

LE SCIENZE

edizione italiana di **SCIENTIFIC
AMERICAN**

www.lescienze.it

dossier

NUMERO 9 - AUTUNNO 2001 - L. 12 000 € 6,2

Il colore

I principi fisici
e la luce

Dalla natura
all'arte

I segreti
della percezione

Fotografia
e illusione



LE SCIENZE

Piazza della Repubblica, 8 - 20121 MILANO
Telefono: 02 29001753 r.a. Fax: 02 6552908
www.lescienze.it
E-mail: redazione@lescienze.it

Direttore

Enrico Bellone

Redazione

Marco Cattaneo (*vice direttore*), Adriana Giannini (*caporedattore*), Elena Bernacchi, Gianbruno Guerriero, Giovanna Salvini (*grafica*), Massimo Scaglione

Segreteria di redazione

Luisa Degli Esposti (*responsabile*),
Giovanna Corona

Progetto grafico della copertina, Gianni Mascolo

Responsabile dei servizi pubblicitari

Mimma Pisano

Pubblicità:

A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa, 21 - 20139 MILANO
Telefono: (02) 574941.

Distribuzione per l'Italia

SO.DI.P. Società di Diffusione Periodici
«Angelo Patuzzi» S.p.A., via Bettola 18,
20092 Cinisello Balsamo (MI).

Fotolito

Fotolito Sebi s.r.l., via per Cinisello 9,
Nova Milanese (MI).

Stampa

Seregni S.p.A., via Puecher 2, Paderno Dugnano (MI).

Consiglio di amministrazione

Carlo Caracciolo, Marco Benedetto,
Fabio Tacciarina, Francisco Gracia Guillen,
Rolf Grisebach, James Charles McCullagh

Direttore generale: Giovanni Ceschi

«Le Scienze dossier» pubblicazione periodica
edita da Le Scienze S.p.A. Registrazione del Tribunale
di Milano n. 25 del 14.1.1999, ISSN 1128-0743.
Direttore responsabile: Carlo Caracciolo.
Printed in Italy - settembre 2001.

Copyright © 2001 by Le Scienze S.p.A.
Piazza della Repubblica 8, 20121, MILANO
Copyright © 2000 by Pour La Science.

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte
della rivista può essere riprodotta, rielaborata
o diffusa senza autorizzazione scritta dell'editore.
Si collabora solo su invito
e non si accettano articoli non richiesti.

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief, John Rennie

Board of Editors: Michelle Press (*Managing Editor*),
Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol
Ezzell, Marc Fischetti, W. Wayt Gibbs, Marguerite
Holloway, Kristin Leutwyler, Steve Mirsky,
Madhusree Mukerjee, George Musser, Ricki L. Rusing,
Sarah Simpson, Gary Sux, Paul Wallich, Philip
M. Yam.

President and Chief Executive Officer,

Gretchen G. Teichgraber;

Art Director, Edward Bell;

Associate Publisher/Production, Bill Sherman;

Chairman, Rolf Grisebach.

Hanno collaborato a questo dossier
per le traduzioni: Elena Bernacchi, Folco Claudi,
Massimo Scaglione;
per la revisione bozze: Carlo M. Marcandalli.

Ufficio vendite

Piazza della Repubblica, 8 - 20121 Milano
telefono 02 29001753 r.a. Fax 02 6552908

copia arretrata

L. 16 000

FIEG Federazione
Italiana
Editori
Giornali

I colori e il cervello

Nel corso dell'evoluzione ci è toccato di avere un corredo di cellule grazie alle quali ciascuno di noi riesce ad accedere al mondo esterno. L'accesso è piuttosto limitato, e le limitazioni sono causate dalla struttura biologica degli organi di senso e del sistema nervoso centrale. Quale affidabilità possiamo concedere alle strutture di accesso? Vecchio problema, poiché, come sappiamo, i sensi possono anche trarci in inganno. Nel Seicento Galilei e Locke suggerirono di liberare la conoscenza dalle trappole dei sensi. Sostennero che solo certe qualità, cosiddette primarie, (come la forma delle cose, il numero delle loro parti o il loro stato di moto nello spazio) fossero intrinseche agli oggetti del mondo. Altre qualità erano invece da intendere come secondarie: il colore, per esempio, non stava nelle cose percepite, ma negli apparati sensoriali degli osservatori. Se togliamo gli occhi, la rosa non è più rossa. Moltissimi problemi di questo tipo sono stati affrontati e via via risolti nei secoli successivi. Oggi sappiamo, per esempio, che il cervello svolge un'azione categorizzatrice sia per il colore, sia per la forma, sia per il moto. E nello stesso tempo abbiamo anche imparato, grazie alle neuroscienze, che proprio nel caso della visione è lecito dire che è quasi insensibile, ormai, il tratto che separa le cellule da ciò che continuiamo a chiamare «la mente».

Questa raccolta di saggi scientifici analizza la situazione del colore sotto varie linee di studio, raggruppando queste ultime in tre insiemi tematici: la fisica, la produzione e la percezione.

Ci sono, infatti, leggi di base che consentono lo studio del colore in riferimento alle proprietà delle onde elettromagnetiche, e metodi (antichi e moderni) per la preparazione di pigmenti. Ma, soprattutto, c'è il cervello. Esiste una codificazione genetica per l'architettura delle retine, un'insieme di processi in parallelo grazie ai quali riusciamo a interpretare gli stimoli luminosi che irritano i nostri fotopigmenti e a tradurli in segnali che migrano nel cervello, e zone dove il cervello assegna significati ai segnali. Darwin non nascondeva la propria meraviglia nel constatare la complessità strutturale che l'evoluzione aveva assegnato all'occhio. Provverebbe oggi, se potesse studiare ciò che sappiamo sul colore, una meraviglia ancora maggiore. Si accorgerebbe infatti d'aver avuto ragione, ma per motivi impensabili nella seconda metà del suo secolo.

ENRICO BELLONE

LA FISICA DEL COLORE

4

Il colore e la luce

Georges Roque

Talvolta confusi, talvolta considerati in opposizione, il colore e la luce vengono sempre studiati congiuntamente

8

Gli atlanti dei colori

Esiste un metodo razionale per presentare i colori? La realizzazione di atlanti costringe a interrogarsi sulla natura stessa del colore

10

I colori del cielo

Jearl Walker

La diffusione della luce solare è ciò che dona al cielo colori magnifici

14

I colori vividi di una bolla di sapone

Jearl Walker

Gli effetti iridescenti di una pellicola di acqua saponata esemplificano in modo divertente le interferenze delle onde luminose

20

L'iridescenza delle ali di farfalla

Serge Berthier e Carole Chevalley

Lo studio delle strutture microscopiche delle ali delle farfalle ha rivelato il segreto dei loro effetti di iridescenza

28

Il colore nelle gemme

Emmanuel Fritsch e George Rossman

Come per la Venere di Milo e la Vittoria di Samotracia, la bellezza delle gemme è dovuta più ai loro difetti che alla loro perfezione



PRODURRE IL COLORE

34

Una tavolozza per il Paleolitico

Colette Vignaud, Marie-Pierre Pomiès e Michel Menu

Raffinate tecniche di preparazione dei materiali permettevano la decorazione delle grotte

35

Il blu e il verde degli Egizi

Sandrine Pagès-Camagna e Sylvie Colinart

I più antichi pigmenti di sintesi rivelano i loro segreti

36

Dai pigmenti alla pittura

François Perego

La preparazione e la valorizzazione dei colori richiedono qualche conoscenza specifica e... un po' di pazienza

42

L'introduzione dei coloranti sintetici

Georges Bram e Nguyễn Trong Anh

L'innovazione tecnologica nel passato non era meno rapida di oggi, e alcune società «nuove arrivate» nel settore chimico ebbero grande successo inaugurando la rivoluzione dei coloranti sintetici, che in pochi anni soppiantarono quelli naturali



Copertina:
David Parker
Science Photo Library
Grazia Neri



48 Le prime fotografie a colori

Grant B. Romer e Jeannette Delamoir

I metodi usati inizialmente per la riproduzione dei colori erano ingegnosi, anche se complicati e poco efficienti

56 Luci del cosmo

di Aldo Conti

Osservando il cielo notturno, gli astronomi possono ricavare un gran numero di informazioni dallo studio dei colori rilevati



62 I geni per la visione dei colori

Jeremy Nathans

L'isolamento dei geni che codificano per le proteine fotosensibili dell'occhio umano fornisce nuove indicazioni sul processo evolutivo della percezione normale dei colori e sulle basi genetiche del daltonismo

71 La visione dei colori secondo Edwin Land

Semir Zeki

La sensazione del colore non è assoluta: è il risultato di un confronto simultaneo delle quantità di rosso, di blu e di verde tra tutti gli oggetti

72 I pittori e i difetti della vista

Philippe Lanthony

Un'opera pittorica riflette a volte anomalie visive dell'autore; ma non sempre dall'opera

si può risalire alla diagnosi: ispirazione e ingegno possono prevalere nell'esito finale

78 Le illusioni cromatiche

Philippe Brou, Thomas Sciascia,
Lynette Linden e Jerome Lettvin

Illusioni ottiche create sullo schermo di un computer mostrano che non è sufficiente, per percepire i colori, che l'occhio capti la luce proveniente dalle differenti superfici che compongono il paesaggio

86 L'elaborazione dell'immagine visiva

Semir Zeki

Analizzando i diversi attributi delle immagini, il cervello è in grado di costruire un proprio mondo visivo; particolari tipi di cecità spiegano il ruolo svolto da alcune regioni specializzate della corteccia

Il colore e la luce

di Georges Roque

Talvolta confusi, talvolta considerati in opposizione, il colore e la luce vengono sempre studiati congiuntamente

Colore e luce: i due fenomeni sono talmente legati che si tende a dimenticare quanto siano distinti e quanto le loro relazioni siano cambiate nel corso della storia. Sarà pertanto utile ricostruire, attraverso alcune tappe storiche, l'evoluzione della dipendenza del colore dalla luce. La fisica ci servirà da filo conduttore. In effetti, quando si cercano informazioni concernenti la storia del colore, le si trova in genere negli studi sulla storia della luce. È del tutto comprensibile, dirà qualcuno, dato che la luce è ciò che rende il colore possibile. Questa argomentazione ha una conseguenza importante: se i colori apparissero nello splendore del giorno e si spegnessero con il venir meno della luce diurna (di notte tutti i gatti sono grigi, come si suol dire), si sarebbe tentati di pensare che i colori stessi si estendano dal bianco al nero lungo la scala di luminosità. Ed è proprio così che i sapienti dell'antichità concepivano il colore. Considerando la luce come un'alternanza tra chiarezza e oscurità, essi posero le basi di una subordinazione del colore alla luce che sarebbe durata per parecchi secoli. Prima di entrare nel dettaglio, occorre precisare che l'interesse scientifico per la luce è stato a lungo inseparabile da una riflessione sulla natura della

visione. Bisogna in effetti attendere che i principi generali della natura della visione venissero compresi perché ci si interessasse specificamente alla luce: è il matematico, fisico e filosofo arabo Ibn al-Haytham, detto Al-hazen (965-1039) che, nel *Trattato di ottica*, fornisce una descrizione esatta dell'occhio e analizza il fenomeno delle rifrazioni atmosferiche.

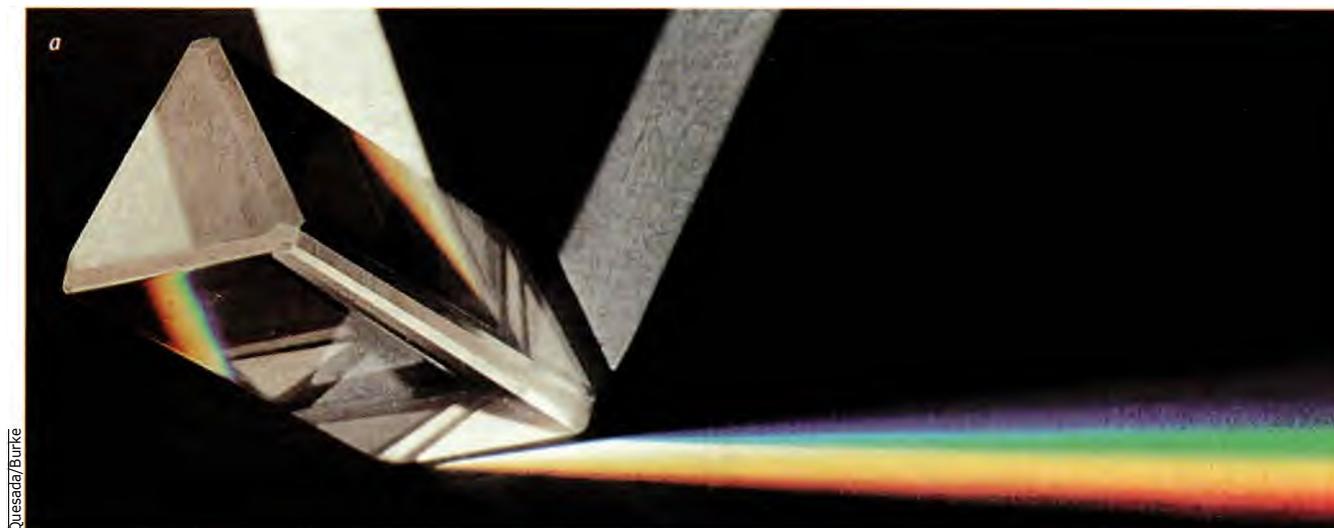
La confusione tra colore e chiarezza

Nell'antichità, la teoria aristotelica, che farà testo almeno fino al Rinascimento, subordina il colore alla luce. Aristotele (384-322 a.C.) assimila la chiarezza e l'oscurità dell'aria alla bianchezza e alla nerezza dei corpi (*De Sensu*, 439b 15); inoltre, riprendendo un'idea antica che si ritrova già in Empedocle (490-435 a.C.), considera il bianco e il nero come colori. Tuttavia il ruolo di questi due colori è particolare: non solo essi appaiono come i termini estremi di

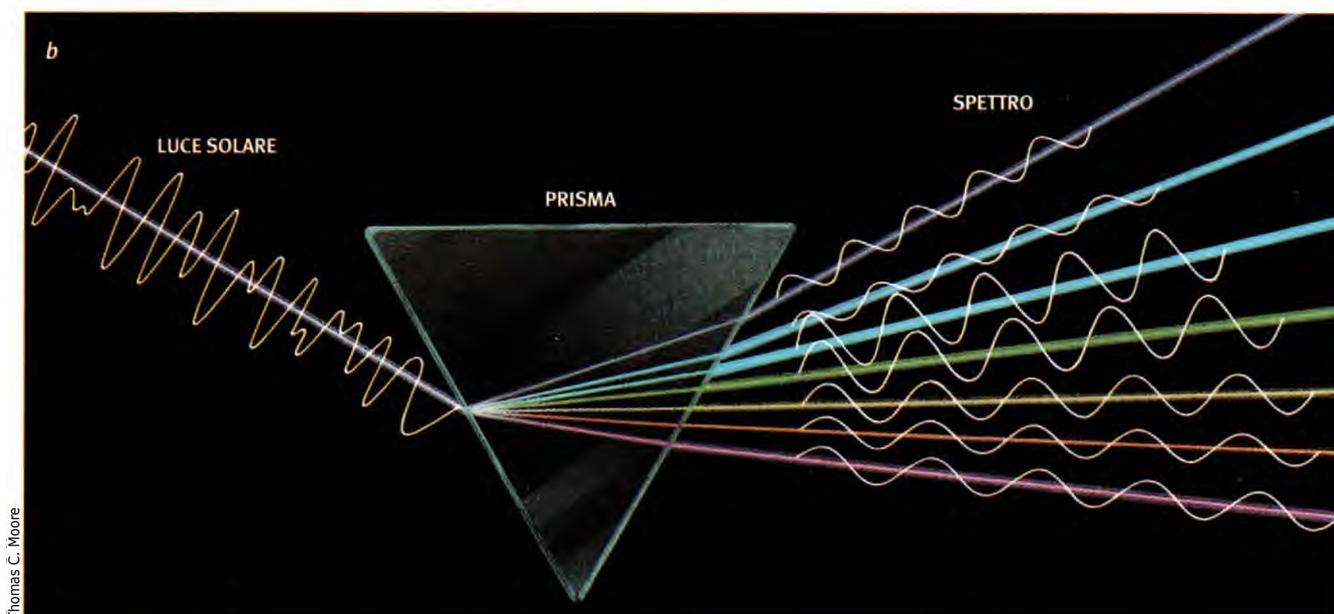
tutta la serie dei colori, ma anche e soprattutto da essi scaturiscono tutti gli altri colori, che risultano da una mescolanza di bianco e di nero in diverse proporzioni. Aristotele fa il paragone con l'armonia in musica per affermare che certe proporzioni semplici di bianco e di nero producono colori più belli.

Questa concezione, che ha prevalso a lungo, ha comportato conseguenze durevoli. La principale è che i colori vengono classificati seguendo un asse di chiarezza che va dal bianco al nero, e il giallo è considerato come il colore più luminoso (essendo il più vicino al bianco). In altre parole, i colori sono stati pensati e classificati in funzione di un criterio acromatico, quello della chiarezza. Per essere più precisi, mentre ai nostri giorni il colore viene analizzato a partire da tre parametri (tinta, brillantezza e saturazione), la tinta è stata per molto tempo pensata non in quanto tale (rosso, verde, giallo eccetera), ma come una funzione della chiarezza, ovvero della brillantezza.

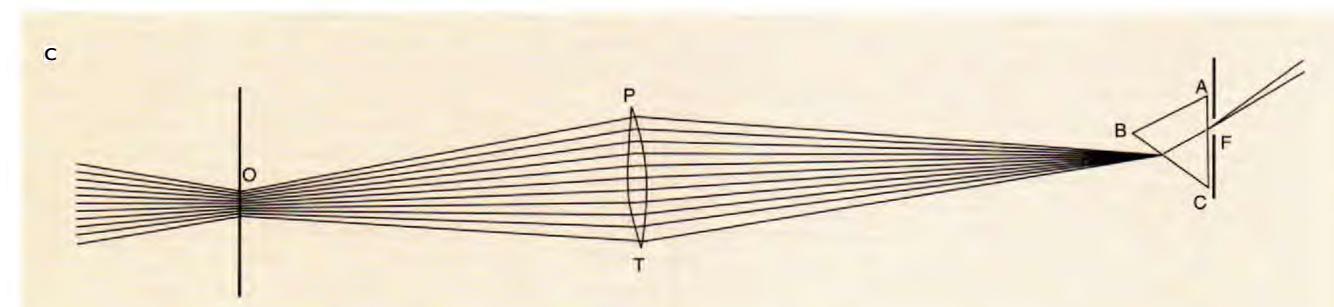
Gli effetti di questo modello sono numerosi e continuano talvolta a determinare, implicitamente,



Quesada/Burke



Thomas C. Moore

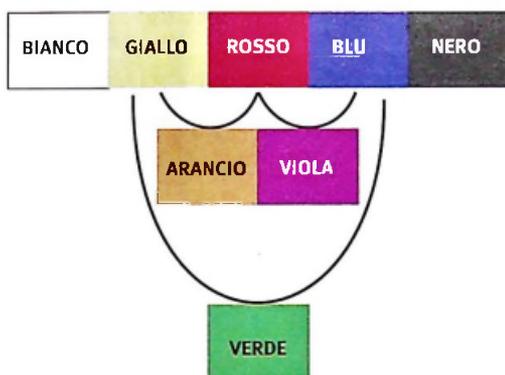


Nel suo celebre esperimento del 1672, Newton separò un fascio di luce bianca in uno spettro di luce colorata (a). Si sa oggi che la luce bianca è composta da onde elettromagnetiche di diverse lunghezze d'onda; nel prisma, ogni componente viene deviata di un angolo diverso, il quale dipende dalla lunghezza d'onda (b). In un altro esperimento, Newton dimostrò che i diversi raggi colorati, rifratti dal prisma, possono per il tramite di una lente (o di due altri prismi) ricostituire la luce bianca di partenza. Ciò

confirma la natura eterogenea della luce. Nel disegno eseguito di suo pugno per illustrare il principio (c), un fascio luminoso entra nella camera oscura attraverso un foro F, poi viene rifratto dal prisma ABC. I raggi colorati che attraversano l'obiettivo PT vengono fatti riconvergere su O, dove formano un campo di luce bianca. «La luce così prodotta - spiega Newton - era completamente e perfettamente bianca, per nulla diversa ai sensi da quella proveniente direttamente dal Sole.»



Fino al XVII secolo, i colori venivano classificati secondo il loro grado di chiarezza, in una scala decrescente che andava dal bianco al nero, e ciò a dispetto dell'interesse suscitato dalla mescolanza dei tre colori «primari». Questo schema è riportato dal trattato di ottica di François d'Aguilon, gesuita stabilitosi ad Anversa. Questo trattato fu illustrato dal celebre pittore fiammingo Rubens, e fece testo nel XVII secolo (*Opticorum libri sex*, 1613).



il modo in cui pensiamo ai colori. Diamo qualche esempio. Il termine «tono», improntato al vocabolario musicale, se è passato a qualificare la chiarezza (nell'accezione del vocabolario scientifico del XIX secolo), designa comunque anche la tinta stessa, dal che deriva un motivo di confusione tenace e sintomatico dei rapporti confusi tra tinta e brillantezza. Il concetto di «valore», caro ai pittori, riflette la medesima subordinazione, dato che il colore viene pensato in termini di chiarezza, vale a dire di «quantità di chiaro e di scuro contenuta in un tono» (dal *Dictionnaire d'art et d'archéologie* di Réau). Questo concetto di valore è al cuore dell'insegnamento artistico delle Accademie che, in epoca classica, hanno imposto l'uso delle sfumature di valore nella resa del colore.

Al di là del vocabolario - e della pratica - della storia dell'arte, sorprende constatare che questo paradigma regola anche le denominazioni dei colori stessi. Lo studio dell'evoluzione semantica dei termini riferiti ai colori (nelle lingue indoeuropee) mostra infatti che questi termini hanno inizialmente significato rapporti di chiarezza prima di evocare tinte vere e proprie. In inglese, per esempio, i termini primitivi che descrivevano solo la chiarezza hanno finito per scomparire (come *hador*, che significava «chiaro», «luminoso»). Nel contempo, i principali termini di colore (con l'eccezione del rosso, *red*, che ha sempre avuto il senso di tinta) hanno perso a poco a poco il loro senso di chiarezza, mentre quello di tinta - dapprima accessorio - si è rinforzato divenendo predominante: *yellow*, per esempio, proviene da una radice indoeuropea che significa «brillare»; evolvendo, il suo senso di tinta ha finito per soppiantare quello di luminosità (del Sole) o di brillantezza (dell'oro).

Questo esempio illustra l'interazione affascinante dei differenti campi concernenti il colore, tanto più che le lingue e i concetti di colore si sono evoluti di pari passo. Nella sua opera storica dell'evoluzione del senso del colore, Hugo Magnus constata che i termini di colore utilizzati dai greci antichi rinviavano alla chiarezza ben più che alla tinta: per esempio Omero qualifica come «verde» non le foglie degli alberi o l'erba dei prati, bensì il miele o il tuorlo d'uovo, il che significa che l'aggettivo non corrispondeva alla tinta che intendiamo noi, ma a ciò che chiameremmo «giallo pallido». Anziché trarre la conclusione che il modo di pensare i colori sia cambiato, Magnus ha preferito ritenere che, in un quadro evolutivistico, i greci fossero dotati di un sistema visivo primitivo, attratto anzitutto dalla luminosità.

Questo predominio della chiarezza sulla tinta nei

termini di colore perdura nel Medioevo. Si impiegano così termini come «scarlatto», «cremisi» o «purpureo», per i quali è oggi ben difficile stabilire se la sfumatura indicata fosse rossa o violacea. Lo schema generale fissato da Aristotele e dalla sua scuola non subisce modificazioni profonde, ma si complica per le connotazioni teologiche prese dalla luce. Questa possiede infatti una doppia natura: quella di lux, l'essenza luminosa propriamente detta, o fonte dell'illuminazione (identificata con Dio), e quella di lumen: l'aspetto più materiale, ossia l'agente che rende possibile la percezione luminosa o colorata. Secondo questa concezione le relazioni tra luce e colore erano assai complesse, ma se ne può trarre l'idea che il colore, considerato una proprietà residente alla superficie delle cose, fosse qualcosa di attinente al lumen.

Questa «metafisica» della luce è stata messa in relazione con le vetrate gotiche, dato che in esse il colore viene «rivelato» dalla luce. Chi non ha mai visto emergere un tripudio di colori da una vetrata improvvisamente attraversata da un raggio di sole? E chi non ha visto quei colori spegnersi al semplice passaggio di una nube? Anche se, per i filosofi dell'epoca, non è la luce intesa come lux a generare i colori, è importante notare il ruolo capitale svolto dalla luminosità per la messa in evidenza del colore.

La rifrazione attraverso un prisma

Si dovette attendere Isaac Newton (1642-1727) per avere un cambiamento profondo e durevole nelle relazioni tra luce e colore. Certo, esperimenti con prismi erano stati fatti anche prima di lui (in particolare da Cartesio intorno al 1637 e da Francesco Maria Grimaldi intorno al 1665) e avevano permesso di stabilire che ogni colore possiede un angolo di rifrazione diverso. Tuttavia queste teorie postulavano ancora che la luce fosse bianca e pura, cosicché restava da spiegare come questa luce bianca e pura fosse in grado di modificarsi per dar luogo ai colori (Cartesio, per esempio, pensava che i colori fossero prodotti dalla superficie di rifrazione).

L'intuizione geniale di Newton consistette nel considerare la luce non omogenea, come si era ammesso fino a quel momento, bensì eterogenea, vale a dire composta da «raggi» (termine suo) colorati dotati di angoli di rifrazione differenti. Questa concezione e la sua dimostrazione sperimentale comportano una profonda modifica dei concetti di chiarezza e tinta: i colori possono ormai essere quantificati, in quanto si caratterizzano per il loro grado di «rifrangibilità». Li si può quindi classificare secondo questo criterio, che concerne direttamente le tinte, senza più subordinarli alla luminosità, poiché gli angoli di rifrazione non hanno nulla a che vedere con la luminosità: per esempio il giallo e il verde, che hanno angoli di rifrazione molto vicini, sono assai diversi dal punto di vista della luminosità.

Questa nuova concezione ha avuto un impatto considerevole sulle mescolanze di colore: a partire dal momento in cui la bianchezza (della luce) deve essere considerata come il risultato della mescolanza di molti colori, ci si interessa più da vicino alle regole di questa mescolanza.

Dal punto di vista dei rapporti tra colore e luce, si potrebbe pensare che da Newton in poi la differenza

tra i due venga in qualche modo abolita, dato che la luce contiene in sé tutti i colori. In realtà, l'entusiasmo per la scoperta newtoniana genera una vera e propria infatuazione per la luce solare, in quanto sorgente di tutti i colori. Questa infatuazione, in pittura, culminerà con l'impressionismo e il neo-impressionismo. Come scrive il poeta Jules Laforgue, laddove «l'Accademia non vede che luce bianca, allo stato espanso, l'impressionista la vede come se impregnasse tutto, non di morto biancore, ma di mille vibranti combattimenti, di ricche scomposizioni prismatiche». Le teorie newtoniane, ampiamente divulgate, comportano quindi uno spostamento di accento verso i colori «prismatici» contenuti nella luce.

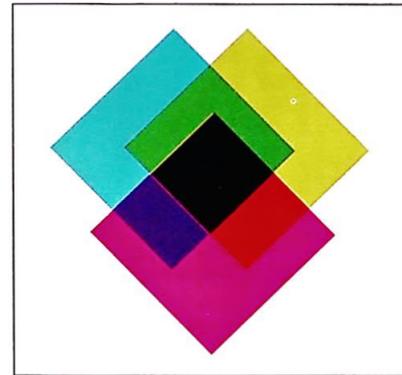
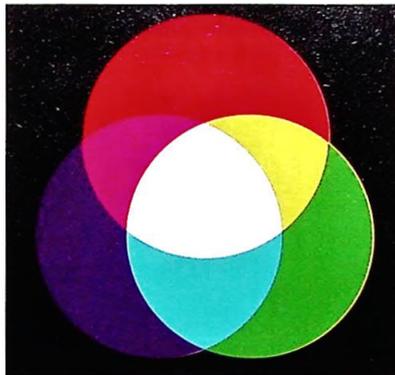
Questa infatuazione per la luce come fonte dei colori non fu priva di conseguenze spiacevoli, una delle quali consiste nel fatto che le regole di mescolanza dei fasci luminosi valevano anche per le mescolanze di pigmenti, il che ha generato molte confusioni. Si dovette attendere il lavoro di Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz, alla metà del XIX secolo, perché fossero distinte chiaramente le regole della mescolanza di fasci luminosi (sintesi additiva) e le regole della mescolanza dei pigmenti (sintesi sottrattiva).

Dalla fisica allo «spirituale»

La rivoluzione operata da Newton nei rapporti tra luce e colore non fu immediatamente accettata dai contemporanei. Tra i più accaniti antinewtoniani vi furono i tintori, il che non deve sorprendere: rendendo il colore più affine alla luce, la fisica newtoniana del colore gettava in un certo senso discredito sulle mescolanze di pigmenti, che interessavano da vicino l'industria delle tinture e del tessile. Tuttavia il più convinto degli antinewtoniani rimane Johann Wolfgang von Goethe, il quale consacrò molti sforzi ed energie per combattere la teoria del grande scienziato inglese. Per molto tempo screditato come non scientifico (come già era l'opinione di Helmholtz), il suo *Trattato dei colori* (1810) divenne oggetto qualche anno più tardi di un rinnovato interesse da parte dei filosofi e sociologi della scienza.

Goethe opera rispetto a Newton un doppio spostamento di relazioni tra colore e luce. Da un lato sdoppia il concetto di luce, considerato dai fisici come pura positività, in due poli - luce e oscurità - entrambi, a suo modo di vedere, responsabili del colore. Rinnovando in qualche modo il paradigma aristotelico, egli associa un colore fondamentale a ogni polo (giallo alla luminosità e blu all'oscurità) e pensa le mescolanze di colore (nonché i loro valori spirituali) a partire da questi due colori di base. D'altra parte, ipotizza che certi colori (che egli qualifica come fisiologici, in opposizione ai colori fisici) siano generati in assenza di luce. Egli si dedica anche a osservazioni sui colori percepiti, chiudendo gli occhi dopo avere fissato per un certo tempo un dato colore. Riprende inoltre gli esperimenti di Newton basati sulla camera oscura (una stanza buia dove la luce penetra attraverso una stretta apertura su una parete): dopo avere fissato un colore, chiude l'apertura al fine di osservare i fenomeni fisiologici generati nell'occhio: quelle che oggi si chiamano postimmagini.

Goethe dà così almeno due contributi. Da una parte insiste giustamente sul fatto che certi fenome-



Mescolanza additiva e sottrattiva dei colori. Quando si proiettano su uno schermo tre fasci di luce colorata (arancione, verde e viola), le loro mescolanze a due a due sono di colore giallo, ciano e magenta; dove i tre fasci si sovrappongono, si ha il bianco (a sinistra). Questo tipo di mescolanza di luce-colore è detto additivo, poiché ogni fascio aggiunge le sue caratteristiche, di modo che l'insieme dei tre colori riproduce la luce bianca. Quando si sovrappongono tre filtri trasparenti colorati ai tre «primari» degli artisti e dei tipografi (giallo, magenta e ciano), il ricoprimiento di due di essi produce uno dei tre colori «secondari» (verde, arancione e viola), e la sovrapposizione di tutti e tre produce, in teoria, il nero (in pratica un grigio molto scuro, a destra). Questa mescolanza di colore-materia (pigmenti o filtri colorati) si chiama sottrattiva, poiché ogni colore agisce da filtro che sottrae alla luce parte delle sue componenti: quando i tre colori vengono sovrapposti, tutta la luce è sottratta, e non resta che la percezione del nero.

ni cromatici possono essere prodotti senza sorgente luminosa diretta, e mette in rilievo molti degli effetti di contrasto ai quali il chimico francese Eugène Chevreul darà risonanza (ignorando i lavori di Goethe) una trentina di anni più tardi. D'altra parte, legando i colori alla luminosità e all'oscurità, conferisce loro un contenuto spirituale che era assente dalla fisica newtoniana; questa concezione sedurrà numerosi artisti in epoca romantica e fino al XX secolo (si pensi a Wassily Kandinsky).

Per di più, attribuendo alla luminosità e all'oscurità valori spirituali legati ai colori, Goethe favorisce lo sviluppo di un simbolismo che associa l'intensità dei colori al brusco passaggio dal buio alla luce. Così Henri Matisse, uno dei più grandi coloristi del XX secolo, era affascinato da questa leggenda: «Il grande pittore britannico Joseph Turner viveva in una sorta di cantina. Ogni otto giorni, faceva aprire bruscamente le imposte e, allora, quali incandescenze! Quali abbagliamenti! Quali gioielli!».

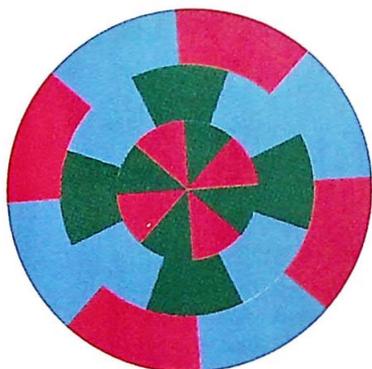
L'AUTORE

GEORGES ROQUE è ricercatore del CNRS e lavora in particolare sulla teoria del colore.

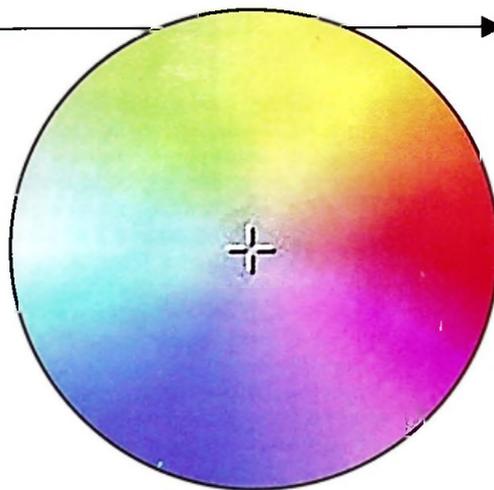
PER SAPERNE DI PIÙ

- LINDBERG D.C., *Theories of Vision from Al-Kindi to Kepler*, University of Chicago Press, Chicago, 1976.
 SEPPER D.L., *Goethe contra Newton. Polemics and the Project for a New Science of Color*, Cambridge University Press, 1988.
 MACLAURY R.E., *From Brightness to Hue: An Explanatory Model of Color-Category Evolution*, in «Current Anthropology», 33, n. 2, 1992.
 CASSON R.W., *Color Shift: Evolution of English Color Terms from Brightness to Hue*, in *Color Categories in Thought and Language*, a cura di C.L. Hardin e L. Maffi, Cambridge University Press, 1997.
 ROQUE G., *Art et science de la couleur. Chevreul et les peintres, de Delacroix à l'abstraction*, Éditions Jacqueline Chambon, Nîmes, 1997.

Gli atlanti dei colori



Esiste un metodo razionale per presentare i colori? La realizzazione di atlanti costringe a interrogarsi sulla natura stessa del colore



In moltissime situazioni, professionali e non, ci si trova a dover scegliere il colore di un oggetto o di una sostanza: vernici per decorazioni o per uso artistico, inchiostri da stampa, tessuti o pezzi di mobilio, prodotti di bellezza, carrozzerie di automobili... La lista è pressoché infinita. Il colore è anche un criterio di qualità: maturazione della frutta, freschezza delle carni eccetera. Ma non si può scegliere né giudicare un colore se non si ha un termine di confronto. Ed è questa la funzione dei campionari o dei cataloghi di colore. E, pure, questo è il motivo per cui gli artisti o i professionisti del colore hanno cercato di classificare e presentare i colori in una maniera razionale, all'interno dei cosiddetti «atlanti dei colori».

Il disco di Maxwell non comprende che tre colori: il rosso, il verde e il blu. Quando lo si fa ruotare, compaiono tre nuovi colori: viola, blu-verde e giallo aranciato.

Esiste un gran numero di atlanti di colore molto specifici, come il campionario Pantone degli inchiostri da stampa, le carte di colore delle mele Golden o i cataloghi di coloranti per tessuti. D'altronde, è proprio attraverso l'interesse per gli usi specifici del colore che i teorici hanno tentato un approccio razionale alla classificazione dei colori stessi. Per esempio, il chimico francese Eugène Chevreul ha proposto una teoria dei colori e un cerchio cromatico mentre era direttore delle tinture alle industrie tessili Gobelins. I circa 35 000 campioni di tessuto Gobelins sono classificati in base ai principi di questo modello. Grazie al tentativo di razionalizzazione di Chevreul, gli atlanti hanno fatto grandi progressi.

Le miscele di colore

Certi atlanti sono concepiti a partire da miscele additive di luce. Si sperimenta facilmente il fenomeno di addizione dei colori con l'aiuto di un disco di Maxwell: si divide un disco di cartone in tre zone concentriche e ciascuna di esse in otto quadranti uguali; la prima zona contiene alternatamente rosso e verde; la seconda zona, blu e verde; la terza zona, blu e rosso. Quando si fa ruotare il disco, la luce riflessa dalle differenti zone di colore si mescola, in modo che sulle tre zone concentriche si vedono solo tre colori: al centro, il rosso e il verde si mescolano per dare un giallo aranciato; nella seconda zona il verde e il blu danno una tinta intermedia verde-blu,

denominata cyan; alla periferia il rosso e il blu generano un colore violetto (detto magenta). I sistemi di sintesi additiva detti RVB (rosso-verde-blu) si basano su questo principio: i tubi catodici dei televisori ne sono l'esempio più conosciuto.

Altri atlanti contengono i colori ottenuti per mescolanza di pigmenti. Queste mescolanze sono sottrattive, in quanto sottraggono luce. I colori sono generalmente presentati in diagrammi a due assi: lungo ciascuno di essi la quantità di un colore aumenta. Il chimico tedesco Wilhelm Oswald, che si interessava anche al colore, propose un atlante di questo genere nel 1923.

Per individuare un colore in funzione dei suoi gradi di mescolanza, si può utilizzare un cerchio cromatico (in alto a destra di questa pagina), costruito in base alle proprietà di complementarità dei colori: due tinte simmetriche rispetto al centro sono complementari, e si annullano. Quando le tinte non sono simmetriche rispetto al centro, la tinta prodotta si situa sull'arco di cerchio intermedio. In una sintesi additiva, i colori primari (quelli cioè a partire dai quali è possibile ottenere tutti gli altri) sono il rosso, il verde e il blu. In una sintesi sottrattiva, i colori primari sono il ciano, il magenta e il giallo. Questi sei colori fondamentali compaiono sul cerchio.

Al disco cromatico, le cui coordinate sono difficili da determinare, la Commissione internazionale dell'illuminazione preferisce un diagramma in coordinate cartesiane, di cui si dà una rappresentazione a pagina 16 di questo «Dossier».

Gli atlanti generalisti e di uso pratico

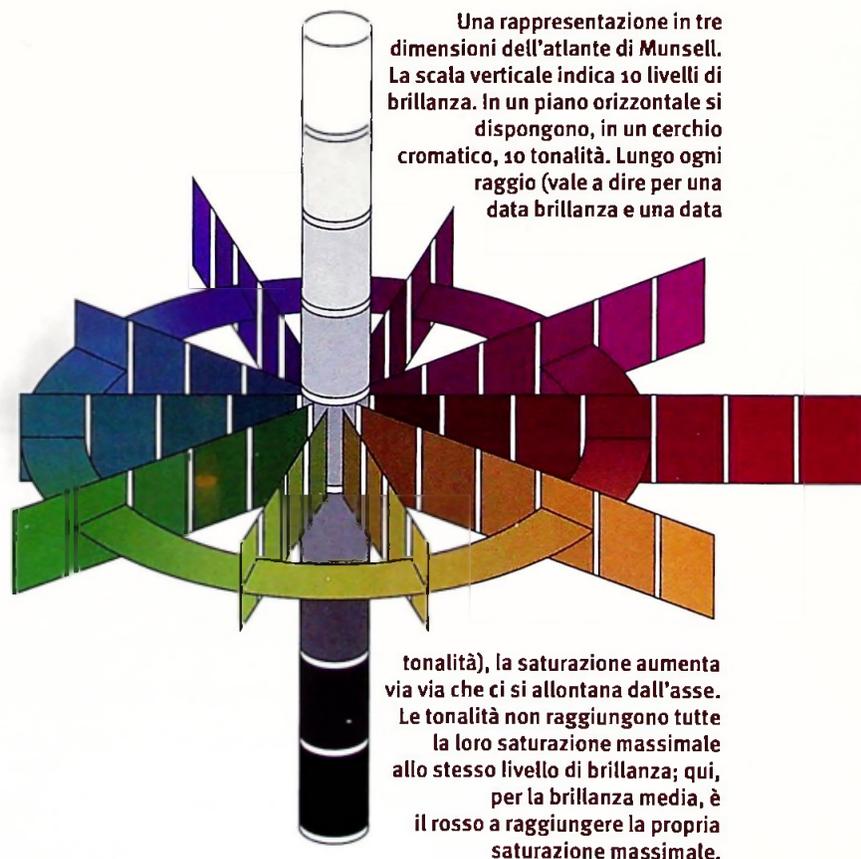
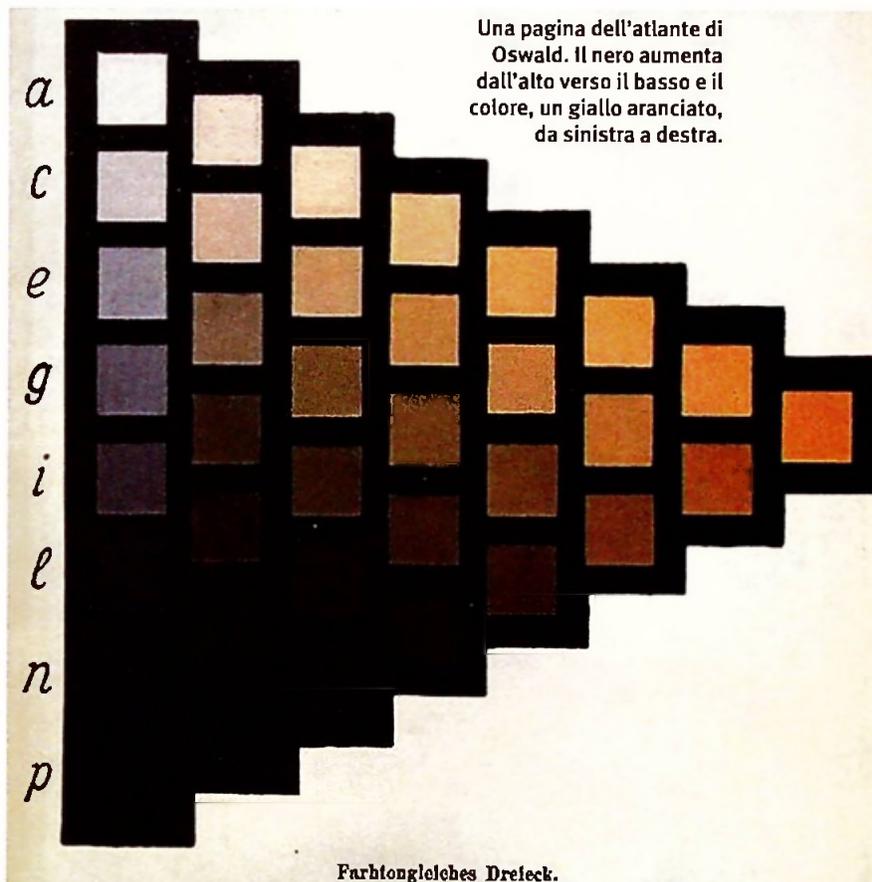
L'atlante più generale e senza dubbio di più semplice uso è quello del pittore e professore americano Albert Munsell. La sua prima edizione per il pubblico risale al 1929. Esso è organizzato secondo tre parametri: la tonalità, la brillantezza e la saturazione. Munsell è stato il primo a definire questi parametri con chiarezza. Ognuno di essi varia secondo una scala decimale. La scala delle tonalità è costituita da cinque tonalità principali (rosso, giallo, verde, blu, violetto) tra le quali si intercalano cinque tonalità intermedie (arancione, giallo-verde, verde-blu, blu-violetto e violetto-rosso). Per ogni tonalità, l'occhio può distinguere e memorizzare 10 livelli di brillantezza che vanno dal nero (brillantezza nulla) al bianco (brillantezza 10). Questa scala si basa sul confronto con 10 campioni di grigio neutro e sulla misura della loro brillantezza per mezzo di un fotometro che funziona alla luce del giorno. A parità di tonalità e di brillantezza, un colore può variare in «forza», che Munsell chiama *chroma* e che noi traduciamo con «saturazione». La scala di saturazione è stata realizzata a partire da campioni passati al vaglio di numerosi osservatori. A parità di tonalità, i massimi di saturazione sono raggiunti a livelli differenti di brillantezza.

La rappresentazione ideale di una tale classificazione avrebbe tre dimensioni, ma sarebbe troppo complicata da realizzare (si veda l'illustrazione in basso in questa pagina). Munsell presenta i colori in tavole, per ognuna delle quali un parametro rimane fisso e gli altri due variano, per gradi equidistanti.

Sulla scia di Munsell, gli atlanti dei colori non hanno mai cessato di perfezionarsi: oggi contengono più informazioni, ma sono anche più complicati. Per esempio, nel 1952 l'atlante DIN, realizzato a partire dal lavoro del tedesco Manfred Richter, propose una classificazione simile a quella di Munsell, ma presentò 24 tonalità anziché 10 e definì una brillantezza negativa, non in rapporto a una scala di grigi bensì in rapporto alla brillantezza ottimale della tonalità considerata. Questa definizione tiene conto del fatto che il giallo, per esempio, raggiunge una brillantezza massimale superiore alla brillantezza massimale del blu.

Negli anni sessanta, gli scandinavi adottarono l'atlante NSC (Natural System of Colors), che oppone i colori complementari: il rosso e il verde, il blu e il giallo, il bianco e il nero. I colori sono classificati in un doppio cono di rivoluzione i cui vertici sono dati dal bianco e dal nero e la cui base è un cerchio cromatico: i colori fondamentali (giallo, rosso, blu e verde) determinano quattro quadranti, ognuno suddiviso in 10 intervalli regolari. Per un decennio il sistema ha fatto assai fatica a imporsi altrove che in Scandinavia, poiché si pensava che tre parametri fossero sufficienti a descrivere la visione dei colori, ma dopo il 1970 alcuni studi sulla percezione dei colori hanno confermato che il cervello analizza i segnali provenienti dall'occhio contrapponendo le tonalità e i contrasti, il che valorizza la classificazione NSC, attualmente il più utilizzato.

Tratto da *L'encyclopédie de la peinture*, Erec éditeur, Puteaux, 1999.



I colori del cielo

La diffusione della luce solare è ciò che dona al cielo colori magnifici

di Jearl Walker



Malgrado un secolo di osservazioni e di studi teorici, i colori del cielo non hanno ancora rivelato tutti i loro misteri. Perché il cielo nelle belle giornate è blu quasi ovunque tranne che all'orizzonte, dove è bianco? Perché il Sole al tramonto è generalmente rosso mentre intorno a esso il colore degrada? Perché al crepuscolo si alza a oriente un'ombra incurvata, bordata di rosa? Perché a volte appare a ovest una fugace macchia violetta, proprio dopo il tramonto del Sole? Perché si vede talvolta una seconda macchia violetta, circa due ore dopo la prima? Tutte queste domande si riassumono nella seguente: come interagisce la luce con le molecole dei gas che compongono l'atmosfera e con le differenti particelle in sospensione? Gli enigmi sono ancora molti...

La tavolozza di colori del cielo al tramonto.

Le teorie storiche sul colore del cielo abbondano. Si è supposto che la luce sia diffusa da particelle in sospensione come polvere, aerosol, cristalli di ghiaccio o gocce d'acqua, oppure che i colori del cielo risultino dall'assorbimento della radiazione rossa da parte del vapore e dell'ozono atmosferico.

Nel 1985 Craig Bohren e Alistair Fraser, dell'Università della Pennsylvania, confutando queste ipotesi, hanno dimostrato che la teoria proposta da Rayleigh nel 1899 è esatta. Per molto tempo però lo stesso Rayleigh non si fidò della propria teoria, soprattutto perché non comprendeva l'origine delle osservazioni effettuate nel 1869 da John Tyndall. Celebre per il suo talento di divulgatore, Tyndall aveva dimostrato che una nebbia artificiale assume un colore blu degno dei cieli più belli quando è illuminata da un fascio di luce bianca e la direzione di osservazione differisce da quella del fascio luminoso.

A lungo si era creduto che il colore blu del cielo fosse dovuto alla diffusione della luce a opera di particelle in sospensione nell'atmosfera, e che un gas molto puro, come l'aria privata di ogni impurezza, non diffondesse la luce. Nel 1899, Rayleigh però ipotizzò che responsabili del fenomeno fossero le stesse molecole dell'aria: «Anche in assenza di particelle in sospensione, vedremmo sempre il cielo blu».

Per comprendere la teoria di Rayleigh consideriamo una molecola qualsiasi illuminata da luce bianca, costituita dall'insieme delle radiazioni dello spettro visibile. A ogni colore corrisponde una lunghezza d'onda che aumenta in modo continuo passando dal blu al verde, al giallo, al rosso. La lunghezza d'onda della radiazione rossa è circa 1,68 volte maggiore di quella della radiazione blu.

Quando la luce solare colpisce una molecola, le differenti radiazioni costitutive sono diffuse in tutte le direzioni con intensità differenti. La luce è diffusa soprattutto nella stessa direzione di incidenza, sia in senso uguale (come se la luce attraversasse la molecola) sia in senso opposto, verso la sorgente luminosa. La luce diffusa perpendicolarmente al raggio incidente, invece, è due volte meno intensa.

Questa descrizione si applica a tutte le radiazioni, ma le intensità diffuse, per una direzione d'osservazione data, variano con la lunghezza d'onda. Rayleigh scoprì che l'intensità della luce diffusa in una particolare direzione è inversamente proporzionale alla quarta potenza della lunghezza d'onda. Di conseguenza, le radiazioni di breve lunghezza d'onda, come il blu, sono più diffuse di quelle a grande lunghezza d'onda, come il rosso. Poiché il rapporto delle lunghezze d'onda è pari a 1,68, l'intensità della luce blu diffusa da una molecola è 1,68⁴, cioè circa otto volte maggiore di quella della luce rossa.

Supponiamo ora di osservare la luce diffusa a 90 gradi rispetto alla direzione incidente. Se potessimo percepire la luce diffusa da una sola molecola, vedremmo un bagliore azzurrognolo, poiché la parte blu dello spettro è diffusa più delle altre componenti. Naturalmente, l'effetto si vede meglio se le molecole che diffondono la luce sono molte; quando si osserva il cielo in una regione lontana dal Sole, tutte le molecole situate nella direzione d'osservazione diffondono una luce blu in tale direzione (il blu non è puro perché esiste anche il contributo delle altre lunghezze d'onda).

Il rosso del crepuscolo

Poiché è soprattutto la radiazione blu a essere diffusa, la luce riemessa nella direzione incidente è «spostata» verso il rosso. Questo fenomeno non è percepibile quando si guarda verso il Sole a mezzogiorno, poiché la luce solare non ha attraversato l'atmosfera per una distanza abbastanza lunga; ma quando il Sole è basso sull'orizzonte lo strato di aria attraversata è più spesso: la luce è arricchita di radiazione di grande lunghezza d'onda e il Sole appare rosso. Questa spiegazione sembra contraddittoria poiché la luce blu è diffusa sempre in misura maggiore rispetto alla luce rossa, quale che sia la direzione d'osservazione, in particolare lungo quella incidente. Da ciò si potrebbe dedurre che la luce non deviate debba essere ancora blu, e non rossa.

L'obiezione però non regge. Supponiamo che il fascio iniziale sia composto da 1000 fotoni rossi e 1000 fotoni blu. Quando attraversano un gruppo di molecole, i fotoni blu diffusi in ogni direzione sono otto volte più numerosi dei fotoni rossi. Ammettiamo che, tra gli 80 fotoni blu e i 10 fotoni rossi diffusi in ogni direzione dello spazio, otto fotoni blu e uno rosso lo siano nella direzione d'incidenza. Il fascio che si propaga in questa direzione sarebbe composto da 928 fotoni blu e 991 fotoni rossi, cioè comunque più ricco di radiazione rossa.

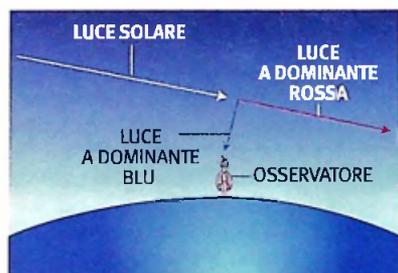
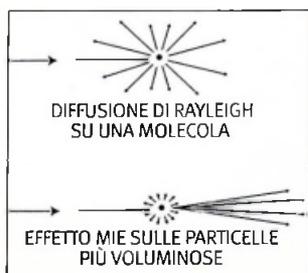
Come fanno le molecole a diffondere la luce in avanti? Le molecole non sono barriere insuperabili: la materia si concentra in un minuscolo nucleo, attorno al quale gravitano gli elettroni, ma il resto è vuoto. La teoria classica di diffusione della luce afferma che il campo elettrico della radiazione incidente fa oscillare gli elettroni delle molecole attraversate: così una parte dell'energia luminosa è comunicata agli elettroni. Quando particelle cariche come gli elettroni oscillano, emettono luce diffusa in ogni direzione, salvo quella di oscillazione. Poiché la direzione di oscillazione è perpendicolare a quella d'incidenza, parte della luce prosegue il suo tragitto in avanti.

Perché non il violetto?

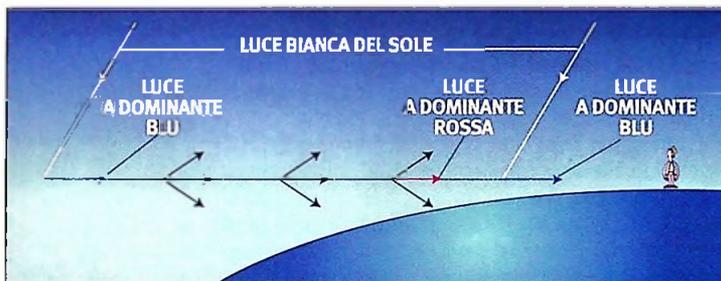
Bohren e Fraser hanno sollevato e poi risolto un'obiezione alla dimostrazione di Rayleigh sul colore blu del cielo basata sul fatto che la radiazione di lunghezza d'onda più corta nello spettro visibile corrisponde al violetto. Perché allora il cielo non è di questo colore invece che blu? Le spiegazioni sono due: in primo luogo la componente violetta della luce solare è meno intensa della componente blu; di conseguenza il violetto diffuso verso l'osservatore è minore. Secondariamente, il nostro occhio è più sensibile al blu che al violetto.

A volte si attribuisce il colore del cielo alla presenza di vapore acqueo nell'atmosfera, forse perché le distese d'acqua sono spesso blu. Infatti, attraversando molti metri d'acqua, la luce bianca perde una parte della sua componente rossa, assorbita dalle molecole del liquido: perciò la luce riflessa da un lago è soprattutto la componente blu. Secondo Bohren e Fraser, l'atmosfera non contiene abbastanza molecole d'acqua perché questo fenomeno sia responsabile del colore blu del cielo.

Si è supposto anche che all'origine del colore del



Due meccanismi di diffusione. La diffusione di Rayleigh rende blu il cielo.



Perché il cielo diurno appare bianco vicino all'orizzonte.



Perché il cielo è più blu allo zenit, proprio dopo il tramonto del Sole.

cielo vi sia lo strato di ozono che circonda la Terra tra 10 e 40 chilometri di quota, con la densità massima a circa 25 chilometri. Il fenomeno sarebbe dovuto al fatto che le molecole di tale gas hanno la loro banda di assorbimento nella parte rossa dello spettro. L'intensità della componente rossa diminuirebbe così quando la luce attraversa lo strato di ozono. In realtà, questo fenomeno ha un ruolo secondario: durante il giorno la luce solare attraversa troppo poco ozono perché questo assorbimento sia percepibile. Al crepuscolo, il tragitto dei raggi attraverso lo strato di ozono è molto più lungo e l'assorbimento più consistente, ma la causa principale del colore del cielo resta il fenomeno descritto da Rayleigh.

L'orizzonte più bianco

Di giorno, col bel tempo, il blu del cielo diviene più chiaro verso l'orizzonte, che risulta così bordato di bianco su un angolo di circa 5 gradi. Anche le molecole dell'aria situate in direzione dell'orizzonte diffondono la luce secondo il meccanismo di Rayleigh. Ma allora perché il cielo non è blu?

Secondo Bohren e Fraser, il fenomeno è dovuto alla maggiore lunghezza del tragitto dei raggi luminosi nell'atmosfera quando si guarda verso l'orizzonte:

la luce è diffusa innumerevoli volte prima di raggiungere l'osservatore. Una parte della luce che ci arriva è diffusa dalle molecole vicine e ci comunica una sensazione di blu. Molecole più lontane diffondono la luce verso di noi, ma questa è in seguito ridiffusa dalle molecole che incontra sul cammino. A ogni nuova diffusione, la parte del fascio diffuso in avanti - verso l'osservatore - s'impoverisce di blu. Dopo molte diffusioni, perciò, questa luce è più rossa. L'insieme delle diffusioni genera l'impressione di luce bianca che si osserva al di sopra dell'orizzonte.

Col bel tempo, la diffusione modifica anche il colore delle montagne: quelle più vicine appaiono blu, poiché la luce diffusa dalle molecole dell'aria situate tra le montagne e l'osservatore è dominata da tale componente. Le montagne molto lontane, invece, appaiono bianche, proprio come l'orizzonte.

Secondo Bohren e Fraser, la luce del Sole al tramonto non sarebbe rossa ma arancione se fosse diffusa solo dalle molecole dell'aria; spesso il Sole è di un rosso fiammeggiante perché la luce è diffusa anche da particelle solide e liquide in sospensione nell'atmosfera. Così, durante il giorno, quando si guarda in una direzione vicina a quella del Sole, si percepisce una parte della luce diffusa in avanti da particelle e goccioline in sospensione; la regione osservata appare più brillante che nel caso di un'atmosfera pura. Il Sole allo zenit (il punto del cielo sulla verticale dell'osservatore) è bordato di bianco; quando è basso sull'orizzonte la luce che colpisce le particelle è già divenuta rossa per diffusione di Rayleigh, e il Sole è perciò bordato di rosso vivo. Più l'atmosfera è carica di particelle in sospensione, più la bordatura è brillante e il contorno del Sole ben visibile.

L'effetto Mie

Le particelle e le goccioline in sospensione nell'atmosfera diffondono la luce secondo il meccanismo di Rayleigh solo quando hanno diametro inferiore a 0,1 micrometri circa. Le particelle più grandi diffondono la luce secondo un meccanismo complesso, l'effetto Mie, descritto all'inizio del XX secolo dal fisico tedesco Gustav Mie. La diffusione della luce a opera delle particelle abbastanza grandi è una forma di diffrazione. La luce è rimessa soprattutto in un cono stretto, diretto in avanti. Il cono corrispondente alla luce rossa è più largo di quello della luce blu, di modo che il fascio diretto verso l'osservatore diviene sempre più blu (nel caso di una semplice diffrazione, le onde luminose che colpiscono le particelle si propagano tutt'intorno a esse, anche nella loro «zona d'ombra»; l'effetto Mie è molto più difficile da interpretare, e non lo tratteremo in dettaglio).

Al calar del Sole, col bel tempo, lo zenit è di un blu più profondo che durante la giornata; è un fenomeno sorprendente, poiché nello stesso momento l'orizzonte è rosso. Sono state proposte varie spiegazioni, ma il responsabile di questo blu spesso superbo è lo strato di ozono. Quando la luce solare attraversa questo strato di sbieco, l'ozono assorbe la parte rossa dello spettro e il fascio luminoso diventa blu, malgrado la diffusione di Rayleigh subita lungo il tragitto. Il fenomeno è ancora più marcato quando la luce attraversa uno strato di particelle sufficientemente grandi e ha luogo l'effetto Mie. La luce diviene

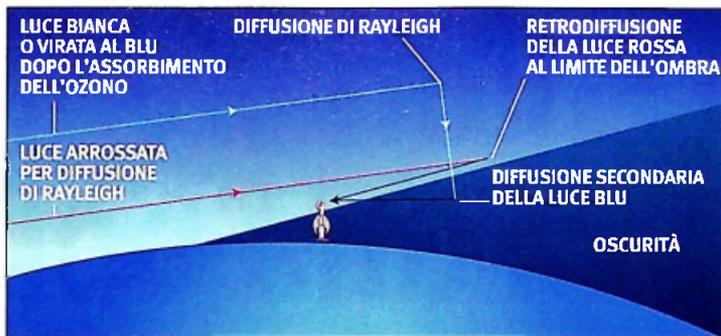
nuta blu grazie a questi meccanismi arriva allo zenit ed è parzialmente rimmessa verso la Terra dalla diffusione di Rayleigh.

Subito dopo il calar del Sole, l'ombra della Terra si eleva a est, spesso bordata di rosso o di malva. Questo colore è dovuto all'arrossamento della radiazione luminosa nel corso del lungo attraversamento degli strati bassi dell'atmosfera. Presso il limite superiore dell'ombra, una parte della luce subisce una diffusione di Rayleigh e ritorna verso la Terra: si percepisce allora un bordo rosso al di sopra dell'ombra.

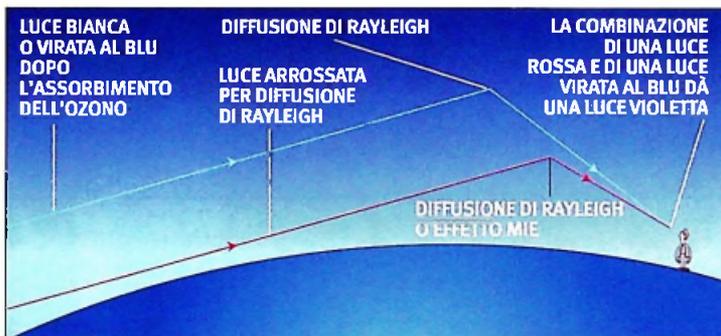
Proprio sotto il limite superiore dell'ombra, invece, si vede talvolta un colore blu, poiché la luce che attraversa gli strati alti dell'atmosfera, più rarefatti, è meno impoverita di radiazione di tale colore rispetto a quella che attraversa gli strati bassi. L'effetto è ancora più evidente quando la luce attraversa di sbieco lo strato di ozono o uno strato di particelle responsabili dell'effetto Mie. Presso la zona d'ombra, parte della luce è emessa per diffusione di Rayleigh e passa nell'ombra, dove diffonde di nuovo prima di tornare verso l'osservatore. Dopo ripetute diffusioni, il blu è debole ma percepibile, a causa del fondo scuro.

Una macchia violetta

Una decina di minuti dopo il tramonto, si vede a volte una macchia violetta, tra 15 e 60 gradi al di sopra del punto in cui il Sole è scomparso. Essa sembra dovuta alla presenza di uno strato di particelle situate nella zona inferiore dello strato di ozono. Si è supposto che queste particelle fossero polvere o ceneri fini provenienti da eruzioni vulcaniche e incendi di foreste, ma nel 1967 Aden Meinel e Marjorie Pettit Meinel, dell'Università dell'Arizona, hanno ipotizzato il coinvolgimento di altri prodotti vulcanici. Quando un'eruzione libera molto biossido di zolfo, questo gas si alza fino alla base dello strato di ozono e reagisce; i solfati che si formano precipiterebbero su nuclei di condensazione e gli aerosol prodotti diffonderebbero la luce per effetto Mie. I Meinel pensano che la macchia violetta sia il risultato di un mescolamento della luce «molto rossa» e di quella «molto blu» diffuse in differenti regioni del cielo. La componente rossa sarebbe formata da raggi radenti alla Terra, che attraversano uno strato di atmosfera sufficiente per essere arrossati per diffusione di Rayleigh. Una parte di questi arriverebbe all'osservatore per effetto Mie, se le particelle sono abbastanza voluminose, o per diffusione di Rayleigh se sono più piccole. Nei due casi, le particelle in sospensione arrossano la luce. La componente blu, d'altra parte, sarebbe dovuta all'attraversamento dello strato di ozono su una traiettoria molto inclinata. La luce vira verso il blu per l'assorbimento della componente rossa. Alcuni di questi raggi blu diffondono secondo il meccanismo di Rayleigh e arrivano all'osservatore. Poiché le due componenti blu e rossa seguono la stessa traiettoria verso l'osservatore, la loro combinazione genera una luce violetta. Perché allora il cielo non è tutto violetto? Perché l'osservatore riceve combinazioni di colori diverse secondo l'angolo di osservazione. I colori sono magnifici quando l'atmosfera contiene molte particelle, come accade spesso dopo un'eruzione vulcanica. Per esempio, si sono avuti spettacolari tramonti nei



I colori del cielo al limite superiore dell'ombra della Terra.



La formazione di una macchia violetta al crepuscolo.

cinque anni successivi all'esplosione del Krakatoa, avvenuta nel 1883; l'eruzione dell'Agung, a Bali, nel 1963, ha colorato i tramonti per circa tre anni.

Non è ancora chiara l'origine di un'altra luce violetta che appare (più raramente) nello stesso punto del cielo, ma più tardi, un'ora e mezza o due dopo il tramonto. Alcuni ritengono che lo strato di particelle in sospensione che forma la prima macchia violetta sia responsabile anche della seconda: se questo strato è spesso, una frazione della luce diffusa dalla fascia di ozono situata ben al di sotto dell'orizzonte diffonde di nuovo sulle particelle della parte visibile dello strato. Quando l'intensità luminosa è sufficiente, si distingue un bagliore violetto. In alternativa, il fenomeno si spiega con la presenza di un secondo strato di particelle, tra 80 e 90 chilometri di quota, in una regione di bassa temperatura al limite tra mesosfera e ionosfera. Queste particelle potrebbero essere di origine spaziale, poiché la Terra riceve frammenti di comete e di asteroidi che formano uno spesso strato di particelle in questa regione. La luce diffusa da esso non è abbastanza intensa per essere percepibile di giorno o al crepuscolo, ma appare a volte quando la maggior parte dell'atmosfera visibile si trova nell'ombra della Terra, e questo strato è illuminato dal Sole. L'illuminazione notturna delle città è purtroppo un grave ostacolo all'osservazione di questa seconda macchia violetta.

L'AUTORE

JEARL WALKER è stato collaboratore di «Scientific American».

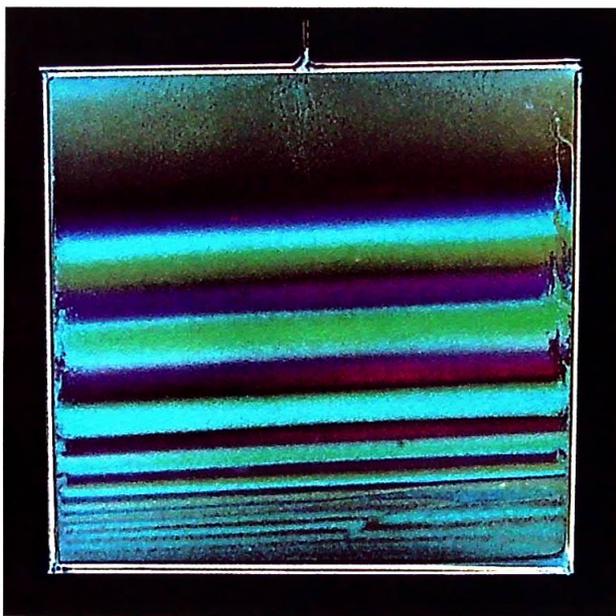
PER SAPERNE DI PIÙ

MEINEL ADEN e PETTIT MEINEL MARJORIE, *Sunsets, Twilights and Evening Skies*, Cambridge University Press, 1983.
BOHREN CRAIG F. e FRASER ALISTAIR B., *Colors of Sky*, in «The Physics Teachers», 23, n. 5, pp. 267-272, maggio 1985.

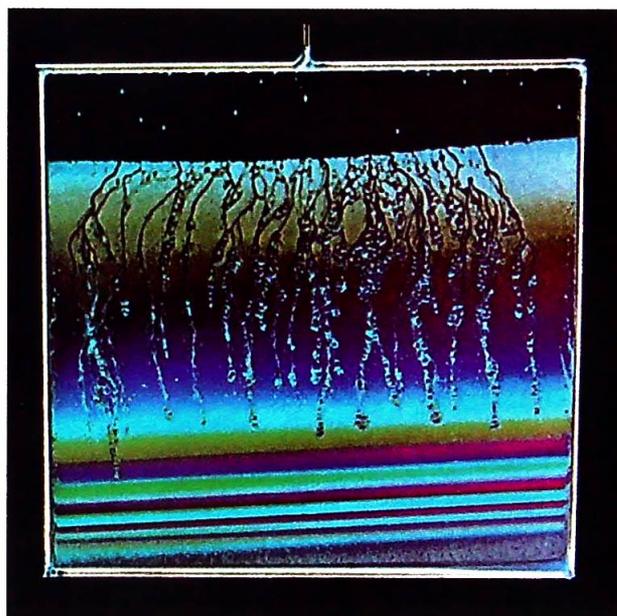
I colori vividi di una bolla di sapone

di Jearl Walker

Gli effetti iridescenti di una pellicola di acqua saponata esemplificano in modo divertente le interferenze delle onde luminose



F. Goro



Tutti hanno osservato i colori delle sottili pellicole saponose. Quando si tiene verticalmente una pellicola di acqua saponata in un anello di filo di ferro e la si illumina (per riflessione) con luce bianca, si osserva una successione di bande orizzontali colorate. Se il liquido ha avuto il tempo di colare verso il basso, la parte alta della pellicola appare scura; qui il tenue spessore della pellicola di sapone spiega l'assenza di luce riflessa. Questa zona scura è spesso menzionata negli esperimenti didattici, poiché rappresenta un esempio significativo delle proprietà interferenziali delle onde luminose. Appena al di sotto della regione scura, la prima banda appare bianca e la sua larghezza è relativamente pronunciata. Sotto la zona bianca, si trova una frangia arancione, seguita da una banda porpora e da una blu. Al di sotto, la sequenza di colori non si riproduce identica a se stessa. Ma perché appaiono colori nella luce riflessa da una sottile pellicola illuminata di luce bianca? Per comprenderlo, bisogna innanzitutto rammentare perché si succedono frange scure e brillanti.

Consideriamo un raggio di luce monocromatica (chiamiamolo *A*) incidente in modo quasi perpendicolare sulla superficie di una sottile pellicola saponosa (si veda l'illustrazione qui sotto a sinistra). Una frazione della luce (raggio *B*) si riflette sulla superficie; il resto viene rifratto dalla prima faccia della pellicola, attraversa la pellicola stessa e incontra la seconda faccia. Una parte della luce che raggiunge questa seconda superficie viene di nuovo riflessa, riattraversa la pellicola, subisce una rifrazione sulla prima faccia ed emerge dalla pellicola saponosa. Chiamiamo questo raggio emergente *C*. I raggi *B* e *C* ritornano verso l'osservatore, situato dallo stesso lato della sorgente luminosa rispetto alla pellicola. Sono questi due raggi luminosi a determinare il colore della pellicola, tenendo conto naturalmente del colore della luce incidente.

Il resto della luce incidente rimbalza su ognuna delle due facce e, a ogni incidenza, parte della luce viene riflessa e parte rifratta. Una parte di questa luce emerge dall'altro lato della pellicola e non ha un effetto diretto sui colori osservati. In ragione della sua debole intensità, la luce che emerge dopo molti tragitti all'interno della pellicola non svolge che un ruolo minimo.

Così, la pellicola appare scura o brillante a seconda delle fasi relative delle onde corrispondenti ai raggi *B* e *C*. Quando le due onde sono in fase, esse interferiscono positivamente (le loro intensità si sommano) e producono una frangia brillante. Quando invece sono in opposizione di fase, interferiscono negativamente (le loro intensità si sottraggono) e producono una frangia scura. Nei casi intermedi, l'intensità risulta compresa tra questi due estremi.

La differenza di fase tra le onde riflesse si esprime in lunghezza d'onda o in gradi (dove 360 gradi, o 2π radianti, rappresentano lo sfasamento di una lunghezza d'onda). L'interferenza è additiva quando la differenza di fase è nulla (o uguale a $k\pi$, dove k è un numero pari) o uguale a un numero intero di lunghezze d'onda. Una interferenza negativa appare invece quando la differenza di cammino dei raggi è uguale a un numero dispari di volte la semilunghezza d'onda.

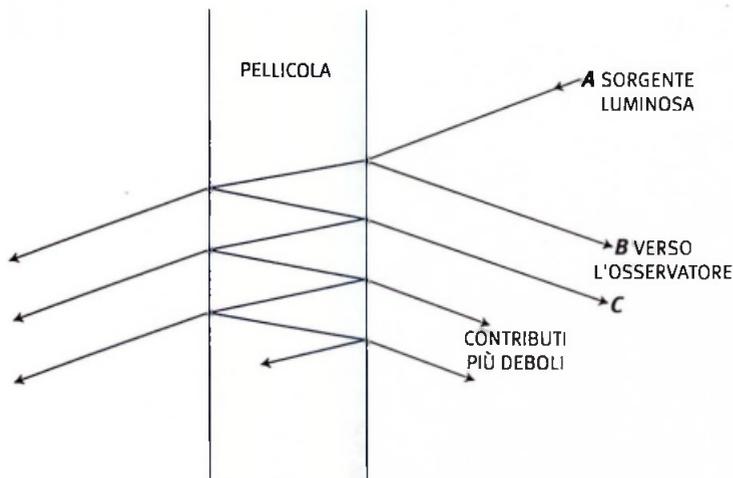
Dal momento che i raggi *B* e *C* provengono en-

trambi dal medesimo raggio incidente *A*, perché non sono in fase e perché, in queste condizioni, ci si deve attendere qualcosa di diverso da una semplice riflessione brillante? Vi sono due ragioni. In primo luogo, quando la luce si riflette su una superficie, essa può, in certe condizioni, subire uno sfasamento. Quando la luce viene riflessa da un mezzo il cui indice di rifrazione è superiore a quello del mezzo da cui la luce proviene, essa subisce uno sfasamento di mezza lunghezza d'onda (π radianti). Se invece la riflessione ha luogo su un mezzo meno rifrangente, non si ha sfasamento. In questo modo, la riflessione del raggio incidente sulla prima superficie (che genera il raggio *B*) comporta uno sfasamento di mezza lunghezza d'onda, in quanto l'indice di rifrazione della pellicola saponosa è più elevato di quello dell'aria; nella situazione opposta, la riflessione di *C* sulla seconda superficie non comporta alcuno sfasamento. Per questo fatto, le riflessioni sulle superfici in avanti e all'indietro si traducono in una differenza di fase di mezza lunghezza d'onda tra i due raggi emergenti.

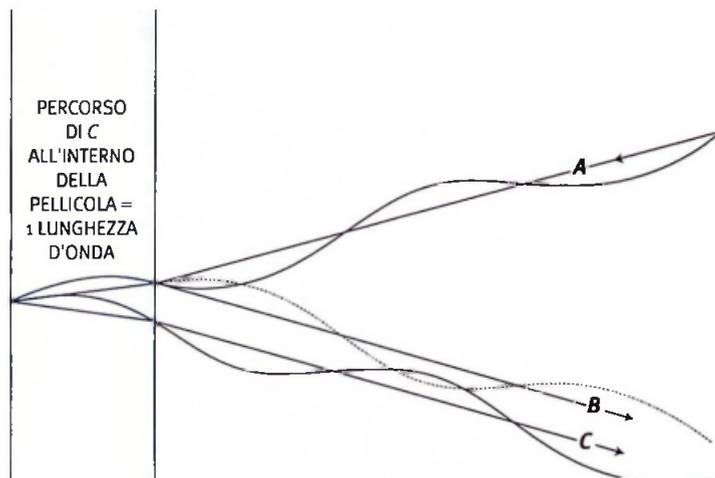
La differenza di cammino dei due raggi introduce una differenza di fase supplementare; in effetti il raggio *C* attraversa due volte la pellicola, mentre il raggio *B* non la attraversa. Se *A*, il raggio incidente, è pressoché perpendicolare alla superficie della pellicola, la distanza supplementare percorsa da *C* è sostanzialmente uguale a due volte lo spessore della pellicola. Supponiamo che questo spessore sia uguale a mezza lunghezza d'onda: dopo avere attraversato due volte la pellicola, il raggio *C* emerge avendo percorso una distanza corrispondente a una lunghezza d'onda completa, mentre *B* si riflette semplicemente sulla superficie anteriore. (Per un calcolo preciso, che non è necessario esplicitare in questa sede, occorre confrontare lo spessore della pellicola con la lunghezza d'onda della luce nella pellicola stessa, vale a dire la lunghezza d'onda della luce nell'aria divisa per l'indice di rifrazione della pellicola saponosa.)

In definitiva, il raggio *B*, riflettendosi, subisce uno sfasamento di una mezza lunghezza d'onda, mentre il raggio *C* subisce uno sfasamento che dipende dallo spessore della pellicola. Nell'esempio citato in

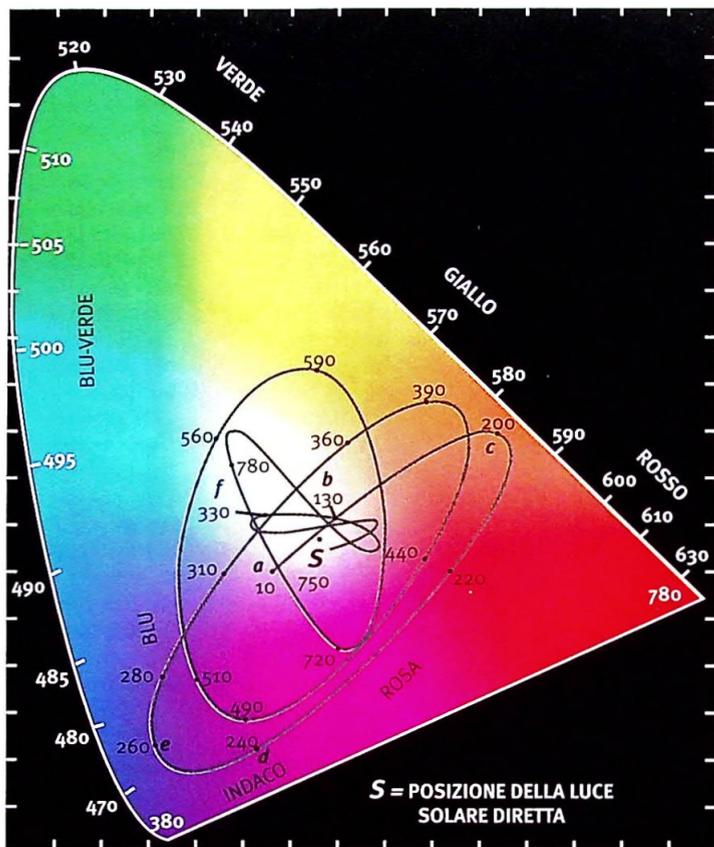
Nella pagina a fronte: pellicola saponosa illuminata dalla luce solare riflessa da un foglio di carta bianca (a sinistra). L'assenza di luce riflessa nella parte più alta è dovuta allo spessore molto tenue della pellicola in quella zona. Riscaldando leggermente l'anello che sostiene la pellicola (a destra) si producono suggestivi fenomeni di risalita e ridiscesa del liquido.



Percorso di un raggio luminoso in una pellicola saponosa.



Un esempio di estinzione per interferenza negativa.



La curva cromatica di una pellicola saponosa illuminata dalla luce solare si aggroviglia man mano che si avvicina al bianco.

precedenza, lo sfasamento di *C* è pari a una lunghezza d'onda. Sottraendo il primo sfasamento dal secondo, si ottiene la differenza di fase tra i due raggi emergenti. Quando lo spessore è tale che la differenza di fase è un numero dispari di semilunghezze d'onda, come nel nostro esempio, le ampiezze delle due onde si sottraggono e la pellicola appare scura. Quando lo spessore della pellicola è tale che la differenza di fase risulta nulla o equivale a un numero intero di lunghezze d'onda, i due raggi emergenti sono in fase e le ampiezze delle onde corrispondenti si sommano: la pellicola appare dunque brillante.

Per esemplificare, ho supposto che il raggio *A* fosse quasi perpendicolare alla pellicola; la stessa spiegazione vale però per qualunque angolo di incidenza, con la sola differenza che la distanza supplementare percorsa dal raggio *C* sarebbe superiore a due volte lo spessore della pellicola.

Le sottigliezze del fenomeno

Quando una pellicola saponosa viene tenuta in verticale in un anello di filo di ferro, il liquido di cui essa è costituita cola lentamente verso il basso sotto l'effetto del proprio peso, cosicché lo spessore della pellicola aumenta progressivamente dall'alto verso il basso. Se si illumina la pellicola con una luce monocromatica, si osserva che in certi punti, lungo una verticale, lo spessore della pellicola permette ai raggi riflessi di interferire positivamente, il che si traduce nella comparsa di bande chiare. Tra queste bande brillanti, lo spessore della pellicola è però tale da indurre una interferenza negativa, per cui appaiono

frange scure. Tra le bande più brillanti e quelle più scure, le regioni di interferenza intermedie risultano mediamente luminose.

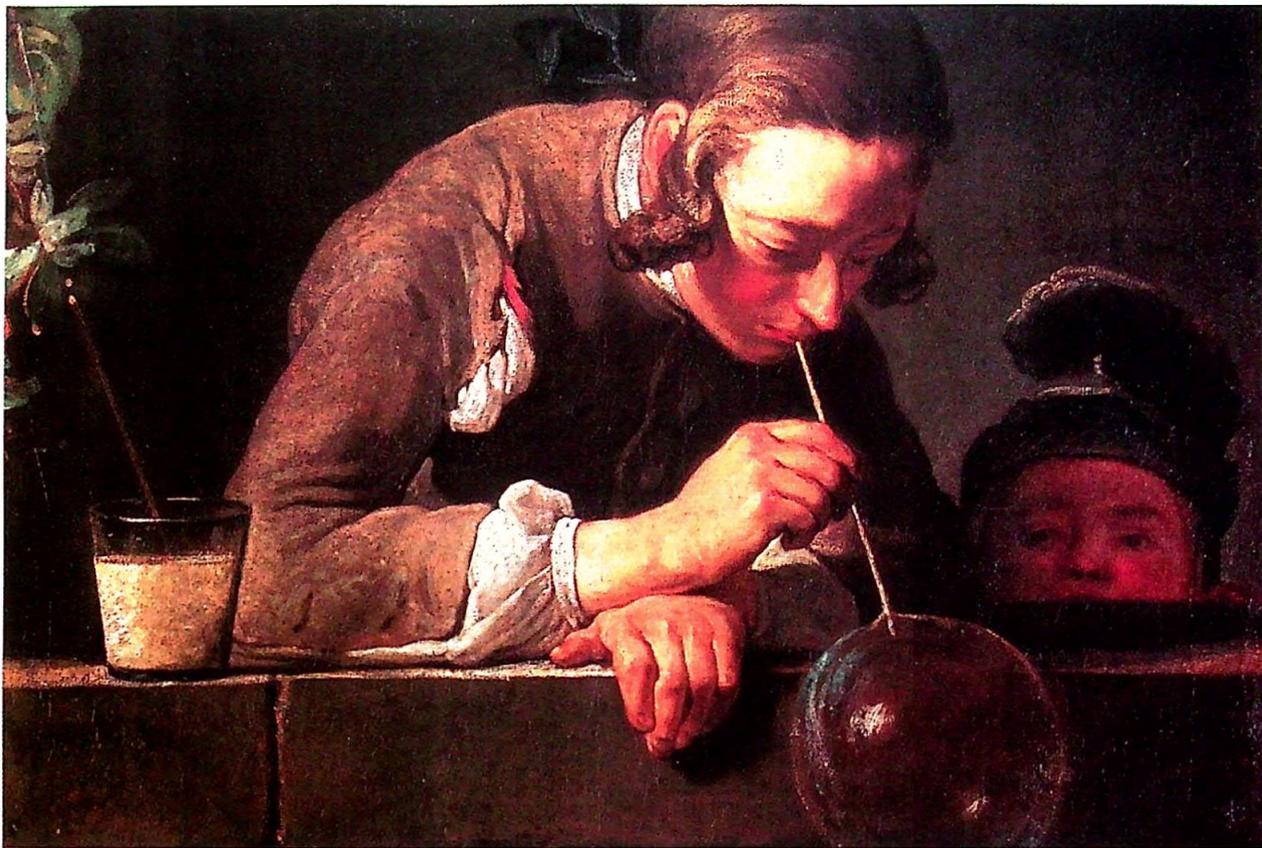
Questa spiegazione classica nasconde alcune sottigliezze. Per prima cosa, com'è possibile che un'interferenza tra i raggi *B* e *C* conduca a un annullamento totale della banda colorata? Come è evidente, infatti, questi raggi non hanno la stessa ampiezza, e *C* è più debole di *B*: anche se fossero in perfetta opposizione di fase e si sottraessero rigorosamente l'uno dall'altro, l'annullamento della luminosità dovrebbe essere incompleto.

Per risolvere il problema, dobbiamo tener conto di tutti i raggi che emergono verso l'osservatore dopo avere subito riflessioni multiple all'interno della pellicola. Per quanto in precedenza io abbia affermato che questi raggi svolgono un ruolo secondario, qui bisogna chiamarli in causa. In una interferenza negativa, tutti questi raggi riflessi supplementari sono in fase con il raggio *C*; la loro ampiezza combinata, sommata a quella di *C*, è uguale all'ampiezza del raggio *B*. Sono quindi questi raggi, dovuti alle riflessioni multiple e di cui non si tiene normalmente conto, a produrre le frange scure.

La seconda sottigliezza è la seguente: se la luce proviene da una sorgente puntiforme lontana, sulla pellicola non appare alcun sistema di frange scure o brillanti. I raggi emessi da questa sorgente arrivano paralleli gli uni agli altri e tutti colpiscono la pellicola con il medesimo angolo di incidenza. Di conseguenza, in ossequio alla legge della riflessione, i raggi che ritornano verso l'osservatore lasciano tutti la pellicola con lo stesso angolo. In funzione dello spessore della pellicola, i raggi interferiscono positivamente o negativamente, ma lo fanno tutti indistintamente allo stesso modo e pertanto si può osservare una chiazza scura oppure chiara nel punto in cui la luce viene riflessa verso l'occhio.

Nel caso di una sorgente di ragguardevoli dimensioni, come il Sole (che occupa circa mezzo grado nel campo visivo di una persona) o una lampada situata in prossimità della pellicola, i raggi luminosi incidenti raggiungono la pellicola secondo una varietà di angoli. Per una data posizione della testa, l'osservatore riceve certe coppie di raggi *B* e *C* tali che il tragitto percorso dal raggio *C* nella pellicola mette quest'ultimo in opposizione di fase con il raggio *B*, il che genera una frangia scura nel punto in cui i raggi sono riflessi sulla pellicola. E, in modo analogo, altri raggi *B* e *C* che l'occhio dell'osservatore intercetta interferiscono positivamente, così da rendere brillante la zona da cui emergono.

L'ultima sottigliezza del fenomeno riguarda la perdita di colore quando la pellicola diviene troppo spessa. I colori di interferenza sono peraltro assenti non solo quando la pellicola saponosa è spessa, ma anche quando è trasparente, come una pozza d'acqua su un marciapiede dopo un acquazzone. Le spiegazioni precedenti restano valide, a condizione che lo spessore della pellicola raggiunga diverse volte la lunghezza d'onda della luce visibile. Perché allora i colori scompaiono? Ciò accade perché, dal momento che la lamina rifrangente è spessa, vi sono diverse lunghezze d'onda dello spettro visibile che interferiscono positivamente allo stesso tempo, e la luce mescola un numero di colori sufficiente ad ap-



The Metropolitan Museum of Art, Wente, Gift of Friends, New York

parire bianca. Se la pellicola si ispessisce ancora, le lunghezze d'onda che ricompongono una frangia brillante cambiano, ma la luce composta che si vede è sempre bianca.

Uno dei fenomeni sorprendenti osservati nella lamina di sapone tenuta verticalmente è il lento sviluppo di una regione scura a partire dalla parte alta della pellicola. Quando il sapone può colare verso il basso, la parte alta della pellicola diviene talmente sottile che il suo spessore risulta molto inferiore alla lunghezza d'onda della radiazione luminosa. Il raggio C percorre allora una distanza supplementare che è trascurabile rispetto alla lunghezza d'onda, ed emerge quasi senza sfasamento. Il raggio B, da parte sua, è sempre sfasato di una mezza lunghezza d'onda per riflessione: questa differenza di fase non ha nulla a che vedere con lo spessore dello strato liquido. Quindi, se lo spessore della pellicola è molto tenue, i due raggi B e C emergono necessariamente con una differenza di fase vicina a una mezza lunghezza d'onda: interferiscono cioè negativamente. Ecco perché una pellicola molto fine è sempre scura.

La successione dei colori

Supponiamo ora che si illumini la pellicola con una luce bianca. Lo spessore necessario per ottenere interferenze positive dipende dalla lunghezza d'onda della luce. I valori di questo spessore producono frange brillanti che variano per ogni colore. Queste piccole differenze spiegano perché le frange brillanti, corrispondenti ai diversi colori, appaiano in punti diversi. I colori dovrebbero scaglionarsi dal blu al

rosso (dalle lunghezze d'onda più brevi a quelle più lunghe) scendendo lungo la pellicola, poiché lo spessore aumenta. Ma perché questa sequenza non appare nelle pellicole saponose reali?

Per interpretare i colori di interferenza osservati su una pellicola di sapone, utilizziamo il sistema colorimetrico esemplificato nell'illustrazione nella pagina a fronte. I numeri associati ai nomi dei colori sono le lunghezze d'onda dei colori espresse in nanometri, e i numeri indicati sulla curva rappresentano gli spessori della pellicola saponosa, sempre in nanometri. Il punto *a* si situa verso l'alto della pellicola, laddove la luce riflessa diviene percettibile per la prima volta. Per spessori più grandi, i luoghi spettrali (rappresentativi dei colori monocromatici, o puri) si allontanano dal punto *a*.

La posizione corrispondente a una pellicola ultrasottile (il nero) non è rappresentata. Quando lo spessore della pellicola aumenta, essa appare ancora scura, ma di una tinta tendente al blu, poiché le interferenze non riescono ad annullare completamente la luce blu riflessa. È questa la ragione per cui il primo punto riportato sulla curva cromatica (punto *a*) è distante dal centro bianco del diagramma e dal lato blu. L'annullamento incompleto del blu si produce prima che appaia ogni altro colore perché il blu corrisponde alla più piccola lunghezza d'onda dello spettro visibile. Questa luce blu appare allorché la distanza supplementare attraversata dal raggio C raggiunge una certa frazione di lunghezza d'onda della luce: il raggio C inizia allora a essere leggermente sfasato e non è più rigorosamente in opposizione di fase con il raggio B. Per quanto il cammino

**J. B. S. Chardin
(1699-1779),
Ragazzo che fa le
bolle di sapone,
olio su tela.**



ottico supplementare sia ancora molto breve, non è insignificante se confrontato con la lunghezza d'onda del blu; in compenso, se confrontato con le lunghezze d'onda più grandi degli altri colori, è pressoché trascurabile.

Quando la pellicola è più spessa (da un ottavo a un quarto della lunghezza d'onda nel dominio del visibile) tutti i colori sono più o meno soggetti a interferenze positive. Di conseguenza la curva cromatica si sposta verso il punto *b*, nella regione centrale del diagramma cromatico che corrisponde al bianco. Quando si osserva una pellicola saponosa senza troppo badare ai dettagli, questa zona biancastra è la prima banda chiara facile da distinguere, al di sotto della regione scura superiore.

Per spessori via via crescenti, la curva cromatica si sposta verso il punto *c*, nella zona arancione, poi cambia direzione e passa per il punto *d*, che è un color porpora, per raggiungere finalmente il punto *e* che rappresenta la prima zona della pellicola veramente blu. Successivamente la curva dei colori evita il verde e passa per il punto *f*, presso il centro bianco. Sulla pellicola di sapone si vede soprattutto del giallo al di sotto della prima frangia blu. Quindi la curva torna verso il centro e produce frange purpuree, blu (ma di un blu meno puro del precedente) e, infine, verde puro. Per spessori superiori, il blu puro non torna più, ma il passaggio nel verde è ancora più percettibile. In definitiva, la curva dei colori si avvolge verso il centro bianco, il che corrisponde alla zona chiara nella parte bassa della pellicola (quando è sufficientemente spessa).

L'errore di Newton

I colori delle pellicole di sapone avevano attirato l'attenzione di Newton. Nella sua opera *Opticks*, egli descrive in modo dettagliato i colori di una pellicola di sapone illuminata dal Sole. Tutte le particolarità che qui abbiamo menzionato, vengono spiegate in quelle pagine. Tuttavia, Newton considerava la luce di natura corpuscolare, e non ondulatoria, e il suo lavoro rappresenta così un buon esempio di utilizzazione di buoni dati sperimentali per stabilire una teoria falsa. Newton credeva che i colori della pellicola fossero il risultato della rifrazione differenziale dei diversi colori contenuti nella luce solare, ipotesi da lui ugualmente utilizzata nella sua celebre dimostrazione della separazione dei colori attraverso un prisma di vetro. Questa dimostrazione mostrava in modo corretto come la luce bianca si componesse di tutti i colori dello spettro visibile. Newton pensava, a quanto pare, che lo spessore di una bolla di sapone fosse in grado di separare i colori più o meno allo stesso modo del prisma.

Il modo in cui Newton concepiva la rifrazione sembra ben strano ai nostri giorni. Egli pensava che le particelle di luce si rifrangessero su materiali co-

me le soluzioni saponose a causa di forze che queste sostanze avrebbero esercitato sui corpuscoli luminosi, obbligandoli a cambiare direzione di propagazione. Newton riteneva che diversi colori fossero ricevuti simultaneamente dall'occhio dell'osservatore, che interpretava così la sfumatura di colore risultante in funzione dell'intensità dei colori riflessi, ma il suo modello non comprendeva i fenomeni di interferenza ondulatoria. Egli aveva notato anche le zone nere e anche la tinta blu a contatto con le più importanti regioni scure, ma la sua interpretazione di questa assenza di luce voleva che in quei punti, semplicemente, non venisse riflessa luce.

Gli strati di molecole di sapone

La ragione dei colori delle pellicole saponose non fu compresa che più tardi, quando il modello corpuscolare della luce cedette il passo alla concezione ondulatoria. I dettagli della zona scura non vennero spiegati subito: in effetti, se si osserva una pellicola verticale, si vedrà che la regione scura non scompare progressivamente, trasformandosi dolcemente in una regione meno scura e azzurrata; al contrario, si osserva una transizione assai netta tra le due zone.

Nel 1939, finalmente, Sir William Bragg spiegò questa transizione con l'organizzazione molecolare alla superficie della pellicola. Quando una pellicola di sapone si forma, provocando l'apparizione dei colori, certe molecole di sapone (che sono lunghe catene di idrocarburi) migrano verso la superficie della pellicola; ogni catena si allinea perpendicolarmente alla superficie con l'estremità idrofila (ricca in ossigeno) rivolta verso l'interno della pellicola stessa. Tra le due superfici costituite da molecole di sapone si trovano acqua e altre molecole di sapone non orientate. In una pellicola di spessore minimo, lo strato intermedio è eliminato e non restano che i due strati orientati di molecole di sapone.

Questa pellicola ultrasottile, il cui spessore è quindi uguale a due volte la lunghezza di una molecola di sapone, è molto scura. Bragg espresse l'idea che la transizione tra una pellicola ultrasottile a doppio strato e una pellicola più spessa a triplo strato (con uno strato di soluzione saponosa intermedio tra i due superficiali) non fosse graduale. La ragione principale di questa transizione è che, quando la pellicola si assottiglia per formare una lamina ultrasottile, lo strato intermedio di soluzione saponosa deve essere in qualche modo espulso. Questa espulsione forma una sorta di rigonfiamento. Al di sopra di esso, la pellicola è ultrasottile e scura; al di sotto è più spessa (anche se pur sempre molto sottile) e compare la tinta azzurrata della regione scura.

Sir William Bragg menziona anche un elegante esperimento dovuto a Sir James Dewar. Si pone una pellicola verticale sotto una campana di vetro e si fa il vuoto attorno a essa; poi si riscalda la base della campana in modo che la parte inferiore dell'anello che regge la pellicola sia leggermente riscaldata. Il calore fa risalire un poco di liquido lungo l'anello, fino alla sommità della pellicola. In questo punto, il liquido forma goccioline che ridiscendono scivolando sulla zona scura. Quando le goccioline vengono illuminate, appaiono come un meraviglioso drappaggio argentato su un fondo molto scuro.

L'AUTORE

JEARL WALKER
ha curato su «Le Scienze» dal 1981 al 1987 la rubrica «Scienza in casa».

PER SAPERNE DI PIÙ

TRAUB ALAN, *A Graphical Demonstration of White Light Interference*, in «American Journal of Physics», 21, n. 2, pp. 75-82, febbraio 1953.
KUBOTA HIROSHI, *Interference Color in Progress in Optics: vol. 1*, collana diretta da E. Wolf, North-Holland Publishing Company, 1961.

L'iridescenza delle ali di farfalla

di Serge Berthier e Carole Chevalley

Lo studio delle strutture microscopiche delle ali delle farfalle ha rivelato il segreto dei loro effetti di iridescenza



Messaggera degli dei greci, Iris personificava anche l'arcobaleno. Dal nome della dea prendono nome un fiore, la parte colorata dell'occhio e anche l'effetto noto come iridescenza. Il fenomeno è frequente in natura, ma spesso viene mascherato dalla fonte dominante di colore costituita dai pigmenti. Solo quando si esprime da sola, o come effetto predominante, l'iridescenza appare in tutta la sua bellezza. Ciò avviene in molti insetti - lepidotteri e coleotteri in particolar modo - ma anche in certi uccelli, pesci e cefalopodi. Numerosi fisici si sono interessati al fenomeno e hanno cercato di darne una spiegazione. Rivelando le strutture responsabili del fenomeno fisico, le tecniche di microscopia elettronica hanno svelato i segreti dell'iridescenza. Le farfalle sfruttano praticamente tutti i fenomeni fisici che conducono a una variazione di colore, associandovi talora pigmenti; esse costituiscono pertanto eccellenti modelli per lo studio dell'iridescenza. Questi colori meravigliosi non sono un «lusso» della natura. Sono

I colori di origine strutturale variano in funzione dell'indice ottico n del mezzo in cui è posta la farfalla. *Morpho menelaus* appare blu all'aria ($n = 1$, in basso a sinistra) e diviene verde-gialla in acetone ($n = 1,362$, al centro). Quando l'indice è pari a quello della chitina ($n \sim 1,5$, in alto), i colori strutturali scompaiono e rimangono solo quelli dei pigmenti. Ciò indica che la struttura è permeabile ai fluidi.



il frutto di una lunga evoluzione, e hanno funzioni cruciali: il mimetismo, la gestione dei flussi termici e tutta la gamma dei segnali tra farfalle. D'altronde, quando ci interroghiamo sull'interesse dal punto di vista selettivo di questo o quel colore, non dimentichiamo che la percezione varia da una specie all'altra: è una sensazione fisiologica distribuita irregolarmente in natura e che è differente per un partner sessuale, per una preda o un predatore.

Il colore percepito è il risultato dell'interazione di un'onda elettromagnetica - la luce - con il recettore sensoriale. Si distinguono i colori pigmentari, dovuti all'assorbimento o alla riflessione selettivi di una porzione dello spettro visibile da parte della molecola, e i colori fisici o strutturali, prodotti da quattro fenomeni: la rifrazione, le interferenze, la diffrazione e la diffusione. In pratica, si separano gli effetti pigmentari e quelli strutturali immergendo le farfalle in liquidi di indice di rifrazione diverso.

La distinzione dei quattro fenomeni è d'altronde più storica che fisica, dal momento che, se i formalismi sono spesso differenti, i fenomeni soggiacenti si assomigliano. La distinzione dipende dalle dimensioni, dalla forma e dall'organizzazione delle strutture nelle quali si verifica l'interazione. Di questi quattro fenomeni, solo la rifrazione attraverso una struttura prismatica non si riscontra nei lepidotteri: tutti gli altri sono sfruttati in varia misura, da soli o in combinazione, e talvolta associati a pigmenti.

La struttura delle ali di farfalla

Dai cinque ingrandimenti in su l'osservazione rivela la struttura caratteristica dell'ala a scale differenti. Via via si sono osservate l'ala intera, a occhio nudo, le scaglie, la cui lunghezza è dell'ordine dei 100 μm (micrometri), le loro strie (circa 1 μm) e le strutture delle strie o delle membrane della scaglia, la cui dimensione varia da 50 a 100 nm (nanometri),

secondo una progressione che ha seguito i progressi della microscopia.

L'ala è costituita da due membrane che si sviluppano indipendentemente e che aderiscono alla fine dello sviluppo. Progressivamente, la doppia membrana si organizza su un reticolo di nervature caratteristico per ciascuna specie: queste nervature delimitano porzioni d'ala, chiamate cellule alari, la cui superficie è relativamente piana e omogenea. L'ala è coperta da minuscole scaglie su entrambi i lati.

Le scaglie sono formate da due foglietti di chitina, un polisaccaride che rappresenta il costituente principale dei tegumenti degli artropodi (insetti, crostacei...). Esse hanno diversi ruoli, ma noi considereremo soltanto quello di supporto del colore e dei motivi cromatici. La forma delle scaglie, la loro dimensione e il modo in cui sono impiantate sono variabili e influenzano il rendimento dei colori. Il foglietto inferiore delle scaglie, rivolto verso la membrana alare, è generalmente liscio o debolmente ondulato, mentre quello superiore, più spesso, ha un rilievo più pronunciato. In numerose specie di farfalle, tra cui la maggior parte delle specie iridescenti che qui ci interessano, le scaglie sono disposte su due strati: quelle di fondo sono a contatto diretto con la membrana alare; le scaglie di rivestimento, disposte in quinconce sulle precedenti, le ricoprono in diversa misura a seconda della specie. Il colore delle scaglie risulta sia dai pigmenti che esse contengono, sia dalla loro struttura. Nelle farfalle della famiglia Uraniidae (illustrazioni in questa pagina e a pagina 23), le scaglie di fondo contengono pigmenti e formano uno schermo nero, quasi continuo, sul quale si stagliano le scaglie di ricoprimento, dette strutturali (la loro struttura impone il colore). Al contrario, nelle farfalle della famiglia Morphidae le scaglie di fondo sono strutturali e quelle di rivestimento lasciano passare la luce (sono infatti trasparenti o atrofizzate).

Le scaglie strutturali presentano, sulla faccia su-

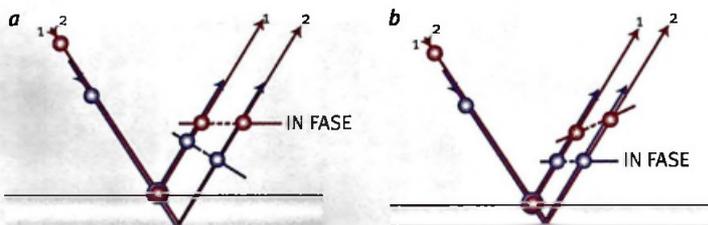
L'iridescenza in *Chrysidia madagascariensis* (fam. Uraniidae). Questa farfalla appare gialla e nera sotto una luce perpendicolare (a destra). La stessa farfalla si presenta verde e nera in luce radente, quando la direzione di illuminazione è circa parallela alla superficie della farfalla (a sinistra).

Le interferenze degli strati sottili

Gli strati sottili creano fenomeni di interferenza. La luce incidente viene riflessa dalle due facce dello strato: la superiore e la inferiore. Queste due onde riflesse interferiscono, vale a dire la loro ampiezza si addiziona o si sottrae, in funzione del loro sfasamento (il quale dipende dalla lunghezza del loro percorso e dall'indice del mezzo attraversato). Quando la differenza di percorso tra le due onde riflesse è un multiplo intero della lunghezza d'onda, le onde riflesse sono in fase, ovvero le ampiezze delle due onde sono massima o minima negli stessi istanti. In questo caso, le interferenze sono costruttive: appare il colore corrispondente alla lunghezza d'onda di queste onde. Negli altri casi, le

onde sono sfasate, e l'ampiezza dell'onda risultante diminuisce. Le onde riflesse sono in opposizione di fase quando la differenza di percorso è un multiplo dispari della semilunghezza d'onda: le interferenze sono distruttive e il colore corrispondente scompare.

Nell'illustrazione, è mostrato il tragitto di due onde incidenti, l'una corrispondente al colore rosso, e l'altra al colore blu. Sui raggi luminosi, sono stati individuati punti a distanza di una lunghezza d'onda (più breve nel caso del blu che non in quello del rosso). Per un dato spessore dello strato (e per l'incidenza indicata), le onde del raggio rosso sono in fase dopo riflessione sulla faccia anteriore e posteriore dello strato (a). Viceversa, le onde riflesse del raggio blu sono in opposizione di fase, sicché questo colore scompare quasi del tutto. La situazione si inverte se si diminuisce lo spessore dello strato (b) o se si aumenta l'incidenza.



Dato che gli indici dei materiali dielettrici organici sono deboli (da 1,5 a 1,6 per la chitina), i fattori di riflessione sono deboli (dal 4 al 5 per cento per faccia). Essi aumentano considerevolmente con il numero di strati (specchio multistrato o di Bragg).

periore, un reticolo di strie longitudinali, parallele all'asse della scaglia. La distanza tra le strie è variabile: da 500 nm sulle scaglie strutturali di certe specie della famiglia Morphidae (oltre 2000 strie per millimetro) a oltre 4 μm nella famiglia Uraniidae. Sulle scaglie pigmentate, la distanza media tra le strie è dell'ordine di 2 μm . Varia anche il rilievo delle strie: da un centinaio di nanometri a un micrometro. Tutte le strie presentano una struttura comune semplice, che ogni specie modula sviluppando in misura diversa - talvolta fino all'eccesso - certi elementi.

Le strie sono composte di lamelle più o meno lunghe, dello spessore dell'ordine di 90-100 nm, che hanno origine a intervalli regolari sulla membrana superiore della scaglia e si sovrappongono come tegole, con un ricoprimento variabile a seconda della specie. Esse si mantengono a distanza costante le une dalle altre grazie a un reticolo di «traversine» microscopiche (microtrabecole). Le lamelle si ritrovano quindi a essere tutte leggermente inclinate, sul piano della scaglia, di una decina di gradi circa. Più le lamelle sono lunghe, più sono numerose nel sovrapporsi. Si osservano così impilamenti che raggiungono le 12 lamelle l'una sull'altra. È notevole che la loro lunghezza sia regolare e uguale a un multiplo intero dell'intervallo tra le loro radici quadrate, cosicché, in ogni punto della stria, l'impilamento comporta un numero costante di strati.

Alla stessa scala, in alcuni lepidotteri (per esempio nella famiglia Uraniidae) si osservano strutture che non fanno parte delle strie, ma della stessa membrana superiore della scaglia. La membrana è allora costituita non più da uno strato chitinoso unico, ma da un impilamento anche cospicuo di strati (fino a sei o sette) ognuno di un centinaio di nanometri, mantenuti a distanza costante da microtrabecole. Tali strati sono spesso forati da numerosi alveoli che permettono la circolazione gassosa in tutto il sistema.

A scala molecolare si osservano le lunghe catene di chitina che assicurano la rigidità dell'insieme del-

le strutture e, talvolta, i pigmenti che, a seconda delle specie, sono ripartiti in modo omogeneo in seno alle strutture stesse o agglomerati sotto forma di piccoli granuli ovoidali, tra le strie.

I colori di interferenza

Nella famiglia Uraniidae, al microscopio ottico si notano scaglie regolarmente impiantate, disposte in due strati distinti (si veda l'illustrazione nella pagina a fronte). Un primo strato - le scaglie di fondo pigmentate, piegate longitudinalmente e leggermente convesse - forma uno schermo assorbente su cui si dispone il secondo strato di scaglie strutturali. Queste ultime, fortemente convesse, leggermente pigmentate e adiacenti l'una all'altra, formano lunghi rotoli simili a onde, sulle cui creste va a riflettersi la luce, producendo lunghe bande colorate. I due tipi di scaglie presentano strie longitudinali poco marcate, più spaziate sulle strutturali (circa 4 μm) che sulle pigmentate (da 1 a 2 μm). Le controstrie sono praticamente inesistenti sulle scaglie strutturali, ma marcate e regolari su quelle pigmentate, con passo da 250 a 300 nm. È questa struttura alveolare serrata ad assicurare, con la melanina, il forte assorbimento luminoso da parte delle scaglie di fondo. Un ingrandimento maggiore, al microscopio elettronico a scansione, consente di risolvere la forma generale delle scaglie e anche la loro struttura superficiale.

Le strie delle scaglie strutturali presentano una struttura classica a lamelle corte e non si ricoprono, dal momento che la loro lunghezza è pressoché uguale alla spaziatura. Sia per la loro struttura sia per la loro spaziatura, non possono essere loro all'origine della forte riflessione osservata nello spettro del visibile; bisogna quindi penetrare all'interno della scaglia per carpire il segreto delle Uraniidae.

Al microscopio elettronico a trasmissione, la membrana superiore della scaglia appare formata da un impilamento di 13-15 strati alternati di aria e di



Le scaglie di un'ala di farfalla (*Chrysidia madagascariensis*) osservate a ingrandimento diverso. Il microscopio ottico a riflessione (100 ingrandimenti, *a*) fa apparire i due strati di scaglie: le pigmentate sotto e le strutturali (bombate e

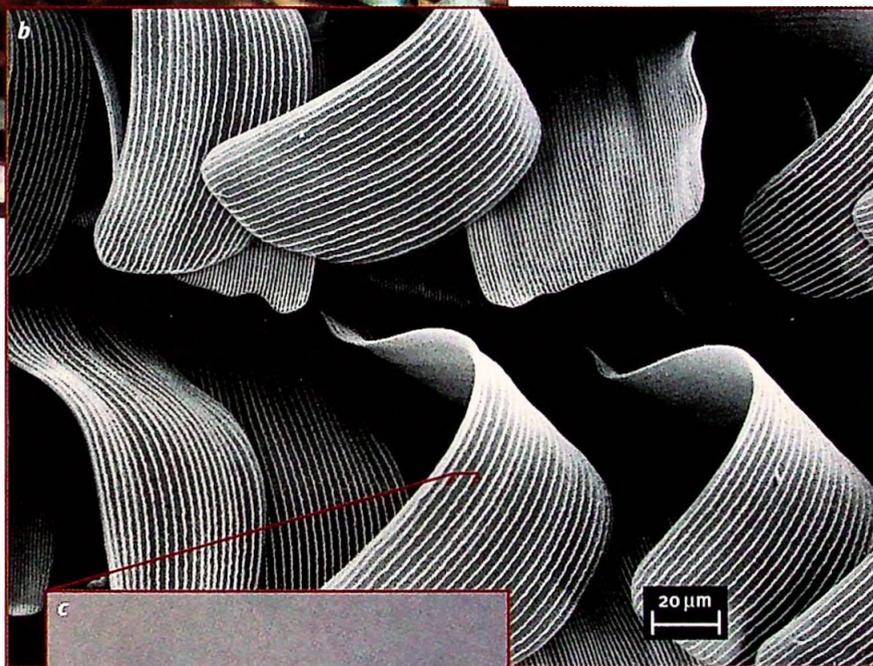
chitina, ognuno di 90 nm di spessore in media, e mantenuti in posizione da un reticolo di microtrabeole. Al microscopio a scansione, lo strato esterno risulta forato da numerosi pori e la velocità di penetrazione nella scaglia di vari liquidi fa supporre che lo stesso valga anche per gli strati più profondi.

Dato che la scaglia, in sezione trasversale, è leggermente convessa, la si può considerare, rispetto a questa direzione, come uno specchio a faccette di 4 μm di larghezza inclinate le une rispetto alle altre di una decina di gradi (meno al centro, di più verso i bordi). Questa disposizione tende a dare il picco di riflessione, che resta centrato su una lunghezza d'onda di 560 nm, in incidenza perpendicolare (in accordo con le previsioni teoriche, che conducono a uno spessore medio di 87,5 nm) e tende anche a diminuire la purezza spettrale. Lo stesso effetto si produce anche in direzione longitudinale, molto amplificato: la scaglia forma in pratica un semicerchio, di modo che solo una stretta zona, di circa 50 μm , si trova in posizione adatta a creare interferenze nel visibile. Di nuovo, la purezza spettrale è ridotta.

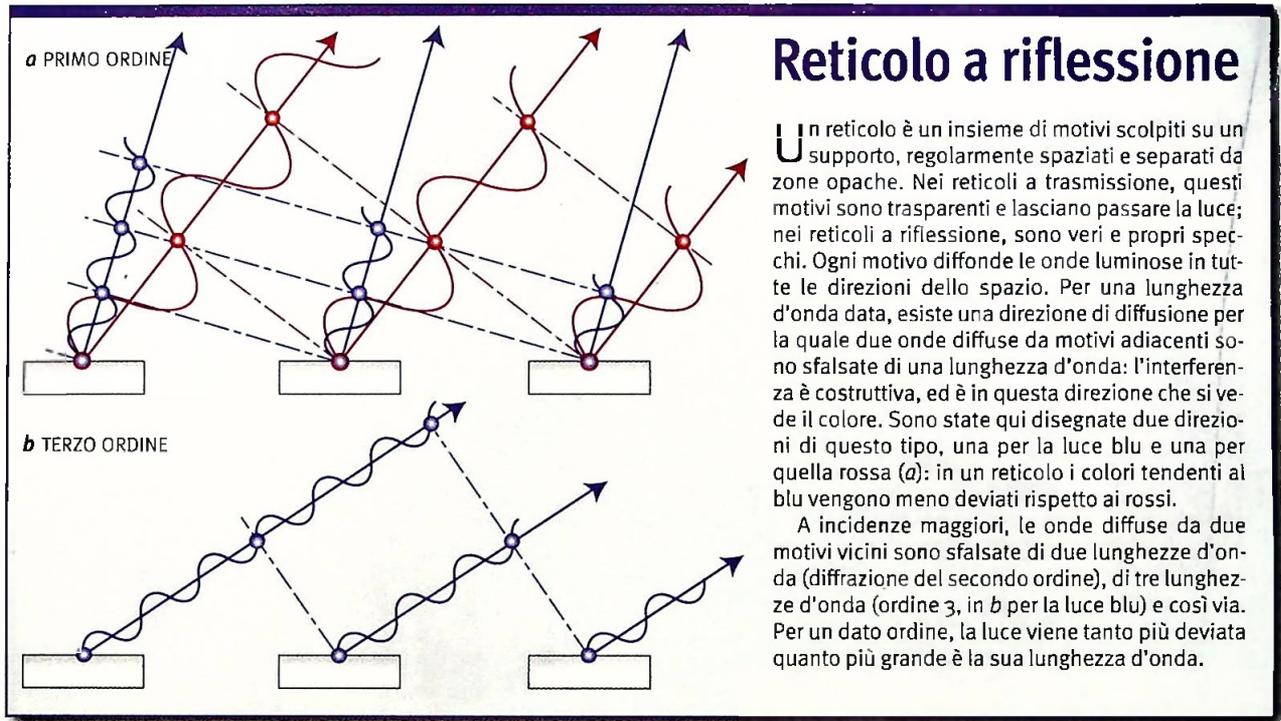
La diffrazione e le interferenze

Le scaglie delle ali di altre farfalle, come quelle del genere *Morpho*, sono diverse sia per disposizione sia per struttura da quelle delle Uraniidae. Anche qui si hanno due strati di scaglie, ma sono le scaglie di fondo a essere strutturali e sorgenti del colore. Le scaglie di ricoprimento, trasparenti o atrofizzate, modulano la vivacità del colore, a seconda del tasso di ricoprimento (massimo nell'opaca *M. anaribia* e quasi nullo nelle brillanti *M. alexanor* e *M. cypris*).

Le scaglie di fondo, rettangolari (80 \times 200 μm), formano uno strato quasi continuo sulla superficie dell'ala e non si sovrappongono quasi per nulla. Le strie della loro faccia superiore sono marcate (oltre un micrometro di spessore) e fitte (da 1600 a 2000 per millimetro). Queste scaglie sono notevoli soprat-



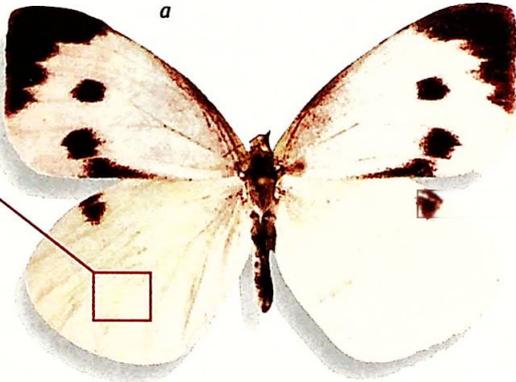
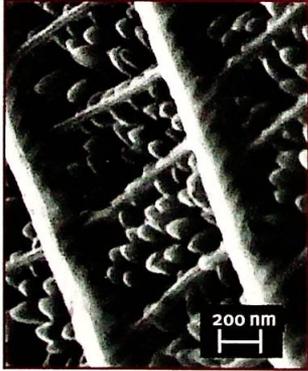
iridescenti) che le ricoprono. Il microscopio elettronico a scansione (400 ingrandimenti, *b*) rivela l'andamento generale delle scaglie strutturali. Con la microscopia elettronica in trasmissione (45 000 ingrandimenti, *c*) una rottura di scaglia all'altezza di una stria (l'escrescenza al centro) rivela la struttura interna della membrana.



Reticolo a riflessione

Un reticolo è un insieme di motivi scolpiti su un supporto, regolarmente spazati e separati da zone opache. Nei reticoli a trasmissione, questi motivi sono trasparenti e lasciano passare la luce; nei reticoli a riflessione, sono veri e propri specchi. Ogni motivo diffonde le onde luminose in tutte le direzioni dello spazio. Per una lunghezza d'onda data, esiste una direzione di diffusione per la quale due onde diffuse da motivi adiacenti sono sfalsate di una lunghezza d'onda: l'interferenza è costruttiva, ed è in questa direzione che si vede il colore. Sono state qui disegnate due direzioni di questo tipo, una per la luce blu e una per quella rossa (a): in un reticolo i colori tendenti al blu vengono meno deviati rispetto ai rossi.

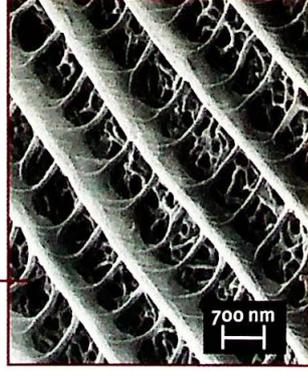
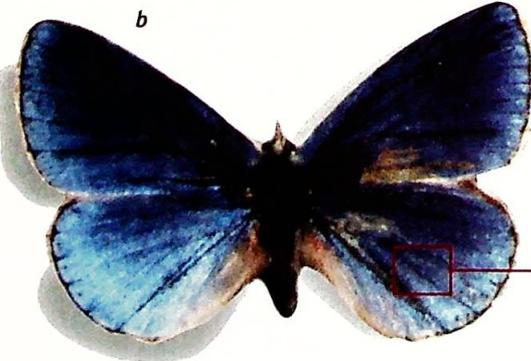
A incidenze maggiori, le onde diffuse da due motivi vicini sono sfalsate di due lunghezze d'onda (diffrazione del secondo ordine), di tre lunghezze d'onda (ordine 3, in b per la luce blu) e così via. Per un dato ordine, la luce viene tanto più deviata quanto più grande è la sua lunghezza d'onda.



tutto per la struttura delle strie. Esse sono costituite da un impilamento di 6-12 lamelle di chitina, appiattite e leggermente arrotondate all'estremità, e di uno spessore compreso fra 90 e 100 nm. Le lamelle sono mantenute a distanza costante da un reticolo di microtrabecole: ogni stria si comporta come un insieme di strati alternati di aria e di chitina, regolarmente spazati, e possiede quindi individualmente un forte potere di riflessione. L'insieme di queste strie parallele forma un reticolo di riflessione che potremmo definire selettivo, poiché solo le lunghezze d'onda che interferiscono in maniera costruttiva nell'impilamento di lamelle vengono diffratte in direzioni differenti.

Anche in questo caso, un fondo scuro pigmentato accentua il contrasto: esso è formato dalle scaglie della faccia ventrale (che sono pigmentate in tutte le *Morpho*), ma anche da pigmenti diffusi nelle scaglie strutturali stesse.

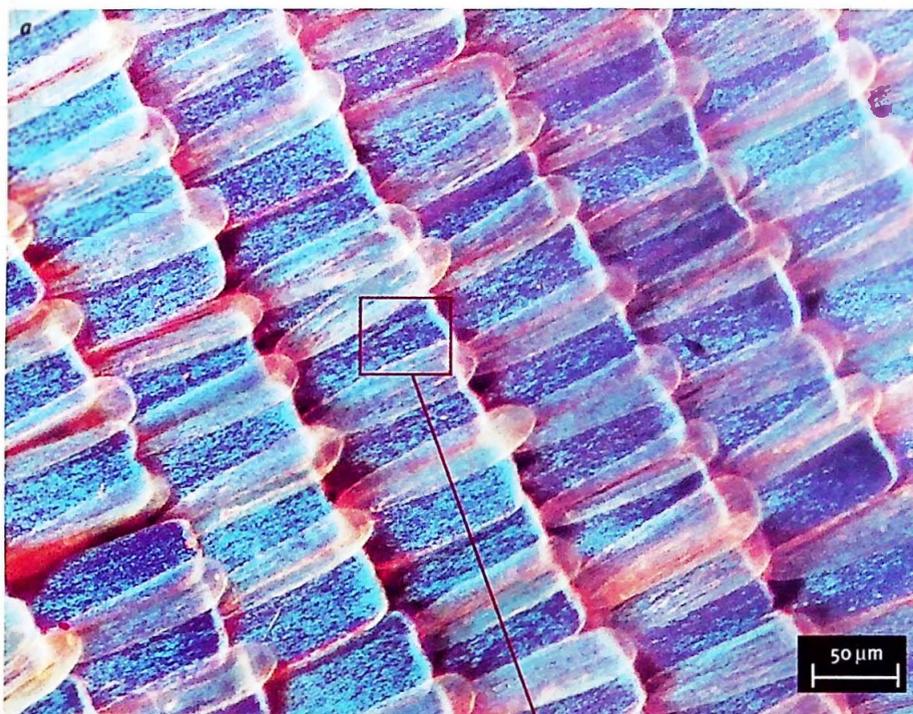
Esiste una differenza importante tra la luce riflessa da un multistrato (come le scaglie di *Uraniidae*) e quella diffratta da un reticolo (come le scaglie di *Morpho*): il multistrato si comporta come uno specchio e la luce è riflessa in una sola direzione, mentre il reticolo disperde la luce in numerose direzioni. Questi colori vivi costituiscono probabilmente un messaggio intraspecifico (tra i maschi nelle *Morpho*) che deve essere visibile dappertutto. È questo certamente il motivo per cui le scaglie interferenziali di tipo *Uraniidae* sono, nella maggioranza dei casi, fortemente deformate (convesse o biconvesse), per riflettere in tutte le direzioni dello spazio, mentre quelle delle *Morpho* sono piane o leggermente bombate.



Struttura diffondente delle scaglie nelle Pieridi e nelle farfalle Argo. Nella Pieride comune *Pieris brassicae* (a), gli spazi interstria delle scaglie contengono granuli ovoidali di pterina. Nella Argo *Polyommatus icarus* (b), la scaglia possiede una struttura spugnosa.

La diffusione

La diffusione della luce a opera di piccole particelle o di inclusioni è il fenomeno più diffuso tra le farfalle delle regioni temperate, ed è sovente associa-

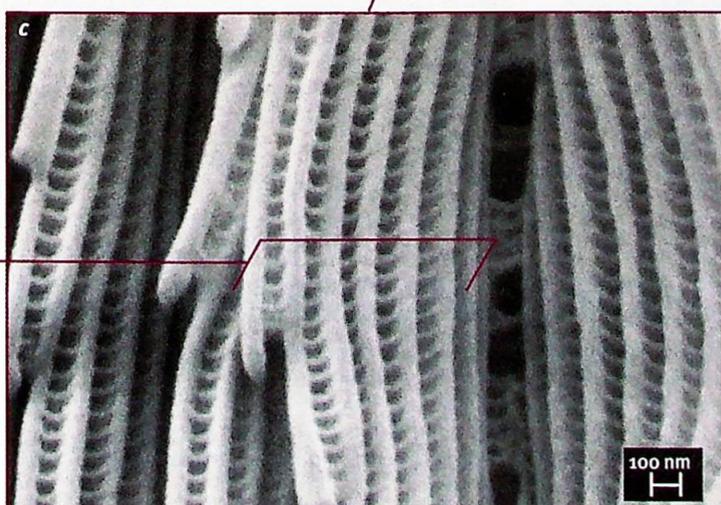
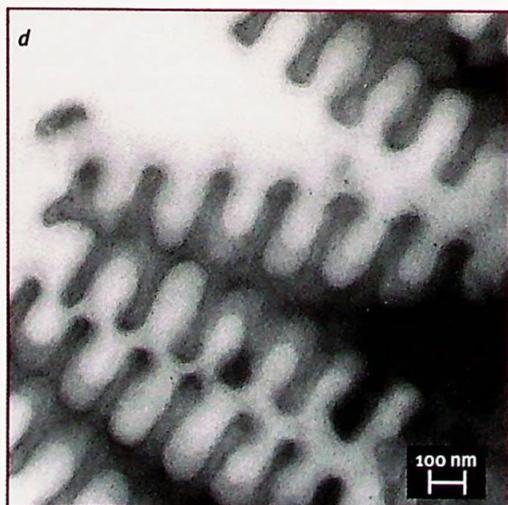
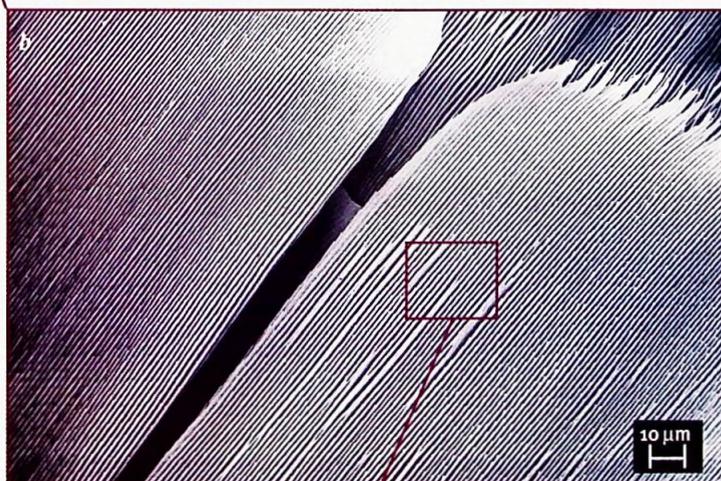


Struttura di un'ala di farfalla (*Morpho menelaus*). Al microscopio ottico (250 ingrandimenti, *a*), si constata che la faccia dorsale delle ali è tappezzata di scaglie iridescenti, che formano un fondo continuo pure coperto di scaglie trasparenti, poste alla giunzione delle precedenti. Osservata al microscopio elettronico (1000 ingrandimenti, *b*), una scaglia presenta strie che formano un reticolo regolare (1800 strie per millimetro). L'osservazione di queste strie al microscopio elettronico a scansione (50 000 ingrandimenti, *c*) mostra come esse siano costituite da un impilamento di lamelle di chitina separate da strati di aria e sostenute da microtrabecole. In sezione (*d*), le strie appaiono esse stesse costituite da un impilamento regolare di strati di chitina (*in nero*).

to alla presenza di pigmenti. È all'origine del bianco delle Pieridi, comuni nei nostri giardini, e di tutta la gamma dei blu delle *Argo* (fam. Hesperidae).

Le scaglie di *Pieris brassicae* sono lunghe e strette, dentellate, e in notevole rilievo sul piano dell'ala. In questo caso è difficile distinguere le scaglie di fondo e quelle di ricoprimento, dal momento che tutte sono uniformemente bianche, sia in riflessione sia in trasmissione, e di forma piuttosto simile. L'insieme si presenta abbastanza disordinato, con un forte tasso di ricoprimento delle scaglie.

Al microscopio elettronico a scansione, le strie appaiono poco sviluppate, distanti in media 1,5 μm. Le lamelle sono corte, non si ricoprono e non generano componenti interferenziali. Esse sono comunque notevoli per l'importante sviluppo delle controstri, spaziate con regolarità (di circa 600 nm), e il loro insieme forma una stupefacente quadrettatura della



La diffusione con e senza pigmenti

L'efficienza di diffusione di una particella (o proporzione di energia incidente diffusa) dipende dal raggio della particella e dalla lunghezza d'onda della luce incidente, e più precisamente dal rapporto fra queste due quantità. Essa tende a zero quando la lunghezza d'onda è molto più grande della particella, ma è non nulla quando le particelle sono molto più grandi della lunghezza d'onda.

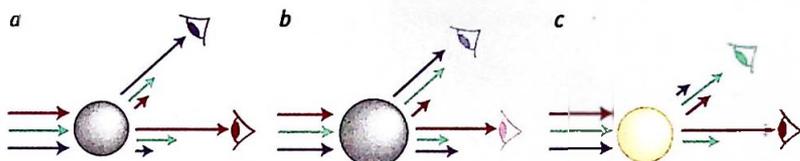
Le particelle piccole diffondono quindi più efficacemente la luce blu (corte lunghezze d'onda) che non quella di lunghezze d'onda maggiori, e in particolare quella corrispondente al rosso (in *a*, il colore dell'occhio indica il colore dominante ricevuto).

Ciò spiega in particolare il colore blu del cielo, ed è anche la causa della colorazione blu di alcune farfalle e di alcuni uccelli.

Quando la dimensione delle particelle aumenta, sono le radiazioni verdi, e poi gialle... che vengono diffuse in prevalenza, ma le lunghezze d'onda più piccole sono pur sempre diffuse maggiormente di quelle grandi: si osserva allora un bianco azzurrato (neve, nubi eccetera, *b*).

Che cosa accade quando la particella produce un pigmento giallo? Questo pigmento assorbe il colore complementare del giallo, vale a dire il blu. Di conseguenza, non si trovano più che radiazioni verdi nella luce diffusa (*c*). I pigmenti gialli sono responsabili del verde di numerosi uccelli, rettili e anfibi.

Infine, quando le particelle sono molto concentrate, ovvero sono a stretto contatto, come nelle farfalle, il trattamento matematico della diffusione è complesso. Ciò produce tinte composte, fino al bianco.



scaglia, con file parallele di compartimenti rettangolari. In questi compartimenti, le particelle diffondono si addensano in ragione di una ventina per casella. Si tratta di minuscoli granelli di pterina, di forma ellissoidale e regolare, tutti orientati verticalmente sulla superficie della scaglia. L'asse minore misura 150 nm, e quello maggiore, più difficile da valutare poiché non se ne vede sempre l'estremità, circa 350 nm.

L'argo blu (*Polyommatus icarus*) si presenta come una *Pieris brassicae* al negativo. Per quanto di forma più regolare, anche qui la maggior parte delle scaglie è organizzata in modo disordinato, e l'insieme è disseminato di lunghe scaglie filiformi. Le strie sono ben spaziate, le lamelle corte, senza ricoprimento, e le controstrie sono pure sviluppate. La differenza con *P. brassicae* risiede nel fatto che le scaglie di argo blu non hanno alcuna inclusione. Il fondo dei compartimenti è tappezzato da una struttura spugnosa. È difficile, dalle immagini in microscopia elettronica a scansione, determinare lo spessore di questa struttura, ma si può valutare la dimensione media dei suoi pori, che è inferiore a 100 nm. L'efficienza della diffusione risulta in questo caso ridotta per le onde luminose di grande lunghezza d'onda, mentre prevalgono il blu e il violetto. L'intensità resta debole e le purezze ben inferiori a quelle ottenute dalle *Morpho* con il meccanismo dell'interferenza.

Quale fonte di ispirazione!

Oltre che gli artisti, le farfalle non mancano di ispirare anche gli scienziati, che tentano di riprodur-

re certe proprietà ottiche delle loro ali. Da tempo si è capaci di realizzare specchi costituiti da un impilamento di strati di materiali dielettrici dall'indice alternativamente alto e basso. A seconda degli spessori degli strati, tali sistemi permettono di riflettere, in modo selettivo, domini precisi dello spettro. Questa tecnica è usata per realizzare specchi per raggi ultravioletti e X, domini spettrali per i quali i materiali intrinsecamente riflettenti sono rari o inesistenti. In base allo stesso principio si realizzano anche specchi bianchi, che riflettono la maggior parte dello spettro visibile. Contrariamente alle Uraniidae, gli spessori degli strati variano in questo caso continuamente nel rivestimento, assicurando una forte riflessione per tutte le lunghezze d'onda del visibile. Questi specchi privi di rivestimento metallico non riflettono i raggi infrarossi, e quindi non riscaldano. Essi sono comunemente utilizzati nei riflettori per lampade alogene o chirurgiche. Si tenta di copiare gli effetti di iridescenza facendo depositare strati di spessore appropriato su fibre di tessuto. Tali effetti vengono ottenuti con tinture e includendo particelle rivestite. L'iridescenza è anche utilizzata per impedire la falsificazione di banconote o biglietti.

Le strutture più complesse nel reticolo bidimensionale delle scaglie di *Morpho* costituiscono un esempio naturale di ciò che i fisici chiamano cristalli fotonici: queste strutture presentano periodicità in diverse direzioni dello spazio e permettono di indirizzare la luce a volontà. I cristalli fotonici, oggetto di intensa ricerca, avranno presto un ruolo tra i componenti integrati di calcolatori, telefoni e laser.

La diffusione a opera di piccole particelle è normalmente applicata in diversi campi. Dall'industria delle vernici e dei pigmenti, poiché influisce sul colore e la sua brillantezza, al campo tessile dove è usata contro l'ingiallimento dei tessuti dovuto all'assorbimento delle lunghezze d'onda più brevi da parte della fibra. Piccole particelle di diversi ossidi incluse nei polimeri tessili, opportunamente calibrate, diffondono prevalentemente la radiazione blu, per compensare le perdite dovute all'assorbimento del materiale.

GLI AUTORI

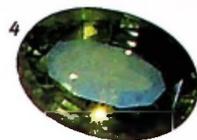
SERGE BERTHIER è professore di fisica all'Università «Denis Diderot» (Parigi 7) e ricercatore nel Laboratorio di ottica dei solidi dell'Università «Pierre et Marie Curie» (Parigi 6).
CAROLE CHEVALLEY è professore di scienze naturali al Liceo «Florent Schmitt», a Saint-Cloud.

PER SAPERNE DI PIÙ

SÈVE R., *Physique de la couleur*, Masson, 1996.
MAY M. e CAZABAT A.-M., *Optique*, Dunod, 1996.
CALLET P., *Couleur-lumière, couleur-matière*, Diderot Multimédia, 1998.
BERTHIER S., *La couleur des papillons*, Springer France, 1999.
BERTHIER S. e LAFAIT J., *Des tissus aux couleurs changeantes*, in «Pour la science» n. 266, dicembre 1999.

Il colore nelle gemme

di Emmanuel Fritsch e George R. Rossman



Come per la Venere di Milo e la Nike di Samotracia, la bellezza delle gemme è dovuta più ai loro difetti che alla loro perfezione

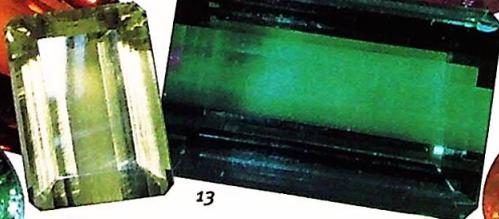
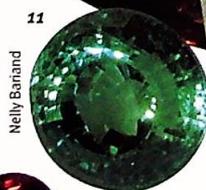
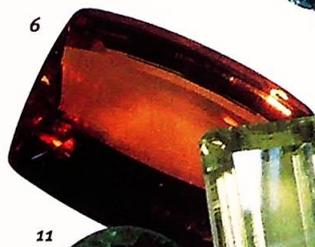


Contrariamente ai fiori e alle piante che con il tempo sbiadiscono, i minerali conservano il proprio colore. Questa proprietà è conosciuta da tempi remoti, fin da quando si iniziarono a estrarre dai minerali i colori per le prime pitture rupestri. Più recentemente l'uomo ha imparato a tagliare, a levigare e a montare in monili le pietre colorate. Quando la mineralogia diviene una scienza, alla fine del XVIII secolo, il colore è un criterio di identificazione dei minerali. Dato che i cristalli di una medesima specie non hanno tutti lo stesso colore, si intuisce che certe tinte siano dovute alla presenza di impurità. Goethe è uno dei primi a spiegare la colorazione ametista del quarzo con la presenza di ferro. La corrispondenza tra un certo colore (per esempio, il verde dello smeraldo) e un dato elemento (il cromo) è oggi assodata; ma il colore ha anche altre cause.



Spiegando l'origine del colore nelle gemme alcuni sperano, al di là della curiosità accademica, di trovare tecniche per migliorare le qualità cromatiche delle gemme stesse.

La luce che interagisce con una gemma può essere assorbita, riflessa, rifratta, diffratta, dispersa o trasmessa. L'assorbimento è la causa principale del colore. Esso dipende dal comportamento degli elettroni all'interno delle strutture del cristallo. Queste strutture variano per dimensione: la più «piccola» causa possibile del colore delle gemme è la presenza di ioni metallici dispersi; anche gli scambi di elettroni tra atomi producono fenomeni cromatici; infine, può capitare che tutti gli atomi di un cristallo partecipino alla genesi del colore. Altri fenomeni ottici, come la dispersione e la diffrazione della luce da parte di grandi strutture, generano effetti di colore come l'opalescenza. Qui di seguito illustreremo con esempi ciascun meccanismo e descriveremo alcuni trattamenti in grado di modificare la colorazione.



La grande varietà cromatica delle gemme deriva da proprietà ottiche diverse. Per esempio il colore dell'ametista (1) è prodotto da impurità di ferro. Si vedono qui una kunzite (2), una tanzanite (3), un'olivina (4), due tormaline rosa (5 e 8), un topazio (6), due acquemarine (o berillo blu, 7 e 9), uno zirconio (10), due tormaline verdi (11 e 13), un eliodoro (berillo giallo, 12), un'opale comune (14), un'opale nobile (15).

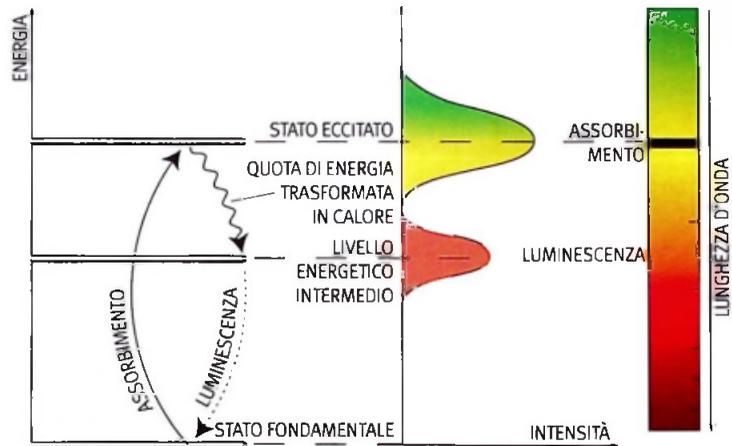
Le impurità metalliche

Allo stato di impurità, gli ioni metallici presenti nella struttura di una gemma sono lontani gli uni dagli altri e quindi non interagiscono. È questo anche il caso degli ioni che fanno parte della formula del minerale, come gli ioni ferro nell'olivina o gli ioni manganese nel granato spessartina. In che modo questi atomi isolati assorbono la luce? Uno ione è un atomo che possiede elettroni in più o in meno, sicché la carica totale degli elettroni (negativa) non compensa perfettamente la carica del nucleo (positiva). La carica elettrone dello ione, o valenza, è simbolizzata da un segno (più o meno) e da un numero affiancati al simbolo dell'elemento: per esempio Cr^{3+} è lo ione cromo con tre elettroni mancanti, mentre O^{2-} è lo ione ossigeno con due elettroni in più.

Le energie degli elettroni di un atomo o di uno ione hanno valori discreti, distribuiti su vari livelli. Un elettrone non può aumentare la propria energia da un livello all'altro se non assorbe una quantità sufficiente a compiere il salto (uguale alla differenza di energia di due livelli). Quando un raggio luminoso fornisce questa energia, un elettrone passa repentinamente dal proprio livello fondamentale a un altro (uno stato cosiddetto eccitato). Lo stato eccitato di un elettrone è instabile, poiché l'elettrone tende a ritornare al proprio stato fondamentale. Per farlo, l'elettrone libera una parte della propria energia, il più delle volte sotto forma di vibrazioni atomiche (calore) nel reticolo cristallino. In questo caso, il colore del minerale corrisponde alle lunghezze d'onda che non vengono assorbite. Accade anche che il cristallo emetta l'energia di transizione sotto forma di luce: si produce così la cosiddetta luminescenza. Dato che l'elettrone non può emettere più energia di quella che ha assorbito, la lunghezza d'onda della luminescenza è maggiore o uguale di quella dell'assorbimento. Per esempio, il Cr^{3+} del rubino assorbe energia nella regione del giallo-verde, ed emette luminescenza nel rosso. Questo è anche il motivo per cui molti minerali emettono una luminescenza visibile (bassa energia) quando vengono esposti a raggi ultravioletti, invisibili e di alta energia.

Pochi ioni assorbono la luce visibile. I più comuni sono: titanio (Ti), vanadio (V), cromo (Cr), manganese (Mn), ferro (Fe), cobalto (Co), nichel (Ni) e rame (Cu). Nella maggior parte dei casi, l'identità dello ione condiziona il colore. Per esempio, nello spinello (alluminato di magnesio), le impurità di Fe^{2+} conferiscono un colore blu-grigio, mentre impurità di Cr^{3+} producono una tonalità rossa.

Anche la valenza di uno ione influisce sul colore, e in particolare sulla sua intensità. Essendo poco probabili, le transizioni negli ioni Mn^{2+} e Fe^{3+} sono poco frequenti e assorbono poco nello spettro visibile; di conseguenza producono colori pallidi. Lo ione Mn^{3+} assorbe la luce ben più efficacemente dello ione Mn^{2+} , il che spiega perché la tormalina elbaite sia pressoché incolore quando contiene Mn^{2+} ma diviene di un color rosa vivo quando contiene una quantità equivalente di Mn^{3+} (rubelite). I trattamenti che modificano la valenza degli ioni metallici presenti nelle gemme possono quindi modificare il colore delle gemme stesse. Così, un riscaldamento in ambiente riducente (che aggiunge elettroni) trasforma il



Gli elettroni di uno ione possiedono livelli discreti di energia. Quando un'onda luminosa apporta energia a sufficienza per far passare un elettrone da un livello fondamentale a uno eccitato, l'onda viene assorbita: per mezzo di uno spettrofotometro si misura una curva di assorbimento centrata sull'energia dello stato eccitato; con uno spettroscopio a prisma, si vede che il colore corrispondente alla lunghezza d'onda assorbita non viene più trasmesso dalla gemma. Capita che il cristallo liberi una parte dell'energia di eccitazione sotto forma di luce: è la cosiddetta luminescenza.



Harold ed Erica Van Pelt

Nel berillo, lo ione Fe^{3+} conferisce una colorazione gialla, e lo ione Fe^{2+} un blu. Il berillo verde contiene quindi una miscela di Fe^{3+} e Fe^{2+} . Per produrre un colore blu acquamarina, si riscalda il berillo verde al fine di trasformare Fe^{3+} in Fe^{2+} .

Fe^{3+} in Fe^{2+} , cosicché il berillo verde si trasforma in un'acquamarina blu. L'irradiazione (con raggi X, raggi gamma eccetera), che sottrae elettroni agli ioni, produce l'effetto contrario.

Oltre all'identità e alla valenza, la presenza delle impurità influisce sui livelli di energia degli elettroni, e quindi sul colore della gemma. La sfalerite verde e lo spinello blu sono entrambi colorati dallo ione Co^{2+} , ma quest'ultimo è legato allo zolfo nella sfalerite verde, mentre è legato all'ossigeno nello spinello blu (come nella maggior parte delle gemme). La coordinazione di uno ione, vale a dire il numero di atomi a cui lo ione stesso è legato, ha pure la sua importanza. Essa può essere, in ordine di frequenza, ottaedrica (lo ione metallico ha sei vicini pressoché equidistanti), tetraedrica (lo ione ha quattro vicini) o cubica deformata (come nei granati e nello zirconio,

dove lo ione metallico ha otto vicini). Per esempio, il cobalto conferisce un colore rosa vivo alla cobalto-calcite, dove si trova in coordinazione ottaedrica, ma anche un colore blu vivo allo spinello blu naturale cobaltifero, assai raro, dove la sua coordinazione è tetraedrica. Altro esempio: il colore verde dell'olivina risulta dallo ione Fe^{2+} in coordinazione ottaedrica leggermente deformata, mentre il rosso intenso del granato almandino è prodotto dallo stesso ione, questa volta in coordinazione cubica deformata.

Ma perché la geometria di contorno dello ione metallico determina il colore? Perché gli elettroni dello ione centrale sono respinti elettrostaticamente dagli elettroni degli ioni vicini, con un'intensità che dipende dal numero dei vicini, dalla loro distanza e dalla loro posizione relativa. Questi ultimi parametri condizionano il colore, poiché l'energia richiesta per fare saltare l'elettrone da un livello energetico all'altro dipende dalla repulsione elettrostatica risentita dall'elettrone stesso. Essi sono pure responsabili del fenomeno chiamato pleocroismo o policroismo: il colore di una gemma varia a seconda della sua orientazione rispetto a una sorgente luminosa. Per esempio, l'epidoto è bruno in una direzione e verde in un'altra. Questo effetto è notevole quando lo ione responsabile del colore possiede una coordinazione ottaedrica, deformata in rapporto all'arrangiamento geometrico ideale: la quantità di energia richiesta (e quindi assorbita) non è più la stessa nella direzione lungo la quale gli ioni sono più ravvicinati.

Anche altri dettagli strutturali influiscono sul colore. Così, il rubino, lo smeraldo e l'alessandrite (varietà cromifera di crisoberillo) devono la loro colorazione molto viva al cromo (Cr^{3+}) in coordinazione ottaedrica. La differenza tra questi minerali ha a che fare con la distanza tra lo ione Cr^{3+} e gli ossigeni vicini. La concentrazione delle impurità importa

ugualmente, poiché determina la distanza tra lo ione metallico e gli ossigeni. Per esempio, nel granato pirolo un aumento della concentrazione di ioni Cr^{3+} modifica il colore dal rosso al porpora.

Nei materiali non cristallini, come il vetro, le impurità di ioni metallici producono effetti analoghi. Il colore verde-olivina delle tecliti e delle moldaviti è pure dovuto alla presenza di Fe^{2+} .

La luce emessa da gruppi di atomi

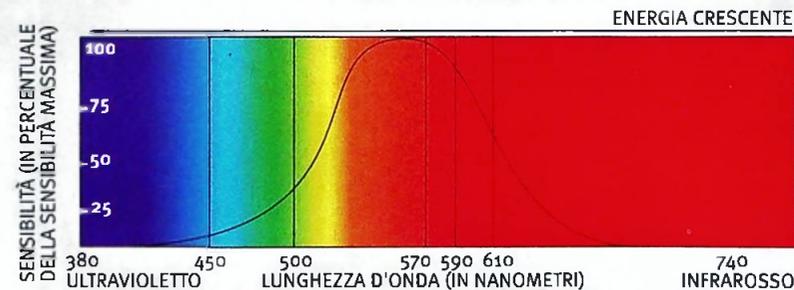
Nel caso di impurità isolate, il colore risulta dalla transizione tra i livelli energetici di uno stesso ione. Capita tuttavia che un elettrone lasci l'atomo di origine per occupare i livelli energetici di uno ione vicino. Il fenomeno, detto trasferimento di carica, produce colori molto belli: l'eliodoro, varietà giallo dorata di berillo, è colorato per la presenza di Fe^{3+} e per la sua interazione con i vicini atomi di ossigeno. Le transizioni confinate allo ione ferro si manifestano con un assorbimento del blu e del violetto nello spettro visibile. In compenso, il trasferimento di elettroni degli ioni O^{2-} verso lo ione Fe^{3+} provoca un assorbimento da 100 a 1000 volte più intenso del precedente (lo si produce artificialmente per irradiazione). Questo forte assorbimento è centrato nell'ultravioletto e si estende fino alla parte blu dello spettro visibile: per questo l'eliodoro appare giallo dorato.

I trasferimenti di carica provocano abitualmente assorbimenti centrati presso l'ultravioletto, che si estendono fino alla regione blu dello spettro visibile; ciò spiega perché il berillo e il corindone abbiano lo stesso colore giallo degli zaffiri, a dispetto delle differenze di coordinazione dello ione metallico. Comunque, la posizione esatta del centro della banda di assorbimento dipende dalla valenza dello ione metallico. Si è visto che il trasferimento di carica da

La luce e il colore

Un prisma di vetro separa un raggio di luce bianca e un nastro di colori «spettrali», una giustapposizione di viola, blu, verde, giallo, arancione e rosso. Ogni colore corrisponde a una lunghezza d'onda determinata, la quale possiede un'energia data: più la lunghezza d'onda è corta, più grande è l'energia. Il campo della luce visibile si estende da circa 375 nanometri a 740 nanometri, ma la luce solare ha anche componenti di più alta energia (gli ultravioletti) e di più bassa energia (gli infrarossi).

L'assorbimento di una gemma di una parte delle lunghezze d'onda visibili che la attraversano è uno dei meccanismi responsabili del colore. Così, se una pietra come lo smeraldo assorbe principalmente il rosso e il blu-violetto, la luce che non è assorbita (vale a dire il verde, un po' di giallo e di blu) attraversa la pietra, che così



ci appare verde. L'alessandrite trasmette il blu-verde e il rosso: alla luce del giorno, essa appare verde, poiché è nel verde che la luce solare presenta il suo massimo di intensità; osservata sotto la luce incandescente (come quella di una candela), ben più rossa della luce solare, l'alessandrite appare rossa. Una pietra come lo zaffiro blu, che non trasmette altro che blu, appare quasi nera se osservata a lume di candela, poiché essa emette poca luce blu.

La luce emessa da una gemma è successivamente ricevuta dall'occhio. Nella retina dell'occhio umano sono sensibili

due tipi di cellule: i coni e i bastoncelli. I bastoncelli non contengono che un solo pigmento e sono responsabili della visione crepuscolare (sotto scarsa illuminazione). Accade così che in un ambiente male illuminato le gemme appaiano senza colore, in differenti toni di grigio. In condizioni di illuminazione più intensa, utilizziamo i coni, che sono in grado di assorbire nel rosso, nel blu e nel verde. L'occhio umano reagisce in modo differente ai colori visibili: è più sensibile al verde, che rappresenta anche il massimo dell'irraggiamento solare percepito alla superficie terrestre.

O^{2-} verso Fe^{3+} causa un assorbimento fino alla parte visibile dello spettro; in compenso, il trasferimento di carica da O^{2-} verso Fe^{2+} è centrato nell'ultravioletto e ha influenza minima sul colore; infine, il trasferimento da O^{2-} verso Fe^{4+} cade al centro dello spettro visibile, conferendo all'ametista il suo colore violetto. Nella produzione di ametista sintetica, si sfrutta l'irradiazione per trasformare il Fe^{3+} in Fe^{4+} , necessaria alla produzione del colore violaceo.

Talora un elettrone si sposta al di là dello ione più vicino: quando un atomo di ossigeno separa due ioni metallici, questi ultimi possono scambiarsi elettroni tramite l'ossigeno. Dal momento che il ferro è abbondante in natura, un trasferimento di carica tra Fe^{2+} e Fe^{3+} è frequente. L'acquamarina blu scuro deve il proprio colore a questo fenomeno: un trasferimento di carica di Fe^{2+} verso Fe^{3+} provoca un forte assorbimento verso l'estremità rossa dello spettro visibile. Dato che il violetto viene già soppresso da un trasferimento di carica di O^{2-} verso Fe^{3+} , ciò fa spazio a una zona di trasmissione nel blu. Se l'acquamarina contiene troppo Fe^{3+} , i trasferimenti di carica di O^{2-} verso Fe^{3+} assorbono troppo blu, e l'acquamarina tende al verde; un riscaldamento in ambiente ridu-

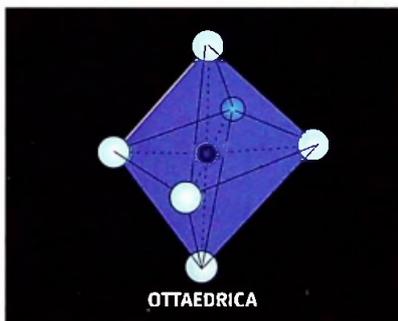
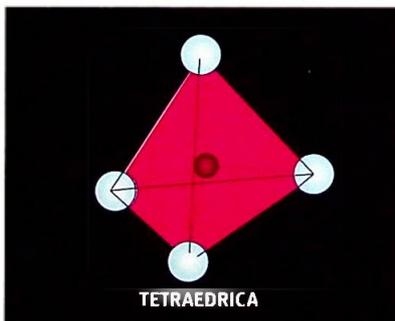
le. Le transizioni di coppia sono orientate lungo i legami $Fe^{3+}-O-Fe^{3+}$ e danno un forte pleocroismo.

Alcune gemme rare devono il proprio colore a un trasferimento di carica in un gruppo di atomi non metallici. Così, le transizioni che hanno luogo tra gli atomi di zolfo della molecola $(S_2)^-$ producono il blu intenso della lazurite (componente principale del lapislazzuli). Per materiali organici come l'ambra e il corallo gli elettroni sono delocalizzati (dispersi) su diversi atomi o su una molecola intera. Transizioni tra i livelli energetici molecolari conducono a un assorbimento della luce visibile e creano il colore.

I difetti del cristallo

I «difetti» dell'arrangiamento cristallino, siano essi atomi mancanti (lacune) o atomi addizionali (interstiziali), generano splendidi colori dopo l'irradiazione della gemma. Questi difetti costituiscono uno «pseudo-atomo», il quale causa un assorbimento della luce (anche nella parte visibile dello spettro); lo si denomina «centro colorato». Esposto a una radiazione abbastanza forte da causare lo spostamento di atomi di carbonio, il diamante diventa verde. Ogni

Nelle gemme, sono frequenti tre coordinazioni ioniche: tetraedrica (4 atomi vicini), ottaedrica (6) e cubica deformata (8).

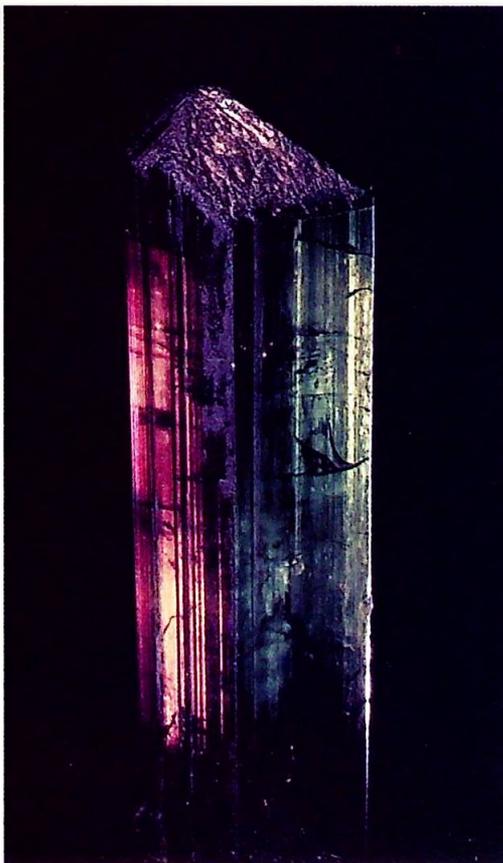


cente riconduce la zona di trasmissione nel blu, restituendo alla pietra un colore di maggiore pregio.

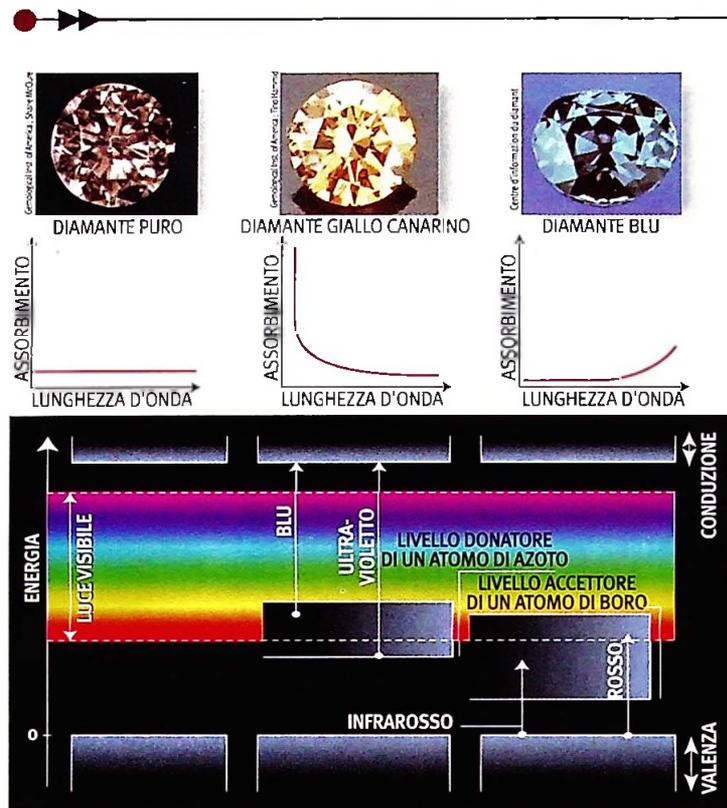
Una caratteristica importante del trasferimento di carica tra due ioni metallici è un forte pleocroismo. La colorazione dell'acquamarina, dovuta al trasferimento di carica da Fe^{2+} verso Fe^{3+} , è più netta quando la luce vibra nella direzione di orientazione delle coppie di ioni. Al fine di ottenere il colore più intenso possibile, il tagliatore sfaccetta spesso un'acquamarina perpendicolarmente a questo asse.

Ioni metallici di elementi chimici diversi possono pure scambiarsi elettroni. È il caso del trasferimento di carica tra Fe^{2+} e Ti^{4+} , che conferisce allo zaffiro la colorazione blu. Il riscaldamento fa volgere al blu zaffiri pressoché incolori (zaffiri «geuda»), a causa della presenza naturale di inclusioni di rutilo (TiO_2) che si dissolvono ad alta temperatura nel corindone: il titanio di queste inclusioni viene rilasciato, diffonde verso il ferro presente nel corindone naturale e forma con quest'ultimo coppie ioniche $Fe^{2+}-Ti^{4+}$.

Mettendo in gioco diversi elettroni, le transizioni di coppie di ioni $Fe^{3+}-Fe^{3+}$ sono la causa del colore di certi zaffiri gialli: si producono simultaneamente due transizioni nei due ioni Fe^{3+} . L'energia richiesta per le transizioni è la somma dell'energia di transizione di due ioni metallici isolati: l'assorbimento si situa quindi ad alta energia (tra 300 e 500 nm), presso l'ultravioletto e all'estremità blu dello spettro visibi-



Questo epidoto del Pakistan (12 centimetri di altezza) presenta un pleocroismo verde-bruno: il suo colore varia a seconda dell'orientazione della luce. Questo fenomeno è senza dubbio dovuto a una distorsione del sito ottaedrico del ferro.



Il diamante puro è isolante e incolore: nessun fotone visibile può eccitare un elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione (a sinistra). Se atomi di azoto sostituiscono atomi di carbonio, si crea un livello di energia che dona elettroni alla banda di conduzione e provoca un assorbimento dal violetto fino al blu (al centro): sono i diamanti giallo canarino. Invece la sostituzione con atomi di boro introduce nella banda proibita del diamante un livello che può accettare elettroni della banda di valenza (a destra): si ha così un assorbimento dall'infrarosso vicino all'estremità rossa dello spettro visibile, che dà al diamante una colorazione blu.

sito vacante di carbonio neutro (vale a dire senza elettrone in eccedenza) produce un assorbimento nel rosso e nell'arancione, cosicché il diamante trasmette nel blu (se non assorbe nel blu-violetto), come il diamante blu trattato o, più di frequente, nel verde.

Nella maggior parte dei casi, invece di spiazzare un atomo intero, l'irradiazione espelle un elettrone. Per esempio, nel quarzo affumicato, dove ioni alluminio (Al^{3+}) vicinano una piccola quantità di ioni silicio (Si^{4+}), l'irradiazione naturale protratta sulla scala dei tempi geologici ha espulso un elettrone di un atomo di ossigeno vicino a uno ione alluminio; lo pseudo-atomo così formato assorbe nell'ultravioletto e fino alla parte visibile, il che provoca la tinta «fumée». Se il cristallo contiene una quantità sufficiente di alluminio e se la radiazione è intensa, il quarzo annerisce. Dopo riscaldamento, la tinta affumicata scompare e il quarzo ridiventa incolore come all'origine.

I centri colorati nelle gemme sono vari, ma talvolta è facile distruggerli come crearli. Gli elettroni spiazzati durante la loro formazione sono intrappolati nel cristallo, spesso da un catione situato in prossimità (H^+ , Na^+ eccetera). In diversi casi, l'elettrone è trattenuto debolmente e si libera dopo un leggero riscaldamento o una breve esposizione alla luce: ritorna allora alla propria posizione di origine e restituisce il colore originale (o l'assenza di colore). In altri casi, come nella tormalina rossa, l'elettrone viene trattenuto più saldamente e il colore è stabile.

Capita che l'irradiazione crei vari centri colorati allo stesso tempo. Per esempio, nel trattamento commerciale del topazio blu, l'irradiazione iniziale genera centri blu e marroni. Un riscaldamento permette in seguito di sopprimere la componente bruna. Può essere anche che il trattamento non produca immediatamente il colore desiderato. Un riscaldamento sarà quindi necessario per «riassemblare» tutti gli in-

gredienti. Per esempio, in certi diamanti colorati per trattamento, le lacune create per irradiazione si spostano durante il riscaldamento per incontrare impurità di azoto, il che forma centri colorati.

Il cristallo nel suo insieme

Fino a questo punto, abbiamo descritto le cause del colore legate a strutture isolate di piccole dimensioni: un atomo, una molecola isolata, un gruppo di atomi. Tuttavia il colore di certe gemme risulta da processi che chiamano in causa tutto il cristallo.

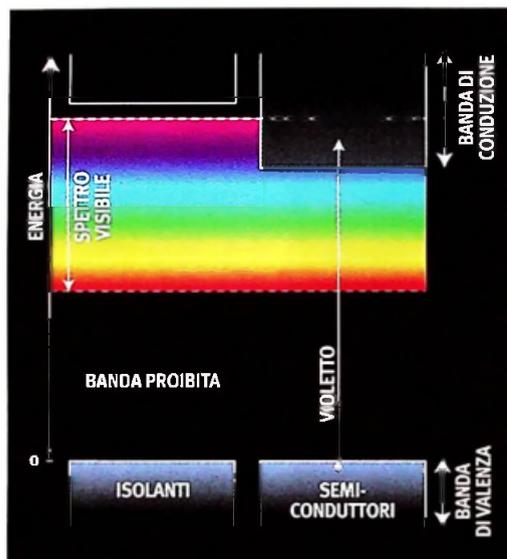
Gli elettroni di certe gemme sono delocalizzati in tutto il cristallo e producono colore per la loro interazione con la luce visibile. Una tale delocalizzazione è caratteristica dei metalli e dei semiconduttori. In questi materiali solidi, milioni di atomi condividono i loro livelli energetici. Questi livelli sono così numerosi e così ravvicinati che costituiscono «bande» di energia: una banda di valenza di bassa energia, dove formicolano gli elettroni, e una banda di conduzione di alta energia, generalmente vuota, salvo nei metalli. L'energia che separa queste due bande è caratteristica del materiale e si chiama banda proibita. Quando l'assorbimento di onde luminose produce energia a sufficienza, alcuni elettroni della banda di valenza possono saltare la banda proibita e raggiungere la banda di conduzione (così chiamata dal momento che gli elettroni di questa banda partecipano alla conduzione elettrica del materiale). In certi semiconduttori, il colore è dovuto non alle transizioni tra livelli energetici di atomi isolati, ma alle transizioni interbanda, vale a dire tra la banda di valenza e quella di conduzione. Quando l'energia della banda proibita è superiore al massimo di energia della luce visibile (corrispondente al violetto), quest'ultimo non fornisce energia a sufficienza per permettere a un elettrone di saltare la banda proibita. Pertanto, tutto lo spettro visibile viene trasmesso (non vi è alcun assorbimento) e, in assenza di impurità o di difetti, il minerale è incolore (e isolante elettrico): è questo il caso del corindone, del berillo, del quarzo, del diamante e del topazio. Quando la larghezza della banda proibita è inferiore a quella della luce violetta, le radiazioni di alta energia della luce visibile (dal violetto al verde) vengono assorbite, e le radiazioni di bassa energia trasmesse: i colori prodotti da queste trasmissioni interbanda vanno dal giallo intenso al rosso profondo. Il colore rosso della cuprite (CuO) e del cinabro (HgS) si spiegano in questo modo.

Quando la larghezza della banda proibita è inferiore alla più bassa energia delle radiazioni dello spettro visibile (il rosso), tutte le lunghezze d'onda della luce visibile provocano una transizione dalla banda di valenza alla banda di conduzione, di modo che tutto lo spettro visibile viene assorbito: il minerale è opaco, generalmente nero.

I diamanti puri hanno una banda proibita così larga che non presentano colore e conducibilità elettrica apprezzabili. In compenso, se vi sono impurità, alcune di esse creano livelli di energia tra la banda di valenza e quella di conduzione: il colore proviene allora da questi atomi. Il diamante giallo canarino deve il proprio colore ad atomi isolati di azoto, e una varietà blu di diamante ad atomi isolati di boro. L'azoto, che contiene sette protoni, si sostituisce facil-

Le proprietà elettriche e ottiche delle gemme dipendono dalla larghezza della banda proibita, che separa la banda di valenza (l'insieme degli stati fondamentali degli elettroni) dalla banda di conduzione (l'insieme degli stati eccitati). Quando la banda proibita è più larga dello spettro visibile (a sinistra) nessuna lunghezza d'onda del visibile può eccitare

gli elettroni, e tutti i colori vengono trasmessi: la gemma è incolore (se non possiede alcuna impurezza né alcun centro colorato) e isolante. Quando la banda di conduzione comincia all'interno dello spettro visibile, i raggi dal violetto al blu vengono assorbiti e permettono transizioni dalla banda di valenza a quella di conduzione (a destra).



mente al carbonio (sei protoni). Dato che l'azoto contiene un protone in più del carbonio, quando sostituisce un carbonio nel diamante (in proporzione circa 1 a 100 000) diviene un donatore di elettroni. Essendo data la differenza di energia tra questo livello donatore e la banda di conduzione, l'azoto favorisce transizioni che assorbono la luce visibile dall'ultravioletto fino al verde (circa 560 nanometri). Il colore trasmesso è pertanto un giallo intenso.

Il boro (cinque protoni) ha un elettrone in meno del carbonio e diviene un «accettore» di elettroni quando sostituisce un carbonio nel diamante. La sua presenza aggiunge alla struttura di bande del cristallo una nuova banda elettronica situata all'interno della banda proibita del diamante. L'eccitazione di un elettrone della banda di valenza del diamante verso un livello accettore del boro non richiede che una debole quantità di energia, nella regione dell'infrarosso. Essendo largo il livello di energia del boro, si osserva un assorbimento dell'infrarosso fino al limite del verde. Il colore blu intenso che ne risulta può essere provocato da una concentrazione di boro di una parte per milione solamente. Il diamante Hope è il più conosciuto dei diamanti blu. Nessun trattamento commerciale conosciuto condiziona le colorazioni prodotte dalle transizioni interbanda.

Gli effetti della luce

Tutti i colori visti finora erano dovuti a un assorbimento della luce. Il colore di certe gemme si produce anche per fenomeni di interferenza, di diffrazione e di diffusione della luce. Questi processi dipendono poco dalla composizione chimica della pietra; piuttosto sono dovuti alla struttura cristallina del minerale (inclusioni o lamelle).

Il fenomeno di interferenza più comune è l'iride-

scenza. Essa si produce nelle fessure di quarzo iride o nell'agata di fuoco. La diffrazione, altro tipo di interferenza, produce le zone di colore puro dell'opale. Questo minerale è costituito da un impilamento regolare, in strati paralleli, di minuscole sfere di silice idrata; la lunghezza d'onda diffratta dipende dalla dimensione delle sfere e dalla direzione di osservazione. Così, quando si muove la pietra, il colore cambia ed è questo che «rende viva» l'opale. Nessun trattamento commerciale finora conosciuto è in grado di creare un reticolo di diffrazione. In compenso, un fenomeno di diffrazione già esistente può essere ravvivato dalla presenza di un fondo scuro o riducendo la diffusione della luce nella matrice grazie all'impregnazione con diversi prodotti.

Quando la struttura interna della pietra è irregolare, la luce visibile non può essere diffratta. Può però essere diffusa, ossia deviata in direzioni differenti, con una maggiore efficacia per la luce blu. L'opale comune, le cui sfere di silice sono troppo piccole o impilate in modo troppo irregolare per diffrangere la luce, ha un aspetto bianco-azzurro, ma trasmette la luce arancione: è «opalescente». La «pietra di luna», un feldspato potassico, contiene lamelle di spessore nanometrico di feldspato sodico che diffondono la luce e conferiscono all'insieme una tinta «lunare» (negli esemplari migliori). Quando i centri diffusori sono di dimensioni superiori alle lunghezze d'onda della luce visibile, la luce viene diffusa in tutte le direzioni, compresa quella di osservazione, e si ricombina per produrre una luce bianca. I cristalli contenenti numerose inclusioni fluide (come il quarzo latteo), microcristalli incolori, microfratture, bolle eccetera hanno un aspetto traslucido e latteo.

L'ultimo tipo di colorazione delle gemme è dovuto al colore delle inclusioni in un cristallo ospite incolore o quasi. Per esempio, le inclusioni di ematite sono responsabili del colore dell'ortoclasio rosso o rosa e di quello di certe cordieriti (le ioliti «sanguigne»). L'opale di fuoco è colorata da inclusioni nanometriche di ossido di ferro. Quando le placchette sono abbastanza grandi da essere visibili a occhio nudo, come i cristalli di mica verde nel quarzo avventurina, scintillano quando si muove la pietra.

GLI AUTORI

EMMANUEL FRITSCH è professore al Servizio di formazione permanente dell'Università di Nantes e all'Istituto dei materiali «Jean Rouxel» (CNRS-IMN). È anche vice-presidente dell'Associazione francese di gemmologia.

GEORGE R. ROSSMAN è professore di mineralogia al Caltech di Pasadena, in California.

PER SAPERNE DI PIÙ

- NASSAU KURT, *Gemstone Enhancement*, Butterworths, 1984.
- FRITSCH E. e ROSSMAN G.R., *An Update on Color in Gems. Part 1: Introduction and Colors Caused by Dispersed Metal Ions*, in «Gems & Gemology», 23, n. 3, pp. 126-139, 1987.
- FRITSCH E. e ROSSMAN G.R., *An Update on Color in Gems. Part 2: Colors Involving Multiple Atoms and Color Centers*, in «Gems & Gemology», 24, n. 1, pp. 3-15, 1988.
- FRITSCH E. e ROSSMAN G.R., *An Update on Colors in Gems. Part 3: Colors Caused by Band Gaps and Physical Phenomena*, in «Gems & Gemology», 24, n. 2, pp. 81-102, 1988.
- BARIAND P. e POIROT J.-P., *Larousse des pierres précieuses*, Larousse, 1998.

Una tavolozza per il Paleolitico

Scoperte le tecniche di preparazione dei materiali che permettevano la decorazione delle grotte

Prelievo di un campione di pittura dal Grande toro nero di Lascaux.



CNP, Aujoulat

di Colette Vignaud, Marie-Pierre Pomies e Michel Menu

I pori dei cristalli di ematite trovati nella Grotta di Troubat (Hautes Pyrénées) rivelano l'origine artificiale del pigmento rosso (a sinistra). La fotografia realizzata nella Grotta di Niaux, in Ariège, mostra un segno rosso (a destra) prodotto mescolando ematite e granito macinato.

Le tracce lasciate dall'uomo preistorico sugli oggetti e le sue opere d'arte consentono di stabilire un sottile legame con il passato. Queste tracce, rivelate dalle analisi fisico-chimiche e dai metodi elaborati presso il Laboratorio di ricerca dei Musei di Francia (LRMF), rivelano metodi e tecniche usate 35 000 anni fa, nel Paleolitico superiore.

I pigmenti

Nel Paleolitico si incontrano essenzialmente due colori: il rosso e il nero. Il giallo e il bruno sono rari, il bianco sporadico. Il nero può essere organico (carbone minerale, carbone di legno o d'osso) oppure un ossido di manganese facilmente reperibile in natura. Il rosso proviene da un ossido di ferro, l'ematite, che abbonda nel suolo. Tuttavia la si può ottenere anche riscaldando goethite gialla (un idrossido di ferro) a oltre 250 °C. In parecchi siti, come la Grotta della renna di Arcy-sur-Cure (Yonne) o il giacimento di la Ferrassie (Dordogna), sono stati ritrovati, all'interno di focolari, nelle vicinanze o nelle ceneri, ossidi di

fra 11000 e 6500 anni a.C., sono stati rinvenuti blocchi di ematite. Dalle analisi sono risultati costituiti per il 25 per cento di goethite riscaldata.

Abbiamo prelevato campioni di colore rosso dalle opere parietali della Grotta di Lascaux (Dordogna), realizzate circa 20 000 anni fa, e da blocchi rossi ritrovati al piede delle pareti. La somiglianza dei cristalli conferma che i blocchi sono stati usati per realizzare le pitture, ma non sono state individuate tracce di riscaldamento dell'ematite: essa è molto pura e ha cristallizzato in lamine sottili di grande ampiezza, tipiche dell'accrescimento naturale di un ossido di ferro. Forse i pittori di Lascaux ignoravano la sintesi dell'ematite? Disponendo di pigmenti di qualità e della tonalità desiderata, non sentivano il bisogno di fabbricarla.

Additivi e leganti

Per modificare le proprietà dei pigmenti e migliorare la coesione, la capacità di coprire il supporto e la conservazione, si aggiungono additivi incolori. In molte pitture rupestri, i pigmenti macinati sono stati mescolati con argilla, talco, feldspati potassici o granito. Questi minerali, comuni in natura, conferiscono alla materia pittorica proprietà particolari: per esempio la biotite (una mica nera presente nel granito) dà un aspetto iridescente all'opera dipinta.

Gli uomini preistorici preparavano i colori in veri e propri laboratori, come quello scoperto nella Grotta della vacca, in Ariège, a poche centinaia di metri in linea d'aria da Niaux, sull'altra riva del Vicdessos. Oltre a preparare gli ingredienti della materia pittorica, li amalgamavano con un legante: olio o grasso vegetale o animale garantivano l'adesione dello strato di pittura al supporto.

Questi studi dei materiali pittorici dimostrano che gli artisti della preistoria avevano già l'aspirazione a oltrepassare la semplice rappresentazione del reale, poiché elaboravano la materia pittorica stessa: ampliavano la loro tavolozza, mescolavano i materiali e ottenevano molteplici sfumature; modificavano anche gli strumenti per applicare il colore, al fine di controllarne lo spessore e il grado di diluizione.



LRMF, Vignaud



GLI AUTORI

COLETTE VIGNAUD, MARIE-PIERRE POMIES e MICHEL MENU fanno parte del Centro di restauro e ricerca dei Musei di Francia.

ferro di diversi colori, fra il giallo e il rosso violaceo. Sono stati sintetizzati per scopi artistici?

L'ematite sintetica, ottenuta per riscaldamento, differisce da quella naturale: l'allargamento anomalo di molte righe di diffrazione dei raggi X rivela una minore regolarità dei cristalli di ematite sintetica; inoltre, nel corso del riscaldamento questi cristalli sintetici perdono molecole d'acqua, prima intrappolate in pori di qualche nanometro di diametro.

Nel sito di Troubat (Hautes Pyrénées), occupato

Il blu e il verde degli Egizi

I più antichi pigmenti di sintesi rivelano i loro segreti

di Sandrine Pagès-Camagna e Sylvie Colinart

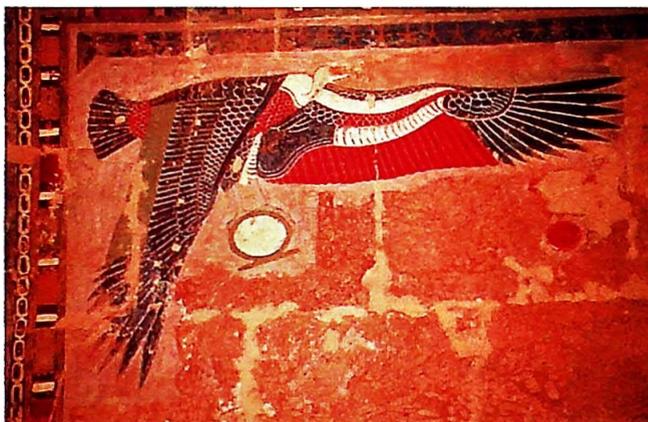
Sotto il sole sfolgorante sulle rive del Nilo, dove luce e ombra sembrano tagliate con il coltello, non esiste arte faraonica senza colore. L'architettura egizia doveva completare la creazione divina e quindi splendere di colori vivaci e significativi: «il Molto Verde» indicava il mare, «il Nero» l'Egitto, «il Muro Bianco» rappresentava il primo palazzo reale e così via.

Ciascun colore della tavolozza egizia associa un uso simbolico e uno naturalistico. La letteratura egizia descrive la capigliatura degli dèi come composta di lapislazzuli blu, e la poesia amorosa decanta la donna amata «dalle chiome di vero lapislazzulo», ossia con capelli neri dai riflessi bluastrì; e sui sarcofagi i capelli dei defunti sono dipinti di blu. Il verde della vegetazione accompagna ogni rinascita e trasmette il vigore, la forza e la buona salute; così un volto dipinto di verde è annuncio di resurrezione. Allo stesso modo, gli amuleti verdi forniscono la protezione desiderata.

L'analisi di blocchetti di pigmento grezzo e della policromia delle opere conservate al Dipartimento delle antichità egizie del Museo del Louvre ci ha permesso di precisare il processo di sintesi del pigmento blu egizio e di chiarire quello del verde.

Sfumature di blu

Uno dei più antichi pigmenti sintetici, il cosiddetto blu egizio è l'unico di questo colore impiegato nell'Egitto faraonico. La sua più antica testimonianza si trova nella stele-falsa porta di Mery, che proviene da Saqqara e risale alla metà della IV dinastia (verso il 2500 a.C.). Questo pigmento trovò ampia diffusione nell'Impero romano, ma il suo impiego cessò, senza ragione apparente, intorno al VII secolo d.C. Il nome di blu egizio è riservato al pigmento blu caratterizzato dalla presenza di specie cristalline formatesi nel corso del riscaldamento, e non si applica alle invetriature dello stesso colore, ma di struttura amorfa. Tuttavia, la «ricetta» per ottenere il blu egizio deriva dalle tecniche di invetriatura: consiste nel riscaldare fra 870 e 1100 °C, per parecchie ore, una miscela di composti calcarei, silicei e rameosi con un fondente sodico. Il risultato di questa cottura è una massa blu compatta ed eterogenea, che associa la cuprorivaite cristallina ($\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$, che dà il colore



Sandrine Pagès-Camagna

al pigmento) a resti silicei cristallizzati (quarzo e tridimite) in una fase amorfa che racchiude tutti i residui della cottura.

Le condizioni di riscaldamento generano tutta una serie di sfumature, dal blu scuro all'azzurro, ancora prima di macinare il prodotto. Perché conservi una bella tonalità, il pigmento viene macinato non troppo finemente e applicato in uno spesso strato. Sul sarcofago di Mesrè, proveniente dall'Alto Egitto e risalente alla fine della XVIII dinastia (verso il 1200 a.C.) il pittore ha giocato con la granulometria del pigmento per ottenere due toni di blu: chiaro, con grani di dimensione inferiore a 20 micrometri; e più intenso, con grani di circa 60 micrometri.

I segreti del verde egizio

Sostituito della malachite, il verde egizio è stato erroneamente descritto come un blu egizio colorato in verde per aggiunta di ferro. Altri ricercatori ritenevano che il verde egizio fosse il risultato di una cottura troppo prolungata della miscela destinata a preparare il blu egizio; in alternativa, si sarebbe ottenuto il verde per riscaldamento in atmosfera riducente.

In realtà, il colore verde veniva preparato cuocendo in atmosfera ossidante, fra 900 e 1150 °C, una miscela composta dagli stessi ingredienti che si usavano per il blu, ma con più sodio e meno rame. Per entrambi i pigmenti, il sodio poteva provenire dal natron (una miscela naturale di concrezioni saline) o da ceneri vegetali. La silice era fornita dalla sabbia, il calcio dalle rocce calcaree e il rame dai minerali o, in certe epoche, dal bronzo.

Il pigmento verde egizio è un miscuglio eterogeneo di residui silicei cristallizzati (quarzo, tridimite o cristobalite), di parawollastonite (CaSiO_3), che contiene il rame come impurezza, e da una prevalenza di materiale amorfo che conferisce il colore.

Come afferma Irtyzen, artigiano dell'XI dinastia (2030 a.C.), la trasmissione orale dei segreti di produzione spiega come nessuna ricetta sia giunta fino a noi. Sconosciuto nell'Antico Regno, il verde egizio appare a partire dal Primo periodo intermedio (2200-2030 a.C.) ed è in uso fino al Terzo periodo intermedio (1070-660 a.C.), ma è attestato solo sul territorio egiziano. Lo studio in corso rivela quindi molti altri misteri che attendono soluzione.

La dea Nekhbet, col piumaggio blu e verde, come è raffigurata nel Tempio di Hatshepsut, a Deir-el-Bahari.

GLI AUTORI

SANDRINE PAGÈS-CAMAGNA e **SYLVIE COLINART** fanno parte del Centro di ricerca e restauro dei Musei di Francia. Lo studio di cui si parla in questa pagina ha ricevuto un premio dalla Fondazione l'Oréal.

Dai pigmenti alla pittura

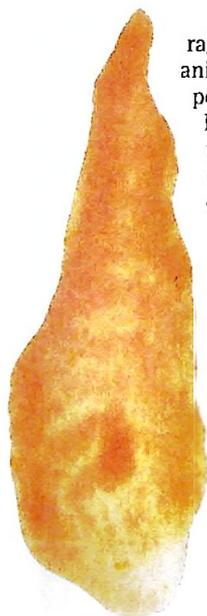
di François Perego

La preparazione e la valorizzazione dei colori richiedono qualche conoscenza specifica e... un po' di pazienza



F. Perego

Tre pigmenti naturali: a destra, il pigmento laccato su allumina di verga d'oro (un giallo estratto dalle foglie di *Solidago virgaurea*); sopra, il carminio di cocciniglia; in alto a destra, l'indaco naturale.



I pittori fino al XVIII secolo conoscevano solo una quarantina di pigmenti, e non ne utilizzavano che una ventina: eppure, quali straordinari colori animano i loro quadri, affreschi e miniature! All'epoca, i procedimenti di fabbricazione si avvicinavano più alla cucina che alla chimica ragionata, e la maggior parte dei prodotti utilizzati da Rubens e dai pittori a lui contemporanei era ancora di origine naturale.

Poi, a partire dal XIX secolo, la situazione si inverte e si va verso il «tutto sintetico». Utilizzare per dipingere i colori offerti dalla natura è una possibilità ovvia e attraente. La polpa dei lamponi o i petali dei fiori fanno immaginare tinte smaglianti, ma saremmo delusi se tentassimo di estrarne i coloranti per preparare pigmenti: i loro colori sono essenzialmente dovuti a due classi di molecole, i carotenoidi e i flavonoidi (fra i quali vi sono gli antocianati), che hanno una resistenza molto scarsa alla luce. Le piante hanno tuttavia fornito ai pittori gialli e rossi magnifici (in particolare le lacche di guado, di ramno, di quercitrone e di garanza o robbia), nonché il blu di indaco. Solo quest'ultimo e la lacca di garanza resistono però in maniera

ragionevole alla luce. Anche il regno animale è stato ampiamente sfruttato per ottenere pigmenti: per esempio, la porpora antica, tratta da diversi molluschi gasteropodi marini, il carminio, estratto dalla cocciniglia del nopale (e tuttora utilizzato come colorante alimentare), il seppia, prodotto dall'animale dello stesso nome, e il giallo indiano, derivato dall'urina di vacche nutrite con foglie della pianta del mango.

I pittori hanno sfruttato ancora più ampiamente il regno minerale: dal carbone e dalle terre diversamente colorate (la maggior parte delle quali deve la propria tonalità al ferro) fino ai colori più vivaci come il cinabro (solfuro rosso di mercurio), l'azzurrite, la malachite (entrambe carbonati ba-

sici di rame), il realgar, l'orpimento (due solfuri di arsenico), il lapislazzuli e così via.

I primi pigmenti sintetici erano anch'essi di origine minerale: il bianco di piombo (biacca) è noto da almeno 2500 anni. Il procedimento di preparazione è rimasto quasi immutato fino all'inizio del XIX secolo: si ponevano lamine di piombo in vasi dal fondo ricoperto di aceto e un gran numero di questi vasi, coperti, era posto sotto un mucchio di letame; i vapori dell'aceto reagivano con l'ossido di piombo superficiale; dopodiché, a contatto con il biossido di carbonio liberato dal letame, l'acetato basico di piombo si trasformava in carbonato basico di piombo (la biacca, appunto). Le materie prime dei pigmenti sintetici del passato erano sovente molto semplici: ancora l'aceto o vinacce, fatti reagire con lamine di rame, servivano a preparare il verderame (un acetato basico di rame, e non il carbonato idrato che si deposita sul metallo in ambiente umido). A sua volta il verderame, riscaldato con l'oleoresina che trasuda dal pino, dà un resinato di rame dal bellissimo colore verde smeraldo trasparente.

I colori nascosti

La garanza contiene coloranti derivati dall'antrachinone. Nelle radici della pianta questi composti sono presenti in forma di glicosidi, cioè legati a un gruppo zuccherino. Due coloranti antrachinonici derivati dalla garanza erano di particolare interesse per i pittori: l'alizarina e la porporina. L'1,2 diidrossiantrachinone (alizerina) fu sintetizzato nel 1869 da Karl Graebe, Karl Liebermann e Heinrich Caro della Badische Anilin, con effetti disastrosi per i coltivatori del Midi francese e dell'Alsazia. La porporina, o 1,2,4 triidrossiantrachinone, meno abbondante dell'alizerina nella lacca di garanza naturale, le conferisce la caratteristica fluorescenza arancione.

Non è difficile preparare una lacca di garanza: bisogna avere a disposizione la pianta (si coltiva facilmente in giardino) o acquistarla in un'erboristeria con il nome di radice di *Rubia tinctorum*, o *R. perigrina*. Dopo aver fatto seccare e invecchiare la radice (il risultato è migliore perché la decomposizione dei glicosidi inizia già durante l'invecchiamento), seguiremo una ricetta del XIX secolo, traducendola in termini di chimica moderna. Dapprima, è necessario «staccare» il derivato antrachinonico dal gruppo zuccherino tenendo la radice, ridotta a piccoli pezzi, in acqua tiepida (40-50 °C) leggermente acidificata con l'1 per cento di acido cloridrico, per uno o due giorni (si può anche provocare un'idrolisi enzimatica con il lievito di birra; questa reazione produce un derivato alcolico di garanza che un tempo veniva bevuto). In un secondo momento si deve eliminare un composto colorante giallo fulvo, abbondante e deleterio per la bellezza e la solidità del colore finale, bagnando dapprima il materiale vegetale con acqua tiepida



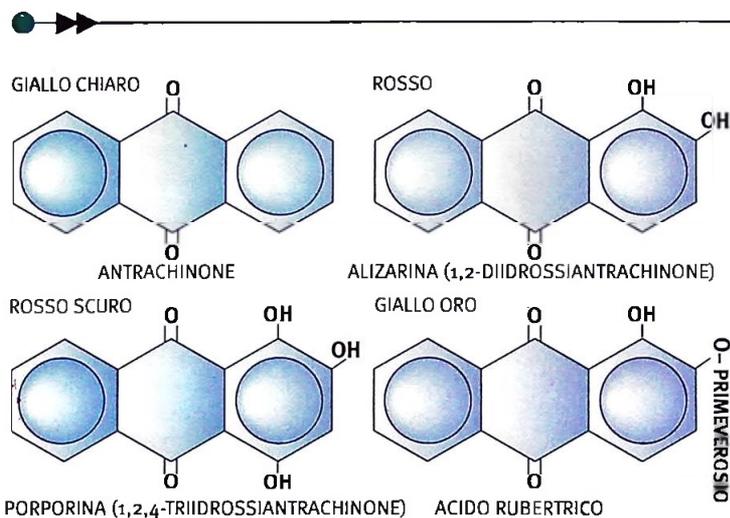
Questa lamina di piombo, esposta a vapori di acido acetico e di biossido di carbonio in presenza di aria e umidità, si è coperta di uno strato di carbonato basico di piombo (bianco di piombo, chiamato anche biacca), pigmento senza il quale la stessa pittura a olio non avrebbe potuto esistere.

leggermente alcalinizzata con un poco di carbonato di sodio, e poi lavandolo con acqua pura fino a che questa non smetta di colorarsi.

La radice è allora pronta per l'estrazione dei principi coloranti. La si immerge in una soluzione calda di allume di potassio (solfato doppio di alluminio e potassio) al 12 per cento, e ben presto si vede il liquido assumere la tinta di uno sciroppo di granatina. Si riscalda ora moderatamente per 1-2 ore al fine di estrarre dalle radici il colorante, che però non è utilizzabile tal quale. Si sfrutta dunque la proprietà dell'allumina di adsorbire varie molecole e il fatto che l'alizerina forma complessi intensamente colorati

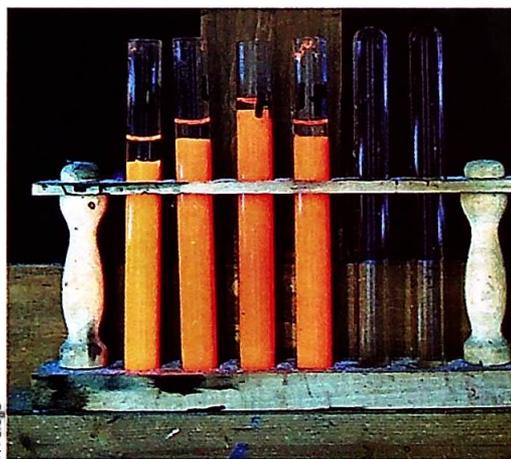


La radice (in basso a destra) della garanza o *Rubia tinctorum* (al centro) contiene coloranti, e principalmente l'alizerina e la porporina. A partire da questa radice secca, si prepara un pigmento laccato rosso (la polvere nel vetro d'orologio) che si impiega per realizzare un colore a olio (in basso al centro).



Formule dell'antrachinone, dell'alizarina, della porporina e dell'acido rubertrico. Ciascun esagono con un cerchio inscritto rappresenta un anello benzenico, formato da sei atomi di carbonio. Il colore dipende dalla struttura della molecola, e in particolare dai gruppi laterali.

Sotto una lampada ultravioletta, è ben visibile la fluorescenza arancione caratteristica di quattro lacche di garanza preparate con procedimenti diversi. Essa è dovuta alla porporina, in quanto l'alizarina non è fluorescente.



ti con numerosi metalli (alluminio, calcio eccetera). Mescolando la tintura di garanza con una soluzione di carbonato di sodio, precipita una magnifica «lacca» (per evitare confusioni, si dovrebbe dire pigmento laccato): allumina insolubile si forma per reazione del solfato di alluminio presente con il carbonato di sodio e, simultaneamente, il colorante è estratto dalla soluzione per adsorbimento sui grani di allumina. A questo punto basta lavare più volte il precipitato con acqua pulita, filtrare e asciugare.

Il principio di adsorbimento da parte dell'allumina (o di altri precipitati) si applica a vari coloranti, come quello che si estrae facendo cuocere i carciofi in acqua. L'aggiunta di allume, e poi di carbonato di potassio, provoca la precipitazione di un pigmento laccato giallo analogo a quello prodotto a partire dal guado, una pianta un tempo coltivata per la sua tintura gialla «solida», vale a dire resistente alla luce (un concetto questo molto relativo).

Dai colori in polvere alla pittura

I pigmenti non sono di norma utilizzabili direttamente. I colori per dipingere vengono preparati di-

spendendo i pigmenti in un legante, come l'uovo, l'olio di lino o una soluzione di gomma arabica nel caso delle tecniche tradizionali, e poi eventualmente allungando con un diluente. Tuttavia, non bisogna credere che sia sufficiente tritare un poco di pigmento con un legante: se talvolta accade che il colore così ottenuto sia direttamente utilizzabile, nella maggior parte dei casi un simile prodotto non ha i requisiti voluti (consistenza, potere colorante, opacità o trasparenza, o anche una certa sfumatura); per di più, le sue caratteristiche non sono stabili. Inoltre, poiché certi pigmenti sono molto costosi o troppo coloranti, li si mescola con pigmenti incolori e trasparenti che non contribuiscono direttamente né al colore né all'opacità della pellicola pittorica. Per esempio, il blu di ftalocianina è così intenso che, se viene utilizzato puro, ha un tono addirittura nerastro anziché blu. Perciò, per comprendere come mai i colori già pronti sono sovente superiori alle preparazioni «fatte in casa», bisogna approfondire la microstruttura dei pigmenti.

Questi ultimi sono polveri colorate o incolori, insolubili nel mezzo in cui vengono dispersi, cosa che li distingue dai coloranti, i quali invece sono sempre solubili (inchiostro da stilografica, eosina, mercurocromo e così via). In questo articolo ci interesseremo solo dei pigmenti, e non dei coloranti; inoltre ci concentreremo sulla pittura a olio.

Per ottenere un colore bisogna disperdere le particelle di pigmento nel legante (l'olio), che è idrofobo. Anche certi pigmenti sono idrofobi, ma taluni tendono a essere idrofilo: in altri termini, l'energia di superficie tra una particella di pigmento e l'olio è sovente elevata. Si riesce tuttavia a disperdere i pigmenti negli oli con l'apporto di energia meccanica, attraverso la cosiddetta «macinazione» dei colori.

Al microscopio si può osservare come si comportano le particelle nel corso di questo processo: all'inizio le particelle primarie di pigmento sono sovente unite, con una faccia in comune, il che porta alla formazione di aggregati compatti (la superficie di un aggregato è minore della superficie totale delle particelle componenti). Le particelle primarie possono anche unirsi avendo, come unici punti di contatto, angoli o spigoli, allo stesso modo di un mucchio disordinato di mattoni; si parla allora di agglomerati, la cui superficie è vicina alla superficie totale delle particelle primarie. Anche gli aggregati possono associarsi in agglomerati. La grandezza media delle particelle primarie varia da pigmento a pigmento: va normalmente da 13 nanometri a 10 micrometri, e può arrivare a 60 micrometri per gli additivi e i pigmenti naturali, soprattutto quelli antichi.

La «macinazione» ha come scopo la dispersione delle particelle di pigmento; nel corso dell'operazione le particelle primarie vengono spezzate e divise. Questa modificazione della grandezza delle particelle può essere voluta o evitata a ogni costo (per esempio nel caso di pigmenti che abbiano ricevuto un trattamento superficiale). Lo spezzettamento delle particelle ne aumenta considerevolmente la superficie totale: se, per esempio, si divide un cubo di un centimetro di lato in cubetti di un micrometro di lato, si ottengono 1000 miliardi di cubetti, e la superficie totale passa da 6 centimetri quadrati a 6 metri quadrati.

rapporti con l'esterno

Se ci si limita a formare una pasta amalgamando il pigmento e l'olio con una spatola, il colore contiene aria occlusa e, soprattutto, le particelle di pigmento sono mal disperse. La «macinazione», grazie alle forze di taglio che esercita, permette una buona dispersione del pigmento e un perfetto umettamento da parte del legante; nel contempo l'aria occlusa viene eliminata. La moletta, un pestello circolare di materiale duro e munito di manico, è lo strumento più antico utilizzato per la macinazione dei colori. Bisogna anche badare a ottenere una viscosità adeguata: l'ideale è una pasta densa, di cui si può regolare la viscosità sulla tavolozza per aggiunta di un diluente.

Tuttavia, miscelando polveri come i pigmenti, si possono avere sorprese, come ben sanno i muratori: se si mescolano 700 litri di ghiaia, 450 litri di sabbia, 350 di cemento e 20 di acqua, non si ottengono 1520 litri di calcestruzzo (pari alla somma dei volumi) ma solo 1000, perché la sabbia si è inserita negli interstizi della ghiaia, il cemento è entrato negli spazi liberi e l'acqua ha sostituito l'aria rimanente. Si

può sfruttare questo fenomeno per ridurre la quantità d'olio necessaria per disperdere un pigmento di granulometria abbastanza elevata, come il nero avorio, il viola di cobalto chiaro, il verde di cobalto scuro, o il rosso di solfuro di cerio? Si può aggiungere un poco di pigmento molto fine senza che la pasta perda la propria coesione?

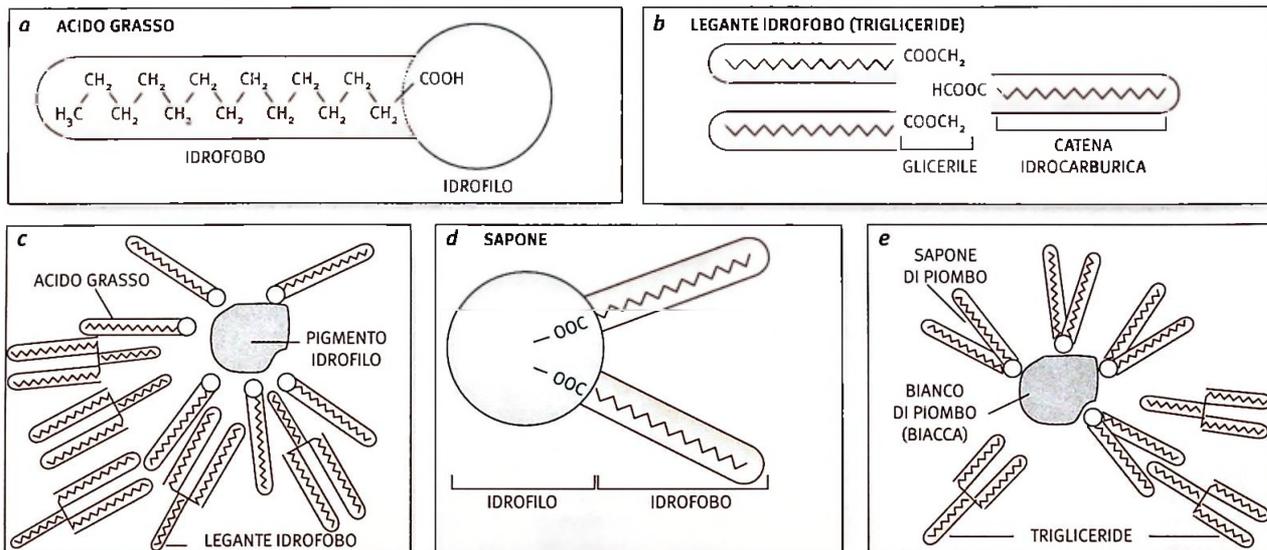
Facciamo una prova: prepariamo una pasta di rosso di solfuro di cerio triturando il pigmento con la spatola insieme con l'olio, poi macinando questa pasta densa con la moletta, su una lastra di vetro levigata. Cerchiamo quindi di introdurre con la spatola un volume di silice finissima pari a circa due terzi di quello della pasta stessa: dapprima la pasta si riduce a polvere appiccicosa, dato che la silice «ruba» l'olio libero al colore. Tuttavia una macinazione energica con la moletta finisce per comprimere i grani sottili di silice negli interstizi fra i grani del pigmento, e ci si ritrova di nuovo con una pasta, benché più soda di quella iniziale. È però indispensabile partire dal pigmento in polvere e non da un colore già pronto, perché il fabbricante può aver aggiunto al prodotto additivi o adiuvanti che falserebbero la prova.



F. Perego

Il solfuro di cerio è utilizzato come pigmento rosso. Per ottenere un colore, si disperde la polvere con olio (a); amalgamando con una spatola si ottiene una pasta (b), la quale, «macinata» con una moletta (lo strumento in vetro visibile in b e c), diventa più fluida. Se si unisce a questa pasta una quantità pari a due terzi del suo volume di silice estremamente fine (d, a sinistra nella palette), si ottiene dapprima una miscela polverulenta. Una macinazione energica permette di compattare meglio i grani del solido (e): l'olio presente è di nuovo sufficiente per formare una pasta (benché più soda).





Gli acidi grassi (a) hanno una parte idrofoba (catena idrocarburica, in giallo) e una idrofila (in blu): sono cioè anfifili («che amano entrambi i lati»). Tali molecole possono fungere da collegamento fra due ambienti ad affinità opposte, qui un pigmento idrofilo e un legante idrofobo (b, c). I saponi hanno questa proprietà in maniera marcata (d). I saponi di cationi bi- o trivalenti (calcio, piombo, alluminio) favoriscono le emulsioni «acqua in olio» (e): le molecole formano micelle, in cui la testa idrofila (e l'acqua) è all'interno, e la coda idrofoba (e l'olio) all'esterno. I saponi di cationi monovalenti (sodio, potassio, ammonio) favoriscono invece le emulsioni «olio in acqua».

Per fluidificare

La prova dell'assorbimento dell'olio determina la quantità minima di legante (in questo caso olio di lino) necessaria per ottenere una pasta con un dato pigmento. A questo scopo, si aggiunge progressivamente olio di lino a 100 grammi di pigmento e si amalgama con una spatola fino a ottenere una pasta morbida che non aderisce alla lastra di vetro.

Al di là di questa soglia, poche gocce in più fluidificano considerevolmente la pasta. Si può osservare un effetto analogo quando si fanno aderire l'una all'altra due lastre di vetro inumidite e ben sgocciolate, separate dunque solo da una sottilissima pellicola di liquido: è molto difficile staccarle a causa delle forze di capillarità che si esercitano tra il vetro e l'acqua. Ma se si inietta un poco d'acqua tra le due lastre, le si può far scivolare facilmente perché le forze di capillarità diventano minori. Questa proprietà si applica ai colori: il fenomeno è semplicemente trasposto alla scala dei grani di pigmento.

Questo è anche il motivo per cui quanto più una polvere è fine, tanto più è facile ottenere una pasta densa. Si può sperimentare questo effetto con il sale fino da cucina: se si cerca di disperderlo in olio, è difficile ottenere una pasta che stia insieme, perché i grani sono troppo grandi per ammassarsi a sufficienza. Invece, se si macina finemente questa pasta con l'aiuto di una moletta, essa si addensa via via che i grani si riducono di dimensioni perché, grazie all'aumento della superficie, la quantità di liquido fra i grani diminuisce quanto basta perché le distanze siano piccole e le forze di tensione superficiale elevate.

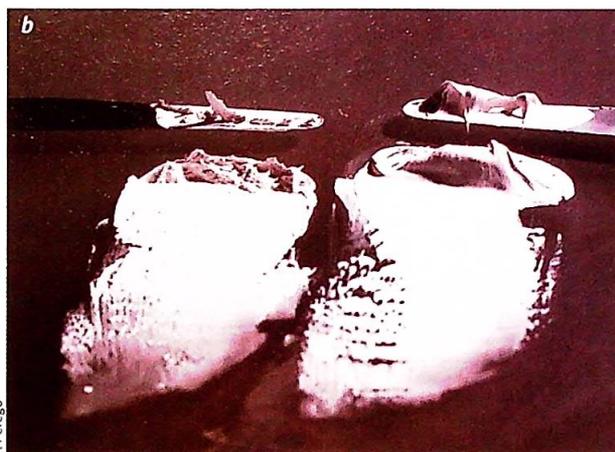
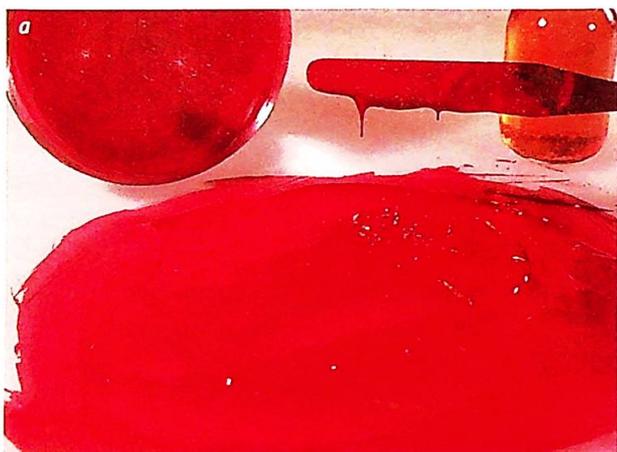
Si avrà lo stesso effetto con qualunque olio? Gli antichi trattati di pittura consigliano a volte di utilizzare olio invecchiato per macinare i colori. Effettivamente, l'ossigeno atmosferico ossida l'olio (che è essenzialmente composto da trigliceridi, ossia esteri costituiti da glicerolo e da tre molecole di acidi grassi, identiche o differenti tra loro). Gli acidi grassi presenti negli oli siccativi (vale a dire in quelli che presentano la proprietà di formare una pellicola solida una volta esposti all'aria) sono per la maggior

parte insaturi (la loro struttura include cioè parecchi legami doppi fra atomi di carbonio). L'ossidazione provoca il taglio dei legami doppi, cosa che dà origine, fra l'altro, alla formazione di acidi grassi. Il gruppo carbossilico -COOH, acido e idrofilo, che questi recano a un'estremità, modifica l'energia superficiale: esso si lega ai pigmenti idrofili, mentre la catena idrocarburica, idrofoba, «si ancora» nelle molecole d'olio circostanti. In tal modo, gli acidi grassi si rivelano agenti umettanti e disperdenti assai efficaci.

Saponi e dispersioni

Per verificare questa descrizione teorica, prepariamo dapprima un acido grasso immergendo del sapone in aceto riscaldato a bagnomaria: il liquido che galleggia è costituito dagli acidi grassi del sapone. Aggiungiamo una traccia di questo liquido alla pasta densa di solfuro di cerio che abbiamo preparato in precedenza. Un breve trattamento con la moletta fluidifica la pasta in maniera sorprendente: prima sembrava satura di pigmento, ma l'aggiunta di acido grasso dimostra che ne può ricevere dell'altro. È possibile che questo effetto sia legato alla qualità del pigmento?

Rifacciamo l'esperimento con un pigmento che si disperda bene, come la biacca. Dispersa in olio di lino fresco e neutro, questa dà un risultato deludente: una pasta troppo granulosa. Tuttavia una punta di acido grasso basta a darle fluidità, e anzi un'untuosità particolare, da un lato a causa dell'effetto umettante di cui abbiamo parlato prima, ma anche perché gli acidi grassi reagiscono con la biacca formando saponi, che sono ottimi disperdenti. Così, come indica una vecchia ricetta, si può cominciare a formare una pasta di biacca e acqua, il che permette fra l'altro di evitare di inalare la polvere tossica a base di piombo; in seguito si aggiunge progressivamente olio rimescolando il bianco. L'olio sostituisce l'acqua; solo una parte di questa rimane imprigionata sotto forma di emulsione, vale a dire di goccioline d'acqua circondate da molecole dette tensioattive e disperse nell'olio. Si ottengono così colori di consi-



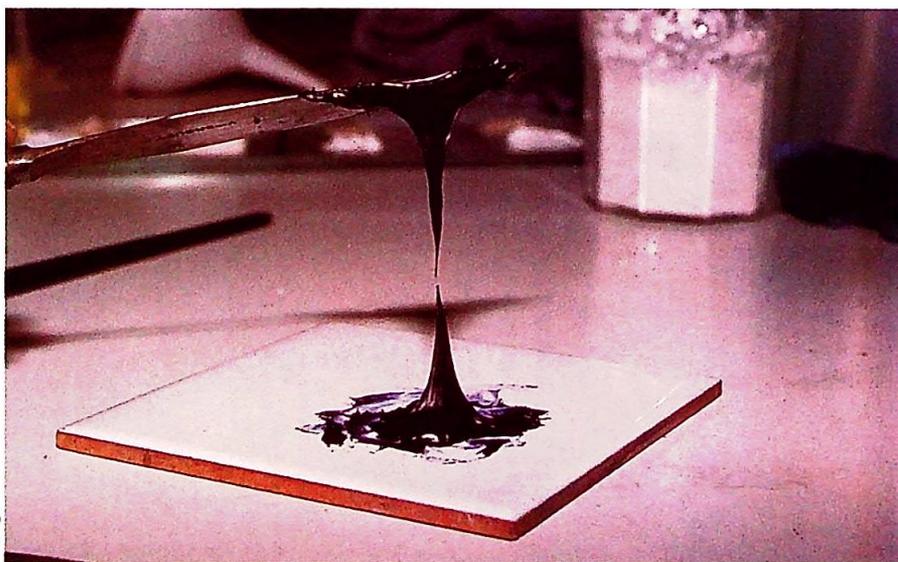
Quando si mescola una quantità minima di acidi grassi alla pasta densa di solfuro di cerio preparata macinando semplicemente il pigmento con olio, si ottiene una pasta nettamente più fluida, in cui si può introdurre altro pigmento (a). Nello stesso modo si può fluidificare la biacca, con risultati migliori della dispersione in olio, che assume una colorazione giallastra (b).

senza cremosa e senza eccesso d'olio, il che facilita l'essiccazione: al grafismo preciso e incisivo di certi quadri antichi contribuisce forse anche l'utilizzo di questi bianchi.

Mettere in gabbia il blu oltremare

La dispersione dei pigmenti può però riservarci altre sorprese. Per esempio, il blu oltremare (forma artificiale del lapislazzuli, un silicato di alluminio che contiene zolfo e sodio), benché si disperda facilmente nell'olio, manifesta un comportamento particolare: quando si prepara una pasta di blu oltremare come abbiamo fatto per determinare l'assorbimento d'olio, e in seguito alla macinazione con la moletta, si ottiene molto presto una pasta densa e soda, ma che, lasciata a riposo, si liquefa al punto da colare dalla spatola. Si può aggiungere ancora un po' di pigmento e riprendere la macinazione, ma, nonostante un aumento della consistenza, essa rimane inadatta per la pittura a olio. Alla fine, se si continua ad aggiungere pigmento, si ottiene una pasta estremamente viscosa, che forma fili quando la si tira, ma che riprende poi subito la sua consistenza iniziale. I pittori e i fabbricanti di colori hanno cercato di ovviare al comportamento indesiderabile di questo pigmento mediante un artificio: hanno gelificato l'olio attraverso l'aggiunta di cera. Questo sistema è adeguato quando si ha a che fare con un pigmento idrofilo? (Per la sua struttura zeolitica, una polvere fine di blu oltremare adsorbe fino al 2 per cento in peso d'acqua.) Una silice pirogenata, come quella citata in precedenza, o un silicato di alluminio, entrambi idrofili, si rivelano altrettanto efficaci (e meno problematici per la tenuta della pellicola pittorica).

Terminiamo questo panorama di comportamenti strani esaminando il caso del carbonato di calcio, che è naturalmente idrofilo, ma che si può rendere idrofobo: è sufficiente disciogliere un grammo di acido stearico (o altro acido grasso saturo con 12, 14 o 16 atomi di carbonio) in 50 millilitri di alcool a 96 gradi intiepidito. Immergiamo 100 grammi di pigmento in questo liquido, per formare una pasta, ag-



Il pigmento blu oltremare (un silicato di alluminio che include zolfo e sodio) macinato con l'olio dà una pasta soda, persino dura, ma che si liquefa a riposo (un fenomeno inverso a quello delle sabbie mobili, detto «dilatanza»). La pasta stirata rapidamente si comporta come un fluido iperviscoso. Poco dopo il cessare della sollecitazione, queste stalattiti e stalagmiti di colore si liquefanno e cadono.

giungendo alcool se necessario. Amalgamiamo, lasciamo evaporare l'alcool, poniamo la polvere in un boccale aperto nel cestello di una pentola a pressione, sospeso sopra alcuni centimetri d'acqua. Riscaldiamo in modo che la preparazione «cuocia» per un'ora: l'acido grasso reagisce con il carbonato di calcio per formare, alla superficie dei grani, un sapone idrofobo.

Un carbonato di calcio così trattato manifesta un comportamento ben diverso da quello del prodotto d'origine: si disperde più facilmente nell'olio, mentre la sua dispersione in ambiente acquoso è nettamente più tixotropica (si fluidifica in seguito a una sollecitazione, per riprendere la viscosità iniziale a riposo, come le sabbie mobili).

L'AUTORE

FRANÇOIS PEREGO è restauratore di quadri e compie ricerche sulle tecniche e sui materiali utilizzati nelle arti grafiche.

L'introduzione dei coloranti sintetici

di Georges Bram e Nguyễn Trong Anh

L'innovazione tecnologica nel passato non era meno rapida di oggi, e alcune società «nuove arrivate» nel settore chimico ebbero grande successo inaugurando la rivoluzione dei coloranti sintetici, che in pochi anni soppiantarono quelli naturali



Unità di produzione della BASF a Ludwigshafen, sulle rive del Reno, alla fine del XIX secolo. All'epoca, l'industria chimica produceva 600 tonnellate di indaco artificiale all'anno, mentre

la produzione annuale di indaco naturale era di 10 000 tonnellate. Nel 1911, la situazione era rovesciata: 870 tonnellate di prodotto naturale contro 22 000 di indaco artificiale.

Nel XIX secolo lo sviluppo della chimica fu all'origine di quello dell'industria tessile europea, con la produzione di nuovi detergenti per sgrassare le fibre, dell'acqua di Javel (ipoclorito di potassio) per sbiancarle e così via. Parallelamente, la sintesi di tutta una gamma di coloranti sintetici diede origine alle industrie chimica e farmaceutica moderne. Prima degli anni cinquanta dell'Ottocento, i soli coloranti utilizzati erano di origine vegetale o animale. In Francia la coltivazione della garanza o robbia, da cui si estrae un colorante rosso, prosperava in Alsazia e faceva la fortuna di Vacluse. L'indaco per il blu, il legno di campeggio per il nero, l'orcanetto per il rosso aranciato e la cocciniglia per il rosso erano alcuni dei prodotti importati in quantità crescente dal mondo intero. Nelle sue *Memorie*, Sir Arthur Conan Doyle osservò che nel 1881 il prezzo di un sacco di cocciniglia corrispon-

deva a circa due anni del suo stipendio di medico della marina mercantile.

Per ottenere altri colori, i chimici cercarono dapprima di modificare i prodotti naturali. Così, uno dei primi coloranti sintetici, il muresside, venne preparato per reazione di acido urico con acido nitrico. Il nome ricorda la porpora dell'antichità, o «porpora di Tiro», che veniva estratta da un mollusco, il murice. Il muresside e le sue proprietà coloranti erano noti già alla fine del XVIII secolo, ma la sua preparazione fu per lungo tempo impedita dalla scarsità dell'acido urico, che doveva essere estratto dall'urina di mammiferi, soprattutto carnivori. Nel 1835 il guano del Perù cominciò a essere importato in Europa. Utilizzato come fertilizzante, si rivelò anche una comoda fonte di acido urico, il che permise, a partire dalla metà del secolo, la produzione industriale di muresside in Francia. Questo colorante ebbe un grande successo: lo si presentava come la porpora di Tiro riscoperta, e dimostrazioni di tintura furono organizzate alle Tuileries, al cospetto di Napoleone III. Nonostante tutto, il guano era ancora costoso, e il muresside subì ben presto la concorrenza della nuova generazione di coloranti preparati a partire dal catrame, sottoprodotto dell'industria del gas per l'illuminazione; già nel 1863 la sua produzione era divenuta trascurabile.

Dal catrame ai coloranti

La fabbricazione del gas illuminante per distillazione del carbone fossile lasciava un residuo, il catrame, di cui non si sapeva che fare. Solo piccole quantità servivano nella manifattura delle funi per la Marina, nel calafataggio delle navi, nel rivestimento dei tetti dei capannoni industriali o come combustibile nelle fabbriche del gas.

Negli anni quaranta dell'Ottocento, i chimici valorizzarono il catrame ottenendone per distillazione un gran numero di prodotti, fra cui il benzene, il naftalene, l'antracene e così via. Questi composti, fino ad allora poco conosciuti, divennero le materie prime dell'industria dei coloranti. Per parecchi anni il prodotto più importante fu l'anilina, un derivato benzenico prima ottenuto in piccole quantità per distillazione del catrame, ma che in poco tempo fu preparato industrialmente a partire dal benzene stesso.

Due chimici ebbero un ruolo preponderante nel successo dei coloranti sintetici: August Wilhelm

Hofmann (1818-1892) e l'inglese William Henry Perkin (1838-1907), che studiò sotto la guida di Hofmann dal 1853 e divenne, nel 1856, suo assistente al Royal College of Chemistry di Londra.

Già nel 1849 Hofmann aveva sottolineato l'importanza della sintesi del chinino a partire da prodotti del catrame di carbone fossile. Allora il paludismo era una malattia diffusa in Europa e il chinino, solo rimedio efficace conosciuto, veniva estratto dalla corteccia di china, importata con alti costi dall'America Meridionale. Le truppe inglesi impegnate nelle Indie ne facevano amplissimo uso.

Nel piccolo laboratorio ricavato nella dimora di famiglia, il giovane Perkin si dedicò, durante le vacanze di Pasqua del 1856, alla sintesi del chinino, di cui allora si conosceva soltanto la formula bruta, $C_{20}H_{24}O_2N_2$. Ragionando, come egli stesso poi raccontò, «per addizione e sottrazione», Perkin notò che si otteneva la stessa formula bruta moltiplicando per due quella di un derivato dell'anilina, l'allitolidina ($C_{10}H_{13}N$), aggiungendo al prodotto due atomi di ossigeno e togliendone due di idrogeno (per esempio, due allitolidine e tre ossigeni darebbero una molecola di chinino e una di acqua).

Ovviamente, in questo modo si ottiene il giusto numero di atomi di ciascuna specie, ma niente prova che siano disposti nel modo esatto. Con grande abilità, Perkin fece reagire l'allitolidina con bicromato di potassio, un agente che apporta ossigeno (cioè un ossidante). Il precipitato rosso-bruno che si ottiene non è chinino. Perkin avrebbe potuto fermarsi qui, ma fortunatamente era più interessato alla chimica che al chinino, e decise di studiare l'ossidazione dell'anilina, la cui formula C_6H_7N non ha alcun particolare rapporto con quella del chinino stesso. Questa volta ottenne un precipitato nerastro che si scioglieva parzialmente in alcool dando una splendida colorazione porpora. Il prodotto solido isolato si rivelò un ottimo colorante per diversi tessuti e prese il nome di porpora di anilina, malva o malveina. Altri chimici avevano notato che l'anilina si colorava in presenza di ossidanti, ma il merito di Perkin fu di aver isolato il colorante e di



Fotografia Musée de l'Armée, Paris

A partire dal 1835, i pantaloni dei fanti dell'Esercito francese furono tinti di rosso con la garanza naturale. Questa pratica durerà fino all'inizio della prima guerra mondiale.

Hofmann, fiancheggiato da Graebe e Liebermann: costoro, insieme con Caro, furono i primi a sintetizzare l'alizarina, il principio colorante della garanza.

August Wilhelm Hofmann (1818-1892)



Il precursore della chimica dei coloranti della seconda metà del XIX secolo iniziò studi di diritto e lingue a Giessen, la sua città natale, ma ben presto si orientò verso la chimica seguendo i corsi di Liebig che, dal 1824, era professore in quella università. Studiò le proprietà del catrame di carbon fossile e particolarmente quelle dell'anilina, argomento sul quale discusse la tesi nel 1841. Su iniziativa del principe Alberto, marito della regina Vittoria, nel 1845 fu nominato direttore del Royal College of Chemistry a Londra.

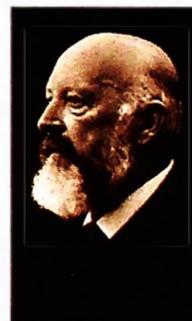
Il primo colorante sintetico venne preparato da Perkin, ma Hofmann è considerato come l'iniziatore di questo settore di ricerca. Scopri una nuova classe di coloranti derivati dall'anilina, i «viola Hofmann», che ebbero una certa importanza. Nel 1865 tornò in Germania dove tenne la cattedra di chimica all'Università di Berlino. La sua influenza fu decisiva per la chimica inglese e tedesca.

Johann Friedrich Wilhelm Adolf von Baeyer (1835-1917)

Baeyer sostenne la tesi di dottorato nel 1858 a Berlino, dopodiché occupò un modesto posto di insegnante in questa città fino al 1872. Dopo l'annessione dell'Alsazia da parte della Germania, fu nominato professore a Strasburgo.

La sua opera è diversificata e importante. Oltre all'indaco, sintetizzò numerosi coloranti della serie delle fluoresceine e delle ftaleine.

Nel 1864 preparò l'acido barbiturico, le cui proprietà ipnotiche non furono identificate fino al 1903. Sono state proposte due spiegazioni per il nome: secondo alcuni, l'acido barbiturico sarebbe stato preparato per la prima volta il giorno di Santa Barbara; per altri, il nome si riferirebbe a un'amica dello scienziato. Il nome di Baeyer è associato anche alla «teoria delle tensioni», da lui proposta nel 1885 per interpretare le differenze di stabilità delle molecole cicliche a seconda delle loro dimensioni. Fu insignito del premio Nobel per la chimica nel 1905.



averne verificato la capacità di tingere i tessuti in maniera stabile.

Il colore porpora

Apparsa in un periodo in cui la regina Vittoria, l'imperatrice Eugenia e le dame della loro corte impazzivano per il malva, la malveina si diffuse rapidamente in tutta Europa. In precedenza questo colore così ricercato era ottenuto con il muresside e soprattutto con la porpora francese, un colorante preparato nel 1856 da un tintore di Lione a partire da un lichene che aveva subito fermentazione ammoniacale. La porpora francese sembrava destinata a un avvenire brillante, ma la malveina la soppiantò molto rapidamente. Il muresside subì la stessa sorte.

Perkin registrò brevetti in Inghilterra nell'agosto 1856 e nel febbraio 1857. In quello stesso anno, volle estendere il proprio brevetto alla Francia, ma un errore di data lo invalidò, e il suo colorante divenne di dominio pubblico. Paradossalmente, questo intoppo garantì la prosperità dell'inventore: il prodotto «piratato» accrebbe la domanda di quello originale e decretò il successo della Perkin Et Sons, che egli aveva fondato insieme con il padre e il fratello.

I benefici erano enormi, considerando che la mal-

veina aveva un prezzo paragonabile a quello del platino. Il bicromato di potassio invece non era costoso, e Perkin aveva personalmente messo a punto (in sei mesi, nella lavanderia di famiglia in attesa che venisse costruita la fabbrica) una sintesi industriale in due stadi dell'anilina, a partire dal benzene e con reattivi a buon mercato (acido solforico, nitrato di sodio, limatura di ferro, acido acetico). Nel 1874, avendo fatto la sua fortuna, Perkin, che aveva solo 36 anni, vendette la fabbrica e si dedicò con successo a ricerche fondamentali di chimica organica, in un laboratorio che si era fatto costruire nei pressi della sua casa. Divenuto uno dei padri della chimica organica inglese, Perkin morì nel 1907 al ritorno da un viaggio trionfale negli Stati Uniti.

Che ne fu della sintesi del chinino? Oggi si sa che il tentativo di Perkin non avrebbe mai potuto riuscire. L'«alliltoluidina» utilizzata era in realtà una miscela di due composti, molto diversi dal chinino. Questo ha comunque una struttura di gran lunga troppo complessa perché se ne potesse realizzare la sintesi con le conoscenze e i mezzi dell'epoca. Esso fu sintetizzato solo nel 1944, per merito di Robert Burns Woodward, uno dei più grandi chimici organici del XX secolo. Quanto alla malveina, essa era in effetti una miscela di pseudo-malveina, derivata

dall'anilina, di malveina, prodotto di condensazione dell'anilina, e di orto- e para-toluidina, impurezze dell'anilina commerciale dell'epoca.

Sotto il segno del fucsia

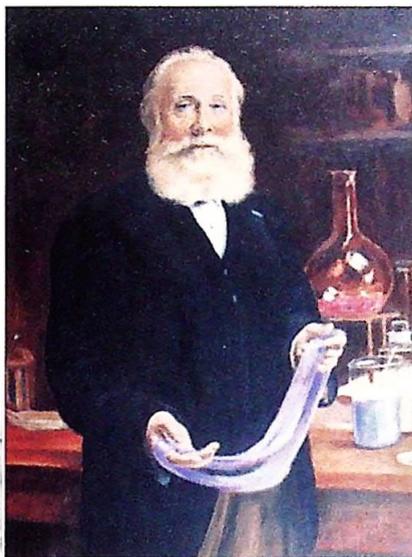
La scoperta di Perkin ispirò molti ricercatori, i quali fecero reagire l'anilina con i composti più diversi nella speranza di ottenere nuovi coloranti. È così che nel 1859 il chimico lionese Emmanuel Verguin (1814-1864) ottenne un bellissimo colorante rosso ossidando l'anilina commerciale con tetracloruro di stagno. La *Établissements Renard Frères*, di Lione, lo registrò nello stesso anno con il nome di fucsina perché, secondo la domanda di brevetto, il suo colore ricordava quello della fucsia; ma si è sovente notato che *Fuchs* in tedesco significa «volpe» (ovvero *renard* in francese). Il grande successo di questo prodotto non impedì però il declino dell'industria francese dei coloranti.

Tre ragioni spiegano questa tendenza. Innanzitutto, la Legge francese sui brevetti del 1844 proteggeva il prodotto e non il procedimento. Quando altri chimici tentarono di migliorare la sintesi della fucsina, furono sistematicamente citati in giudizio dalla *Établissements Renard* e condannati. Ben presto, questi inventori compresero che avrebbero fatto meglio a sfruttare le loro scoperte altrove, in Germania e in Svizzera.

Inoltre la Francia era carente di tecnici chimici. In Germania, dal 1825, le «scuole tecniche» (*Technische Hochschulen*), sovvenzionate a livello regionale, formavano i quadri di alto livello di cui l'industria aveva bisogno. In Francia, salvo rari casi, questo sviluppo dovette attendere altri 50 anni.

La terza ragione è forse la più grave. La malveina, la fucsina e gli altri coloranti anilini erano il risultato di ricerche empiriche. Il successo di queste ricerche era - allora come oggi - aleatorio. Per ottenere risultati, diventava necessaria una ricerca fondata su basi teoriche solide. Una simile teoria, la chimica organica strutturale, apparve negli anni sessanta dell'Ottocento grazie a numerosi scienziati, fra cui Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850), Justus von Liebig (1803-1873), Archibald Scott Couper (1831-1892) e soprattutto August Kekulé (1829-1896), che pubblicò nel 1858 il suo articolo fondamentale sul carbonio tetraivalente. Grazie alla teoria strutturale, si poteva determinare la struttura di una molecola, prevederne la reattività e concepirne sintesi razionali. Adottata in Germania e in Inghilterra, questa disciplina fu respinta in Francia dove molti chimici, Marcellin Berthelot (1827-1907) in testa, rifiutavano addirittura di credere agli atomi. Data l'influenza di Berthelot - fu ministro per l'istruzione pubblica - la teoria atomica cominciò a essere insegnata in Francia solo negli ultimi anni del XIX secolo.

È grazie a questi nuovi strumenti concettuali che l'industria chimica tedesca creò numerosi coloranti molto economici ed eclissò completamente la sua rivale francese. I progressi tedeschi nella chimica organica furono tali che ben presto venne realizzata la sintesi di due coloranti naturali complessi, l'alizarina e l'indaco. Frutto di una collaborazione esemplare fra università e industria, queste sintesi fecero della Germania il centro indiscusso dell'industria dei colo-



The Color Museum, Bradford

Questa scena di ballo alla corte di Napoleone III illustra la voga delle tinte viola. In Inghilterra questa moda fu diffusa dalla regina Vittoria e in Francia dall'imperatrice Eugenia. William Henry Perkin (in alto) mostra fieramente un panno tinto con malveina.



Bibliothèque de l'Opéra

ranti, e poi di tutta l'industria chimica organica fino alla prima guerra mondiale. La produzione tedesca di coloranti rappresentava, in valore commerciale, il 50 per cento della produzione mondiale nel 1881, il 70 per cento nel 1896 e l'80 per cento nel 1900.

Dalla garanza di Vaucluse all'alizarina renana

La garanza è una pianta le cui radici forniscono un colorante rosso molto apprezzato, utilizzato fin dal 1835 per tingere i pantaloni della fanteria e della cavalleria francesi. Il principio colorante essenziale è l'alizarina, isolata già nel 1826.

Karl Graebe (1841-1927) e Karl Liebermann (1842-1914) erano nel 1868 assistenti di Adolf von Baeyer (1835-1917) a Berlino. Baeyer aveva dimostrato che molecole organiche complesse potevano essere frammentate (si usa il termine di degradazione) per riscaldamento in presenza di zinco in polvere. Egli suggerì a Graebe - dapprima riluttante - ma costretto a obbedire - di applicare questa reazione all'alizarina. La determinazione, più semplice, della struttura dei composti di degradazione avrebbe permesso, ricostruendo il rompicapo, di dedurre quella



Le piante da cui si estraggono i coloranti non lasciano sempre immaginare i colori delle tinture. La garza è un colorante rosso ottenuto dalla radice di *Rubia tinctorum* (a sinistra nella tavola botanica). L'indaco è una tintura blu scuro, resistente al sole e al lavaggio, estratta dalle foglie e dai gambi di *Indigofera tinctorum* (a destra nella stessa tavola). Scomparsa all'inizio del XX secolo, la coltura delle piante per tintoria è ripresa a livello artigianale, come dimostra questo campo di guado in Provenza (foto a destra).

dell'alizarina stessa, il che a sua volta ne avrebbe permesso la sintesi razionale.

Graebe e Liebermann dimostrarono che la struttura fondamentale dell'alizarina era quella dell'antracene, un idrocarburo ottenuto nella distillazione del carbone fossile. Essi riuscirono ben presto a convertire l'antracene in alizarina, in collaborazione con Heinrich Caro (1834-1910), specialista dei coloranti sintetici che era appena tornato dall'Inghilterra per assumere la direzione scientifica di una neonata impresa renana destinata a un prospero futuro, la Badische Anilin & Soda Fabrik (BASF). È proprio sfruttando i brevetti sull'alizarina e i coloranti derivati che la BASF si assicurò il successo. Perkin, che aveva anch'egli realizzato la sintesi dell'alizarina a partire dall'antracene, presentò la domanda di brevetto il 26 giugno 1869, solo un giorno dopo Caro, Graebe e Liebermann. Non tardò tuttavia a mettersi d'accordo con i colleghi tedeschi per collaborare e scambiarsi le licenze di fabbricazione.

Il costo dell'alizarina scese via via che se ne perfezionava la sintesi. In Francia, le autorità sostennero per un po' i produttori di garza continuando a utilizzare il colorante naturale per l'Esercito; ma ciò non bastò a evitare il disastro. La garza naturale, venduta a 200 franchi al quintale nel 1865, 10 anni più tardi non ne valeva che 25. Nel 1872 i coltivatori producevano ancora 23 000 tonnellate di polvere di garza, ovvero più di metà della produzione mondiale. Nel 1878 ne producevano appena 500 tonnellate, mentre la produzione di alizarina sintetica equivaleva già a 30 000 tonnellate di garza.

E Baeyer (ri)creò l'indaco

Uno dei più antichi coloranti conosciuti, l'indaco è ancora oggi largamente utilizzato, dato che la moda dei jeans ne garantisce il perenne successo. La sua importazione in Europa, a partire dal XVI secolo, mandò in rovina intere regioni che si dedicavano alla coltura del guado, pianta da cui si traevano differenti sfumature di blu; la crisi colpì particolarmente Tolosa e il suo circondario. Nell'Ottocento il com-

mercio dell'indaco era controllato dall'Inghilterra, che aveva fondato nelle Indie numerose piantagioni e impianti di trasformazione. Tutto questo rimase un ricordo dopo che la BASF, sulla scia della sintesi dell'alizarina, riuscì a realizzare quella dell'indaco. Tre chimici ebbero un ruolo chiave in questa scoperta: due accademici, Baeyer e Karl Heumann (1850-1893), e un chimico industriale, Caro, che iniziò a collaborare con Baeyer nel 1876.

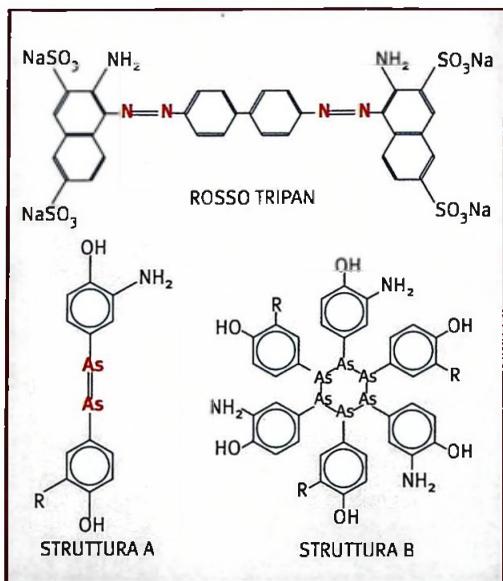
Il problema era tutt'altro che semplice. Baeyer iniziò a lavorarvi nel 1865 ma, nonostante il suo talento, riuscì a venire a capo della struttura dell'indaco solo nel 1883. Già nel 1868, tuttavia, ottenne una struttura parziale che guidò i suoi studi sulla sintesi. Così Baeyer realizzò nel 1878, e poi nel 1882, la sintesi dell'indaco secondo due vie differenti. Erano però procedimenti onerosi, e solo una terza sintesi (1890), dovuta a Heumann, poté essere sfruttata industrialmente a partire dal 1897.

Fra il primo brevetto e la commercializzazione erano passati 17 anni, durante i quali la BASF investì 18 milioni di marchi-oro, ossia una somma superiore al capitale dell'impresa. Questo massiccio investimento si rivelò fruttuoso: nel 1897 l'Inghilterra commercializzava 10 000 tonnellate di indaco naturale e la Germania 600 tonnellate di indaco di sintesi. Nel 1911 le cifre erano di 870 tonnellate di prodotto naturale e 22 000 di indaco artificiale. Il Governo britannico tentò certamente di favorire l'indaco naturale per le uniformi militari, ma non poté impedire che si ripettesse per i piantatori inglesi ciò che era avvenuto per i produttori di garza in Francia.

Oggi la BASF resta il principale fabbricante di indaco, con una produzione, nel 1997, pari al 40 per cento del totale mondiale, ossia 17 000 tonnellate stimate: di che tingere 800 milioni di paia di jeans.

Le spintarelle del caso

Nel XIX secolo, la chimica era ancora ai primi passi, e il caso dava un contributo non trascurabile alle scoperte, come accadde per la sintesi della malveina o per quella dell'alizarina. Questa consiste nel-



Il colorante rosso tripan (*in alto*) era utilizzato per trattare la malattia del sonno. La sua efficacia era attribuita al doppio legame dell'azoto (-N=N-). Cercando altri composti con legami doppi, Paul Ehrlich scoprì nel 1909 l'arsenammina, efficace contro la sifilide. Non essendo in grado di determinarne la struttura, suppose che avesse la struttura A. In realtà, si è dimostrato ben più tardi, nel 1961, che questo composto aveva una struttura molto differente (B), senza doppi legami fra gli atomi di arsenico.

Nel 1904 impiegò il rosso tripan per trattare la malattia del sonno. Attribuendo l'efficacia di questo colorante al gruppo di atomi di azoto uniti da legame doppio (-N=N-), Ehrlich preparò numerosi composti contenenti un gruppo analogo, ma con arsenico (-As=As-). Sintetizzò così l'arsenammina e dimostrò, nel 1909, che il composto era attivo contro i tripanosomi e le spirochete, microrganismi responsabili rispettivamente della malattia del sonno e della sifilide. All'epoca, il solo metodo di analisi dei prodotti era l'analisi centesimale, che forniva solo la formula bruta, a meno di un fattore moltiplicativo. Così, Ehrlich gli attribuì la struttura A (si veda l'illustrazione qui accanto): quella di un monomero con un doppio legame dell'arsenico. Il prodotto venne commercializzato l'anno seguente con il nome di Salvarsan («l'arsenico che salva»), ed ebbe un successo terapeutico e mediatico considerevole perché era il primo farmaco realmente efficace contro la sifilide. Nel 1961 si dimostrò che il Salvarsan non conteneva atomi di arsenico uniti da un doppio legame e che la sua struttura era differente: era un trimero, vale a dire che possedeva il triplo degli atomi rispetto alla formula bruta di base. Partendo da un'ipotesi errata, Ehrlich aveva fatto una notevole scoperta.

Questi successi furono il punto di partenza per l'individuazione di quasi tutti i medicinali introdotti nella prima metà del XX secolo. Una delle ricerche più fruttuose fu quella sulle infezioni batteriche, contro le quali non esisteva alcun farmaco efficace ancora all'inizio degli anni trenta. L'attenzione si rivolse verso quei coloranti che mostravano una forte affinità per le proteine.

Nel 1934 Gerhard Domagk (1895-1964) annunciò che un prodotto commercializzato dalla I. G. Farben con il nome di Prontosil debellava le infezioni stafilococciche e streptococciche acute. L'anno seguente, Jacques Tréfouël (1897-1977) e i suoi collaboratori del gruppo di Ernest Fourneau (1872-1949) all'Institut Pasteur dimostrarono che questo composto veniva metabolizzato in sulfanilammide, la forma attiva. In vivo, questa era efficace quanto il Prontosil e, contrariamente a esso, lo rimaneva in vitro. Queste scoperte segnarono l'avvento dei sulfamidici, i farmaci più efficaci prima dell'arrivo degli antibiotici.

l'ossidare l'antracene ad antrachinone con acido nitrico e poi nell'introdurre i gruppi OH mancanti. Quest'ultima operazione deve essere effettuata indirettamente, facendo dapprima reagire acido solforico con antrachinone. È proprio questa reazione, oggi classica, che allora non si riusciva a eseguire.

Graebe e Liebermann avevano fallito. Caro riesaminò il problema e incontrò gli stessi ostacoli. Poi, durante un ultimo tentativo, dovette assentarsi brevemente. Al suo ritorno, Caro constatò che vi era stato un surriscaldamento: una parte della miscela di reazione era schizzata sul soffitto, ma il resto conteneva il prodotto desiderato. Senza questo fortunato incidente, Caro sarebbe senza dubbio rimasto bloccato a lungo: la reazione avviene solo a una temperatura molto elevata, che nessun chimico ragionevole avrebbe impiegato (anche senza considerare i rischi), nel timore di decomporre l'antrachinone, dato che l'acido solforico è un agente molto aggressivo.

Dai coloranti alla chemioterapia

Notiamo tuttavia che non è sempre il caso a controllare gli esperimenti. La nascita della chemioterapia, che è derivata dalle ricerche sui coloranti sintetici, mostra come il paziente perseguimento di un'idea logica e semplice abbia permesso di salvare milioni di vite.

Il medico tedesco Paul Ehrlich (1854-1915) definì chemioterapia la distruzione degli organismi patogeni nel malato per mezzo di prodotti chimici. Come sono stati trovati questi prodotti?

Da giovane studente di medicina, Ehrlich si era interessato molto alla colorazione delle sezioni di tessuti e delle colture microbiche, in vista del loro esame al microscopio. Nel corso della sua tesi riguardante i coloranti istologici, egli notò che tingere i microrganismi equivale ad attaccarli selettivamente con i coloranti ed ebbe quindi l'idea di cercare agenti battericidi in questa famiglia di composti. Utilizzò dunque il blu di metilene (1891) per trattare due pazienti affetti da una forma benigna di malaria, con risultati eccellenti.

GLI AUTORI

GEORGES BRAM
è professore di chimica e di storia della chimica all'Università di Parigi-Sud (Orsay).

NGUYỄN TRONG ANH, direttore di ricerca al CNRS, è professore di chimica all'École polytechnique.

PER SAPERNE DI PIÙ

CARDON DOMINIQUE e DU CHATENET GAËTAN, *Guide des teintures naturelles*, Delachaux et Niestlé, 1990.

TRAVIS ANTHONY S., *The Rainbow Makers: the Origins of the Synthetic Dyestuffs Industry in Western Europe*, Associate University Press, 1993.

FAUQUE DANIELLE, *Regards sur l'histoire des colorants artificiels au XIX^e siècle*, in «Bulletin de l'Union des physiciens», 88, n. 769, pp. 1753-1174, dicembre 1994.

ALTMANN JAN ed ELBL-WEISER KARIN, *That Old Mood Indigo*, in «Chemistry and Industry», 16, p. 654, 1997.

Le prime fotografie a colori

di Grant B. Romer e Jeannette Delamoir

I metodi usati inizialmente per la riproduzione dei colori erano ingegnosi, anche se complicati e poco efficienti

La fotografia a colori è comunemente ritenuta una conquista moderna perché in gran parte le fotografie del secolo scorso appaiono più o meno monocromatiche. Essa, tuttavia, deve la sua esistenza a ricerche effettuate nel XIX secolo. E, in effetti, gli inizi della fotografia a colori precedono addirittura gli sviluppi commerciali della dagherrotipia, il cui centocinquantenario è stato celebrato nella primavera 1989. I primi ricercatori nel campo della fotografia ritenevano che le riproduzioni fotografiche dovessero essere a colori. Se gli obiettivi proiettavano immagini a colori, perché le immagini finali non dovevano esserlo? Perciò i primi tentativi di fotografia a colori furono tesi alla riproduzione

diretta dei colori, utilizzando una sola sostanza fotosensibile per registrare in un solo passaggio lo spettro visibile in tutta la sua estensione. In effetti si conoscevano molte sostanze in grado di cambiare colore in seguito all'esposizione alla luce e alcune di queste riuscivano ad assumere i colori della luce incidente.

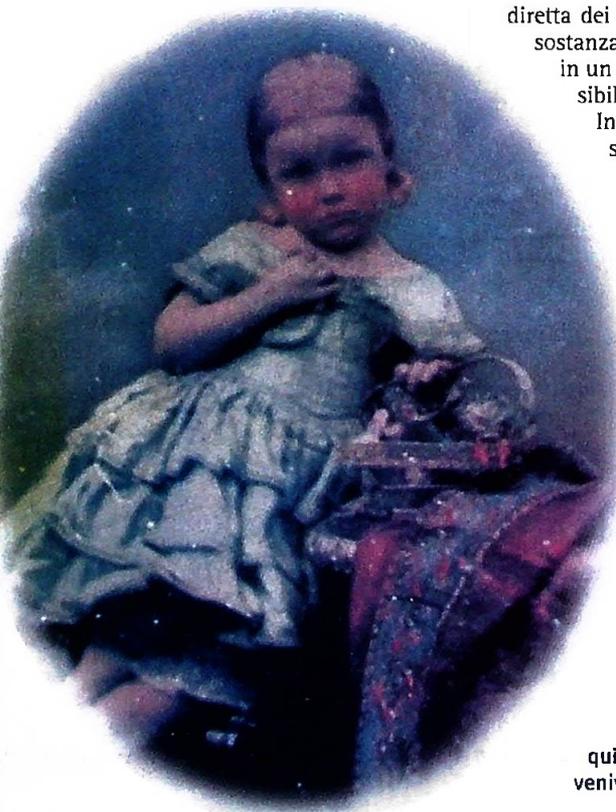
Nel 1810 Thomas Johann Seebeck, un fisico tedesco che collaborava strettamente con Goethe nelle ricerche del grande erudito sulla natura del colore, pubblicò alcune osservazioni sulla risposta del cloruro d'argento alla proiezione dell'immagine dello spettro. Seebeck

stendeva cloruro d'argento umido su un foglio di carta che poi esponeva per 15 minuti e più alla luce dispersa da un prisma. L'alogenuro d'argento esposto assumeva alcuni colori dello spettro, sia pure sbiaditi. Seebeck non riuscì a spiegare il fenomeno, come d'altra parte non vi riuscì alcun altro fino al 1868.

Louis-Jacques-Mandé Daguerre, pittore, cominciò a compiere esperimenti intorno al 1820 con la speranza di riuscire a riprodurre fotograficamente i colori utilizzando minerali fosforescenti. Nel 1826 un inventore francese, Joseph-Nicéphore Niepce, ottenne quella che è la più antica fotografia conservatasi fino a oggi: l'immagine di un granaio, impressa su una lastra di peltro rivestita con una soluzione di bitume. La luce aveva reso insolubile agli acidi il bitume, producendo un'immagine monocromatica.

Daguerre e Niepce presero poi a collaborare e a compiere esperimenti con lastre argentate esposte a vapori di iodio. Quattro anni dopo la morte di Niepce, avvenuta nel 1833, Daguerre mise a punto il procedimento di ripresa dei dagherrotipi, un segreto che mantenne fino al 1839. Nel frattempo lo scienziato

I progressi nel campo della fotografia a colori sono evidenziati dal confronto tra un dagherrotipo del 1845 colorato a mano (a sinistra) e una fotografia a colori del 1907 (a destra). Mentre la dagherrotipia incontrò un successo immediato dopo la sua introduzione, avvenuta nel 1839, pochi dei primi procedimenti fotografici a colori si dimostrarono commercialmente redditizi. La fotografia a colori qui riprodotta è stata ripresa con il processo Autochrome, nel quale il materiale sensibile veniva impressionato attraverso un reticolo di granuli d'amido colorati in rosso-arancione, verde e viola (si veda l'illustrazione a pagina 52).





International Museum of Photography, George Eastman House, Rochester, N.Y.P.



Science Museum, Londra

Questa riproduzione a colori dello spettro della luce, ottenuta nel 1848 dal fisico francese Edmond Becquerel, è conservata presso il Science Museum di Londra. Becquerel depositò cloruro d'argento su una lastra per dagherrotipi che espose quindi alla luce dispersa da un prisma: il composto fissò i colori dello spettro. Metodi diretti di questo tipo per la riproduzione dei colori furono i più comunemente usati nei primi esperimenti di fotografia a colori.



International Museum of Photography

L'immagine in alto illustra il metodo «a contatto» per la riproduzione diretta dei colori. Il francese Abel Claude Niepce de Saint-Victor ottenne questa immagine verso la metà del secolo scorso, esponendo alla luce una lastra ricoperta di cloruro d'argento che aveva posto a contatto con il disegno in basso, probabilmente un pezzo di carta da parati.

dilettante inglese William Henry Fox Talbot aveva posto le basi del procedimento fotografico negativo-positivo su carta, inventando un sistema al quale diede più tardi il nome di calotipia.

La dagherrotipia fu il primo procedimento fotografico effettivamente utilizzabile. Le immagini erano ottenute esponendo in una camera oscura una lastra di rame argentato, preventivamente trattata con vapori di iodio. L'immagine latente formatasi sulla lastra veniva poi rivelata con l'esposizione a vapori di mercurio, che formavano un amalgama con l'argento nelle zone esposte della lastra. La diffusione della luce da parte dell'amalgama e la riflessione speculare da parte dell'argento nelle zone meno esposte producevano nell'insieme un'immagine positiva. Negli anni successivi alla sua introduzione, il procedimento fu perfezionato. La sensibilità alla luce venne migliorata usando, invece dello iodio, bromo e cloro. Il cloruro d'argento era utilizzato anche nel procedimento su carta di Talbot, che usava carta saturata con questo composto per ottenere copie positive, stampando per contatto i negativi su carta.

Con questi metodi Daguerre, Talbot e i loro epigoni ottennero a volte risultati vivamente colorati, benché essenzialmente monocromatici. La mancata riproduzione della policromia era spesso compensata colorando a mano i dagherrotipi, con risultati a volte di notevole pregio (si veda l'illustrazione a pagina 48). Ma il desiderio di riprodurre fotograficamente i colori rimaneva vivo fra gli sperimentatori che cercavano di ampliare le prestazioni della fotografia.

Il colore, finalmente!

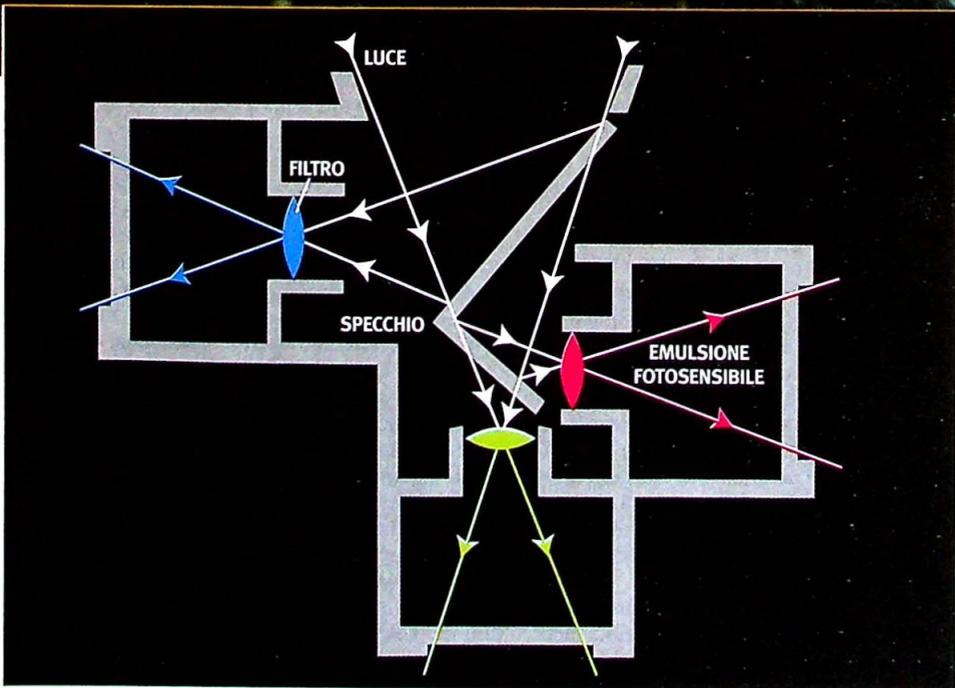
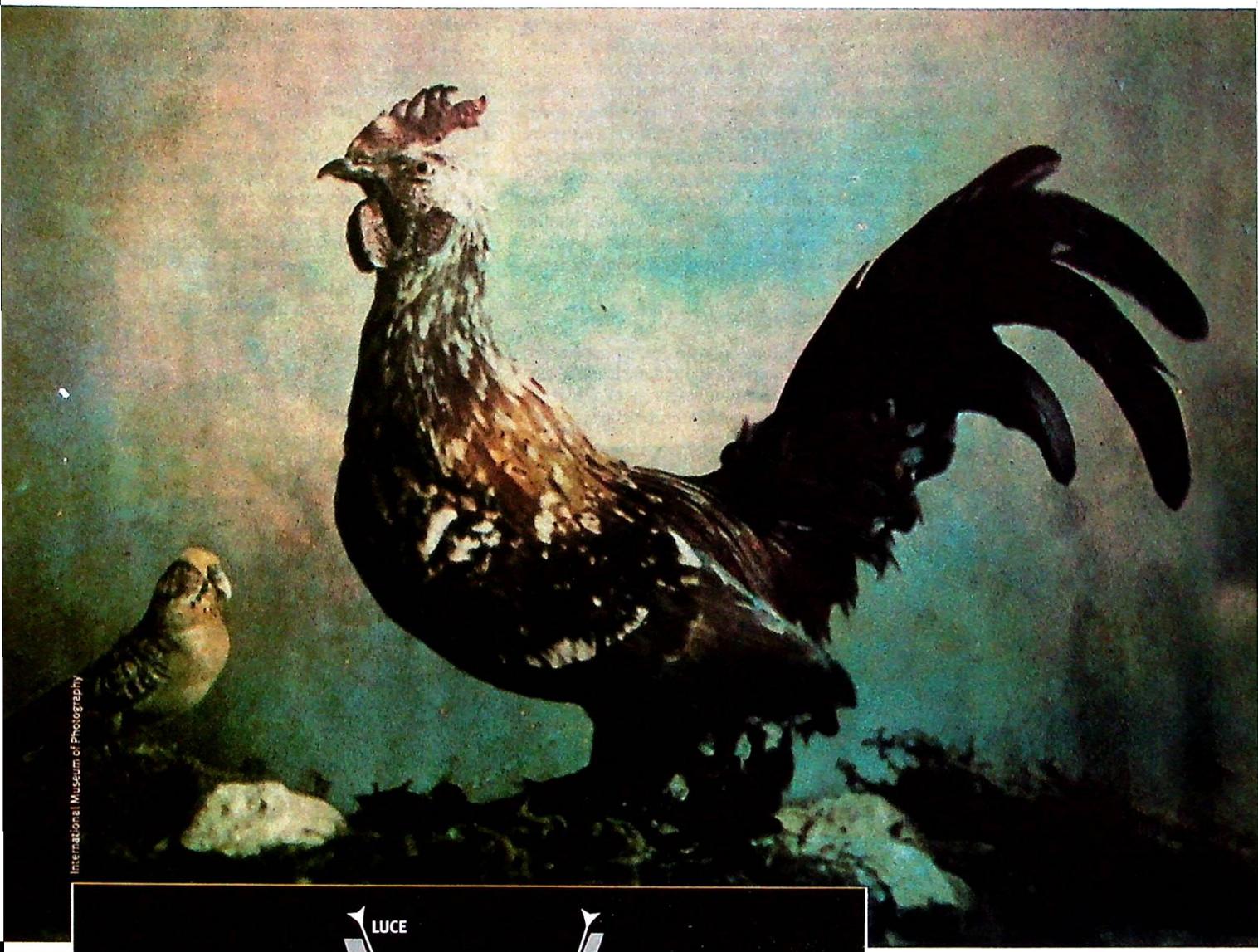
Vi fu quindi un ritorno di interesse per gli esperimenti di Seebeck. Nel 1840 l'astronomo inglese Sir John F. W. Herschel li ripeté, notando le caratteristiche spettrali di vari sali d'argento. Il suo lavoro attirò l'attenzione del fisico francese Edmond Becquerel che, nel 1847, prese a registrare gli spettri su uno strato uniforme e sottile di cloruro d'argento steso su una lastra per dagherrotipi anziché su carta. I risultati ottenuti da Becquerel furono decisamente incoraggianti: una delle sue registrazioni a colori è conservata a Londra, presso lo Science Museum.

Abel Claude Niepce de Saint-Victor, nipote di Joseph Niepce, riprese nel 1851 il lavoro di Becquerel e vi apportò alcuni perfezionamenti variando il metodo di deposizione del cloruro d'argento e migliorando la stabilità dei colori con una vernice protettiva. Una delle sue brillanti riproduzioni a colori dello spettro si trova al Conservatoire National des Arts et Métiers, a Parigi. Niepce de Saint-Victor cominciò poi a riprodurre nature morte sulle sue lastre al cloruro d'argento e ottenne anche immagini a contatto su carta partendo da disegni colorati.

Il procedimento di Niepce de Saint-Victor non ebbe successo commerciale perché le immagini non potevano venire adeguatamente fissate e perché i tempi di posa richiesti per riprodurre tutti i colori erano troppo lunghi (fino a un'ora). Ma il suo lavoro ebbe un risvolto interessante. Nel 1851, lo stesso anno nel quale Niepce de Saint-Victor iniziò i suoi esperimenti, un ministro del culto e fotografo di mestiere, l'americano Levi L. Hill, affermò di avere scoperto un metodo per ottenere dagherrotipi a colori.



International Museum of Photography



La macchina fotografica di Ducos du Hauron consentiva la riproduzione indiretta dei colori registrando negative di selezione nel blu, nel verde e nel rosso. Due specchi semitrasparenti dividevano la luce entrante in tre fasci, che attraversavano filtri per isolare le componenti nei tre colori primari. Le emulsioni disponibili verso il 1870 non erano abbastanza sensibili per essere utilizzate con questa macchina ma, con metodi più elaborati, Ducos du Hauron riuscì a ottenere fotografie a colori come quella riprodotta in questa pagina.



Hill raccolse 15 000 dollari da finanziatori curiosi di conoscere il suo metodo, ma nessuno riuscì a riprodurre i suoi risultati e alla fine venne bollato come imbroglione. Di recente, però, il dagherrotipista moderno Joseph W. Boudreau del Paier College of Art di Hamden, nel Connecticut, è riuscito a ottenere immagini a colori seguendo il procedimento descritto da Hill. Inoltre l'esame di molte delle immagini di Hill ha dimostrato che la loro policromia era, almeno in parte, di natura fotografica. In effetti sembra che il procedimento di Hill fosse molto simile a quelli usati da Becquerel e Niepce de Saint-Victor.

Interferenza e visione dei colori

Nel 1868 il fisico tedesco Wilhelm Zenker suggerì la possibilità che i colori riprodotti dalle lastre al cloruro d'argento fossero dovuti a fenomeni di interferenza delle onde luminose all'interno dello strato fo-

producendo un sistema di onde stazionarie. Nel corso dello sviluppo si formavano lamine d'argento a distanze pari a metà della lunghezza d'onda della luce che le aveva prodotte.

L'immagine sviluppata appariva simile a una normale negativa in bianco e nero, a meno che non venisse osservata da un angolo particolare. In questo caso la riflessione della luce sulla superficie dell'immagine produceva colori brillanti, molto simili a quelli naturali del soggetto. Sebbene il processo Lippmann richiedesse tempi di posa lunghi e la manipolazione del mercurio risultasse difficile, i colori ottenuti erano così belli che esso godette di un certo successo commerciale, almeno fino al 1907.

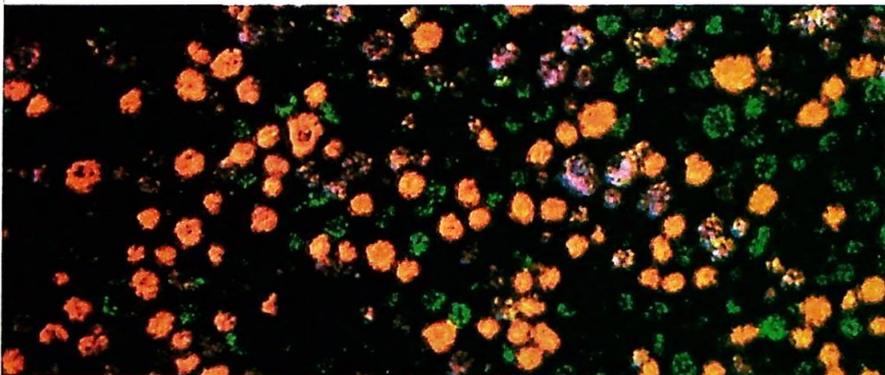
La nascita dei procedimenti moderni

In quell'anno il processo Lippmann venne soppiantato da metodi indiretti per la riproduzione di immagini a colori; questi metodi - che ricostruiscono i colori dello spettro usando opportune combinazioni dei tre colori primari, blu, verde e rosso - sono stati tutti descritti nel secolo scorso e sono divenuti la base della moderna fotografia a colori. Per comprendere l'evoluzione di questi metodi è necessario, ancora una volta, tornare agli anni che hanno preceduto la dagherrotipia.

Nel 1801 il medico e fisico inglese Thomas Young presentò alla Royal Society di Londra una teoria sulla visione dei colori secondo cui nell'occhio umano esistono tre tipi di recettori, ognuno dei quali sensibile a uno solo dei tre colori primari. Quando i colori primari sono presenti in proporzioni diverse, stimolano opportune combinazioni di recettori e danno origine alla visione della gamma di colori percepiti dall'uomo. Con la presentazione della teoria di Young, il colore venne identificato per la prima volta come un fenomeno fisiologico anziché come una sostanza materiale. La sua formulazione, unitamente ai progressi nel campo della stampa con sovrapposizione di tre o più colori, aprì la strada agli esperimenti di riproduzione fotografica indiretta dei colori.

Inizialmente si tentò di replicare il processo della percezione visiva registrando separatamente le tre componenti primarie, per poi ricombinarle e ricostruire un'immagine a pieni colori. Nella maggior parte di questi sistemi si separavano i colori primari riprendendo tre negative monocromatiche attraverso filtri blu, verde e rosso. Dalle tre negative di selezione si producevano positive che venivano ricombinate con un procedimento «sottrattivo» oppure «additivo».

I metodi additivi ricostruiscono le immagini mescolando fasci di luce dei tre colori primari. Ciò si può fare, per esempio, proiettando in sovrapposizione tre immagini colorate, o giustapponendo linee sottili o puntini dei colori primari, in modo da lasciare all'occhio il compito di mescolare i colori. I metodi sottrattivi, invece, utilizzano pigmenti dei colori complementari a quelli delle luci primarie - ciano (blu-verde), magenta (blu-rosso) e giallo (verde-rosso) - ognuno dei quali assorbe selettivamente uno dei colori primari, consentendo la percezione degli altri due. (Il ciano assorbe la luce rossa, il magenta quella verde e il giallo quella blu.)

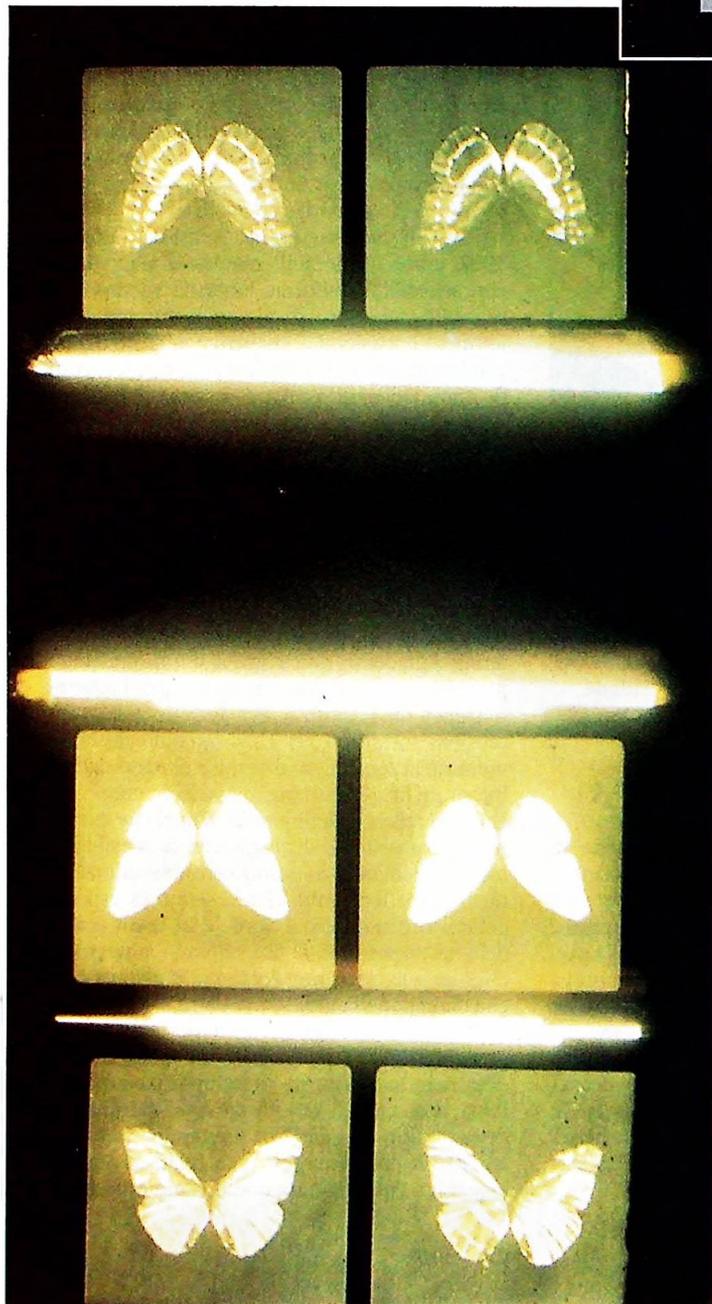
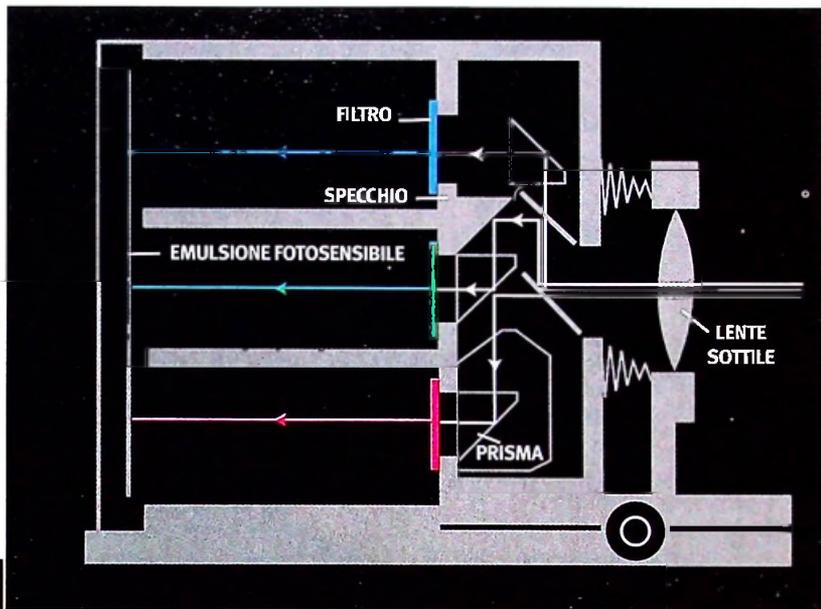
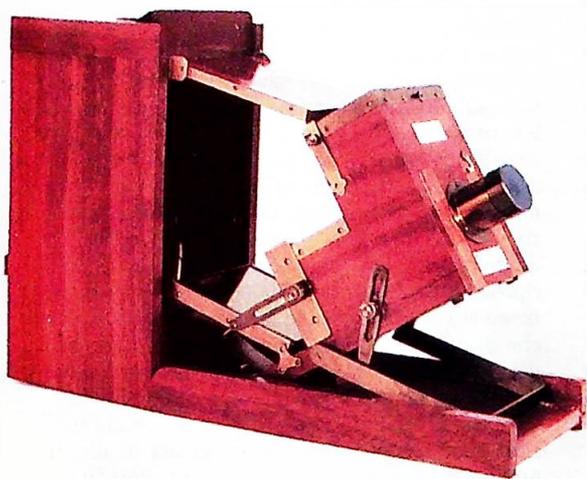


Granuli di amido di patata nei tre colori primari avevano la funzione di filtri nella macchina fotografica di Ducos du Hauron. I produttori di materiali sensibili Auguste e Louis-Jean Lumière usarono granuli d'amido colorati nel processo Autochrome, da essi introdotto nel 1907. Uno strato sottile d'amido era sovrapposto all'emulsione. Dopo esposizione e sviluppo, la luce trasmessa attraverso i granuli ricostruiva la miscela di colori primari riproducendo i colori del soggetto.

tosensibile. Secondo Zenker la luce interagisce con il cloruro d'argento, rifrangente, e la superficie riflettente della lastra d'argento, lucida, formando onde stazionarie le cui creste e i cui ventri coincidono per posizione ma si alternano nel tempo. Dove le creste e i ventri coincidono, sosteneva Zenker, il cloruro d'argento viene impressionato e forma straterelli d'argento; nei punti in cui invece coincidono i nodi fra creste e ventri, il sale d'argento non si impressiona. Quando si guarda la lastra in luce bianca, che contiene tutte le lunghezze d'onda, le lamine d'argento dovrebbero riflettere solo quel colore al quale lo strato sensibile è stato esposto inizialmente.

La teoria di Zenker delle onde stazionarie venne confermata nel 1889 dal fisico tedesco Otto Wiener, il cui lavoro portò, nel 1891, alla realizzazione di fotografie a colori dirette e fissabili. Il procedimento, molto ingegnoso, venne messo a punto dal fisico francese Gabriel Lippmann, che impiegò le emulsioni su lastra di vetro introdotte intorno al 1850. Egli disponeva la lastra, su cui era stesa un'emulsione di bromuro d'argento di grana particolarmente fine, in un contenitore nel quale uno strato di mercurio veniva posto a contatto con l'emulsione stessa. Il mercurio fungeva da specchio, esattamente come la lastra argentata usata negli esperimenti di Niepce de Saint-Victor.

Lippmann disponeva il contenitore in una macchina fotografica ed esponeva normalmente. La luce che aveva attraversato la lastra di vetro e l'emulsione colpiva il mercurio e veniva riflessa all'indietro,



La macchina fotografica e il visore Kromskop funzionavano secondo i principi esposti da Ducos du Hauron, la cui applicazione divenne possibile nel 1895, quando l'inventore americano Frederic E. Ives poté mettere in commercio questi apparecchi grazie ai progressi nella sensibilità delle emulsioni. La macchina impiegava specchi semitrasparenti e prismi per suddividere la luce che entrava attraverso l'obiettivo e filtri per separare le componenti primarie (*sopra*). Il percorso complicato del fascio di luce verde era necessario perché il suo cammino avesse la stessa lunghezza di quello compiuto dagli altri due fasci. Un modello più elaborato dell'apparecchio Kromskop aveva due obiettivi e consentiva la ripresa di immagini stereoscopiche (*qui a fianco*).

Il dirigibile Hindenburg brucia in un fotoreportage a colori del 1937 (pagina a fronte).

Materiali che consentivano la registrazione simultanea dei tre colori - l'eredità del tripack - permisero la ripresa a colori di eventi rapidi e inattesi, come il disastro del dirigibile.

La ricostruzione additiva dei colori venne dimostrata per la prima volta nel 1861 da James Clerk Maxwell in una seduta della Royal Institution di Londra. Maxwell proiettò in sovrapposizione su uno schermo tre diapositive in bianco e nero di un nastro per capelli. Ognuna era stata ripresa attraverso un filtro costituito da un vetro o un liquido colorato e proiettata con il medesimo filtro: le immagini sullo schermo riproducevano i colori del nastro.

Maxwell aveva realizzato l'esperimento per verificare le sue ricerche nel campo della colorimetria e ne fu soddisfatto. Ma la sua dimostrazione non risolse i problemi della fotografia a colori. Le emulsioni dell'epoca erano molto più sensibili al blu che agli altri colori e, anche aggiustando i tempi di esposizione per il verde e il rosso per compensare la mancanza di sensibilità, i risultati non erano un gran che.

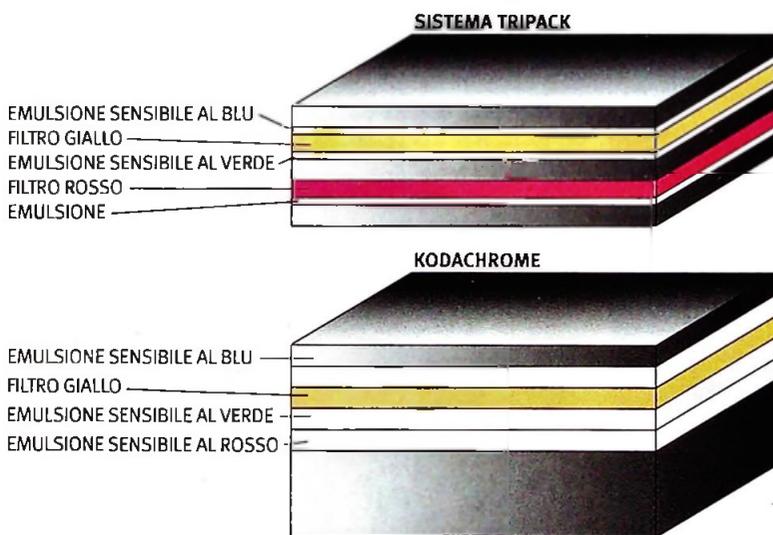
Nel 1868 Ducos du Hauron aveva suggerito la possibilità di evitare le complicazioni del procedimento basato su tre riprese distinte esponendo l'emulsione sensibile attraverso uno schermo di vetro sul quale fossero state tracciate linee finissime in blu, rosso e giallo. Le linee rosse avrebbero permesso solo alla luce rossa di passare e di esporre l'emulsione sottostante. Parimenti le righe blu e gialle sarebbero state attraversate solo da luce blu e gialla, rispettivamente. Sovrapponendo alla positiva, in esatto registro, uno schermo simile a quello usato in ripresa, le zone esposte della positiva avrebbero riflesso la luce attraverso le medesime righe colorate che avevano prodotto l'immagine. Le righe sottili dei colori primari si sarebbero fuse nell'occhio dell'osservatore, riproducendo i colori dell'originale.

Ducos du Hauron non possedeva i mezzi finanziari necessari per sperimentare la sua teoria, ma prima della fine del secolo essa venne utilizzata da diversi imprenditori in Irlanda e negli Stati Uniti. I procedimenti messi in opera erano afflitti da problemi di registro degli schermi a reticolo, dai costi proibitivi per la realizzazione di questi ultimi e dalla bassissima sensibilità dei materiali esistenti nei confronti dell'estremità rossa dello spettro. I pionieri francesi del cinema, Auguste e Louis-Jean Lumière, proposero nel 1907 una soluzione a questi problemi con il loro processo Autochrome, il primo veramente pratico e sempre di tipo additivo.

I fratelli Lumière furono aiutati dal fatto che nel 1907 erano disponibili emulsioni pancromatiche, con sensibilità uniforme lungo lo spettro e quindi sensibili anche al rosso. I Lumière riuscirono poi a eliminare i problemi di registro e di costo dei reticoli colorati ideando un'alternativa economica, costituita da granuli di amido colorati in rosso-arancione, verde e viola che venivano sovrapposti all'emulsione sensibile in uno strato dello spessore di un solo granulo. L'emulsione veniva impressionata dalla luce che filtrava attraverso i granuli colorati e, in seguito a sviluppo per inversione, forniva un'immagine positiva trasmettendo la luce attraverso i granuli d'amido e ricostruendo in tal modo i colori dell'originale. I materiali Autochrome rimasero in commercio fino agli anni trenta, quando vennero soppiantati dai materiali Agfacolor, Kodachrome e altri precursori dei processi sottrattivi che oggi dominano il mercato.

Ducos du Hauron aveva iniziato a lavorare sui processi sottrattivi nel 1874, quando riuscì ad aumentare la sensibilità al verde e al rosso delle lastre fotografiche. (Questo passo avanti fu consentito dal chimico tedesco Hermann W. Vogel che aveva scoperto la possibilità di migliorare la sensibilità cromatica mediante coloranti sensibilizzatori.) Ducos du Hauron fece coincidere i tempi di esposizione delle lastre sensibili al verde e al rosso con quelli delle lastre sensibili al blu, aprendo la possibilità di effettuare le tre riprese contemporaneamente, anziché l'una dopo l'altra.

A questo fine, egli inventò una macchina fotografica dotata di tre obiettivi, che erano in grado di effettuare le tre riprese contemporaneamente. Tuttavia, dato che gli assi dei tre obiettivi non coincidevano, non era possibile mettere perfettamente a registro le tre immagini. Egli realizzò quindi una macchina equipaggiata con un solo obiettivo, die-

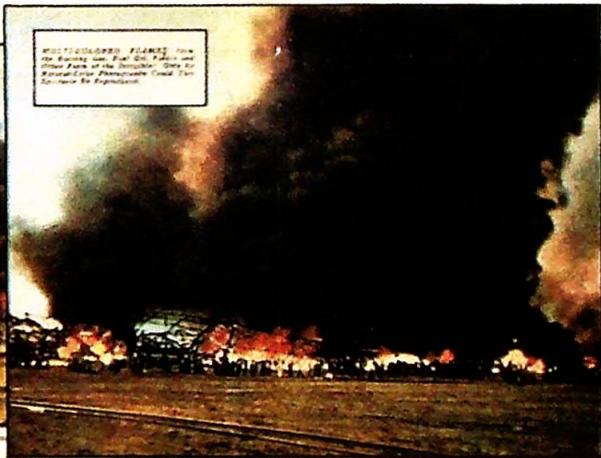
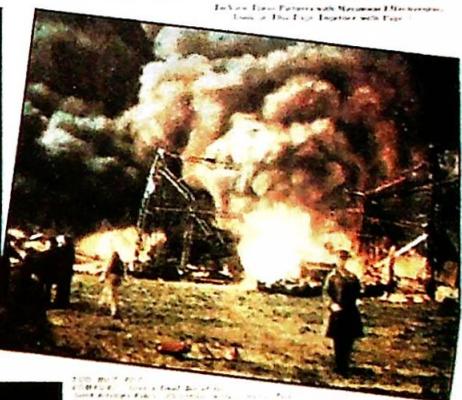


Il sistema tripack e i suoi successori, come il Kodachrome, combinavano i tre negativi su un medesimo supporto. Il tripack, inventato da Ducos du Hauron nel 1897, era costituito da una lastra di vetro rivestita da uno strato di bromuro d'argento (sensibile solo al blu per esposizioni brevi), seguito da un filtro giallo che trasmetteva solo la luce verde e rossa, da un'emulsione sensibile al verde, da un filtro rosso e da una terza emulsione. La lastra Kodachrome è praticamente identica. Non richiede un filtro rosso perché negli anni trenta, quando essa venne introdotta, erano ormai disponibili emulsioni sensibili al rosso.

Il gioco dei tre colori

Nel 1862, un anno dopo la dimostrazione di Maxwell, un francese di soli 25 anni, Louis Ducos du Hauron, esaminò i fondamenti di gran parte dei procedimenti fotografici a colori esistenti all'epoca e propose un metodo che è ancora alla base di tutti i procedimenti moderni. La sua proposta consisteva nel riprendere tre negative di selezione attraverso tre filtri colorati, utilizzandole per realizzare positive nei colori primari da sovrapporre per ottenere una stampa su carta. Ducos du Hauron mostrò le sue prime stampe a colori alla Société Photographique de Paris nel 1869. Si trattava di un risultato caratterizzato dal fatto che egli aveva identificato erroneamente i tre colori primari in rosso, giallo e blu.

DEATH OF A GIANT: The Exclusive Colorphoto Record of the Destruction of the HINDENBURG



A HISTORIC COLOR PHOTOGRAPH OF THE HINDENBURG AIRSHIP ON FIRE, TAKEN BY THE NEW YORK TIMES PHOTOGRAPHER, CHARLES SCHWAB, ON APRIL 16, 1937. THE AIRSHIP WAS BURNING AT THE GLENN FIELD AIRPORT IN LAMAR, OHIO. THE PHOTOGRAPH WAS TAKEN FROM A DISTANCE OF APPROXIMATELY 100 FEET. THE AIRSHIP WAS BURNING FOR APPROXIMATELY 30 SECONDS BEFORE IT WAS DESTROYED. THE PHOTOGRAPH WAS TAKEN BY CHARLES SCHWAB, A PHOTOGRAPHER FOR THE NEW YORK TIMES. THE PHOTOGRAPH WAS TAKEN FROM A DISTANCE OF APPROXIMATELY 100 FEET. THE AIRSHIP WAS BURNING FOR APPROXIMATELY 30 SECONDS BEFORE IT WAS DESTROYED.

International Museum of Photography

tro al quale erano disposti specchi semitrasparenti che dividevano in tre il fascio di luce, consentendo l'esposizione contemporanea di tre lastre (si veda l'illustrazione a pagina 51).

Il procedimento di Ducos du Hauron richiedeva comunque emulsioni più sensibili di quelle disponibili verso il 1870. Il successivo miglioramento della sensibilità consentì all'inventore americano Frederic E. Ives di commercializzare nel 1895 un apparecchio, chiamato Kromskop, funzionante secondo il principio di Ducos du Hauron (si veda l'illustrazione a pagina 53). Esso consentiva anche la ripresa di immagini stereoscopiche. Le tre immagini di selezione cromatica venivano riunite con nastri adesivi e potevano venire osservate usando un visore molto simile a quello proposto da Ducos du Hauron nel 1869.

Per portare la fotografia a colori nel XX secolo mancava solo il modo di riunire su una sola lastra i tre negativi di selezione. Ducos du Hauron propose una soluzione nel 1897. Il suo «tripack» era composto da una lastra su cui era steso uno strato di emulsione trasparente di bromuro d'argento, sensibile solo al blu per esposizioni brevi, dietro al quale erano disposti in successione un filtro giallo (che consentiva il passaggio solo alla luce rossa e verde), uno strato di emulsione sensibile al verde, un filtro

rosso e infine un'emulsione pancromatica (si veda l'illustrazione nella pagina a fronte). Dalla negativa di selezione nel blu si ricavava una positiva gialla, da quella nel verde una positiva magenta e da quella nel rosso una cyan. Sovrapponendo le tre positive si otteneva un'immagine che riproduceva correttamente i colori originali. I materiali a colori oggi in uso sono versioni raffinate del tripack di Ducos du Hauron.

Abbiamo solo sfiorato alcuni episodi della storia della fotografia a colori nell'Ottocento, ma nella seconda metà di quel secolo vennero fatte varie altre proposte innovative. Tra queste, solo poche hanno avuto un seguito. Molte tecniche del passato meritano di non essere dimenticate e molte di esse potrebbero, forse, ancora contribuire all'evoluzione della fotografia.

GLI AUTORI

GRANT ROMER
e **JEANNETTE DELAMOIR**
lavorano presso il Museo internazionale della fotografia di Rochester, negli Stati Uniti.

PER SAPERNE DI PIÙ

- EDER JOSEF MARIA, *History of Photography*, Columbia University Press, 1945.
- FRIEDMAN JOSEPH S., *History of Color Photography*, Focal Press, 1968.
- WALL E.J., *History of Three-Color Photography*, Focal Press, 1970.
- COE BRIAN, *Colour Photography: The First Hundred Years 1840-1940*, Ash & Grant, 1978.

Luci del cosmo

di Aldo Conti

Osservando il cielo
notturno, gli astronomi
ricavano un gran numero
di informazioni
dallo studio
dei colori rilevati



N.A. Sharp/AURA/H040/NSF

Guardando il cielo si potrebbe avere l'impressione che manchino quasi completamente i colori. A parte alcune stelle molto brillanti e i pianeti, tutto il resto appare di colore grigio. Questa assenza dei colori è però frutto di una carenza del nostro occhio, che li può percepire solo in presenza di livelli di luce piuttosto elevati. Anche una stanza con la luce molto bassa ci appare in bianco e nero. La realtà è però ben diversa e l'astronomia è una scienza particolarmente interessata ai colori, perché ciascuno di essi trasporta un pezzettino di informazione sulla sorgente che lo ha emesso. Proprio per questo vedremo che il concetto di colore assume in astronomia un significato più vasto, che va ben oltre la descrizione dei colori che noi vediamo con i nostri occhi.

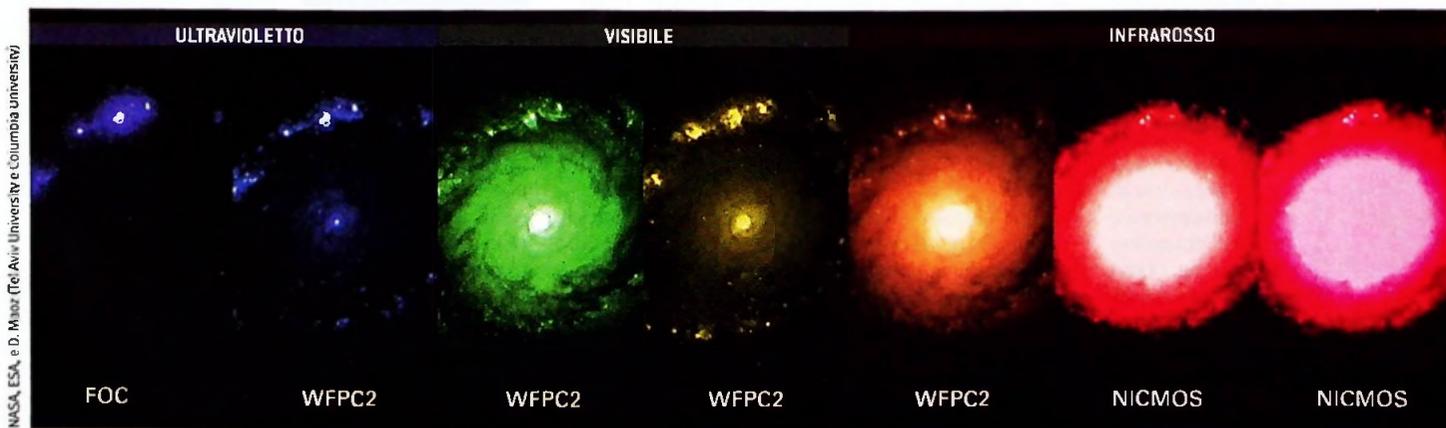
Ma andiamo con ordine, e iniziamo con gli unici colori che possiamo vedere in cielo a occhio nudo: quelli delle stelle. Tra le stelle più evidenti ci sono sicuramente quelle rosse, le supergiganti che stanno passando attraverso le ultime fasi della loro esistenza. Una molto bella è Aldebaran, che si è meritata il nomignolo di Rosso occhio del Toro, e lì vicino si trova anche un'altra stella rossa, Betelgeuse, nella costellazione di Orione. Sempre in Orione troviamo una bella stella azzurra, Rigel. In estate, invece, con un piccolo telescopio si può osservare la bellissima stella doppia Albireo, nella costellazione del Cigno, composta da una stella blu e da una arancione. Se poi osserviamo il cielo con l'ausilio di un semplice binocolo, allora quasi tutte le stelle assumono un colore, a volte molto gradevole.

Ma da dove viene il colore delle stelle? Il nostro Sole è veramente giallo? Fu Newton il primo che provò a scomporre la luce del Sole con un prisma e si accorse che è composta di tutti i colori dello spettro e che il giallo è solo la lunghezza d'onda dominante. Questo è vero anche per tutte le altre

stelle, il cui colore dipende dalla temperatura della superficie. Come regola generale, poi, le stelle giovani sono molto calde, ed emettono luce blu. Le stelle più vecchie sono di solito giganti rosse, la cui atmosfera si è espansa e raffreddata. A questa categoria appartengono Aldebaran e Betelgeuse. Le stelle di «mezza età», come il nostro Sole, possono avere colori intermedi.

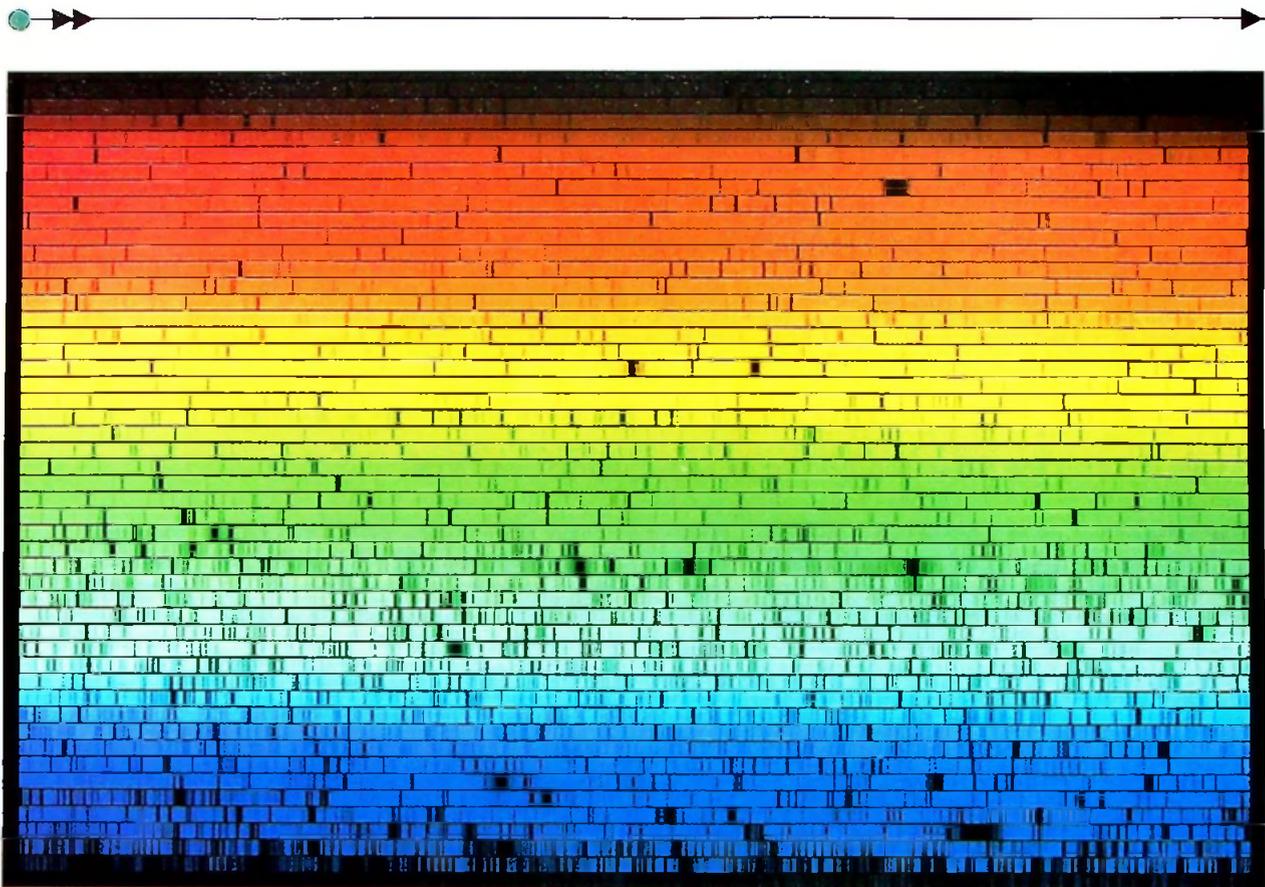
Ma anche questa regola ha la sua eccezione: le nane bianche. Queste sono stelle praticamente morte, in cui la fornace nucleare si è spenta e che splendono ancora in virtù del calore residuo del collasso gravitazionale che ha dato loro origine. Quando sono giovani, le nane bianche sono estremamente calde e la loro luce appare appunto bianca. Man mano che si raffreddano, pensavano gli astronomi, dovrebbero assumere tinte via via più rossastre, fino a spegnersi del tutto. Invece, alcuni anni fa il professor Brad M. S. Hansen, dell'Università di Princeton, predisse che questi oggetti dovrebbero invece diventare bluastri quando raggiungono una temperatura di circa 4500 kelvin.

Un ottimo esempio di nebulosa a emissione: la nebulosa Rosetta, nella costellazione dell'Unicorno. Il tipico colore rossastro è dovuto all'emissione dell'idrogeno, eccitato dai raggi ultravioletti emessi dalle stelle brillanti al centro della nebulosa.



Grazie alla capacità dell'Hubble Space Telescope, è stato possibile riprendere la galassia NGC 1512 in diversi «colori», dall'ultravioletto al lontano infrarosso, per ottenere così più informazioni sull'oggetto. L'immagine è stata ottenuta riunendo le varie riprese a diverse lunghezze d'onda, mostrate nel pannello. L'immagine più a sinistra è stata ripresa nel lontano ultravioletto, a 220 nanometri, ed è stata «codificata» nell'immagine completa con il colore porpora. La seconda è stata invece ottenuta nell'ultravioletto vicino, a 333

nanometri. Nell'ultravioletto vengono evidenziate le regioni di formazione stellare, dove sono ancora presenti stelle molto giovani e calde. Le due immagini seguenti sono state ottenute rispettivamente con un filtro verde, 545 nanometri, e con uno giallo, 659 nanometri. Le ultime tre immagini sono state invece riprese nell'infrarosso, a lunghezze d'onda diverse fino a 1,875 micrometri. Le immagini nell'infrarosso sono utili per individuare le stelle in formazione, che sono ancora oscurate dalle loro nebulose.



Lo spettro emesso da Arturo, una gigante rossa. In questo caso, ogni riga orizzontale rappresenta una parte dello spettro larga 6 nanometri e l'intero spettro copre tutto il visibile. Le righe scure verticali che si osservano sono dovute alla presenza, nell'atmosfera della stella, di vari elementi chimici che assorbono alcune lunghezze d'onda ben precise.

Questo avviene perché a quella temperatura iniziano a formarsi delle molecole di idrogeno che, compresse nella sottilissima atmosfera della stella, spesso solo 10 metri, assorbono la radiazione rossa e infrarossa. La previsione è stata confermata pochi mesi fa da un gruppo di astronomi di varie nazionalità, guidato dal professor Ben R. Oppenheimer dell'Università della California a San Diego. Curiosamente, le stelle sono state individuate grazie al loro rapido (in termini astronomici) spostamento nel cielo, e solo in seguito sono state osservate spettroscopicamente.

I colori delle nebulose

Se tralasciamo il mondo delle stelle, allora il cielo si riempie anche di molti altri oggetti colorati, le cui tonalità dipendono però da processi fisici completamente diversi. Si tratta delle molte nebulose che si trovano nella nostra galassia. La maggior parte sono nebulose a emissione: gigantesche nubi da cui hanno di solito origine le stelle e i sistemi solari. Queste nebulose sono costituite principalmente da idrogeno e presentano tutte un colore rosso molto bello. Questo è dovuto al fatto che non emettono luce in virtù del loro calore, come le stelle, ma l'emissione è dovuta all'eccitamento delle molecole di idrogeno. Il motore di questa emissione è sempre una stella (o gruppo di stelle) giovane al centro della nebulosa, che ionizza il gas con la propria radiazione ultravioletta. Molto spesso, però, queste nebulose sono state «sporcate» dal materiale emesso da esplosioni di supernova e, quindi, contengono elementi diversi, ognuno con la sua emissione. Lo spettro di queste



Un'immagine della stella doppia Albireo, nella costellazione del Cigno, ottenuta con il telescopio Katzman del Lick Observatory. Questa doppia è particolarmente spettacolare, perché le sue due componenti sono colorate intensamente in blu e in arancione.

nebulose non è più quindi continuo, ma presenta una serie di linee di emissione ben precise. A volte, una nebulosa si può trovare troppo lontano dalla stella perché il suo gas venga ionizzato, e allora si limita a riflettere la luce che la raggiunge, apparendo di colore blu.

Oltre alle nebulose a emissione ne esistono anche altre, fra cui sono particolarmente interessanti quelle cosiddette planetarie. Queste nebulose sono, invece che l'inizio di una nuova stella, la fine di una vecchia. Sono infatti ciò che resta dell'esplosione di una stella o degli strati più esterni emessi da una stella morente. In questo caso, come si vede nelle immagini del Telescopio spaziale, queste nebulose sono multicolori perché, pur essendo costituite sostanzialmente ancora da idrogeno, contengono anche cospicue quantità di altri elementi, ognuno con la sua emissione. L'ossigeno di queste nebulose, per esempio, emette nel verde. Per fare un'analogia di laboratorio, sono delle specie di bruciatori bunsen, in cui i vari elementi vengono bruciati ed emettono la loro luce caratteristica. In



Rappresentazione
in falsi colori
della nebulosa
Rosetta.
In questa
immagine,
ottenuta dalla
composizione
di varie riprese
con diversi filtri,
le regioni in rosso
sono ricche
di idrogeno,
quelle in verde
di ossigeno e
quelle in blu
di zolfo.

T.A. Rector, B. Wolpa, M. Hama, KPNO 0.9-m Mosaic, AURA/NOAO/NSF





Teddy Barston/AURA/NOAO/NSF

Accostamento di colori nella nebulosa Trifida, nel Sagittario. La nebulosa rossa è una normale nebulosa a emissione, che invia raggi ultravioletti. In alto, la radiazione UV diventa troppo debole, e la nebulosa si limita a riflettere la luce blu delle stelle.

questo caso, i gas sono ancora caldi per via dell'esplosione, ma queste nebulose sono destinate a espandersi talmente tanto da scomparire abbastanza rapidamente, su scala astronomica.

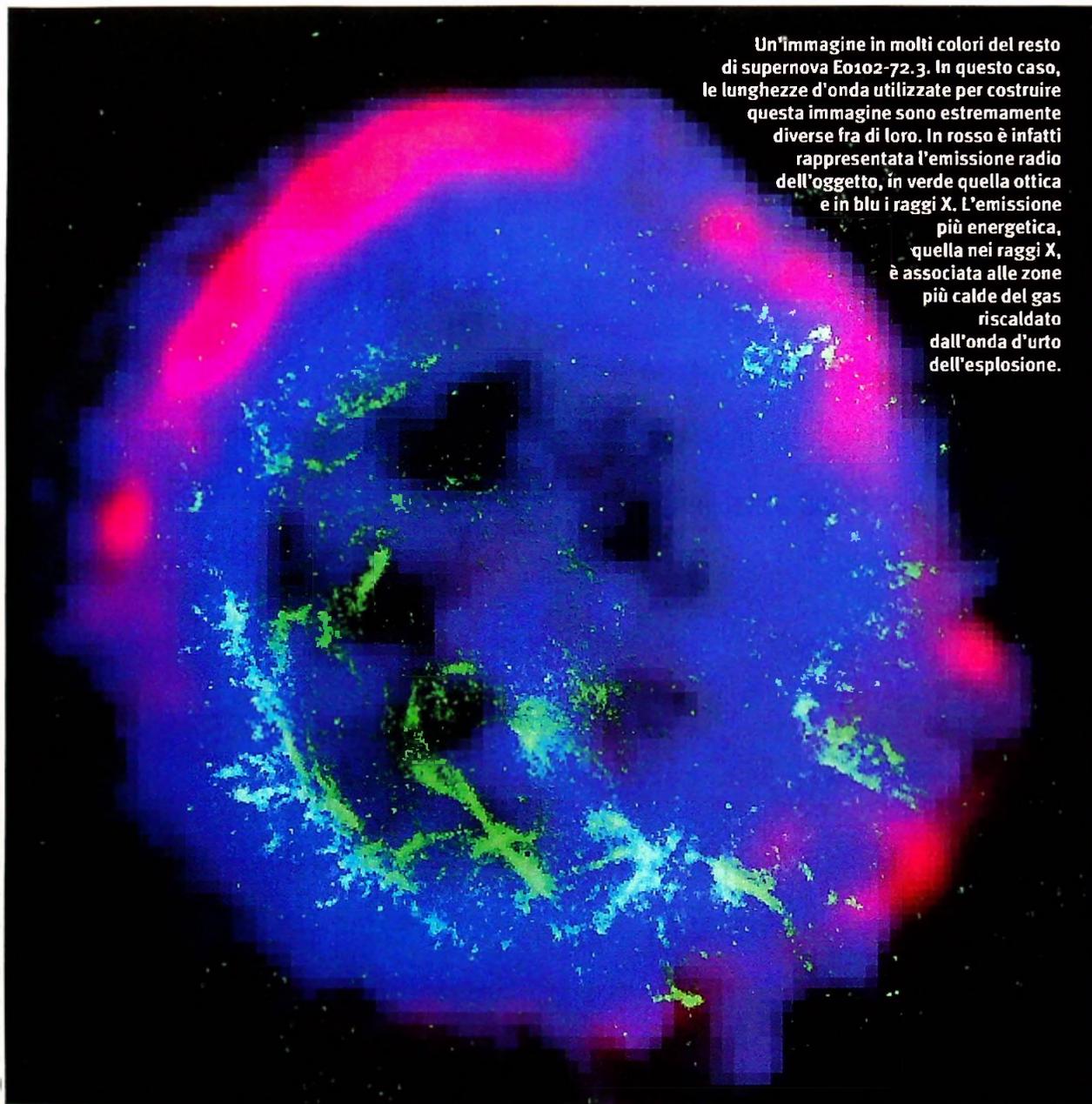
Tutti i colori dell'universo

Ma che cosa sono realmente i colori? La fisica ci insegna che essi corrispondono a diverse lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica comprese fra 400 e 700 nanometri. Questa però è solo una minuscola frazione dello spettro elettromagnetico; possiamo allora pensare alle onde radio, ai raggi X e ultravioletti eccetera, come a colori diversi? Gli astronomi sembrano pensarla così, e per loro il concetto di colore non potrebbe avere un significato più vasto; osservano il cielo praticamen-

te in tutte le lunghezze d'onda, dalle onde radio ai raggi X. Purtroppo, mentre alcuni di questi «colori» raggiungono facilmente il suolo terrestre, come le onde radio, altri vengono fermati dall'atmosfera, per cui è necessario disporre di osservatori nello spazio o a quote altissime. Proprio di recente, un telescopio sperimentale della NASA, trasportato a bordo di un pallone fino a una quota di 39 chilometri, ha ripreso le prime immagini di due oggetti osservandoli nei raggi X «duri», quelli più energetici. Fino a ora le osservazioni di questi «colori» erano state impossibili, semplicemente per la mancanza di ottiche in grado di focalizzare simili lunghezze d'onda. Ovviamente, le immagini riprese in queste diverse lunghezze d'onda vengono poi rappresentate facendo uso dei colori che vediamo, diventando rappresentazioni in falsi colori.

Un'immagine in molti colori del resto di supernova E0102-72.3. In questo caso, le lunghezze d'onda utilizzate per costruire questa immagine sono estremamente diverse fra di loro. In rosso è infatti rappresentata l'emissione radio dell'oggetto, in verde quella ottica e in blu i raggi X. L'emissione più energetica, quella nei raggi X, è associata alle zone più calde del gas riscaldato dall'onda d'urto dell'esplosione.

Raggi X (NASA/CXC/SAO); ottico (NASA/HST); radio: (CSIRU/AINF/AICA)



Colori spostati

L'astronomia riesce a sfruttare anche lo spostamento dei colori. Tutti abbiamo sentito parlare dello spostamento verso il rosso della luce delle sorgenti più lontane, le galassie, dovuto all'effetto Doppler e all'espansione dell'universo. Quello che accade è che, poiché più le galassie sono lontane da noi e più si allontanano velocemente, la loro luce appare per così dire «stirata», con una lunghezza d'onda maggiore. L'effetto è tale, per le sorgenti lontane, da far sì che esse scompaiano dall'universo visibile, per entrare in quello infrarosso. L'effetto è ancora più impressionante se si pensa che le galassie sono tipicamente oggetti blu, per via della presenza di numerose stelle giovani.

Ma i colori in astronomia si spostano. Sappiamo

tutti che esiste lo spostamento verso il rosso; meno persone sanno che, più raramente, se ne ha uno verso il blu, di piccola entità. Ma che cosa significa questo spostamento, e quanto cambia le cose? Tantissimo. Nel caso delle galassie più lontane può addirittura trasformare un oggetto blu in una sorgente infrarossa, quasi invisibile. L'osservazione nell'infrarosso diventa quindi importante in cosmologia, perché fornisce indicazioni sugli oggetti che esistevano quando l'universo aveva solo una frazione della sua età attuale. Inoltre, i vari colori interagiscono in modo diverso con la materia. Per esempio, la luce verde non passa attraverso un filtro rosso; viceversa i raggi X penetrano i tessuti molli e vengono pertanto usati per le radiografie; e gli infrarossi riescono a penetrare la cortina di polvere che tenta di nasconderci l'universo.

L'AUTORE

ALDO CONTI
dottore di ricerca
in fisica,
è giornalista
scientifico
e si occupa
prevalentemente
di astrofisica
e astronomia.



I geni per la visione dei colori

di Jeremy Nathans

L'isolamento dei geni che codificano per le proteine fotosensibili dell'occhio umano fornisce nuove indicazioni sul processo evolutivo della percezione normale dei colori e sulle basi genetiche del daltonismo



Bruce Coleman Inc./Nicholas deVore III

Leigh Hunt, poeta inglese del XIX secolo, scrisse che i colori sono i sorrisi della natura; ma come può un osservatore distinguere un sorriso da un altro? La risposta è fornita in gran parte da tre classi di cellule a forma di cono, sensibili ai colori, che si trovano nella retina dell'occhio. Ciascun tipo di cellula risponde in modo diverso alla luce riflessa da un oggetto colorato a seconda che la cellula contenga un pigmento sensibile al rosso, al verde o al blu; i pigmenti sono proteine fotosensibili che vengono eccitate particolarmente da lunghezze d'onda lunghe (rosso), intermedie (verde) o corte (blu) della luce visibile. Le quantità di luce assorbite rispettivamente da ciascuna classe di coni sono tradotte in segnali elettrici dai nervi retinici e quindi trasmesse al cervello, dove il segnale complessivo induce la sensazione di uno specifico colore. Il ruolo dei pigmenti nella discriminazione dei colori è conosciuto da decenni, ma la loro struttura non era stata chiarita fino a tempi recenti. I miei colleghi e io abbiamo ora identificato i geni che codificano per i pigmenti, determinato le loro strutture e quindi dedotto le sequenze amminoacidiche delle

proteine codificate. Questo lavoro, condotto presso la School of Medicine della Stanford University, dovrebbe portare all'isolamento dei pigmenti stessi e a un esame dettagliato del loro funzionamento. I nostri studi hanno anche fornito chiarimenti sull'evoluzione della percezione dei colori normale e di quella anomala, spesso chiamata cecità ai colori. (Solitamente le anomalie riguardano la discriminazione di alcuni colori, non di tutti.)

Le nuove scoperte arricchiscono il quadro della visione dei colori costruito pezzo per pezzo nel corso degli ultimi secoli. Isaac Newton fornì il primo importante contributo quando scoprì che la luce solare, o luce bianca, si scompone in una serie di colori se rifratta da un prisma di vetro. Egli riconobbe anche che la radiazione corrispondente a ciascun angolo di rifrazione ha un colore caratteristico, che va dal rosso, per la luce meno rifratta, attraverso l'arancione, il giallo, il verde, fino al blu, all'indaco e al violetto per angoli di rifrazione progressivamente maggiori. Oggi si sa che ciascun angolo di rifrazione, e quindi ciascun colore puro, corrisponde a luce di una specifica lunghezza d'onda. Newton inoltre osservò che l'occhio umano spesso non è in grado di distinguere colori formati da combinazioni del tutto diverse di radiazioni luminose. Egli scoprì, per esempio, che combinando opportune radiazioni luminose con angoli di rifrazione diversi, come il rosso e il verde, si poteva produrre una sensazione di colore indistinguibile da quella prodotta da una terza radiazione pura, in questo caso il giallo, con angolo di rifrazione intermedio tra quelli precedenti.

Verso la fine del XVIII secolo alcuni ricercatori svilupparono le osservazioni di Newton e stabilirono che la visione dei colori è tricromatica. Questo significa che la maggior parte dei colori può essere ottenuta da una mescolanza di tre colori primari; in tutti gli altri casi una corrispondenza può essere ottenuta mescolando prima due colori primari e aggiungendo il terzo al colore dato. Molti colori monocromatici, o puri, possono fungere da primari, ma tutti i gruppi di colori primari sono costituiti da radiazioni

di lunghezze d'onda diverse, una lunga, una media e una corta; quando si mescolano i tre colori primari in parti uguali si produce la sensazione del bianco. Per convenzione, oggi si considerano primari il rosso, il verde e il blu.

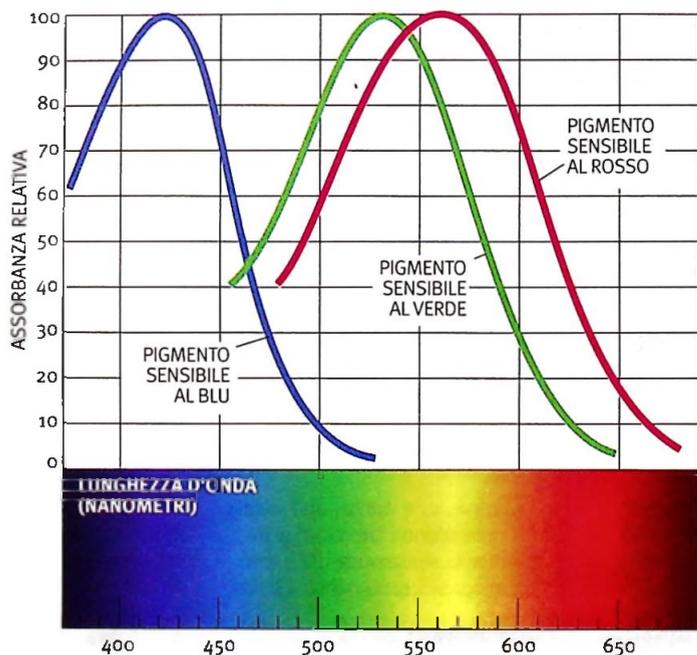
Nel 1802 il medico e fisico inglese Thomas Young propose che il tricromatismo fosse dovuto a una particolarità fisiologica umana, ipotizzando che i colori visti da un soggetto siano determinati dal diverso grado di eccitazione di tre tipi di recettori. Egli sottolineò che «essendo quasi impossibile immaginare che ciascun punto sensibile della retina contenga un numero infinito di particelle, ciascuna capace di vibrare in perfetta sintonia con ogni possibile lunghezza d'onda, è necessario ipotizzare che ne esista un numero limitato, corrispondente, per esempio, ai tre colori primari». Occorse molto tempo per confermare l'ipotesi di Young, ma oggi si sa che le tre classi di recettori (i coni) hanno sensibilità alla luce distinte, anche se in parte sovrapposte. Per esempio, i recettori per il rosso e per il verde assorbono entrambi la luce arancione, ma i primi la assorbono in modo più efficiente.

Il daltonismo

Poco tempo prima che Young proponesse la sua teoria, un suo contemporaneo, John Dalton (il padre della teoria atomica), contribuì a sollevare l'interesse per lo studio della visione anomala dei colori, studio che ha accompagnato e ispirato quello della visione normale. Nel suo primo articolo presentato alla Manchester Literary and Philosophical Society, pubblicato nel 1794, Dalton riferì di non vedere i colori come li vedevano altre persone. Lo scienziato affermava: «Quella parte dell'immagine che altri chiamano rossa appare a me poco più di un'ombra o mancanza di luce» e aggiungeva anche che l'arancione, il giallo e il verde gli apparivano come «qualcosa che dovrei chiamare sfumature diverse di giallo». Oggi si definisce daltonismo l'incapacità di distinguere i colori nella regione dello spettro che va dal

L'arcobaleno appare quando la luce solare, passando attraverso goccioline d'acqua, viene rifratta e scomposta nei colori costituenti. L'analisi di Isaac Newton di questo e di un altro fenomeno simile (la scomposizione, attraverso un prisma di vetro, della luce bianca) inaugurò secoli di ricerche sulla visione dei colori. Oggi si sa che la percezione dei colori dipende dal diverso grado di eccitazione dei tre tipi di pigmenti visivi della retina. I fotorecettori a forma di cono che contengono i pigmenti trasformano la luce assorbita in segnali elettrici e li trasmettono al cervello per l'interpretazione.

Le curve indicano le varie sensibilità dei tre pigmenti dei coni allo spettro della luce visibile. Il pigmento sensibile al blu viene eccitato soprattutto dalle lunghezze d'onda corte; i pigmenti sensibili al verde e al rosso da quelle intermedie e lunghe. I pigmenti non sono stati ancora isolati; perciò le sensibilità sono state ricavate da singoli coni prelevati da cadaveri.



rosso al verde («discriminazione tra rosso e verde»), che si riscontra nell'8 per cento circa degli uomini di razza caucasica e nell'1 per cento delle donne. Esistono anche difetti nella capacità di distinguere i colori nella regione blu dello spettro, ma sono rari.

Intorno alla metà del XIX secolo il fisico scozzese James Clerk Maxwell individuò due tipi di daltonismo mostrando diversi colori ad alcuni soggetti ed esaminando sistematicamente i colori che essi non distinguevano (si veda l'articolo *Pigmenti visivi e daltonismo* di W. A. H. Rushton in «Le Scienze» n. 83, luglio 1975). Seguendo la teoria di Young dei tre recettori, Maxwell valutò la sensibilità alla luce dei recettori e divise i soggetti con visione a colori difettosa a seconda che confondessero colori che eccitavano ugualmente i recettori per il rosso e per il blu oppure quelli per il verde e per il blu; presumibilmente i soggetti con una visione a colori normale riuscivano a distinguere tali colori in base ai diversi livelli di eccitazione dei loro recettori per il verde e il rosso rispettivamente. Maxwell dedusse correttamente che a un gruppo di soggetti con una visione a colori difettosa mancava il recettore per il verde e all'altro quello per il rosso. Questi individui vengono definiti rispettivamente deuteranopi e protanopi.

Poco più tardi il matematico e fisico inglese John William Strutt, meglio conosciuto come Lord Rayleigh, introdusse l'anomaloscopia, strumento sul quale ancora oggi si basa l'esame della visione dei colori. L'anomaloscopia proietta tre differenti luci monocromatiche su uno schermo. Negli studi sulla discriminazione dei colori nella regione dello spettro che va dal rosso al verde, si proiettano su una metà dello schermo una luce rosso scuro e una verde, in

modo che si sovrappongano e si mescolino mentre una luce gialla viene proiettata separatamente sull'altra metà dello schermo: i soggetti esaminati regolano il rapporto fra la luce rossa e quella verde e l'intensità della luce gialla fino a che le due metà dello schermo risultino corrispondenti.

Il funzionamento dell'anomaloscopia si basa sul fatto che le persone con visione normale dei colori possiedono due classi di recettori, quelli per il rosso e quelli per il verde, che operano nella regione dello spettro che va dal rosso al verde. (I recettori per il blu non sono interessati dall'esperimento.) I soggetti con una visione normale percepiscono un campo uniforme quando i recettori per il rosso e per il verde assorbono ciascuno una quantità uguale di luce (ossia un uguale numero di fotoni al secondo) dalle due metà dello schermo. Questi soggetti fanno corrispondere il giallo con un rapporto altamente riproducibile di luce rossa e verde (si veda l'illustrazione nella pagina a fronte). Invece ai soggetti dicromati (protanopi e deuteranopi) può avvenire di far corrispondere la luce gialla con quella rossa o quella verde da sole oppure con qualsiasi proporzione di luce rossa e verde. Questi soggetti stabiliscono tali corrispondenze poiché tutt'e tre le luci sono rilevate da un'unica classe di recettori; correggendo l'intensità di una sola, un dicromato può rendere uguale il numero di fotoni ricevuti dalle due metà dello schermo.

Queste differenze tra soggetti normali e soggetti protanopi e deuteranopi permisero a Rayleigh di individuare i dicromati con il suo nuovo strumento. Inoltre, esaminando parenti e amici, egli identificò anche due altri gruppi di soggetti con una visione dei colori anomala. Come i soggetti normali (e diversamente dai dicromati), questi individui avevano bisogno sia di luce rossa sia di luce verde per stabilire una corrispondenza con il giallo, ma le usavano in proporzioni diverse dalle solite. Uno di questi gruppi usava più verde e meno rosso; per l'altro valeva il contrario. Rayleigh concluse che questi soggetti, oggi chiamati rispettivamente tricromati deuteranomali e protanomali, possedevano recettori per il verde o il rosso con sensibilità spettrali atipiche.

Verso la metà del XX secolo studi psicofisici di questo tipo, basati sul giudizio dei soggetti, avevano offerto un notevole supporto alla teoria di Young dei tre recettori e altri studi avevano indicato che i coni della retina fossero quei recettori. Tuttavia, trovare una prova diretta a favore di queste ipotesi rimaneva dal punto di vista tecnico un problema. Uno degli ostacoli consisteva nella difficoltà di isolare i coni, che nella retina sono inframmezzati ai più numerosi bastoncelli (i fotorecettori responsabili della visione crepuscolare in bianco e nero).

Gli spettri di assorbimento

Ciononostante, si riuscì a trovare una soluzione ingegnosa. Negli anni sessanta Paul Brown e George Wald della Harvard University ed Edward MacNichol, Jr., William Dobbie e William Marks della Johns Hopkins University costruirono microspettrofotometri capaci di determinare l'assorbimento di una singola cellula fotorectrice. Questo strumento fa passare un raggio di luce di una certa lunghezza d'onda attraverso la regione di un cono sensibile ai

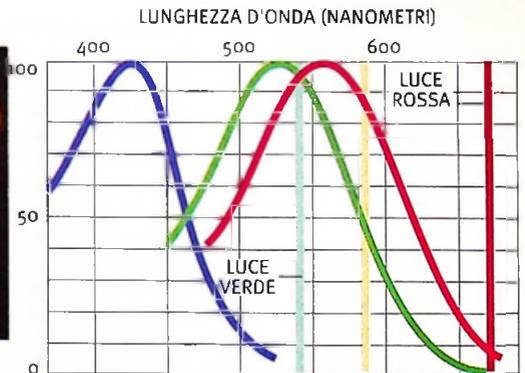
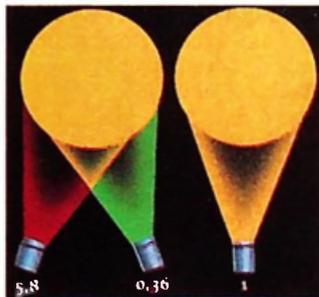
Gli accoppiamenti di colori (a sinistra nella figura) stabiliti in una prova per la discriminazione del rosso e del verde sono raffigurati accanto alle curve di sensibilità spettrale dei soggetti (a destra). Lo strumento usato per la prova, l'anomaloscopio di Rayleigh, proietta una luce rossa e una verde sovrapposte su una metà di uno schermo bianco e una luce giallo-arancione sull'altra metà. I soggetti regolano il rapporto tra luce rossa e luce verde e l'intensità della luce gialla fino a che le due parti dello schermo appaiono ugualmente luminose (ossia fino a che la luce assorbita da ciascun tipo di pigmento su una metà dello schermo sia uguale a quella assorbita sull'altra metà). I numeri sotto alle luci indicano le rispettive intensità. I soggetti normali (a) hanno bisogno di una miscela di luce rossa e verde per arrivare a una corrispondenza con il giallo e scelgono un'alta intensità di rosso e una bassa intensità di verde. (Rispetto alla luce gialla, i pigmenti sensibili al rosso e al verde assorbono entrambi in modo meno efficiente la luce rossa e in modo più efficiente quella verde.) Le persone prive del pigmento sensibile al rosso (b) o al verde (c) hanno la caratteristica di individuare una corrispondenza con la luce gialla usando solo la luce rossa oppure quella verde (come nel caso illustrato). I soggetti i cui pigmenti sensibili al rosso (d) o al verde (e) hanno una sensibilità spettrale anomala usano nella prova sia la luce rossa sia la luce verde, ma in confronto ai soggetti normali scelgono un eccesso di rosso o di verde rispettivamente.

colori e un raggio identico attraverso una regione diversa; durante la prova la lunghezza d'onda della luce viene fatta variare per tutto lo spettro. Per ogni specifica lunghezza d'onda la differenza di intensità dei due raggi emergenti è una misura dell'assorbanza della regione sensibile ai colori a quella lunghezza d'onda. Gli studi effettuati con questo strumento hanno dimostrato che i coni isolati durante un'autopsia manifestavano tre spettri di assorbimento diversi. Gli spettri osservati erano in buon accordo con le sensibilità previste dagli studi psicofisici.

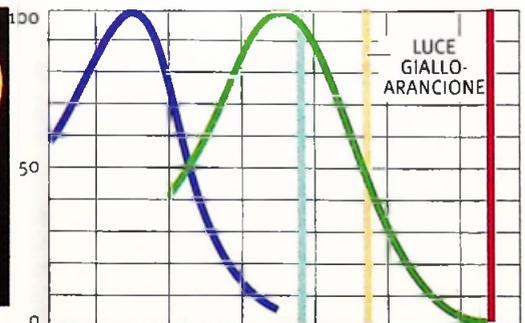
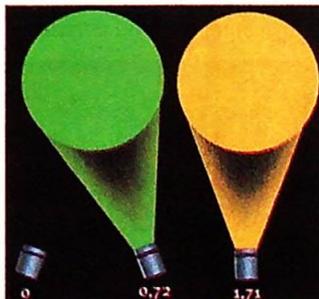
Un grafico che riporta la frazione relativa dei fotoni assorbiti in un secondo da ciascuna classe di coni rispetto alle lunghezze d'onda dello spettro visibile presenta tre curve a campana. I coni sensibili al blu assorbono lunghezze d'onda tra 370 e 530 nanometri (miliardesimi di metro) e hanno il massimo della sensibilità intorno a 420 nanometri. Sia i coni sensibili al rosso sia quelli sensibili al verde coprono la maggior parte dello spettro, ma hanno una particolare sensibilità alle lunghezze d'onda tra 450 e 620 nanometri: i coni sensibili al verde mostrano la massima efficienza intorno a 535 nanometri, quelli sensibili al rosso intorno a 565 nanometri.

A partire dagli anni settanta sono emerse nuove prove a sostegno dell'idea che i soggetti dicromati manchino di questa o quella classe di recettori. William Rushton dell'Università di Cambridge condusse un esperimento dirigendo un raggio di luce di lunghezza d'onda accordabile negli occhi di individui dicromati e misurando la luce riflessa (e quindi non assorbita) dalla retina; dimostrò così che particolari lunghezze d'onda non vengono assorbite in modo normale da questi soggetti. Più recentemente James

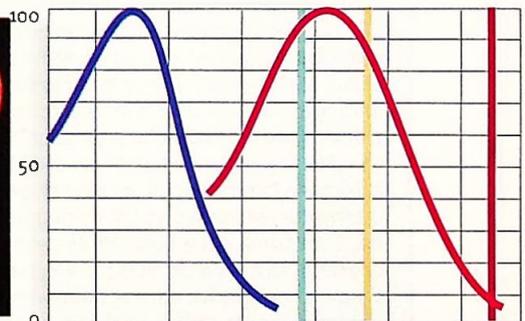
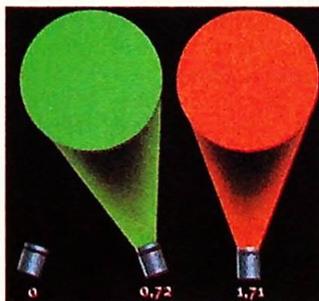
a. visione normale dei colori



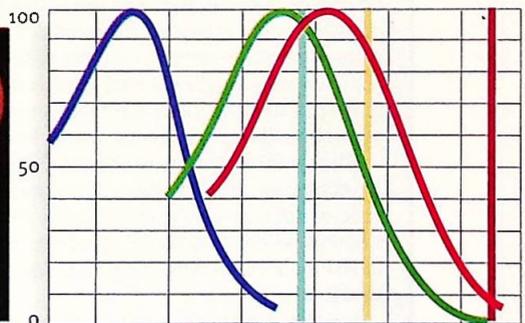
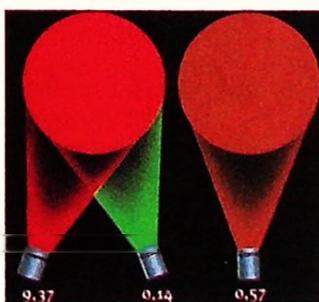
b. protanopo



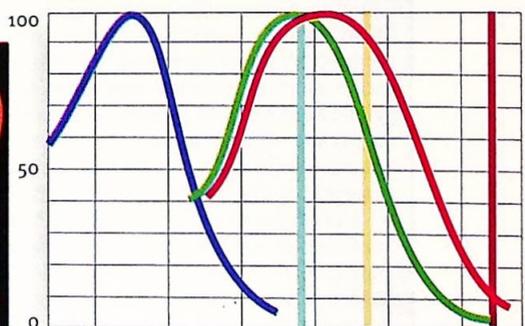
c. deuteranopo



d. protanomalo



e. deuteranomalo



Bowmaker dell'Università di Londra, John Mollon di Cambridge e H. Dartnall dell'Università del Sussex hanno dimostrato con un microspettrofotometro che la retina di un individuo deuteranopo non contiene la classe di coni sensibili al verde.

Nuovi risultati hanno fornito anche informazioni sulle cause del tricromatismo anomalo. Per mezzo di tecniche psicofisiche, Rushton e, indipendentemente, Thomas Piantanida e Harry Sperling, allora all'Università del Texas, hanno dimostrato che le curve di sensibilità spettrale dei recettori protanomali e deuteranomali sono intermedie alle curve normali di assorbimento dei coni sensibili al rosso e al verde.

Essendo ormai certa l'esistenza di tre classi diverse di coni, all'inizio degli anni ottanta il mio collega David Hogness e io rivolgemmo la nostra attenzione

allo studio delle basi genetiche della visione dei colori normale e anomala. Oltre a contribuire al tentativo di isolare le proteine dei pigmenti, speravamo di dare completezza agli studi di genetica classica che tentavano di ricostruire la trasmissione ereditaria dei difetti nella visione dei colori in una famiglia.

Tali studi si basavano sul fatto, noto da tempo, che i difetti nella discriminazione del rosso e del verde sono più comuni nei maschi che nelle femmine. Un'analisi di questo andamento indicò che responsabili dell'anomalia sono geni localizzati sul cromosoma X (del sesso). I maschi presentano un'anomalia nella discriminazione del rosso e del verde se il loro unico cromosoma X (ereditato dalla madre) porta quel carattere; le femmine sono affette solo se hanno ricevuto un cromosoma X anomalo da cia-

La variabilità della visione dei colori

Riassunti in questo articolo del 1986, i lavori di Jeremy Nathans e dei suoi collaboratori hanno rappresentato un punto di svolta nella comprensione della neurofisiologia della visione dei colori. Da 15 anni, grazie ai progressi della genetica, questi lavori si sono sviluppati in più direzioni.

Per prima cosa si è visto che la molecola del pigmento dei coni «rossi» si distingue da quella del pigmento dei coni «verdi» solo per 15 amminoacidi su un totale di 364 (si veda l'illustrazione *d a pagina 69*). Se ne deduce che la sostituzione di alcuni amminoacidi di un pigmento permette di passare a un altro pigmento. Gli studi sperimentali realizzati in questa direzione hanno mostrato che sette amminoacidi hanno un ruolo cruciale: in particolare quelli i cui codoni sono posti sull'esone 5 del gene (amminoacidi dei siti 277, 285 e 309). È per questo motivo che, se nel sito 285 si rimpiazza l'alanina con la treonina, il massimo della curva di assorbimento del pigmento si sposta di 14 nanometri verso le lunghezze d'onda più ampie: passa, per esempio, da 535 nanometri (verde intenso) a 549 nanometri (verde-giallo). Ne risulta un polimorfismo nella struttura molecolare dei pigmenti visivi, che si traduce nel fenotipo con variazioni nei risultati all'anomaloscopia nel soggetto normale, e nel daltonismo. La piccola differenza tra i pigmenti dei coni «verdi» e quelli dei coni «rossi» suggerisce, inoltre, che tutti e due derivino da un pigmento ancestrale presente in un'epoca abbastanza recente dell'evoluzione.

Gli scambi di frammenti cromosomici intra- e intergenici con *crossing-over* (incrocio dei cromosomi nel momento di una divisione cellulare) e la molteplicità dei geni già indicati da Nathans rendono conto del grande polimorfismo genetico della visione a colori, che comporta, anche nello stato normale, geni ibridi.

Il numero dei geni è una questione ancora aperta, ma in generale si è disposti ad accettare l'idea che il gene per il pigmento rosso non sia unico, mentre per il pigmento verde sono stati individuati fino a nove geni. Tuttavia, non tutti i geni presenti sono espressi, e l'unico gene attivo sarebbe in seconda posizione nella sequenza genica. Questo dibattito non è puramente accademico: il numero e i tipi di geni influenzerebbero le variazioni della visione a colori nella popolazione mondiale e causerebbero le varietà fenotipiche del daltonismo.

La comprensione delle anomalie della visione a colori ha beneficiato di questi fondamentali progressi. L'avvenimento più spettacolare è stato l'esame genetico del DNA dell'occhio di Dalton, che era conservato in un'ampolla dalla sua morte, av-

venuta nel 1844. L'analisi ha dimostrato che Dalton era deuteranopo (insensibile al verde), e non protanopo (insensibile al rosso) come lasciava pensare la sua testimonianza.

La genetica ha anche dimostrato la localizzazione del gene del pigmento dei coni «blu» sul cromosoma 7 (un autosoma, che non partecipa alla determinazione del sesso). Questa situazione distingue formalmente la tritanopia ereditaria, dovuta a un difetto di questo pigmento, dall'atrofia ottica ereditaria dominante con la quale talvolta è stata confusa, e il cui gene è sul cromosoma 3.

Il monocromatismo a coni «blu», dovuto all'assenza contemporanea di espressione di due geni per i pigmenti verde e rosso, non è semplicemente una associazione della protanopia e della deuteranopia, ma sembra legato a una disfunzione (forse una delezione) dell'LCR (regione di controllo del locus) del cromosoma X.

Sono stati così scoperti molti geni per l'acromatopsia totale, ereditaria e recessiva, in particolare sul cromosoma 8. Quest'ultimo ha l'interessante particolarità di essere stato ritrovato contemporaneamente in Europa e sulle isole Pingelap, un atollo nell'Oceano Pacifico la cui popolazione è in grande maggioranza acromata e alla quale Oliver Sacks ha dedicato una monografia (*L'isola dei senza colore*, 1997).

Infine, lo studio della visione a colori animale lasciava pensare fino ad ora che le scimmie del Mondo Antico fossero sempre tricromati, ma ricercatori giapponesi hanno recentemente scoperto alcune dicromatie in una popolazione di più di 3000 scimmie. Al contrario, il dicromatismo è di regola presso le scimmie del Nuovo Mondo e questa differenza fa propendere per un'evoluzione posteriore alla separazione dei continenti, avvenuta circa 40 milioni di anni fa. Un caso molto interessante è quello della scimmia Saimiri, in cui le femmine omozigoti (che portano le stesse versioni di geni sui due alleli cromosomici) sono dicromati, mentre le femmine eterozigoti sono tricromati, essendo espressi due geni differenti. Se ne è dedotta la possibilità che le femmine eterozigoti per il daltonismo possano avere una certa forma della visione a colori tetracromatica (con quattro pigmenti nei coni), ma le ricerche cliniche non hanno per ora confermato questa ipotesi, probabilmente perché la rete neurale della retina umana non si è adattata a un simile processo.

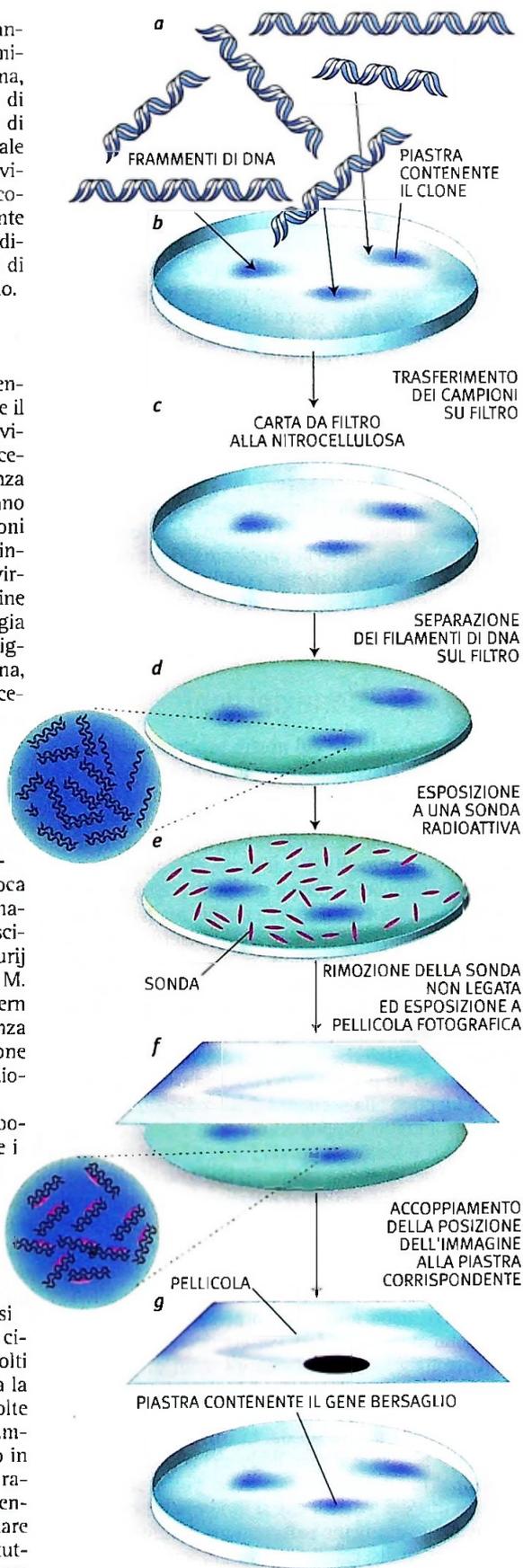
PHILIPPE LANTHONY,
Laboratorio della visione dei colori, Centre hospitalier
national d'ophtalmologie des Quinze-Vingts, Parigi.

scuno dei genitori. I nostri studi hanno indicato anche che i difetti nella sensibilità al blu sono determinati da un gene che si trova su un altro cromosoma, non del sesso (autosoma). Abbiamo stabilito di prendere in esame la spiegazione più semplice di questi andamenti nella trasmissione ereditaria, vale a dire che le anomalie nella visione dei colori derivino da alterazioni ereditarie a carico dei geni che codificano per i pigmenti dei con. Presumibilmente mutazioni in tali geni possono dare luogo alla perdita di un pigmento funzionale o alla produzione di un pigmento con spettro di assorbimento anomalo.

Il gene della rodopsina bovina

La nostra ipotesi di lavoro richiedeva l'isolamento dei geni che codificano per i pigmenti dei con e il confronto delle loro strutture in persone con una visione dei colori normale e difettosa. Spesso si procede all'isolamento dei geni determinando la sequenza amminoacidica delle proteine per cui essi codificano e utilizzando l'informazione per ottenere indicazioni sulla struttura dei geni. Tuttavia, poiché quando intraprendemmo il nostro lavoro non si sapeva virtualmente nulla riguardo alla struttura delle proteine dei pigmenti, stabilimmo di adottare una strategia meno diretta. Partimmo dal presupposto che i pigmenti dei con e quello dei bastoncelli, la rodopsina, si siano evoluti da un unico pigmento visivo ancestrale e che perciò i geni attuali possedano alcune sequenze simili di basi nucleotidiche (le quattro unità strutturali la cui successione lungo l'elica del DNA codifica l'informazione genetica). Pensammo che, se avessimo conosciuto la struttura del gene per la rodopsina, avremmo potuto ottenere qualche informazione sulla struttura dei geni per i pigmenti dei con. A quell'epoca non erano ancora stati isolati né la rodopsina umana né il suo gene, ma alcuni ricercatori erano riusciti a isolare la rodopsina di bovino. Inoltre Yuriy Ovc'innikov dell'Istituto di chimica bio-organica M. S'emyakin di Mosca e Paul Argrave della Southern Illinois University avevano determinato la sequenza amminoacidica della proteina. Questa informazione sarebbe stata il punto di partenza per l'identificazione dei geni per i pigmenti dei con.

Stabilimmo di isolare il gene per la rodopsina bovina e di utilizzarlo come sonda per identificare i geni umani per la rodopsina e per i pigmenti dei con. Il metodo si basava sulla tecnica dell'ibridazione del DNA, che sfrutta il fatto che un singolo filamento di DNA forma una doppia elica stabile con un secondo filamento se le sequenze di basi nucleotidiche dei due filamenti sono complementari; in particolare, l'adenina si appaia sempre con la timina e la guanina con la citosina. La tecnica di ibridazione comprende molti passaggi, ma essenzialmente il ricercatore taglia la doppia elica di DNA da analizzare e produce molte copie di ciascun frammento clonandolo. Un campione prelevato da ciascun clone viene separato in filamenti singoli di DNA e una sonda marcata radioattivamente (cioè un altro frammento di filamento singolo di DNA), che si pensa sia complementare al gene cercato, viene aggiunta ai campioni. Se tutto procede per il meglio, la sonda si lega stabilmente



L'ibridazione del DNA ha permesso di identificare i geni per la rodopsina e per i pigmenti dei con. I ricercatori hanno frammentato una doppia elica di DNA (a), hanno separato i frammenti e li hanno clonati in virus batterici cresciuti in coltura batterica. Ogni virus ha formato una placca, ossia una zona di rapido accrescimento virale (b). Le capsule sono state coperte con carta da filtro nitrocellulosa, in modo che vi aderisse un campione di ogni placca (c). Il DNA raccolto sul filtro è stato separato in filamenti (d) ed esposto a una sonda marcata radioattivamente (e), formata da un singolo filamento di DNA del gene bovino per la rodopsina (*in rosso*). Se la sonda fosse stata simile ai geni umani si sarebbe ibridata con questi geni. Per capire se la sonda si fosse legata ai geni, la carta da filtro è stata coperta con una pellicola fotografica (f): macchie scure sono apparse in corrispondenza dei siti di legame (g). Così si sono identificati i cloni che contenevano i geni in esame facendo coincidere le macchie con le placche.

al frammento a essa complementare, permettendo così di identificare il gene in esame (si veda l'illustrazione nella pagina precedente).

Normalmente, avremmo tentato la messa a punto di una sonda che ci permettesse di realizzare il nostro primo obiettivo, cioè l'identificazione del gene per la rodopsina bovina, compilando una lista di tutte le possibili sequenze di basi che potevano produrre la sequenza amminoacidica nota della rodopsina. In seguito avremmo esaminato diverse sonde costruite sulla base di quella lista. Fortunatamente però riuscimmo a evitare gran parte di questo procedimento perché avevamo a disposizione una sonda per identificare il gene della rodopsina bovina. H. Gobind Khorana, Daniel Oprea e Arnold Satterthwait del Massachusetts Institute of Technology e Meredith Applebury e Wolfgang Baehr della Purdue University avevano già individuato una sequenza di DNA che si lega in modo efficiente alle molecole di RNA messaggero che codifica per la rodopsina bovina. (L'RNA messaggero è la molecola a filamento singolo che porta l'informazione contenuta nel DNA dal nucleo al citoplasma, dove dirige la produzione della proteina codificata.) Basandoci sulla sequenza di DNA ottenuta da Khorana e Applebury, sintetizzammo una sonda e la usammo per identificare il gene per la rodopsina bovina.

L'identificazione dei geni

Nella seconda fase del nostro programma utilizzammo un filamento del gene della rodopsina bovina che avevamo appena identificato come sonda per individuare i geni umani per la rodopsina e per i pigmenti dei con. La sonda si legava fortemente solo a un segmento di DNA umano, che analisi successive riconobbero come il gene che codifica per la rodopsina. La sonda si legava anche, ma più debolmente, a tre altri segmenti di DNA. Determinando le loro sequenze nucleotidiche, scoprimmo che i segmenti avevano regioni codificanti omologhe a quelle dei geni per la rodopsina umana e bovina. L'analisi delle sequenze amminoacidiche delle proteine codificate mostrò che anche le molecole erano simili tra loro: il 40 per cento di ciascuna catena proteica era identico alla sequenza della rodopsina.

Naturalmente supponevamo che i segmenti di DNA a cui si legava la sonda fossero i geni per i tre pigmenti dei con, ma avevamo bisogno di ulteriori conferme sperimentali. Per esempio, speravamo che gli RNA messaggeri corrispondenti alle sequenze che si legavano alla sonda sarebbero stati trovati nella retina dell'occhio, il solo luogo dove vengono prodotti i pigmenti visivi e quindi anche i loro RNA. E in effetti nella retina erano presenti RNA corrispondenti ai DNA ibridati. Per verificare se le nostre scoperte fossero coerenti con gli studi di genetica classica individuammo dove si trovavano esattamente sui cromosomi i segmenti di DNA messi in evidenza dalla nostra sonda. In collaborazione con Thomas Shows e Roger Eddy del Rosewell Park Memorial Institute di Buffalo (New York), scoprimmo che due dei tre geni che si ibridano debolmente si trovano esattamente nella regione del cromosoma X in cui le analisi classiche avevano localizzato l'origine dei difetti nella discriminazione del rosso e del

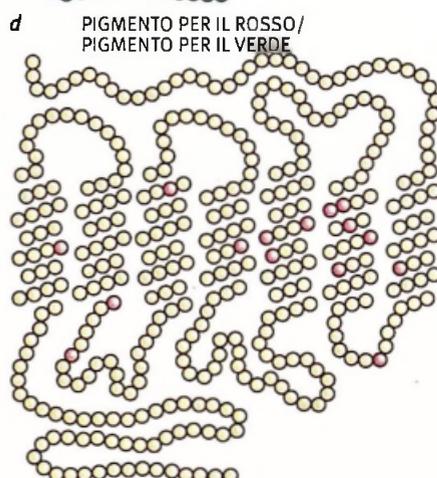
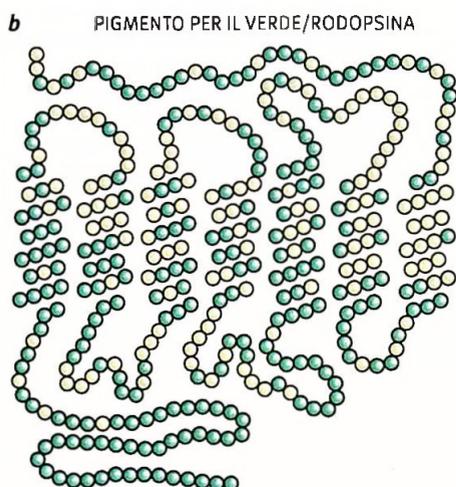
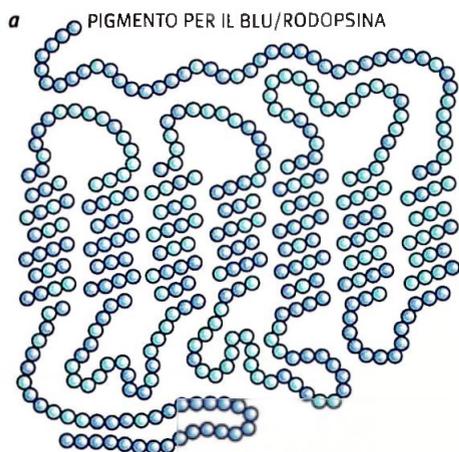
verde. Ne traemmo la conclusione che questi geni codificano per i pigmenti sensibili al rosso e al verde e studi successivi confermarono questa idea. Il terzo gene, che, come oggi sappiamo, codifica per il pigmento sensibile al blu, si trova sul cromosoma 7, una scoperta coerente con la nozione che la visione anomala del blu è determinata da un autosoma.

La notevole omologia esistente tra il gene per la rodopsina e i tre geni per i pigmenti sensibili ai colori suggeriva che tutti e quattro i geni si fossero in realtà evoluti dallo stesso progenitore. Gli elementi disponibili facevano pensare che in uno stadio ancestrale un gene progenitore avesse dato origine ad altri tre geni: quello per la rodopsina, quello per il pigmento sensibile al blu e un terzo gene che codificava per un pigmento sensibile alla regione dello spettro visibile che va dal rosso al verde. Questo terzo gene si sarebbe sdoppiato più recentemente, dando origine a un gene per il pigmento sensibile al rosso e a uno per il pigmento sensibile al verde.

Siamo indotti a pensare che questi ultimi due geni siano il prodotto di uno sdoppiamento abbastanza recente perché il loro grado di omologia è notevolmente elevato: addirittura il 98 per cento del loro DNA è identico e questo fa pensare che abbia avuto poco tempo per modificarsi. L'idea che questo evento si sia verificato non molto tempo fa, almeno in termini evolutivi, è suffragata dalle scoperte di Gerald Jacobs dell'Università della California a Santa Barbara, in collaborazione con Bowmaker e Mollon. Essi hanno dimostrato che le scimmie del Nuovo Mondo hanno un solo gene per il pigmento visivo sul cromosoma X, mentre le scimmie del Vecchio Mondo, più strettamente imparentate con gli esseri umani, hanno due geni per i pigmenti visivi su quel cromosoma. L'aggiunta del secondo gene sul cromosoma X deve essere avvenuta in un momento successivo alla separazione dell'America Meridionale dall'Africa, circa 40 milioni di anni fa.

Rimaneggiamenti cromosomici

Le scoperte che finora abbiamo descritte non erano del tutto inaspettate, ma un'altra fu sorprendente. Prendendo in esame i geni per i pigmenti visivi isolati dal cromosoma X di 17 fra i nostri colleghi maschi, tutti con visione dei colori normale, scoprimmo che il gene per il pigmento sensibile al rosso era sempre presente in una singola copia, mentre l'altro gene, quello che codifica per il pigmento sensibile al verde, era presente in una, due o tre copie. L'esistenza di più copie era sorprendente, perché un solo gene per il pigmento sensibile al verde è presumibilmente sufficiente per una visione normale dei colori. Recenti esperimenti suggeriscono che i geni per i pigmenti visivi siano disposti in una sequenza continua lungo il cromosoma X e che questa disposizione «a tandem» spieghi la variabilità nel numero dei geni. Geni simili disposti a tandem hanno la tendenza a subire una variazione del numero di copie nel corso della meiosi, il processo di divisione cellulare che produce cellule uovo e spermatozoi. Cellule differenti portano versioni un po' diverse di ciascun cromosoma e durante la meiosi i cromosomi omologhi si appaiano e si ricombinano, scambiandosi segmenti. Di norma lo scambio avviene in modo che



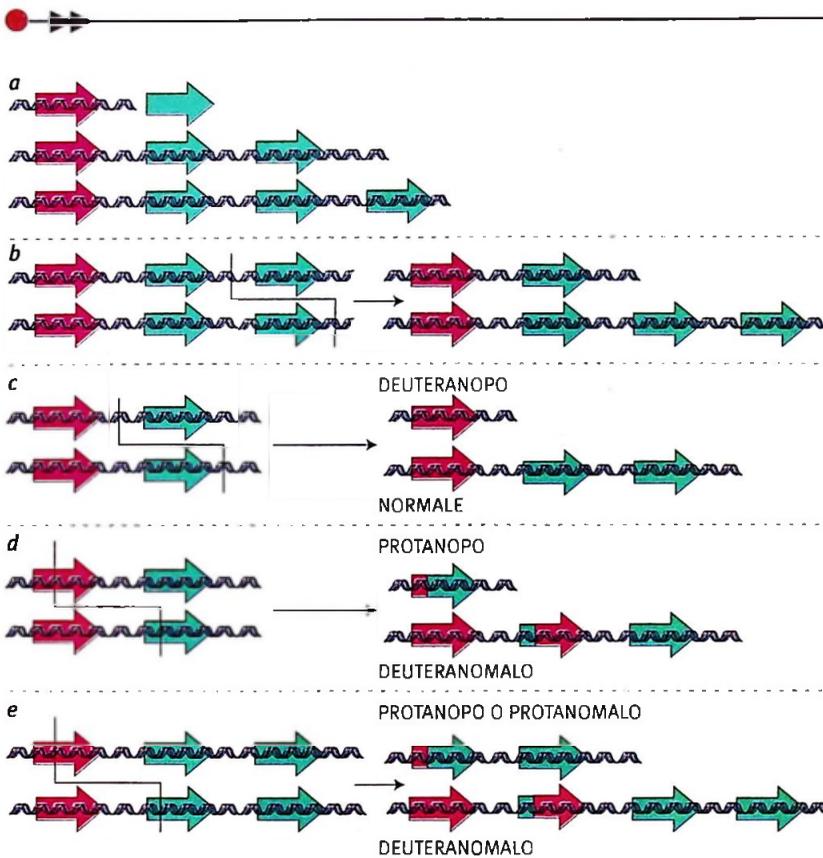
I confronti dei quattro pigmenti visivi dell'uomo in base alle loro sequenze nucleotidiche indicano che la rodopsina e i tre pigmenti sensibili ai colori hanno tutti sequenze di aminoacidi simili. (Ognuno dei cerchietti in colore rappresenta una differenza di aminoacidi.) La somiglianza più stretta si riscontra fra i pigmenti sensibili al rosso e al verde (d). Nei casi in cui le molecole messe a confronto hanno lunghezze differenti, è stata raffigurata quella più lunga e la parte non condivisa appare tutta in colore.

nessun cromosoma acquisti o perda dei geni, ma talvolta due segmenti altamente omologhi possono ricombinarsi in modo errato, subendo un processo di ricombinazione omologa ineguale. Può accadere che un cromosoma acquisti una o più copie di un gene esistente a spese dell'altro cromosoma oppure che i due cromosomi si scambino materiale da geni correlati ma diversi. Il cromosoma che ne risulta è trasmesso agli spermatozoi o alle cellule uovo.

È facile immaginare come una ricombinazione omologa ineguale possa aver dato luogo alle varie configurazioni dei geni per i pigmenti sensibili al verde in individui con una visione normale dei colori. Prendiamo in considerazione due cromosomi omologhi, ciascuno dei quali porti un gene per il pigmento sensibile al rosso adiacente a due geni per il pigmento sensibile al verde. Se uno di questi due geni su un cromosoma viene trasferito all'altro cromosoma nel corso della meiosi, una cellula figlia porterà un cromosoma con un gene per il pigmento sensibile al rosso e uno per il pigmento sensibile al verde, mentre l'altra avrà rispettivamente uno e tre copie di questi geni: si tratta appunto della variazione osservata nei soggetti da noi esaminati. In ogni caso si osserva un solo gene per il pigmento sensibile al rosso perché esso si trova proprio al termine della serie dei geni per i pigmenti visivi ed è molto improbabile che un gene in quella posizione venga duplicato (o perso) per ricombinazione omologa.

Sembra che alla ricombinazione omologa ineguale vada ascritta non solo la variazione nel numero di geni per i pigmenti sensibili al verde in individui con una visione normale dei colori, ma anche la grande maggioranza dei difetti nella discriminazione del rosso e del verde. In collaborazione con Piantanida ho studiato il DNA isolato da 25 uomini che in esami con l'anomaloscopia di Rayleigh avevano mostrato una discriminazione difettosa del rosso e del verde: tutti tranne uno avevano una configurazione anomala dei geni per i pigmenti sensibili al rosso e al verde in conseguenza di una ricombinazione omologa ineguale.

Quali configurazioni di geni fanno sì che un individuo sia protanopo o deuteranopo oppure tricromato anomalo? Scoprimmo che la maggior parte dei soggetti deuteranopi aveva semplicemente perduto tutti i geni per i pigmenti sensibili al verde. Tuttavia in alcuni di questi soggetti il gene per il pigmento sensibile al verde era stato rimpiazzato da un gene ibrido: le sequenze di DNA vicine all'inizio del gene derivavano da un gene per il pigmento sensibile al verde e le sequenze rimanenti da un gene per il pigmento sensibile al rosso. Evidentemente il cromosoma con il gene ibrido era frutto di una ricombinazione in cui una parte del gene normale per il pigmento sensibile al verde si scambiava di posto con una parte del gene per il pigmento sensibile al rosso. Perché il gene ibrido non produce un ricetta-



Lo scambio di materiale genico fra cromosomi X normali, che portano i geni per i pigmenti sensibili al rosso e al verde (*freccie a colori*), può produrre una discriminazione normale o anomala tra rosso e verde. I cromosomi X di individui con una visione normale dei colori hanno un gene per il pigmento sensibile al rosso e uno, due o tre geni per il pigmento sensibile al verde (a). Questa normale variabilità può prodursi facilmente quando un cromosoma che ha un gene per il pigmento sensibile al rosso e due geni per quello sensibile al verde trasferisce uno di questi ultimi al suo omologo (b). I soggetti dicromati o tricromati anomali hanno una visione dei colori difettosa a causa di una ricombinazione genetica che ha causato la perdita del gene per uno dei pigmenti (c) oppure la formazione di un gene ibrido derivato in parte da un gene per il pigmento sensibile al rosso e in parte da un gene per il pigmento sensibile al verde (d, e). La sensibilità spettrale di un pigmento ibrido dipende dalla posizione in cui si ha *crossing-over* (scambio di materiale genico) nel gene ibrido.

re funzionale per il verde? Sembra probabile che le sequenze di DNA all'inizio dei geni ibridi o normali determinino il tipo di cellula in cui il gene sarà attivo e che le sequenze più lontane determinino il tipo di pigmento prodotto. Questo promuoverebbe, in presenza di un gene ibrido, la produzione del pigmento sensibile al rosso in cellule che di norma dovrebbero diventare coni per il verde, consentendo loro di funzionare solo come recettore per il rosso.

I soggetti maschi che all'esame con l'anomalscopio di Rayleigh risultavano privi del recettore per il rosso per lo più non avevano perso completamente le sequenze geniche per il pigmento sensibile al rosso; invece, il loro singolo gene per questo pigmento era stato rimpiazzato da un ibrido in cui solo le sequenze di DNA iniziali derivavano da un gene per il pigmento sensibile al rosso. Se ne deduce che questo gene ibrido determina la produzione di un pigmento sensibile al verde in cellule che normalmente sarebbero diventate coni per il rosso; in tal modo individui portatori del gene avrebbero solo recettori per il verde e non per il rosso.

Tutti i tricromati anomali avevano almeno un gene ibrido in aggiunta ad alcuni o a tutti i geni normali per i pigmenti visivi. Riteniamo che in questi individui i geni ibridi codifichino per proteine dotate di sensibilità spettrale anomala. Le nostre scoperte indicano che possono esistere molti pigmenti anomali e che le loro particolari sensibilità spettrali sono determinate dalla posizione esatta in cui si ha il *crossing-over* (cioè lo scambio di materiale genetico tra i cromosomi omologhi) nel gene ibrido. Maggiore è la frazione dell'ibrido proveniente dal gene per il pigmento sensibile al verde, più simile a questo sarà il pigmento codificato; così pure, se gran parte dell'ibrido proviene dal gene per il pigmento sensibile al rosso, il pigmento codificato sarà più simile a quest'ultimo. Se abbiamo ragione, i nostri dati dovrebbero spiegare le osservazioni psicofisiche secondo cui i recettori anomali mostrano il massimo dell'assorbimento a lunghezze d'onda intermedie tra quelle che sono assorbite con la massima efficienza dai coni normali per il rosso e per il verde.

L'AUTORE

JEREMY NATHANS lavora presso il Dipartimento di biologia molecolare e genetica della Johns Hopkins School of Medicine di Baltimora, nel Maryland, Stati Uniti.

PER SAPERNE DI PIÙ

NATHANS J., THOMAS D. e HOGNESS D. S., *Molecular Genetics of Human Color Vision: The Genes Encoding Blue, Green, and Red Pigments*, in «Science», 232, n. 4747, pp. 193-202, 1986.

NATHANS J., PIANTANIDA T., EDDY R., SHOWS T. e HOGNESS D., *Molecular Genetics of Inherited Variation in Human Color Vision*, in «Science», 232, n. 4747, pp. 203-210, 1986.

SUN H. e altri., *A Novel Visual Pigment-like Protein Located in the Apical Microvilli of the Retinal Pigment Epithelium*, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», n. 94, pp. 9893-9898, 1997.

Una finestra aperta

Rimangono ancora aperte alcune questioni sul ruolo di coni e pigmenti nella visione dei colori. Che cosa conferisce ai pigmenti il loro caratteristico spettro di assorbimento? In che modo ciascun fotorecettore «decide» quale pigmento produrre? Come si formano le connessioni tra i fotorecettori e i neuroni a livello più elevato? Per dare risposta a queste e ad altre domande, i difetti ereditari della visione dei colori nell'uomo rappresentano una grande opportunità, che ci apre una «finestra» straordinaria sul funzionamento dell'occhio.

La visione dei colori

di Semir Zeki

La sensazione del colore non è assoluta: è il risultato di un confronto simultaneo delle quantità di rosso, di blu e di verde tra tutti gli oggetti

Edwin Land (1909-1991), fondatore della società Polaroid, ha inventato le pellicole polarizzanti di plastica e la fotografia istantanea, invenzioni che gli portarono fortuna ma non spensero la sua curiosità. Con i suoi scritti e i suoi esperimenti, Land non ha mai smesso di sottolineare l'importanza del fenomeno di costanza dei colori: la nostra percezione dei colori è indipendente dal tipo di illuminazione. Una foglia verde, per esempio, sembra verde all'aurora, al crepuscolo o a mezzogiorno, in un giorno soleggiato come in un giorno nuvoloso. Le quantità di luce rossa, verde e blu riflesse da questa foglia variano considerevolmente nelle diverse condizioni.

Questo fenomeno è stato spesso trascurato, o ignorato, negli studi della visione dei colori: i fisiologi e gli psicologi lo consideravano ora come un fenomeno dipendente dal giudizio (come von Helmholtz), ora come un atto di memoria e di apprendimento (secondo Ewald Hering).

Senza ignorare queste due concezioni della visione, Land le considerava secondarie. Per dimostrare che la costanza del colore è un processo fondamentale della visione, Land realizzò eleganti esperienze. Nel 1959 ricompose con una luce bianca e una luce rossa quasi tutta la gamma dei colori della realtà. Aveva fotografato il suo soggetto sia con un filtro rosso sia con un filtro verde. Poi proiettava la fotografia «in rosso» attraverso un filtro rosso, e la fotografia «in verde» con luce bianca. L'immagine ottenuta sovrapponendo su uno schermo le due fotografie proiettate «in rosso e bianco» avrebbe dovuto dar luogo solo al rosso, al bianco e a sfumature intermedie. Con sorpresa, si constatò che l'immagine somigliava alla fotografia a colori dello stesso soggetto.

I rapporti di luce

In esperienze più quantitative, Land illuminava con tre proiettori (uno rosso, uno verde e uno blu) due quadri identici, divisi in zone di vari colori e forme. Con uno spettrometro, misurava la quantità di luce riflessa da una data zona di ciascun quadro. Per uno dei quadri, le quantità di rosso, di verde e di blu erano regolate in modo che una zona bianca apparisse bianca; per l'altro quadro si regolavano i proiettori in modo che una zona verde (rossa, violetta o di qualunque altro colore) riflettesse lo stesso tripetto che componeva la zona bianca del primo.

secondo Edwin Land



La riproduzione in alto (fotografia a colori e fotoincisione) mostra i colori di una natura morta. Le tre fotografie in bianco e nero sono state prese con filtri che riproducono le sensibilità dei tre sistemi di coni: rosso, verde e blu. Fragole e ravanelli sono chiari nella fotografia con filtro rosso e più scuri su quelle con filtro verde e blu. I motivi del piatto sono chiari nella fotografia con filtro blu e scuri nelle altre due. I tre livelli di luminosità di una superficie, in rapporto ai livelli di luminosità delle superfici vicine, sono sufficienti a determinare il colore di un oggetto.

Malgrado questa calibrazione, il verde (rosso, violetto...) del secondo quadro appariva all'occhio non bianco, ma verde (rosso, violetto...). Ciò prova che si riconosce il colore di un oggetto non dalla composizione spettrale della luce che esso riflette, ma dal confronto delle composizioni spettrali riflesse da tutti gli oggetti circostanti.

Edwin Land ha dedotto dalle sue esperienze che la percezione del colore è il risultato di un calcolo automatico: una parte del cervello situato tra la retina e la corteccia confronta la quantità di luce di un dato colore (rosso, verde o blu) riflessa da una superficie con le quantità riflesse dalle superfici vicine. Questa teoria è stata chiamata RETINEX (da «retina» e «cortex»). L'intuizione di Land era corretta. Oggi sappiamo che è proprio la corteccia cerebrale, nell'area V4, a calcolare il rapporto di queste quantità.

L'AUTORE

SEMIR ZEKI è professore di neurologia all'Università di Londra.

PER SAPERNE DI PIÙ

LAND EDWIN H., *Una nuova teoria della visione dei colori*, in «Le Scienze», n. 155, marzo 1978.

WENSBURG PETER C., *Land's Polaroid: A Company and the Man Who Invented it*, Houghton Mifflin Co., Boston, 1987.

I pittori e i difetti della vista

di Philippe Lanthony

Un'opera
pittorica
riflette a
volte
anomalie
visive
dell'autore;
ma non
sempre
dall'opera
si può
risalire alla
diagnosi:
ispirazione
e ingegno
possono
prevalere
nell'esito
finale

Il pittore osserva, interpreta, riscrive la sua realtà. Come reagisce quando la sua vista è anormale, o degradata? Davanti a un difetto visivo, l'artista mette all'opera le risorse della sua immaginazione e del suo sapere per superare gli handicap della malattia. La notorietà dei pittori che soffrivano di difetti della vista, gravi o leggeri, temporanei o permanenti, è disparata: alcuni sono molto celebri, come Edgar Degas, Edvard Munch o Claude Monet, altri meno, come Silvestro Lega e Charles Meryon. Una lesione, improvvisa o progressiva, si traduce in un'anomalia del modo di vedere forme o colori, in un restringimento del campo visivo, o addirittura nella cecità. Certi pittori mostrano malvolentieri il loro occhio malato, altri rivelano la malattia con una fasciatura che ricopre l'occhio colpito in un autoritratto, altri ancora raffigurano nelle loro opere i sintomi visivi soggettivi della malattia: Peter Mac Karella, nei suoi autoritratti, dipinse una macchia nera in luogo dell'occhio sinistro, Munch tratteggiò macchie che indicavano come l'umor vitreo del suo occhio - la sostanza viscosa, normalmente trasparente, che riempie il globo oculare - avesse perso qua e là la sua trasparenza.

Certe anomalie influiscono sullo stile dell'artista o sulla scelta dei suoi soggetti. Un difetto congenito, come il daltonismo, o un'anomalia acquisita, come la cataratta e alcune lesioni della retina, alterano la visione dei colori. Vedremo come Pissarro cambiò soggetti a causa della sua patologia oculare. Certi pittori si adattano, altri arrivano a rinunciare alla loro arte. La riconversione, talora drammatica, è - in qualche caso - felice: Maillol abbandonò con rimpianto la pittura per dedicarsi alla scultura.

La tavolozza del daltonico

Nel 1794, il chimico John Dalton riferiva: «Non ero mai stato convinto di una mia peculiarità visiva finché, per caso, non osservai il colore del fiore *Geranium zonale* alla luce di una candela, nell'autunno del 1792. Il fiore era rosa, ma mi appariva di un colore pressoché blu cielo durante tutta la giornata; alla luce della candela, però, era sorprendentemente cambiato, [...] diventando ciò che io chiamavo rosso, colore che con il blu presenta un contrasto evidente. Allora, non dubitando che tale cambiamento fosse identico per tutti, chiesi ad alcuni amici di osservare il fenomeno; fui sorpreso di constatare che tutti erano d'accordo nel non trovare alcuna differenza con l'aspetto del fiore visto alla luce del giorno. A eccezione di mio fratello, che vedeva come me...».

La descrizione di questa anomalia nella percezione dei colori, che oggi prende il nome di daltonismo, non rappresenta sempre il mondo percepito dai daltonici, come testimonia l'analisi dell'occhio di Dalton. Gli oftalmologi che avevano letto la descrizione di Dalton erano concordi sulla diagnosi: egli era daltonico nei confronti del rosso (ovvero mancava del pigmento che assorbe le lunghezze d'onda più alte dello spettro visibile). L'occhio di Dalton fu poi conservato a Manchester, così che recentemente alcuni biologi hanno potuto studiarlo: l'analisi ha rivelato che egli era daltonico per il verde (gli mancava cioè il pigmento che assorbe le lunghezze d'onda medie). La sua percezione dei colori era del tutto diversa da quella che si era creduto di poter dedurre dalle sue descrizioni. Le parole non erano bastate per esprimere la differenza percettiva.

Dal 1797, qualche anno dopo la descrizione di Dalton, Goethe cominciò a interessarsi alle conseguenze del daltonismo sulla pittura: fece effettuare a un daltonico alcuni accoppiamenti di colori all'acquarello, tentò di riprodurre i colori come li percepivano i daltonici e dipinse egli stesso un paesaggio seguendo le indicazioni di un daltonico.

La confusione dei colori nei daltonici deriva dall'organizzazione della loro percezione dei colori, poiché essi dispongono solo di due dei tre componenti fondamentali. Normalmente si vede «a tre colori»:

blu, verde e rosso. La retina contiene cellule fotorecetttrici - i coni - suddivisi in tre sottotipi: ciascuno di essi è sensibile a una banda di lunghezze d'onda diverse. La normale visione a tre colori ci permette di percepire circa 150 tonalità di colore nello spettro. Le persone dotate di una vista corretta, o tricromatica, vedono l'insieme dei colori in modo continuo, mentre i daltonici hanno solo due tipi di coni nella retina, e questo dicromatismo riduce lo spettro a tre tinte: il blu, il giallo e una tinta intermedia percepita come acromatica, in genere bianca o grigia.

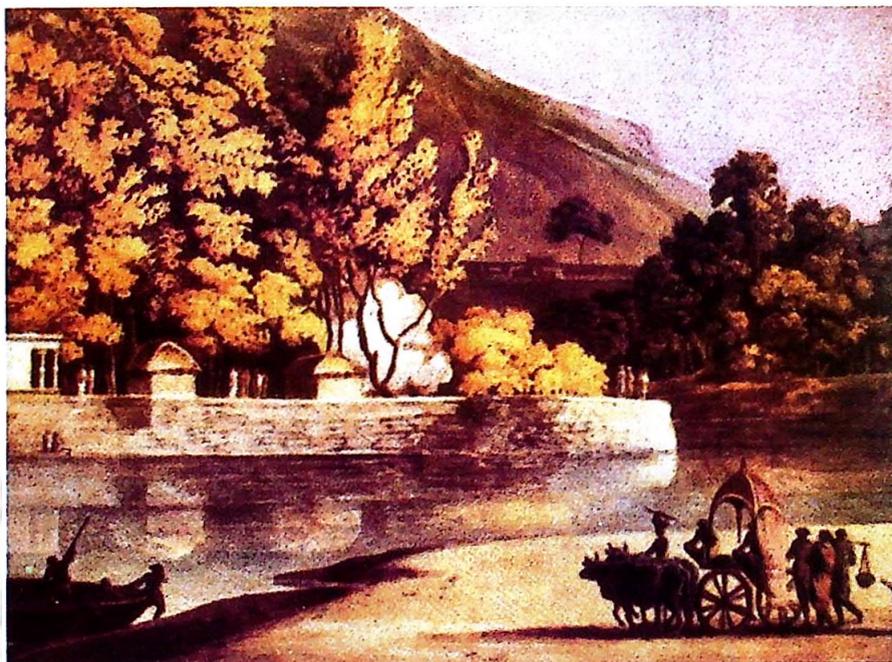
Si possono quindi valutare i problemi che devono affrontare i pittori daltonici. In presenza di una tonalità di verde, sono incerti fra tre colori che percepiscono in modo quasi identico: il verde, ossia il colore reale, il rosso porpora, che non distinguono dal verde, e il grigio, il colore che essi realmente percepiscono. In presenza di un arancione, sono incerti tra il vero colore arancione, il colore con cui lo confondono - un giallo-verde - e il colore che vedono, che corrisponde a un giallo pallido. Secondo la legge delle probabilità hanno una possibilità su tre di scegliere il colore giusto!

Per studiare le difficoltà di discriminazione dei colori incontrate da un artista daltonico, l'oftalmologo ha a disposizione diversi metodi: per esempio fargli copiare un quadro, osservando così direttamente le confusioni fatte dal pittore. Oppure può analizzare i quadri realizzati da daltonici e tentare di distinguervi il contributo dell'anomalia cromatica e quello derivante dall'interpretazione artistica. L'esame di questi quadri rivela che i pittori compiono scelte sistematiche, grazie alle quali si può classificarli in tre gruppi: secondo uno studio condotto nel 1978 dall'oftalmologo tedesco Wolfgang Münchow su 342 pittori di Dresda, gli artisti che dipingono un quadro basato sulle luminosità - i «valori» del linguaggio pittorico - formano un primo gruppo. La percezione dei valori dal bianco al nero è normale nei daltonici. Nel secondo gruppo, i pittori utilizzano i colori di cui non dubitano, vale a dire il giallo e il blu, producendo tele bicolori molto caratteristiche. Il terzo gruppo, infine, sfrutta una tattica opposta rispetto ai prudenti metodi appena descritti: i pittori fanno un uso estremamente libero e arbitrario dei colori.

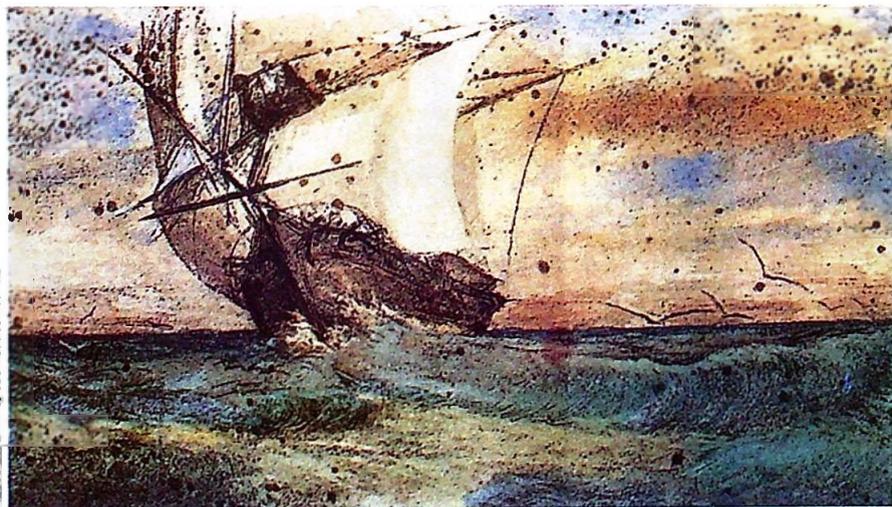
Il daltonismo è un'anomalia genetica dovuta a un'alterazione di uno dei tipi di coni della retina, che lascia intatte le altre funzioni visive. Già prima della descrizione di Dalton si sapeva di personaggi affetti da una percezione anormale dei colori. E il caso del Duca di Marlborough (1650-1722), generale inglese, o del poeta francese Charles Pierre Colardeau (1732-1776), che vantava doti di pittore, ma si faceva aiutare per colorare le sue opere. Nes-

I pittori daltonici confondono certi colori, in particolare il blu e il rosso porpora - il che conferisce al cielo dei loro dipinti un aspetto rosato crepuscolare - e il verde e il giallo, sicché il fogliame ha un aspetto autunnale. Goethe si interessò al daltonismo e realizzò un acquerello seguendo le indicazioni di un daltonico (in alto). Nel pastello intitolato *Il vascello fantasma*, di Charles Meryon, dominano il giallo e il blu (al centro). Il paesaggio del pittore contemporaneo J.-J. (in basso) ha l'aspetto autunnale caratteristico dei pittori daltonici.

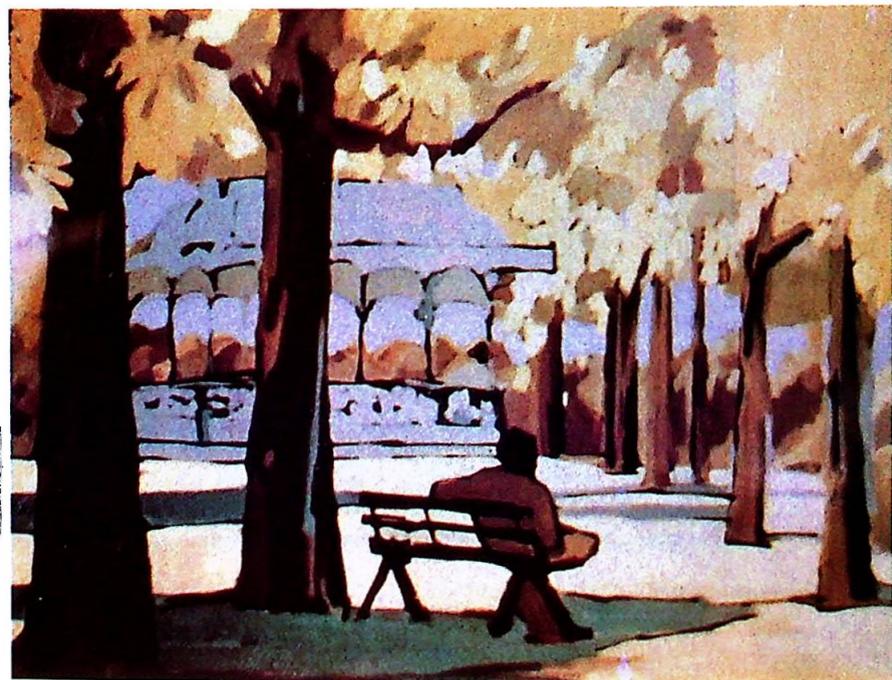
I pittori e i difetti della vista



W. Jaeger, Klin, Mbi-Augenhelik



MUSEO del Louvre, Cabinet des dessins



Collezione pnvalla

Che cosa vedono i daltonici

Per capire le sensazioni cromatiche provate dai daltonici, classifichiamo i colori lungo il bordo di un disco passando dal rosso all'arancione, al giallo, al verde, al blu, per ritornare al rosso attraverso i violetti. In una persona dotata di vista normale, questa sequenza è continua e non presenta alcuna zona acromatica, bianca o grigia (*si veda il disco di sinistra*).

In un daltonico, l'insieme delle tinte è sostituito da due sole tinte: in luogo dei colori caldi (arancione, giallo, giallo-verde), egli percepisce il giallo; in luogo dei colori freddi (blu-verde, blu, violetto, porpora), percepisce il blu. Una zona acromatica separa le due metà del disco (*si veda il disco di destra*). Esistono due tipi di daltonici: coloro per i quali la zona acromatica è situata nel rosso e quelli per cui la zona acromatica è situata nel verde. In prossimità della zona acromatica, le tinte hanno un aspetto slavato, e la loro coloritura aumenta a mano a mano che ci si allontana dalla zona acromatica.

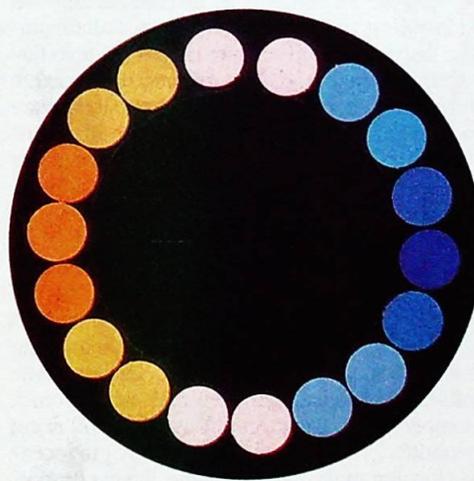
Una simile descrizione chiarisce le confusioni fatte dai daltonici. Così, un verde e un arancione sono confusi da un daltonico la cui zona acromatica è nel rosso, poiché sono entrambi percepiti come un giallo pallido. Quando si presenta a un daltonico di questo tipo un campione arancione e gli si chiede di scegliere una tinta equivalente, esita tra l'arancione (il colore reale), il verde con cui lo confonde (il colore confuso) e un giallo pallido (il colore percepito). Effettivamente, sul disco di ripartizione dei colori, arancione e verde sono equivalenti e percepiti come un giallo pallido. Quando questo daltonico deve tro-

vare l'equivalente di un campione rosso, esita tra il rosso (il colore reale), il blu-verde (il colore confuso) e il grigio (il colore percepito). Quando si dice che il daltonico confonde il rosso e il verde (o più esattamente il blu-verde), non significa che veda il rosso come verde o viceversa, ma che vede entrambi i colori come grigi.

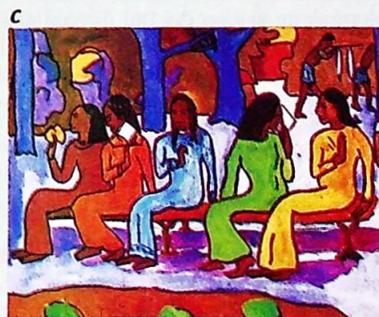
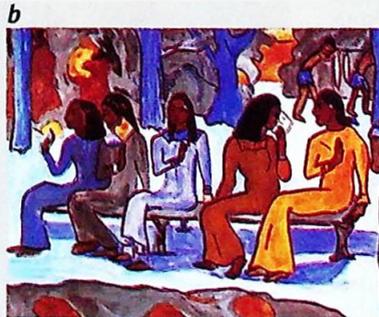
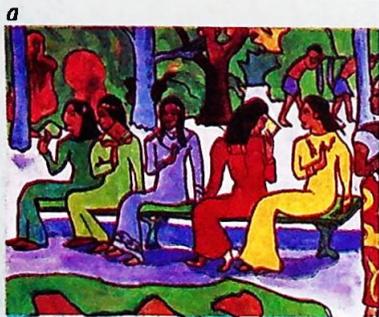
I daltonici, però, non confondono mai i colori che percepiscono: il giallo, il blu e il grigio. Inoltre, il colore è definito da tre attributi psicosensoziali: la tonalità o tinta, la luminosità (o il contrasto luminoso) e la saturazione (il grado di colorazione). Nei daltonici, la discriminazione delle tonalità è anormale, ma quelle della luminosità e della saturazione sono corrette, il che offre loro un mezzo per differenziare i colori: sia per la luminosità (il giallo è più chiaro del violetto) sia per la saturazione, che aumenta progressivamente via via che ci si allontana dalla zona acromatica. Così, essi non confondono un arancione reale con un giallo reale, perché il primo è percepito come un giallo pallido, mentre il secondo è un giallo vivo.



Ripartizione circolare dei colori in una persona con vista normale.



Ripartizione circolare dei colori in un individuo daltonico.



Una persona dotata di vista normale ha realizzato una copia del quadro *Ta Matété* di Paul Gauguin (a). Lo stesso quadro è stato copiato anche da un daltonico (b) facendo uso dei colori che egli «percepiva»: i colori caldi sono resi con il giallo quando sono chiari e con il marrone quando sono scuri; i colori freddi sono resi in blu. Il rosso e il blu-verde

sono percepiti come acromatici e sono resi con gradazioni di grigio. L'insieme del quadro è molto uniforme. Anche il quadro a destra (c) è stato realizzato da un daltonico, che ha però utilizzato i colori «confusi», vale a dire quelli che sul disco dei colori qui sopra sono equivalenti: il rosso e il blu-verde, l'arancione e il verde.

sun caso di pittore daltonico di una certa celebrità è però stato documentato prima delle pubblicazioni di Dalton e di Goethe; solamente nel XIX secolo si cominciò a descriverne qualche caso. L'artista austriaco Joseph Achten (1822-1867), per esempio, dovette limitarsi al disegno e al monocromo, a causa del suo daltonismo.

Charles Meryon (1821-1868) avrebbe voluto essere pittore, ma i suoi primi tentativi all'acquerello gli rivelarono l'anomalia cromatica di cui soffriva; passò perciò all'incisione, arte in cui divenne un vero maestro. Un solo pastello, *Il vascello fantasma*, è rimasto a testimonianza della sua attività di pittore, e la dominante blu-gialla dell'opera è coerente con una diagnosi di daltonismo. Uno dei suoi amici, Philippe Burty, descrisse con precisione il daltonismo di Meryon: «Nelle rare pitture o nei pastelli di Monsieur Meryon che abbiamo visto, abbiamo creduto di osservare che, se egli possiede in alto grado il senso dei valori relativi di ombra e luce, i suoi occhi non sembrano sempre colpiti dal valore corretto dei toni di colore. Non può distinguere le fragole mature dalle foglie. Sulla sua tavolozza, usa il rosso in luogo del giallo, il rosa per il verde, mentre distingue altri colori come il carminio puro, l'oro, il cobalto, il lapislazzuli, con estrema precisione».

Perché non si trovano daltonici nella storia dell'arte classica? Quando la pittura era una fedele rappresentazione di un modello, i colori dovevano essere conformi alla realtà. Il daltonico, imbarazzato, optava per una diversa forma d'arte: l'incisione, per esempio, come fece Meryon. Poiché il daltonismo colpisce l'8 per cento della popolazione, Meryon non fu senz'altro il solo pittore daltonico, e un incisore o scultore che, pur essendo nato in una famiglia di pittori, non dipingeva mai, poteva essere daltonico. Al contrario, nella pittura moderna, che ha rinunciato all'imitazione meticolosa del modello, si possono elencare diversi pittori daltonici. Lo statunitense Paulanship (1885-1965) passò dalla pittura alla scultura, ma altri, come Georges Einbeck (1871-1951) rimasero pittori.

Se il daltonismo falsa la visione dei colori, qualsiasi anomalia di uno dei costituenti dell'apparato visivo rischia di perturbare non solo la visione dei colori, ma anche quella delle forme, dei dettagli o dei contrasti. Nella pittura, questi diversi disturbi influiscono sulla realizzazione di un quadro, il cui aspetto cambia in funzione della patologia.

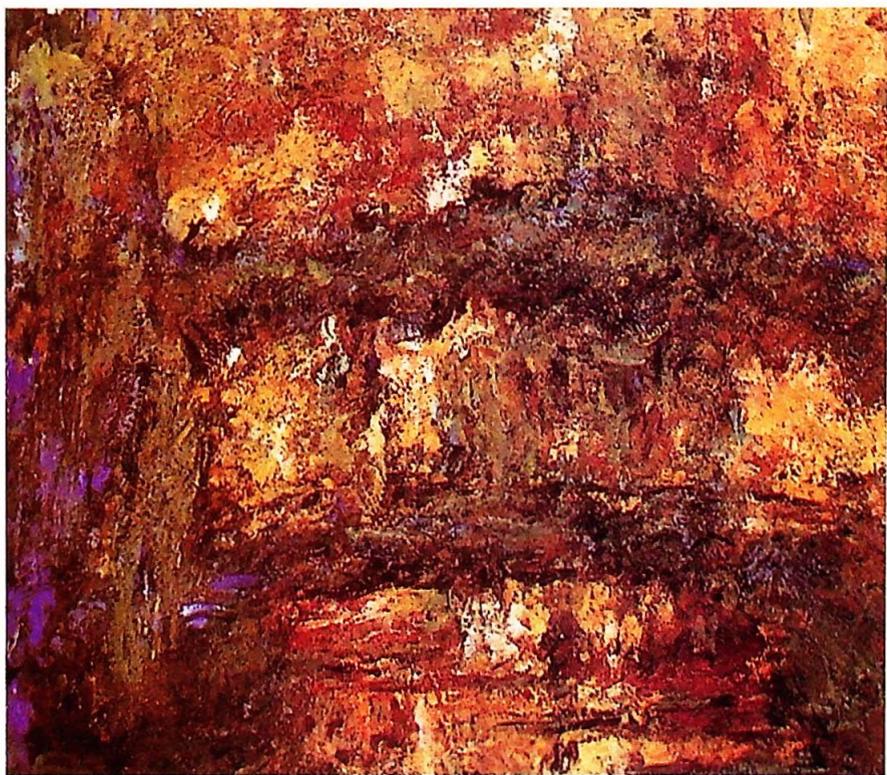
Un filtro per Monet

La più comune di queste patologie è la cataratta detta «nucleare», nella quale il nucleo del cristallino diventa opaco e ingiallisce. Il cristallino ingiallito si comporta come un filtro collocato nell'occhio, che assorbe le lunghezze d'onda corte dello spettro visibile. La miscela di colori che ne deriva porta a un ingiallimento apparente dei verdi e a una scorretta percezione dei viola e dei blu.

La cataratta è spesso stata invocata per spiegare le variazioni della tavolozza dei pittori anziani ma, a rigore, si può affermarlo soltanto per i pittori che furono operati per risolvere questa patologia. L'estrazione del cristallino affetto da cataratta venne praticata per la prima volta nell'aprile 1745 dal chirurgo



Musée d'Orsay, Parigi



Musée Marmottan, Parigi

Claude Monet ha dipinto *Le bassin aux nymphéas* (in alto) nel 1899. Questo quadro, eseguito prima che il pittore fosse colpito da cataratta, ha una dominante fredda. *Le pont japonais* rappresenta la stessa veduta, dipinta nel 1922; quest'opera presenta una dominante gialla e forme imprecise, che indicano come la cataratta si sia aggravata e il pittore veda ormai la natura con un filtro giallo nell'occhio.

francese Jacques Daviel (1693-1762), e il primo artista a beneficiarne fu François Devosge (1732-1811) che, dopo l'operazione, fondò la Scuola di belle arti di Digione. Altri pittori sicuramente sottoposti a questo intervento furono Antonio Verrio (1639-1707), Rosalba Carriera (1675-1757), Honoré Daumier (1808-1879), Claude Monet (1840-1926) e, fra i contemporanei, Jean Hélion (1904-1987) o Jean Bazaine, nato nel 1904. Si può seguire l'evoluzione dei disturbi della visione dei colori in Monet, perché l'artista amava dipingere serie di quadri dello stesso soggetto. Così dipinse più di 20 volte il *Pont japonais*, a Giverny, e queste tele rivelano con il passare del tempo l'accentuazione dell'ingiallimento e il degrado delle forme.

Un cristallino affetto da cataratta agisce come un filtro la cui densità aumenta col passare del tempo. L'evoluzione della cataratta modifica la percezione delle forme e dei colori in modo progressivo, sicché il pittore vi si abitua. L'intervento, poi, modifica la vista in modo radicale, restituendo una buona acuità visiva, ma provocando uno sconvolgimento della percezione spaziale, luminosa e dei colori. In Monet, l'operazione alla cataratta sopprime bruscamente il filtro giallo che egli aveva nell'occhio: il

pittore vede di nuovo le lunghezze d'onda corte (i blu), addirittura meglio di come le vedeva prima di avere la cataratta, perché l'operazione ha soppresso non solo il filtro patologico, ma anche il filtro naturale costituito dal cristallino. La percezione dei blu è esacerbata. I quadri dipinti da Monet dopo l'intervento lo illustrano con chiarezza: hanno una dominante blu che contrasta con la tonalità dei quadri che dipingeva con il cristallino affetto da cataratta.

Le grandi decorazioni esposte oggi all'Orangerie di Parigi illustrano gli sforzi d'ingegno compiuti dall'artista per superare i suoi difetti visivi. Col procedere della cataratta, distingue meno chiaramente i dettagli: allora dipinge i soggetti più grandi. Percepisce male le differenze di luminosità: così aumenta i contrasti. Non vede più i toni freddi: perciò li interpreta secondo il suo intuito. Non distingue più il rilievo: fa una pittura piatta.

La retina di Degas

Anche le malattie della retina possono perturbare la vista dei pittori. Quando queste patologie ledono una delle tre categorie di coni, le conseguenti alterazioni della visione dei colori influiscono sulla tavo-

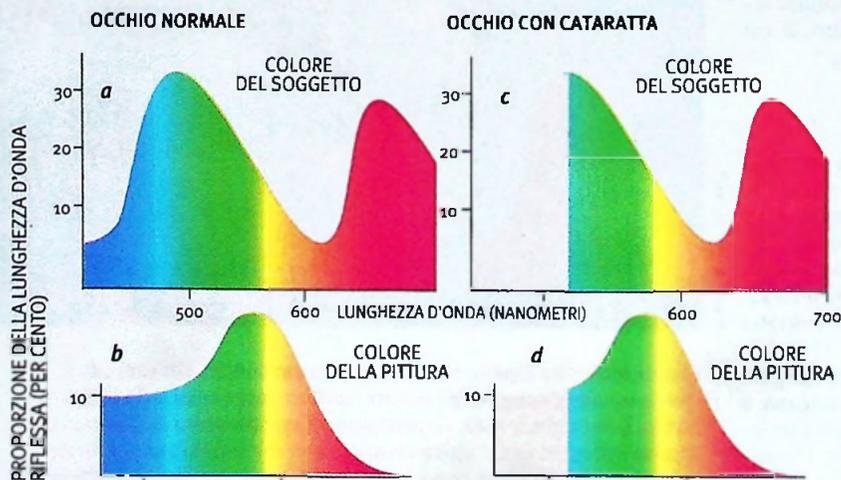
Cataratta, pigmenti e lunghezze d'onda

Il cristallino si comporta come un filtro. Negli anziani, o in chi soffre di cataratta, perde la sua trasparenza e ingiallisce. Via via che l'opacizzazione del cristallino si intensifica, l'adattamento cromatico compensa l'anomalia: tutto accade come se la persona colpita dalla malattia modificasse il proprio «bianco di riferimento». Poiché il pittore vede il quadro e il soggetto attraverso lo stesso filtro giallo del cristallino, i colori del quadro sono quelli reali? Di fatto, questo non accade, e un pittore che soffre di cataratta sceglie sulla sua tavolozza un colore più giallo di quello che sceglierebbe un pittore con una vista normale.

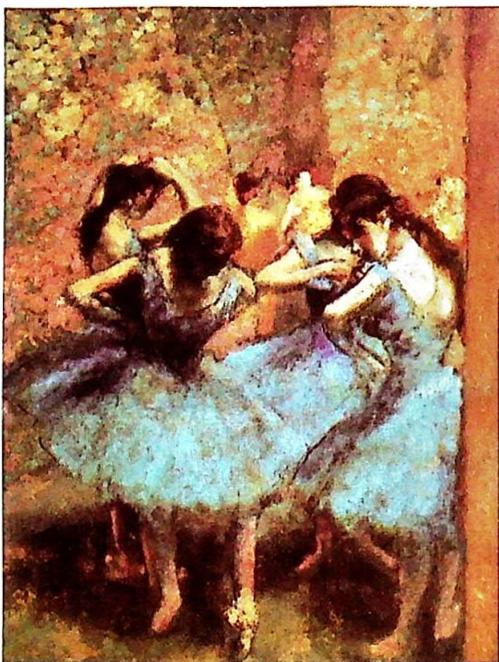
All'origine di questa scelta c'è quel fenomeno per il quale due colori di composizione spettrale diversa appaiono, in determinate condizioni, identici. Un pittore che copia fedelmente i colori di un soggetto equalizza l'aspetto dei colori naturali e di quelli della sua tavolozza. La composizione chimica delle sostanze che costituiscono questi due tipi di colori differisce notevolmen-

te. Le curve di riflessione spettrale differiscono a loro volta, e pertanto l'apparenza visiva è simile (il colore di un oggetto è la risultante dei colori riflessi). Nell'esempio qui sotto, l'oggetto è verde, benché il suo spettro mostri due massimi. Il pigmento è ugualmente verde, ma è molto più monocromatico.

La somiglianza esteriore talvolta sparisce quando cambiano le condizioni in cui si osserva il quadro: per esempio quando si modifica l'illuminazione, o appunto quando il pittore soffre di cataratta. La presenza di un filtro giallo nell'occhio disturba la normale equalizzazione: quando un pittore che soffre di cataratta riproduce un verde, la tonalità che sarebbe scelta da un pittore senza cataratta gli sembrerebbe troppo verde e, per ristabilire la somiglianza, egli usa un colore più giallo. Poiché il cristallino affetto da cataratta è giallo, i quadri eseguiti da artisti che soffrono di questa malattia hanno a loro volta una dominante troppo gialla.



La composizione spettrale di un soggetto verde (a) differisce da quella della copia dipinta (b), anche se i due colori sembrano identici. Quando il cristallino ingiallisce, assorbe la radiazione di lunghezza d'onda inferiore a 510 nanometri: lo spettro è amputato della parte sinistra e la componente fredda del soggetto (c) è eliminata. La tonalità della pittura (d), invece, è meno modificata dal filtro: essa scivola verso le tinte calde, ma meno di quanto faccia quella del soggetto. La tonalità della pittura sembra così, al pittore, troppo verde. Per ristabilire la conformità, egli tende a utilizzare componenti più calde, come il giallo.



Degas (*Danseuses bleues*, a sinistra) modifica il suo stile via via che la sua vista si abbassa. Talvolta abbandona il pennello e applica il colore con le dita, il che conferisce un aspetto maculato ad alcuni dei suoi quadri. Pissarro (sotto) è costretto ad adeguare i soggetti alla sua patologia. Sofferente di un'inflammation aggravata dal vento e dal freddo, dipinge da una camera d'albergo: qui, l'Avenue de l'Opéra vista da una finestra.



lozza degli artisti che ne soffrono. Fu questo il caso di Degas (1834-1917), dell'italiano Silvestro Lega (1826-1895) e dell'impressionista inglese Philip Steer (1860-1942).

Anche se Degas è classificato tra gli impressionisti, non mostrò molta passione per la rappresentazione di paesaggi, ma manifestò piuttosto una predilezione per gli interni. Soffriva di fotofobia, ovvero non riusciva a sopportare la luce violenta. L'evoluzione del disegno di Degas è legata alla vista difettosa dell'artista. Per i suoi disegni, utilizza all'inizio la matita, ma le linee tracciate in questo modo finiscono per essere troppo pallide. Passa allora alla matita grassa, e poi al carboncino. Questa evoluzione riflette un abbassamento della sensibilità ai contrasti. Per di più, se molti dei quadri che dipinse in gioventù sono eseguiti a olio con tecniche classiche, per le opere di tarda età egli abbandona il pennello e usa le dita per applicare il colore, ed è questo che conferisce un aspetto maculato ad alcune delle sue tele.

Abbiamo esaminato il pittore contemporaneo M. H., afflitto da una degenerazione globale della retina: la sua visione dei colori si limitava al blu-verde e al giallo. Le lesioni delle vie ottiche causano evidenti disturbi del senso cromatico. I neurologi inglesi Robert Hess e Gordon Plant pubblicarono nel 1986 l'auto-osservazione del pittore Peter Mac Karcil, vittima di una neurite ottica acuta dell'occhio destro. Nel corso della sua malattia, questo artista cominciò a dipingere in modo comparativo ciò che vedeva da ciascun occhio. La sequenza dei quadri realizzati mostra la differente percezione dei colori dei due occhi. Infine, citiamo il caso del pittore statunitense non figurativo Jonathan I., divenuto acromatico in seguito a un trauma cranico apparentemente non grave.

Daremo un ultimo esempio dell'influenza delle patologie oculari sui quadri: quello di Camille Pissarro, le cui vie lacrimali erano ostruite.

Camere con vista

Per non parlare degli accessi acuti, l'ostruzione delle vie lacrimali causava a Pissarro una lacrimazione costante, aggravata dal vento e dal freddo. Il medico gli prescrisse pertanto di proteggere l'occhio con una benda quando usciva, e gli raccomandò di restare in casa in occasione degli accessi infiammatori. Pissarro, il pittore della luce e dei paesaggi, fu così costretto a trovare altri soggetti: non scelse le nature morte, ma le vie della città, scene che dipingeva dall'alto, dalla finestra di una camera d'albergo: l'Hotel Garnier per dipingere la facciata della Gare Saint-Lazare, l'Hotel de Russie per i grandi boulevard, l'Hotel du Louvre per l'Avenue de l'Opéra. Affittò anche un appartamento in Rue de Rivoli per poter dipingere le Tuileries e uno in Place Dauphine per il Pont-Neuf.

Lo studio delle patologie oculari dei pittori non deve limitarsi alla constatazione dell'effetto immediato della malattia sulla visione dell'artista. Se ci si accontentasse di questo, si perderebbe la parte più bella della storia, quella che rende affascinante lo studio delle malattie oftalmiche dei pittori: il modo cioè in cui questi uomini hanno saputo reagire ai propri handicap visivi. L'artista di talento sa infatti esplorare nuove vie, che avrebbe senza dubbio trascurato se non si fosse trovato a doversi confrontare con la malattia.

L'AUTORE

PHILIPPE LANTHONY è oftalmologo presso il Laboratoire de la vision des couleurs al Centre hospitalier national d'ophtalmologie des Quinze-Vingts di Parigi.

PER SAPERNE DI PIÙ

- PICKFORD R., *Psychology and Visual Aesthetics*, Hutchinson, 1972.
 HESS R. F. e PLANT G. T., *Optic Neuritis*, Cambridge University Press, 1986.
 TREVOR-ROPER P., *The World through Blunted Sight*, Penguin, 1988.
 MAFFEI L. e FIORENTINI A., *Arte e cervello*, Zanichelli, 1995.
 SACKS O., *Un antropologo su Marte*, Adelphi, 1995.
 DICKINSON C., MURAY I. e CARDEN D., *John Dalton's Colour Vision Legacy*, Taylor & Francis, Londra, 1997.

Le illusioni cromatiche

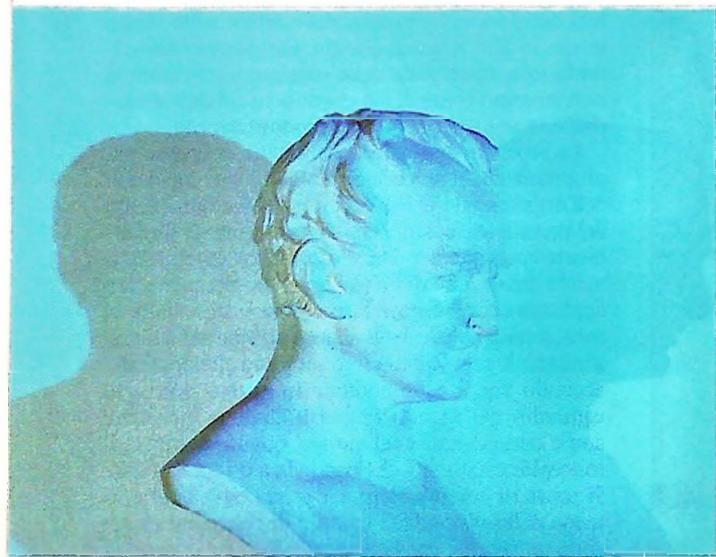
di Philippe Brou, Thomas Sciascia,
Lynette Linden e Jerome Lettvin

Illusioni ottiche create sullo schermo di un computer mostrano che non è sufficiente, per percepire i colori, che l'occhio capti la luce proveniente dalle diverse superfici che compongono il paesaggio visivo

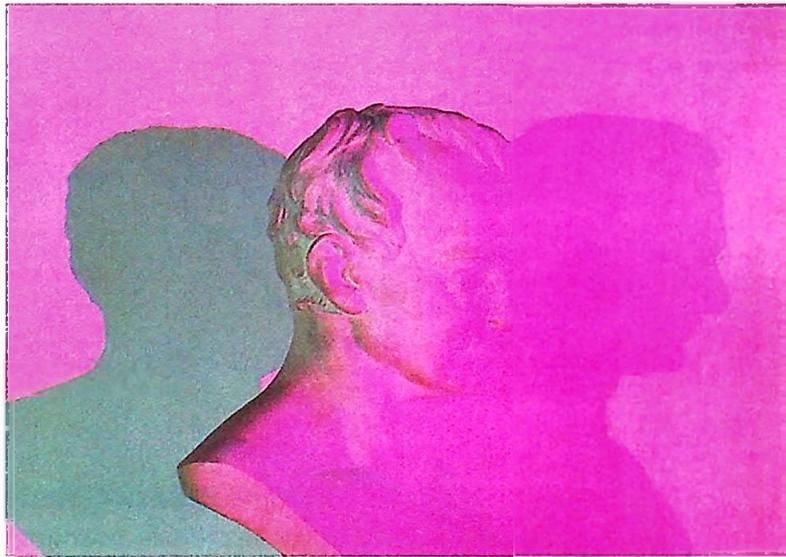
Il fantastico effetto di spirale colorata delle finestre della Thanksgiving Square Chapel a Dallas, nel Texas.



Tony Stone Images/John Elk



B. Howland e D. Denton, Massachusetts Institute of Technology



Il colore, come la bellezza, è nell'occhio dello spettatore. È un'esperienza soggettiva e, come tale, non è passibile di misura. Tuttavia spesso si stima che, al contrario della bellezza, il colore sia dovuto a una causa fisica diretta: lo spettro della luce che raggiunge l'occhio. Quest'ultimo viene assimilato a una telecamera che misura, in ogni punto dell'immagine, l'energia associata alle lunghezze d'onda grandi (rosso), medie (verde) e piccole (blu). Come una telecamera, l'occhio possiede tre tipi di recettori del colore: si pensa dunque che il colore percepito in un punto sia il risultato di una sorta di misura dei livelli di rosso, di verde e di blu dell'immagine. Questa opinione comune è la base di numerose illusioni ottiche costruite dai ricercatori che lavorano sulla percezione visiva, illusioni in cui l'osservatore vede un colore invece di un altro. Nella maggior parte dei casi queste illusioni mostrano che i sensi sono fallaci, e in particolare che l'occhio non funziona bene come dovrebbe. Se è facile violare le concezioni classiche sulla visione dei colori, forse è perché tali concezioni sono false: le illusioni non sono la manifestazione di difetti ottici, ma il risultato del processo di elaborazione dei colori.

In questo articolo, proponiamo una concezione nuova con una serie di illustrazioni. I colori che noi attribuiamo agli oggetti del mondo visivo non dipendono strettamente dalla luce che proviene da ciascuno di essi, come se fosse captata indipendentemente da tutto il resto, ma da un confronto tra le luci provenienti sia dall'oggetto sia dai suoi dintorni. Questa affermazione sembra bizzarra, poiché il colore degli oggetti ci appare come una proprietà intrinseca della loro superficie. Alla luce del giorno - si può argomentare - una rosa appare rossa «in senso assoluto» e non solamente in rapporto a ciò che le sta intorno. Tuttavia, non è perché ci sembra intrinseco alla rosa che il colore rosso risulta dai soli dati luminosi che ne compongono l'immagine.

La costanza dei colori

Gli errori delle concezioni classiche sul colore derivano da una «illusione» che fa talmente parte del-

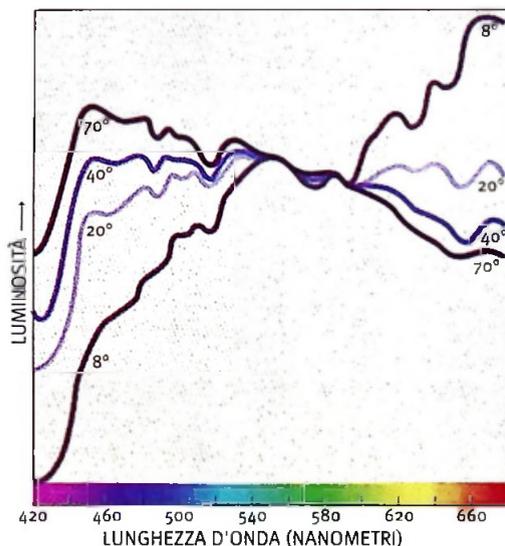
l'esperienza quotidiana da non essere più notata. È la costanza del colore degli oggetti alla luce solare. L'illuminazione esterna non è sempre la stessa: l'intensità e lo spettro della luce del giorno cambiano dall'alba a mezzogiorno, e da mezzogiorno al tramonto. All'alba, la luce ha una tonalità rosa. Al pomeriggio è nettamente gialla. La luce del Nord, preferita dagli artisti, è quella del cielo blu senza sole; sotto un albero verdeggianti la luce diffusa ha una sfumatura verde. Tuttavia, in tutte le condizioni di luce diurna un foglio di carta bianca ci apparirebbe sempre bianco: in effetti tutte le superfici mantengono un colore approssimativamente costante qualunque siano le variazioni di illuminazione.

Poiché viviamo spesso sotto un'illuminazione artificiale, siamo abituati a vedere i visi cambiare colore quando passano da una illuminazione a incandescenza a una a fluorescenza. Tuttavia, già da un secolo i ricercatori sanno che la costanza dei colori rappresenta un difficile problema. È una esperienza

Le ombre colorate sono un'illusione ottica che aiuta a comprendere i processi nascosti della visione dei colori. Il busto nelle due foto, posto davanti a un fondo bianco, è illuminato da una parte da luce bianca, dall'altra da una luce colorata. Poiché esso è di fronte alla luce colorata, l'ombra dietro la testa contiene solo luce bianca. Non appare però priva di colorazione: il suo colore è complementare di quello dell'ombra colorata dall'altro lato. Così l'ombra dietro la testa appare più calda nell'immagine di sinistra. Se si coprono le regioni circostanti queste ombre, si vede che sono identiche. Questa illusione mostra che la percezione dei colori si basa su confronti tra zone di immagine separate da una frontiera.

Le proprietà fisiche dei diversi tipi di luce del giorno, e in particolare il loro spettro, sono evidentemente differenti. Le quattro curve rappresentano lo spettro della luce diffusa al livello del suolo in quattro momenti differenti della giornata, corrispondenti a differenti altezze angolari del Sole tra l'orizzonte (zero gradi) e lo zenit (90 gradi).

Una mezz'ora prima del calar del Sole (8 gradi); il picco dello spettro della luce si situa nel rosso. Molte ore prima, mentre il Sole è alto nel cielo (70 gradi), il picco si situa nel blu.



quotidiana il fare a memoria il confronto tra i colori del viso e delle labbra di una persona, come ci appaiono in qualunque condizione di luce, e quelli che abbiamo visto un'ora, un giorno o una settimana prima sotto un'altra luce. È così che siamo capaci di rivelare le variazioni che avvengono quando la persona arrossisce, impallidisce o è colpita da una malattia come l'itterizia o l'anossia (che rende di colore blu). Queste modificazioni sono tuttavia più deboli di quelle legate alla luce del giorno. Secondo il fisiologo e fisico Hermann von Helmholtz, vissuto nel XIX secolo, tutto si svolge come se la nostra percezione del colore si formasse «prescindendo dall'illuminazione».

Helmholtz aveva ipotizzato che il cervello, intenzionalmente o grazie alla memoria, sappia già quali colori «dovremmo» vedere, e di conseguenza calibri la propria percezione in modo da escludere l'illuminazione. Ma questa idea non lo soddisfaceva, e a ragione: per quale miracolo un organo di senso potrebbe permetterci di dire quale luce agisce su tutto... tranne che sull'organo stesso? In altre parole, non possiamo dire quale luce agisca su una superficie, dato che ne riceviamo solo una parte: quella che la superficie riflette verso il nostro occhio. Come si può «prescindere dall'illuminazione» in queste condizioni?

Nel nostro tentativo di chiarire la questione, dobbiamo tenere conto di una difficoltà che riguarda tutti i discorsi sul colore. In effetti, esistono due spiegazioni distinte della visione dei colori. La prima riguarda il modo in cui gli elementi di una immagine visiva sono trasformati in dati sensoriali; ci si interessa in tal caso ai coni, i fotorecettori sensibili al colore, e al modo in cui reagiscono alla luce. Su ciascuno cono, l'arrivo della luce decolora un pigmento fotosensibile. Questo tipo di studi si basa sulla velocità di risposta dei pigmenti all'arrivo dei fotoni.

I soggetti dell'esperimento devono regolare una luce di riferimento (giocando per esempio sull'intensità di tre sorgenti di luce colorata che si combinano per formare una macchia luminosa) finché scompare la frontiera tra questa luce di riferimento e la luce adiacente (oggetto dello studio), in modo che la distinzione tra le due sia impossibile. Esperienze di questo tipo mostrano che combinazioni differenti di

luci decolorano i pigmenti della retina nello stesso modo. In altri termini, questi lavori forniscono soltanto una descrizione delle reazioni pigmentarie e non tengono conto di ciò che succede ai dati sensoriali una volta che sono stati prodotti dai coni.

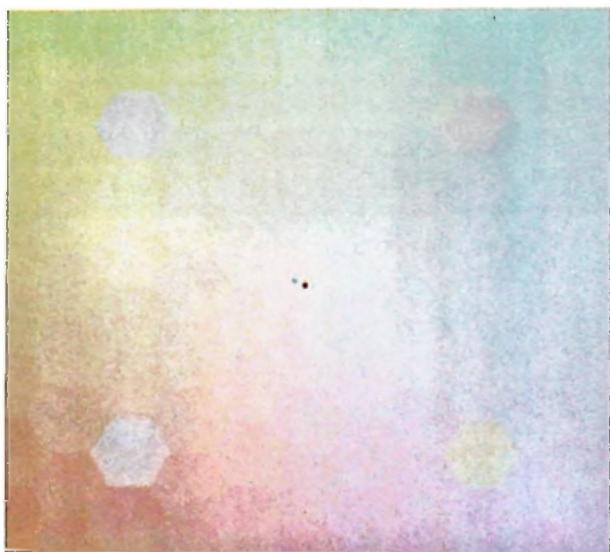
La seconda spiegazione del colore concerne più propriamente la percezione. Tutto ciò che sappiamo dell'organizzazione dell'occhio e del funzionamento del cervello ci mostra che il soggetto non è direttamente cosciente dei dati sensoriali grezzi, ma solamente dei risultati di un'elaborazione che viene loro applicata. Per spiegare la percezione dei colori, si considerano note le leggi di acquisizione dei dati e si studiano le regole della loro ulteriore elaborazione. Secondo noi, è utile adottare in questa ricerca lo «sguardo» dell'ingegnere, per il quale la questione non è tanto l'analisi del mondo, quanto piuttosto il concepire un sistema che risponda a un fine preciso. Si tratta di comprendere per prima cosa qual è lo scopo della visione dei colori e di concepire in seguito un sistema che la realizzi.

Il ruolo della visione dei colori

La visione dei colori si è sviluppata, come funzione fisiologica utile, in un mondo primitivo in cui la principale forma di luce era quella solare, più o meno diffusa, rifratta o riflessa. Gli oggetti illuminati da questa luce erano essenzialmente corpi pieni, opachi e non metallici, che la riflettevano in funzione della composizione, della rugosità e delle irregolarità di superficie. Questi oggetti erano distribuiti a caso sulla Terra. Un'immagine di un simile mondo costituisce una mappa a due dimensioni di un caos organizzato: una regione dell'immagine è pressoché sempre limitata da numerose altre regioni e i cambiamenti di luce che si osservano su un tratto della frontiera non permettono di prevedere quelli che caratterizzano un altro segmento. Riassumendo, un insieme di tre fattori - luce diurna, diversa riflettività e disposizione caotica degli oggetti - ha fatto evolvere la visione dei colori. Questa ha come scopo il miglioramento delle prestazioni della vista: facilita le distinzioni tra differenti superfici e la loro memorizzazione, aiuta l'apprendimento e il riconoscimento dei pericoli, così come il reperimento del cibo.

Poiché la visione a colori permette distinzioni più fini rispetto a quella monocromatica in bianco e nero, i suoi vantaggi sono notevoli; d'altra parte se le distinzioni non sono affidabili, divengono inutili, se non addirittura fuorvianti: sono cioè «rumore», informazioni prive di senso. La costanza del colore ha dunque una grande importanza, poiché la capacità di riconoscere gli oggetti sarebbe ridotta se i colori cambiassero a causa di una illuminazione diversa.

In termini di colori, qual è allora la caratteristica memorizzabile di una superficie, sapendo che deve essere allo stesso tempo connaturata alla superficie stessa e indipendente dalla luce ambientale? La sola qualità che soddisfi queste condizioni è la riflettività, cioè la capacità di una superficie di riflettere le diverse lunghezze d'onda della luce. Se ci si attiene alla definizione abituale, l'occhio non misura la riflettività; poiché questa è data dal rapporto tra luce incidente e luce riflessa dalla superficie, l'occhio ha accesso solo a quest'ultima.



B. Howland e D. Denton, Massachusetts Institute of Technology



L'idea di prendere la riflettività come fondamento della visione dei colori appare dunque assurda se si considera come dogma che il colore di una superficie non dipenda dalla luce che ne proviene. Ma ci sono altri modi di vedere il fenomeno. Il più diretto sostituisce alla misura della luce riflessa da ciascuna superficie un confronto tra le luci riflesse da superfici adiacenti. Se due superfici ricevono la stessa illuminazione, questo confronto è indipendente dalla luce incidente. Da questo fatto segue che confrontare le luci riflesse equivale a confrontare le riflettività (non determinabili individualmente). Arriviamo allora all'ipotesi che il colore percepito risulti sì dalla riflettività di una superficie, ma confrontata con quella delle superfici vicine. Di conseguenza, affinché un punto di una immagine appaia di un certo colore, occorre che la regione vicina sia sufficientemente diversa. È questa l'idea che vogliamo ora approfondire grazie a una sequenza di «illusioni» cromatiche, costruite a partire dagli schemi ideati da Edwin Land, fondatore della Polaroid, che consacrò la propria vita allo studio della visione dei colori.

Esperienze sorprendenti

Le illusioni ottiche che stiamo per illustrare sono osservabili su un normale schermo televisivo. Lo schermo è stato fotografato con un apparecchio convenzionale. Una difficoltà tecnica riguardava il fatto che nella stampa a colori la gamma dinamica va da 1 a 10 per l'intero spettro. In altre parole, l'intensità del punto più luminoso di un colore dato è solo 10 volte maggiore di quello del punto meno intenso dello stesso colore. L'inchiostro nero con il quale sono scritte queste righe possiede una riflettività pari all'incirca alla decima parte di quella del foglio bianco. Al contrario, le diapositive hanno una gamma dinamica che va da 1 a 100. La stampa appiattisce la vivacità dell'immagine, al contrario delle diapositive. Per evitare che le nostre immagini siano snaturate da questo fenomeno, abbiamo limitato a 3 o meno la gamma dinamica della luminosità dei colori. Le immagini che illustrano questo articolo sono dunque le versioni stampate; ma, utilizzando imma-

gini destinate alla proiezione e non alla stampa, si sarebbe potuto, senza rischio, aumentare i contrasti.

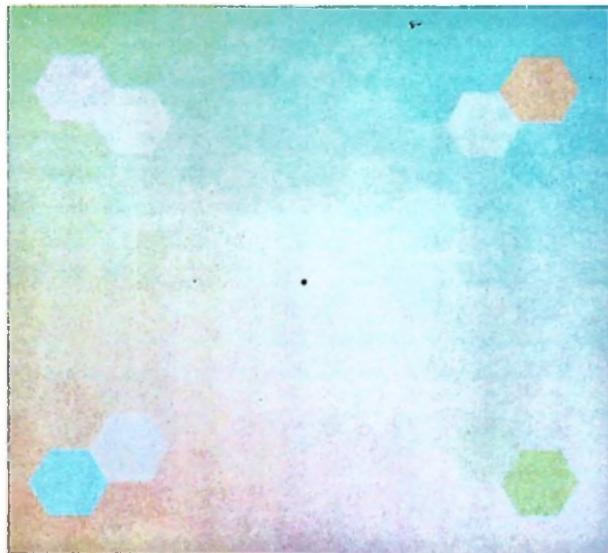
Un secondo problema riguarda il fatto che i tre colori fondamentali (magenta, cyan e giallo) che si utilizzano normalmente in tipografia hanno caratteristiche cromatiche nettamente differenti rispetto ai punti fluorescenti rossi, blu e verdi degli schermi. Per questo motivo è impossibile ottenere su carta un verde che abbia la stessa intensità e la stessa saturazione di quello dello schermo, anche con la gamma dinamica qui utilizzata.

Esaminiamo dapprima i due schermi illustrati in questa pagina. Sono composti dagli stessi elementi: chiazze di colore esagonali. Ogni esagono di uno schermo si ritrova in qualche punto nell'altro. Ciascuno di questi esagoni ha una segnatura cromatica formata da tre numeri, che rappresentano rispettivamente l'intensità dei pixel rossi, verdi e blu (i pixel sono i punti luminosi che costituiscono lo schermo). Tra le due immagini c'è una sola differenza: la disposizione degli esagoni gli uni in rapporto agli altri, cioè la loro posizione sullo schermo.

Sul primo schermo, gli esagoni sono disposti secondo i loro tre numeri cromatici: l'intensità del rosso cresce dall'alto verso il basso dello schermo, quella del verde dal basso verso l'alto, e quella del blu da sinistra a destra. Da un esagono all'altro, la variazione d'intensità è appena superiore al limite percettivo. Il secondo schermo è molto differente: i colori vi appaiono più vari e più vivi, benché la sola differenza sia che gli esagoni sono stati mescolati, cioè è stata loro attribuita una posizione casuale. Un esercizio istruttivo consiste nel cercare di scoprire, per un esagono dato, il cambiamento di posizione da uno schermo all'altro. Se nel primo schermo esso si trova lungo un bordo, la sua nuova posizione nel secondo schermo è abbastanza facile da trovare. In caso contrario l'operazione è quasi impossibile, a meno di non isolare ciascun esagono coprendo gli altri.

Sui due schermi di questa pagina, cinque esagoni - quello centrale e i quattro vicini a ciascun angolo - sono particolari per due motivi: la loro posizione è costante, e tutti hanno la stessa segnatura cromatica. Per tutti gli altri, le triplette caratteristiche sono

Abbiamo fotografato lo schermo di un computer su cui erano poste queste serie di esagoni colorati e dove appaiono «illusioni». Ogni esagono del primo schermo si ritrova anche nel secondo, ma nel primo gli esagoni sono disposti in ordine cromatico. Nel secondo sono collocati a caso, e questo dà l'impressione di colori più vivi. Cinque degli esagoni hanno la stessa segnatura cromatica (lo stesso spettro) e la stessa posizione sui due schermi. Nel primo, sembrano avere colori abbastanza differenti; nel secondo, questo colore (un grigio neutro) è facilmente percepito come identico per tutti e cinque.



Modificando le posizioni degli esagoni colorati che contornano ciascun esagono grigio, non si evita di essere ingannati da questi ultimi, e non si ristabilisce la costanza dei colori (a sinistra). Ciò indica che la percezione dei colori si basa su confronti, fatti nella retina, delle variazioni di riflettività di chiazze colorate, intorno alla loro frontiera comune. Basta lo scambio in diagonale degli esagoni colorati (a destra) per dare a quelli grigi l'apparenza di un grigio costante: è il confronto con uno spettro molto diverso che ristabilisce la costanza dei colori. Qui uno solo degli esagoni adiacenti a ciascun esagono grigio è stato scambiato con il suo omologo; per tutto il resto questo schermo è uguale al primo.

differenti. Confrontiamo questi cinque esagoni. Nel primo schermo, appaiono probabilmente di colori diversi, malgrado la limitata gamma dinamica dell'illustrazione. Ma se si fissa uno qualunque di questi esagoni, piazzandosi a distanza normale di lettura (circa 35 centimetri), il suo colore diventa indeterminato. È poco probabile che si arrivi a riconoscere l'esagono centrale, marcato da un piccolo punto nel centro. Fissando lo sguardo sul punto e chiudendo un occhio, i quattro esagoni periferici appariranno dapprima con colori netti, ma dopo qualche secondo svaniranno. In effetti, l'immagine intera vi apparirà fusa, tranne sul contorno, ovvero sulla frontiera con il foglio bianco.

Una volta ancora, il secondo schermo è diverso. I cinque esagoni dovrebbero apparire dello stesso grigio, benché non abbiano cambiato posizione e segnatura cromatica rispetto al primo schermo. Se si fissa uno qualunque di questi esagoni, il suo colore resterà di un grigio stabile. In più, fissando il punto centrale non si vedrà l'immagine alterarsi come avviene con il primo schermo.

Queste prime constatazioni permettono di fare alcune osservazioni. Quando gli esagoni colorati che contornano i cinque esagoni grigi sono disposti a caso, i colori paiono più vivi e il grigio è stabile; al contrario, se gli esagoni sono disposti in ordine, i colori paiono meno vivi e il loro grigio è variabile: l'ordine distrugge la costanza del colore.

In questa pagina a sinistra è mostrato un altro schermo, quasi identico al primo, in cui è stata modificata la disposizione nelle immediate vicinanze dei quattro esagoni grigi periferici. Inoltre abbiamo modificato l'ordine degli esagoni grigi: sono gli stessi del primo schermo, ma la loro posizione sull'anello non è più la stessa. Attorno a ciascun esagono grigio, l'intensità media dei pixel rossi, verdi e blu resta invariata e pertanto il colore percepito di ciascun esagono grigio non cambia. Il quarto schermo (in questa pagina a destra) è ancora più simile al primo. Sono stati solo scambiati in diagonale quattro esagoni esterni che erano a contatto con gli esagoni grigi. In esso si riconosce meglio il colore grigio.

I due schermi nella pagina a fronte sono molto si-

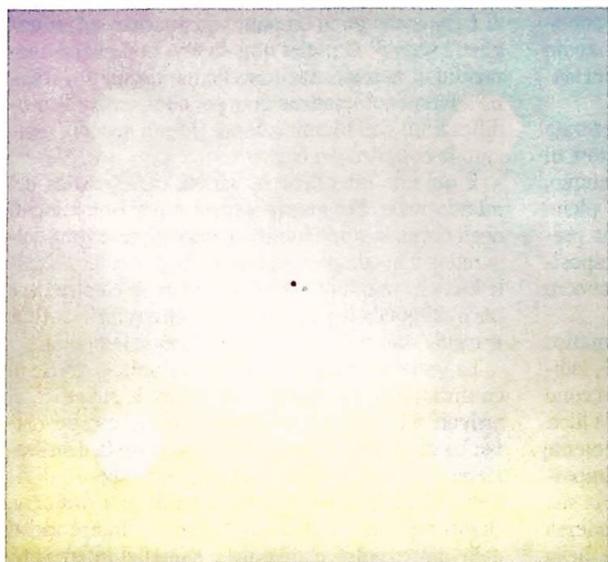
mili a quelli della pagina precedente: è stato modificato soltanto il programma che genera i colori, in modo che le segnature cromatiche siano specificate in magenta, cyan e giallo, i pigmenti utilizzati in tipografia. Le illusioni cromatiche rimangono, benché i colori siano, come ci si poteva attendere, differenti da quelli del primo schermo.

Le ombre colorate

Resta da mostrare un'ultima illusione. Alla costanza dei colori si oppone un fenomeno che appare come una sorta di immagine in negativo, ottenuta con le ombre colorate. A pagina 79 sono mostrate due fotografie di una scena reale, un busto di Alexander von Humboldt piazzato su fondo bianco. Nelle due foto, il busto è illuminato da un lato da una luce colorata e dall'altro lato da una luce bianca. È difficile dire da quale lato si trovino le sorgenti: nelle due immagini una delle ombre ha il colore del fascio colorato (perché il busto blocca la luce bianca). Tuttavia la seconda ombra (dove è la luce colorata a essere bloccata) non appare senza colore: assume il colore complementare di quello della prima ombra. L'effetto è particolarmente netto per le ombre situate sul busto (nell'illustrazione, le sorgenti luminose colorate sono a destra).

Perché il fenomeno delle ombre colorate costituisce il «negativo» di quello della costanza dei colori? Nei due casi, il colore attribuito a una luce è diverso da quello che è veramente, cioè da quello che dovrebbe essere in funzione delle sue proprietà fisiche. Nelle ombre colorate, una distribuzione spettrale identica (cioè uno stesso stimolo fisico) dà colori differenti. Nella costanza dei colori, distribuzioni differenti danno lo stesso colore.

Sul primo schermo della pagina precedente, la differenza apparente tra i colori di cinque esagoni grigi costituisce di fatto un esempio di ombre colorate. Se si volesse modificare la riflettività dei quattro esagoni grigi periferici in modo da farli apparire dello stesso colore dell'esagono centrale (marcato da un punto) le quattro regolazioni sarebbero differenti. Si sarebbe trasformato un fenomeno di ombre co-



lorate (stimoli identici percepiti come differenti) in un fenomeno di costanza cromatica (stimoli differenti percepiti come simili). Ma se si ridistribuissero gli altri esagoni, come nel secondo schermo, i cinque grigi apparirebbero tutti di colori differenti.

L'elaborazione dei colori

È chiaro che l'elaborazione delle informazioni sui colori fornite dai dati sensoriali non si limita a stabilire una semplice corrispondenza punto per punto tra colore percepito e spettro della luce. Non vi è nulla di simile nella nostra esperienza quotidiana della luce del giorno, in cui si manifestano la costanza dei colori e le ombre colorate. L'elaborazione dei colori obbedisce dunque a leggi diverse rispetto a quelle che comandano le reazioni alla luce dei pigmenti visivi. Le nostre esperienze ci informano sulla natura di queste leggi. In primo luogo, i colori sono determinati ai contorni delle superfici osservate. Questi luoghi sono i soli in cui i dati cromatici cambiano: è proprio questo fenomeno a permettere di percepire i rapporti di riflettività. Il primo schermo è esemplificativo. Fissando di nuovo con un occhio il punto centrale, si vedranno i quattro esagoni grigi della periferia scomparire dopo qualche secondo, poi riapparire, poi scomparire di nuovo. Facendo attenzione, ci si accorge che la ricomparsa accompagna sempre un movimento dell'occhio: con un po' di allenamento è possibile controllare volontariamente la sparizione e la ricomparsa.

Questa osservazione illustra il fenomeno della stabilità delle immagini retiniche. Fin dal XIX secolo, è noto che mantenendo fissa un'immagine sulla retina, essa sparisce per lasciare il posto a un'impressione di cecità, chiamata campo vuoto. Questa sparizione è dovuta al fatto che ciascuno dei recettori (i coni) si adatta alla luce che lo colpisce. I recettori sono concepiti per segnalare al sistema nervoso i cambiamenti e non gli stati permanenti. La vista funziona bene finché l'occhio si muove; se l'occhio si immobilizza, la vista si altera.

In secondo luogo, il colore di una superficie dipende non soltanto dal suo contorno, ma anche dal-

la «storia» della zona della retina in cui si forma la sua immagine. Un insieme di recettori non fornisce lo stesso segnale in risposta a una luce data se è stato precedentemente esposto a una successione di luci differenti o se ha avuto una storia di stimoli più povera. Questa conclusione può essere tratta ancora dall'osservazione del primo schermo. Come già detto, fissando uno dei quattro esagoni grigi della periferia, il suo colore diviene subito indeterminato. Al contrario, se si osserva l'immagine liberamente, lasciando correre lo sguardo, si conserva l'impressione dei quattro esagoni di colori differenti. Il fenomeno di permanenza delle immagini retiniche fornisce una spiegazione. Poiché l'immagine stabile scompare, guardare fissamente una superficie è un cattivo metodo per determinarne il colore.

Al contrario, poiché i recettori non si adattano istantaneamente (ogni immagine, per quanto luminosa e contrastata, sparisce in circa due secondi) e poiché l'occhio si sposta continuamente e a scatti, ciascun cono riceve informazioni numerose e varie.

Il secondo schermo e i seguenti portano alle stesse conclusioni: quando l'ambiente di una superficie si diversifica, il colore di questa superficie è più preciso e più stabile nel tempo. Per giunta, quindi, c'è una correlazione più debole tra colore e riflettività di una superficie. Nel mondo reale, la diversità è la regola: è raro osservare disposizioni ordinate simili alla prima immagine, salvo che nei motivi cromatici utilizzati da certi animali per mimetizzarsi.

Con questa diversità naturale e i cambiamenti continui di orientazione dello sguardo, si è certi che il contorno delle superfici e la storia luminosa di tutti i coni siano vari quanto poteva augurarsi un ingegnere responsabile della concezione di un sistema per la visione dei colori.

L'adattamento alla luce

Veniamo alle preoccupazioni di questo ingegnere. Che un sistema di recettori sia naturale o artificiale, è utile che sia dotato di una funzione di «normalizzazione continua». È ciò che gli psicologi chiamano «adattamento» e gli ingegneri «controllo auto-

Si ritrovano qui le stesse illusioni dei due schermi precedenti, ma le signature cromatiche degli esagoni sono modificate in modo che assomiglino a combinazioni di tre colori che si usano in tipografia. In altre parole, le luminosità variano progressivamente per il cyan (un blu che vira al verde), il magenta (un rosso violaceo) e il giallo. Qui, i cinque esagoni grigi sembrano ancora avere colori differenti quando sono circondati da signature cromatiche ordinate, ma appaiono di un solo colore quando i colori circostanti sono disposti a caso. Ovviamente il grigio dei cinque esagoni appare diverso da quello degli esagoni corrispondenti del primo schermo.



matico del guadagno». Si tratta di correggere continuamente la sensibilità del sistema al livello medio del segnale in entrata, in modo che le variazioni siano sempre in una gamma dinamica limitata.

Si calcola dunque la media del segnale di entrata e la si utilizza per regolare il guadagno (o fattore di amplificazione). Così funzionerebbe, per esempio, un obiettivo fotografico che si oscurasse in pieno sole e si aprisse in luce debole, il tutto con una precisione tale che gli scatti fatti con la stessa esposizione a mezzogiorno o al crepuscolo risultassero pienamente riusciti.

Per elaborare un sistema di controllo automatico del guadagno applicato alla sensibilità dei coni, indichiamo con L l'intensità della luce che arriva al cono in un istante dato e con A la storia recente della luce, cioè la media delle intensità luminose recentemente pervenute al cono, ponderate in modo che l'importanza della luce diminuisca in proporzione alla sua anzianità: Helmholtz chiamava questa grandezza «luce scura». Il quoziente della differenza e della somma della luce e della luce scura $(L - A)/(L + A)$ assicura un controllo automatico di guadagno.

In effetti, se la luce è costante, con A (la luce scura) pari a L (la luce), il rapporto è nullo. Se L aumenta; il rapporto diviene positivo; se l'incremento persiste, A cresce progressivamente fino al nuovo valore di L , e il rapporto torna a zero. Al contrario, quando L diminuisce, il rapporto diviene negativo, e poi torna a zero quando A decresce fino a L . A un accrescimento o una diminuzione di L di una frazione fissa del suo valore corrisponde una variazione fissa del rapporto. Infine, un aumento improvviso di L fino a un multiplo elevato di A non può portare il rapporto che a un valore molto vicino a 1; così, una diminuzione improvvisa di L fino a una frazione molto piccola di A conduce il rapporto a un valore vicino a -1 . Il rapporto non può dunque superare ± 1 .

Pensiamo ora a una schiera di coni funzionanti secondo questo modello: se fossero indipendenti gli uni dagli altri, un'immagine stabilizzata su questa superficie darebbe ovunque un segnale nullo. Immaginiamo dunque che i coni siano connessi e si comunichino il loro valore di A con intensità inversamente proporzionale alla loro distanza reciproca. Un'immagine stabilizzata fornisce ancora un segnale ovunque nullo; in risposta una modificazione di L su un cono viene trattata in funzione non solo del livello di adattamento A di questo cono, ma anche dei valori di A di tutti i vicini. Così, ciascun cono stabilisce la media nel tempo della luce scura, mentre le sue connessioni gli danno la media nello spazio.

Con tre strati di coni interconnessi e intrecciati, uno per ciascuno dei tre pigmenti visivi, si ottiene un riferimento tricromatico per ogni cambiamento

di L che avvenga in un punto qualunque dell'immagine. I segnali di uscita non dicono nulla delle operazioni di normalizzazione che hanno subito; si sono adattati automaticamente per compensare le modificazioni dell'illuminazione. Questo sistema assicura la costanza dei colori.

È qui che interviene la varietà caratteristica del mondo reale. Per questa varietà e per i movimenti degli occhi, la storia luminosa delle diverse zone della retina è in complesso la stessa. In più la media delle luci che raggiungono una zona retinica differisce poco da quella del campo visivo circostante. Infine, le medie spaziali somigliano alle medie temporali.

La varietà del mondo permette dunque, grazie ai confronti locali lungo le frontiere tra le superfici, di arrivare a colori costanti sull'insieme del campo visivo. La diversità non riguarda solamente la distribuzione delle luci riflesse, ma quella dei rapporti di riflettività da una parte e dall'altra di una frontiera. Questi rapporti sono, in larga misura, indipendenti dalle dimensioni relative delle superfici interessate. Se esse costituiscono l'informazione essenziale analizzata dalla vista, il disequilibrio delle dimensioni non ha importanza fino a livelli elevati. Di fatto, una piccola superficie dallo spettro nettamente differente da quello del fondo ordinato è sufficiente ad assicurare la costanza di colore dell'esagono grigio adiacente (si veda l'illustrazione a pagina 82 a destra).

Un principio di economia

Questa teoria del colore è applicabile al sistema visivo dell'uomo? Questo mette in gioco una serie di siti successivi di elaborazione. I coni inviano l'informazione ai circuiti nervosi della retina, che raccolgono le informazioni provenienti da altri siti di elaborazione tramite la «via di uscita»: il nervo ottico. Quest'ultimo stimola una struttura cerebrale chiamata corpo genicolato esterno, che attiva a sua volta una parte della corteccia cerebrale, la corteccia visiva primaria. I coni sono dunque i primi elementi di un sistema sensoriale complesso. Può dunque sembrare sorprendente attribuire loro una funzione di tale importanza nella visione dei colori. Ciononostante, gli esperimenti hanno mostrato che la rivelazione delle frontiere di colore comincia dalla retina. E dato che ogni frontiera implica una modificazione di una grandezza (differenza di colore o di luminosità, per esempio), occorre dunque che la grandezza in questione esista a questo livello perché sia possibile rivelare le differenze (per rivelare una frontiera tra rosso e verde occorre dapprima avere distinto i due colori). Sarebbe poco efficace e poco affidabile riportare l'elaborazione del colore a livelli del sistema visivo più lontani dai recettori, poiché la retina sarebbe obbligata a inviare le informazioni concernenti qualità come il colore per vie distinte da quelle che segnalano le frontiere, e ciò esigerebbe un'elaborazione sovradimensionata.

Semplici ragioni di economia portano dunque a pensare che l'elaborazione dei fattori determinanti il colore, con i coni e l'apparato retinico loro associato, costituisca un sistema affidabile, e in ogni caso preferibile a un suo trasferimento in strutture nervose più centrali come la corteccia visiva. Resta da stabilire se tale è stata la scelta della natura.

GLI AUTORI

PHILIPPE BROU, THOMAS SCIASCIA, LYNETTE LINDEN E JEROME LETTVIN lavorano insieme, sotto la direzione di Lettvin, al Massachusetts Institute of Technology.

PER SAPERNE DI PIÙ

VON HELMHOLTZ HERMANN, *Treatise on Physiological Optics*, Dover Publications Inc., 1962.

KORETZ JANE F. e HANDELMAN GEORGE H., *Come l'occhio umano mette a fuoco le immagini*, in «Le Scienze» n. 241, settembre 1988.

GLICKSTEIN MITCHELL, *La scoperta della corteccia visiva*, in «Le Scienze» n. 243, novembre 1988.

HUBEL DAVID, *Occhio, cervello e visione*, Zanichelli, Bologna, 1989.

L'elaborazione dell'immagine visiva

Analizzando i diversi attributi delle immagini, il cervello è in grado di costruire un proprio mondo visivo; particolari tipi di cecità spiegano il ruolo svolto da alcune regioni specializzate della corteccia

di Semir Zeki

Lo studio del sistema visivo è un'impresa dal carattere profondamente filosofico: si tratta infatti di stabilire in che modo il cervello acquisisca conoscenza del mondo esterno, una questione tutt'altro che semplice. Gli stimoli visivi che arrivano al cervello non costituiscono un codice di informazione stabile. Le lunghezze d'onda della luce diffusa da una superficie cambiano al variare dell'illuminazione, eppure il cervello è in grado di assegnare alla superficie un colore costante. L'immagine retinica prodotta dalla mano di un oratore che gesticola non è mai identica da un istante all'altro, tuttavia il cervello deve continuare a classificarla come una mano. L'immagine di un oggetto varia con la distanza, ma il cervello continua a conoscerne le reali dimensioni. Il suo compito, quindi, è quello di estrarre le caratteristiche invariabili degli oggetti dal flusso continuamente mutevole di informazioni che riceve da essi. L'interpretazione è una parte inseparabile della percezione sensoriale. Per conoscere ciò che è visibile, il cervello non può dunque limitarsi ad analizzare le immagini presentate alla retina, ma deve costruirsi un mondo visivo.

Quando osserviamo un'immagine, aree differenti della corteccia cerebrale ne analizzano i diversi attributi, come colore, forma e movimento. Visione e comprensione avvengono simultaneamente grazie all'attività sincrona di queste aree corticali. Il mondo visibile è quindi un'«invenzione» del cervello.

A questo scopo, il cervello ha sviluppato un elaborato meccanismo neurale, così meravigliosamente efficiente da richiedere un secolo di studi prima che si riuscisse ad avere anche solo un'idea delle sue molte componenti. E quando le ricerche sulle patologie cerebrali iniziarono a rivelare alcuni segreti del sistema visivo, i neurologi esitarono ad ammetterne le sorprendenti implicazioni.

La caratteristica distintiva di questo meccanismo è una complessa «divisione del lavoro» le cui basi anatomiche sono aree corticali discrete e sottoregioni specializzate in particolari funzioni visive. Dal punto di vista della patologia tale divisione si manifesta come incapacità di riconoscere certi aspetti del mondo visivo quando il meccanismo interessato è compromesso. È paradossale che nessuna di queste specializzazioni interne del cervello sia normalmente evidente a livello percettivo. La sfida è dunque quella di cercare di capire come le componenti della corteccia cooperino per darci un'immagine unificata del mondo.

Questa moderna concezione del sistema visivo

cerebrale si è evoluta solo negli ultimi 20 anni. I primi neurologi, a partire da quelli attivi alla fine del XIX secolo, avevano opinioni molto differenti. Partendo dal concetto erroneo che la luce riflessa o emessa da un oggetto contenesse codici visivi, ritenevano che l'immagine venisse «impressa» sulla retina, esattamente come accade con una lastra fotografica. Queste impressioni retiniche verrebbero poi trasmesse alla corteccia visiva che analizzerebbe i codici che esse contengono: sarebbe questo processo di decodificazione a consentirci di vedere. Si riteneva che la comprensione di ciò che vediamo fosse un processo separato, compiuto tramite l'associazione delle impressioni ricevute con altre simili, incontrate in precedenza.

Anatomia della visione

Questa concezione del funzionamento cerebrale, che resistette fino alla metà degli anni settanta, era profondamente filosofica, sebbene i neurologi non lo dichiarassero mai apertamente. Essa separava la

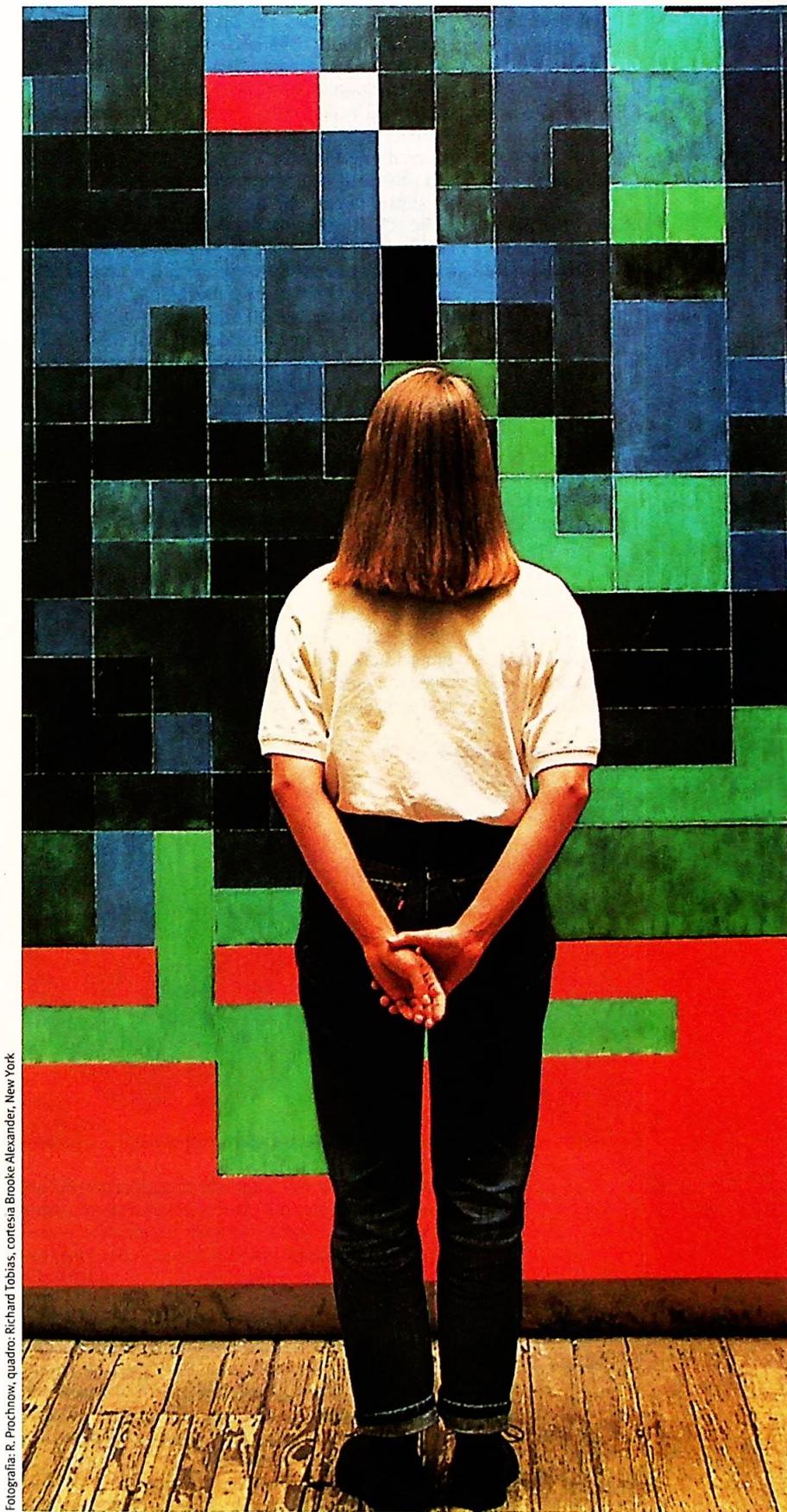
percezione dalla comprensione e assegnava a ogni facoltà una sede corticale separata. L'origine di questa dottrina dualistica è poco chiara, ma la si può collegare alla concezione, introdotta da Immanuel Kant, delle due facoltà della percezione e della comprensione, la prima passiva e la seconda attiva.

I neurologi videro una prova della loro ipotesi nel fatto che la retina si collega quasi esclusivamente a una parte ben distinta del cervello, la corteccia visiva primaria o striata, denominata anche area V1. Questa connessione si compie con elevata precisione topografica: l'area V1 contiene a tutti gli effetti una mappa dell'intero campo retinico. La retina e l'area V1 sono collegate tramite una struttura subcorticale, il nucleo genicolato laterale, che comprende sei strati di cellule. I quattro strati superiori sono detti parvocellulari in quanto contengono neuroni dal corpo cellulare piccolo, mentre i due sottostanti prendono il nome di strati magnocellulari perché i loro neuroni hanno corpo grande. Molti anni fa, il compianto Salomon E. Henschen dell'Università di Uppsala suppone che la funzione dei grandi neuroni fosse quella di «raccogliere la luce» mentre i piccoli neuroni avrebbero avuto il compito di «registrare i colori»; la sua intuizione di base, ossia che le suddivisioni anatomiche avessero significato funzionale, ha assunto in anni recenti un'importanza sempre maggiore.

A quell'epoca si scoprì che lesioni in una posizione qualsiasi della via che collega la retina con l'area V1 producono un campo di cecità assoluta, la cui estensione e posizione corrispondono esattamente alla grandezza e al sito della lesione in V1. Questa osservazione condusse Henschen a considerare l'area V1 come la «retina corticale», ossia il luogo in cui si ha la «visione».

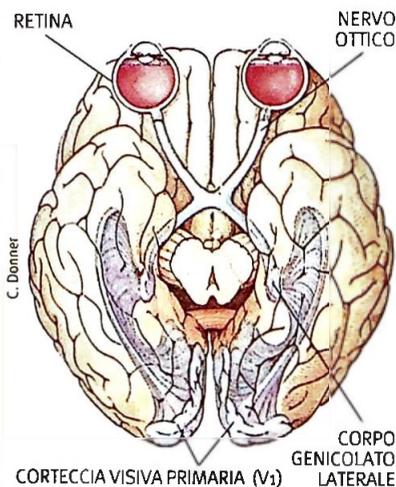
Inoltre lo psichiatra tedesco Paul Emil Flechsig dell'Università di Lipsia aveva dimostrato, alla fine del XIX secolo, che certe regioni del cervello, fra cui l'area V1, hanno aspetto maturo già alla nascita, mentre altre, comprese le regioni corticali circostanti a V1, continuano a svilupparsi, come se la loro maturazione dipendesse dall'acquisizione di nuove esperienze. Secondo Flechsig e gran parte degli altri neurologi contemporanei, questa osservazione implicava che V1 fosse «il punto d'ingresso della radiazione visiva nell'organo della psiche» e che le aree circostanti fossero sede delle funzioni «psichiche» superiori correlate alla visione. La teoria di Flechsig trovò sostegno in dati abbastanza discutibili, in base ai quali le lesioni in questa cosiddetta corteccia visiva di associazione, al contrario di quelle in V1, potrebbero provocare «cecità mentale», una patologia in cui il soggetto non comprende ciò che vede.

Sorprendentemente, sono state le ricerche sulla corteccia visiva di associazione a smentire infine questo concetto dualistico dell'organizzazione visiva nel cervello. Lavori intrapresi negli anni settanta da John M. Allman e Jon H. Kaas dell'Università del Wisconsin sull'aoto e da me sul macaco hanno dimostrato che la corteccia visiva di associazione - che oggi si preferisce chiamare corteccia prestriata - è costituita da molte e svariate aree corticali, separate da V1 tramite l'area V2. Una svolta fondamentale nella nostra conoscenza di come il cervello costruisca l'immagine visiva si è avuta poi con la mia dimostrazione che queste aree sono singolar-



Fotografia: R. Prochnow, quadro: Richard Tobias, cortesia Brooke Alexander, New York

Le suddivisioni anatomiche e funzionali all'interno del sistema visivo sono le basi fisiologiche della visione. La maggior parte delle connessioni fra la retina e la corteccia visiva, situata nella parte posteriore del cervello, passa attraverso il nucleo genicolato laterale. In sezione, questa struttura subcorticale mostra sei strati di cellule: due strati magnocellulari (M) e quattro parvocellulari (P).



mente specializzate per svolgere compiti diversi.

Nei miei studi fisiologici, ho presentato ai macachi un'ampia gamma di stimoli (colori, linee con varie orientazioni e punti che si muovevano in direzioni diverse) e, per mezzo di elettrodi, ho controllato l'attività delle cellule della corteccia prestriata. I risultati dimostrano che tutte le cellule in una regione della corteccia prestriata chiamata area V5 reagiscono al movimento, che la maggior parte di esse è sensibile alla direzione e che nessuna è influenzata dal colore dello stimolo in movimento. Questi fatti mi hanno indotto a ritenere che l'area V5 sia specializzata nella percezione visiva del moto. (La terminologia neuroanatomica non è sempre uniforme; alcuni studiosi preferiscono la denominazione MT a V5.)

Ho poi scoperto che la stragrande maggioranza delle cellule di un'altra area, V4, è in qualche misura sensibile a specifiche lunghezze d'onda della luce, e che gran parte di esse lo è anche all'orientazione delle linee, i costituenti della forma. Anche quasi tutte le cellule di altre due aree adiacenti, V3 e V3A, reagiscono alla forma, ma come quelle dell'area V5 sono per lo più insensibili al colore dello stimolo.

A ogni area il suo compito

Questi studi mi hanno condotto a proporre, all'inizio degli anni settanta, il concetto di specializzazione funzionale della corteccia visiva, secondo il quale il colore, la forma, il movimento e forse altri attributi del mondo visibile vengono elaborati sepa-

ramento del flusso sanguigno in zone del cervello impegnate in compiti specifici, i miei colleghi dello Hammersmith Hospital di Londra e io abbiamo cominciato ad applicare le osservazioni che derivavano dagli esperimenti sulle scimmie allo studio diretto del cervello umano. Abbiamo scoperto che, quando soggetti umani dalle capacità visive normali osservano un quadro di Mondrian (un dipinto astratto che non contiene oggetti riconoscibili), l'aumento maggiore del flusso locale di sangue si ha in una struttura denominata giro fusiforme. Per analogia con una regione simile del macaco, indichiamo quest'area corticale dell'uomo come V4. I risultati sono molto diversi quando i soggetti osservano una serie di quadrati bianchi e neri in movimento: il massimo flusso cerebrale di sangue si ha in un'area più laterale, distinta dalla V4, che chiamiamo area V5.

Questa dimostrazione del fatto che l'elaborazione del movimento e quella del colore sono processi separati costituisce una prova diretta della specializzazione funzionale della corteccia visiva umana. Gli studi con la PET rivelano un altro fatto interessante: in entrambe le condizioni di stimolazione, nell'area V1 (e probabilmente anche nell'adiacente V2) si è avuto un marcato aumento del flusso di sangue. Così come nelle scimmie, anche nell'uomo queste regioni devono essere deputate alla distribuzione di segnali a diverse aree della corteccia prestriata.

La chiave del sistema di distribuzione in queste aree sta nella loro organizzazione strutturale e funzionale. L'area V1 è particolarmente ricca di strati cellulari distinti, ma rivela un'architettura ancora più elaborata quando la si esamina con una tecnica di colorazione applicata per la prima volta da Margaret Wong-Riley del Medical College of Wisconsin a Milwaukee. I mitocondri contengono un enzima metabolico, la citocromo ossidasi, che consente alla cellula di utilizzare energia; colorando una regione cerebrale con una sostanza specifica per questo enzima, si possono identificare le cellule dall'attività metabolica più intensa.

Con l'impiego di questa tecnica, l'architettura metabolica dell'area V1 appare caratterizzata da colonne di cellule che si estendono dalla superficie corticale fino al tessuto nervoso sottostante, la cosiddetta sostanza bianca. Se osservate in sezioni parallele alla superficie corticale, queste colonne appaiono come addensamenti intensamente colorati, separati l'uno dall'altro da regioni intermedie di colore più pallido. Alla Harvard Medical School, Margaret Livingstone e David H. Hubel hanno scoperto che le cellule sensibili alle lunghezze d'onda della luce si concentrano negli addensamenti dell'area V1, mentre quelle sensibili alla forma si trovano soprattutto nelle regioni intermedie.

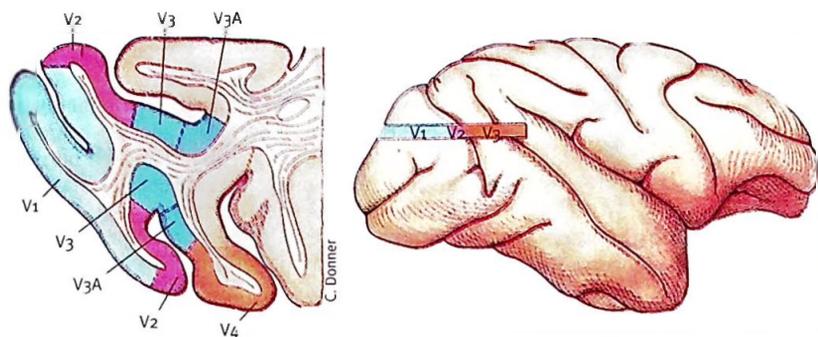
Le colonne di cellule sono particolarmente evidenti nel secondo e terzo strato di V1, che ricevono segnali dagli strati parvocellulari del nucleo genicolato laterale. Le cellule di queste regioni rispondono in modo intenso e persistente agli stimoli visivi e molte di esse sono influenzate dal colore.

Un insieme distinto di strutture può essere osservato nello strato 4B di V1, che riceve segnali dagli strati magnocellulari del nucleo genicolato laterale, le cui cellule rispondono fuggevolmente agli stimoli e sono per lo più insensibili al colore. Lo strato 4B

ratamente. Dato che la grande maggioranza dei segnali che arrivano alle aree specializzate proviene da V1, ne deriva che anche quest'ultima deve possedere una specializzazione funzionale, così come l'area V2, che riceve segnali da V1 e si collega alle stesse aree specializzate. In un certo senso, queste due aree devono fungere da «ufficio postale», distribuendo segnali differenti alle aree appropriate. Con nuove tecniche di colorazione istologica, in combinazione con gli studi fisiologici, si è ottenuta una conferma clamorosa alla mia teoria e si sono ricostruite queste specializzazioni, a partire dall'area V1, in tutta la corteccia prestriata.

Con l'introduzione della tomografia a emissione di positroni (PET), che permette di misurare l'au-

La corteccia visiva del macaco è stata studiata nei dettagli. Una sezione (a sinistra) al livello indicato nella parte destra dell'illustrazione mostra una zona della corteccia visiva primaria (V1) e aree visive della corteccia prestriata (V2-V5).



invia proiezioni alle aree V5 e V3. Le cellule di 4B che si connettono con V5 si raccolgono in piccole chiazze separate dalle cellule che si connettono con altre aree visive. In breve, l'organizzazione dello strato 4B di V1 fa pensare che alcune parti di esso siano specializzate nella percezione del moto e siano segregate dalle regioni che si occupano degli altri attributi delle immagini visive.

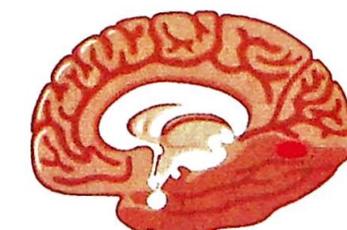
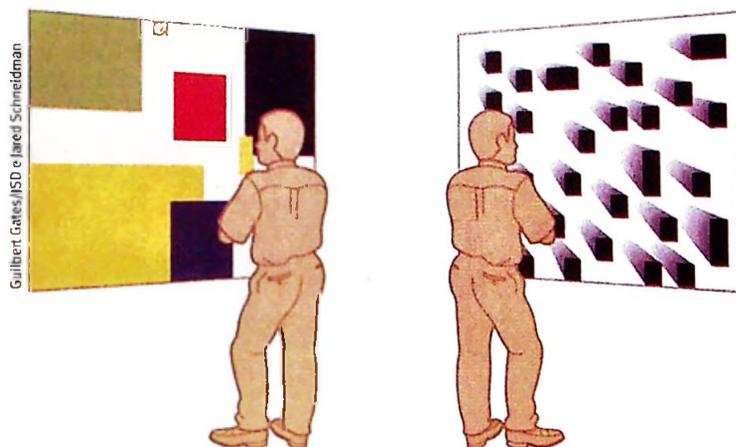
Come V1, anche l'area V2 ha un'architettura metabolica speciale, che in questo caso prende la forma di strisce spesse e sottili separate l'una dall'altra da regioni intermedie colorate meno intensamente. Come hanno dimostrato le ricerche condotte da Edgar A. DeYoe e David C. Van Essen del California Institute of Technology, da Hubel e Livingstone, da Stewart Shipp dello University College di Londra e da me, le cellule sensibili alle lunghezze d'onda della luce si raggruppano nelle strisce sottili, mentre quelle che reagiscono alla direzione del moto si trovano soprattutto nelle strisce spesse. Le cellule sensibili alla forma sono distribuite sia nelle strisce spesse sia nelle regioni intermedie.

Si potrebbe allora dire che le aree V1 e V2 contengono «caselle» nelle quali vengono raggruppati i diversi tipi di segnale prima di essere inviati alle aree visive specializzate. Le cellule di queste caselle hanno campi recettivi piccoli, ossia rispondono solo a stimoli che ricadono in una regione limitata della retina. Inoltre esse registrano informazioni solo su uno specifico attributo dell'immagine compresa in quel campo recettivo. È come se V1 e V2 analizzassero l'intero campo visivo un pezzetto per volta.

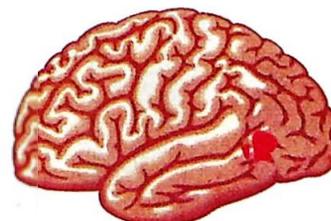
Forma, colore e movimento

Questi fatti ci consentono di delineare quattro sistemi paralleli interessati ai diversi attributi della visione: uno per il movimento, uno per il colore e due per la forma. I due sistemi che più differiscono l'uno dall'altro dal punto di vista «computazionale» sono quello per il movimento e quello per il colore. Nel primo, l'area cruciale della corteccia prestriata è V5; i segnali in ingresso passano dalla retina, attraverso gli strati magnocellulari del nucleo genicolato laterale, allo strato 4B di V1. Da qui sono trasmessi a V5, sia direttamente sia attraverso le strisce spesse dell'area V2. Il sistema per il colore dipende dall'area V4; i segnali in ingresso passano attraverso gli strati parvocellulari del nucleo genicolato laterale fino agli addensamenti di V1, poi continuano verso V4 direttamente o tramite le strisce sottili dell'area V2.

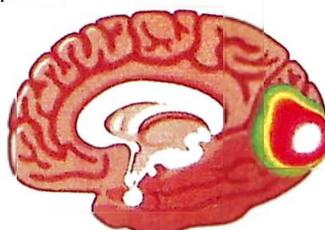
Dei due sistemi per la forma, l'uno è intimamente correlato alla percezione del colore, mentre l'altro è



AREA V4 ATTIVA



AREA V5 ATTIVA



AREE V1 E V2 ATTIVE

Immagini dissimili stimolano regioni differenti della corteccia visiva. Un quadro di Mondrian vivacemente colorato rende attiva l'area V4, come dimostra lo studio del flusso locale di sangue nel cervello. Immagini in bianco e nero in movimento attivano l'area V5. Entrambi i tipi di immagini attivano anche le aree V1 e V2, meno specializzate.

indipendente da essa. Il primo si basa sull'area V4 e riceve segnali dagli strati parvocellulari del nucleo genicolato laterale tramite le regioni intermedie fra gli addensamenti di V1 e quelle intermedie fra le strisce di V2. Il secondo è imperniato su V3 ed è coinvolto soprattutto nella percezione della forma dinamica, ossia la forma di oggetti in movimento. Trae i propri segnali dagli strati magnocellulari del nucleo genicolato laterale, attraverso lo strato 4B di V1; gli impulsi procedono poi verso V3 sia direttamente sia tramite le strisce spesse dell'area V2.

Sebbene questi quattro sistemi siano distinti, l'anatomia delle aree V1 e V2 e le connessioni dirette fra le aree visive specializzate offrono molte possibili

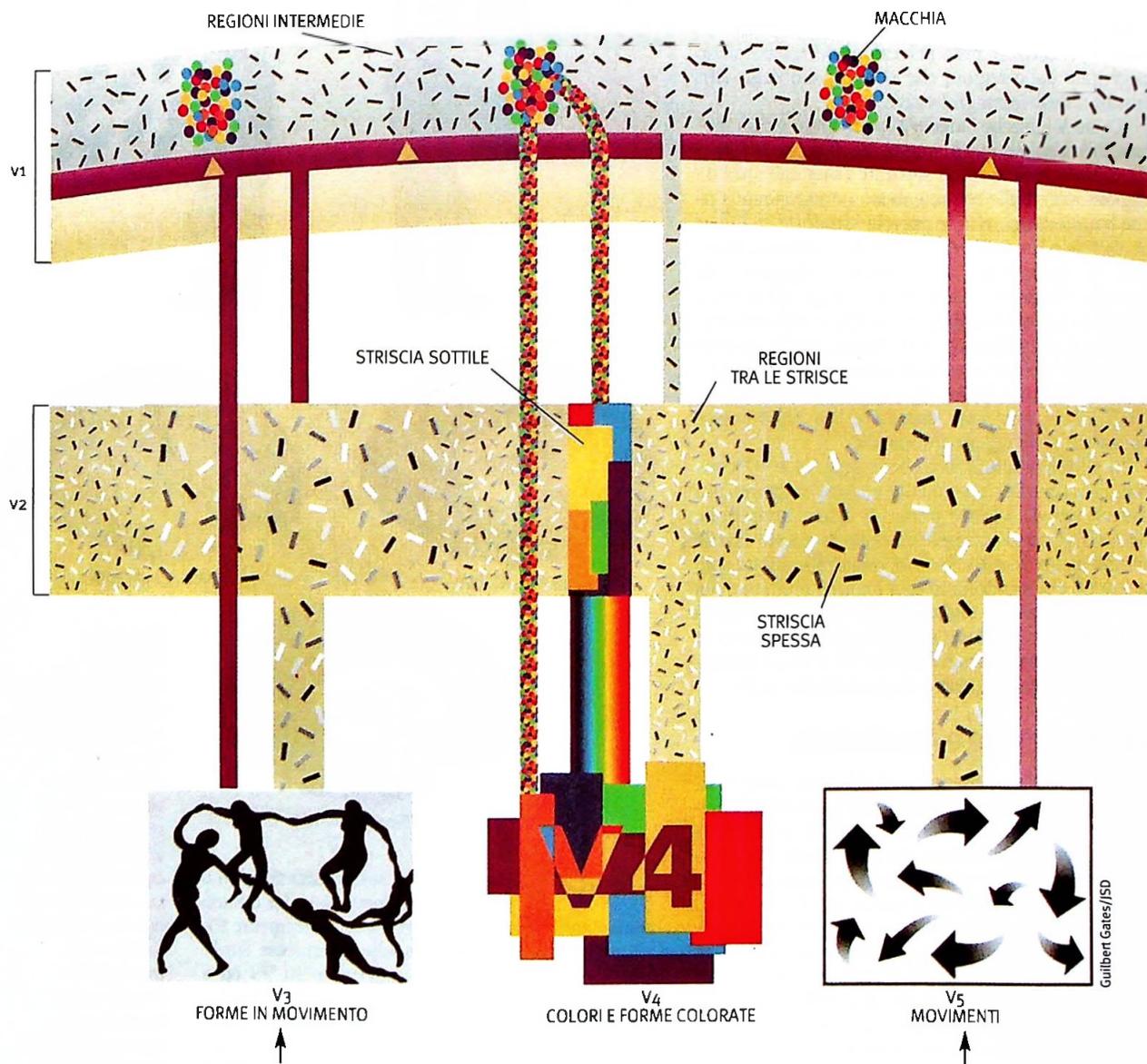
lità di comunicazione fra le «caselle». Pertanto vi è un mescolamento dei segnali provenienti dagli strati parvocellulari e magnoocellulari, che le aree della corteccia prestriata usano in modi diversi per eseguire le proprie funzioni.

Lesioni e cecità cerebrale

Questa notevole separazione di funzioni si rispecchia in alcune delle patologie che colpiscono la corteccia visiva. Lesioni di aree corticali specifiche producono sindromi visive ugualmente specifiche che, pur essendo molto meno debilitanti di una cecità totale, possono essere abbastanza gravi da portare i pazienti alla disperazione. Le lesioni dell'area V4 producono acromatopsia, una patologia nella quale i

pazienti vedono solo sfumature di grigio. Questa sindrome è differente dalla semplice cecità per i colori in quanto i pazienti non solo non riescono a vedere o a riconoscere il mondo a colori, ma non rammentano neppure i colori percepiti in epoca precedente alla lesione. Tuttavia, se la retina e l'area V1 non sono danneggiate, la loro percezione della forma, della profondità e del movimento rimane intatta.

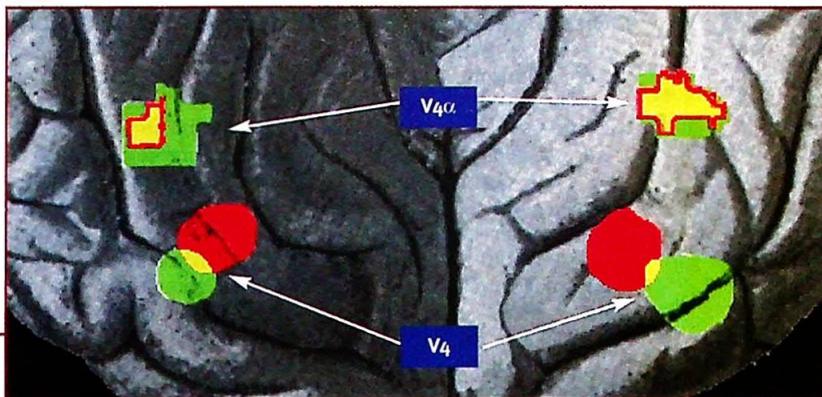
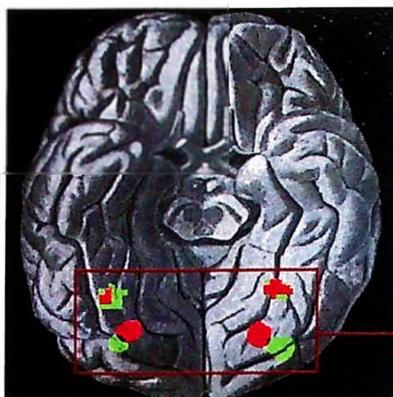
Così pure, una lesione dell'area V5 provoca acinetopsia, un disturbo in cui i pazienti non vedono né interpretano il mondo in movimento. Possono vedere perfettamente un oggetto immobile, ma il movimento lo fa svanire. Gli altri attributi della visione rimangono immutati: una specificità che deriva direttamente dal differenziamento funzionale della corteccia visiva umana.



Sono state identificate quattro vie percettive all'interno della corteccia visiva. La percezione del colore si ha quando cellule sensibili alla lunghezza d'onda della luce incidente situate nelle regioni degli addensamenti dell'area V1 inviano segnali all'area V4 e alle strisce sottili dell'area V2, che sono collegate a V4. La

percezione della forma associata al colore dipende dalle connessioni fra le regioni intermedie di V1 e V2 e l'area V4. Le cellule dello strato 4B di V1 mandano segnali alle aree V3 e V5 sia direttamente sia tramite le strisce spesse di V2; queste connessioni danno origine alla percezione del movimento.

STIMOLI



S. Zeki

Dato che la percezione della forma e quella del colore sono processi separati nella corteccia, è abbastanza sorprendente che nessuno abbia mai riferito una perdita completa e specifica della percezione della forma. È probabile che un simile deficit richieda la distruzione sia dell'area V3 sia della V4 e quindi l'eliminazione di entrambi i sistemi sensibili alla forma. L'area V3 costituisce un anello che circonda V1 e V2; di conseguenza, una lesione abbastanza grande da distruggere completamente V3 e V4 danneggerebbe irrimediabilmente anche V1, causando cecità totale.

Alcuni pazienti con danni alla corteccia prestriata presentano percezione difettosa della forma, spesso unita ad acromatopsia. Questi individui hanno di solito difficoltà molto maggiori nell'identificare forme immobili che non in movimento e spesso preferiscono guardare la televisione anziché osservare il mondo reale in quanto le immagini televisive sono per lo più in movimento. Quando si trovano di fronte a un oggetto immobile, ricorrono spesso alla strategia di muovere la testa per facilitare l'identificazione. Queste osservazioni fanno pensare che essi acquisiscano la conoscenza delle forme tramite il sistema sensibile al movimento situato nell'area V3.

La specializzazione funzionale della corteccia visiva si manifesta anche in una sindrome a cui ho dato il nome di cromatopsia («visione a colori»), associata all'avvelenamento da monossido di carbonio. Questa patologia è stata descritta sporadicamente nella letteratura medica, anche se non è mai stata presa sul serio fino a quando non si è scoperta la specializzazione funzionale della corteccia. Alcune persone che sopravvivono agli effetti nocivi dell'ossido di carbonio presentano un danno corticale diffuso dovuto alla carenza di ossigeno. In questi pazienti la visione è gravemente compromessa, tranne che per un aspetto: la percezione dei colori rimane pressoché intatta. Dato che il colore rimane il solo tipo di informazione visiva disponibile, queste persone tentano di identificare ogni oggetto in base al colore, definendo per esempio tutti gli oggetti blu come «mare».

La causa esatta di questa strana cromatopsia è sconosciuta. Gli addensamenti metabolicamente attivi dell'area V1 e le strisce sottili dell'area V2, entrambi sensibili al colore, sono alimentati da un numero insolitamente alto di vasi sanguigni. È quindi probabile che queste regioni siano relativamente

immuni ai danni perché l'abbondante afflusso di sangue le rende meno vulnerabili alla deprivatione di ossigeno.

In sintesi, dunque, sappiamo che la distruzione totale dell'area V1 provoca la completa incapacità di acquisire qualsiasi informazione visiva e che una lesione in una delle aree specializzate rende inaccessibile e incomprensibile l'attributo corrispondente dell'immagine visiva. Che cosa accadrebbe, ci si può chiedere, se i segnali provenienti dal nucleo genicolato laterale venissero avviati direttamente alle aree specializzate senza passare affatto per l'area V1? La natura ha già fatto l'esperimento per noi, e il fenomeno che ne risulta fornisce ulteriori informazioni importanti sul funzionamento della corteccia visiva.

Vedere e capire

Questo fenomeno è la «visione cieca», descritta per la prima volta da Ernst Pöppel dell'Università di Monaco di Baviera e poi studiata nei dettagli da Lawrence Weiskrantz dell'Università di Oxford. Le persone affette da questa patologia sono totalmente cieche a causa di lesioni dell'area V1; tuttavia, se sono costrette a indovinare, riescono a differenziare correttamente un'ampia varietà di stimoli visivi. Per esempio, sono in grado di distinguere movimenti in direzioni diverse oppure differenti lunghezze d'onda della luce. Le loro capacità in questi compiti sono imperfette e non del tutto affidabili, ma i risultati che ottengono sono migliori di quelli che conseguirebbero per scelta casuale. Tuttavia i pazienti non sono consapevoli di vedere qualcosa e spesso sono sorpresi di avere indovinato.

Le basi di questa discriminazione si trovano quasi certamente in una connessione piccola, ma diretta, fra il nucleo genicolato laterale e la corteccia prestriata, come hanno osservato Masao Yuki del Tokyo Metropolitan Institute for Neurosciences e Wolfgang Fries dell'Università di Monaco di Baviera. In alternativa, potrebbe essere interessata qualche altra connessione subcorticale ancora sconosciuta con le aree specializzate. In ogni caso, vi sono buone ragioni per supporre che negli individui affetti da visione cieca i segnali visivi raggiungano la corteccia prestriata.

I soggetti che soffrono di questa patologia sono in grado di «vedere», ma non di «capire» e così non acquisiscono alcuna conoscenza. In poche parole, la

Il centro per il colore è situato nell'uomo in due aree di V4: una posteriore, collegata alla retina e una anteriore. In un cervello umano abbiamo visualizzato con la risonanza magnetica le zone attivate quando il soggetto guarda una croce bianca. Abbiamo poi proiettato immagini a colori e in bianco e nero sopra la croce: tali stimoli provocano nel cervello un'attività rappresentata in rosso. Abbiamo poi proiettato sotto la croce bianca immagini che attivano nel cervello le zone in verde. Le zone comuni ai campi visivi superiore e inferiore appaiono in giallo. La regione stimolata dal campo visivo superiore è situata sotto quella stimolata dal campo inferiore. L'area V4 ha dunque un'organizzazione retinotopica: «vede» una scena come è proiettata sulla retina.

loro «visione», che può essere indotta solo in condizioni di laboratorio, è perfettamente inutile. Si può concludere che, perché la corteccia visiva svolga la propria funzione di acquisire conoscenza del mondo, è essenziale che l'area V1 sia intatta. Forse V1 (e per estensione V2) è indispensabile perché dà inizio al processo di elaborazione delle informazioni che deve poi essere perfezionato dalle aree specializzate, oppure perché i risultati dell'elaborazione eseguita dalle aree specializzate le vengono infine ritrasmessi.

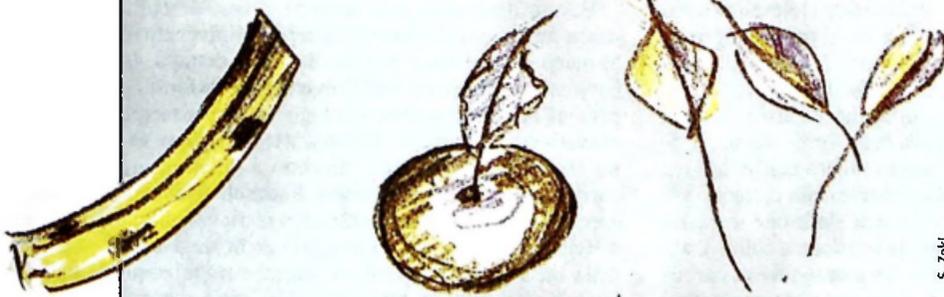
In letteratura clinica vi sono molti altri esempi che chiariscono come la preelaborazione compiuta nelle aree V1 e V2 possa contribuire direttamente e costruttivamente alla percezione. Un danno all'area V5 può pregiudicare la capacità di distinguere la direzione o la coerenza dei movimenti. Tuttavia, come hanno scoperto Robert F. Hess dell'Università di Cambridge e colleghi, i pazienti affetti da acinetopsia possono ugualmente rendersi conto che sta avvenendo un movimento di qualche tipo, presumibilmente grazie a segnali trasmessi dalle cellule delle aree V1 e V2. Così un paziente affetto da acromatopsia, studiato da Fries e da me, era in grado di distinguere diverse lunghezze d'onda della luce tramite l'area V1 ancora integra, ma non di interpretare

come colore l'informazione sulla lunghezza d'onda.

Ulteriori indizi vengono dal confronto delle capacità residue di percezione della forma in altri due pazienti con lesioni corticali che sono, in un certo senso, complementari. Il primo aveva subito un danno corticale diffuso, dovuto a un avvelenamento da monossido di carbonio che interessava l'area V1. Questo paziente aveva enormi difficoltà a copiare figure anche semplici perché il sistema di percezione della forma nell'area V1 era gravemente compromesso. Il secondo paziente, colpito da infarto cerebrale, mostrava un'ampia lesione della corteccia prestriata che però aveva in gran parte risparmiato l'area V1. Egli era in grado di riprodurre un disegno della Cattedrale di San Paolo a Londra con abilità, ma non riusciva a comprendere ciò che aveva disegnato. Poiché l'area V1 era per lo più intatta, riusciva a identificare gli elementi locali della forma e a copiare con precisione i tratti che era in grado di vedere e comprendere. La lesione della corteccia prestriata, tuttavia, gli impediva di integrare questi tratti e riconoscerli come un edificio. Il paziente vedeva e comprendeva solo ciò che gli era consentito dalle limitate possibilità del suo sistema ancora intatto.

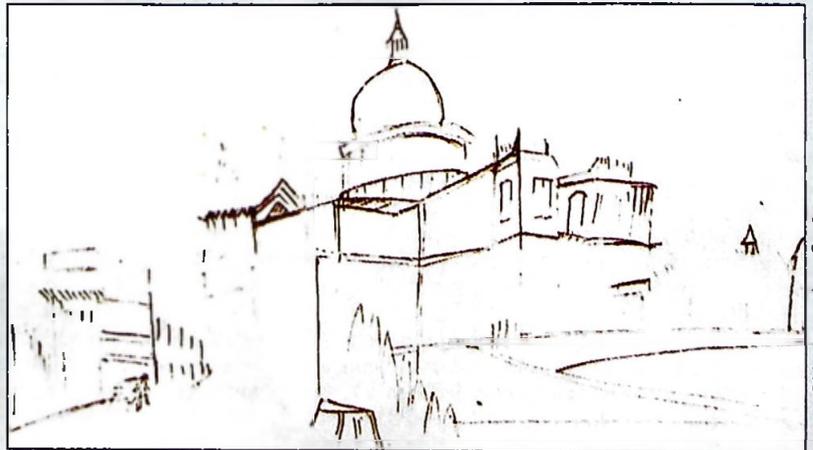
Il mondo visto da una corteccia danneggiata

Una lesione delle aree specializzate della corteccia visiva può provocare particolari tipi di cecità nei quali i pazienti perdono la capacità di vedere un solo attributo delle immagini visive, come il colore, la forma o il movimento. I disegni eseguiti da alcuni di questi individui consentono di farsi un'idea di come essi vedano il mondo e chiariscono il funzionamento della corteccia visiva.



Nei disegni di un paziente che ha subito danni alle vie corticali per la percezione del colore, la banana, il pomodoro e le foglie hanno tutti gli stessi colori.

Un paziente colpito da infarto cerebrale ha subito danni corticali che pregiudicano la percezione della forma. Riesce a copiare abilmente un'illustrazione, ma non a comprendere che i tratti da lui disegnati formano un'immagine della Cattedrale di San Paolo a Londra.



Lawrence Erlbaum Associates, Inc. © 1987

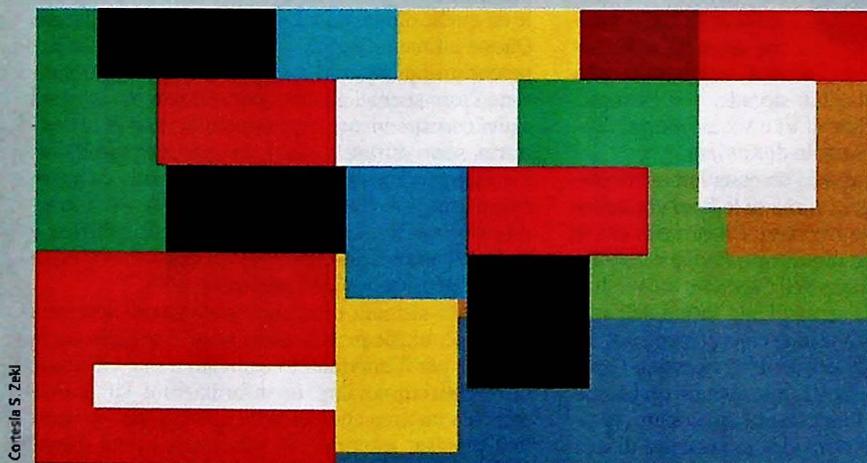
Le capacità residue in questi soggetti rivelano una caratteristica importante dell'organizzazione della corteccia visiva: nessuna delle aree visive - neppure quelle che fungono da «ufficio postale», V1 e V2 - si limita a passare segnali ad altre aree. Al contrario, ognuna fa parte del meccanismo che trasforma attivamente i segnali in arrivo, e può contribuire in maniera esplicita, anche se incompleta, alla percezione.

La divisione del lavoro insita nella corteccia visiva solleva naturalmente il problema di come le aree specializzate interagiscano per produrre un'immagine unificata. La soluzione più semplice è che tutte le aree specializzate comunichino i risultati delle proprie operazioni a un'area «di comando» preposta a sintetizzare l'informazione in arrivo. Da un punto di vista filosofico, questa soluzione non fa che spostare i termini del problema, perché allora bisogna chiedersi chi o che cosa osservi l'immagine composta, e in che modo. Tuttavia, non è il caso di preoccuparsi di ciò, dato che le osservazioni anatomiche mostrano che non vi è alcuna singola area a cui si colleghino in esclusiva tutte le aree precedenti. Le aree specializzate sono invece collegate l'una all'altra, direttamente o tramite altre aree.

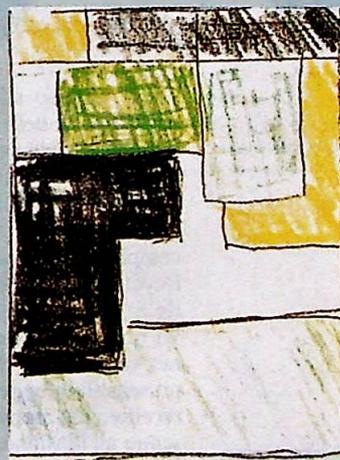
Una questione di integrazione

Sappiamo che le aree V4 e V5 stabiliscono connessioni dirette e reciproche. Entrambe inviano proiezioni anche alle regioni parietale e temporale del cervello, ma, come hanno dimostrato le ricerche condotte dal mio gruppo, le proiezioni in uscita da ciascuna area occupano un territorio ben definito all'interno della regione ricevente. La sovrapposizione diretta fra i segnali provenienti da V4 e da V5 è minima. Sembra quasi che la corteccia cerchi di mantenere una separazione fra segnali visivi distinti, una strategia questa che impiega anche per la memoria e per altri sistemi. L'integrazione dei segnali all'interno della regione parietale o temporale deve avvenire tramite circuiti locali che collegano gli ingressi.

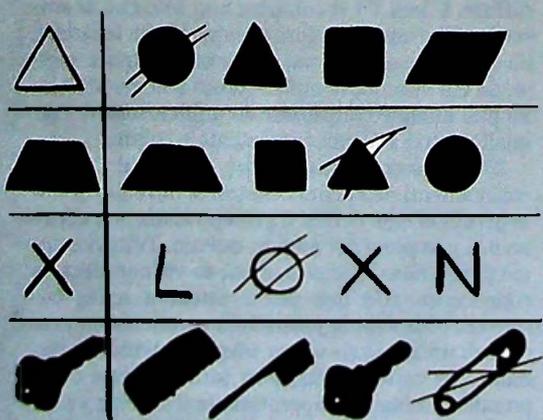
In effetti, l'integrazione dell'informazione visiva è un compito monumentale che richiede un'ampia rete di connessioni anatomiche a ogni livello fra i quattro sistemi paralleli, perché ogni livello contribuisce esplicitamente alla percezione. L'integrazione crea anche problemi davvero ardui. Per comprendere il moto coerente, per esempio, il cervello deve determinare quali oggetti del campo visivo si stiano



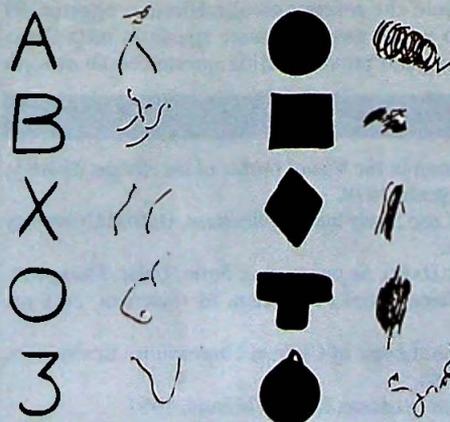
Cortesia S. Zeki



Un paziente affetto da acromatopsia al quale è stato chiesto di riprodurre un dipinto astratto ha copiato esattamente la forma delle campiture, ma i colori del suo disegno non hanno alcun rapporto con quelli del modello.

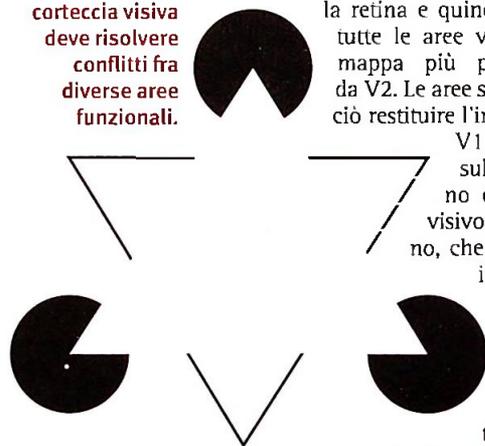


D.F. Benson, Archives of Neurology



Un paziente che ha subito danni corticali a causa di un avvelenamento da CO ha perduto la capacità di percepire le forme. A sinistra, gli è stato chiesto di scegliere quale di quattro possibilità sia identica a una forma data: non ci è riuscito. A destra si vede come sia incapace di copiare forme semplici.

Il triangolo di Kanizsa è formato da contorni illusori. Una corteccia visiva normale vede il triangolo anche se le linee che collegano i vertici in realtà non sono tracciate. Queste illusioni dimostrano che la corteccia visiva deve risolvere conflitti fra diverse aree funzionali.



muovendo nella stessa direzione e alla stessa velocità. Le cellule sensibili al movimento delle aree specializzate possono eseguire questi confronti perché hanno un campo recettivo più grande di quello delle loro controparti nell'area antecedente V1.

Tuttavia, proprio a causa dell'ampiezza del loro campo recettivo, queste cellule sono intrinsecamente meno efficienti nello stabilire con precisione la posizione di un dato stimolo all'interno del campo visivo. Perché il cervello riesca a collocare nelle tre dimensioni l'informazione integrata, questa deve essere in qualche modo affidata a un'area che possieda una mappa topografica più precisa della retina e quindi del campo visivo. Di tutte le aree visive, quella che ha la mappa più precisa è V1, seguita da V2. Le aree specializzate devono perciò restituire l'informazione elaborata a V1 e V2 in modo che i risultati dei confronti possano essere riferiti al campo visivo. Le connessioni di ritorno, che permettono il flusso di informazioni nei due sensi tra aree diverse, sono essenziali anche per risolvere conflitti fra cellule che hanno capacità differenti, ma reagiscono allo stesso stimolo. Ciò accade, per esempio, nelle risposte delle cellule di V1 e V2 a contorni illusori come quelli del triangolo di Kanizsa.

In questa famosa illusione, un osservatore normale percepisce un triangolo anche se le linee che collegano i vertici non sono tracciate: è il cervello che le completa. Come hanno dimostrato Rudiger von der Heydt ed Esther Peterhans dell'Ospedale universitario di Zurigo, le cellule sensibili alla forma dell'area V1 non rispondono all'illusione e non creano una linea continua. Le cellule dell'area V2 ricevono i propri segnali in ingresso da V1, ma, avendo un campo recettivo più ampio e funzioni più analitiche, reagiscono all'illusione «ipotizzando» la presenza di una linea. Per risolvere il conflitto, le cellule di V2 rinviavano i segnali alle loro controparti in V1.

Un'altra difficoltà che deriva dal processo di integrazione è il problema dell'unificazione dei segnali. Le cellule che reagiscono al medesimo oggetto del campo visivo possono essere sparse in tutta l'area V1; i segnali provenienti da queste cellule devono

quindi essere unificati in qualche modo affinché vengano trattati come pertinenti allo stesso oggetto. Il problema diventa ancora più spinoso quando cellule di due o più aree visive reagiscono ad attributi differenti del medesimo oggetto.

Una soluzione al problema è che le scariche prodotte dalle cellule siano simultanee. In pratica, questa sincronizzazione si verifica, almeno in una certa misura, fra cellule che sono anatomicamente connesse l'una con l'altra, come hanno dimostrato Wolf J. Singer del Max-Planck-Institut für Hirnforschung di Francoforte e colleghi. Ma perché le scariche devono essere simultanee? Gli impulsi di ritorno forniscono una soluzione almeno parziale collegando i segnali elaborati da una certa area ad altre aree che le hanno inviato informazioni.

Questi problemi mi hanno fatto mettere a punto una teoria secondo cui il processo non avviene in una singola fase e l'integrazione non deve essere rimandata fino a che tutte le aree visive abbiano completato le proprie operazioni. I requisiti anatomici dell'integrazione a più stadi sono enormi, perché essa prevede connessioni di ritorno fra tutte le aree specializzate, nonché le aree V1 e V2 che inviano loro segnali. I nostri studi indicano che una simile rete esiste realmente. Le proiezioni che ritornano alle aree V1 e V2 differiscono in modo fondamentale da quelle dirette da V1 e V2 alle aree specializzate. Queste ultime proiezioni sono sparpagliate e distinte perché gruppi separati di cellule in V1 e V2 trasmettono i loro segnali ad aree specializzate per attributi visivi corrispondenti; le proiezioni di ritorno, al contrario, sono diffuse e relativamente non specifiche. Per esempio, mentre V5 riceve segnali solo da particolari gruppi di cellule dello strato 4B di V1, la connessione di ritorno da V5 allo strato 4B è diffusa e include l'ambito di tutte le cellule dello strato, comprese quelle che inviano proiezioni a V3.

Questo sistema di ritorno può quindi servire a tre scopi: unificare e sincronizzare i segnali per la forma e per il movimento associati a due vie visive differenti; rimandare le informazioni sul movimento a un'area che possiede una mappa topografica precisa; integrare le informazioni sul movimento con quelle sulla forma associate alla via diretta a V3. Così, mentre le proiezioni che vanno da V2 alle aree specializzate sono altamente segregate, quelle di ritorno, dalle stesse aree a V2, sono diffuse. L'area V4 si connette non solo con le strisce sottili e con le regioni intermedie fra le strisce, da cui riceve segnali, ma anche con le strisce spesse, da cui non riceve nulla. Questo sistema di ritorno può dunque contribuire all'unificazione dei segnali relativi a forma, movimento e colore.

Diventa sempre più evidente che l'intera rete di collegamenti nella corteccia visiva deve funzionare perfettamente perché il cervello abbia una conoscenza completa del mondo esterno. Tuttavia, come dimostrano i pazienti affetti da visione cieca, la conoscenza non può essere ottenuta senza coscienza, che sembra essere una caratteristica cruciale di un apparato visivo adeguatamente funzionante. Di conseguenza, non sarà possibile comprendere in maniera approfondita il sistema visivo cerebrale senza affrontare anche il problema della coscienza.

L'AUTORE

SEMIR ZEKI è professore di neurobiologia all'Università di Londra.

PER SAPERNE DI PIÙ

ZEKI S., *Functional Specialization in the Visual Cortex of the Rhesus Monkey*, in «Nature», 274, n. 5670, 3 agosto 1978.

WEISKRANTZ L., *Blindsight: A Case Study and Implications*, Oxford University Press (Clarendon Press), 1986.

LIVINGSTONE MARGARET e HUBEL DAVID, *Segregation of Form, Color, Movement, and Depth: Anatomy, Physiology, and Perception*, in «Science», 240, pp. 740-749, 6 maggio 1988.

ZEKI S. e SHIPP S., *The Functional Logic of Cortical Connections*, in «Nature», 335, n. 6188, 22 settembre 1988.

EDELMAN GERALD M., *Il presente ricordato*, Rizzoli, Milano, 1991.

ZEKI S., *A Vision of the Brain*, Blackwell Scientific Publications, 1992.