

SIMONE TAIOLI

OCCHIO, CERVELLO E COLORE

ABSTRACT - TAIOLI S., 2016 - Eye, brain and color.

Atti Acc. Rov. Agiati, a. 266, 2016, ser. IX, vol. VI, B: 35-64.

The perception of reality achievable by means of our visual tools is based on extremely complex mechanisms involving different sensory levels. Vision begins in the eyes, our camera sensitive to the electromagnetic radiation in the wavelength range between 380 and 780 nanometers. It ends in the cerebral cortex, owing to the intermediation of a large number of neurons that carry the information from the retina to the brain by nerve impulses, interpreted by our “trip computer” to rebuild “subjective” images of reality. In this article, the author initially discusses the physical properties of light objectively defined via measurement processes, such as frequency and intensity, and outlines some commonly observed wave-like behaviours of light, such as diffraction and interference. However, a description of the theory of vision would be partial by raising questions only about the physical nature of light and/or by describing the physical observables that characterize it. Therefore, in this work we also analyse some physiological principles of visual information processing, and in particular of the color, starting from the description of the retinal photoreceptors, the rods and cones. These antennas are sensitive to the electromagnetic stimulus intensity and type, and their unique properties lay the foundation of the modern trichromatic theory of additive synthesis. Finally, we examine light signal decomposition and decoding in our brain, and how our understanding of the surrounding world is affected by these complex phases. We will show through some examples, such as Byzantine mosaics, pointillism or divisionism paintings, and Leonardo da Vinci’s science, how these bio-physical mechanisms underlying the vision can be intentionally used for creating artworks. In summary, the outcome of our analysis on visible radiation and color vision is that the perception of visual stimulus is not an objective property of light; rather is the result of many complicated psycho-biological processes performed by our organs, aimed at delivering information on the observed reality as accurately as possible.

KEY WORDS - Light; Color; Visual system; Visual perception; Imaging; Artwork.

RIASSUNTO - TAIOLI S., 2016 - Occhio, cervello e colore.

La percezione della realtà che conseguiamo attraverso i nostri strumenti visivi si fonda su meccanismi estremamente complessi che coinvolgono diversi livelli sensoriali. La visione inizia nell’occhio, la fotocamera sensibile alla radiazione elettromagnetica di lunghezza d’onda tra i 380 e i 780 nanometri, e termina nella corteccia cerebrale, con l’intermediazione di una folla massa di neuroni che trasportano l’informazione dalla retina al cervello mediante impulsi nervosi, interpretati dal nostro “computer di bordo” per ricostruire un’immagine “soggettiva”

della realtà. In questo articolo l'autore illustra inizialmente le proprietà fisiche del raggio luminoso oggettivamente definibili tramite un processo di misura, quali la sua frequenza ed intensità, e ripercorre alcuni tra i fenomeni ondulatori più distintivi della luce che vengono quotidianamente osservati, come la diffrazione e l'interferenza. Una teoria della visione non si esaurisce però nella domanda su cosa sia la luce descrivendone le sole osservabili fisiche che la caratterizzano. Perciò, in questo lavoro ci soffermiamo anche sui principi fisiologici di elaborazione dell'informazione visiva ed in particolare del colore, a partire dalla descrizione dei fotorecettori retinali, i coni ed i bastoncelli, sensibili all'intensità ed alla tipologia dello stimolo elettromagnetico incidente e le cui singolari proprietà sono alla base della moderna teoria tricromatica di sintesi additiva. Infine, esaminiamo come l'informazione dei segnali luminosi venga scomposta e decodificata nel cervello, e come la comprensione del mondo circostante venga scomposta e decodificata nel cervello, e come la comprensione del mondo circostante passi anche attraverso questa fase complessa di interpretazione. Mostriamo esempi di come l'arte bizantina dei mosaici, i movimenti pittorici come il puntinismo o il divisionismo, e la scienza di Leonardo da Vinci abbiano saputo sapientemente sfruttare questi meccanismi bio-fisici su cui si basa la nostra capacità visiva. La sintesi di questa analisi su luce e colore è che la percezione dello stimolo visivo non sia un proprietà oggettiva della radiazione luminosa, uguale per tutti, ma è invece il risultato di complicatissimi processi psico-biologici a cui soggettivamente i nostri organi partecipano per restituirci un'immagine che sia la più accurata possibile della realtà osservata.

PAROLE CHIAVE - Luce; Colore; Occhio; Visione; Immagini; Arte.

INTRODUZIONE

Tra le osservabili fisiche, la luce è certamente quella che più di ogni altra influenza direttamente ed indirettamente tutte le attività umane. La luce rappresenta l'elemento naturale che permette di vedere, di percepire e di distinguere le forme, che rivela e svela. Il termine illuminare deriva dal latino e significa conoscere, sapere: solo ciò che è illuminato può essere compreso in modo esaustivo perchè a fondamento della nostra conoscenza si trova l'esperienza visiva. In cosmologia l'universo osservabile è una regione di spazio idealmente racchiusa da una sfera centrata sull'osservatore che contiene tutto ciò che egli può conoscere. L'orizzonte di questa sfera è l'unico limite fisico all'osservazione e quindi all'indagine dell'universo, imposto dal fatto che la luce emessa dagli oggetti celesti ha velocità finita ed impiega un certo tempo per raggiungere l'osservatore. Le stesse relazioni umane sono fortemente connotate dalla comunicazione visiva, e perfino il nostro umore risulta criticamente influenzato dalla presenza o dall'assenza della luce. Non è perciò sorprendente che fin dall'antichità il tema della luce sia stato oggetto di intenso studio, sia dal punto di vista prettamente scientifico per capirne l'origine, la natura e la propagazione nel vuoto o nei mezzi densi, che dal punto di vista filosofico e teologico.

I filosofi della Grecia antica erano fermamente convinti che la luce fosse una emanazione degli occhi per percepire la presenza degli oggetti, alla stregua di un senso tattile. Aristotele, in particolare, nel suo lavoro "De

Anima” sosteneva che “la luce renda i colori che sono in potenza in atto”. Nel “De Sensu” il filosofo greco indaga ulteriormente la natura della luce con un approccio scientifico, sviluppando la prima interpretazione della percezione del colore in termini di rapporto bianco/nero. Euripide, con la sua affermazione “dolce è vedere la luce”, era fermamente convinto che la luce sia parte integrante di ciò che noi vediamo: la luce è cioè non solo una condizione essenziale dell’apparire stesso, ma è un unum inscindibile dalla realtà degli oggetti stessi. La luce, come gli oggetti, non esiste per se. Questa idea ricalca da vicino la visione moderna della natura dei raggi luminosi: tutti i corpi in grado di emettere onde elettromagnetiche sono una sorgente di luce; gli oggetti e la luce sono sistemi fortemente correlati, in cui la presenza dell’uno può modificare le proprietà dell’altro.

Di tenore differente è la visione della luce legata alla tradizione religiosa. Nel medioevo lo schema aristotelico, fermamente ancorato alla spiegazione empirica dei fenomeni naturali, acquista infatti connotazioni più teologiche, attribuendo alla luce una doppia natura: lux, sorgente prima di illuminazione che rappresenta Dio stesso, e lumen, il mezzo materiale che rende possibile la percezione dei colori. La fusione di questi due concetti, lux e lumen, ebbe conseguenze evidenti anche in campo artistico, con la creazione delle vetrate gotiche con sublimi giochi di luce e colore. La luce svolge un ruolo simbolico anche nella Genesi (“Dio vide che la luce era cosa buona e separò la luce dalle tenebre”). Nella narrazione biblica la luce è essenzialmente vita, sia nel suo alternarsi di albe e tramonti al sorgere ed al declinare del Sole, sia come elemento di rappresentazione della vita oltre la morte.

La storia della luce si accompagna a quella della scoperta scientifica fin dagli albori delle scienze naturali, dalla ricerca copernicana, con le esperienze di Newton sulla natura del colore, poi con la teoria della relatività speciale di Einstein, che potremo definire una teoria della luce, ed infine con la moderna teoria quantistica dei campi, dove il modello corpuscolare della luce, costituita da un flusso di piccole particelle dette fotoni, si riconcilia con la visione ondulatoria di Maxwell.

In tutte le civiltà la luce passa da fenomeno fisico ad archetipo simbolico, come nell’Illuminismo, che vuol dire appunto rischiaramento dal buio della visione dogmatica con i mezzi della logica e della scienza. Il sole, come elemento creatore di luce, venne venerato come divinità nell’antico Egitto, nell’antica Babilonia, e perfino nella teologia indiana dei Rig-Veda si considerava la divinità creatrice Prajapati come una luce. Buddha, fondatore della religione buddista, è l’Illuminato. Infine, si attribuisce al grande Goethe il grido finale “Mehr Licht!”, “più luce!” prima di esalare l’ultimo respiro.

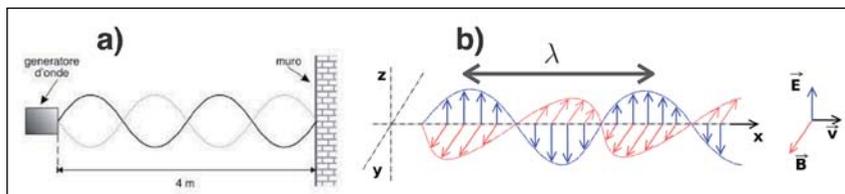


Fig. 1 - a) Corda tenuta ferma ad una estremità (presa da <https://goo.gl/images/iIGHAa>). b) Onda elettromagnetica piana polarizzata, dove E e B rappresentano il vettore campo elettrico e magnetico rispettivamente (presa da <https://goo.gl/images/iIGHAa>).

Limitandoci agli aspetti scientifici, la natura della luce è oggi nota ed è vagamente paragonabile al moto ondoso di una corda scossa ad una estremità e fissata nell'altra, come in Figura 1a). Il moto della corda è caratterizzato da una serie periodica di creste ed avvallamenti e risulta definito da due quantità: la **lunghezza d'onda**, λ , che rappresenta la distanza tra due creste successive (vedi Fig. 1), e l'**ampiezza**, che rappresenta la distanza tra il punto massimo della cresta e la retta che passa per il luogo dei punti medi dell'onda. Insieme a queste osservabili, si può introdurre una terza quantità correlata, la **frequenza**, che rappresenta il numero di oscillazioni che l'onda effettua nell'unità di tempo ed è perciò inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda.

Alla stregua della corda legata ad una estremità, la luce è un'onda elettromagnetica generata da una carica elettrica oscillante nell'intervallo di frequenze del campo del visibile, che si propaga nello spazio senza bisogno di un mezzo interposto e come tale può essere riflessa, rifratta, o trasmessa. Lo spettro delle onde elettromagnetiche che formano la **luce** visibile rappresenta l'insieme delle lunghezze d'onda a cui l'occhio umano è sensibile e che sono alla base della percezione dei colori (vedi Fig. 2). Tale parte dello spettro si situa tra i 380 e i 780 nanometri: alla frequenza maggiore corrisponde la gamma cromatica del blu-violetto, alla frequenza minore corrisponde invece la gamma dei rossi. Per dare una idea più precisa di come questi valori si rapportino con la realtà che conosciamo, basti pensare che la tecnologia informatica ha sviluppato processori per computer in grado di lavorare a frequenze di clock prossime a 3 Gigahertz (Ghz). Questo significa che un microprocessore da 3 Ghz è in grado di eseguire in un secondo circa 3 miliardi di commutazioni tra i due livelli logici "0" e "1"! Nella stessa unità di tempo – pari ad un secondo – un'onda elettromagnetica di lunghezza d'onda pari a 400 nm, che l'occhio umano percepisce come luce blu, esegue 750 bilioni di oscillazioni! Quest'onda compie cioè un numero di oscillazioni 250.000 volte superiore a quella di un processore da 3 Ghz! Con l'avvento delle nuove tecnologie quantistiche, i ricercatori stanno

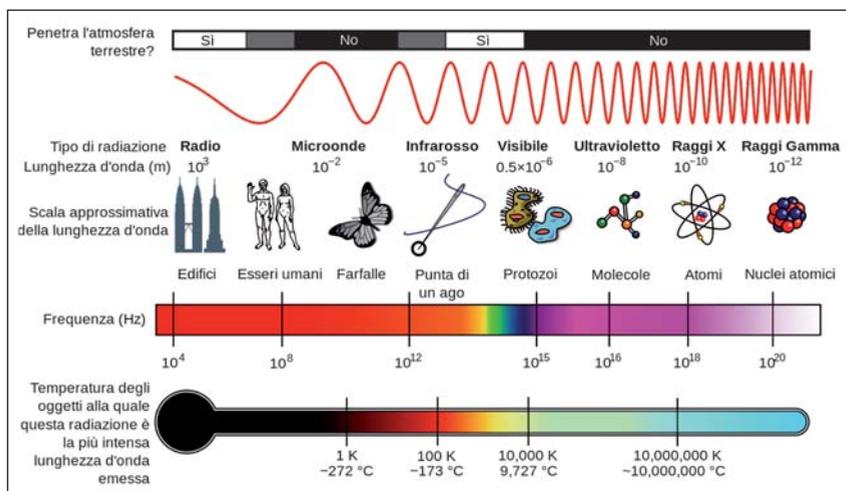


Fig. 2 - Spettro delle onde elettromagnetiche (presa da https://commons.wikimedia.org/wiki/Dispersion#/media/File:Dispersion_prism.jpg).

tentando di costruire una macchina di calcolo che utilizza la luce piuttosto che il trasporto di elettroni per eseguire i calcoli, ed è comprensibile che questo rappresenterebbe una rivoluzione epocale nell'informatica e nelle scienze computazionali.

La radiazione elettromagnetica è caratterizzata da un'onda nel campo elettrico \mathbf{E} che si propaga nello spazio ed oscilla alla stessa frequenza della carica generatrice. Con l'importante eccezione degli stati stazionari, quando una carica elettrica si muove di moto accelerato produce un campo elettrico \mathbf{E} a cui è associato un campo magnetico \mathbf{B} anch'esso oscillante, che si propaga mantenendo la sua direzione di oscillazione ortogonale al campo \mathbf{E} . Sia \mathbf{E} che \mathbf{B} oscillano perpendicolarmente alla direzione di propagazione, come in Figura 1b). Un fascio di luce è normalmente il risultato della sovrapposizione di un gran numero di onde emesse dai costituenti (atomi o molecole) della sorgente di luce. Ne consegue che il campo elettrico \mathbf{E} , mantenendosi sempre perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda, può oscillare in ogni direzione. In questo caso l'onda è non polarizzata. L'onda risulta invece polarizzata linearmente se il vettore campo elettrico \mathbf{E} oscilla sempre lungo una sola direzione, come rappresentato in Figura 1b).

Oggi sappiamo che la radiazione elettromagnetica ha una doppia natura: ondulatoria e corpuscolare. Nei fenomeni di interferenza e diffrazione il comportamento è di tipo ondulatorio, mentre in altri casi, quando la radiazione elettromagnetica ha una frequenza tale da interagire, essere assorbita e trasferire la sua energia alla materia, il comportamento è di tipo

corpuscolare. L'energia trasportata dalla radiazione elettromagnetica nella sua dimensione corpuscolare è quantizzata, cioè è concentrata in pacchetti discreti detti quanti o fotoni. L'energia E dei fotoni è proporzionale alla frequenza ν secondo la relazione $E = h\nu$, dove h è la costante di Planck ($h=6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s).

La radiazione elettromagnetica costituisce uno strumento eccezionale per indagare le proprietà della materia; cioè perturbando un sistema con impulsi elettromagnetici di diversa frequenza è possibile ottenere importanti informazioni sulle sue caratteristiche ottiche ed elettroniche ⁽¹⁾. Infatti la risposta di un sistema a tale impulso elettromagnetico è specifica per ogni sistema, per così dire, è la "firma" che lo identifica e lo caratterizza. Per questo motivo la radiazione elettromagnetica è usata nella scienza dei materiali con diversi scopi: per individuare la presenza di determinati elementi chimici in una struttura, per studiare la struttura a bande di un solido, il suo grado di cristallinità, la presenza di difetti, e lo stato di tensione di un materiale. L'insieme di queste tecniche di indagine analitica dei materiali tramite radiazione prende, non a caso, il nome di spettroscopia ⁽²⁾.

Lo spettro delle onde elettromagnetiche esistenti in natura è in realtà molto più ampio della luce e comprende l'intera gamma delle lunghezze d'onda (vedi Fig. 2): dalle onde radio, caratterizzate da grandi lunghezze d'onda (1000 m) e poco energetiche (10.000 Hz di frequenza), ai raggi gamma (0.01 Angström di lunghezza, 10^{20} Hz). Perciò, fenomeni fisici apparentemente diversissimi tra loro, come le onde radio che trasportano suoni e voci, ed i raggi X che impressionano le lastre radiografiche, hanno in realtà la stessa matrice e corrispondono tutti alla comune famiglia delle onde elettromagnetiche.

La nostra analisi si limiterà a quella parte di spettro che rientra nelle frequenze del visibile, al fine di spiegare la natura del colore ⁽³⁾. Se il fascio di luce è caratterizzato da una sola lunghezza d'onda il segnale verrà detto monocromatico ed il colore sarà puro. Generalmente avremo a che fare con luce caratterizzata dalla presenza contemporanea di più lunghezze d'onda, anzi, le sensazioni di colore più comuni alla nostra esperienza sono quelle associate a questa mescolanza di colori. Per affrontare rigorosamente una teoria del colore è necessario perciò sia descrivere i meccanismi fisici tramite cui i colori si manifestano sia sviluppare metodi per misurare il colore, in tutte le possibili miscele di stimoli monocromatici.

⁽¹⁾ TAIOLI, UMARI & DE SOUZA, 2009; UMARI, PETRENKO, TAIOLI & DE SOUZA, 2012.

⁽²⁾ TAIOLI, SIMONUCCI, CALLIARI & DAPOR, 2010.

⁽³⁾ www.inrim.it/ldm/cd_ldm/allegati/SI_intensita_lum/luce_e_colore.pdf.

Inoltre, quando pensiamo al colore di un oggetto a noi noto, tendiamo a interpretarlo come una proprietà dell'oggetto in sé. In realtà, il segnale luminoso che noi riceviamo e interpretiamo come colore non è solo il risultato del trasporto fisico della luce riflessa dagli oggetti che ci circondano, ma dipende dal tipo di luce in funzione del colore, dell'angolo e dalle proprietà riflettenti dell'oggetto stesso.

La stessa presenza intorno a noi di radiazione elettromagnetica nello spettro visibile non è sufficiente a determinare la sensazione visiva. Se per esempio dirigiamo un puntatore laser per conferenze verso il muro non si avvertirà alcuna sensazione di colore lungo il cammino del fascio luminoso, a meno di inserire sul cammino ottico un elemento dispersore, ad esempio uno sbuffo di fumo. Per avere una sensazione di colore perciò, la luce deve raggiungere il nostro occhio direttamente o mediante l'interazione con un mezzo materiale che allora ci apparirà colorato.

Inoltre, il colore percepito dell'oggetto illuminato dalla sorgente dipenderà dalla frazione della luce incidente riflessa alle singole lunghezze d'onda e ricevuta dall'osservatore. Il colore apparente di un oggetto può quindi essere alterato cambiando la distribuzione spettrale della luce che lo illumina. Se, per esempio, illuminassimo una superficie arancione con un laser He-Ne, che emette radiazione monocromatica rossa, la superficie apparirà rossa. Inoltre, il colore che percepiamo di un oggetto dipende drammaticamente non solo dalla distribuzione spettrale della sorgente usata per illuminarlo ma anche dalle proprietà di riflessione spettrale dell'oggetto nella direzione di osservazione. È quindi importante distinguere sin dall'inizio tra il colore della sorgente ed il colore apparente di un oggetto. La sorgente sarà quindi caratterizzata da una certa distribuzione spettrale (il colore intrinseco della sorgente); l'oggetto illuminato avrà a sua volta determinate proprietà di riflessione alle stesse lunghezze d'onda. In questo senso è corretto definire una "forma della luce", concetto che può suonare un po' astratto e difficile da definire e controllare tecnicamente rispetto alle forme geometriche degli oggetti. Esempi mirabili di questa sostanziale differenza tra il colore della sorgente ed il colore dell'oggetto percepito si trovano nell'arte: in una scultura come il David di Michelangelo, le sinuose forme marmoree sono esaltate dal gioco di luci e ombre sulla sua superficie. In presenza di una illuminazione perfettamente uniforme, anche un'opera d'arte così pregevole risulterebbe come una superficie marmorea dall'aspetto cromatico omogeneo, ingannando gli occhi dell'osservatore e rendendo difficile la percezione della profondità e della forme. Questo concetto di forma della luce è mirabilmente introdotto nella tecnologia ottica che prende il nome di olografia, dove l'effetto di tridimensionalità con prospettive diverse a seconda del punto di osservazione viene ricreato grazie ad un finissimo

intreccio di frange di interferenza tra raggi luminosi coerenti. L'angolo di osservazione influenza la nostra percezione di colore, con notevoli cambi di forma e colore dell'oggetto osservato!

Infine, per quanto in linea di massima lo spettro visibile sia normalmente individuato nel range tra i 380 e i 780 nm, vi sono delle differenze individuali che possono far variare leggermente l'ampiezza dello spettro visibile. Queste specificità sono legate alla conversione, che il singolo osservatore opera, dell'energia trasportata dal raggio luminoso in un segnale elettrochimico trasmesso ai neuroni. Questi ultimi trasformano la percezione della luce e dei colori in un fenomeno soggettivo e sono alla base delle difficoltà, ancora attuali, nel dare una definizione esaustiva e completa del concetto stesso di luce e colore. Infatti, rispondere alla domanda di cosa sia la luce significa non solo descriverla usando il metodo scientifico proprio della fisica, ancorato alle osservazioni di quantità oggettive, come abbiamo visto fino ad ora. Per raggiungere questo fine è necessario comprendere anche come funziona il nostro apparato visivo, l'occhio, e, da ultimo, come il nostro cervello interpreta e comprende i dati relativi ai segnali luminosi che gli pervengono come impulsi elettromagnetici dai nervi ottici situati all'interno del nostro occhio. La percezione del colore perciò non coinvolge solo l'analisi delle caratteristiche spettrali del segnale luminoso, ma anche tutti quei complicatissimi processi psico-biologici che sovrintendono alla percezione del segnale da parte dei nostri organi coinvolti, in primis occhio e cervello.

Per spiegare il fenomeno della percezione del colore in modo completo è necessario perciò tenere in conto tutti questi quattro elementi fondamentali: la luce e le sorgenti di luce, la geometria e le proprietà intrinseche dell'oggetto della visione, l'occhio, ed il cervello. Esamineremo ora separatamente questi concetti, con lo scopo di migliorare la nostra comprensione della "sensazione di colore".

SORGENTI DI LUCE

Le stelle, le lampadine o una semplice torcia elettrica emettono luce sfruttando l'energia prodotta da processi chimico-fisici che avvengono al loro interno. Queste sorgenti vengono indicate con il nome di **sorgenti di luce primaria**. Qualunque corpo, qualora sia illuminato da un fascio di luce, può agire come **sorgente secondaria** riemettendo parte della luce ricevuta nello spazio circostante. In generale, la luce secondaria potrà essere meno intensa, potrà avere una diversa direzione di propagazione, una diversa polarizzazione ed anche una diversa composizione spettrale.

Questi concetti vennero elaborati con maggior precisione e chiariti nel 1814, quando Joseph von Fraunhofer scoprì che lo spettro della luce solare non è continuo, bensì contiene numerose linee scure che si mostrano con una certa regolarità. Le righe scoperte da Fraunhofer altro non sono che linee di assorbimento di transizioni tra livelli energetici elettronici che la luce colpisce nel suo percorso dalla stella al nostro occhio. La stranezza di questi risultati riguardanti l'interazione radiazione-materia diede inizio ad una serie di indagini, dapprima sperimentali poi teoriche, per spiegare la presenza di questi **salto quantici discreti**, che spezzavano il continuum dei colori. Queste investigazioni sfociarono nella creazione di una teoria assiomatica che ancora oggi è il riferimento fondamentale per la nostra interpretazione dei fenomeni naturali, cioè la **meccanica dei quanti**.

Poiché in generale lo spazio tra la sorgente primaria e l'occhio è occupato da materia a diversi livelli di aggregazione (atomi, molecole fino alla materia condensata), lo schema visivo si può esprimere come un flusso di eventi da **sorgente primaria** – a **sorgente secondaria** (oggetto) – all'**occhio**. Con questa schema risulta chiaro che il colore del segnale luminoso che proviene da un oggetto non è una proprietà dell'oggetto in sé ma «è la sua capacità di riflettere un certo tipo di raggi più o meno copiosamente del resto» (NEWTON, *Optica*). Questo crea una distinzione tra la sorgente caratterizzata da una certa distribuzione spettrale e l'oggetto illuminato che a sua volta è dotato di specifiche proprietà di riflessione e rifrazione dipendenti dalla lunghezza d'onda del fascio incidente. Un caso emblematico è la diffusione del raggio luminoso da parte delle molecole in fase gas nell'atmosfera terrestre. Tali molecole hanno tipicamente dimensioni piuttosto ridotte (~ 1 Angstrom) se confrontate con le lunghezze d'onda della parte visibile dello spettro ($\sim 380-750$ nm). In queste condizioni, la diffusione della luce proveniente dal Sole aumenta fortemente con il diminuire della lunghezza d'onda e quindi il colore "oggettivo" del cielo diurno vira verso il violetto. Lo spostamento verso il blu è causato dalla maggiore sensibilità dei fotorecettori dell'occhio umano a lunghezze d'onda più grandi.

In questo esempio, si nota come siano presenti con funzionalità ed effetti differenti tutti gli attori che partecipano alla creazione della "sensazione di colore": sorgente di luce (Sole), mezzo (molecole gassose), occhio (recettore del segnale colorato) e cervello (elaboratore dei segnali elettrici). La presenza contemporanea di diversi fattori che contribuiscono alla percezione del colore crea, come già affermato nell'introduzione, una discrasia tra colore "oggettivo", coincidente con la distribuzione spettrale della sorgente, e colore "soggettivo", percepito nel passo finale di sintesi operato dal cervello.

LUCHE, COLORE, E GEOMETRIA DEL MEZZO

Da molti secoli la branca della scienza che si occupa di propagazione dei raggi luminosi, l'ottica, tenta di descrivere la luce mediante modelli fisici e matematici. La chiave per la comprensione dei fenomeni fisici alla base della sensazione del colore venne esplicitata per la prima volta molto chiaramente da Newton nel suo famoso trattato "Optica" (1704). Lo scienziato inglese, ricalcando la proposta fatta secoli prima dai pitagorici, basò le sue conclusioni sull'osservazione che la luce non aggira gli ostacoli ma si propaga in linea retta. Egli perciò dedusse che la radiazione luminosa doveva essere costituita da fasci di minuscole particelle che emanavano dalla sorgente luminosa e che, impattando gli oggetti, li facevano apparire illuminati. Tra la fine del diciassettesimo e l'inizio del diciottesimo secolo, Newton, ritiratosi nella sua casa di campagna per sfuggire al flagello della peste, iniziò ad occuparsi di esperimenti sul colore e raggiunse un duplice importante risultato: innanzitutto, riuscì a riprodurre la dispersione cromatica dell'arcobaleno utilizzando un prisma di cristallo attraversato da luce solare (vedi Fig. 3). In particolare, Newton identificò sette colori, perché sette era considerato un numero sacro nella tradizione biblica e perché sette erano le note musicali. In questo modo Newton dimostra che la luce solare, o luce bianca, contiene tutti i colori.

Come secondo esperimento, Newton provò ad interporre tra il prisma e lo schermo una fessura sottile dotata di un filtro colorato, selezionando un solo colore, per esempio il verde, tra la gamma di colori emergenti dal prisma. Mise poi un secondo prisma sul fascio di colore verde e vide che il fascio si allargava rimanendo verde. Se il prisma rivestisse un ruolo nella colorazione della luce, allora il raggio verde dovrebbe uscire dal secondo prisma di colore diverso. Newton così dimostrò che i colori dello spettro sono "puri" e rappresentano le varie componenti della luce che il prisma semplicemente separa.

Inoltre, al tempo di Newton erano sperimentalmente conosciute le leggi della riflessione e della rifrazione luminosa e queste rappresentavano un buon banco di prova per dimostrare la validità delle varie teorie sulla natura della luce. La legge di riflessione (vedi Fig. 4 a)) ci dice che il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie di incidenza, passante per il punto di incidenza, giacciono su uno stesso piano e che l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione.

La legge di rifrazione (vedi Fig. 4 b)) dice che il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale alla superficie di separazione fra i due mezzi, passante per il punto di incidenza, giacciono su uno stesso piano e che l'angolo di incidenza e l'angolo di rifrazione dipendono dalla velocità della luce nei

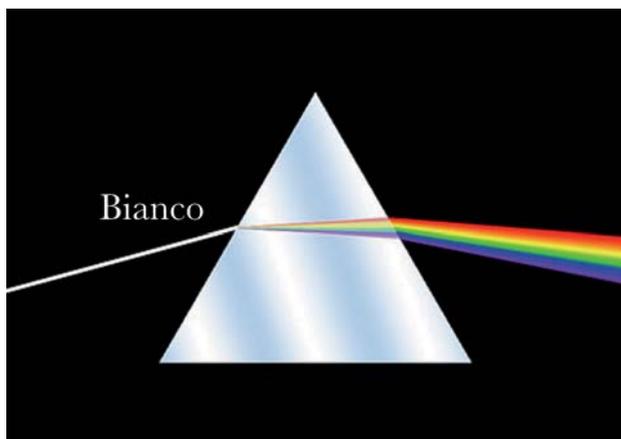


Fig. 3 - Prisma triangolare dispersivo simile a quello usato da Newton nel suo esperimento (presa da https://commons.wikimedia.org/wiki/Dispersion#/media/File:Dispersion_prism.jpg).

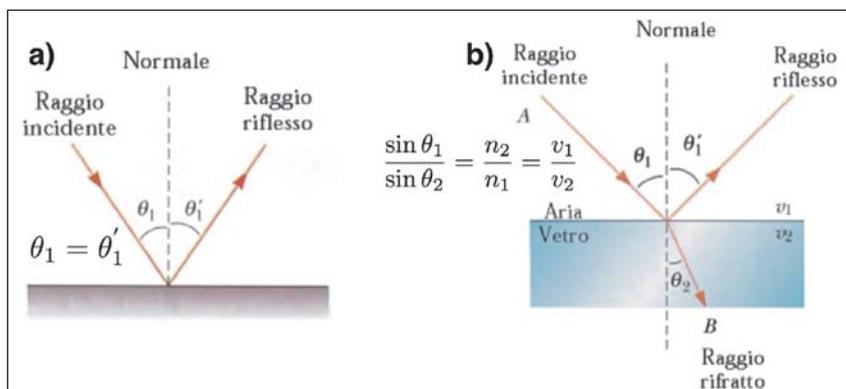


Fig. 4 - Le leggi di riflessione a) e rifrazione b) a cui è soggetto un raggio luminoso.

mezzi attraversati, indicate con v_1 e v_2 in Fig. 4b). In letteratura tale legge di rifrazione è nota come legge di Snell ed afferma che il seno dell'angolo di rifrazione è proporzionale al seno dell'angolo di incidenza in funzione della differenza di densità dei due mezzi, quindi al rapporto dell'indice di rifrazione dei due mezzi, indicati con n_1 ed n_2 in Fig. 4b). L'indice di rifrazione di un mezzo è definito come il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto c e la velocità della luce nel mezzo; perciò l'indice di rifrazione dipende dalla lunghezza d'onda della luce che si propaga nel mezzo e quindi vi dipende anche l'angolo di rifrazione che si ha quando la luce attraversa la superficie di separazione tra due mezzi. Per esempio, quando un'onda passa da un mezzo ad un altro la sua frequenza non varia; variano invece la velocità di propagazione e la lunghezza d'onda. In particolare, quando la

luce passa da un mezzo di un dato indice di rifrazione n_1 ad un mezzo con indice di rifrazione n_2 minore di n_1 , come nel caso di un raggio luminoso che si muove dall'acqua all'aria, allora si può innescare il fenomeno della riflessione totale interna. Questo fenomeno è ampiamente utilizzato nella progettazione delle fibre ottiche o guide d'onda.

Sfruttando la rifrazione sul prisma, Newton fu in grado di scomporre un raggio di luce bianco nelle varie componenti cromatiche. In particolare, i raggi con lunghezza d'onda minore, per i quali l'indice di rifrazione è maggiore, sono maggiormente rifratti (ossia l'angolo θ_2 di Fig. 4 è minore), mentre i raggi con lunghezza d'onda maggiore, per i quali l'indice di rifrazione è minore, vengono deviati di meno. Quindi la luce blu (~ 400 nm) viene rifratta di più della luce rossa (~ 650 nm) quando passa dall'aria ad un altro materiale, come una goccia d'acqua o di vapore. Questo è il motivo per cui dopo un temporale, a causa della presenza di gocce d'acqua sospese che agiscono come un prisma rifrangente, vediamo l'arcobaleno formarsi nel cielo (vedi Fig. 5).

Altri fenomeni in cui la natura ondulatoria della luce in interazione con la materia si manifesta producendo luce colorata monocromatica da luce bianca sono dati da fenomeni quali l'interferenza e la diffrazione.

La diffrazione è un meccanismo associato alla deviazione della traiettoria di propagazione delle onde (alla pari di riflessione e la rifrazione) quando si presenta un ostacolo sul loro cammino. La diffrazione è un fenomeno comune a tutti i fenomeni ondulatori, come il suono, le onde del mare o le onde radio, con effetti più rilevanti laddove la lunghezza d'onda è comparabile con quella dell'ostacolo (vedi Fig. 6).

Nel 1801 Thomas Young in un fondamentale esperimento osservò che una radiazione luminosa incidente con lunghezza d'onda comparabile alle dimensioni laterali di un foro creato in uno schermo veniva dispersa al passaggio dalla fenditura. Inoltre, se le fenditure venivano raddoppiate e disposte parallelamente, in uno schermo opaco posto a valle delle fenditure si creava una figura di interferenza caratterizzata da bande alternativamente chiare e scure (vedi Fig. 6). Young si rese subito conto che le fenditure divenivano due sorgenti lineari di luce e che l'interferenza tra due onde emergenti dai fori era costruttiva (distruttiva) a seconda che la differenza di cammino ottico percorso dalla radiazione al di là dello schermo con la doppia fenditura fosse pari ad un multiplo pari (dispari) di mezza lunghezza d'onda (vedi Fig. 6). Tale differenza di cammino è pari a $d \times \sin \theta$, dove d è la distanza tra le due fenditure e θ l'angolo che formano due rette che congiungono i fori con un certo punto P sullo schermo. In queste condizioni, la dispersione della luce si ottiene poichè l'interferenza costruttiva avviene in luoghi diversi a seconda della lunghezza d'onda, perciò colori

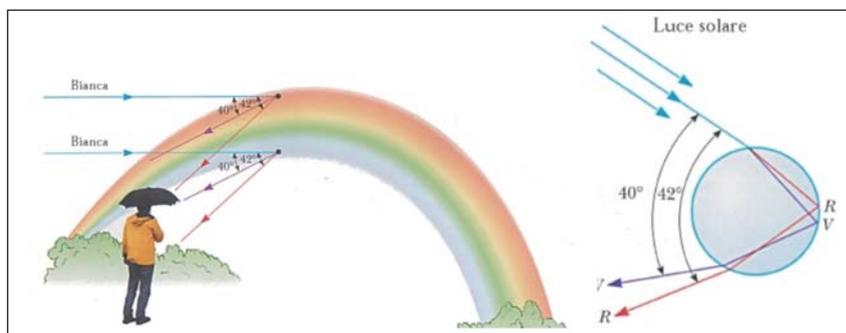


Fig. 5 - Meccanismo di dispersione della luce nel cielo in presenza di umidità (presa da <https://goo.gl/images/iIGHAa>).

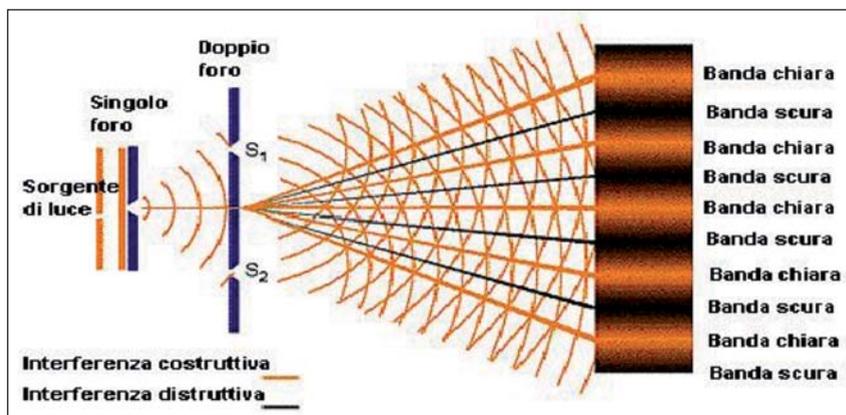


Fig. 6 - Diffrazione da singola fenditura ed interferenza da doppia fenditura (presa da <https://goo.gl/images/iIGHAa>).

diversi appaiono in luoghi diversi. Questo fenomeno interferenziale si manifesta anche in pellicole sottili, dove l'interferenza fra la luce riflessa dalle due superfici della pellicola crea diversi colori, come nelle bolle di sapone, o nelle pellicole di olio sulle pozzanghere. In modo simile, i reticoli di diffrazione sfruttano l'interferenza fra diversi raggi luminosi per disperdere la luce. Per esempio le tracce incise sulla superficie di un CD o di un DVD, la corazza di un maggiolino, o le ali di una farfalla sono esempio di reticoli di diffrazione che creano il familiare effetto arcobaleno. Tutti questi oggetti sono caratterizzati da numerose incisioni equispaziate, fitte e parallele, in modo che la luce venga riflessa e le onde, generate dalle varie micro-fenditure, interferiscano costruttivamente o distruttivamente a seconda del cammino ottico dell'onda.

L'OCCHIO UMANO

Come già sottolineato nelle sezioni precedenti, la sensazione di colore non può essere definita solo sulla base di fattori fisici oggettivi, cioè le caratteristiche spettrali della sorgente luminosa e le qualità riflettenti dell'oggetto, ma è necessario conoscere anche il comportamento del sistema visivo dell'osservatore.

L'occhio umano è uno strumento ottico relativamente semplice (vedi Fig. 7) con una struttura comune in tutti i vertebrati; da un punto di vista evolutivo questa sua semplicità, anche in confronto ad altre specie animali, può essere spiegata con il fatto che tipicamente un cervello dotato di capacità di elaborazione complesse si accompagna ad una struttura oculare semplice.

L'occhio è dotato di una lente, il **cristallino**, che ha il compito della messa a fuoco delle immagini alle diverse distanze e si presenta come una struttura multistrato simile ad una cipolla. La luce penetra nell'occhio attraverso la **pupilla** situata nella parte anteriore dell'occhio. La pupilla, che riveste un ruolo analogo al diaframma in una macchina fotografica, è un pertugio con una dimensione diametrale controllabile da un muscolo chiamato **iride**. Essa appare **nera perché** la maggior parte della luce che entra non riesce più ad uscire, come avviene in una camera oscura dotata di un piccolo foro. Ricorderemo tutti di aver visto fotografie di persone le cui pupille appaiono rosse. Questo effetto, ingigantito dall'uso del flash, qualora non si prendano i dovuti accorgimenti, si spiega facilmente con il fatto che la pupilla non riesca a socchiudersi velocemente sotto lo stimolo dell'iride lasciando tempo alla luce del flash di riflettersi sulla retina e riemergere infine dalla pupilla. Il colore rosso è legato alla forte vascolarizzazione della retina. Questo principio viene utilizzato anche nell'oftalmoscopio, inventato nel 1850 da Helmholtz, tramite il quale si può indagare lo stato di salute della nostra retina durante le visite oculistiche.

L'iride controlla dunque la **profondità di campo** e l'**intensità del segnale** luminoso, dilatandosi o contraendosi involontariamente a seconda che la luce sia fioca o brillante. In questo ruolo è aiutata da un ulteriore muscolo interno adeso al **corpo ciliare**, il **muscolo ciliare**, che ha il compito di accomodamento della visione degli oggetti più vicini e lontani. L'accomodamento della visione per la messa a fuoco degli oggetti a diverse distanze è aiutato anche dalla **zonula**, un sistema di fibre che è preposto alla variazione della curvatura del cristallino. L'occhio è poi dotato di altri sei muscoli esterni che sono deputati a trattenerlo in orbita, ruotarlo e dirigerlo verso la sorgente di luce.

La **retina** è una sottile membrana simile ad una ragnatela che riveste la parete interna dell'occhio e che, volendo mantenere l'analogia con la

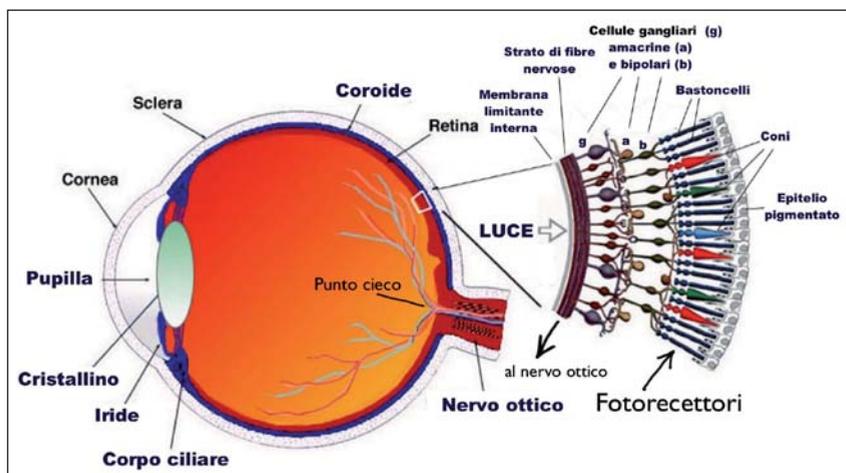


Fig. 7 - Rappresentazione schematica dell'occhio umano (presa da http://storiediscienza.altervista.org/blog/un-errore-progettazione-nellochio-umano/?doing_wp_cron=1489424251.7480189800262451171875).

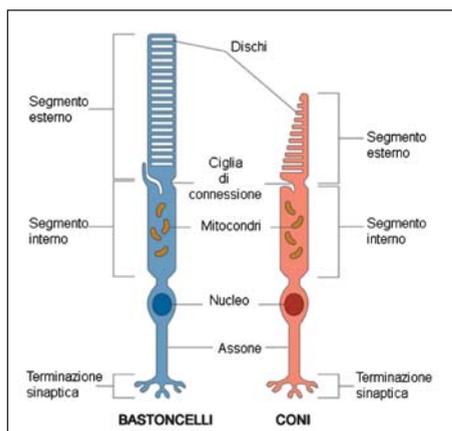


Fig. 8 - I fotorecettori presenti sulla retina dell'occhio umano: i bastoncelli della visione scotopica ed i coni responsabili della visione fotopica (presa da http://storiediscienza.altervista.org/blog/un-errore-progettazione-nellochio-umano/?doing_wp_cron=1489424251.7480189800262451171875).

macchina fotografica, svolge il ruolo della pellicola. Come si vede nell'ingrandimento a destra di Fig. 7, la retina è ricoperta in modo non uniforme da circa 120 milioni di fotorecettori, collegati al cervello dal **nervo ottico**, un fascio di circa un milione di fibre nervose, che hanno il compito di trasmettere le informazioni visive ed interconnettere la retina al cervello. Questi elementi fotosensibili, curiosamente sistemati dal lato della retina opposto a quello di incidenza della luce sono di due tipi: i **coni**, dalla forma sottile e lunghezza limitata, che sono di tre tipi e sono responsabili della visione dei colori in luce diurna o visione **fotopica**, e i **bastoncelli**, che sono di

un unico tipo, non permettono la visione dei colori, e sono utilizzati per la visione notturna o **scotopica**. I fotorecettori, rappresentati in Figura 8, presentano in successione un segmento esterno ed un segmento interno in rapporto con le cellule dell'epitelio pigmentato, una fibra esterna, il nucleo, un assone (o fibra interna) ed una terminazione sinaptica. I pigmenti che reagiscono alla luce sono contenuti nei dischi. La densità dei coni (160.000/mm², in totale 6.5 milioni per ciascun occhio), è massima al centro della retina, chiamata **fovea**, laddove è pure massima la sensibilità visiva.

La visione umana, in conseguenza di questa densità non uniforme, è di tipo attivo: per vedere bene un oggetto dobbiamo centrarlo con lo sguardo. Ciascuna delle tre tipologie di coni è dotata di una specifica sensibilità spettrale a banda larga, perciò non monocromatica bensì parzialmente sovrapposta con le altre (vedi Fig. 9). In particolare, nei coni vi sono tre distinti sistemi sensibili alla luce, con sensibilità massima in tre diverse regioni dello spettro (vedi Fig. 9): una nel rosso, una nel verde e una nel blu. Tale caratteristica spettrale a banda larga dei coni potrebbe far pensare che essi siano poco adatti a determinare le caratteristiche del colore. Vedremo come la natura invece ha ovviato alla presenza di tre sole tipologie di coni. Quando la radiazione elettromagnetica arriva sulla retina, ognuno di questi tre sistemi manda un impulso al cervello. Il pigmento fotosensibile attivo nella ricezione della luce di diverse lunghezze d'onda è la iodopsina, che, quando colpita, inizia una serie di reazioni chimiche e stimolazioni nervose il cui epilogo è la percezione dei colori. L'impulso nervoso generato dalla iodopsina dipende sia dalla sensibilità spettrale del fotorecettore che dalla distribuzione di energia dello stimolo; la generazione dei tre impulsi a seguito dell'interazione con la luce rappresenta l'inizio del percorso di stimolo fisiologico che produce la sensazione di colore. Alterazioni ereditarie o danneggiamento di questi fotorecettori sono una delle possibili cause del daltonismo, una malattia che impedisce la distinzione dei colori.

A questo punto della narrazione è lecito domandarsi se la presenza di un solo tipo di coni sarebbe sufficiente a spiegare la capacità della nostra visione di discriminare intensità e colori della luce. La risposta a questa domanda è negativa. Per dimostrarlo, assumeremo che la **sensibilità** di un ipotetico unico tipo di fotorecettori a luce monocromatica sia simile, in funzione della lunghezza d'onda, a quella riprodotta in Fig. 10 ⁽⁴⁾. Nell'esempio, alla lunghezza d'onda A_1 tale recettore fotosensibile presenta la massima sensibilità (e, quindi, stimolazione) alla visione di un colore

⁽⁴⁾ www.maffepantaleoni.it/L'immagine%20e%20la%20Luce.pdf.

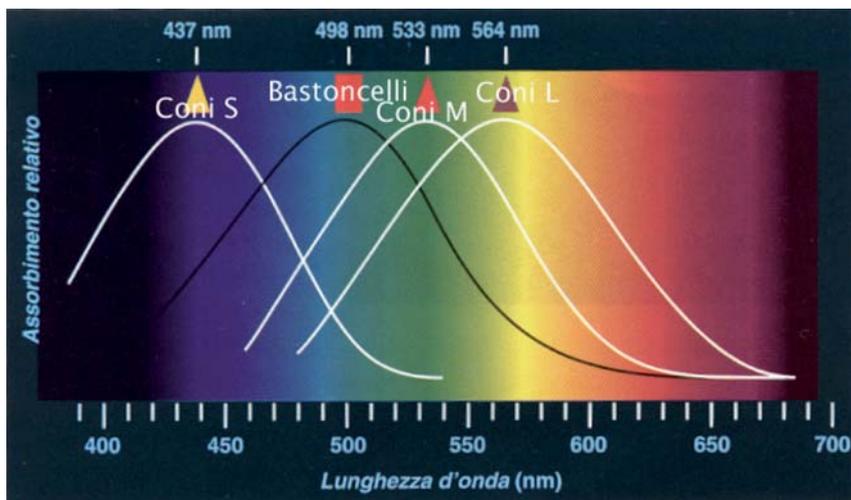


Fig. 9 - Bande di assorbimento spettrale nei coni e nei bastoncelli (presa da www.inrim.it/ldm/cd_ldm/allegati/SI_intensita_lum/luce_e_colore.pdf).

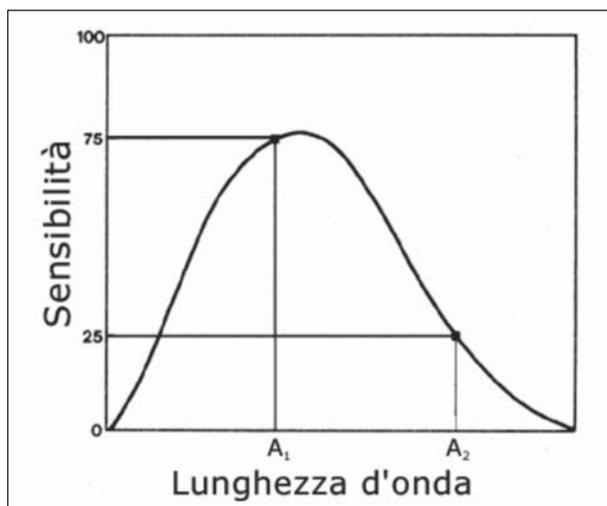


Fig. 10 - Curva di risposta dei bastoncelli a luce di differente lunghezza d'onda (presa da http://storiedisienza.altervista.org/blog/un-errore-progettazione-nellochio-umano/?doing_wp_cron=1489424251.7480189800262451171875).

monocromatico, caratterizzato da una data intensità luminosa. Allo stesso modo, si può ipotizzare una seconda radiazione monocromatica A_2 , che ha la medesima intensità della radiazione A_1 ma lunghezza d'onda differente. Essa produce una stimolazione tre volte meno intensa poiché il recettore risulta circa tre volte meno sensibile. Inoltre, sappiamo dalla fisiologia dell'occhio che l'informazione sulla lunghezza d'onda viene persa sulla retina, venendo sostituita dalla percezione dell'intensità dello stimolo. Con

una curva di sensibilità del tipo in Fig. 10 sarebbe possibile perciò eguagliare l'entità della stimolazione esercitata dalla radiazione A_1 a quella esercitata dalla radiazione A_2 aumentando di tre volte l'intensità della radiazione A_2 . In questo modo, si avrebbe l'assurdo che le percezioni visive suscitate da A_1 ed A_2 sarebbero indistinguibili, ovvero non si avrebbe più la possibilità di discriminare il colore, poiché vedremmo come identiche due radiazioni monocromatiche dotate invece di differenti lunghezze d'onda.

In realtà, il meccanismo appena descritto è simile a ciò che accade nella visione scotopica dei bastoncelli: di tali recettori esiste infatti un solo tipo, che non è in grado, per i motivi appena descritti, di conservare l'informazione sulle differenze di lunghezza d'onda ma solo quella relativa alle variazioni di intensità luminosa.

I bastoncelli sono più numerosi dei coni e pari a circa 100-150 milioni per ciascun occhio. I bastoncelli sono molto più sensibili dei coni alla stimolazione da parte della luce, caratteristica che permette all'occhio di vedere anche in condizioni di scarsa luminosità, laddove i coni faticano a fornire informazioni utili al cervello. Sperimentiamo l'attività dei bastoncelli entrando in una stanza buia, quando attraversiamo uno sporadico momento di cecità prima di assuefarci all'oscurità: i bastoncelli entrano progressivamente in funzione, consentendoci di vedere sufficientemente bene per deambulare senza problemi.

Per avere allo stesso tempo discriminazione dell'intensità luminosa e del colore abbiamo bisogno di almeno due tipi differenti di recettori sensibili al colore. Con questi due tipi di recettori diventa possibile, ad esempio, eguagliare la percezione visiva dipendente da una singola radiazione monocromatica alla percezione visiva dipendente dalla miscela di due radiazioni monocromatiche di differente lunghezza d'onda.

LA SINTESI ADDITIVA E SOTTRATTIVA: TEORIA DELLA TRICROMIA

A causa della sensibilità dei ricettori a tre regioni spettrali differenti, si può immaginare che l'intera gamma di colori possa essere ottenuta tramite la **sintesi additiva** dei tre **colori primari**. In particolare, la mescolanza di **due** colori primari origina i seguenti **colori secondari** della sintesi additiva (vedi Fig. 11a): il giallo (rosso + verde), il ciano (verde + blu) e il magenta (blu + rosso). La sovrapposizione di tutti i colori primari origina il bianco, come intuibile dalla scomposizione di una fascio di luce naturale in tutte le frequenze visibili operata da Newton con il suo prisma triangolare; la mancanza di qualsiasi colore fornisce il nero.

A questo proposito, Thomas Young nel 1801, per primo, elaborò questi

concetti che portarono all'enunciazione della teoria tricromatica (o RGB come la si denomina oggi riferendosi ai tre colori fondamentali rosso, giallo e blu): «Ora, poiché è praticamente impossibile supporre che ciascun punto sensibile della retina contenga un numero infinito di particelle, ciascuna capace di vibrare perfettamente all'unisono con ogni possibile andamento ondulatorio, diventa necessario ipotizzare che il numero sia limitato, per esempio ai colori principali: rosso, giallo e blu...». A parte il piccolo errore di sostituire il giallo al verde come colore primario, l'intuizione di Young che un dato colore possa essere caratterizzato da un numero molto minore di variabili (tre, in accordo alla sensibilità cromatica dei nostri fotorecettori) rispetto al numero di variabili che caratterizzano dal punto di vista fisico un segnale luminoso era felicemente corretta. Per la prima volta si affermava il concetto che la spiegazione della percezione del colore andava ricercata «non già nella natura della luce ma in quella dell'uomo...».

L'importanza del lavoro di Young venne riconosciuta anche da J.C. Maxwell, che nel 1871 scrive: «[...] Può sembrare quasi una banalità affermare che il colore è una sensazione; e tuttavia Young, riconoscendo con onestà questa verità elementare, ha posto le basi della prima seria teoria sulla visione cromatica».

La conclusione che trasse Young è che la percezione di uno specifico colore non sempre significa che al nostro occhio stia arrivando la sola porzione di luce dello spettro associata a quel particolare colore. Questo fenomeno è verificabile, per esempio, con un laser HeNe che emetta luce rossa monocromatica a 632 nm, e il cui spettro sarà composto da un'unica strettissima banda di color rosso. Se la luce rossa, invece, viene ottenuta diversamente, per esempio facendo passare luce bianca attraverso un filtro rosso, allora, benché la nostra percezione del colore risulterà la stessa, lo spettro non sarà costituito però dalla sola frequenza del rosso come nel caso della luce laser. Il risultato di questo complicato processo di elaborazione dei segnali generati dai tre diversi tipi di recettori dell'occhio, perciò, è il fatto che fasci di luce di diversa composizione spettrale che colpiscono l'occhio possano dare luogo ad una medesima sensazione di colore.

Ancora una volta, quanto detto, è la diretta conseguenza del fatto che la percezione del colore è sintetica: una luce rossa ed una blu che colpiscono la retina in un medesimo punto risulteranno nella percezione del colore viola; in questo caso, l'informazione della lunghezza d'onda del rosso e del blu viene persa a contatto con il fotorecettore dei coni. Questa caratteristica della percezione visiva è profondamente differente dalla percezione uditiva. Quando ascoltiamo una sinfonia, un orecchio attento è infatti in grado di scomporre l'accordo musicale nelle sue componenti primarie, le 7 note musicali. L'occhio, diversamente, non è capace di scomporre una stimo-

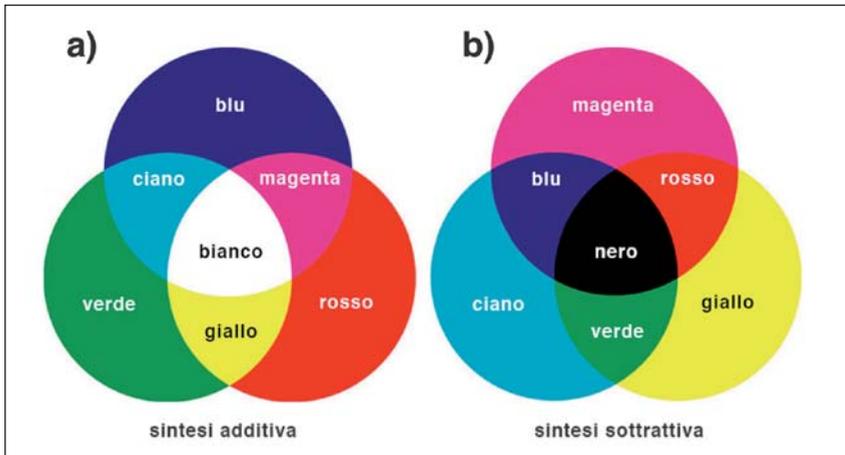


Fig. 11 - a) Sintesi additiva, alla base del modello RGB di luce nei con. b) Sintesi sottrattiva (presa da <https://bazardelpittore.wordpress.com/teoria-del-colore/>).

lazione luminosa in singole frequenze componenti a causa della presenza di soli tre tipi di con.

Mediante la sintesi additiva delle tre radiazioni cromatiche primarie (convenzionalmente scelte come blu, verde e rosso ma potrebbero essere anche di altro colore) è possibile riprodurre una gamma estesa di colori secondari (vedi Fig. 11a)). Questo meccanismo di sovrapposizione è alla base della tricromia della visione diurna, ma non completa tutta la gamma dei colori disponibili. Altre combinazioni di colori si possono ottenere semplicemente variando l'intensità di ciascun fascio. Infatti, l'apparato oculare umano ovvia alla perdita di informazione sulle diverse lunghezze d'onda che compongono il colore recepito, sostituendo tale informazione con una misura dell'eccitazione derivante dall'impatto della luce sulla retina. Tale impatto suscita una sollecitazione proporzionale sia all'intensità della luce incidente che alla sensibilità del recettore alla particolare zona dello spettro a cui appartiene tale radiazione luminosa. Su questo principio si basa, per esempio, la progettazione degli schermi a colori dei televisori o dei computer.

In altre parole, l'esperimento di Young stabilì una volta per sempre che è possibile individuare tre sorgenti primarie tali che, se miscelate in proporzioni opportune, permettono di uguagliare in modo univoco il colore percepito di una qualunque sorgente arbitraria. Le combinazioni possono essere le più eterogenee, mescolando colori che nello spettro sono distanti. Per esempio un colore giallo può essere ottenuto proiettando una luce rossa ed una verde su uno schermo bianco.

È dunque naturale pensare ad un sistema di misura del colore che si basi su tre sorgenti o tre rivelatori di riferimento. La colorimetria è la scienza che ha come obiettivo la misura del colore. Il principio su cui si basa riprende concetti degli spazi vettoriali in algebra lineare.

Si potrebbe infatti pensare che i tre colori puri, rosso, verde e blu costituiscano una base ortogonale per lo spazio dei colori e che mediante una combinazione lineare di essi si possa formare la tavola dei colori. I colori di base non sono necessariamente colori spettrali puri ma vanno scelti in modo che, sommati, siano in grado di restituire una sensazione di luce bianca e vengono detti primari. Di solito vengono scelti il rosso, il verde ed il blu, perché con essi si ottiene una varietà molto ampia di colori, tuttavia la scelta dei primari non è unica. In termini matematici, indicando con D, E e F tre diverse distribuzioni spettrali mutualmente indipendenti (ossia che nessuno di essi possa essere ottenibile da una miscela degli altri due) si può formare la base di un sistema tricromatico. Essi formano un insieme ortogonale di versori. Sarà allora possibile uguagliare un qualsiasi stimolo di colore C ad una combinazione lineare dei tre stimoli primari:

$$C = d D + e E + f F$$

dove i coefficienti d, e, ed f giocano il ruolo di coordinate del punto C nello spazio tridimensionale scelto. Grazie a questa relazione sarà possibile misurare il colore, specificando lo stimolo di colore per mezzo di tre coordinate tricromatiche. Miscelando questi tre colori di base, si possono ottenere delle sensazioni cromatiche equivalenti a molti altri colori. In Fig. 12, riportiamo il diagramma cromatico che mostra tutte le varie combinazioni dei colori ottenibili dai versori (o colori) di base. Sul perimetro curvo della figura si trovano i colori spettrali puri.

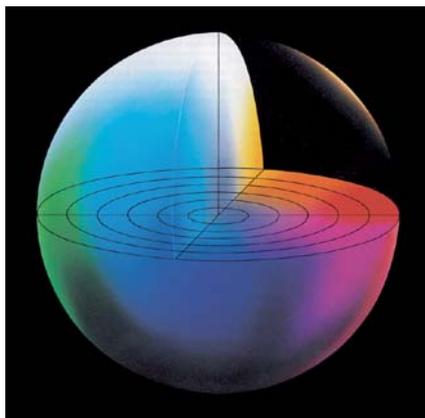


Fig. 12 - Diagramma colorimetro tridimensionale (presa da <https://bazardelpittore.wordpress.com/teoria-del-colore/>).

A conferma della teoria tricromatica della visione e del processo di sintesi additiva, prendiamo esempio dall'arte bizantina; in particolare, esaminiamo il mosaico di *Gesù di Nazareth come Christus Imperator*, un manufatto del VI secolo che si trova in San Vitale a Ravenna (vedi Fig. 13). Le tessere di piccola dimensione di colori differenti l'un dall'altra presenti sul mosaico sono chiaramente distinguibili a distanza ravvicinata (vedi pannello di sinistra di Fig. 13), ma confuse alla distanza da cui si osserva normalmente l'opera (vedi pannello di destra di Fig. 13). Questo accade in conseguenza della sintesi additiva dei colori sulla retina dell'occhio delle singole tessere aventi dimensioni tali da dar luogo a questo meccanismo alla distanza dalla quale il mosaico è progettato per essere visto.

La sintesi additiva dei singoli colori e lo studio scientifico dei fenomeni legati alla luce ed alla visione influenzò anche lo sviluppo di nuove tecniche pittoriche nella prima metà dell'Ottocento, con tecniche del tutto simili a quelle usate nei mosaici ravennati, come il Puntinismo (*Pointillisme*). Rivelando l'interesse scientifico di artisti come George Seurat per la ricerca di nuove forme d'arte, la tecnica del *pointillisme* sfruttava, sulla scorta delle acquisizioni scientifiche del tempo, quella che si riteneva essere la scomposizione ed acquisizione "naturale" dei colori a livello retinico. Secondo tale principio, la retina dell'osservatore diviene soggetto attivo e l'occhio dell'osservatore ricomponete tonalità e sfumature derivate dalla pittura "per punti". Nel *Pointillisme*, come si vede nel pannello di sinistra della Fig. 14, l'opera viene frammentata in punti di colore puro vicinissimi tra loro al punto da essere fuse dall'occhio, alla stregua dei mosaici bizantini. I colori del quadro risultano così da un'integrazione visiva dei colori puri delle macchie nell'occhio dell'osservatore. Georges Seurat denominò "peinture optique" questa tecnica, con un chiaro richiamo alle basi scientifiche della percezione del colore della sua epoca.

Qualora invece i punti, come nel pannello di destra di Fig. 14, siano più grandi ed isolati sulla tela dell'artista allora l'occhio non è più in grado di ricomporre i colori sulla retina e si perde dunque la mescolanza di colori-luce.

La maggior parte delle opere pittoriche si basa però su di un processo opposto alla sintesi additiva, la cosiddetta sintesi sottrattiva dei colori (vedi Fig. 11b)). Invece di sovrapporre fasci di luce a colori primari per ottenere colori secondari, si potrebbe pensare di far passare un fascio di luce bianca attraverso una combinazione a due a due di filtri di colori secondari (giallo + ciano = verde; ciano + magenta = blu; magenta + giallo = rosso). In questo modo si realizza la sintesi sottrattiva. Il giallo, il ciano e il magenta sono colori primari della sintesi sottrattiva. Per ottenere in pratica il meccanismo della sintesi sottrattiva, basti pensare ad un raggio luminoso bianco



Fig. 13 - Sintesi additiva in un mosaico di Ravenna: nel pannello a sinistra, ripreso da vicino, il contributo delle singole tessere è visibile. Nel pannello a destra il meccanismo della sintesi additiva favorisce la visione di insieme del mosaico.

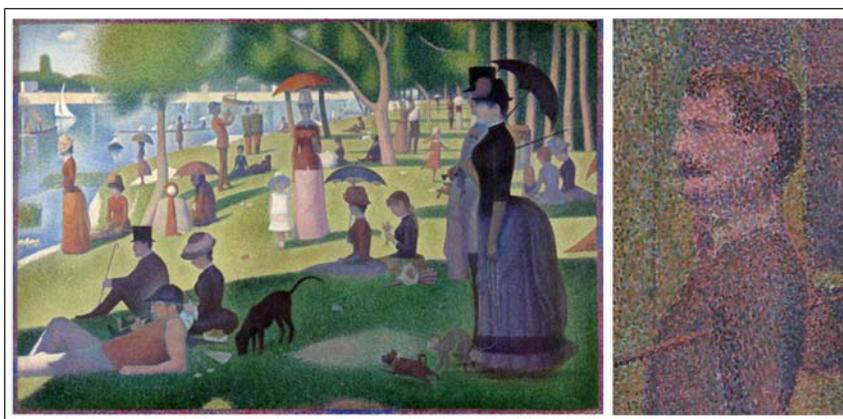


Fig. 14 - Georges-Pierre Seurat. Sinistra: *Una domenica pomeriggio all'isola della Grande-Jatte* (1896). Destra: *Parata del circo* (1899).

riflesso da superfici colorate; un oggetto che percepiamo giallo deriva da una sovrapposizione di colori verde e rosso riflessi dalla superficie, che invece assorbe il blu. I colori primari della sintesi sottrattiva riflettono due delle componenti e ne assorbono la terza; sovrapponendoli si aumenta la parte assorbita a scapito di quella riflessa, la sovrapposizione di tutte e tre origina il nero.

Esempi di sintesi sottrattiva nell'arte si ottengono qualora luce solare venga filtrata attraverso vetri colorati, che lasciano passare le radiazioni di

solo una parte dello spettro. Una delle più famose vetrate della cattedrale Notre-Dame de Chartres, la cosiddetta Notre-Dame de la Belle Verrière (Nostra Signora della Bella Vetrata), che rappresenta una Madonna col bambino circondata da angeli, realizzata verso il 1180, è esemplare per l'applicazione di questa tecnica (vedi Fig. 15).

Quando la radiazione solare filtra attraverso le vetrate, si possono ammirare luci di colore diverso, giallo se il vetro lascia passare le componenti verde e rossa dello spettro, turchese se lascia passare le componenti verde e blu, porpora se il vetro lascia passare le componenti blu e rossa. Dove due filtri si sovrappongono passerà un solo colore: rosso, verde, e blu, rispettivamente. Se si sovrappongono tutti non viene trasmessa nessuna radiazione e il vetro si vede nero.

Infine, analizzata nel dettaglio la struttura dell'occhio e del colore, come si crea un'immagine? Il meccanismo della visione inizia nel nostro occhio, a partire da due immagini distorte, sfocate e rovesciate sulla retina. Il meccanismo più semplice per spiegare la creazione dell'immagine nell'occhio è il **foro stenopeico** (vedi pannello a sinistra di Fig. 16): illuminando un oggetto, se ne ottiene un'immagine ribaltata su di un piano, interponendo uno schermo con un foro molto piccolo, come nella camera oscura per la riproduzione di immagini ideata dall'arabo Al Hazen intorno all'anno 1000 d.C.

Un altro approccio per la creazioni di immagini è la tecnica che si basa sulla rifrazione di un fascio di luce, come visto precedentemente. Quando il raggio luminoso passa da un mezzo meno denso, come l'aria, ad uno più denso, come il vetro, il fascio viene deflesso a formare un'immagine ad una certa distanza dalla superficie rifrangente: lo stesso principio su cui è basata la costruzioni delle lenti correttive, inventate sempre da Al Hazen.

Furono dapprima Giovanni Battista della Porta nel suo *Magia Naturale* (1558) ed in seguito Daniele Barbaro (1568) a capire che il mondo è visto dal cervello tramite la creazione di un'immagine in modo del tutto simile a quella ricreata in una camera oscura, con l'aggiunta di una lente. Tale lente, come già visto, è il cristallino, responsabile dell'accomodamento della messa a fuoco delle immagini alle diverse distanze. La massima deviazione del segnale luminoso per formare l'immagine avviene sulla superficie esterna della cornea, in quanto l'interfaccia aria/cornea è caratterizzata dalla massima differenza di indice di rifrazione. L'occhio è dunque un sistema ottico che può essere corretto secondo le leggi dell'ottica, con opportune lenti correttive, come riportato nel pannello di destra di Fig. 16 per la correzione della miopia, dove lenti divergenti o convesse spostano il segnale, erroneamente formato prima della retina, sulla retina stessa. Gli occhiali più antichi risalgono al X secolo, probabilmente prodotti a Venezia nelle

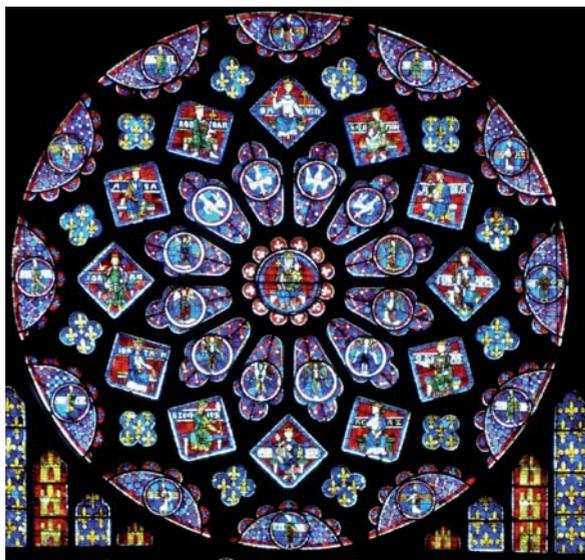


Fig. 15 - Notre-Dame de la Belle Verrière.

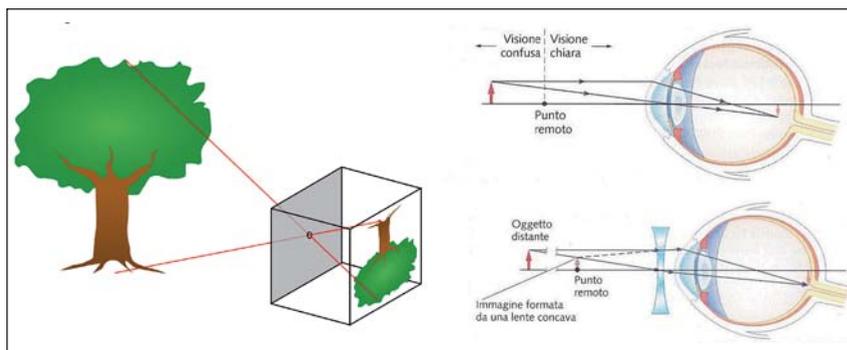


Fig. 16 - Funzionamento del foro stenopeico (sinistra) e della lente per correggere la miopia (destra) (prese da <https://it.wikipedia.org/wiki/Stenoscopia>).

officine dei mastri vetrai, con la ideazione delle prime lenti convesse per la correzione della miopia, mentre solo nel XVI secolo verranno prodotte le prime lenti concave per la correzione della ipermetropia. Inutile dire che le lenti rappresentano un'invenzione fondamentale nel progresso umano in quanto hanno determinato l'aumento della vita attiva senza richiedere consumo di energia e con una manutenzione ridotta al minimo.

IL CERVELLO

Oltre ai fenomeni fin qui analizzati, esistono dei meccanismi, quali i colori prodotti per contrasto dai pittori divisionisti, che non rientrano appieno nella modellazione della percezione della visione tramite la sintesi additiva e sottrattiva. Nel fenomeno di contrasto cromatico, il colore di un oggetto viene a modificarsi qualora sia visto su di uno sfondo neutro (bianco, grigio o nero) oppure su uno sfondo colorato. Questo meccanismo era già noto a Leonardo.

In Fig. 17 riportiamo un caso emblematico del meccanismo di formazione del colore per contrasto: si nota come il colore dello sfondo influenzi il colore del quadrato centrale che vira verso il colore complementare allo sfondo stesso. In particolare, lo stesso giallo appare verdastro se circondato da uno sfondo rosso e rossastro se circondato dal verde.

In Fig. 18 riportiamo invece un altro caso complementare a quello precedente, il meccanismo di formazione del colore per assimilazione. Il colore rosso della trama fitta appare più arancione se sovrapposto al verde e più azzurro se sovrapposto al blu.

I meccanismi di contrasto ed assimilazione ci suggeriscono che una descrizione organica della percezione del colore non si esaurisca solo sulla base della tricromia di Young e che, di conseguenza, l'esistenza di tre tipi di cono non determini tutti gli aspetti della visione del colore. Per una descrizione completa della sensazione di colore occorre specificare che, l'informazione proveniente dai tre tipi di cono non si mantiene separata lungo le vie neurali che collegano la retina al cervello; già nella retina i segnali provenienti da uno o più cono confluiscono su singole cellule nervose, sommandone gli effetti, oppure annullandosi a vicenda. La trasmissione della percezione del colore dalla retina al cervello è un meccanismo fisiologico alquanto complicato e non ancora completamente compreso. Perciò in questo lavoro ci limiteremo a descriverne le peculiarità per sommi capi: la sua descrizione rigorosa ci porterebbe lontano dagli scopi di questo articolo.

L'occhio è in tutto e per tutto un'appendice dell'encefalo, sia per derivazione embriologica, sia per una serie di correlazioni funzionali, come la capacità integrativa propria delle strutture nervose, che si ritrova a livello della retina (vedi Fig. 19). I fotorecettori (i bastoncelli ed i cono) trasformano in impulsi elettrici le informazioni ricevute dalle reazioni fotochimiche che vengono attivate dalla radiazione luminosa e inviano questi segnali ai **neuroni retinici** – le cellule *orizzontali*, *bipolari*, *amacrine* e *ganglionari* – che sono variamente connessi fra di loro ed effettuano una prima elaborazione del segnale visivo. In particolare, ancorati alla retina ci sono due tipi di cellule gangliari, che si differenziano per forma e per funzione.

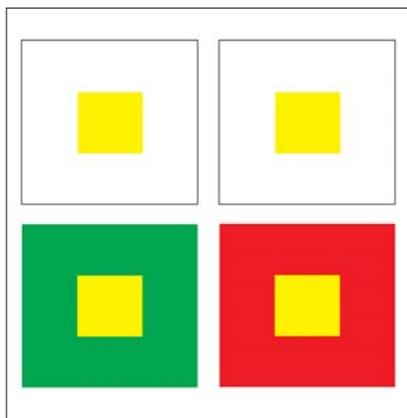


Fig. 17 - Funzionamento del colore per contrasto (presa da www.inrim.it/l dm/cd_ldm/allegati/SI_intensita_lum/luce_e_colore.pdf).



Fig. 18 - Funzionamento del meccanismo del colore per assimilazione (presa da www.inrim.it/l dm/cd_ldm/allegati/SI_intensita_lum/luce_e_colore.pdf).

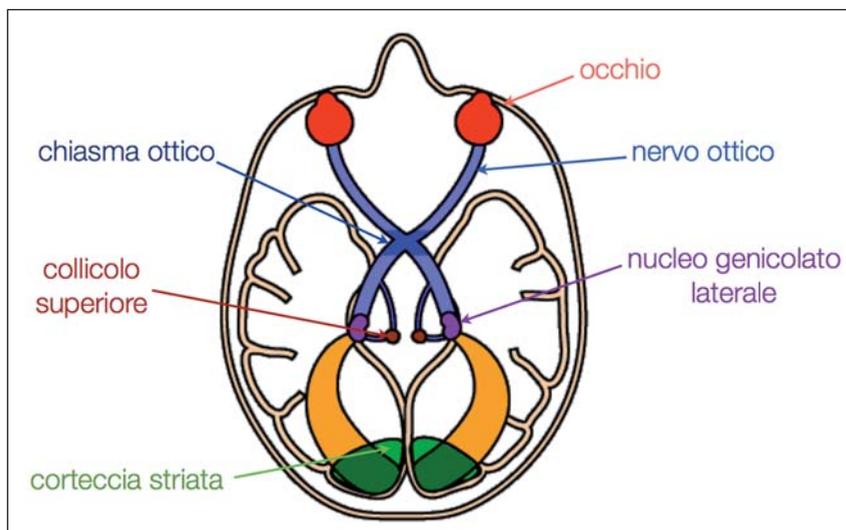


Fig. 19 - Dall'occhio al cervello: fondamenti fisiologici della visione.

Il primo tipo trasmette informazione sull'intensità luminosa dello stimolo visivo in termini di rapporto chiaro/scuro, mentre il secondo tipo trasmette l'informazione cromatica vera e propria. Gli assoni delle cellule gangliari si riuniscono in modo da formare il *nervo ottico*, un cavo che conduce l'informazione visiva fuori dalla retina fino ai centri superiori, dapprima

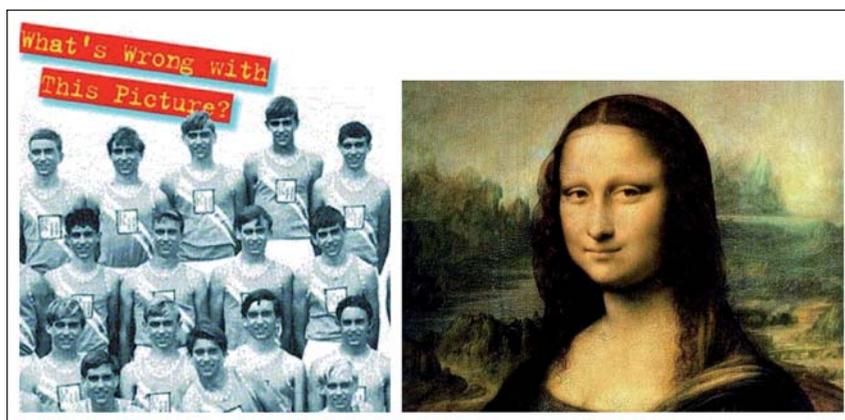


Fig. 20 - L'inganno della mente: ciò che il cervello percepisce non è ciò che l'occhio vede. a) I ragazzi in figura sono gli stessi, solo con un differente taglio di capelli (presa da www.exploratorium.edu/exhibits/wig/whatswrong.html). b) L'espressione enigmatica della Gioconda, talora seria, talora sorridente, dipende da cosa fissiamo.

al chiasma, una struttura formata dalla confluenza dei nervi ottici, e da qui al corpo genicolato laterale ed infine alle aree corticali che si trovano a livello della nuca.

Le fibre nervose provenienti da punti diversi della retina si dirigono verso punti diversi del nucleo genicolato (LGN) e della corteccia, ricreando così una mappa cerebrale dell'immagine fissata sulla retina nel cervello. I cammini separati che gli stimoli nervosi percorrono per raggiungere la corteccia cerebrale servono a mediare diverse funzioni, tipo rilevare e rappresentare il movimento, le forme, i colori ed altri caratteri distintivi del mondo visibile, come la tridimensionalità. Solo prendendo in considerazione tutti i meccanismi fisiologici cerebrali si può descrivere in modo completo la complessa macchina della visione. Ovviamente questo complesso meccanismo della decodificazione percettiva non è indenne da errori e, talora, si può pensare di ingannarlo volutamente, per esempio giocando sul contesto visivo di un'immagine. La Fig. 20 riporta due esempi di come possa accadere che il nostro occhio veda qualcosa di differente da ciò che la nostra mente percepisce. Nel pannello sinistro della Fig. 20 a prima vista i ragazzi ci sembrano diversi perché in una fotografia di gruppo, normalmente, gli individui sono diversi. In realtà si tratta della stessa persona con un differente taglio di capelli. Nel pannello destro di Fig. 20 compare la famosa immagine della Gioconda di Leonardo da Vinci. La sua inafferrabile espressione enigmatica è stata oggetto di studio anche da parte di un nutrito gruppo di neuroscienziati. Margaret Livingstone elaborò una

teoria utilizzando una specifica caratteristica del sistema visivo umano, che abbiamo già incontrato nel nostro percorso. Poiché la distribuzione dei coni non è uniforme sulla retina, la fovea, che ne è la parte centrale, percepisce i dettagli, mentre la parte periferica percepisce gli aspetti più grossolani, come i movimenti e le ombre. Concentrando lo sguardo sulla bocca della Gioconda, viene percepita la fessura dritta delle labbra e l'aspetto è serio: in questo caso stiamo usando la fovea. Quando guardiamo il viso della donna nella sua interezza, usiamo la parte periferica della retina percependo le ombre. In questo modo, la Mona Lisa cambia espressione ed ora ci appare sorridente, dato che Leonardo ha sapientemente rappresentato le ombre sul viso come si disporrebbero se la Gioconda sorrisse. Nel complesso l'osservatore ricava una sensazione di strana ambiguità, che è una delle caratteristiche più famose del quadro.

CONCLUSIONI

In questo articolo abbiamo descritto i complessi meccanismi che sottendono alla visione umana, con particolare enfasi alla detezione del colore. Questa analisi chiarisce che la fenomenologia della percezione dei colori va oltre l'individuazione delle osservabili fisiche, quali lunghezza d'onda, frequenza ed intensità, che pure caratterizzano lo stimolo luminoso. È necessario altresì adottare un approccio più articolato che consideri tutte le dinamiche, fisiche, chimiche e fisiologiche, che partecipano a trasformare la luce in percezione visiva. L'informazione visiva è acquisita tramite una successione di azioni scatenate dalla sorgente di luce. Lo stimolo luminoso segue un percorso che passa inizialmente attraverso la retina, dove si trovano i recettori del colore che trasformano il segnale in un linguaggio trasportabile dal nostro sistema nervoso ed interpretabile dal nostro centro di elaborazione dati, il cervello. Tali meccanismi sono stati sfruttati per produrre pregevoli opere d'arte che altro non sono che la rappresentazione grafica del concetto per cui ciò che è percepito non coincide con ciò che l'oggetto esterno rappresenta. La visione umana è infatti una elaborazione cerebrale mirata a ricostruire l'immagine del mondo, la quale è però influenzata da svariate determinanti: genetiche, neurofisiologiche, conoscitive che rendono assolutamente soggettiva la percezione della realtà che ci circonda.

BIBLIOGRAFIA

- TAIOLI S., UMARI P. & DE SOUZA M.M., 2009 - Electronic properties of extended graphene nanomaterials from GW calculations, *Physica status solidi (b)* 246, 11, 2572.
- UMARI P., PETRENKO O., TAIOLI S. & DE SOUZA M.M., 2012 - Communication: electronic band gaps of semiconducting zig-zag carbon nanotubes from many-body perturbation theory calculations, *The Journal of chemical physics*, 136, 18, 181101.
- TAIOLI S., SIMONUCCI S., CALLIARI L. & DAPOR M., 2010 - Electron spectroscopies and inelastic processes in nanoclusters and solids: Theory and experiment, *Physics Reports*, 493 (5), pp. 237-319.