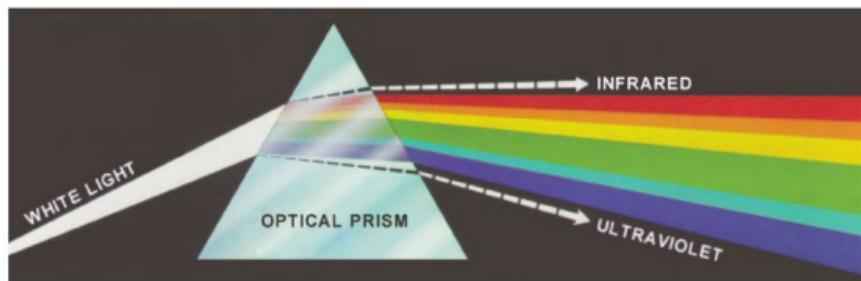


15-11-2022

COLORE

La risposta dell'occhio alla lunghezza d'onda del visibile è il **colore**.

E' semplice confrontare un colore con un altro ma non è possibile descriverlo in maniera assoluta (come la temperatura un termometro).



Se una luce bianca colpisce un **prisma ottico**, da esso escono diverse luci colorate creando così la **RIFRAZIONE**. Quest'ultima riguarda anche *onde meccaniche, acustiche* e oltre quelle ottiche.

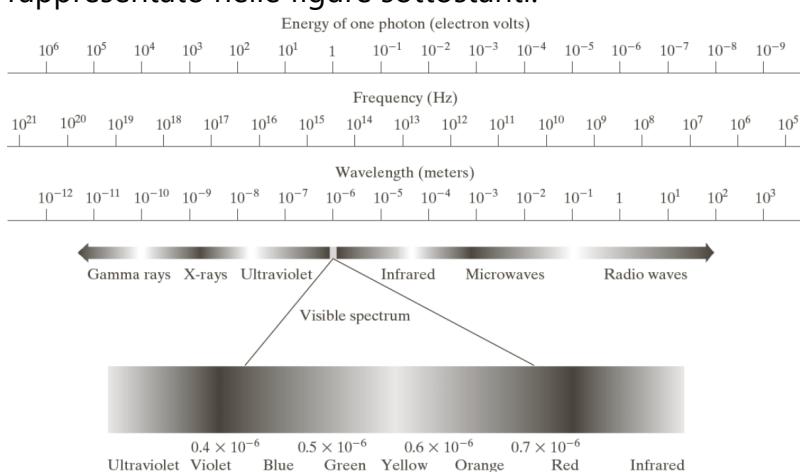
La luce bianca è costituita da onde elettromagnetiche elementari, primitive, semplici.

Tramite la rifrazione si riesce a mostrare ogni singola componente della luce bianca.

L'idea è: un'onda viaggia nell'aria, incontra il prisma, lo attraversa e se c'è rifrazione avviene una deviazione e separazione delle varie onde. Tutto questo dipende dal reticolo cristallino dell'oggetto attraversato e dalla superficie di separazione fra i 2 mezzi.

Luce visibile

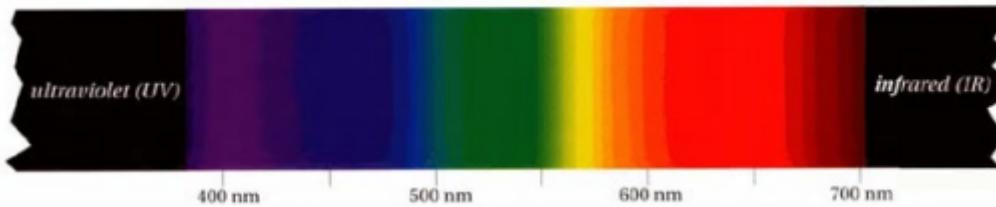
L'occhio riesce a vedere solo ad un determinato range di lunghezze d'onda ed esso è rappresentato nelle figure sottostanti.



Una lunghezza si può misurare in 3 modi diversi per descrivere la stessa cosa.

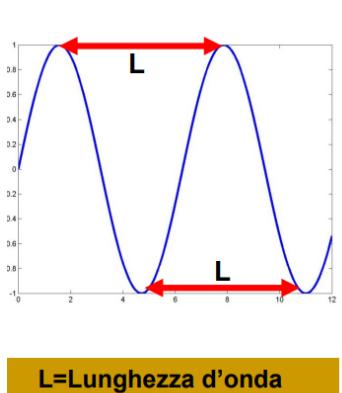
Lunghezza d'onda e frequenza è inversamente proporzionale.

Lunghezza d'onda alta (metri) = frequenza(Hertz) bassa e viceversa



Lo spettro elettromagnetico è **continuo**, quindi non è quantizzata/campionato.

Lunghezza d'onda



L=Lunghezza d'onda

Lung. in nanometri	Tipo radiazione
$10^{17} - 10^{13}$	Osc.elettriche
$10^{13} - 10^9$	Onde radio
$10^9 - 10^6$	Micro-onde
$10^6 - 10^3$	Infrarosso
$10^3 - 10^2$	Visible
$10^2 - 10$	Ultravioletto
$10 - 10^{-3}$	Raggi X
$10^{-3} - 10^{-7}$	Raggi gamma e cosmici

Un nanometro= 1 metro / 1.000.000.000

La lunghezza d'onda è la linea rossa L rappresentata in figura.

Esse sono periodiche, quindi hanno infinite oscillazioni uguali.

Formalmente è la **distanza** che l'onda percorre nel tempo necessario per **compiere una singola oscillazione**.

Se chiamo v = velocità onda e T =periodo, la lunghezza d'onda λ allora: $\lambda = v \times T$

Per *Fourier* l'onda si può scomporre in somma di onde sinusoidali.

- L'occhio umano percepisce come colore di un oggetto quella luce che l'oggetto stesso riflette
- Il colore dipende dalla luce che l'oggetto riesce a riflettere.
- Ci sono oggetti che possono emettere luce proprie (lampadina). L'onda viene direttamente emessa, in questo caso.
- Un oggetto che riflette le lunghezze d'onda da 500 a 570 nm ed assorbe tutto il resto, sarà percepito come di colore verde. Le altre lunghezze d'onda le assorbe.

Descrizione assoluta di un colore

Per descrivere correttamente un colore servono **3 grandezze**:

- **RADIANZA**: cioè la quantità di luce emessa dalla sorgente luminosa. Ci sono elementi che hanno radianza nulla
- **LUMINANZA**: cioè la misure dell'energia percepita dall'utente, o da un sensore
- **BRILLANTEZZA**: è un valore soggettivo che indica la sensazione di colore

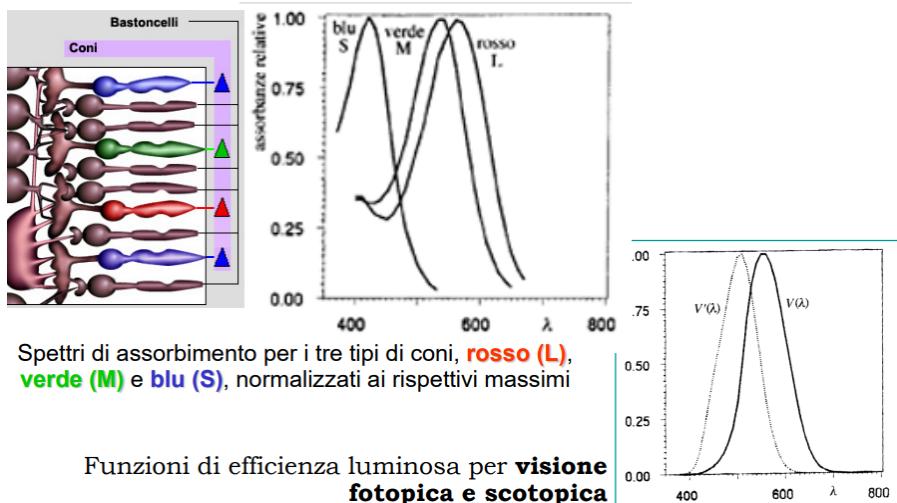
CONI

Nell'occhio ci sono 3 tipi di coni S, M ed L (short, medium, long) ed essi **rispondono ad un certo range** di lunghezze d'onda:

- TIPO **S**: Sensibili alle lunghezze d'onda corte (short, colori bluastri)
- TIPO **M**: Sensibili alle lunghezze d'onda medie (middle, colori verdastri)
- TIPO **L**: Sensibili alle lunghezze d'onda lunghe (long, colori rossastri)

Generalmente il colore percepito è un **mischuglio** fra i 3 coni ma, chiaramente, si può ottenere un colore anche mischiando meno lunghezze d'onda.

Spettro di assorbimento dei coni



TEORIA DEL TRISTIMOLO (YOUNG)

Si possono ottenere TUTTI i possibili colori mescolando 3 colori fondamentali. (3 onde elettromagnetiche con 3 lunghezze d'onda caratteristiche).

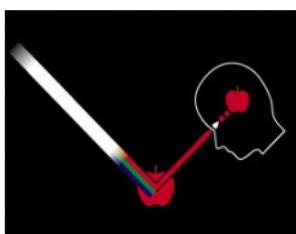
Questa ipotesi è FALSA se non *in prima approssimazione* perchè non posso rappresentare TUTTI i colori ma una buona quantità.

Quindi avendo un'approssimazione con un piccolo errore e con il tristimolo posso avere un colore molto vicino a quello reale.

Tutto quello che può influenzare la sensazione di colore:

A differenza delle misure di lunghezza o di peso, **non esiste una scala fisica per misurare il colore**.

Il colore è una questione di **percezione** o di **interpretazione soggettiva**.



Il riconoscimento dei colori da parte dell'uomo è basato sulla **luce**, sugli **oggetti** che riflettono la luce e sugli **occhi** e il **cervello** dell'osservatore.

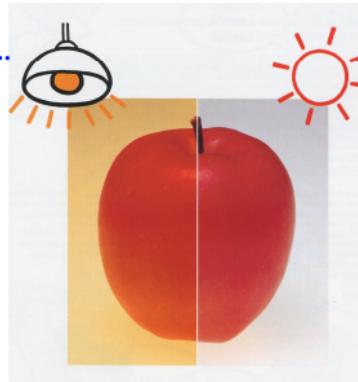
Differenze di sorgenti luminose
luce solare, lampade ad incandescenza, neon,...

Differenze di osservatore
sensibilità, vista,...

Differenze di dimensioni
Effetto area = colori che ricoprono vaste superfici appaiono più luminosi e vivaci

Differenze di sfondo
Effetto contrasto = colori appaiono più cupi se lo è sfondo scuro

Differenze di direzione
Caratteristiche direzionali di alcune vernici
costanza degli angoli di osservazione e di illuminazione



In particolare:

- **Differenze di direzione:** tipo il *back* di un telefono (senza cover, es: P20 lite). Si chiamano **COLORI CANGIANTI**, cioè che cambiano in base alla direzione di osservazione.
- Queste caratteristiche *dovrebbero essere fissate* per misurare il colore in maniera univoca.

Composizione del colore

La Teoria del tristimolo viene descritta dalla **SINTESI ADDITIVA**:

- un modo per comporre i colori partendo da un sottoinsieme di tutti quanti;
- il colore di default è il **NERO** (0,0,0);
- per esempio: il monitor funziona con la sintesi additiva, cioè:
 - quando è spento si vede nero, i cristalli liquidi non emettono luce.
 - si vede un colore quando quei cristalli e mettono della luce. Si sommano le luci che si devono visualizzare ed emettono il colore derivante dalla somma.

Invece, al contrario, la **SINTESI SOTTRATTIVA**:

- il colore di default è il **BIANCO** (255,255,255);
- per esempio: la stampante che stampa sul bianco. In base a quanta quantità di liquido (**PIGMENTI**) viene messo sul foglio.
- Si ha la produzione di *sensazione di colore* sottraendo lunghezze d'onda all'onda 'massima'(cioè il bianco).

L'idea è di far funzionare la descrizione sopra della sintesi additiva con l'**RGB**, in particolare con le lunghezze d'onda:

- **Rosso** 700.0 nm;
- **Verde** 546.1 nm;
- **Blu** 435.8 nm.

Questi valori si avvicinano ai picchi di assorbimento dei coni dell'occhio, quindi sono quasi simili al funzionamento biologico

SPAZIO DI COLORE XYZ

Quindi, scelti questi valori, si ha un **modo di misurare il colore** in base a **3 parametri**.

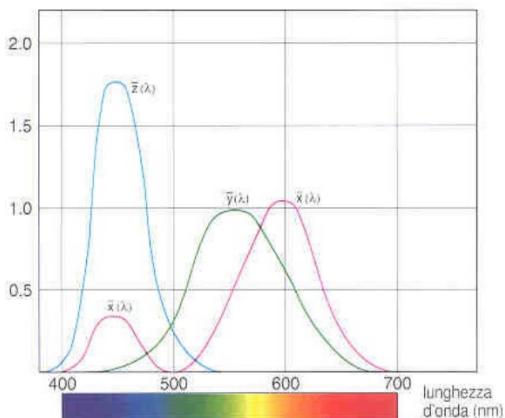
Quindi una terna identifica un colore ed essa viene identificata con X, Y e Z che diventa uno **SPAZIO DI COLORE**.

La terna viene calcolata nel seguente modo:

$$X = \int_{380}^{780} L_{e,\lambda} \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_{380}^{780} L_{e,\lambda} \bar{y}(\lambda) d\lambda = \int_{380}^{780} L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

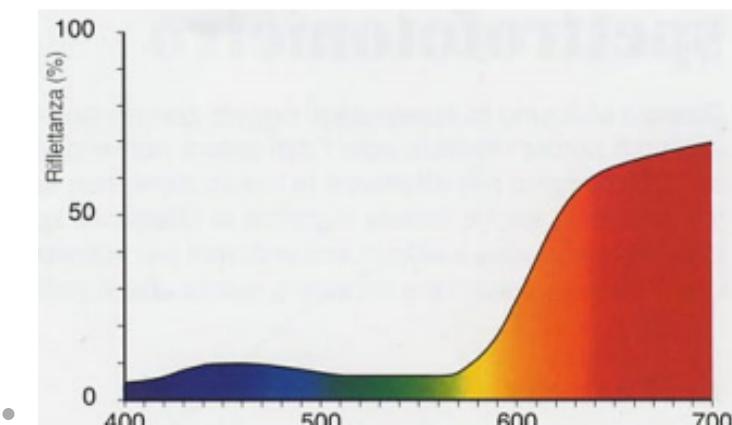
$$Z = \int_{380}^{780} L_{e,\lambda} \bar{z}(\lambda) d\lambda$$



Descrizione delle formule

Le formule:

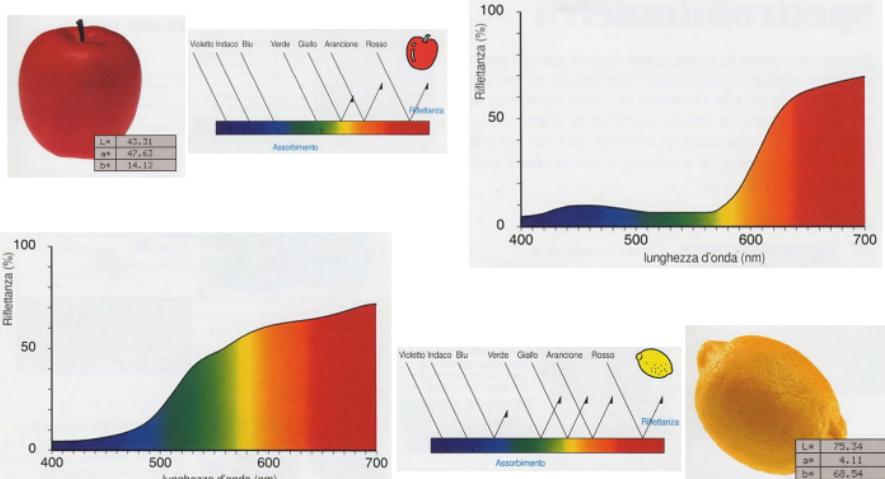
- *Quanto devo pesare una certa lunghezza rispetto alle altre 2?*
- Calcolano le **arie sottese** da una certa curva;
- Sono funzioni peso;
- Tutte le lunghezze d'onda dipendono da λ che indica proprio il "peso"
- L è lo **spettro delle onde elettromagnetiche** di cui voglio descrivere il **colore**.
- Gli estremi 380 e 780 dell'integrale è il **range della luce visibile**
- Una generica L è così fatta:



- L'integrale della L è l'area presente sotto la curva.

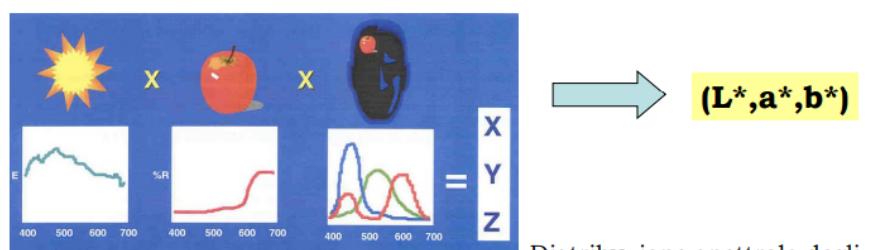
- Per esempio: l'integrale del colore nero puro è 0 perchè comunque corrisponde all'asse delle x, cioè lambda.
- \bar{x} è una funzione peso che serve per pesare più o meno certi range dello spettro. In particolare:
 - \bar{x} pesa di più il rosso;
 - \bar{y} pesa di più il verde;
 - \bar{z} pesa di più il blu.

Spettro di altri oggetti:



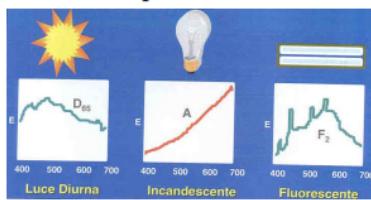
Nel caso della mela rossa, molte lunghezze d'onda relative al rosso vengono riflesse, appunto perchè la mela riflette molto bene quel colore visto che ha la superficie di quel colore.

Dati colorimetrici



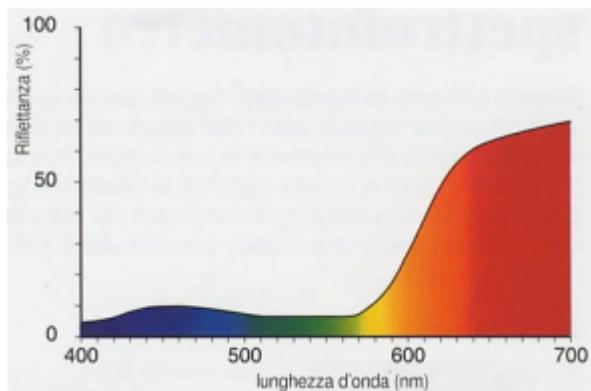
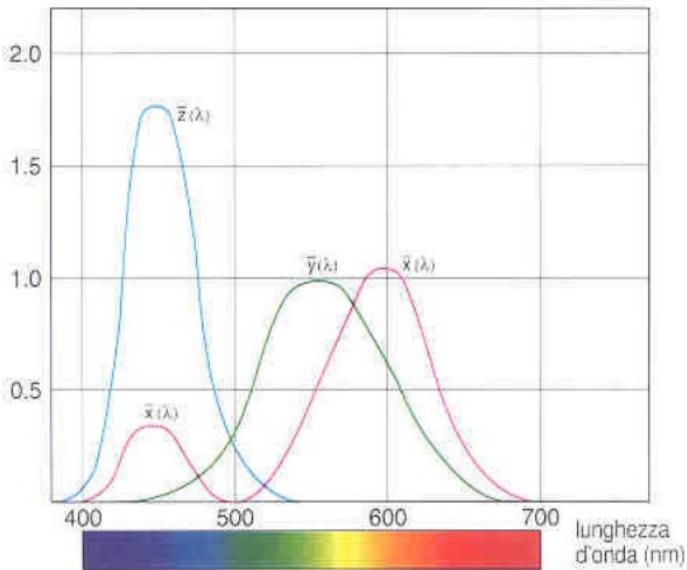
1. Distribuzione energetica della luce che lo illumina
2. Curva spettrale dell'oggetto colorato,
3. Sensibilità al colore dell'occhio umano.

Distribuzione spettrale degli illuminanti più diffusi:



(L, a, b) è uno spazio di colore che al momento non ci interessa

Funzionamento funzioni peso



Riprendiamo la formula della Z :

$$Z = \int_{380}^{780} L_{e,\lambda} \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

- Quando calcolo la Z , prendo la funzione di \bar{z} e lo moltiplico per la funzione $L_{e,\lambda}$;
- la \bar{z} altera la L . La Z ha valori alti quando in L ci sono contributi alti del **blu**.
- Z dice: "**quanto blu c'è**" azzerando lì dove non c'è blu, ovvero nella parte più a centro-destra del grafico.

Riprendiamo la formula della Y :

$$Y = \int_{380}^{780} L_{e,\lambda} \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

- La funzione Y va a **sopprimere** le lunghezze d'onda in un determinato range (*quando si arriva ai margini di \bar{y}*)

La L (l'onda dell'oggetto) si porta dietro tutto mentre \bar{x} , \bar{y} e \bar{z} selezionano le onde che ci interessano dalla L . (appunto, sono funzioni peso)

ILLUMINANTE

Ma chi illumina l'oggetto?

La descrizione del colore di un oggetto dipende dall'illuminante.

- Si suppone che l'oggetto che illumina non è interessante (nelle formule analizzate prima).

In base a queste considerazioni, allora in base all'illuminante che si sceglie di utilizzare, si ottengono spazi **XYZ** differenti (si è influenzati da una luce esterna).

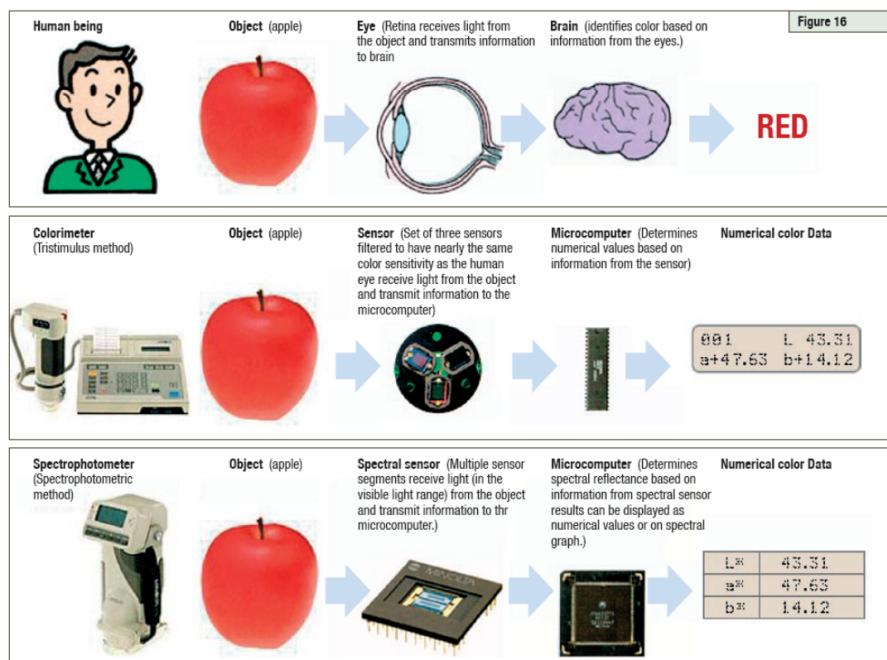
Per illuminante si intende:

- Energia radiante con distribuzione spettrale di energia relativa definita nel campo di lunghezza d'onda capace di influenzare la visione del colore degli oggetti.

La teoria del tristimolo è falsa perchè comunque non è possibile rappresentare tutti i colori con soli 3 lunghezze d'onda ma **ne servono molte di più**.

- L'occhio biologico non può dare una terna come risultato dopo un'osservazione del colore di un oggetto.
- I raggi riflessi dall'oggetto vanno sulla retina e, con i bastoncelli, si attivano le cellule del sistema nervoso che fanno percepire il colore.

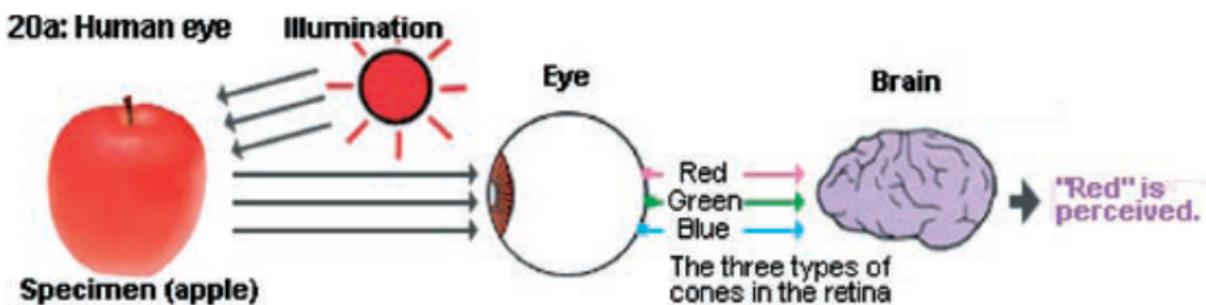
Visione e misura del colore



Strumenti fisici per misurare accuratamente i colori:

- COLORIMETRO:** Sfrutta la teoria del tristimolo a pieno. E' capace di **rilevare SOLO 3 lunghezze d'onda**, quindi ha sensori relativi ad esse. Sulla base di quella produce l'onda risultante. Riceve uno spettro come quello di L .
- SPETTROFOTOMETRO:** Non acquisisce solo 3 lunghezze d'onda ma tutto lo spettro completo quindi si hanno contributi di moltissime lunghezze d'onda:
 - Nel processore si calcolano **XYZ, Lab** o altri spazi di colore;
 - Il sensore è spettrale** (cioè prende in considerazione tutto lo spettro) piuttosto che averne solo 3;
 - Esso è più costoso e accurato.

Lo strumento della misurazione del colore **emette una luce con uno spettro specifico** sull'oggetto sul quale viene poggiato, quindi viene calcolato il colore in base ad una specifica sorgente di una determinata area.



- Non si ha una sorgente luminosa controllata, quindi si introducono altri problemi perché dipende da dove ci si trova.

La sorgente luminosa è detta **ILLUMINANTE** e sta a significare una rappresentazione standard di quella che è una specifica sorgente luminosa.

Quindi non si tratta proprio di **una luce luminosa** ma di una sua **descrizione**.

Illuminante D65

E' la descrizione standardizzata della sorgente luminosa che emette una luce come quella emessa dal sole a mezzogiorno all'equatore con cielo sgombro.

- Per vedere la **variazione di un illuminante si guarda il BIANCO**. Cambiare illuminante cambia anche XYZ quindi se li devo specificare devo specificare anche l'illuminante utilizzato.
- 2 colori diversi possono avere la stessa terna quando cambia illuminante.
- Per **calibrare** tutti i colori si guarda il bianco per vedere se l'illuminante è bianco o di altro colore che può variare in base all'ambiente in cui ci si trova.
- Ciò che si osserva è influenzato fortemente dalla sorgente luminosa.
Quando si misura XYZ si deve esplcitare l'illuminante (in genere il *D65*)

Illuminanti CIE: Gli illuminanti colorimetrici *A*, *B*, *C* e *D65* sono quelli le cui distribuzioni spettrali di energia relativa sono definite dalla CIE.

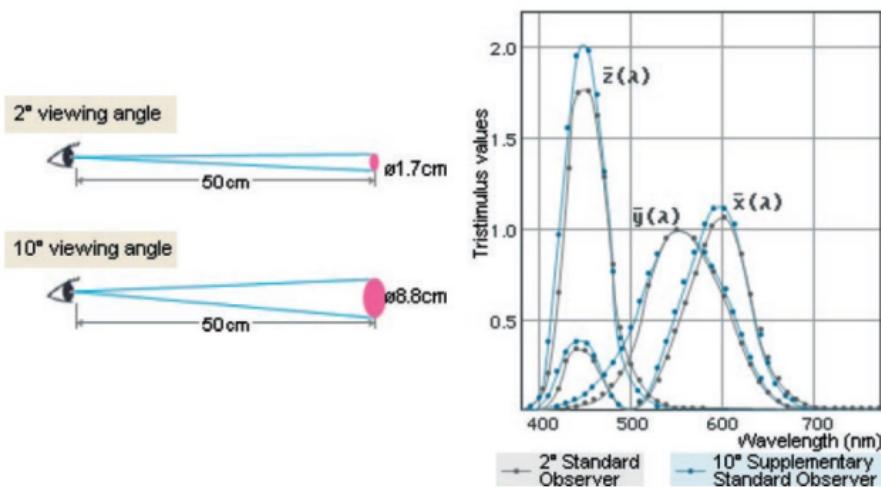
Tabella illuminanti

Nome	CIE 1931 2°		CIE 1964 10°		CCT (K)	Hue	Note
	x ₂	y ₂	x ₁₀	y ₁₀			
A	0.44757	0.40745	0.45117	0.40594	2856		Incandescente / Tungsteno
B	0.34842	0.35161	0.34980	0.35270	4874		{obsoleta} luce diretta del sole a mezzogiorno
C	0.31006	0.31616	0.31039	0.31905	6774		{obsoleta} Average / North sky Daylight
D50	0.34567	0.35850	0.34773	0.35952	5003		Horizon Light. ICC profile PCS
D55	0.33242	0.34743	0.33411	0.34877	5503		Mid-morning / Mid-afternoon Daylight
D65	0.31271	0.32902	0.31382	0.33100	6504		Luce diurna a mezzogiorno: Televisione , sRGB
D75	0.29902	0.31485	0.29968	0.31740	7504		North sky Daylight
E	1/3	1/3	1/3	1/3	5454		Equal energy
F1	0.31310	0.33727	0.31811	0.33559	6430		luce diurna fluorescente
F2	0.37208	0.37529	0.37925	0.36733	4230		Luce Fluorescente bianca fredde
F3	0.40910	0.39430	0.41761	0.38324	3450		luce fluorescente bianca
F4	0.44018	0.40329	0.44920	0.39074	2940		Warm White Fluorescent
F5	0.31379	0.34531	0.31975	0.34246	6350		luce diurna fluorescente
F6	0.37790	0.38835	0.38660	0.37847	4150		Fluorescente bianco chiaro
F7	0.31292	0.32933	0.31569	0.32960	6500		D65 simulatore, simulatore di luce diurna
F8	0.34588	0.35875	0.34902	0.35939	5000		D50 simulator, Sylvania F40 Design 50
F9	0.37417	0.37281	0.37829	0.37045	4150		Cool White Deluxe Fluorescent
F10	0.34609	0.35986	0.35090	0.35444	5000		Philips TL85, Ultralume 50
F11	0.38052	0.37713	0.38541	0.37123	4000		Philips TL84, Ultralume 40
F12	0.43695	0.40441	0.44256	0.39717	3000		Philips TL83, Ultralume 30

TABELLA (non da esame) : La descrizione dell'energia emessa (ha anche un certo colore) è espressa in kelvin

- x_{10}, y_{10} indica l'angolo di visione di 10°;
- x_2, y_2 indica l'angolo di visione di 2°.
- Per angolo si intende l'area che considero guardando un oggetto.

| Es: se ho un muro davanti guardo solo un'area di 2° o 10° di esso.



Temperatura illuminante

- D65 ha temperatura 6505 Kelvin.
- il corpo nero (ideale, non esistente) assorbe tutta la radiazione elettromagnetica che riceve.
- Il corpo nero assorbe tutto e quindi accumula energia. Ad un certo punto il materiale produce passaggi di elettroni. Il corpo nero inizia ad emettere calore e una certa luce. (come la lampadina ad incandescenza, dove il metallo assume energia e illumina). La luce emessa dipende dalla temperatura del corpo nero.
- La temperatura è la luce che emette quando un corpo nero si trova alla temperatura determinata.

Esempi:

Figure 22b: Fluorescent Illuminants
(recommended by JIS for measurements)

4 F6: Cool white

5 F8: Daylight

6 F10: Three narrow band daylight white

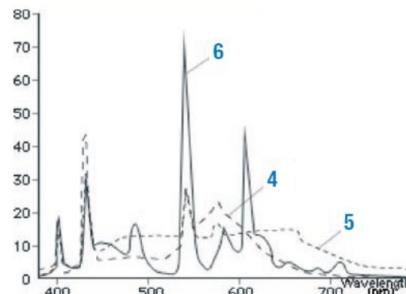
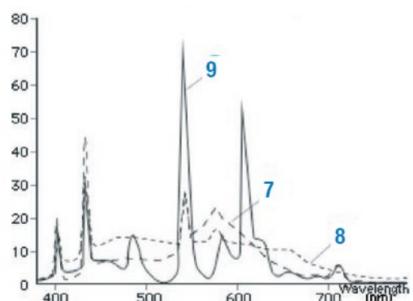


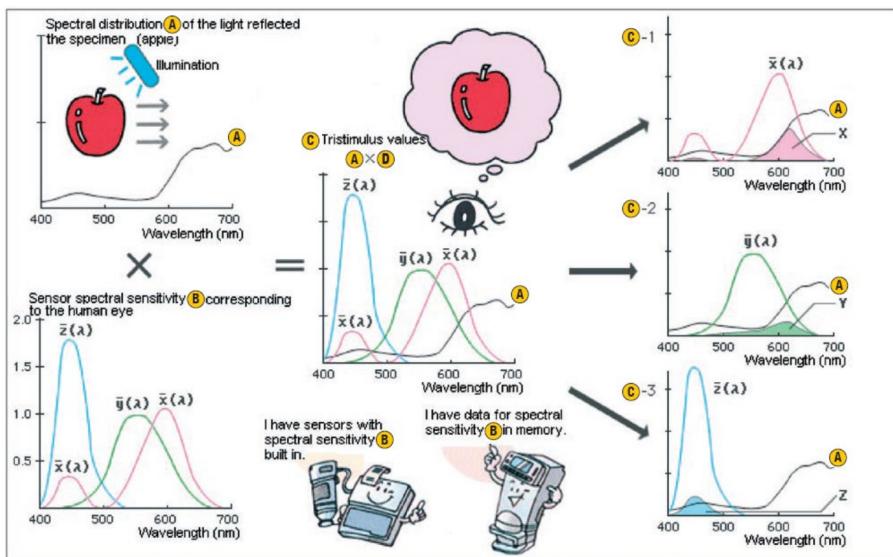
Figure 22c: Fluorescent Illuminants
(recommended by CIE for measurements)

7 F2: Cool white

8 F7: Daylight

9 F11: Three narrow band cool white

Riassunto in generale



OSSERVATORI

Rispetto al 1931, nel 1964 si è deciso di variare l'angolo di visione e le funzioni peso delle componenti X, Y e Z.

Infatti:

- Nel 1931 l'angolo di visione era 2° ;
- Nel 1964 l'angolo di visione diventa 10° .

Di conseguenza variano anche le formule per il calcolo di X, Y e Z diventando:

XYZ Tristimulus Values (CIE 1931)

Tristimulus values determined based on the color matching functions $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ and $\bar{z}(\lambda)$ defined in 1931 by CIE; also referred to as 2° XYZ tristimulus values. They are suitable for a viewing angle of 4° or less and are defined for reflecting objects by the following formulas:

$$X = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$
$$Y = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$
$$Z = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$
$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda)}$$

where
 $S(\cdot)$: Relative spectral power distribution of the illuminant
 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$: Color-matching functions for CIE 2° Standard Observer (1931)
 $R(\cdot)$: Spectral reflectance of specimen

X₁₀ Y₁₀ Z₁₀ Tristimulus Values (CIE 1964)

Tristimulus values determined based on the color matching functions $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ and $\bar{z}(\lambda)$ defined in 1964 by CIE; also referred to as 10° XYZ tristimulus values. They are suitable for a viewing angle of more than 4° and are defined for reflecting objects by the following formulas:

$$X_{10} = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{x}_{10}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$
$$Y_{10} = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$
$$Z_{10} = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}_{10}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$
$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) d(\lambda)}$$

where
 $S(\cdot)$: Relative spectral power distribution of the illuminant
 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$: Color-matching functions for CIE 10° Supplementary Standard Observer (1964)
 $R(\cdot)$: Spectral reflectance of specimen

- Tra i 2 gruppi di formule cambiano solo \bar{x} \bar{y} \bar{z} chiamati \bar{x}_{10} \bar{y}_{10} \bar{z}_{10}
- Invece di L , si hanno 2 componenti: S ed R che sono **più generali**:
 - L si intende la **luce emessa** e basta;
 - S , **spettro dell'illuminante**;
 - R **spettro di riflessione** (capacità dell'oggetto nel riflettere certe lunghezze d'onda).

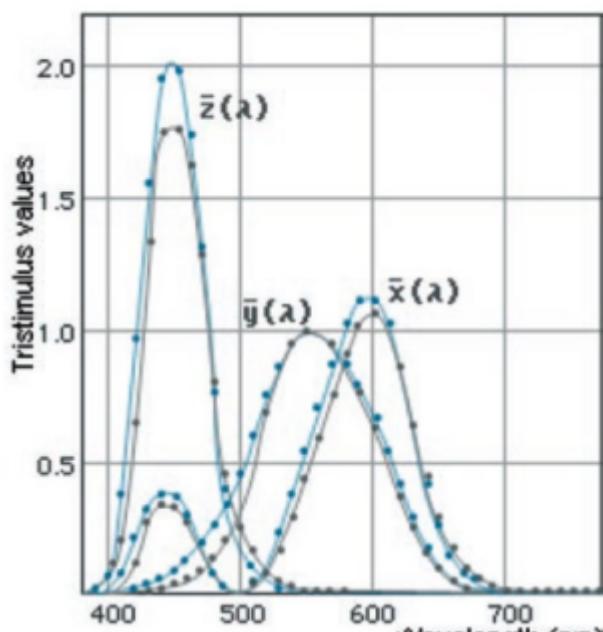
Ogni lunghezza d'onda di una funzione in che percentuale viene riflessa?

Se faccio prodotto fra S ed R ottengo proprio la L che avevo prima e in questo modo separo le due componenti.

- se R riflette tutto, allora la formula dipende solo da S .
- K è il valore di X , Y o Z che serve per **NORMALIZZARE** affinché sia compreso fra [0-100].
 - Nella K non compare la R .
 - Rappresenta **tutto quello che avviene rispetto al VERDE** quando la superficie riflette tutto.

STANDARD CIE 1931 - 1964

- Nel 1931 il CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) ha fissato le lunghezze d'onda standard per i tre colori primari:
Blue = 435,8 nm
Verde = 546,1 nm
Rosso = 700 nm
- Anche se nel 1964 i dati sperimentali hanno dimostrato che in realtà il valore reale è lievemente differente.
Blue = 445 nm
Verde = 535 nm
Rosso = 575 nm



- I nuovi valori di \bar{x} \bar{y} \bar{z} corrispondono circa ai picchi di \bar{x} \bar{y} \bar{z} precedenti.

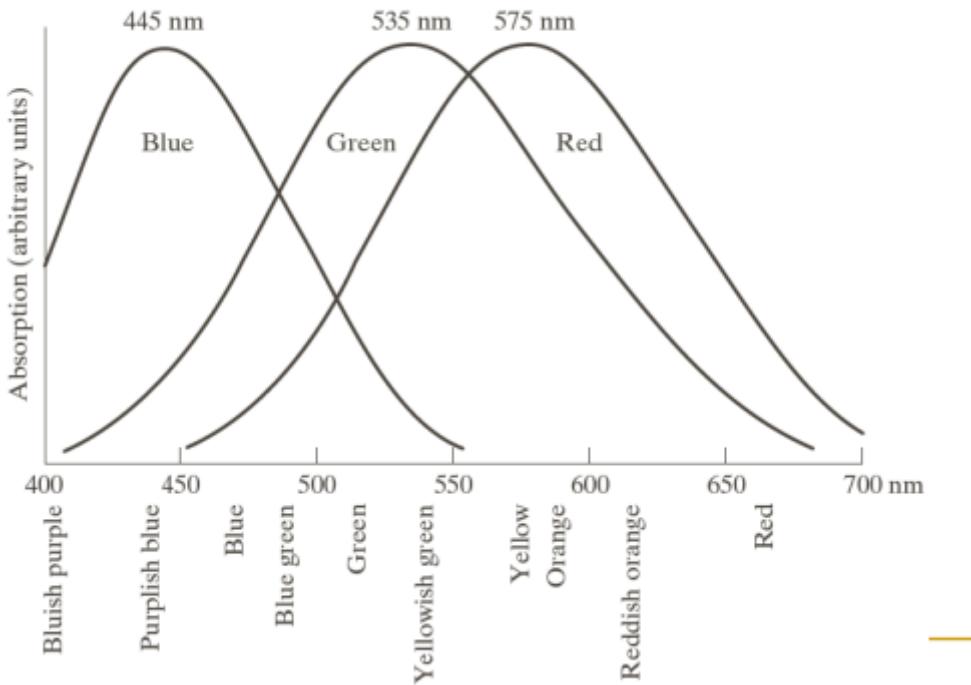


DIAGRAMMA CROMATICO CIE

Prima descrizione più esplicita di spazio di colore. Al variare delle componenti vedo tutti i colori.

Si definisce spazio di colori: si passa da $XYZ \rightarrow xyz$ dove

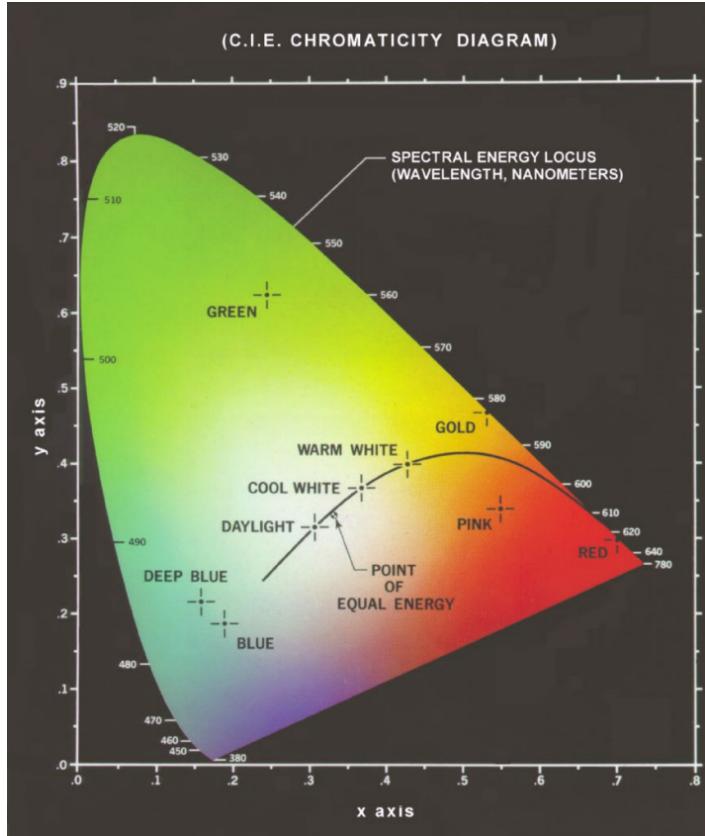
$x = \frac{X}{X+Y+Z}$ è la quantità di **rosso**;

$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$ è la quantità di **verde**;

$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$ è la quantità di **blu**.

- Se la somma $x + y + z = 1$ allora $z = 1 - (x + y)$
- quindi mi bastano 2 componenti per rappresentare xyz .
- per convenzione z si descrive usando le altre 2 componenti.

La rappresentazione grafica al variare di x e y da origine al diagramma cromatico CIE:



- Tutti i colori delle lunghezze d'onda visibili sono disposti lungo i bordi.
- Il punto di uguale energia è il bianco.
- Qualsiasi colore lungo il bordo non ha bianco, quindi è puro.
- dove x e y sono le **VERSIONI NORMALIZZATE** di X e Y (z non c'è bisogno di riportarlo).
- Nella parte colorata ci sono colori visibili. Tutto il resto rappresenta luce non visibile.
- Il punto di bianco è dove l'energia è uguale cioè $x = y = z$ sono *più o meno uguali. Più o meno* perchè dipende dall'illuminante e tendenzialmente si trova verso la zona "centrale" del diagramma.

Il diagramma è utile per sapere cosa succede se combino dei colori:

- Con 2 colori non si possono rappresentare tutti i colori. Con 2 posso ottenere solo 2 colori sulla retta che li congiunge.
- Quindi serve il terzo colore (la terza lunghezza d'onda).

- Se combino un 3° colore posso ottenere tutti i colori compresi nell'area del triangolo che forma.

Ecco perchè non si possono rappresentare tutti i possibili colori con 3 colori perchè dovrei includere tutto il diagramma e visto che esso non ha una forma geometrica definita, non posso racchiudere con un triangolo tutto il diagramma.

Se usassi un triangolo di punti più grande del diagramma stesso, andrei fuori da esso e considererei la luce non visibile dall'occhio (quindi andrei fuori range).

- *Esistono altri spazi di colore dove le componenti diventano più facili da rapportare rispetto alle sensazioni di colore che essi hanno.*

Riassunto dalle slide:

- Unendo **due colori** (due punti sul diagramma CIE) con una linea, tutti i **colori nella linea** sono quelli ottenibili mischiando i due colori.
- Unendo **un colore con il bianco** si ottengono tutti le **tonalità di quel colore**
- Unendo **tre colori** con un triangolo, **tutti i colori lungo il bordo e nel triangolo** sono quelli ottenibili mischiando quei tre colori.

COLOR GAMUT

- Unendo R, G e B si ottiene un triangolo che contiene tutti i colori che si possono produrre.
- Da notare che **il triangolo non copre tutta l'area**, quindi non tutti i colori si ottengono unendo R G e B. (*dimostrazione della falsità della teoria del tristimolo*)

