Luce e Colore

Lo spettro elettromagnetico e la percezione umana

Enrico Calore

INFN Sezione di Ferrara

Argomenti

Cos'è la luce?

Il termine **luce** (dal latino lux) è riferito alla porzione dello **spettro elettromagnetico** visibile dall'occhio umano, compresa tra 400 e 700 nanometri di lunghezza d'onda, ossia tra 790 e 434 THz di frequenza.

Ma fisicamente cos'è?

Cos'è la luce?

Il termine **luce** (dal latino lux) è riferito alla porzione dello **spettro elettromagnetico** visibile dall'occhio umano, compresa tra 400 e 700 nanometri di lunghezza d'onda, ossia tra 790 e 434 THz di frequenza.

Ma fisicamente cos'è?

Dualità:

- Onda (onda elettromagnetica)
- Particella (fotone)

Cos'è la luce?

Il termine **luce** (dal latino lux) è riferito alla porzione dello **spettro elettromagnetico** visibile dall'occhio umano, compresa tra 400 e 700 nanometri di lunghezza d'onda, ossia tra 790 e 434 THz di frequenza.

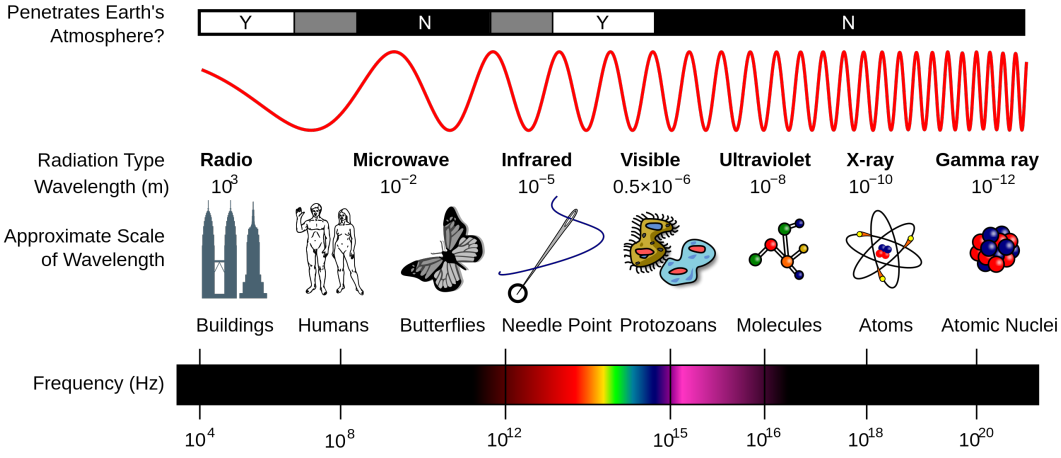
Ma fisicamente cos'è?

Dualità:

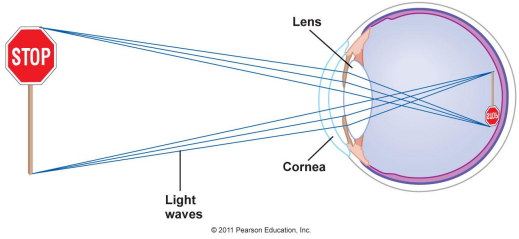
- Onda (onda elettromagnetica)
- Particella (fotone)

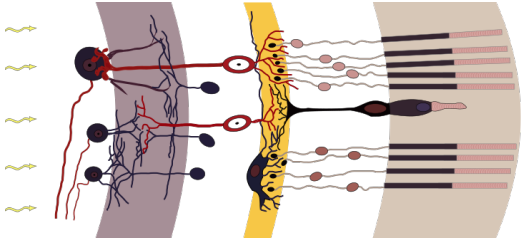
Non proprio l'una, né l'altra:
`https://www.youtube.com/watch?v=pGyXyc5mexk`

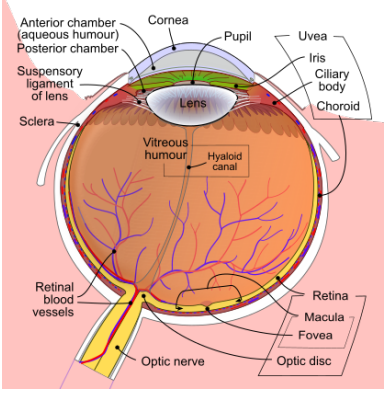
Lo Spettro Elettromagnetico



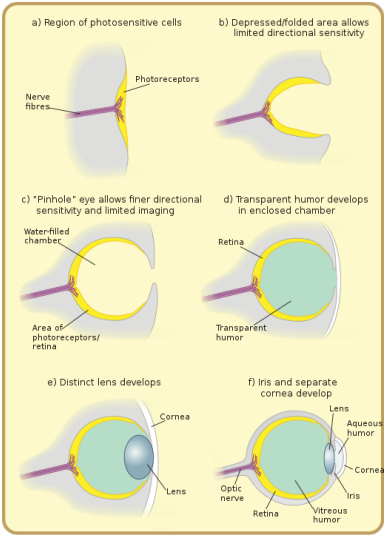
Come riusciamo a percepire la luce?





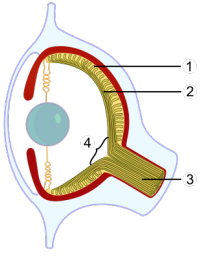


Come riusciamo a percepire la luce?

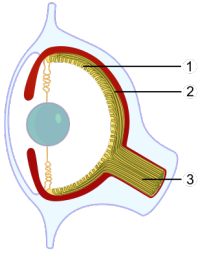


Evoluzione degli occhi

Vertebrati:



Polpi / Piovre:



Due percorsi diversi dell'evoluzione che hanno portato a strutture quasi identiche.

Nel punto dove il nervo ottico entra nell'occhio non abbiamo recettori.

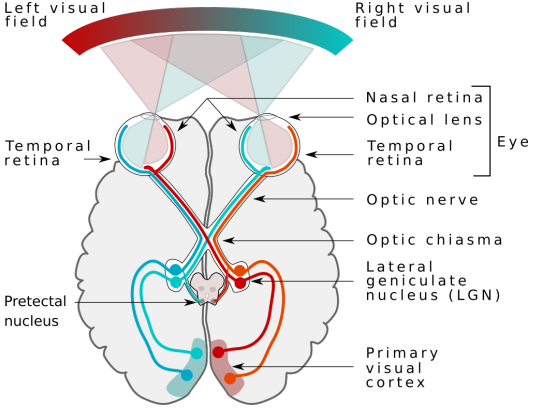
Comprite l'occhio sinistro; con l'occhio destro fissate il punto a sinistra; poi avvicinatevi o allontanatevi...

Nel punto dove il nervo ottico entra nell'occhio non abbiamo recettori.

Comprite l'occhio sinistro; con l'occhio destro fissate il punto a sinistra; poi avvicinatevi o allontanatevi...

...come mai non ve ne eravate mai accorti?

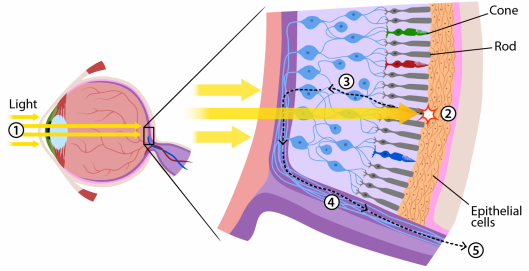
Human Visual System

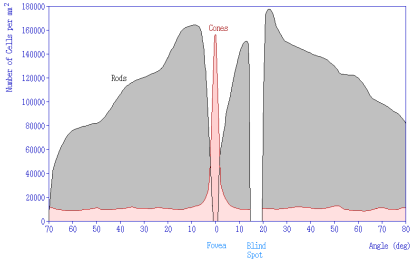


Quello che "vediamo" non è semplicemente quello che viene rivelato dai recettori sulla retina, il sistema visivo è molto più complesso.

Argomenti

Diversi recettori con diverse sensibilità





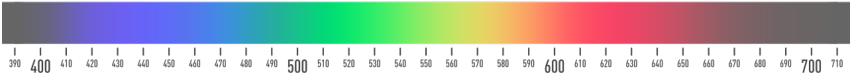
Esistono recettori diversi, non uniformemente distribuiti sulla retina:

- **bastoncelli**, più numerosi e sensibili
- **coni**, di diversi tipi, con sensibilità diverse per diverse porzioni dello spettro visibile.

Ma invece il colore cos'è?

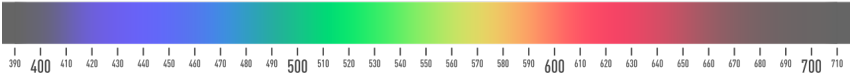
Ma invece il colore cos'è?

Come percepiamo le luci monocromatiche:



Ma invece il colore cos'è?

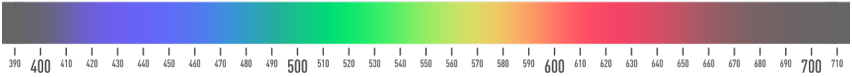
Come percepiamo le luci monocromatiche:



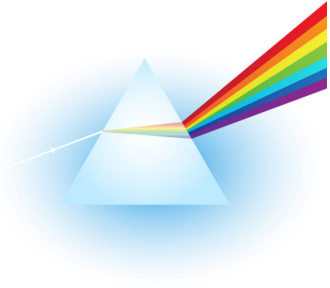
Ma in natura solitamente siamo esposti
a luci monocromatiche?

Ma invece il colore cos'è?

Come percepiamo le luci monocromatiche:

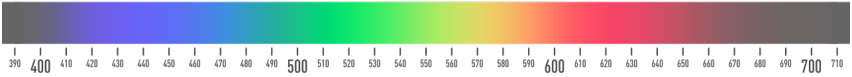


Ma in natura solitamente siamo esposti
a luci monocromatiche?



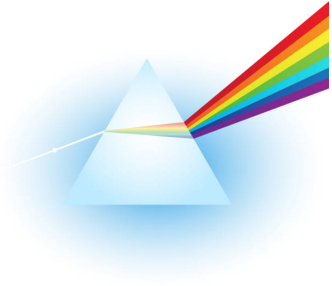
Ma invece il colore cos'è?

Come percepiamo le luci monocromatiche:



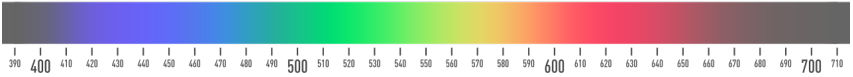
Ma in natura solitamente siamo esposti a luci monocromatiche?

Se vediamo un oggetto rosso è perché riflette una luce monocromatica?

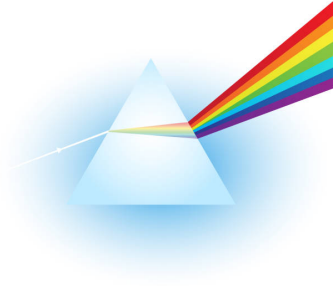


Ma invece il colore cos'è?

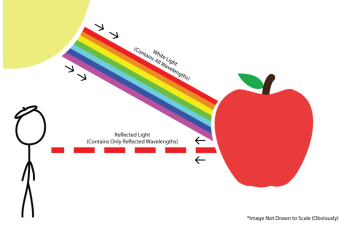
Come percepiamo le luci monocromatiche:



Ma in natura solitamente siamo esposti a luci monocromatiche?

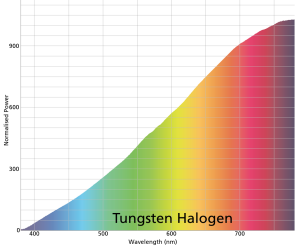


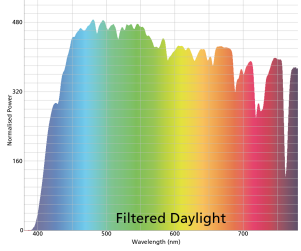
Se vediamo un oggetto rosso è perché riflette una luce monocromatica?

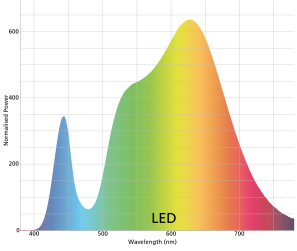


Spectral Power Distribution (SPD)

Diversi "illuminanti", sono composti da diverse distribuzioni spettrali:



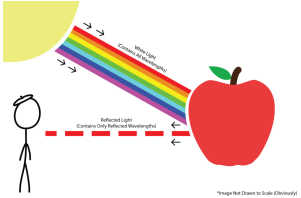


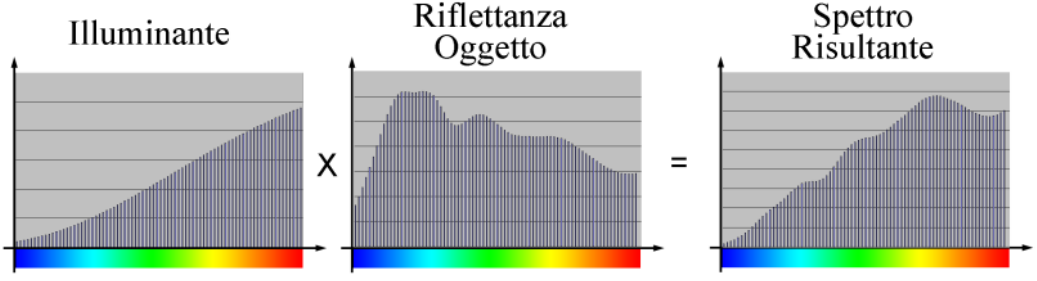


Anche se ci possono apparire tutti come luci più o meno bianche.

Spectral Power Distribution (SPD)

Lo spettro riflesso da un generico oggetto è dato dallo spettro dell'illuminante "pesato" rispetto alla riflettanza dell'oggetto.





Ma quindi?

Data una distribuzione spettrale, come facciamo a sapere di che colore la vediamo?

Ma quindi?

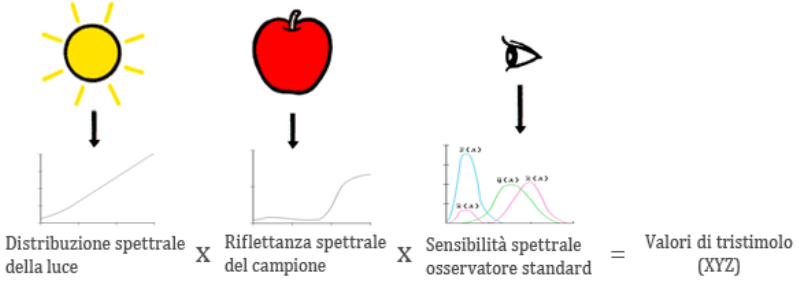
Data una distribuzione spettrale, come facciamo a sapere di che colore la vediamo?

Ci serve una qualche funzione matematica che data una distribuzione spettrale ci dia la risposta dei tre diversi tipi di coni...

Ma quindi?

Data una distribuzione spettrale, come facciamo a sapere di che colore la vediamo?

Ci serve una qualche funzione matematica che data una distribuzione spettrale ci dia la risposta dei tre diversi tipi di coni...



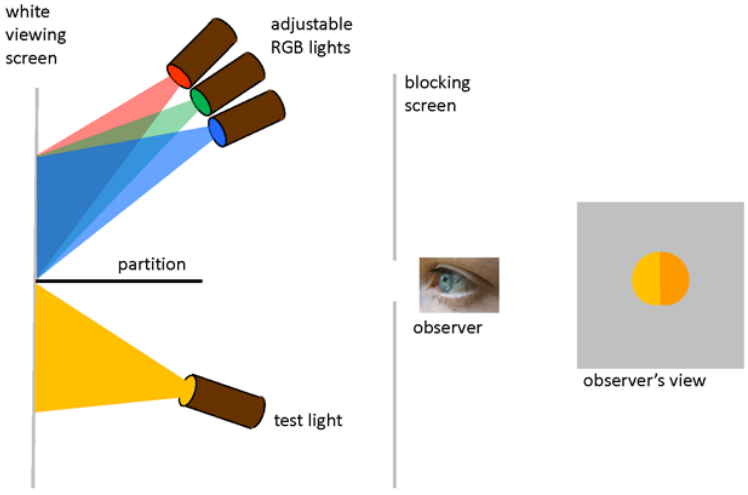
La teoria del tristimolo

Hermann von Helmholtz 1821 – 1894

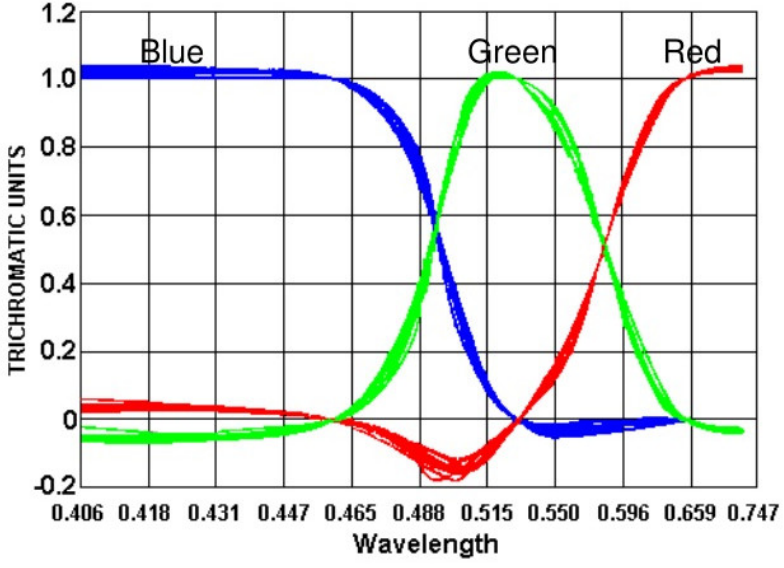
Studia la fisiologia del sistema visivo e studiando coni e bastoncelli, formula la **teoria del tristimolo**.

Pone le basi per una **definizione matematica del colore**.

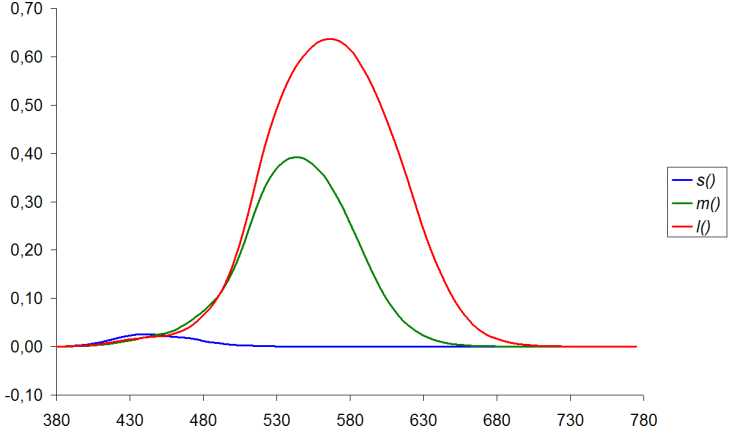
Esperimenti di Wright (1928) e Guild (1931)



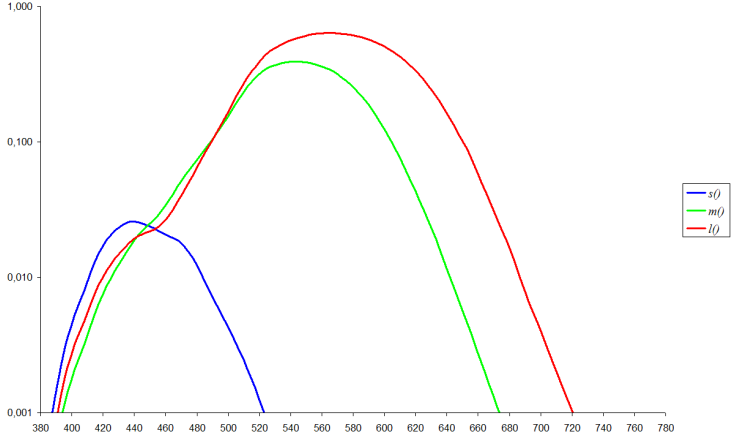
Esperimenti di Wright (1928) e Guild (1931)



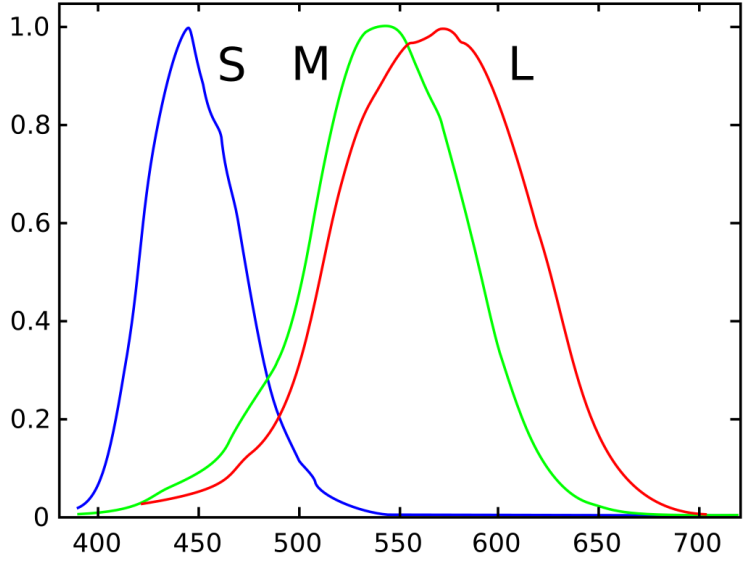
Cones Spectral Sensitivity



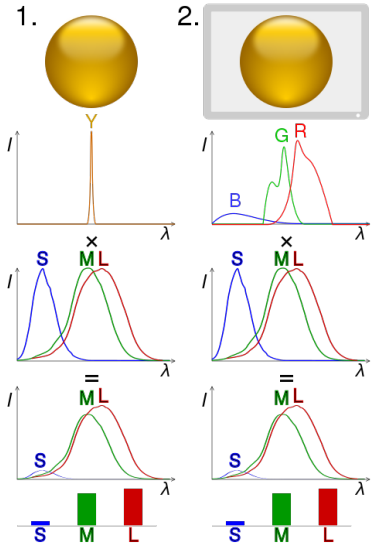
Cones Spectral Sensitivity Log-scale



The normalized spectral sensitivity of human cones



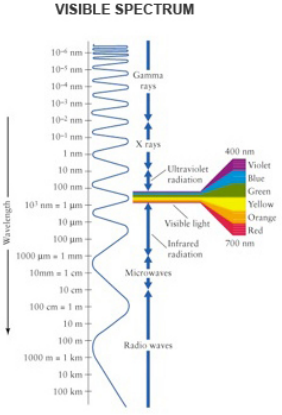
Metamerismo: spettri diversi, stesso tristimolo

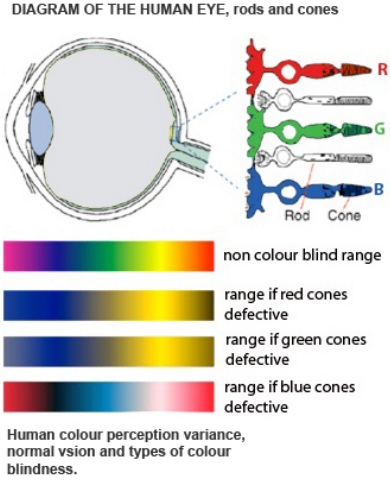


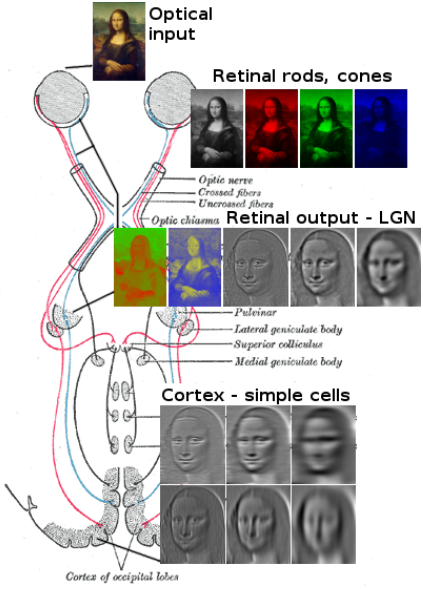
- ① Oggetto illuminato da luce monocromatica e
  ② riproduzione dell'oggetto su uno schermo
- Spectral Power Distribution delle luci che entrano dentro l'occhio dell'osservatore
- Sensibilità spettrale normalizzata dei tre tipi di coni dell'occhio
- Risposta dei coni nei due casi

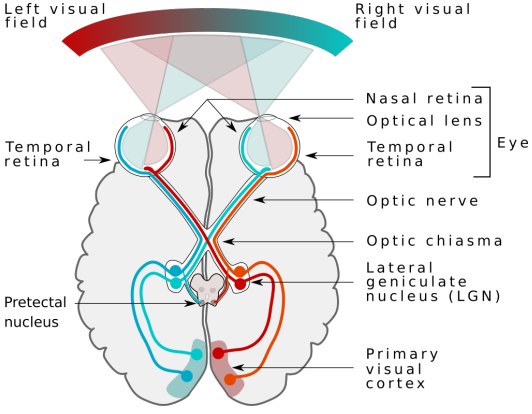
Ma se i coni fossero di due tipi invece di tre?

Ma se i coni fossero di due tipi invece di tre?






Optical input
Retinal rods, cones
Optic nerve
Crossed fibers
Uncrossed fibers
Optic chiasma
Retinal output - LGN
Pulvinar
Lateral geniculate body
Superior colliculus
Medial geniculate body
Cortex - simple cells
Cortex of occipital lobes


Left visual field
Right visual field
Nasal retina
Optical lens
Temporal retina
Eye
Temporal retina
Optic nerve
Optic chiasma
Lateral geniculate nucleus (LGN)
Pretectal nucleus
Primary visual cortex

Argomenti

Di che colore sono i girasoli?

https://rgb1964.wordpress.com/2020/05/29/la-costanza-del-colore/

E adesso?

E adesso?

Se misuriamo i valori di tristimolo, questi corrispondono al **grigio**.

Costanza di colore

Il fisiologo tedesco **Ewald Hering (1834-1918)** spiegava questo fenomeno, la **costanza di colore**, come un atto di memoria e apprendimento.

Sapete che i girasoli sono gialli, quindi li vedete gialli anche se non lo sono!

Costanza di colore

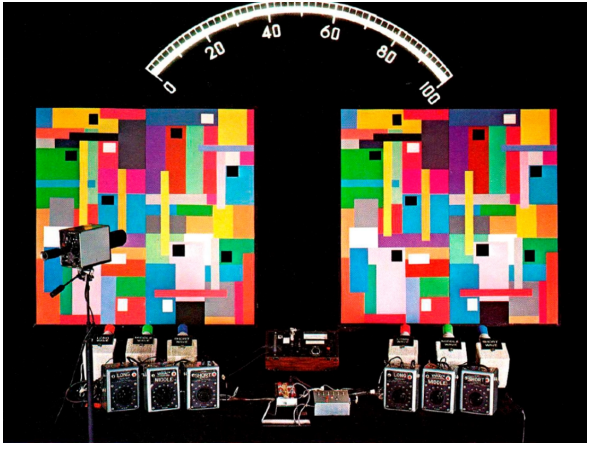
Il fisiologo tedesco **Ewald Hering (1834-1918)** spiegava questo fenomeno, la **costanza di colore**, come un atto di memoria e apprendimento.

Sapete che i girasoli sono gialli, quindi li vedete gialli anche se non lo sono!

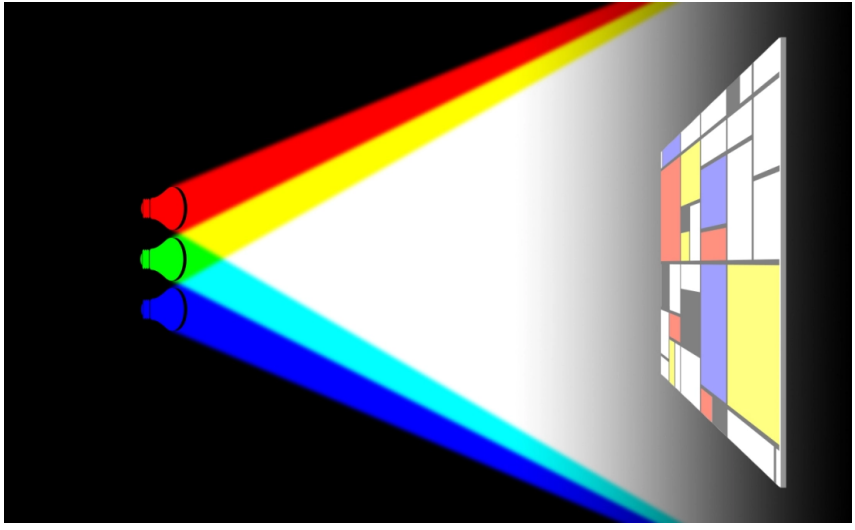
Vi convince?

La costanza del Colore

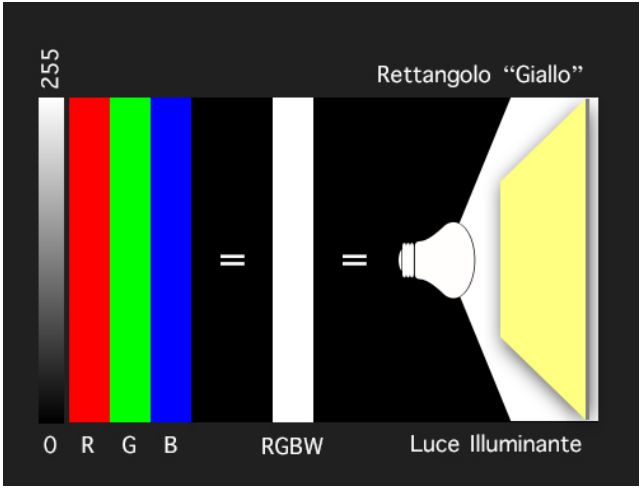
Edwin H. Land (1909-1991), fondatore della società Polaroid, per oltre 25 anni ha realizzato esperimenti sulla percezione del colore.



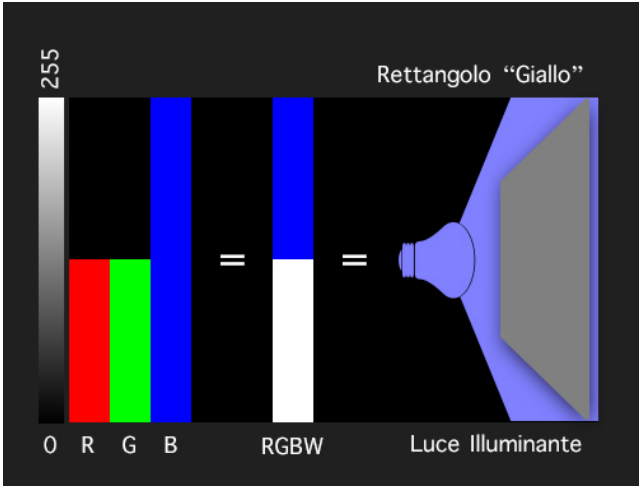
"I Mondrian dei colori" per la somiglianza con le opere di **Piet Mondrian**.



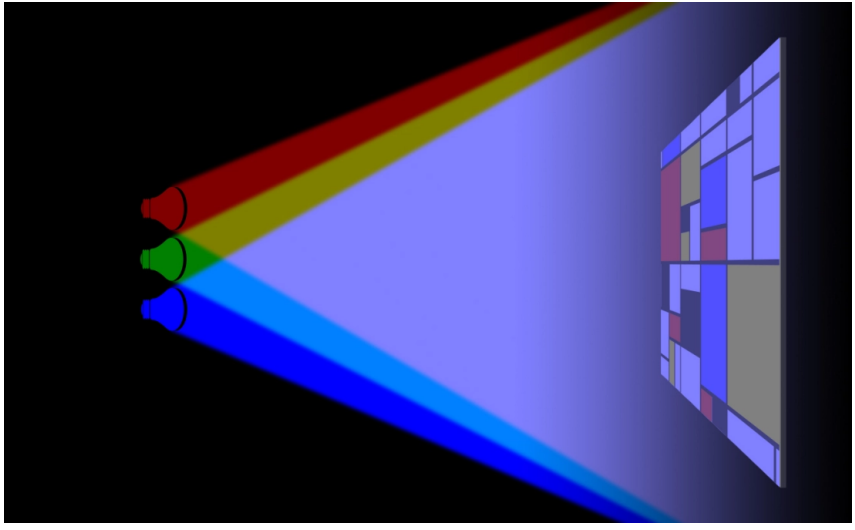
Illuminiamo "L'armonia perfetta" con una luce bianca.

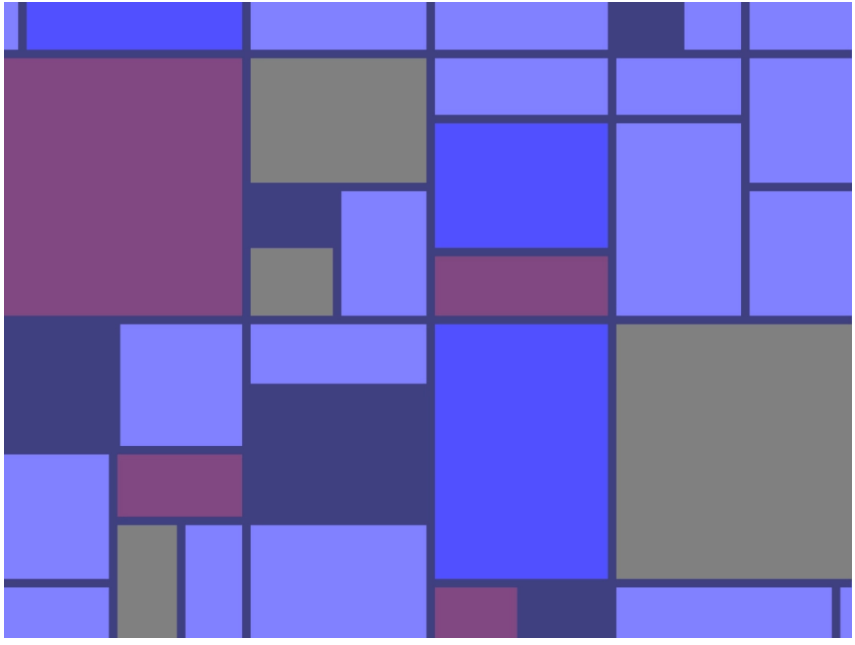


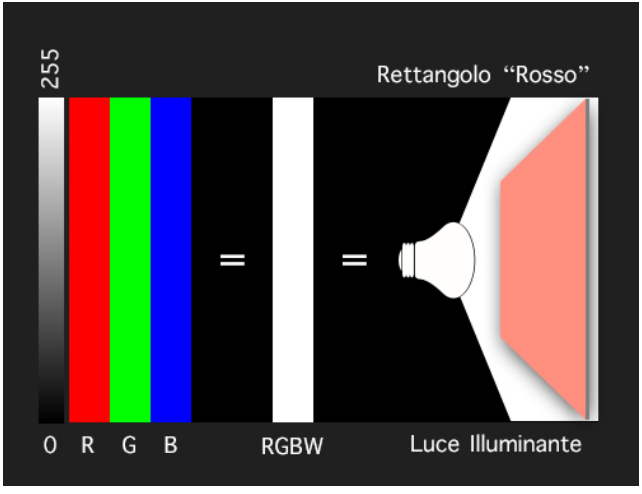
La luce degli illuminanti Rosso e Verde viene riflessa in quantità doppia rispetto alla luce dell'illuminante Blu.

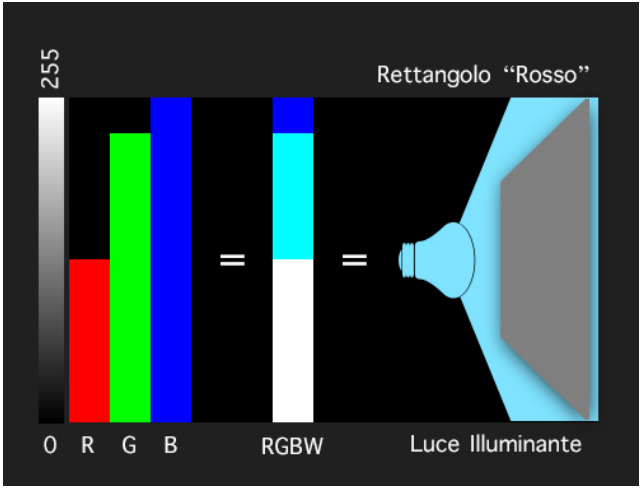


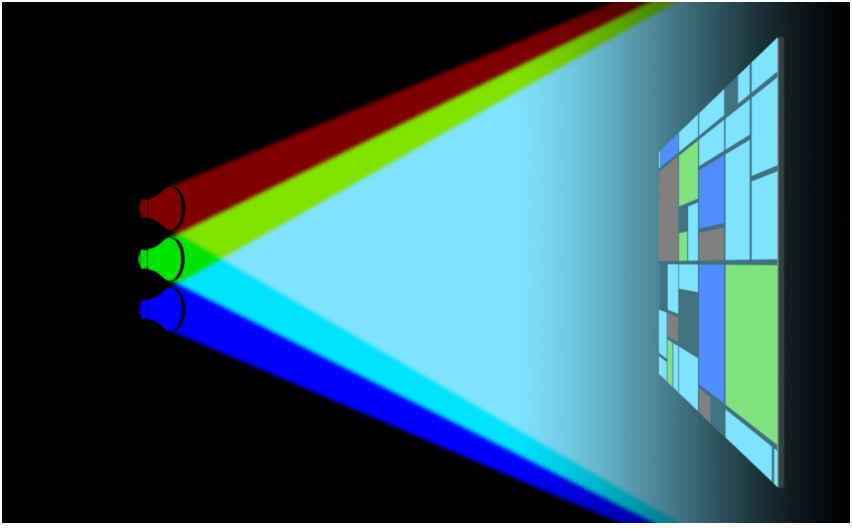
Se riduciamo al 50% l'intensità degli illuminanti Rosso e Verde e lasciamo inalterata quella del Blu, otteniamo una luce Blu al 50%

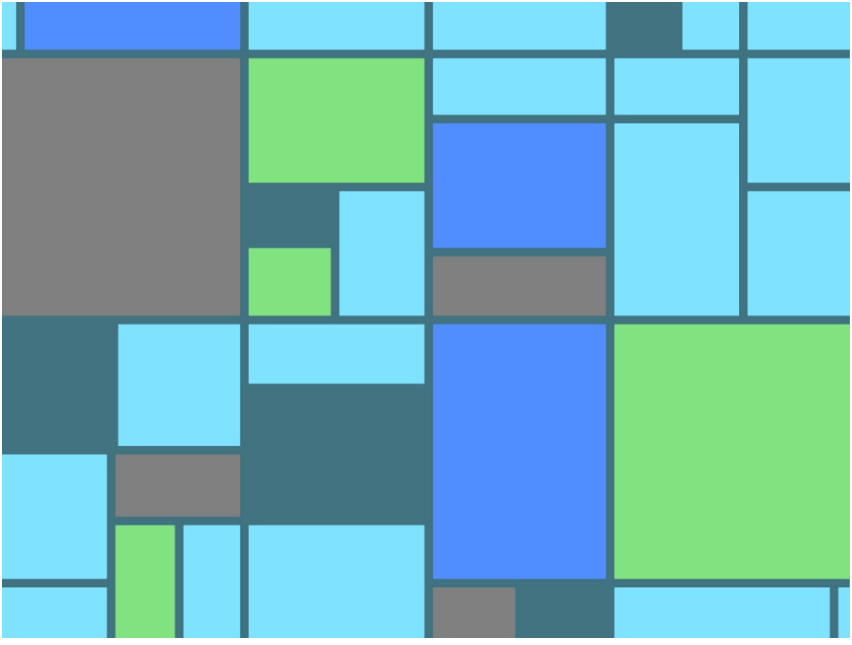


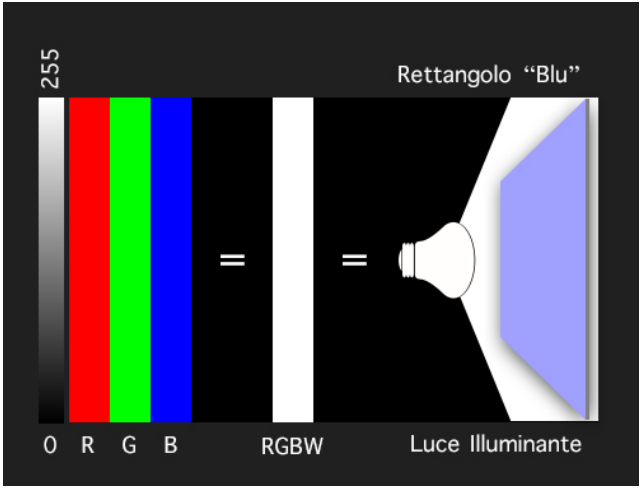


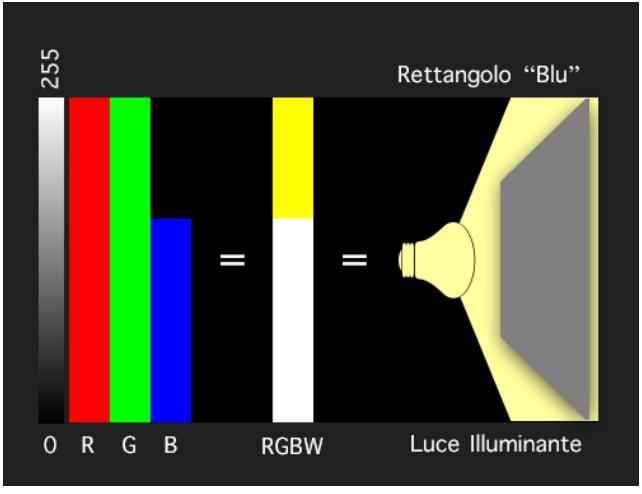

255
Rettangolo "Rosso"
0 R G B
RGBW
Luce Illuminante

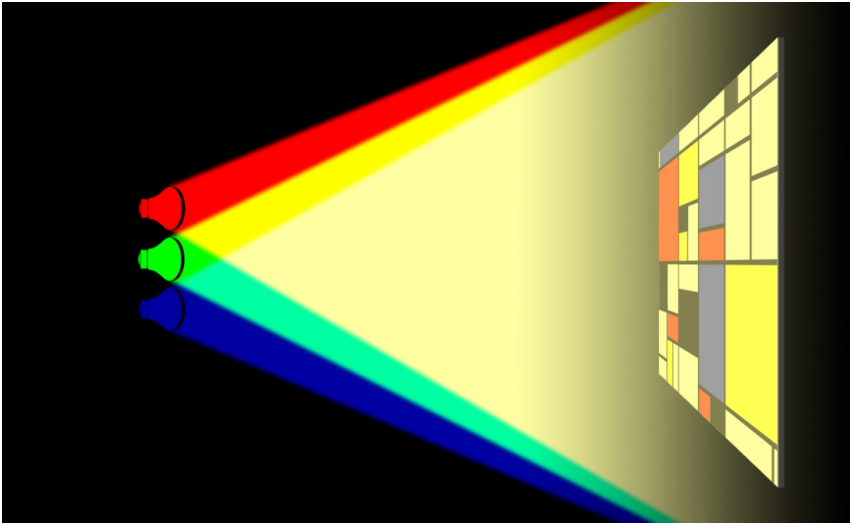

255
Rettangolo "Rosso"
=
=
0 R G B
RGBW
Luce Illuminante

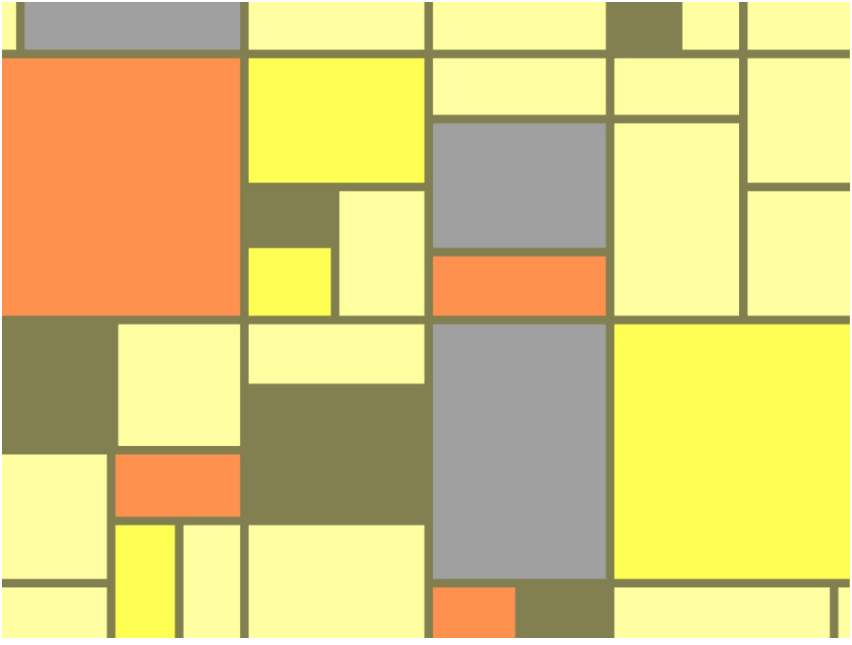





255
Rettangolo "Blu"
0 R G B
RGBW
Luce Illuminante


255
Rettangolo "Blu"
=
=
0 R G B
RGBW
Luce Illuminante



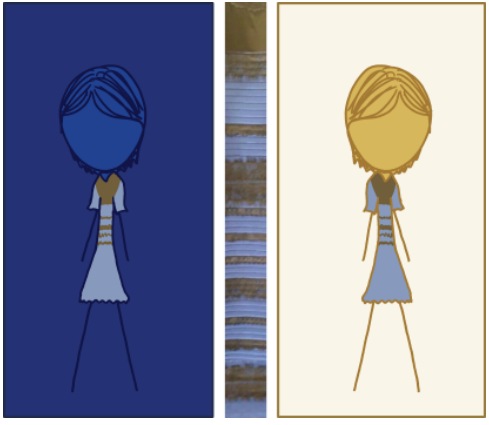


Il Vestito della discordia

Di che colore è il vestito?

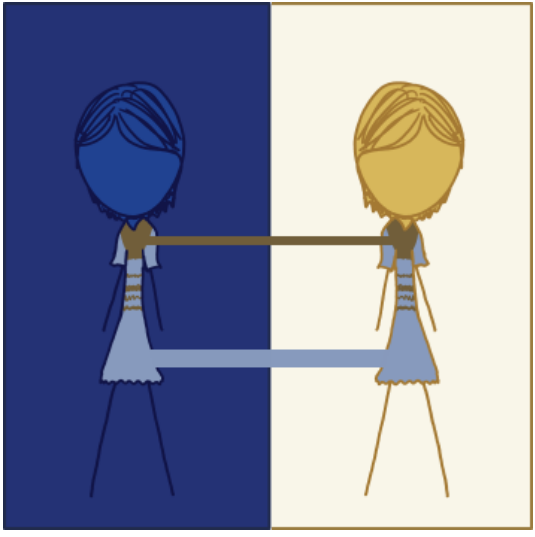
Il Vestito della discordia

Di che colore è il vestito?

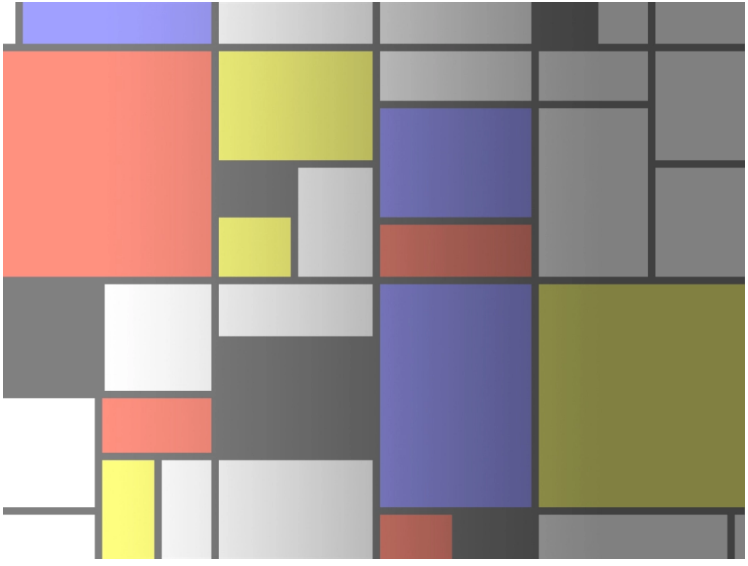


https://www.explainxkcd.com/wiki/index.php/1492:_Dress_Color

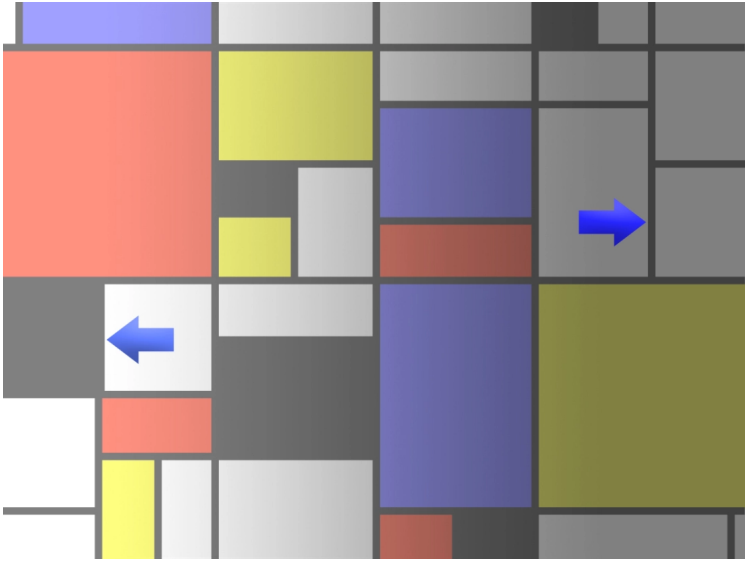
Il Vestito della discordia



Se lo illuminassimo da un lato?

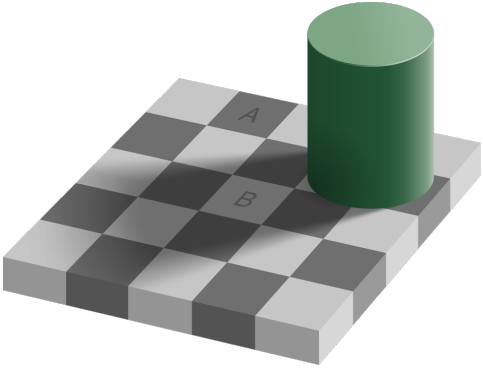


Se lo illuminassimo da un lato?

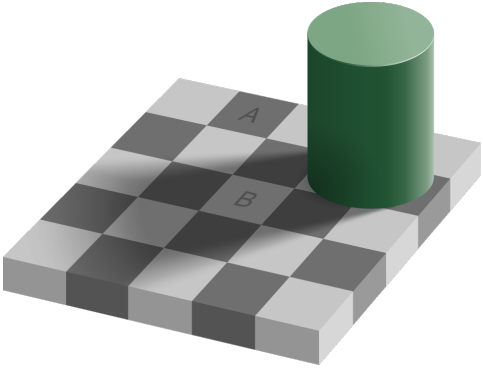


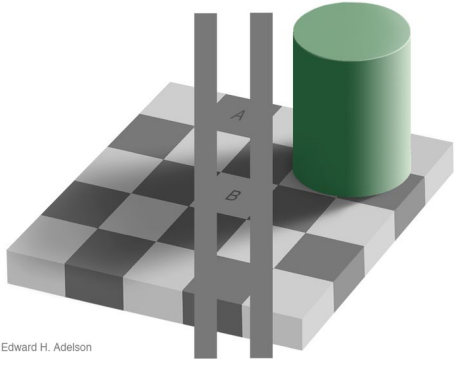
Se lo illuminassimo da un lato?

Colore e percezione della tridimensionalità



Colore e percezione della tridimensionalità



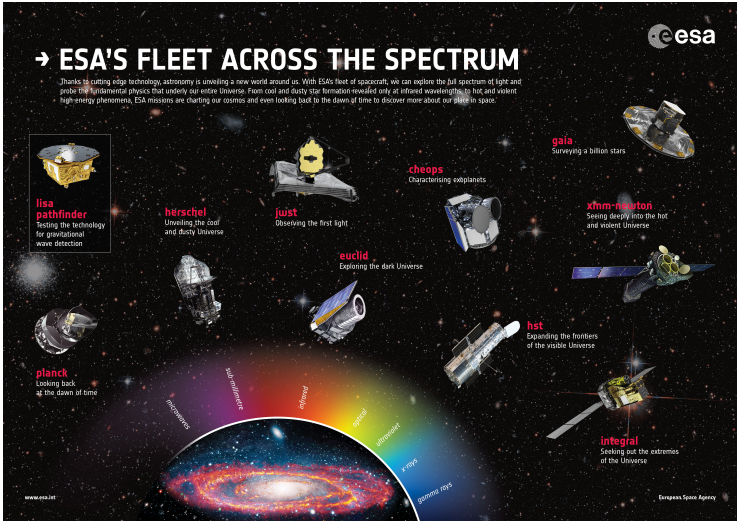


Edward H. Adelson

Quindi, cos'è il colore?

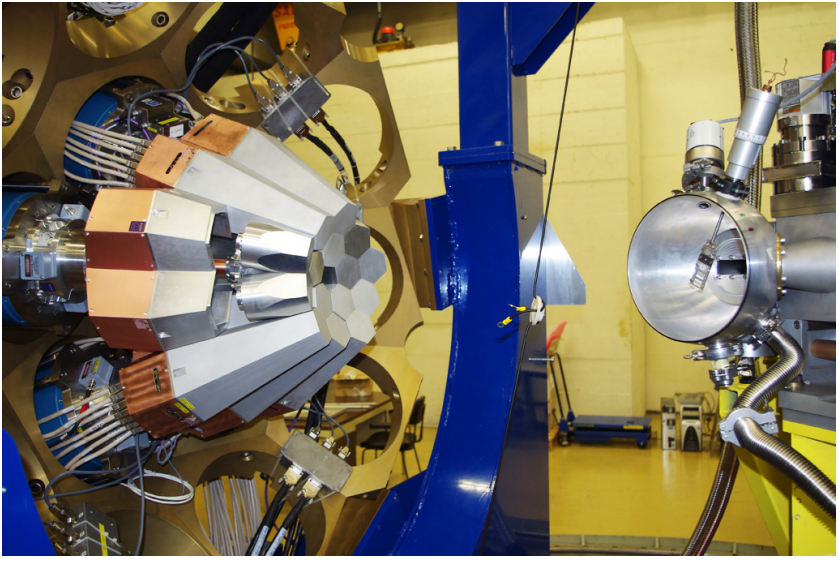
Argomenti

Possiamo espandere lo spettro visibile?



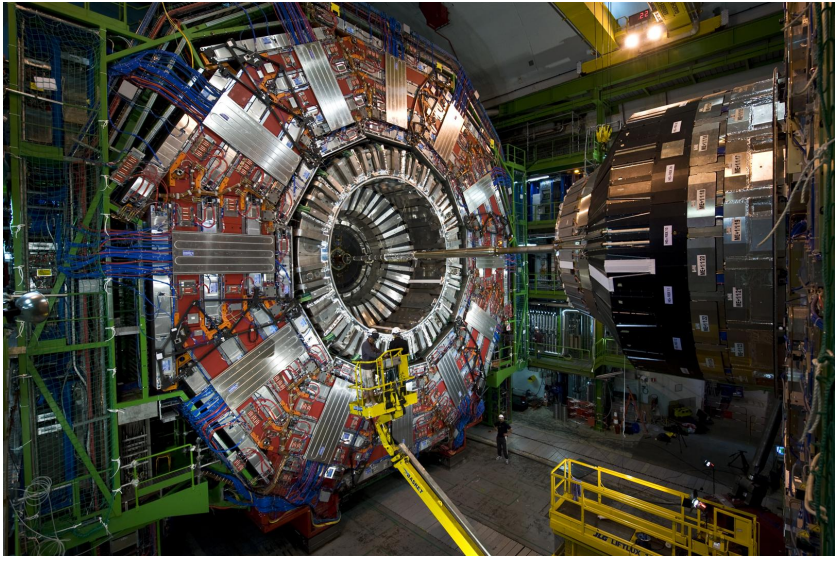
https://sci.esa.int/web/education/-/51382-esa-s-fleet-across-the-spectrum

Possiamo espandere lo spettro visibile?



The Advanced GAmma Tracking Array (AGATA) https://www.agata.org/

Possiamo "vedere" particelle diverse dai fotoni?



CMS `https://cms.cern/detector`

E se avessimo quattro tipi di coni?

https://en.wikipedia.org/wiki/Tetrachromacy

Gabriele Jordan; Samir S. Deeb; Jenny M. Bosten; J. D. Mollon
The dimensionality of color vision in carriers of anomalous trichromacy
Journal of Vision, Vol.10, 12 (2010). https://doi.org/10.1167/10.8.12

https://www.healthline.com/health/tetrachromacy

https://www.bbc.com/future/article/20140905-the-women-with-super-human-vision

Samir Zeki

Professore di neurobiologia alla University College di Londra.

Ha studiato il sistema visivo dei primati e scoperto correlati neurali della percezione del colore.

Nel 1994 ha iniziato lo studio delle basi neurali della creatività e dell'apprezzamento estetico dell'arte.

Semir Zeki
La visione dall'interno. Arte e cervello.
Bollati Boringhieri, 2007

Semir Zeki
Con gli occhi del cervello. Immagini, luci, colori.
Di Renzo Editore, 2008

Semir Zeki
Splendori e miserie del cervello. L'amore, la creatività e la ricerca della felicità.
Codice Edizioni, 2010

« I guardiani che custodiscono gelosamente il presunto confine tra cultura umanistica e cultura scientifica con ogni probabilità non apprezzeranno questo libro. »