

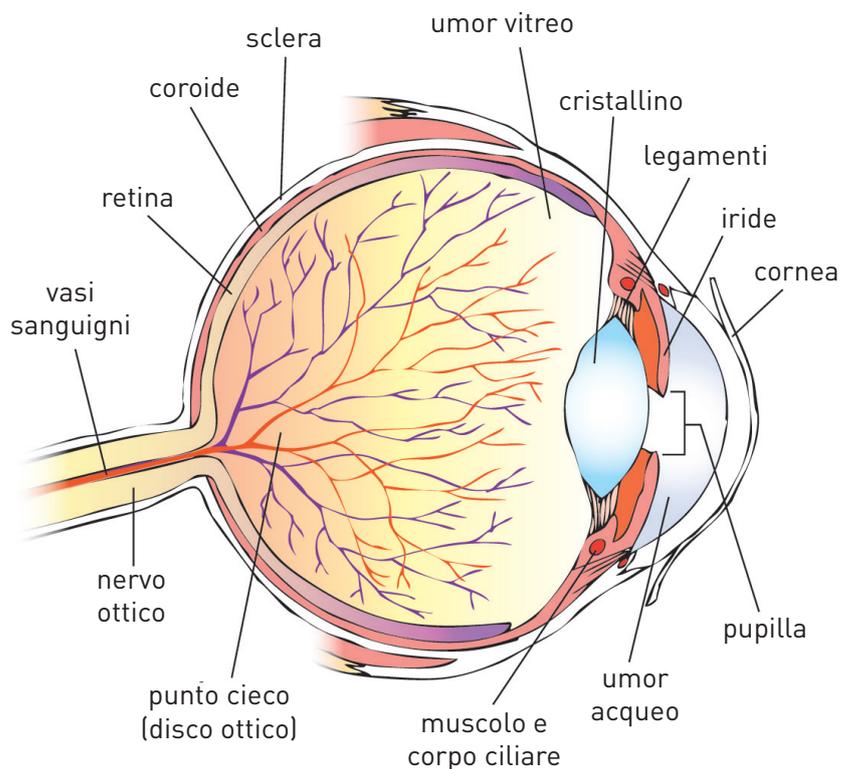
La visione dei colori

1. L'occhio umano e la percezione dei colori

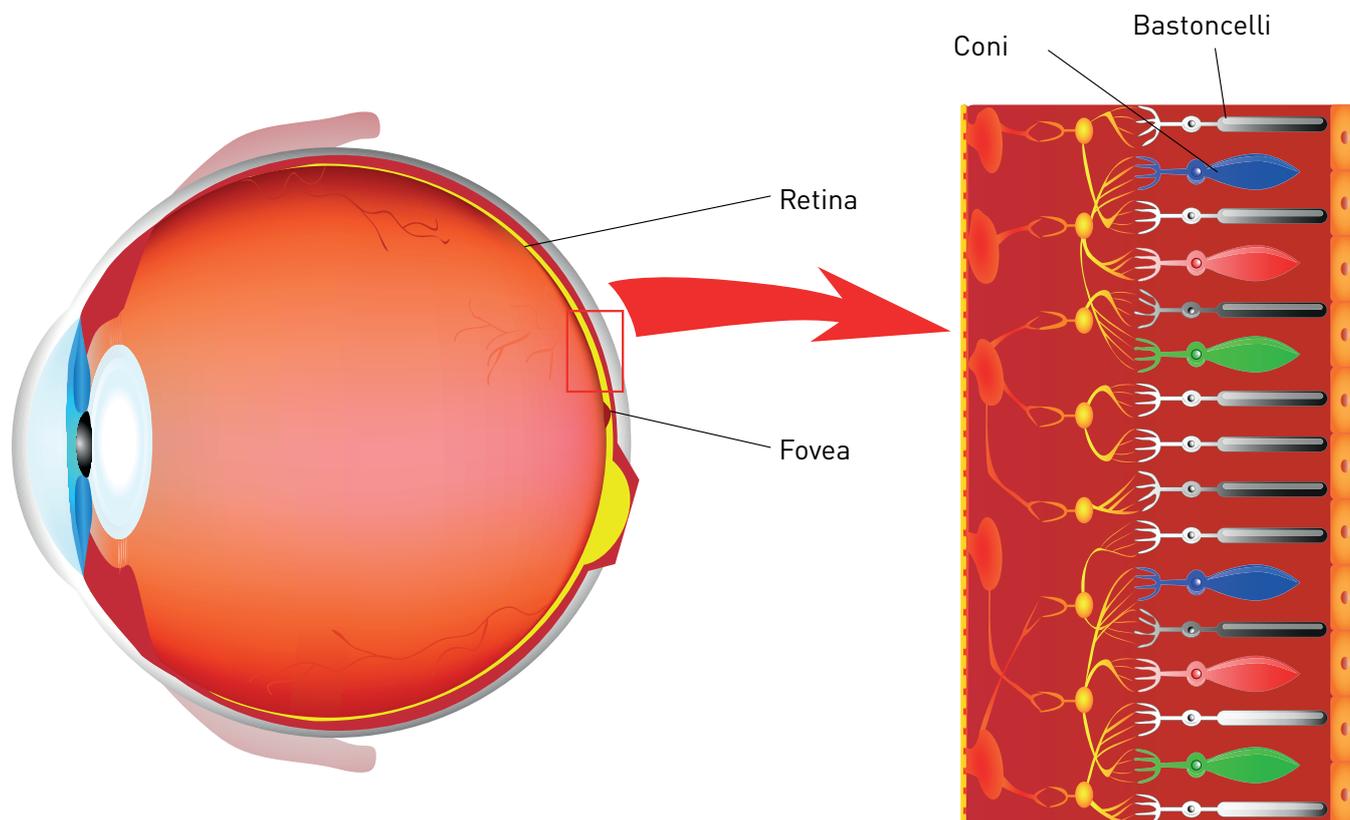
La parte più interna dell'occhio umano è la **retina**, una struttura biologica sensibile alla luce che è in grado di trasformarla in segnali elettrofisiologici per trasmetterli alla **corteccia cerebrale**. La percezione complessa dei colori, infatti, avviene proprio nel cervello, sulla corteccia.

La retina è composta da tessuto nervoso specializzato, disposto in più strati. Lo strato più interno si chiama **epitelio pigmentato**. Lo strato a ridosso dell'epitelio pigmentato ospita i fotorecettori, cellule speciali che interagiscono con lo stimolo luminoso proveniente dall'esterno. I **fotorecettori** sono di due tipologie: i **coni** e i **bastoncelli**.

Anatomia dell'occhio umano. ►



▼ Coni e bastoncelli sono responsabili della visione dei colori.



I coni

La maggior parte dei **coni** si trova nella parte centrale della retina, la **fovea**. Essi permettono la percezione dei colori durante il **giorno** e una visione distinta e **tricromatica**. Esistono tre tipi di coni:

- corto (S) circa il 65% dei coni in totale;
- medio (M) circa il 30%;
- lungo (L) circa il 5%.

In ognuno è presente un fotopigmento peculiare (**opsina**) in grado di assorbire una specifica gamma di lunghezze d'onda, corrispondenti al campo del **rosso** (L-opsina), del **verde** (M-opsina) e del **blu** (S-opsina). Ogni colore emesso dagli oggetti stimola in misura differente i tre diversi tipi di coni (**tristimolo**), i quali elaborano un segnale che, trasmesso tramite il nervo ottico, giunge alle aree dell'encefalo deputate alla visione.

Se i tre coni sono stimolati in contemporanea e con la massima intensità dalla luce emessa da parte di un oggetto, si percepisce il **bianco** (sintesi di tutti i colori).

Se invece la luce incidente viene completamente assorbita dall'oggetto su cui agisce, si percepisce il **nero** (nessun colore riflesso).

Ogni individuo possiede una sua sensibilità cromatica e ogni occhio risponde a uno stimolo visivo sommando i tre contributi di ogni cono. Per questa ragione, ognuno ha una diversa sensibilità ai tre fotorecettori. Per di più, dal momento che la maggior parte dei coni sono concentrati nella fovea, se un oggetto viene osservato da un angolo di osservazione diverso, si può generare uno stimolo visivo finale differente.

I bastoncelli

I bastoncelli si trovano nella zona più periferica della retina e sono molto più numerosi (circa 120 milioni per occhio) e sensibili rispetto ai coni, che invece sono circa 6,5 milioni per occhio. Intervengono nella visione crepuscolare e notturna, in bianco e nero (**scala di grigi**), trasmettendo un'immagine grazie al fotopigmento in essi contenuto, la **rodopsina**. L'immagine è meno nitida di quella trasmessa dai coni.

La visione non è un processo oggettivo

In conclusione, si può affermare che la percezione visiva non può definirsi un processo "oggettivo", come si intende normalmente per i fenomeni fisici, perché varia da soggetto a soggetto dal momento che è una sintesi di processi di natura **fisica, biologica e psicologica**.

Per di più, alcuni soggetti affetti da patologie che portano all'alterazione della percezione dei colori (**discromatopsie**) non possono percepire tutte le frequenze cromatiche. Il **daltonismo** (discromatopsia rosso-verde), per esempio, impedisce a chi ne è affetto di distinguere, il più delle volte, il rosso dal verde. Vi sono però altre e complesse forme di discromatopsie sino alla acromatopsia completa, per lo più su base ereditaria (nessuno dei tre tipi di coni necessari a percepire i colori è funzionante) e chi ne soffre può vedere solo sfumature di grigio.

2. Colori metamericici e teoria del colore

Colori metamericici

Sono detti metamericici i colori che:

- possono apparire identici sotto una sorgente luminosa;
- possono apparire differenti se irradiati da una sorgente diversa.

I due colori vengono detti cromaticamente instabili. Il fenomeno può dipendere:

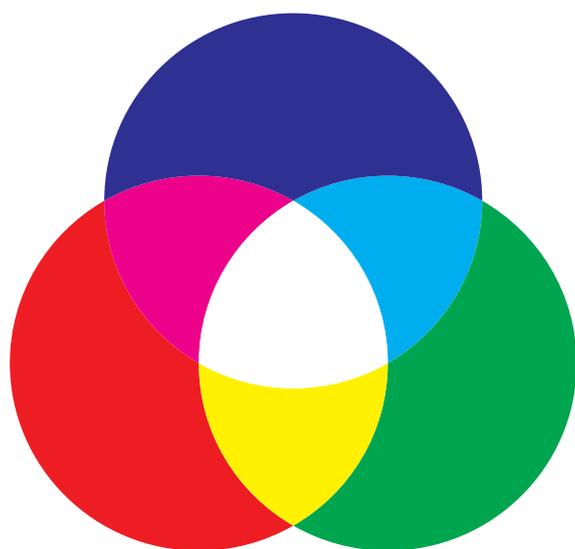
- dalla **soggettività** della visione tricromatica;
- dal **punto di osservazione** dell'oggetto (dalla distanza da cui si osserva l'oggetto o dall'angolo di osservazione);
- dalla **sorgente luminosa**; infatti, se la fonte di illuminazione non è perfettamente bianca, può succedere che il colore osservato appaia differente se illuminato con una sorgente di luce di un certo tipo e non con un'altra;
- dalla **struttura chimica dei coloranti**, perché se i due colori contengono cromofori comuni, è possibile che le tinte appaiano molto simili all'occhio umano, soprattutto se incidono su zone dei fotorecettori meno sensibili alla luce; tale fenomeno può essere accentuato da alcuni finissaggi.

Alcuni standard internazionali hanno unificato i criteri di valutazione per il confronto tra due colori. Un esempio di criterio utilizzato a questo scopo è lo standard di luce illuminante D65 corrispondente alla luce media ambiente alle nostre latitudini.

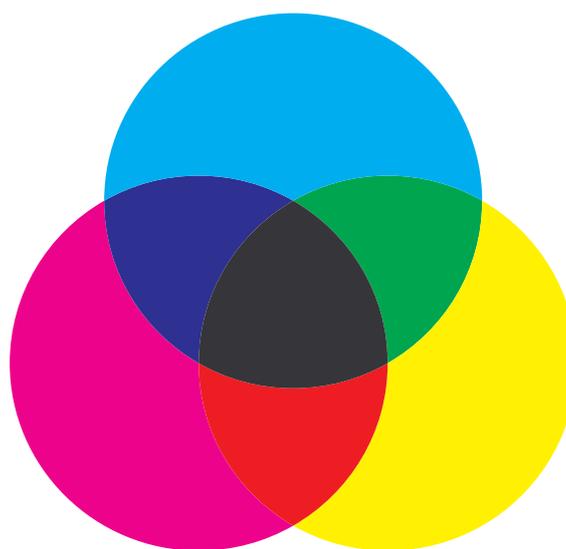
Teoria del colore

I colori possono essere mescolati in due modi:

- sovrapponendo fasci di luce dal colore diverso (**sintesi additiva**);
- sottraendo colori da un fascio di luce (**sintesi sottrattiva**).



Sintesi additiva



Sintesi sottrattiva

ciano



magenta



giallo



nero



bianco



rosso



verde



blu



■ Sintesi additiva: il modello di colore RGB

La tecnologia moderna si serve del **modello RGB** o della **tricromia**, secondo il quale i colori primari sono **rosso** (Red), **verde** (Green) e **blu** (Blue) e che è basato sulla **sintesi additiva** dei colori. È la tipologia di sintesi usata, per esempio dagli schermi ed è coerente con la percezione cromatica dei nostri occhi. Se due fasci monocromatici si sovrappongono, i fotorecettori del nostro occhio percepiscono entrambe le radiazioni, convertendo lo stimolo sensoriale nella visione del colore risultante.

■ Sintesi sottrattiva dei colori: il modello CMYK

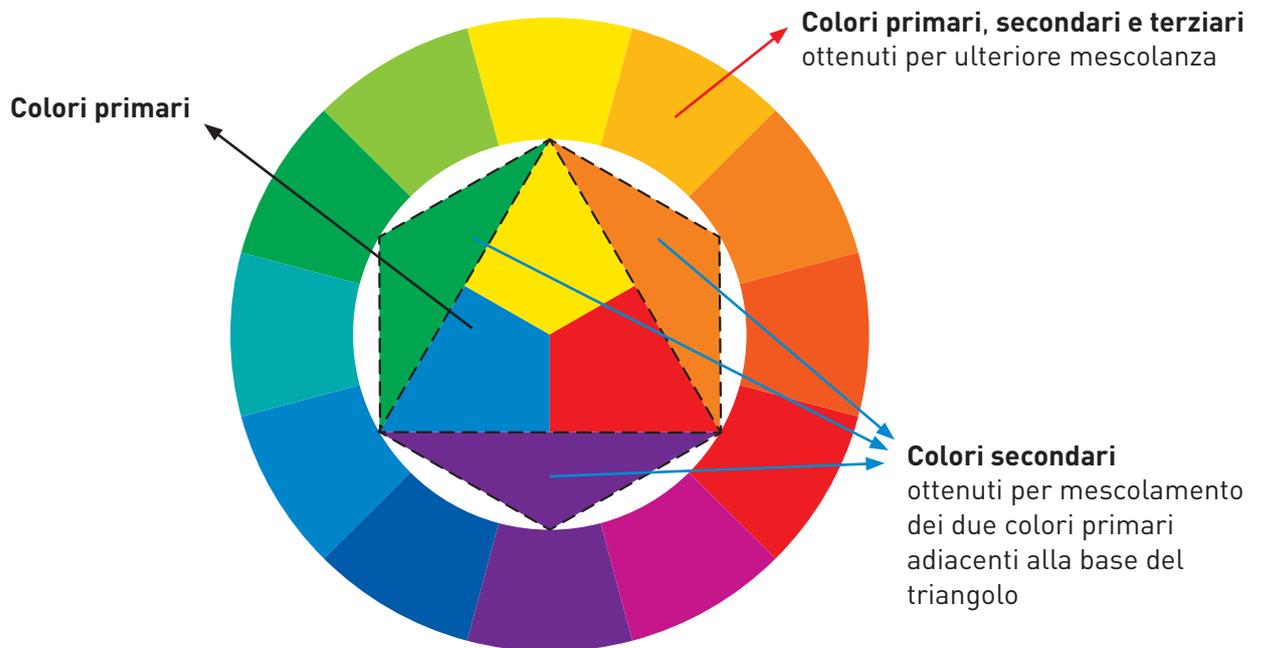
Secondo il modello **CMYK** (o **quadricromia**), i colori si suddividono in:

- colori **primari**, che non si possono ottenere mescolando altri colori. Sono il **ciano** (C), il **magenta** (M), il **giallo** (Y);
- colori **secondari**, ottenibili *mescolando a due a due i colori primari*. Sono: rosso, verde, blu.

Mescolando due colori primari in percentuali diverse, si ottengono i **colori terziari** (quali arancione rossastro, viola bluastrò, ecc.).

In teoria, in base a questo modello, mescolando i tre colori primari, si dovrebbe ottenere il **nero**, ma nel concreto il mescolamento non porta alla percezione del nero, ma del **bistro** (marrone) e obbliga a dover aggiungere pigmenti neri (modello **CMYK**, dove K sta per *Key black*). Tale modello si basa sull'assunto per cui un pigmento attraversato da luce bianca (policromatica) le sottrae una parte delle radiazioni, lasciando invece passare la restante parte che è quella visibile al nostro occhio. I colori secondari sono quelli che sono considerati primari nel modello RGB. Nel campo della pittura, però, la terna di colori primari è data dal rosso, dal giallo e dal blu, sia nella sintesi additiva sia nella sottrattiva. Tuttavia, non è possibile ottenere il bianco nella sintesi additiva, né il nero nella sintesi sottrattiva.

Il cerchio di Itten



▲ Il cerchio cromatico di Itten consente di comprendere meglio la distinzione tra colori primari, secondari e terziari ed è di grande utilità in campo cosmetico e nel campo dell'abbigliamento. Al centro si trovano i colori **primari**. Dal loro mescolamento derivano i **secondari** indicati nei triangoli adiacenti. Nella parte più esterna ci sono i **terziari** derivanti dall'unione dei colori secondari.

I colori presenti all'opposto del cerchio sono **complementari** tra loro: se sovrapposti tendono a compensarsi. Su questo principio si basano gli azzurranti usati nel candeggio ottico e i correttori per occhiaie e imperfezioni varie. Se invece due colori complementari vengono usati in contrapposizione, l'uno esalta l'altro.

3. Perché alcuni oggetti appaiono colorati: le transizioni tra livelli elettronici

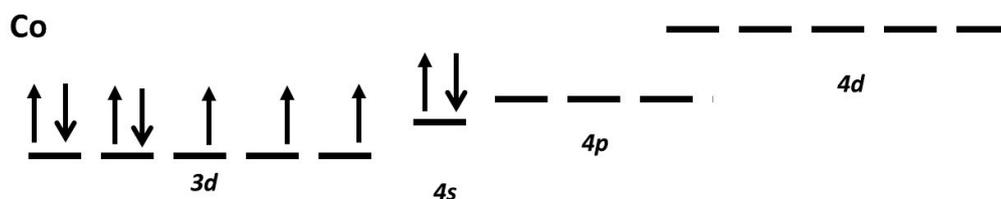
Alla base dei fenomeni responsabili della visione del colore figura quasi sempre una certa facilità da parte degli elettroni nel **passare dallo stato fondamentale a quello eccitato** a seguito di assorbimento di energia. Una sostanza che appare colorata, quindi, assorbe solo alcune lunghezze d'onda della luce, quelle necessarie a compiere il salto energetico, e ne lascia passare altre. In alcuni casi, per promuovere la transizione, è necessario fornire del **calore**; in altri è sufficiente irradiare con **luce solare** per poter osservare il colore della sostanza.

Gli ioni metallici e il colore

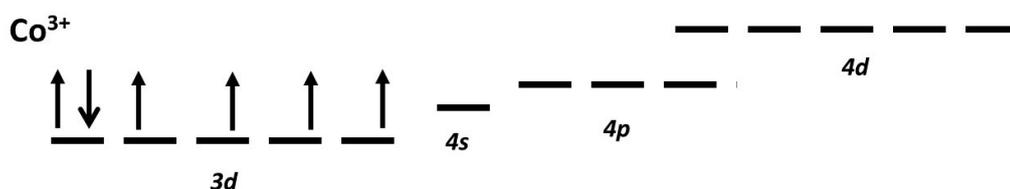
Nella maggior parte dei pigmenti inorganici sono i **metalli di transizione** contenuti al loro interno i veri responsabili del loro colore. Tali metalli presentano un guscio di valenza contenente orbitali di tipo *s*, *p*, *d* ed *f*, a minima distanza tra loro. Per semplicità non prenderemo in considerazione ciò che avviene all'interno degli orbitali *f*.

Se gli orbitali *d* non sono totalmente vuoti (d^0) o totalmente riempiti (d^{10}), gli elettroni hanno la possibilità di saltare da un orbitale *d* all'altro, assorbendo l'energia necessaria da una parte della radiazione visibile e subendo facilmente una transizione tra livelli elettronici. La radiazione non assorbita, poiché non necessaria per il salto, viene trasmessa all'occhio, il che consente di osservare il colore derivante dalla miscelazione delle radiazioni monocromatiche in essa contenute. Se però l'energia necessaria per compiere il salto energetico è minima, il pigmento appare bianco, poiché impiega solo una minima parte della radiazione e riflette quasi per intero la radiazione ricevuta. Se invece l'energia necessaria per compiere il salto energetico è quasi pari a quella della luce bianca policromatica, ne passa solo una frazione piccolissima e il pigmento risulta nero.

Per esempio, il cobalto possiede configurazione elettronica esterna $3d^74s^2$, così rappresentabile:

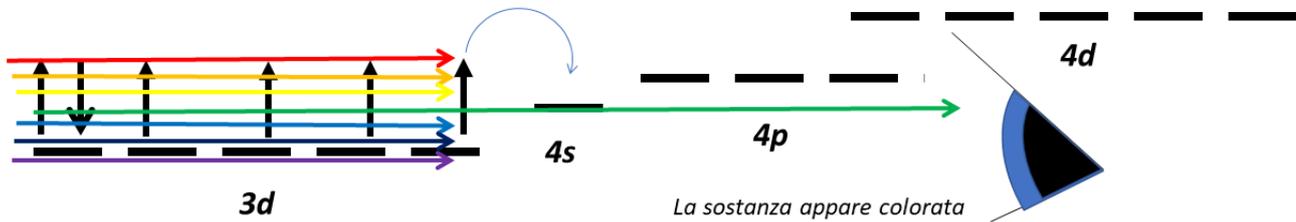


Lo ione cobalto Co^{3+} perde tre elettroni: la sua configurazione diventa $3d^54s^0$:

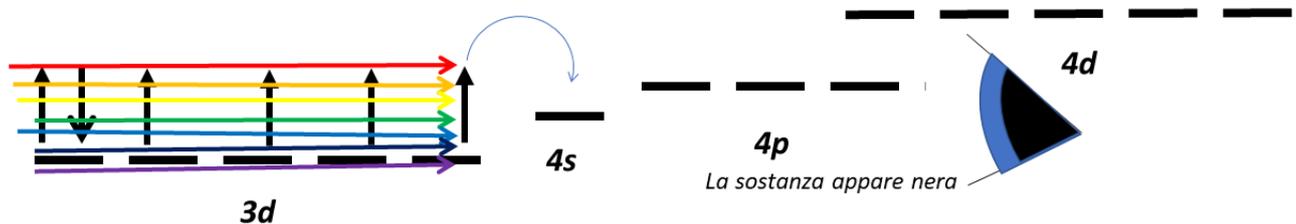


Sono possibili tre casi.

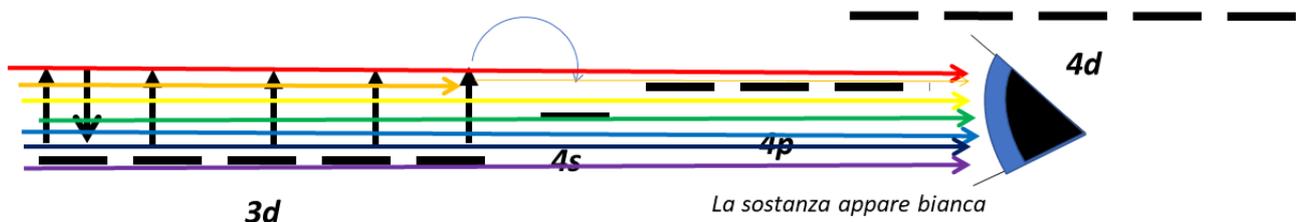
1. La promozione dell'elettrone 3d sul 4s comporta un dispendio di energia **non troppo elevato**. Gli elettroni del catione cobalto assorbono solo una minima parte della radiazione incidente per compiere il salto energetico. La restante frazione è visibile dall'occhio umano. La sostanza appare così **colorata**.



2. La transizione elettronica è possibile solo assorbendo **tutte** le frequenze irradiate dalla sorgente. Ne consegue che la radiazione che non viene assorbita è pressoché nulla. In questo caso ai nostri occhi la sostanza appare **nera**.



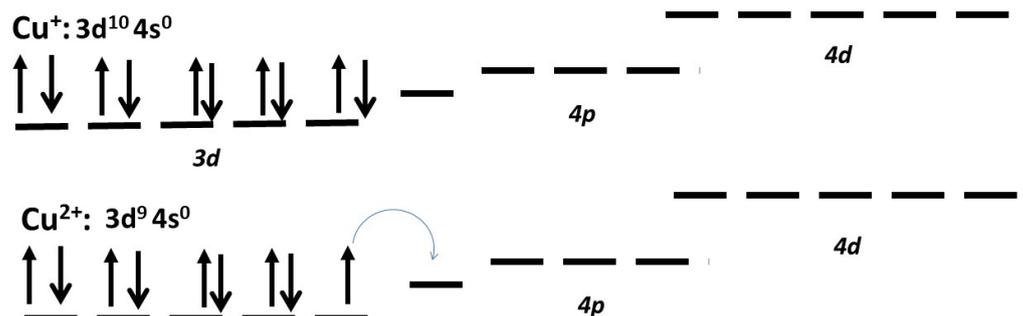
3. La transizione elettronica è possibile assorbendo una parte irrisoria delle frequenze irradiate dalla sorgente. Ne consegue che la radiazione non assorbita è pressoché pari a quella dell'intero spettro del visibile. In questo caso ai nostri occhi la sostanza appare **bianca**.



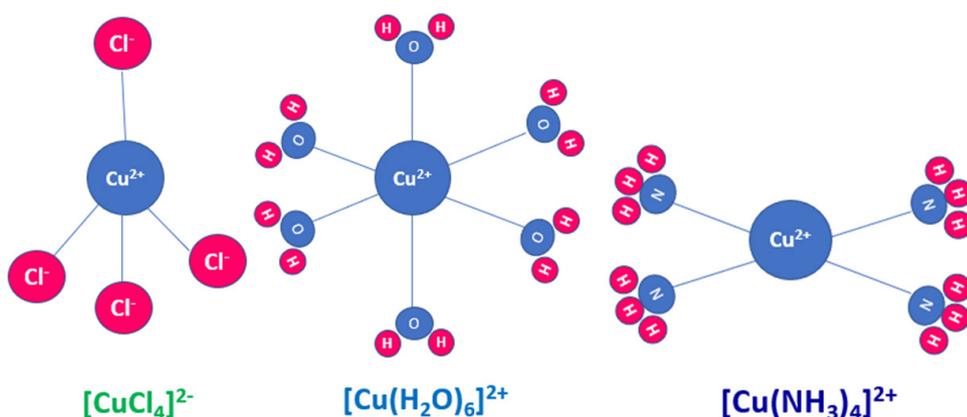
I complessi di coordinazione e il colore

Nel concreto, quale dei tre casi si verifichi dipende da svariati fattori. In primis, ogni ione metallico necessita di una specifica e ben definita quantità di energia per le sue transizioni tra livelli elettronici. Peraltro, se negli orbitali *d* non figurano elettroni spaiati, la possibilità di promuoverli a uno stato eccitato con la radiazione visibile è alquanto improbabile.

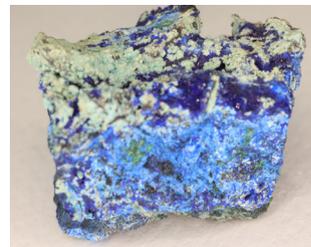
Lo ione rameoso appare incolore ► a causa della impossibilità da parte degli elettroni presenti negli orbitali *d* di poter subire transizioni, essendo tutti pieni; lo ione rameico appare invece colorato grazie alla possibilità da parte degli elettroni presenti negli orbitali *d* di poter subire facilmente transizioni energetiche.



Se lo ione è colorato, il suo colore dipende dal numero e dal tipo di specie chimiche con cui è complessato. Anche la geometria del complesso ne influenza il colore.



▲ In presenza di ioni cloruro, lo ione rameico forma un composto tetraedrico verde $[\text{CuCl}_4]^{2-}$; se legato a sei molecole di acqua, forma un complesso ottaedrico blu $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$; se legato a quattro molecole di ammoniaca, il complesso risultante presenta geometria quadrato planare, dal colore blu scuro $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$.



▲ Un campione di azzurrite $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$: il caratteristico colore è provocato dalla presenza del rame.

Composti organici colorati

I legami multipli presenti nei gruppi cromofori sono in grado di assorbire una parte della radiazione luminosa e rendere possibili transizioni elettroniche con meccanismi piuttosto complessi, ma in linea di massima simili a quelli già illustrati.

La presenza di gruppi auxocromi può rendere le transizioni elettroniche ancora più agevoli.

Minerali idiocromatici e allocromatici

A differenza dei minerali **idiocromatici**, che presentano sempre lo stesso colore (come per esempio la pirite FeS_2), vi sono dei minerali che possono presentare dei colori differenti e vengono classificati come **allocromatici**. Questo fenomeno può verificarsi o perché **nel minerale sono presenti impurezze di altri metalli** in grado di assorbire una frazione della radiazione visibile, o perché **il minerale presenta difetti nella struttura, provocando la formazione dei centri di colore**. Questo avviene se al posto di un anione è presente un elettrone, oppure c'è un elettrone in meno. Questo comporta un assorbimento nel visibile e permette l'osservazione del colore.

È un esempio di minerale allocromatico il quarzo (SiO_2): in assenza di impurezze appare bianco lattescente (quarzo ialino), ma sono molto frequenti inclusioni di altri atomi oppure di altri gruppi di atomi nella struttura, che portano a numerose altre varietà di quarzo, tra cui l'avventurina (inclusioni di cromo), il quarzo rosa (inclusioni di manganese), il quarzo ametista (inclusioni di ferro) e il quarzo aurifero (inclusioni di oro).



▲ La pirite FeS_2 è un minerale idiocromatico.



▲ Quarzo ialino.



▲ Quarzo avventurina.



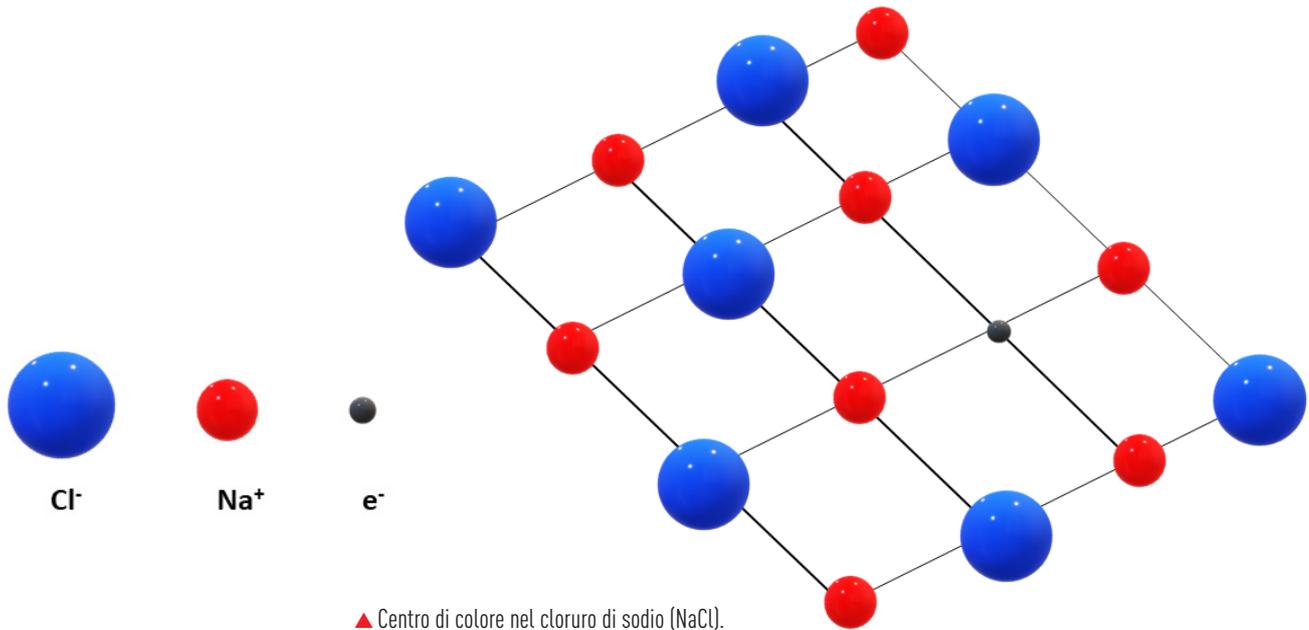
▲ Quarzo rosa.



▲ Quarzo aurifero.

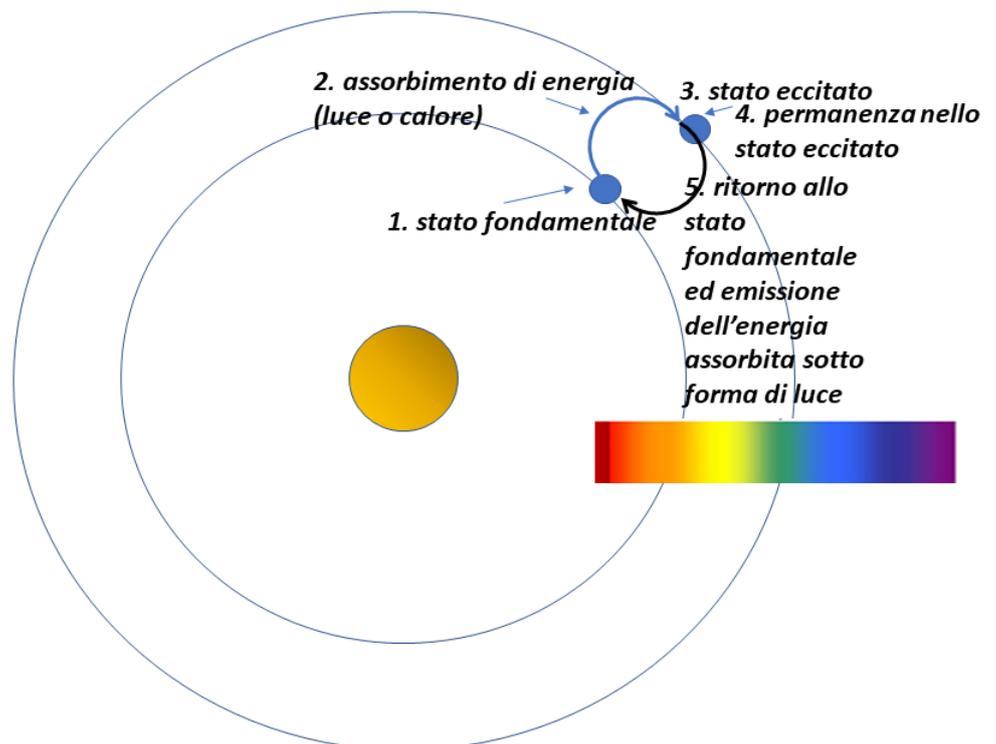


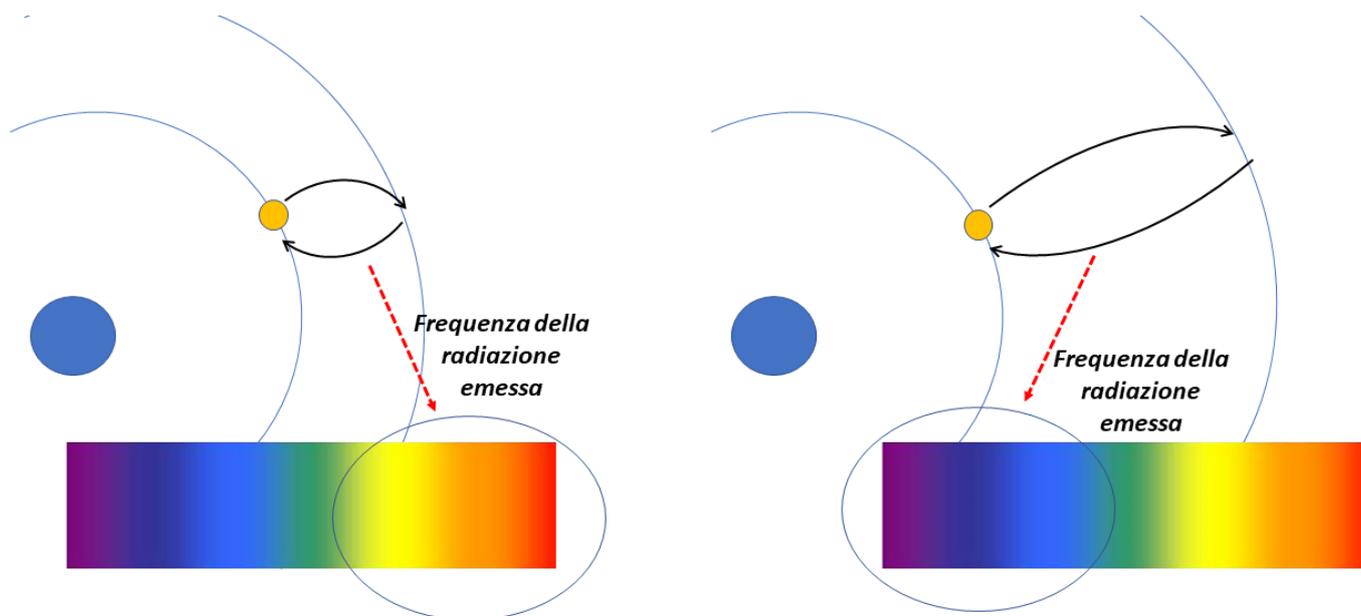
▲ Ametista.



Eccitazione con fonti di calore e osservazione di colore

Molte sostanze se scaldate sulla fiamma emettono luce dal caratteristico colore. La maggior parte di questi elementi sono **metalli**, ma non solo. Questo avviene perché gli elettroni di valenza, se opportunamente eccitati mediante una fonte di calore, possono spostarsi sul livello energetico successivo, assorbendo la quantità di energia necessaria per il salto dallo stato fondamentale allo stato eccitato (**assorbimento**). Dopo infinitesime frazioni di secondo (circa 10^{-15} s), gli elettroni ritornano sul loro stato fondamentale, restituendo l'energia assorbita (**emissione**) sotto forma di fotoni. Abbiamo già visto che se il tempo di permanenza dell'elettrone sale fino ad arrivare a 10 secondi, possono verificarsi fenomeni di fluorescenza o di fosforescenza.





▲ Relazione tra l'entità del salto energetico dell'elettrone dallo stato fondamentale allo stato eccitato e la frequenza della radiazione visibile emessa.

Maggiore è il salto compiuto da un livello energetico al successivo, maggiore è la frequenza dei fotoni emessi.

Maggiore è la distanza tra lo stato fondamentale e lo stato eccitato, più la luce emessa tende al violetto (colore corrispondente alla maggiore frequenza percepita dall'occhio umano).

Minore è la distanza tra lo stato fondamentale e lo stato eccitato, più la luce emessa tende al rosso (colore corrispondente alla minore frequenza percepita dall'occhio umano).

9. Misurazioni di colore

Le tecniche analitiche strumentali per l'identificazione e la misurazione del colore sono svariate. I metodi analitici più utilizzati sono senz'altro quelli **spettroscopici**, che possiedono il vantaggio di essere versatili, rapidi, attendibili, di non alterare il campione o addirittura distruggerlo. In particolare, prenderemo in considerazione gli strumenti che operano nella regione del UV-visibile. Le misurazioni possono avvenire in modalità **assorbanza**, misurando il logaritmo del rapporto tra l'intensità del raggio incidente e di quello che fuoriesce, o in modalità **riflettanza**, ossia misurando l'intensità totale delle radiazioni non assorbite.

Sul campione si fanno incidere, una per volta, tutte le radiazioni monocromatiche facenti parte del campo del visibile e del vicino UV. A seconda della natura chimica del campione, ogni radiazione potrà essere prevalentemente assorbita, o prevalentemente riflessa e diffusa, o entrambe le cose. Alla fine dell'analisi, si ottiene lo **spettro**, ossia un grafico che illustra quali lunghezze d'onda siano state maggiormente assorbite dal campione (**spettro di assorbimento**), o quali lunghezze d'onda siano state maggiormente riflesse dal campione (**spettro di riflettanza**), e con quale intensità. I massimi visibili negli spettri di assorbimento corrispondono alla radiazione assorbita dal campione, per cui il colore osservato è quello corrispondente al minimo di assorbimento. I massimi visibili negli spettri di riflettanza, invece, corrispondono alla radiazione riflessa dal campione, ossia alla radiazione percepibile dal

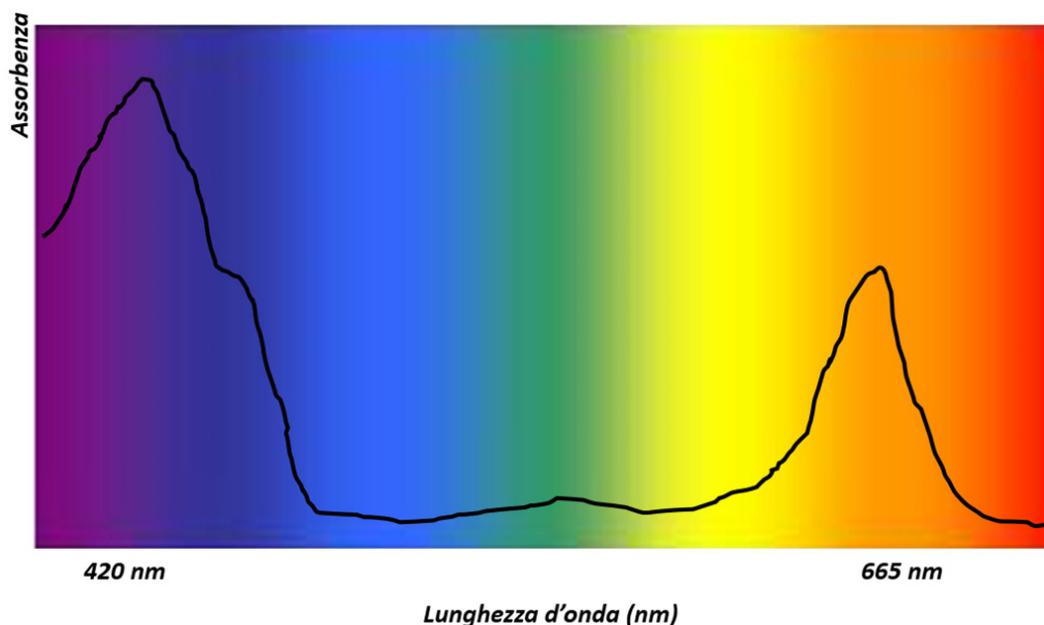


▲ Spettrofotometro.

nostro occhio, se fa parte della regione del visibile. Non sempre, però, questo tipo di spettri sono di immediata interpretazione, come nel caso di pigmenti bianchi, neri o grigi.

Prendiamo in considerazione il caso della clorofilla: perché appare verde? Il suo spettro di assorbimento presenta due massimi: uno nel blu e l'altro nel rosso. Quindi la molecola di clorofilla, se irradiata con luce bianca policromatica, trattiene prevalentemente il **rosso** e il **blu**. Il minimo dell'assorbimento si registra proprio in corrispondenza del verde. Ciò significa che il verde non viene assorbito quasi per niente e viene emesso, motivo per il quale ai nostri occhi la clorofilla appare verde.

Spettro di assorbimento della clorofilla



Nel caso dello spettro in riflettanza, per esempio di un pigmento, ci si può aspettare un massimo in corrispondenza della regione del blu, intorno ai 450 nanometri, ossia le lunghezze d'onda non assorbite dal pigmento e percepibili dall'occhio umano.

Per oggetti opachi come la maggior parte dei pigmenti e dei coloranti, è preferibile avvalersi della modalità di analisi in riflettanza.

Dal momento che ogni sostanza ha un suo specifico spettro di assorbimento e di riflettanza, dalle analisi spettroscopiche è possibile prevedere quali gruppi funzionali siano contenuti all'interno della molecola. Inoltre, incrociando i dati estrapolati da questo tipo di analisi con quelli di altre metodiche, è possibile arrivare a ipotizzare la struttura chimica della sostanza colorata.

Uno strumento molto più semplice dello spettrofotometro è il **colorimetro**, che misura la quantità di colore assorbita da un corpo, determinando in quale percentuale siano combinati il rosso, il verde e il blu.



▲ Colorimetro.