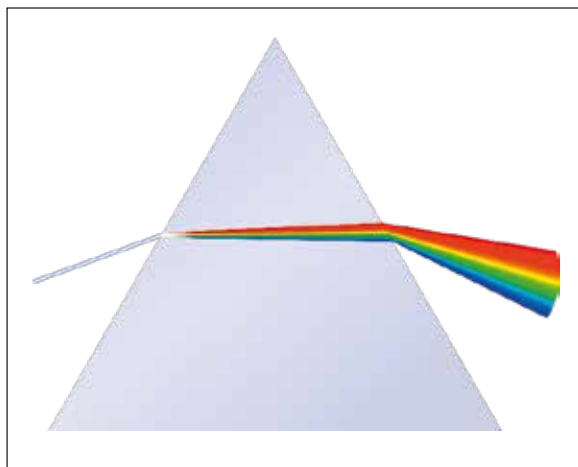




Tutti i colori dell'arcobaleno e qualcuno in più

Gioele Janett e **Luca Belluzzi**, ricercatori presso l'Istituto ricerche solari
Aldo e Cele Daccò (IRSOL)

Figura 1 – Schematizzazione di un prisma di rifrazione. Il fascio di luce bianca che incide da sinistra sul prisma viene suddiviso nei sette colori dell'arcobaleno che emergono verso destra



La luce e i colori hanno un ruolo centrale nella nostra percezione della realtà. Per questo, da secoli, la scienza cerca di costruire e affinare modelli per descrivere il comportamento di ciò che chiamiamo luce. Questo anche allo scopo di comprendere quale legame esiste tra la nostra percezione visiva e il mondo reale. Sebbene appartenga alla nostra esperienza quotidiana, la luce è un fenomeno che non riusciamo a cogliere nella sua essenza più profonda, un po' come i concetti di spazio e tempo. Grazie a innumerevoli studi sperimentali e teorici sappiamo molte cose sulla sua natura, sul suo comportamento e sulla nostra percezione di essa. Ancora oggi però, tra fisica moderna, illusioni ottiche e cromoterapie, ci lasciamo stupire dalla bellezza di un luminoso arcobaleno o dai magnifici giochi di colore del Sole al tramonto. È infatti lecito provare meraviglia davanti alla miriade di colori che popolano le nostre giornate e che variano di tonalità in base all'ora del giorno, alle condizioni meteorologiche, alla stagione, alla latitudine e all'altitudine. E pure intrigante è il ruolo svolto dal Sole in tali fenomeni cromatici. Proviamo quindi a capirne qualcosa in più.

Lo spettro della luce visibile

Newton scoprì che facendo passare un raggio di luce *bianca* solare attraverso un prisma di vetro a base triangolare, esso emergeva dal prisma scomposto nei sette canonici colori dell'arcobaleno: rosso, arancione, giallo, verde, azzurro, indaco e violetto (Figura 1). Lo scienziato inglese intuì che la luce solare non è qualcosa di uniforme e omogeneo, ma piuttosto una

mescolanza di colori diversi, riuniti nel concetto di spettro della luce visibile. Si scoprì in seguito che la luce è un fenomeno di tipo ondulatorio, e che a ogni colore di tale spettro corrisponde una particolare frequenza. Le frequenze più basse corrispondono alle varie sfumature di rosso, mentre quelle via via più alte a tutti gli altri colori dell'arcobaleno fino ad arrivare al violetto. L'esperimento di Newton ci permette fra l'altro di comprendere il fenomeno dell'arcobaleno, il quale ci appare solitamente dopo o durante un temporale, o presso una cascata o una fontana. Bisogna immaginare le gocce d'acqua che si trovano in sospensione nell'aria come una miriade di prismi, che scompongono la luce solare che li attraversa nei sette colori dell'arcobaleno. Questo fenomeno è visibile quando ci poniamo con una particolare angolazione rispetto alla direzione dei raggi che incidono sulle gocce. L'arcobaleno non si genera infatti in un particolare luogo, ma la sua posizione è apparente e dipende dalla posizione relativa del Sole e dell'osservatore, con il primo sempre alle spalle del secondo.

“L'essenziale è invisibile agli occhi?”. Così si rivolge la volpe al Piccolo Principe, descrivendo l'unicità di un fiore. Sappiamo oggi che ciò che percepiamo come luce altro non è che radiazione elettromagnetica, e la precedente affermazione sembra riferirsi alla perfezione all'ampia gamma di frequenze che compongono l'intero spettro elettromagnetico. L'insieme dei colori che l'occhio umano è in grado di distinguere costituisce unicamente una piccola parte di tale spettro, ovvero quella racchiusa tra il rosso e il violetto. Tutte le altre radiazioni sono infatti invisibili ai nostri occhi, ma sono essenziali per il funzionamento e la comprensione dei fenomeni naturali nei quali siamo immersi. Le radiazioni infrarosse, ovvero quelle di frequenza inferiore alla luce rossa, regolano fenomeni come l'effetto serra. Mentre le radiazioni ultraviolette, quelle di frequenza superiore alla luce violetta, possono ustionarci nelle giornate soleggiate.

La percezione del colore

Tornando alla luce visibile, possiamo constatare che il suo spettro non contiene tutti i colori che possiamo percepire. Ci sono infatti diversi colori che non vedremo mai in un arcobaleno, ma che caratterizzano fortemente la nostra realtà visibile. Tra di essi il nero, il bianco, il magenta, il rosa e il marrone. Per capire la non appartenenza di tali colori allo spettro



©iStock.com/coldsnowstorm

visibile è necessario approfondire come il nostro apparato visivo ci permette di percepire le varie tonalità. All'interno del nostro occhio, sulla retina, sono presenti dei particolari fotorecettori detti *coni*. Possediamo soltanto tre tipi di coni, aventi rispettivamente un picco di sensibilità alla luce di frequenze attorno al rosso, al verde e al blu. È quindi lecito domandarsi come facciamo a riconoscere tutti gli altri colori. Consideriamo per esempio il caso in cui il nostro occhio sia illuminato da luce gialla, alla cui frequenza, situata tra il rosso e il verde, non corrisponde nessun tipo di cono. La luce gialla stimola però con intensità simili sia i coni sensibili al rosso, sia quelli sensibili al verde. Il nostro cervello elabora quindi tale informazione per darci la percezione del colore giallo. Nel caso in cui non giunga alcun tipo di luce ai nostri occhi, non viene invece stimolato nessun cono e il cervello ci fa percepire tale assenza di stimoli luminosi come il colore nero, ovvero come buio. Viceversa nel momento in cui tutti e tre i tipi di coni vengono attivati simultaneamente e con intensità simili, percepiamo il colore bianco, come nel caso della luce solare diretta. Numerosi altri colori si ottengono dalla sovrapposizione di luce di diverse frequenze e intensità.

Il seguente esempio ci permette di intuire come, a livello di colori, l'apparato visivo umano possa essere facilmente ingannato. Immaginiamo che il nostro occhio sia stimolato contemporaneamente da un fascio di luce rossa e da un fascio di luce verde. In questo caso verranno stimolati i due tipi di coni sensibili al rosso e al verde, come visto nell'esempio precedente. Il cervello ci farà quindi percepire tale sovrapposizione come il colore giallo, anche se in realtà l'occhio non è irradiato da nessuna luce gialla.

A questo punto possiamo discutere il magenta, un colore leggermente più misterioso. Esso infatti non è presente nella gamma di colori dell'arcobaleno. Consideriamo il caso in cui il nostro occhio venga stimolato contemporaneamente da un fascio di luce rossa e da un fascio di luce blu. Nello spettro visibile, a metà strada tra il rosso e il blu si trova il verde. La sovrapposizione dei due fasci dovrebbe (almeno intuitivamente) venir percepita come verde, ma invece del verde percepiamo il colore magenta. La spiegazione dell'enigma sta nel fatto che, in tal caso, i nostri coni recettori sensibili al verde restano disattivati, non essendo stimolati da nessuna luce verde. Il nostro apparato visivo rischierebbe quindi di farci percepire il verde, nonostante i coni a esso dedicati non percepiscano luce di tale colore. Per uscire da questo corto circuito, il nostro cervello genera un colore alternativo, ovvero il magenta. Potremmo quindi affermare che il magenta non esista al di fuori della nostra percezione visiva, poiché non corrisponde a nessuna particolare frequenza dello spettro visibile.

Un discorso simile potrebbe essere fatto per il colore rosa, anch'esso non appartenente all'arcobaleno. Per poter percepire il rosa, tutti e tre i tipi di coni devono essere stimolati, ma con intensità diverse. Vediamo infatti il colore rosa quando i coni sensibili al rosso sono completamente attivi, mentre gli altri due sono attivati solo parzialmente.

Il marrone può essere invece considerato una variante di uno dei colori dello spettro visibile, l'arancione. Arancione e marrone vengono percepiti in seguito all'attivazione dei medesimi coni, ma con intensità di luce diverse. Con acquarelli e tempere si può infatti ottenere una tonalità marrone, aggiungendo all'arancione un po' di nero.

Il colore degli oggetti

Dopo questa breve introduzione sulla natura fisica del colore e sulla nostra percezione di esso, proviamo a comprendere perché le cose ci appaiono variopinte. Cerchiamo inoltre di capire perché tali colorazioni non sono invariabili nel tempo, ma cambiano al suo trascorrere.

Quando un fascio di luce colpisce un oggetto, parte della radiazione viene assorbita dalla sua superficie, mentre la radiazione complementare viene riflessa nello spazio circostante. Un oggetto illuminato è quindi visibile perché riflette verso di noi parte della luce che incide su di esso. Il nostro occhio vede soltanto i raggi riflessi dall'oggetto, ma non quelli assorbiti da esso. Come scrisse Giacomo Leopardi, "la luce è come un legame, che passa tra l'uomo e gli oggetti visibili". Il colore non è infatti una proprietà intrinseca di un oggetto, ma dipende sia dalle sue caratteristiche superficiali, sia dal tipo di radiazione che lo illumina. Una ciliegia illuminata con luce solare ci appare rossa perché riflette maggiormente la componente rossa della radiazione, mentre assorbe in gran parte la radiazione alle altre frequenze. Se invece venisse illuminata di luce blu, la ciliegia ci apparirebbe di un blu poco luminoso, potendo riflettere solo una piccola frazione della luce di quel colore.

Il colore del cielo

Alzando un poco più lo sguardo, è facile rimanere affascinati dalla varietà di colori che il cielo diurno ci propone. Nelle giornate soleggiate il cielo si presenta vestito del suo classico colore azzurro, fatta eccezione per le zone bianche occupate dalle nuvole. Al crepuscolo è invece possibile vedere il cielo tingersi di tonalità vicine al giallo, al rosso e al rosa.

Le molecole che costituiscono l'atmosfera terrestre, principalmente di azoto e ossigeno, diffondono in tutte le direzioni la luce bianca solare che incide su di esse. La meccanica quantistica ci spiega che tale effetto, detto *scattering di Rayleigh*, è più pronunciato nelle frequenze maggiori, ovvero nella luce violetta e blu, mentre avviene in forma minore nella luce tendente al giallo e al rosso. La radiazione solare di frequenze vicine al rosso prosegue quindi più facilmente lungo una traiettoria rettilinea attraverso l'atmosfera. Al contrario, la luce tendente al violetto ha maggiore probabilità di essere deviata in tutte le direzioni.

Se durante la giornata osserviamo il cielo in una direzione qualsiasi, la radiazione che giunge ai nostri occhi è la luce solare diffusa dall'atmosfera. Tale radiazione sarà

quindi di colorazione prevalentemente violetta. Il cielo ci appare invece azzurro poiché il nostro apparato visivo è molto meno sensibile al violetto che al blu. Inoltre, salendo in alta montagna il cielo ci appare di un blu sempre più scuro, fino a risultare nero se osservato dalla stazione spaziale internazionale. Ciò è dovuto alla diminuzione dello strato di atmosfera terrestre tra noi e il Sole, che riduce la conseguente diffusione di luce.

Al crepuscolo, il Sole si trova invece in prossimità dell'orizzonte. Per giungere a noi la luce solare deve quindi attraversare un'estesa regione della bassa atmosfera e subirne la conseguente diffusione dovuta allo *scattering di Rayleigh*. Questo fa sì che, lungo la sua traiettoria fino ai nostri occhi, la luce solare disperda maggiormente le radiazioni tendenti al blu e al violetto, permettendo così alle radiazioni rosse e gialle di prevalere. La porzione di cielo attorno al Sole e il disco solare stesso diventano quindi sempre più rossi man mano che il tramonto procede.

Le nuvole sono costituite da particelle d'acqua più grandi delle molecole di azoto e ossigeno che compongono la nostra atmosfera. Il processo di diffusione della luce dovuto alle molecole d'acqua, detto *scattering di Mie*, influisce in maniera quasi uniforme su tutti i colori del visibile. Le nuvole ci appaiono quindi bianche, poiché diffondono senza distinzioni tutti i colori della luce bianca solare che incide su di esse. La colorazione più scura delle nuvole, quando minacciano piogge e temporali, è dovuta allo spessore della nuvola, che attenua la luce solare diffusa.

Il colore del Sole

Spingendo lo sguardo ancora più in alto, oltre la coltre atmosferica che riveste il nostro pianeta, troviamo il vero artefice della colorazione della nostra realtà: il Sole. La nostra stella è una vera opera d'arte, la cui natura colorata, solitamente celata ai nostri occhi, è di rara bellezza.

Il disco solare alto nel cielo ci risulta essere di un bianco molto intenso, talmente luminoso da non potere essere osservato a occhio nudo senza subire danni irreparabili alla nostra retina. Ci potrebbe però essere capitato di guardarlo brevemente mentre si trova basso sull'orizzonte, dove a causa dello *scattering di Rayleigh* ci appare meno luminoso e di tonalità tendente al giallo. È anche per questo che nell'immaginario collettivo il Sole è di tale colore. Come già rilevato da Newton, la luce proveniente dalla nostra stel-

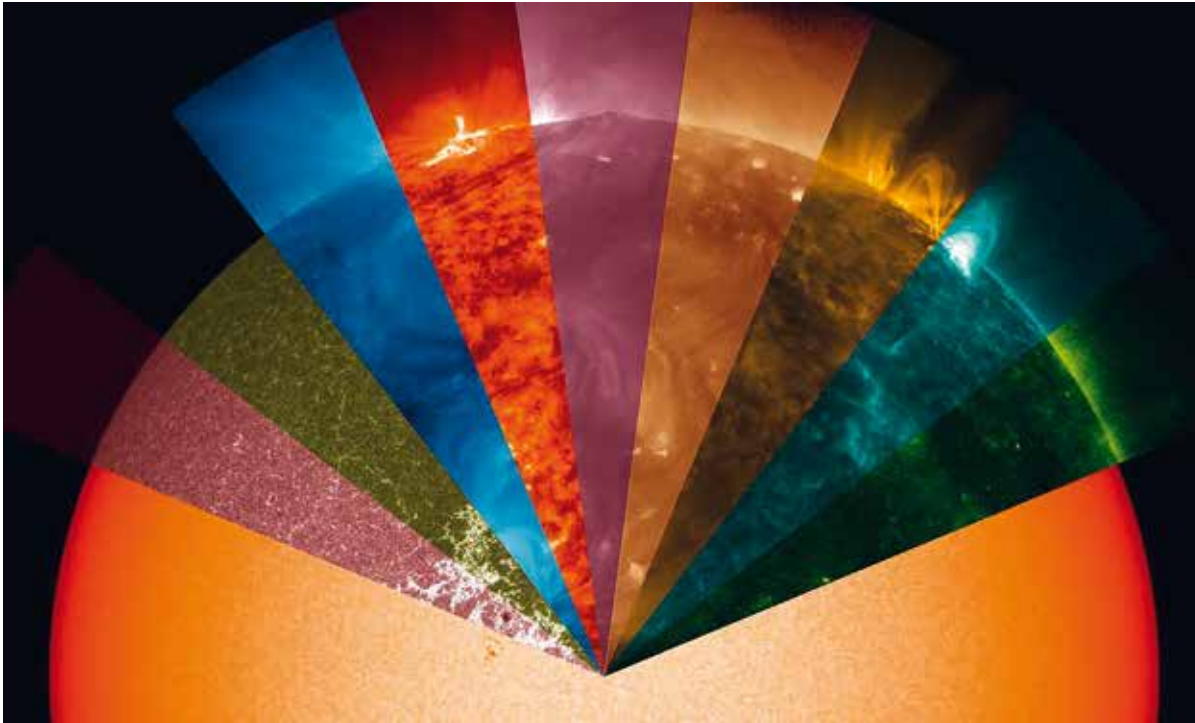


Figura 2 – L'aspetto del Sole dipende dall'intervallo di frequenze al quale lo si osserva (NASA/SDO/Goddard Space Flight Center)

la è invece un trionfo di colori, con un picco di luminosità nel verde, che i nostri occhi non sono tuttavia in grado di cogliere. A differenza dell'occhio umano, i moderni rilevatori possono osservare la luce solare filtrandola in un intervallo di frequenze specifico. Tali rilevatori sono pure sensibili alla radiazione solare anche al di fuori dello spettro visibile, ovvero nell'infrarosso e nell'ultravioletto. Va però ricordato che la nostra atmosfera assorbe la radiazione ultravioletta, proteggendoci da essa. Per osservare il Sole a tali frequenze è quindi necessario portare i nostri strumenti nello spazio. Per esempio, il telescopio spaziale della NASA Solar Dynamic Observatory (SDO) ci fornisce in tempo reale immagini spettacolari del Sole anche a frequenze ultraviolette (Figura 2). Va sottolineato che queste immagini, essendo prese al di fuori dello spettro visibile, hanno colori scelti *ad hoc* che seguono una convenzione arbitraria assunta dagli scienziati. È sorprendente come ogni fotografia del SDO metta in evidenza aspetti particolari del Sole, rilevando un'enorme varietà di fenomeni e strutture, come protuberanze, brillamenti, espulsioni di massa coronale e macchie solari.

In questo particolare contesto si inserisce l'attività di ricerca che svolgiamo all'Istituto ricerche solari Aldo

e Cele Daccò (IRSOL) situato a Locarno-Monti. Il nostro obiettivo di fondo è quello di comprendere nel dettaglio i fenomeni magnetici che avvengono sulla nostra stella. È affascinante come si possa studiare il magnetismo del Sole analizzando l'impronta che esso lascia nello spettro, e quindi anche nei vari colori, della luce solare. All'IRSOL è stata messa a punto una strumentazione leader a livello mondiale per studiare lo spettro della radiazione solare. Oltre alla frequenza, e dunque al colore, ci focalizziamo su un'altra peculiare proprietà della luce, cioè la polarizzazione, che è pure alla base del cinema 3D e degli occhiali da sole Polaroid. L'analisi dello spettro della luce solare, sia quello visibile ai nostri occhi attraverso i colori dell'arcobaleno, sia quello non visibile, e della sua polarizzazione ci permette di svelare nuove proprietà del Sole e di comprenderne sempre meglio il funzionamento.

Il fascino della luce e dei colori hanno contribuito ad accrescere la nostra passione per la fisica solare. Ogni giorno ci accompagna il desiderio di scoprire qualcosa in più su quell'astro che da quattro miliardi e mezzo di anni ci illumina e scalda, e al contempo rende possibile lo spettacolo cromatico che ogni mattino invade le nostre giornate.

“Sole. Un'esposizione interattiva sulla nostra stella” inaugura il nuovo anno di attività de L'ideatorio dell'USI a Cadro. La nuova esposizione, realizzata dall'Istituto ricerche solari Aldo e Cele Daccò (IRSOL) e da L'ideatorio USI, con il sostegno del Fondo nazionale svizzero per la ricerca scientifica, è aperta al pubblico e alle scuole a L'ideatorio a Cadro dal 16 settembre 2023 fino a giugno 2025. Un percorso espositivo destinato a tutte le età per conoscere più da vicino la nostra stella ed esplorare, in modo semplice e interattivo, il ruolo che riveste nella vita quotidiana di ciascuno di noi.