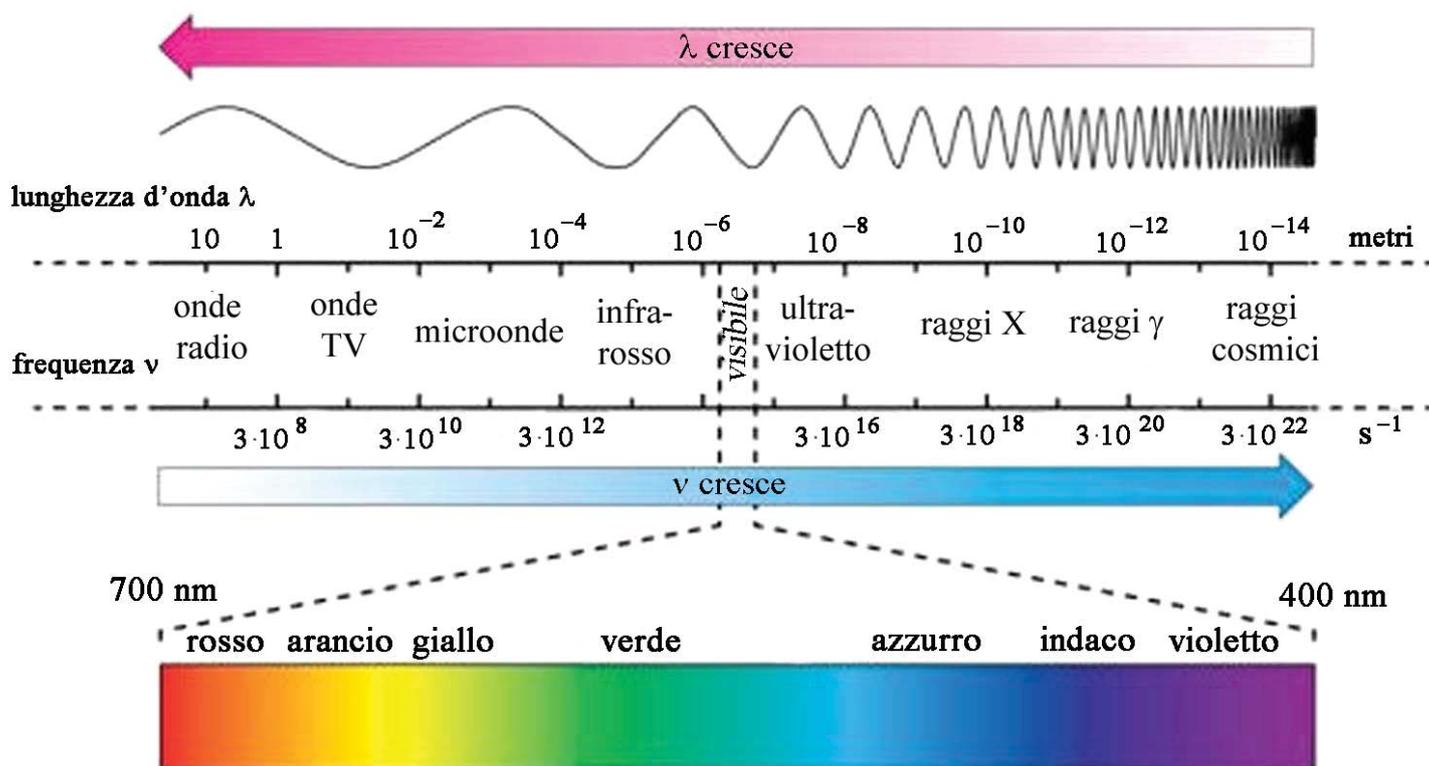


# L'occhio, la visione, il colore e gli effetti extra-visivi

## LA LUCE



**Secondo la teoria quantistica, una sorgente di luce emette energia elettromagnetica per quanti, ovvero fotoni, che sono unità indivisibili di energia.**

Un fotone viaggia nel vuoto con una velocità di propagazione:

$$c = 3 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$

Per i fenomeni ondosi è valida la relazione classica:

$$c = \lambda f$$

f = frequenza (Hz)

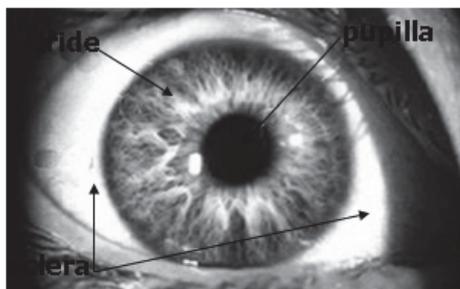
$\lambda$  = lunghezza d'onda (m)

Secondo la relazione di Einstein, l'energia E (J) di un fotone è:

$$E = h f = hc/\lambda \text{ (J)}$$

h = costante di Planck =  $6.624 \times 10^{-34}$  (J x s)

Gli occhi costituiscono gli organi periferici del senso della vista collocati a metà altezza della testa, a circa 6 cm di distanza

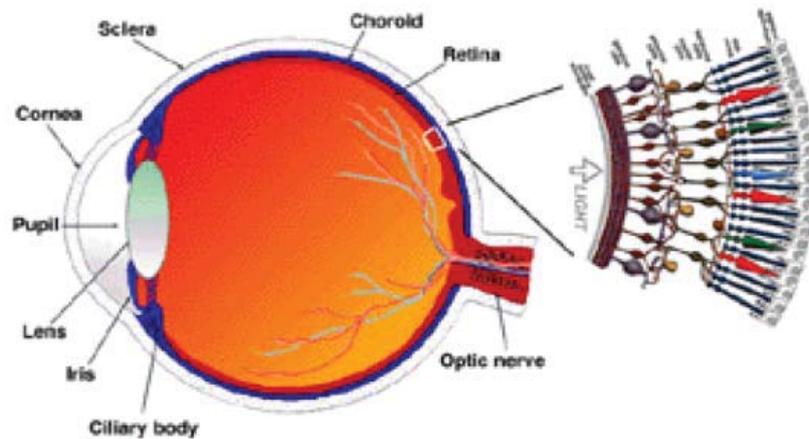


*La pupilla* è un foro circolare che permette alla luce di entrare all'interno dell'occhio. Un meccanismo neurologico ne regola il diametro tra 1 e 8 mm.

*L'iride* è l'area pigmentata che definisce il colore degli occhi. È sede di una muscolatura circolare che controlla l'apertura della pupilla.

*La cornea* è un corpo trasparente che copre la pupilla e l'iride. È la prima lente che focalizza per il 70% la luce verso la retina.

*La sclera* è "il bianco dell'occhio".



### ***Tre strati:***

- 1) esterno bianco formato dalla sclera e dalla cornea
- 2) intermedio blu in due parti: iride + corpo ciliato e coroide
- 3) interno rosso è la parte sensoriale dell'occhio costituita dalla *retina*

### ***Tre camere contenenti fluidi:***

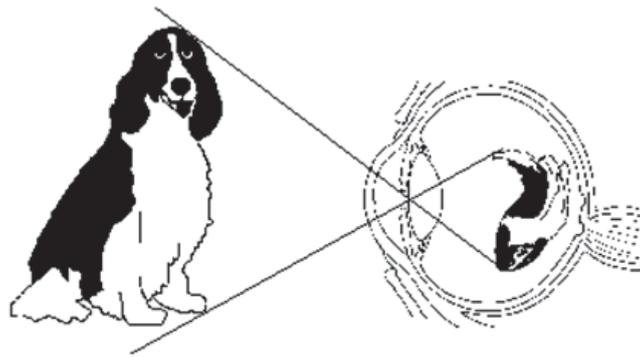
- 1) anteriore, tra la cornea e l'iride
- 2) quella posteriore tra l'iride, le zonule fibrilate e la *lente cristallina*
- 3) la camera vitrea tra il cristallino e la retina. I primi due spazi contengono un umore acqueo, mentre la camera vitrea è riempita di un fluido più viscoso, detto *umore vitreo*.

## Il sistema ottico dell'occhio umano

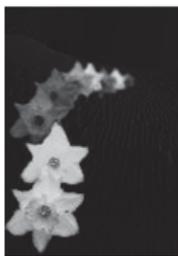
- La luce ambientale entra nell'occhio attraverso il foro pupillare.
- Attraversa mezzi diversi: cornea, cristallino, umore acqueo e umore vitreo.
- Il sistema ottico mette a fuoco un'immagine chiara sulla retina che dà inizio alla codifica dell'informazione per il sistema visivo.
- Tutti gli elementi interposti tra la superficie esterna della cornea e la superficie all'ingresso della retina hanno un ruolo in questa funzione.

## Inversione dell'immagine sulla retina

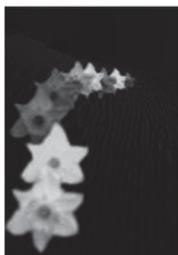
- L'ottica dell'occhio produce un'immagine dell'oggetto reale invertita sulla retina.
- Il processo centrale elabora la percezione dell'immagine come è nella realtà.



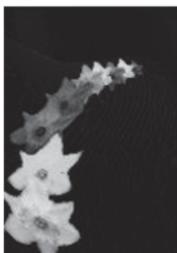
## I difetti più comuni del sistema ottico dell'occhio



**Occhio miope:** gli oggetti a distanza piccola sono visti correttamente a fuoco; quelli più lontani appaiono tanto più sfocati ed indistinti quanto più sono distanti.



**Occhio ipermetrope:** gli oggetti a distanza piccola appaiono sfocati ed indistinti; gli oggetti distanti sono percepiti correttamente, soprattutto se è possibile l'accomodamento.

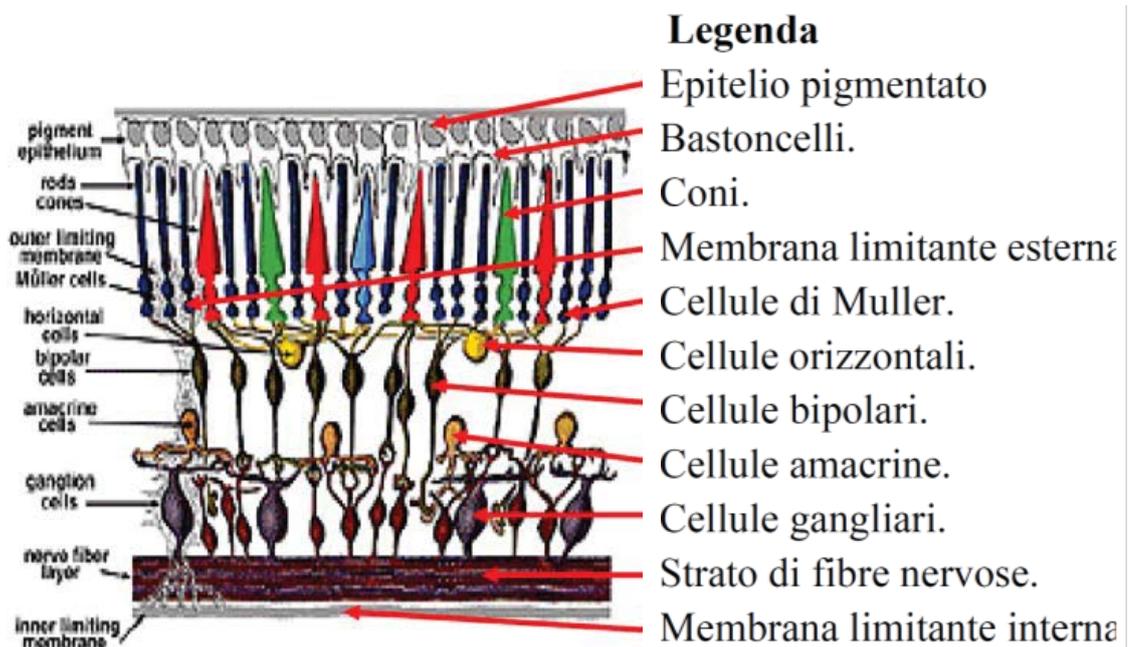


**Occhio astigmatico:** le immagini vengono percepite deformate lungo certe direzioni dipendenti dalla natura dell'astigmatismo.

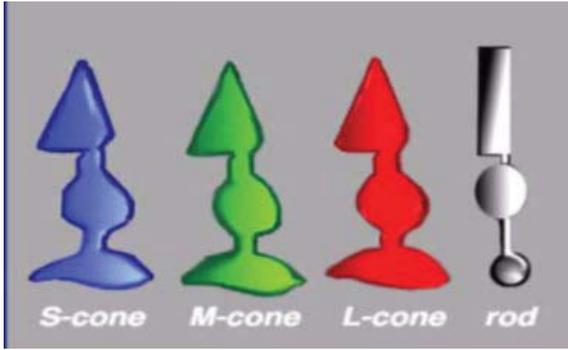
## La retina

- E' la più interna delle tre membrane che formano le pareti del globo oculare e si estende dal punto di entrata del nervo ottico fino al margine pupillare dell'iride. Si estende lungo l'equatore del globo oculare per circa 32 mm impegnando il 72% della superficie interna dell'occhio (1094 mm<sup>2</sup>).
- Per la sua origine e per la sua struttura deve essere considerata di natura nervosa, cioè un pezzo di tessuto cerebrale stimolato dalla luce e dalle immagini del mondo esterno.
- E' una struttura molto complessa.

## Sezione della retina semplificata



# I fotorecettori



*I bastoncelli* reagiscono alla luce blu-verde e presentano una sensibilità massima alla lunghezza d'onda di 498 nm.

Consentono la “visione in bianco e nero” in condizioni di luce scarsa.

Sono così sensibili che possono rivelare un singolo quanto di luce.

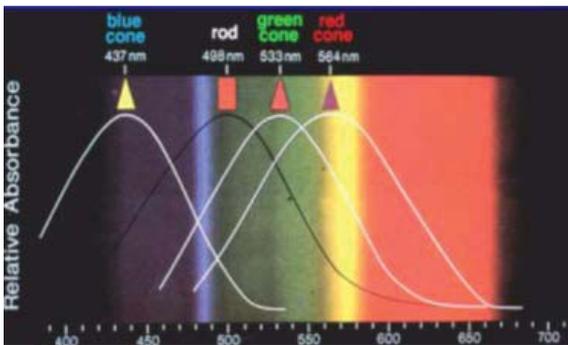
E' possibile contare nella retina da 110 milioni a 125 milioni di bastoncelli.

*I coni* sono di tre tipi, a seconda della struttura molecolare del pigmento in essi contenuto (opsina).

I coni L presentano una sensibilità relativa massima a 584 nm (Long waves), i coni M (Medium waves) a 533 nm ed i coni S (Short waves) a 437 nm.

I tre meccanismi dei coni sono alla base della visione tricromatica caratteristica dell'uomo.

Circa 6,5 milioni di coni popolano la retina.



## I colori: caratteristiche qualitative



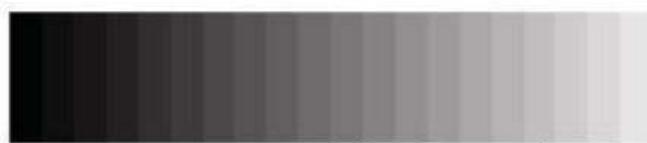
Variazione della Tinta

**La tinta** (o tono) è legata alle lunghezze d'onda dominanti nel flusso luminoso. Definisce la natura del colore percepito (rosso, verde, giallo, etc.).



Variazione della Saturazione

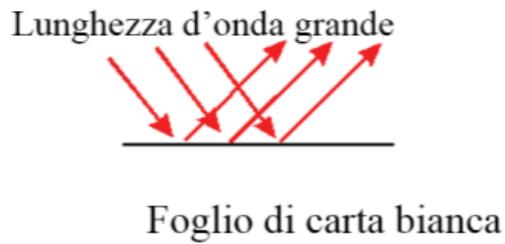
**La saturazione** (o purezza) si riferisce a quanto marcatamente si percepisce il colore (sbiadito o marcato). Oggettivamente, è legata a quanto la concentrazione spettrale corrispondente al colore è associata ad altra luce a banda larga.



Variazione della Luminosità

**La luminosità** si riferisce alla intensità percepita ed è legata alla luminanza dell'oggetto osservato.

## Perché un oggetto appare di un certo colore?



Per molti materiali il coefficiente di assorbimento e quello di riflessione dipendono dalla lunghezza d'onda.

Un corpo che appare giallo assorbe fortemente la luce nel campo del blu e rinvia luce nella regione di lunghezze d'onda del verde e del rosso.

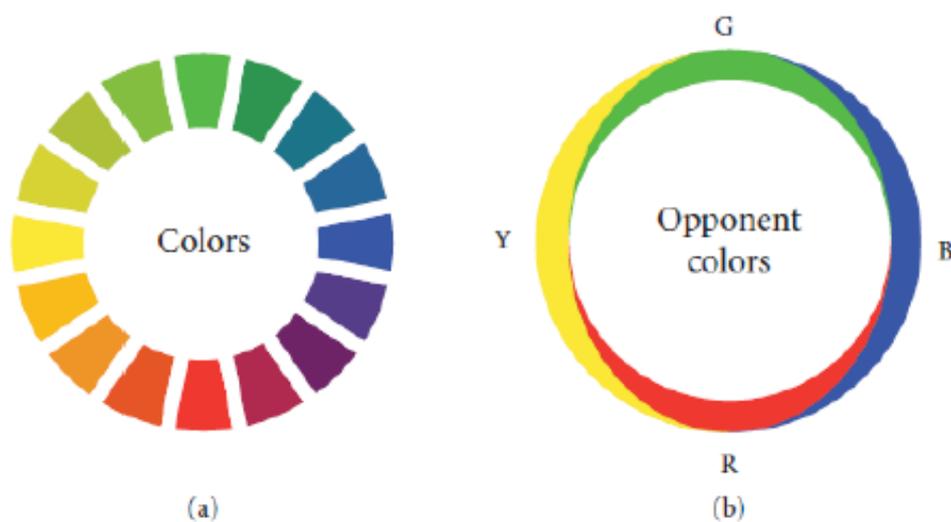
Un foglio di carta bianca rinvia luce quasi uniformemente a tutte le lunghezze d'onda visibili. Pertanto se la radiazione incidente è concentrata nella zona del rosso, la carta appare rossa.

Un foglio di carta blu appare tale alla luce diurna che è banda larga. Essa rinvia solamente la banda del blu e assorbe le lunghezze d'onda maggiori. Se la radiazione incidente è solamente rossa, essa viene assorbita e **la carta appare nera**.

**Affinchè la luce rinviata contenga un certo colore, questo deve essere contenuto nello spettro della luce incidente e non deve essere assorbito nell'interazione con il corpo.**

13

## TEORIA DEL COLORE: LE COMPONENTI PRIMARIE E LA TEORIA DELL'OPPONENZA



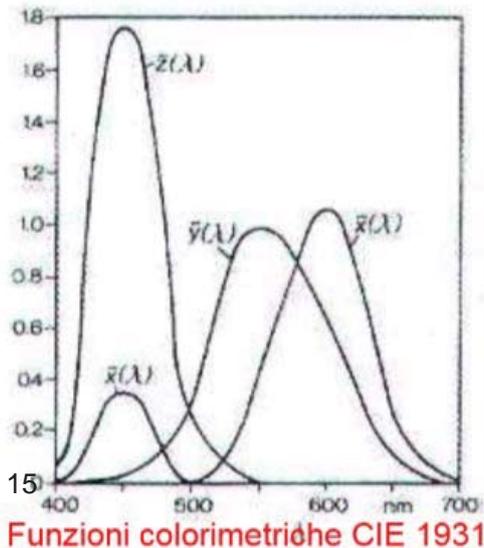
**FIGURE 2** Hering's opponent-colors diagram. A diagrammatic representation of opponent-colors theory. The ring on the left (a) shows a range of colors changing in small steps from green at the top clockwise to blue, red, yellow, and back to green. The ring on the right (b) shows the hypothetical contributions of each of the color-opponent pairs [red (R) vs. green (G), and blue (B) vs. yellow (Y)] to the appearance of the corresponding colors in (a). In accordance with opponent-colors theory, the opposed pairs of colors are mutually exclusive. (Redrawn from Plate 1 of Ref. 7).

14

# Componenti tricromatiche CIE XYZ

La CIE riconobbe forti limitazioni legate all'uso di tre radiazioni monocromatiche RGB per formulare un metodo di classificazione di un colore sulla base di dati spettrali. Una difficoltà era, ad esempio, la necessità di sovrapporre una radiazione monocromatica con segno - (cosa è un colore puro negativo?). Pertanto, nel 1931 normalizzò un metodo praticabile, tuttora in uso, che eliminava - tra l'altro - questa incongruenza concettuale.

Conservando il principio della sovrapposizione, definì tre filtri per pesare lo spettro luminoso di un colore le cosiddette **funzioni colorimetriche**  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  e  $\bar{z}(\lambda)$ , riportate nella figura e nella tabella che segue. La loro forma è basata su certe caratteristiche psico-fisiche della percezione umana dei colori.



Con la densità spettrale  $w(\lambda)$  della luce (radianza spettrale sulla retina) in considerazione si calcolano le tre potenze raggianti **pesate** seguenti:

$$X = \int w(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int w(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int w(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

Queste assumono il significato di **componenti tricromatiche del colore XYZ** con lo stesso senso logico delle componenti tricromatiche primarie RGB.

## Tabella delle funzioni colorimetriche CIE1931

$\lambda$	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$	$\lambda$	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$	$\lambda$	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$
380	0,0014	0,0000	0,0065	515	0,0291	0,6082	0,1117	650	0,2835	0,1070	0,0000
385	0,0022	0,0001	0,0105	520	0,0633	0,7100	0,0782	655	0,2187	0,0816	
390	0,0042	0,0001	0,0201	525	0,1096	0,7932	0,0573	660	0,1649	0,0610	
395	0,0076	0,0002	0,0362	530	0,1655	0,8620	0,0422	665	0,1212	0,0446	
400	0,0143	0,0004	0,0679	535	0,2257	0,9149	0,0298	670	0,0874	0,0320	
405	0,0232	0,0006	0,1102	540	0,2904	0,9540	0,0203	675	0,0636	0,0232	
410	0,0435	0,0012	0,2074	545	0,3597	0,9802	0,0134	680	0,0468	0,0170	
415	0,0776	0,0022	0,3713	550	0,4334	0,9950	0,0087	685	0,0329	0,0119	
420	0,1344	0,0040	0,6456	555	0,5121	1,0002	0,0057	690	0,0227	0,0082	
425	0,2148	0,0073	1,0391	560	0,5945	0,9950	0,0039	695	0,0158	0,0057	
430	0,2839	0,0116	1,3858	565	0,6784	0,9786	0,0027	700	0,0114	0,0041	
435	0,3285	0,0168	1,6230	570	0,7621	0,9520	0,0021	705	0,0081	0,0029	
440	0,3483	0,0230	1,7471	575	0,8425	0,9154	0,0018	710	0,0058	0,0021	
445	0,3481	0,0298	1,7826	580	0,9163	0,8700	0,0017	715	0,0041	0,0015	
450	0,3362	0,0380	1,7721	585	0,9786	0,8163	0,0014	720	0,0029	0,0010	
455	0,3187	0,0480	1,7441	590	1,0263	0,7570	0,0011	725	0,0020	0,0007	
460	0,2908	0,0600	1,6692	595	1,0567	0,6949	0,0010	730	0,0014	0,0005	
465	0,2511	0,0739	1,5281	600	1,0622	0,6310	0,0008	735	0,0010	0,0004	
470	0,1954	0,0910	1,2876	605	1,0456	0,5668	0,0006	740	0,0007	0,0003	
475	0,1421	0,1126	1,0419	610	1,0026	0,5030	0,0003	745	0,0005	0,0002	
480	0,0956	0,1390	0,8130	615	0,9384	0,4412	0,0002	750	0,0003	0,0001	
485	0,0580	0,1693	0,6162	620	0,8544	0,3810	0,0002	755	0,0002	0,0001	
490	0,0320	0,2080	0,4652	625	0,7514	0,3210	0,0001	760	0,0002	0,0001	
495	0,0147	0,2586	0,3533	630	0,6424	0,2650	0,0000	765	0,0001	0,0000	
500	0,0049	0,3230	0,2720	635	0,5419	0,2170	0,0000	770	0,0001	0,0000	
505	0,0024	0,4073	0,2123	640	0,4479	0,1750	0,0000	775	0,0001	0,0000	
510	0,0093	0,5030	0,1582	645	0,3608	0,1382	0,0000	780	0,0000	0,0000	
								$\Sigma$	21,37	21,37	21,37

# Coordinate tricromatiche xyz CIE 1931

Le componenti tricromatiche XYZ consentono di definire un luogo geometrico tridimensionale che fa corrispondere a ciascuna terna di valori XYZ oggettivi un certo colore percepito soggettivamente. E' importante precisare che la relazione non è biunivoca. Cioè, ad una terna XYZ corrisponde un certo colore, ma ad una certa sensazione di colore non corrisponde una ed una sola terna di componenti XYZ. Questo è causato dal fenomeno del **metamerismo**.

Un'equalizzazione metamERICA si verifica quando due luci appaiono dello stesso colore anche quando lo spettro che colpisce la retina è diverso. Ad esempio, la luce di una lampada al sodio a BP appare gialla in quanto lo spettro emesso è quasi monocromatico a 589 nm. La stessa sensazione di giallo può essere evocata mescolando in proporzioni opportune una luce che appare verde ed una che appare rossa.

Il metamerismo si verifica perché la sensazione di colore nasce dall'attività di gruppi di coni diversi che, alla fine, determina la sensazione di un certo colore. La stessa attività può essere destata da una radiazione monocromatica o da uno spettro complesso. Il senso di peso nella mano è lo stesso se lo provoca un oggetto di 1 kg o 2 oggetti da ½ kg.

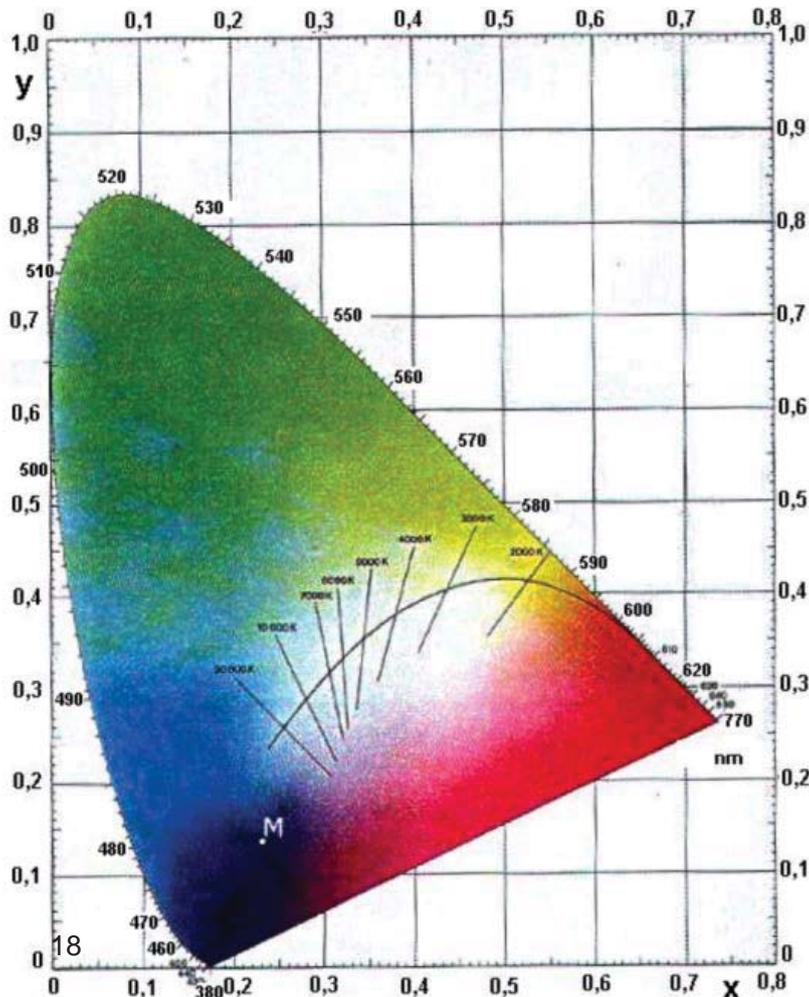
Per ridurre la possibile rappresentazione 3D ad una rappresentazione 2D, la CIE introdusse le **coordinate tricromatiche xyz** con le trasformazioni seguenti:

$$x = X/S ; \quad y = Y/S ; \quad z = Z/S \quad \text{dove} \quad S = X + Y + Z$$

Siccome risulta  $x + y + z = 1$ , è possibile una rappresentazione 2D in (x, y) in quanto per la terza coordinata si ha implicitamente  $z = 1 - (x + y)$ .

## Diagramma cromatico o "triangolo dei colori" CIE 1931

Ogni punto dell'area colorata corrisponde ad un colore reale di coordinate (x,y). La curva campanulare perimetrale è il luogo dei colori puri, ovvero delle radiazioni monocromatiche di cui sono indicate le lunghezze d'onda corrispondenti. I punti del segmento che congiunge le radiazioni ai due estremi del campo visibile (380 e 780 nm), detto linea del porpora, non corrispondono a colori puri. La linea curva rappresenta i colori che evoca il corpo nero alle diverse temperature (indicate da 2000 a 20000 K). I segmenti che la tagliano sono punti di colore che appaiono della stessa tonalità dei punti di intersezione (isoprossimali).



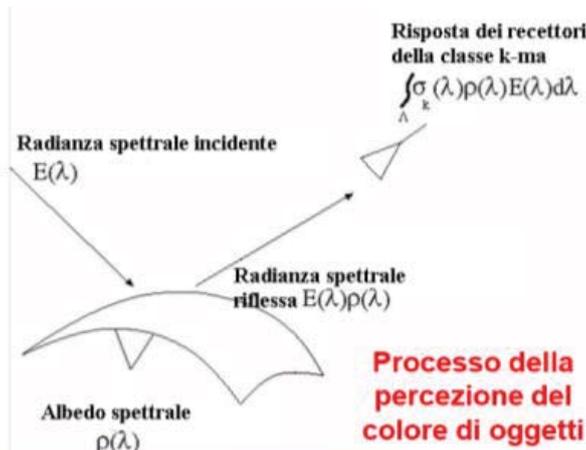
# Esempio di calcolo del punto di colore della luce di una lampada a scarica a vapori di mercurio secondo CIE 1931

Per facilità di calcolo si consideri che la potenza raggianti per unità di superficie più importante sia concentrata intorno a quattro lunghezze d'onda. I valori delle funzioni colorimetriche sono tratti dalla relativa tabella. Gli integrali per X, Y e Z diventano semplici somme di prodotti.

$\lambda$ nm	$w(\lambda)$ mW/cm <sup>2</sup>	$\underline{x}$	$\underline{y}$	$\underline{z}$	
408	1	0,035	0,0009	0,093	$X = 0,512$ $Y = 0,306$ $Z = 1,424$  $x = X/S = 0,228$  $y = Y/S = 0,137$  $z = Z/S = 0,635$
436	0,8	0,332	0,0242	1,648	
546	0,1	0,374	0,983	0,0125	
577	0,2	0,872	0,897	0,0017	

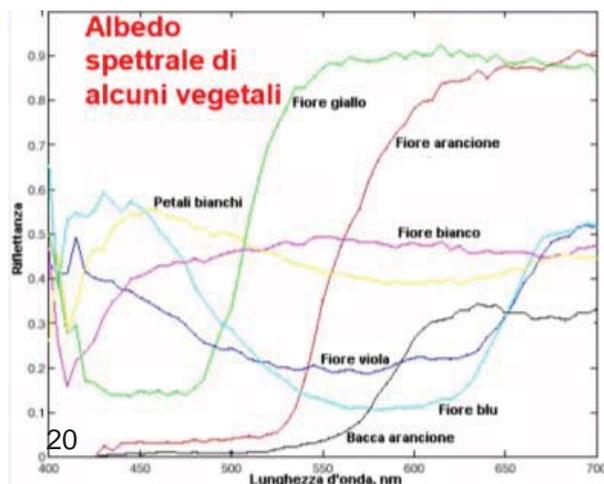
La somma  $x + y + z = 1$ . Con le coordinate  $x$  e  $y$  calcolate si individua il punto di colore M rappresentato nel precedente diagramma cromatico.

## Resa dei colori



E' la capacità di una sorgente luminosa di riprodurre **“fedelmente”** i colori degli oggetti illuminati.

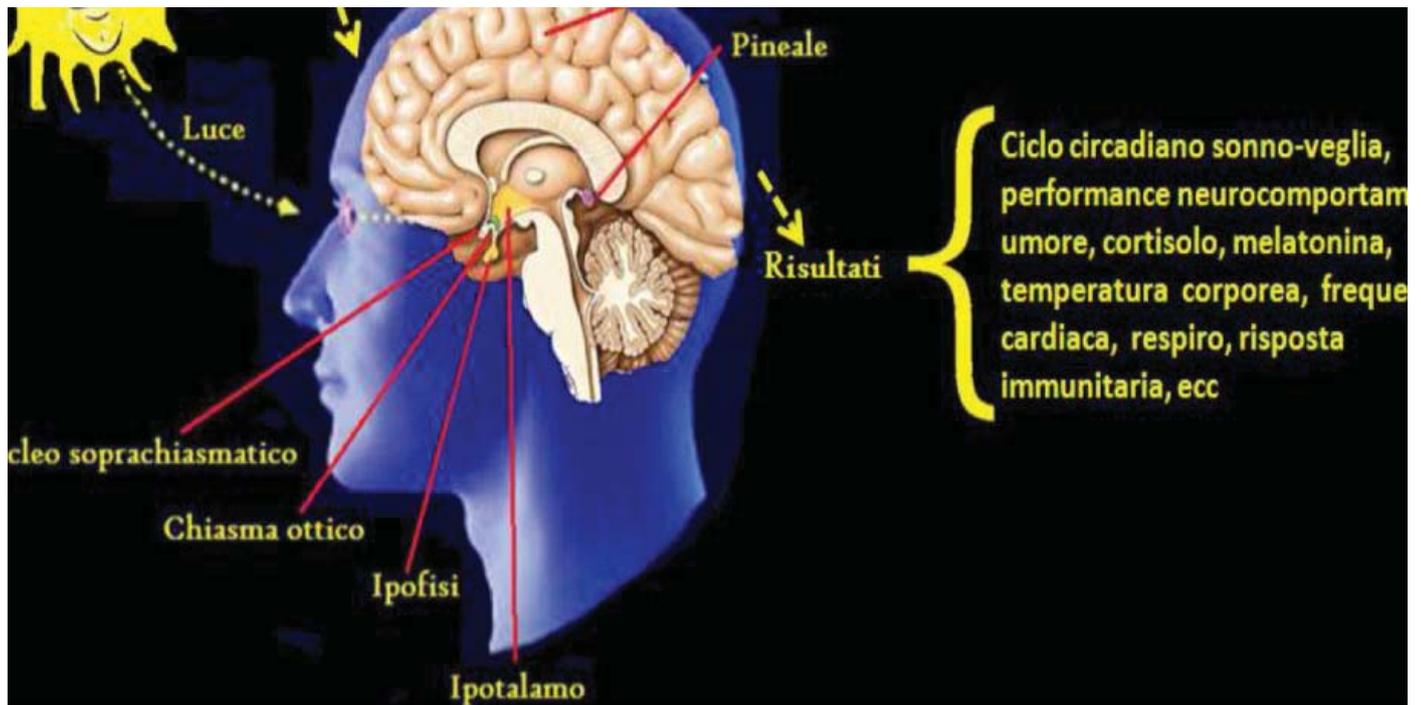
La percezione del colore di un oggetto dipende dallo **spettro della sorgente illuminante**, dalle **proprietà riflettenti** della superficie dell'oggetto in funzione della lunghezza d'onda (albedo) e dall'**elaborazione periferica e centrale** della stimolazione della retina. Il processo è sintetizzato nella figura a fianco in alto.



La figura a lato in basso riporta la riflettanza (albedo) di vari vegetali. Si noti che i due bianchi corrispondono a riflettanze a banda larga. Il giallo e l'arancione presentano riflettanze pronunciate nel campo delle lunghezze d'onda più elevate. Le riflettanze del viola e del blu hanno un massimo relativo alle lunghezze d'onda più basse.

Se appaiono colorati come è indicato nella figura, probabilmente i vegetali sono stati illuminati con una luce a banda larga quale è la luce naturale diurno....

## EFFETTI NON VISIVI DELLE SORGENTI LUMINOSE SULL'UOMO

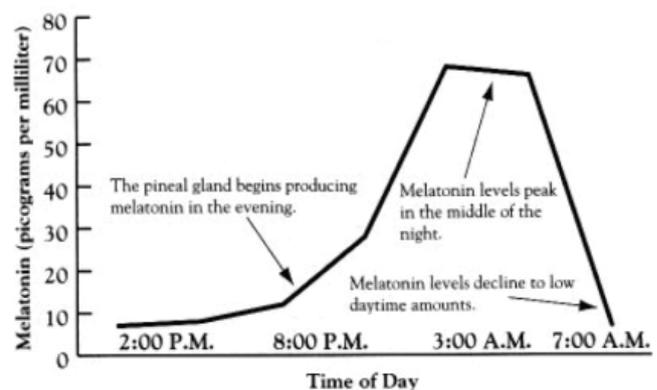


21

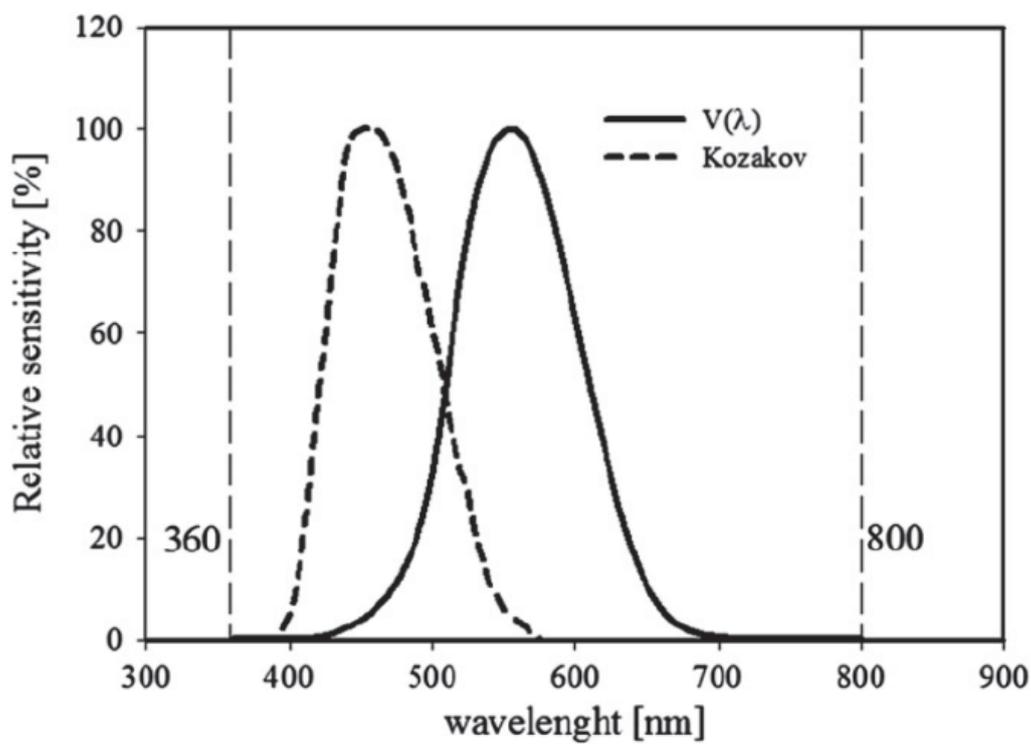
Gli stimoli luminosi influiscono sul ciclo circadiano attraverso la soppressione di melatonina.

Le caratteristiche principali sono:

- Il dosaggio
- L'orario del giorno
- La distribuzione spettrale dello stimolo

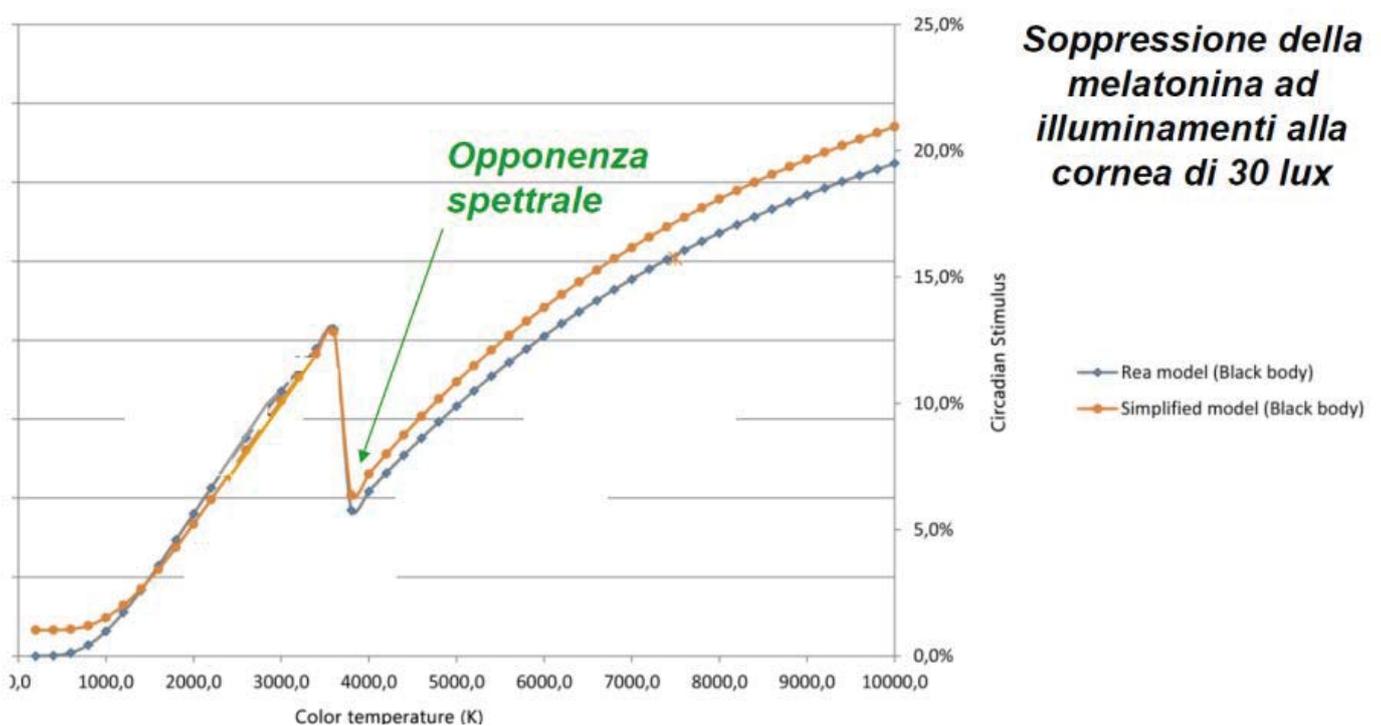


22



$$C_{VF} = \int_{360}^{800} \Phi_{e\lambda} V_{Fn} C(\lambda) d\lambda, \quad [-] \quad V_{VF} = \int_{360}^{800} \Phi_{e\lambda} V_{Fn} V(\lambda) d\lambda = \frac{\int_{360}^{800} \Phi_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda}{\int_{360}^{800} \Phi_{e\lambda} d\lambda}, \quad [-]$$

23



24

Fattore di azione circadiano:  $a_{cv} = \frac{C_{VF}}{V_{VF}}, [-]$

