



Piano Lauree Scientifiche
Laboratorio di Ottica:
L'ottica dai fondamenti
alle sue moderne applicazioni
Incontro 1 - 4/4/2011

Fabio Sciarrino



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Dipartimento di Fisica,
“Sapienza” Università di Roma



INO-CNR
ISTITUTO
NAZIONALE DI
OTTICA

Istituto Nazionale di Ottica, CNR

fabio.sciarrino@uniroma1.it
http:\\quantumoptics.phys.uniroma1.it

Attività previste

- Laboratori di Ottica (2010/2011, 2011/2012)

Obiettivo: laboratori curriculari previsti per il II anno e per il IV anno

- Corso di formazione (2010/2011, 2011/2012)

Preparazione e discussione delle esperienze del Laboratorio di Ottica

- Masterclass di ottica (2011/2012)

Supporto informatico

- Sito e-learning

<http://elearning.uniroma1.it>

- Sito PLS – Dipartimento di Fisica

<https://sites.google.com/site/pianolaureescientifiche/>

Panoramica sui Laboratori di Ottica

Il laboratorio di Ottica prevede la realizzazione di diverse esperienze didattiche volte alla comprensione di tutte le principali tematiche affrontate. In particolare ogni esperienza prevede delle prove sperimentali opportunamente descritte in ogni scheda.

Le esercitazioni previste saranno differenziate tra biennio e triennio, in base alle nozioni base acquisite dagli studenti secondo il programma scolastico.

Responsabile: Fabio Sciarrino

Assistenti: Eleonora Nagali
Chiara Vitelli

Programma del Corso di Ottica

Luce e colori

I colori

Ottica geometrica

Riflessione

Rifrazione

Il banco ottico

Lenti

Prismi

Ottica ondulatoria

Interferenza

Diffrazione

Polarizzazione

Esperienze didattiche

Biennio

Per gli studenti del biennio sono previste 3 esperienze didattiche:

Esperienza I : Luce e colori

Esperienza II : Riflessione e Rifrazione della luce

Esperienza III: Ottica geometrica

Triennio

Per gli studenti del triennio sono previste 3 esperienze didattiche più un approfondimento:

Esperienza I : Diffrazione della luce

Esperienza II: Interferenza della luce

Esperienza III: Polarizzazione

LUCE E COLORI



LUCE E COLORI

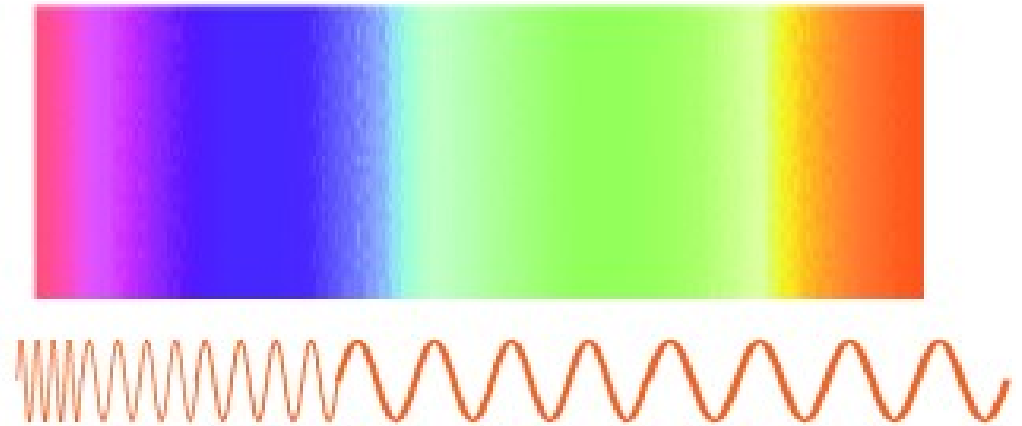
Concetti e nozioni chiave:

- **luce, occhio e cervello come mediatore-elaboratore della visione**
- **Colori primari o fondamentali** (Rosso, Verde, Blu):
sintesi additiva.
Cerchio di Goethe.
- **Colori secondari o complementari** (Giallo, Magenta, Ciano):
sintesi sottrattiva.
- **Teoria di Young- Helmholtz sulla visione dei colori**
spettro visibilità
curva di luminosità per l'occhio

Colori e lunghezza d'onda

L'occhio umano è sensibile solo ad una piccola parte dello spettro elettromagnetico: la luce VISIBILE

COLORE	LUNGHEZZA D'ONDA (nm)
violetto	380-430
blu	430-490
verde	490-560
giallo	560-580
arancione	580-620
rosso	620-760



Rosso e blu-violetto si estendono oltre 100 nanometri
Il giallo solo per 20 nanometri

La luce visibile corrisponde al minimo assorbimento da parte dell'acqua ed al massimo di emissione solare.

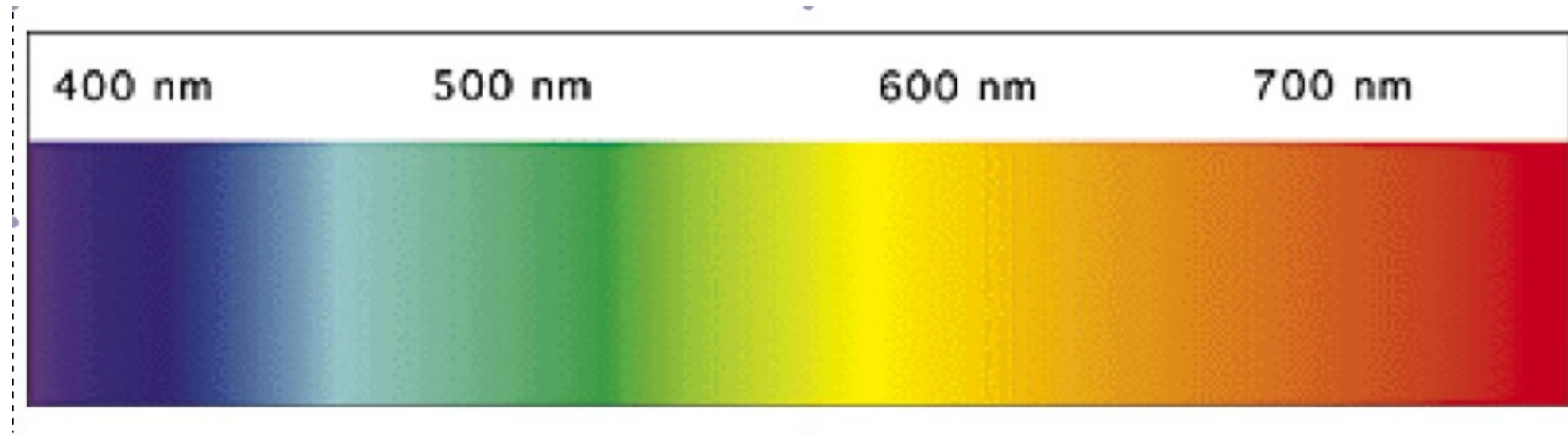
Esperienza I – Luce e Colori

- I colori appartengono alla luce, come sostiene Newton, o agli oggetti?
- Perché un oggetto rosso appare rosso?
Perché un oggetto giallo appare giallo?

E' esperienza comune che gli oggetti si presentano per lo più con un colore ben definito. Da questo si è indotti a pensare che il colore sia una proprietà esclusiva e costante degli oggetti stessi.

Questa prima impressione è smentita da una analisi più approfondita. In realtà il colore degli oggetti dipende ad esempio dall'illuminazione a cui sono sottoposti. Uno dei grandi risultati di Newton fu dimostrare che i colori sono contenuti nella luce e che il loro manifestarsi è dovuto all'interazione fra luce ed oggetti.

Lo spettro visibile



Scomponendo una luce bianca con un prisma od un reticolo di diffrazione si ottiene come risultato uno spettro di colori, detti colori spettrali puri, dal rosso al violetto, passando per il giallo, il verde, il blu e varie tonalità intermedie.

Dal punto di vista fisico della teoria ondulatoria, la luce appartenente ad una zona ristretta dello spettro (una componente monocromatica) un'onda descrivibile (nel vuoto e trascurando la polarizzazione e l'ampiezza) tramite un unico parametro, la lunghezza d'onda λ .

La luce visibile spazia da $\lambda \approx 400\text{nm}$ (violetto) a $\lambda \approx 700\text{nm}$ (rosso).

La visione dei colori

Il colore dipende anche dalla fisiologia dell'occhio umano e del cervello (ad esempio la percezione cromatica varia con l'intensità dell'illuminazione). L'analisi del colore coinvolge perciò lo studio della luce e della sua interazione con la materia e lo studio della neuro-fisiologia della visione.

Il processo della visione dei colori come:

- *luce*, entità fisica esterna all'osservatore;
- *oggetto illuminato che mostra un certo colore.*
- *occhio*, percettore sensibile della luce;
- *cervello*, mediatore-elaboratore della visione;

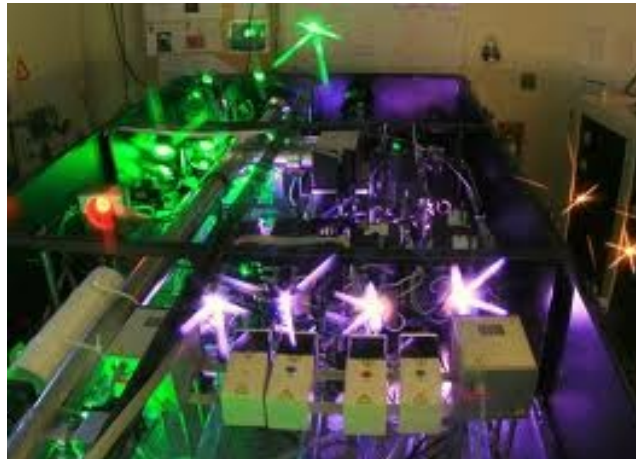
Le sorgenti di luce

Le sorgenti di luce si dividono in

sorgenti a spettro continuo, quando emettono su tutto lo spettro visibile, come il Sole, le fiamme o le lampade a filamento;



sorgenti a spettro di righe, quando emettono solo certe lunghezze d'onda



Decomposizione della luce bianca per rifrazione

Luce colorata può essere prodotta sfruttando (come nel caso del prisma) il diverso valore dell'indice di rifrazione di un materiale trasparente (vetro) per le diverse lunghezze d'onda di cui è composta la luce bianca. In virtù di questo, le varie componenti verranno rifratte diversamente e si disperderanno divenendo visibili. E' questo il meccanismo che produce i colori dell'arcobaleno e degli aloni lunari.

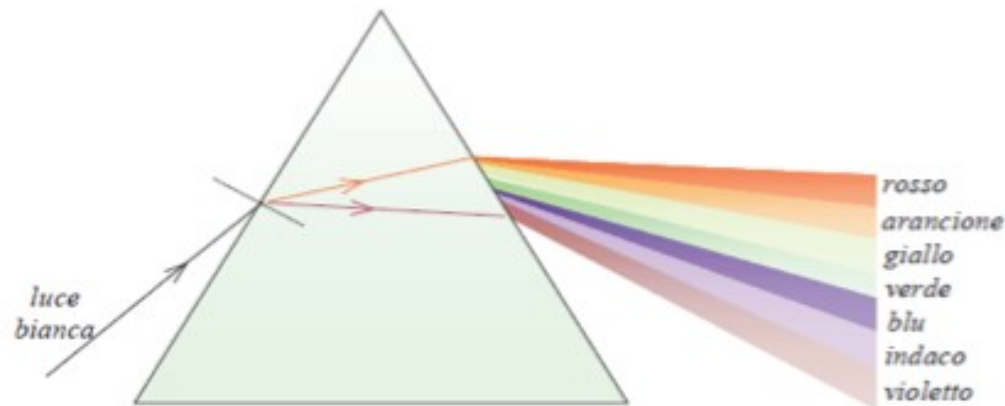


Figure 3: Decomposizione della luce bianca per rifrazione attraverso un prisma retto.

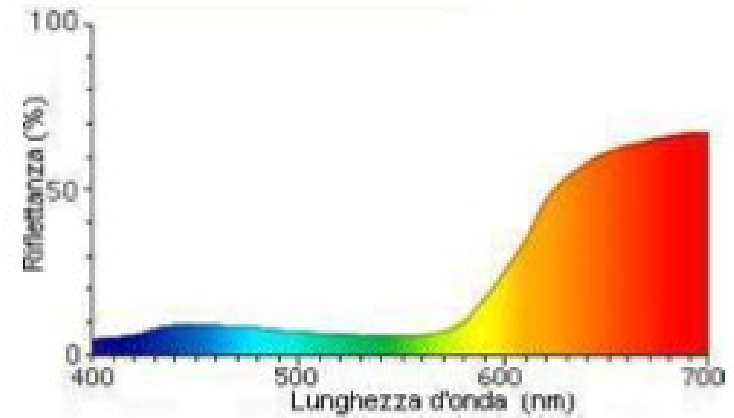
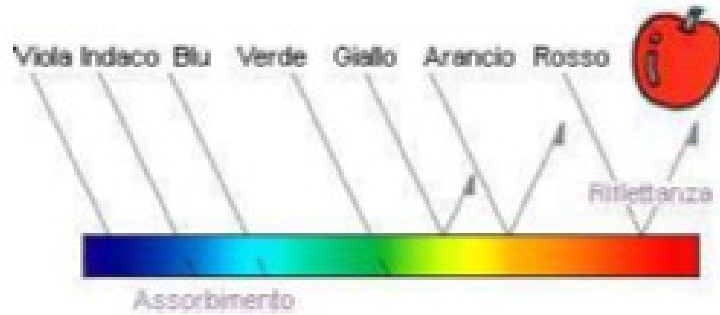
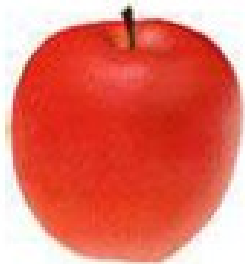
1. Il colore di superficie (oggetti opachi)

Gli oggetti colorati contengono dei **PIGMENTI** che **DIFFONDONO** solo la luce di un particolare colore, **assorbendo il resto: riflettanza spettrale**



La riflettanza spettrale

Esempio: una mela rossa



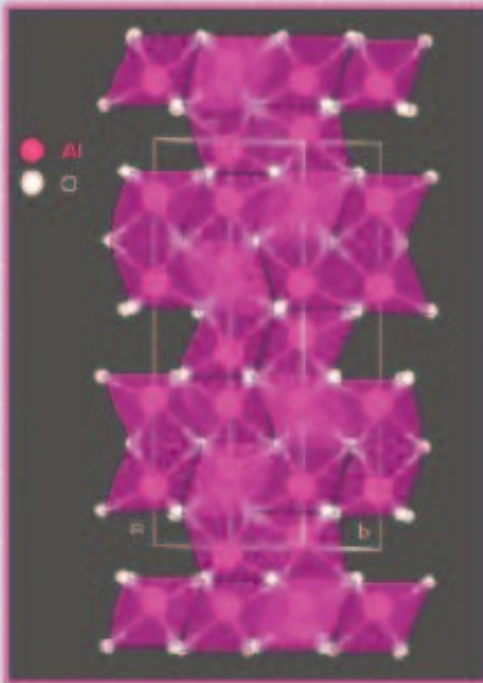
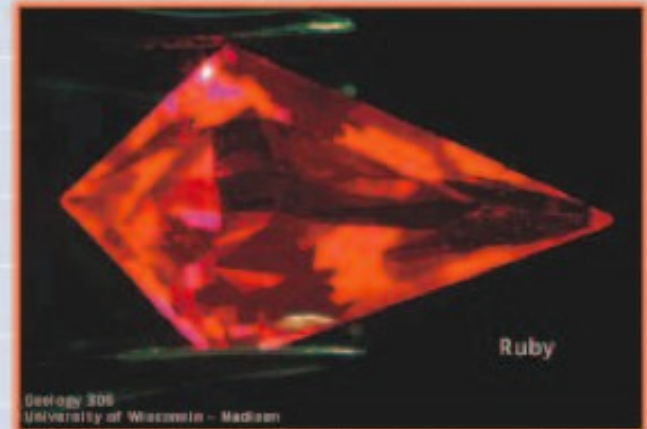
2. Il colore di volume (filtri)

I filtri colorati sono oggetti semitrasparenti che contengono dei pigmenti colorati. Questi pigmenti assorbono gran parte della luce, e lasciano passare solo quella di un determinato colore



Colore di volume dovuto ad impurezze

- il corindone Al_2O_3 è trasparente
- la presenza di impurezze lo colora
- il colore rosso del rubino è dovuto allo ione Cr^{3+} che sostituisce lo ione Al^{3+} nel corindone



I colori del vetro

Il vetro è una miscela più o meno amorfa, cioè con gli atomi disposti in modo disordinato, di diversi minerali, per lo più silice, soda (carbonato di sodio), calcare (carbonato di calcio) e magnesia (carbonato di magnesio). La silice è in grande preponderanza, circa il 70%, il che spiega perché il vetro puro ha una trasparenza non molto dissimile da quella del quarzo (di cui la silice è la versione amorfa).

Aggiungendo altri minerali si ottengono tutte le possibili colorazioni:

rame cobalto.....vetro azzurro
cromo.....vetro verde
ferro (bottiglia di birra)..vetro ambra
nichel.....vetro fume



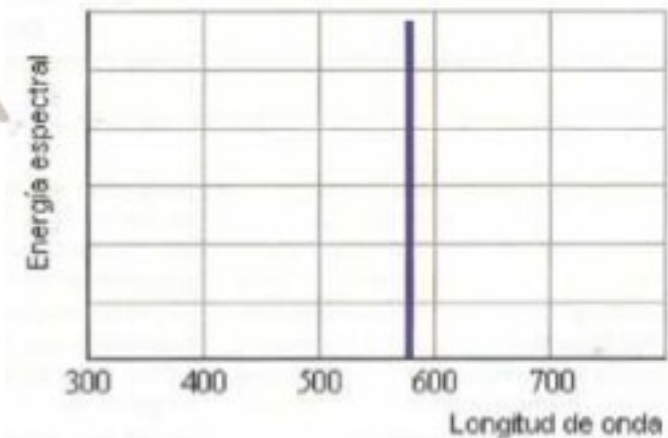
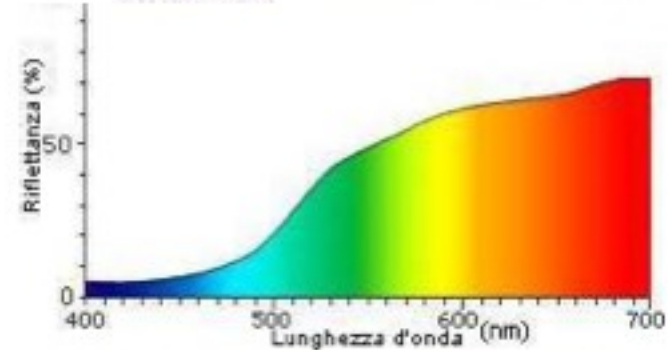
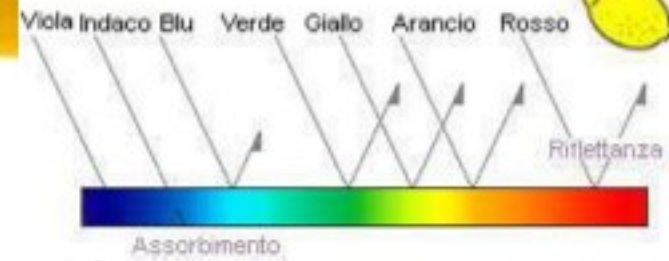
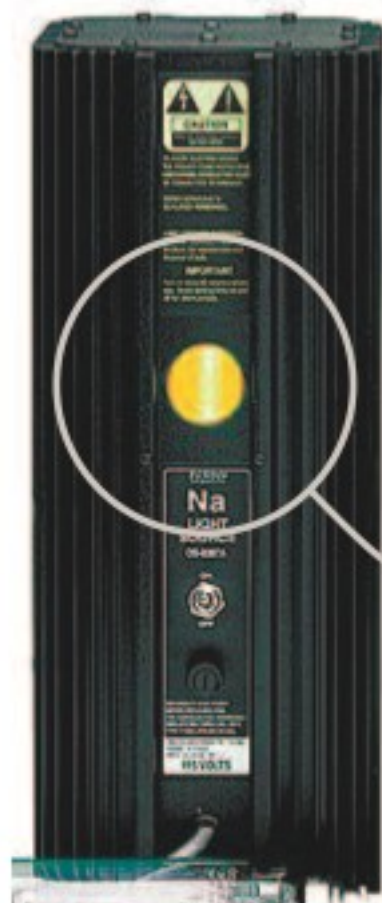
La percezione del colore

Ma la percezione del colore non è la stessa cosa delle lunghezze d'onda emesse

- Due tasti di pianoforte suonati contemporaneamente creano due suoni che mantengono la loro individualità pur creando effetti di armonia: non si ha una nota dominante intermedia. Questo perché la percezione sonora è un **processo fisico** (vibrazione del timpano)
- Due frequenze luminose diverse emesse insieme perdono la loro identità e vengono percepite come un unico stimolo a frequenza intermedia: ad esempio giallo+rosso= arancione. La percezione della luce è infatti un **processo chimico**
- Il colore percepito non è una proprietà intrinseca dell'oggetto. Dipende dai processi neurali dovuti alla luce che colpisce la retina. Soggetti differenti possono percepire le stesse lunghezze d'onda in modo diverso (ad esempio i daltonici, oppure gli uccelli, oppure per la persistenza di colori precedentemente visti). Emissioni spettrali diverse possono dare luogo alla percezione dello stesso colore (colori metameric)

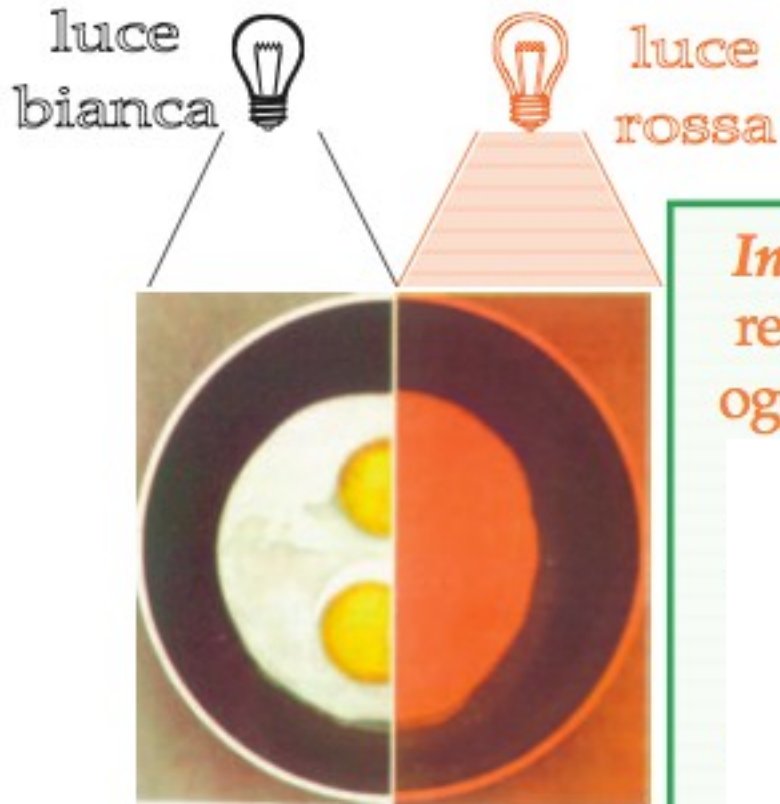
La percezione del colore

Colori metamerici



3. La costanza del colore

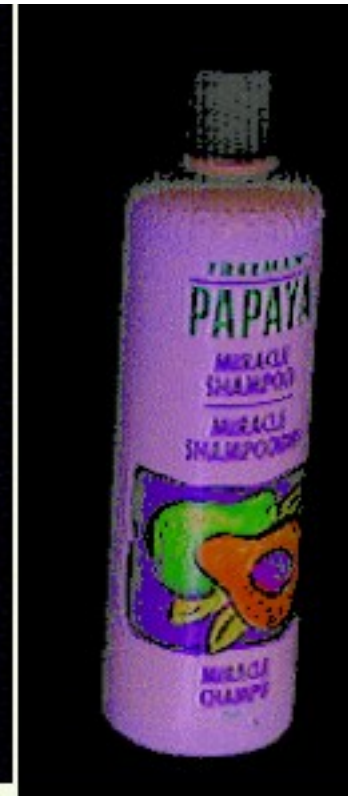
I colori degli oggetti dipendono anche dalla luce che li illumina ?



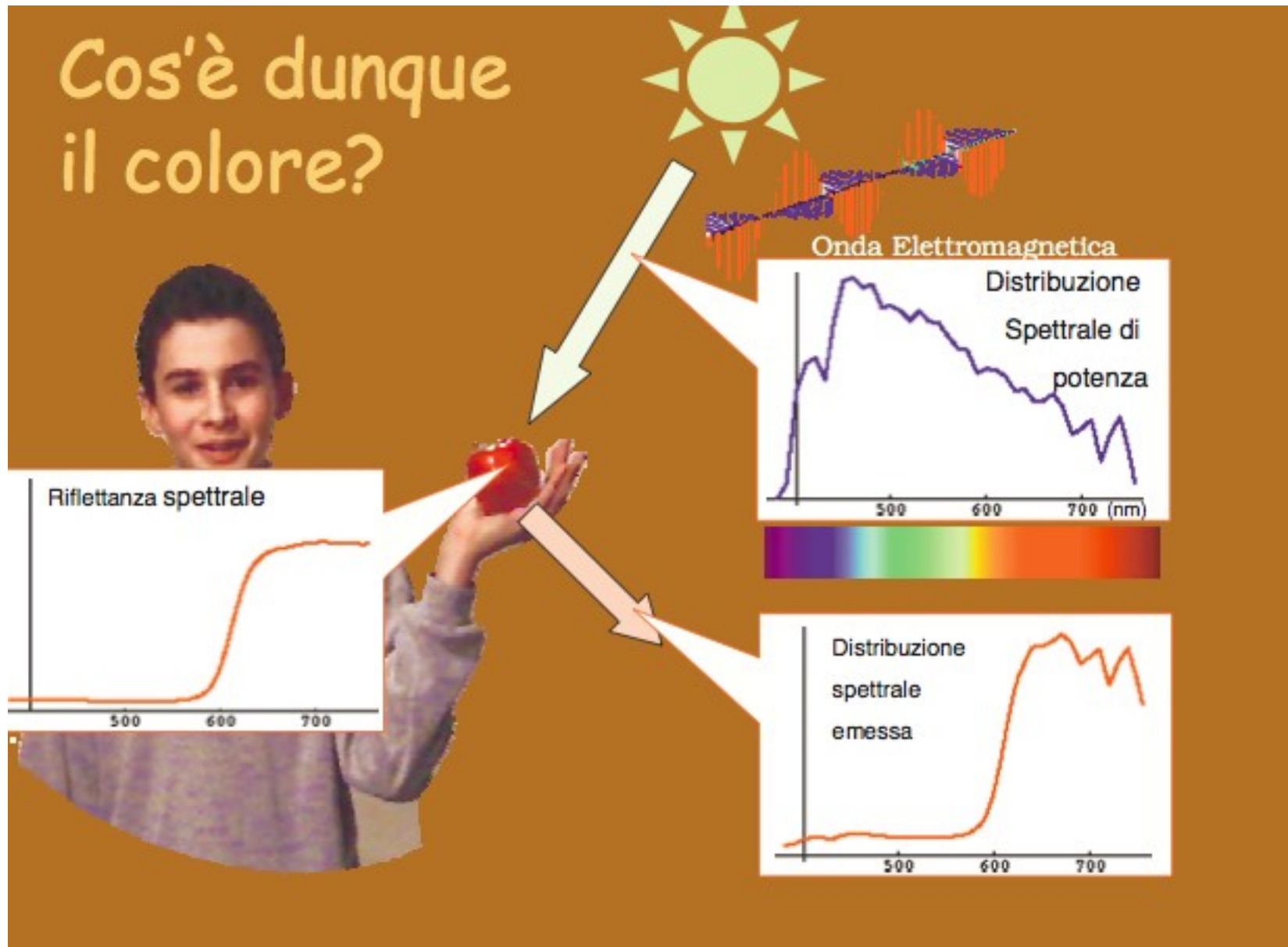
In una fotografia una luce rossa rende dello stesso colore tutti gli oggetti che illumina, tranne i neri.

3. La costanza del colore

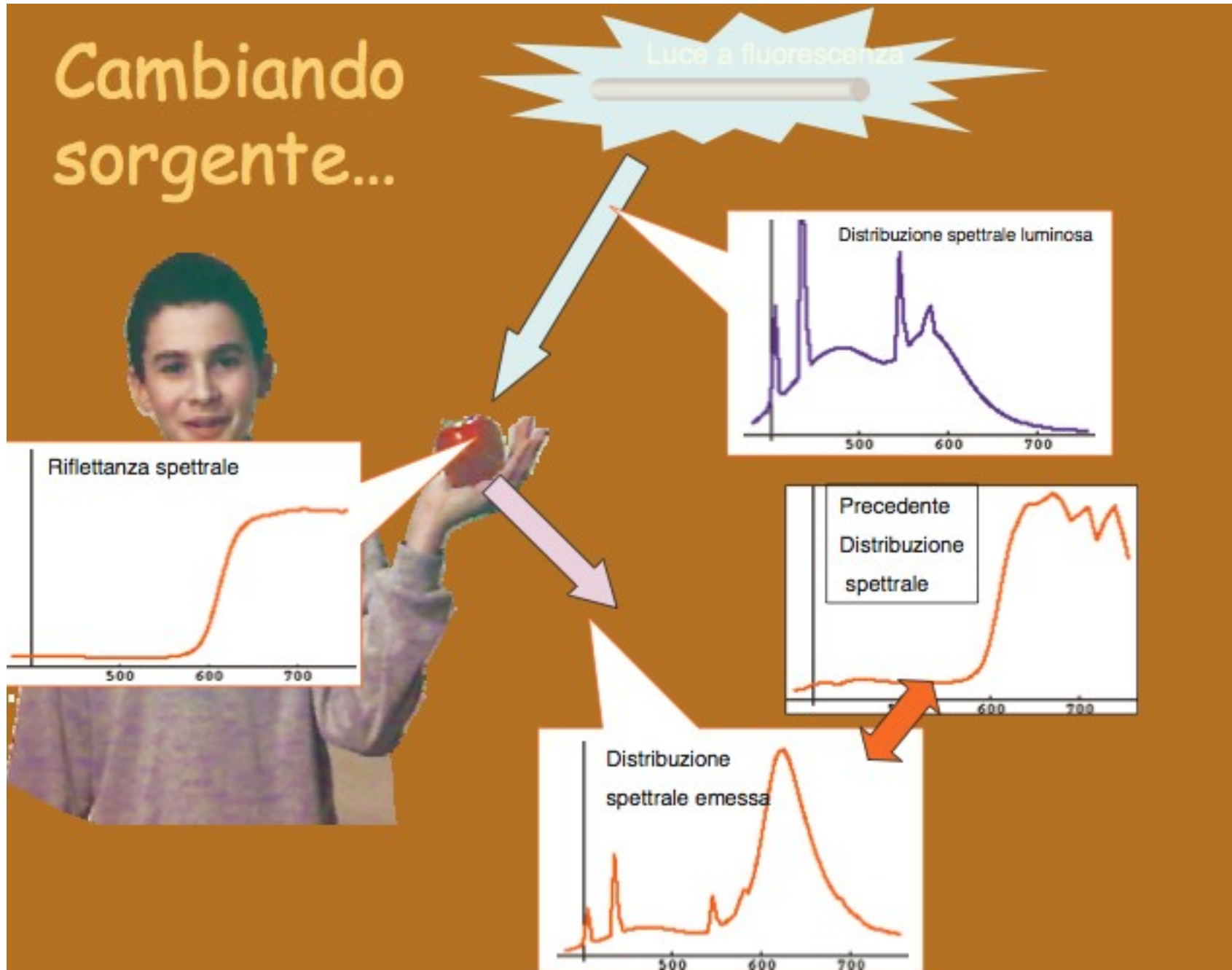
Esempi



La percezione del colore

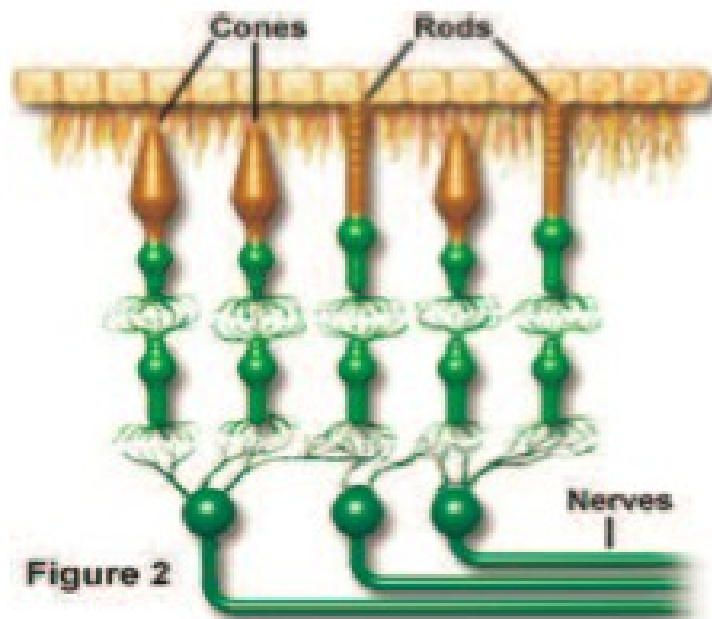
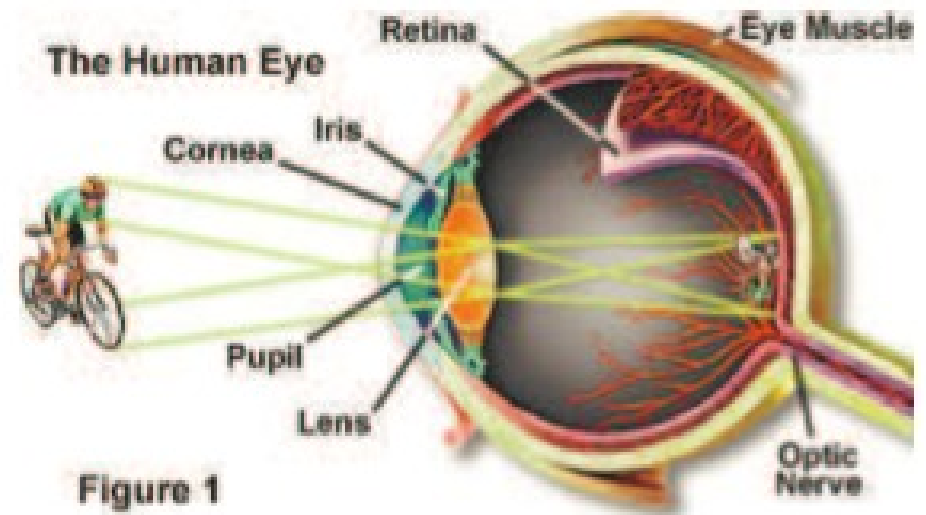


La percezione del colore



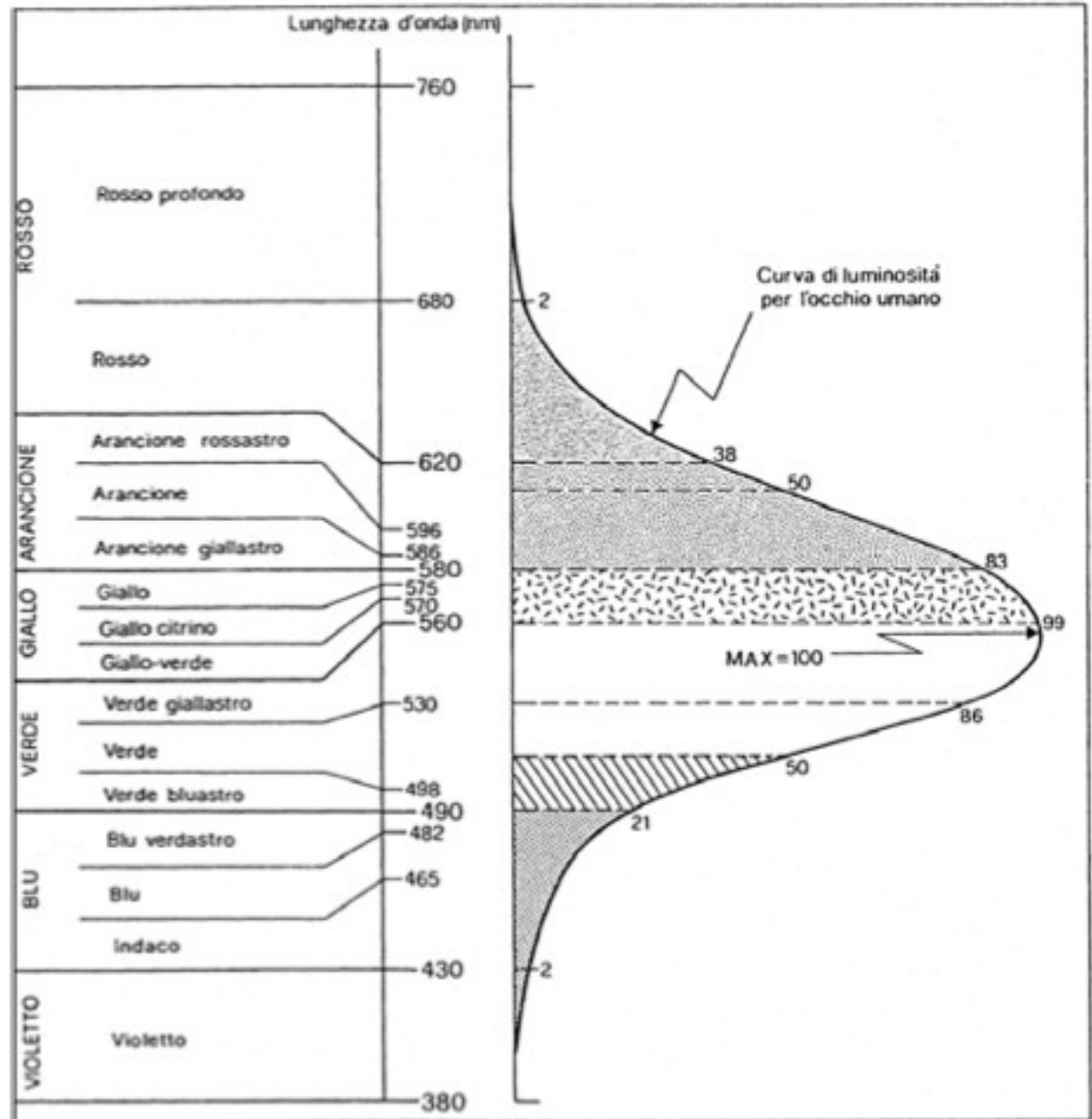
L'occhio umano

L'occhio, tramite la lente del cristallino, forma un'immagine degli oggetti sulla retina, da cui poi partono gli impulsi elettrici che arriveranno al cervello



La retina è ricoperta di *coni* e *bastoncelli*.
I **CONI** sono i responsabili della visione a colori

Risposta dell'occhio



Percezione del colore 1/2

La grande differenza qualitativa ed emotiva percepita fra i diversi colori dello spettro non trova alcun riscontro dal punto di vista fisico, dove la differenza è solo quantitativa, dal momento che si passa dall'uno all'altro al variare del parametro continuo λ . L'origine della differenza qualitativa va perciò ricercata ad un livello neuro-fisiologico.

Il primo luogo di elaborazione del segnale luminoso è la retina. Essa è dotata di recettori:

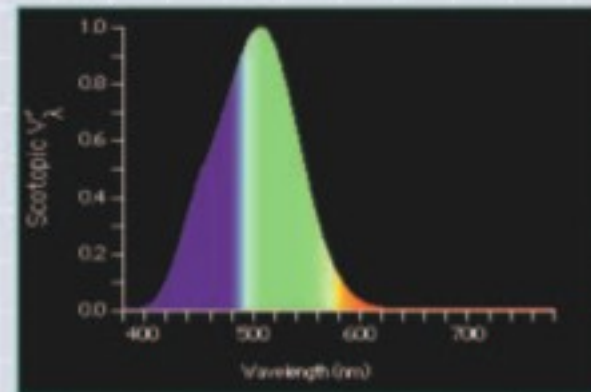
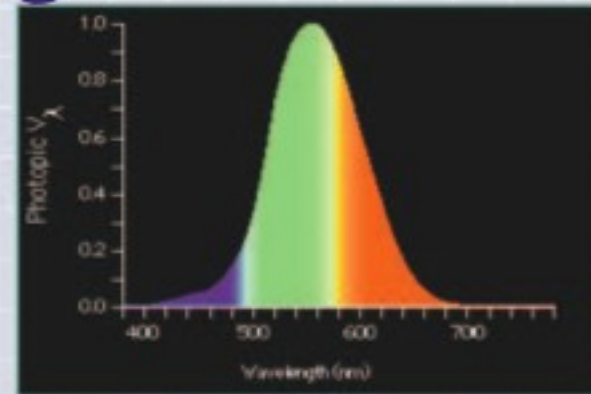
- **I bastoncelli**, utili prevalentemente per la visione notturna e sensibili esclusivamente alla regione blu dello spettro. Infatti nella cosiddetta visione crepuscolare (quando gli occhi si sono adattati alla luce scarsa) percepiamo un paesaggio monocromatico di tinta blu, e gli oggetti di giorno rossi appaiono neri.
- **I con**i, recettori impiegati nella visione diurna e nella percezione dei colori. Sono di tre tipi: uno sensibile al rosso, uno al verde ed uno al blu.

La retina è poi dotata di una complessa innervatura, in cui i segnali provenienti dai recettori vengono elaborati prima di essere inviati al cervello, dove subiscono una successiva elaborazione per produrre finalmente la sensazione del colore. Il colore perciò una esperienza qualitativa prodotta ad un alto livello di elaborazione neuronale.

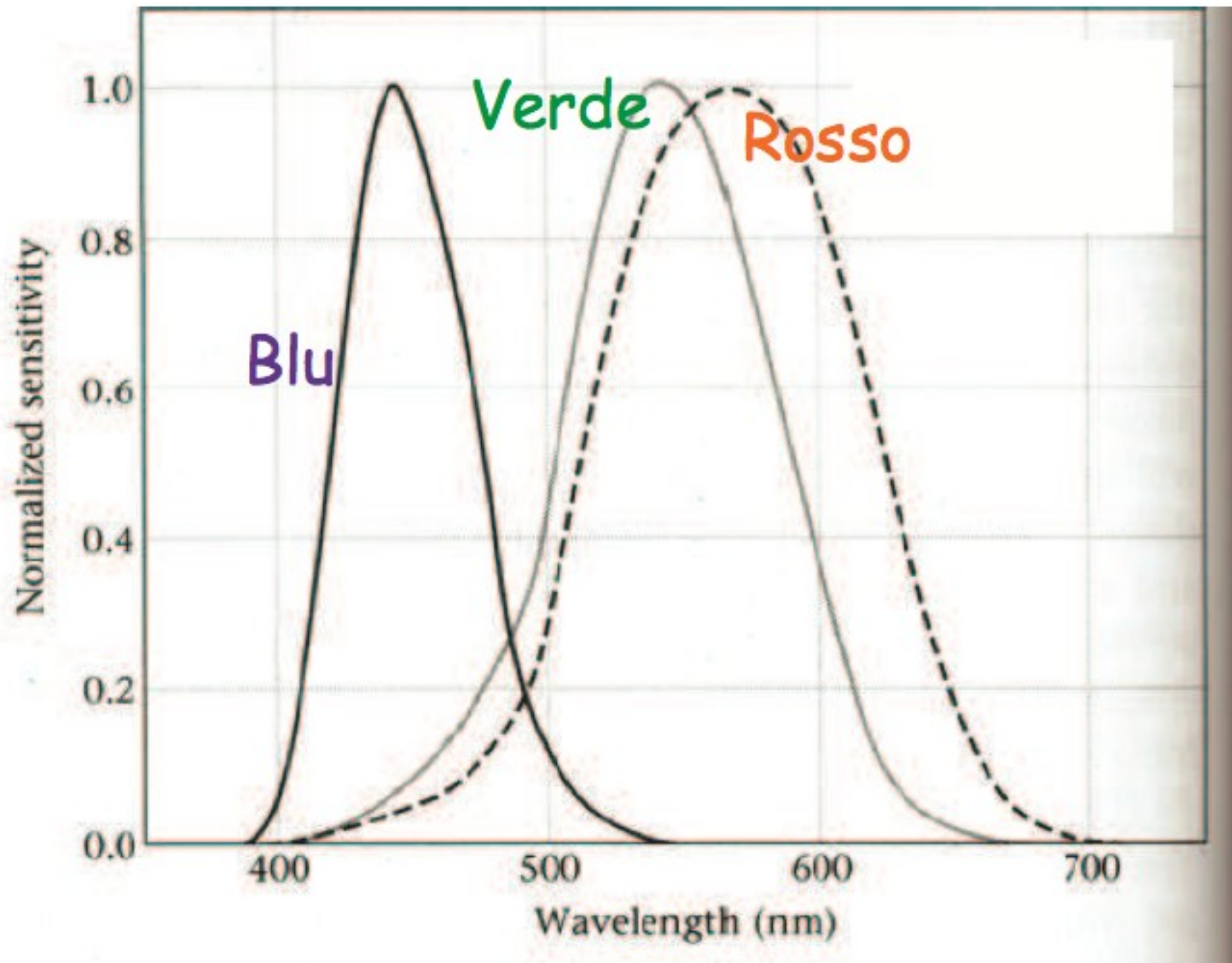
Coni di giorno e bastoncelli di notte

l'occhio umano ha la
massima sensibilità

- nella regione del **verde**
($\lambda_{\max}=555\text{nm}$) per alti livelli di
luce, es. in **luce diurna**
(visione **fotopica**)
- nella regione del **blu-verde**
($\lambda_{\max}=507\text{nm}$) per bassi livelli
di luce, es. in **luce notturna**
(visione **scotopica**)



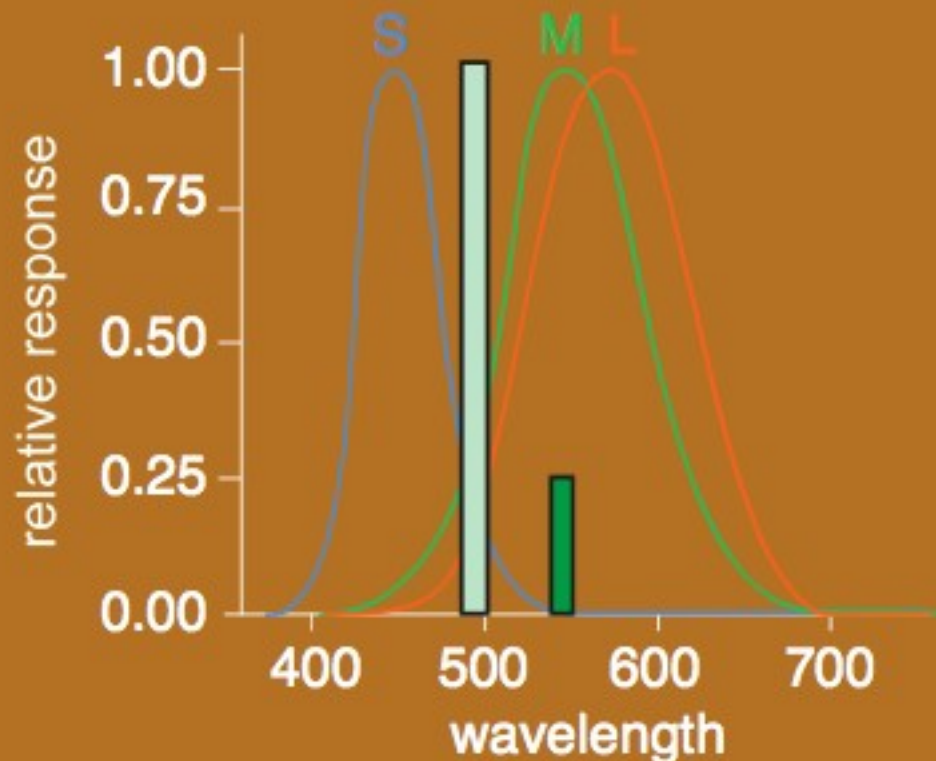
L'occhio ha tre tipi di coni



La percezione umana dei colori

Il raffronto permette di distinguere

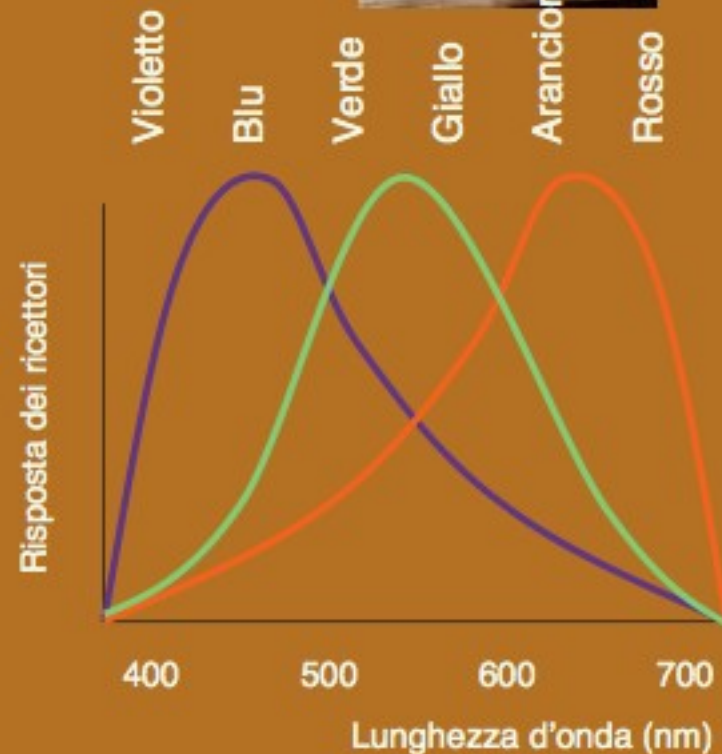
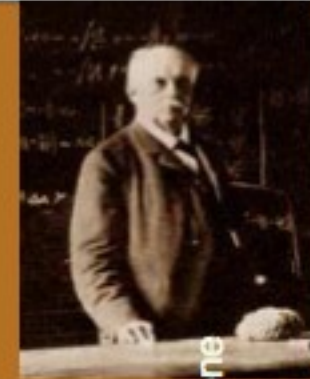
Lunghezze d'onda differenti, intensità differenti ma...
Risposta diversa per i diversi coni



La percezione umana dei colori

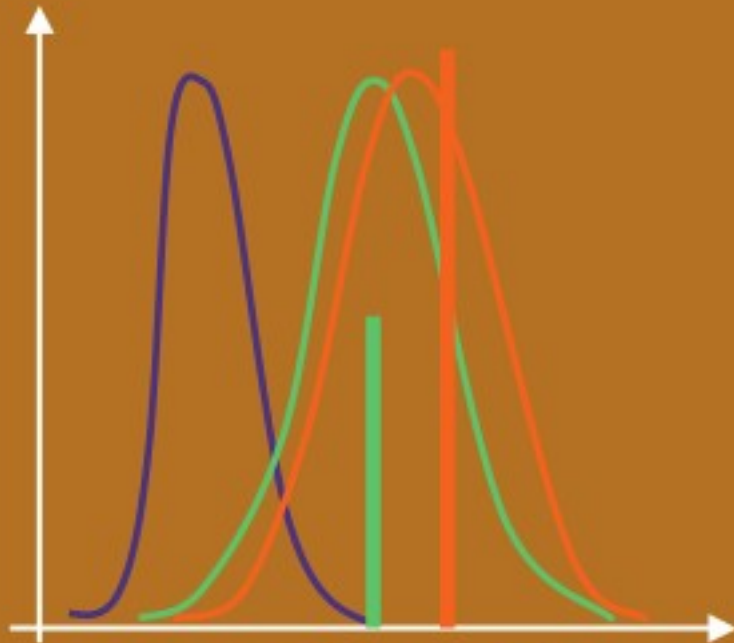
Helmholtz 1859: Teoria del Tristimolo

- Colori come risposte relative (rapporti)

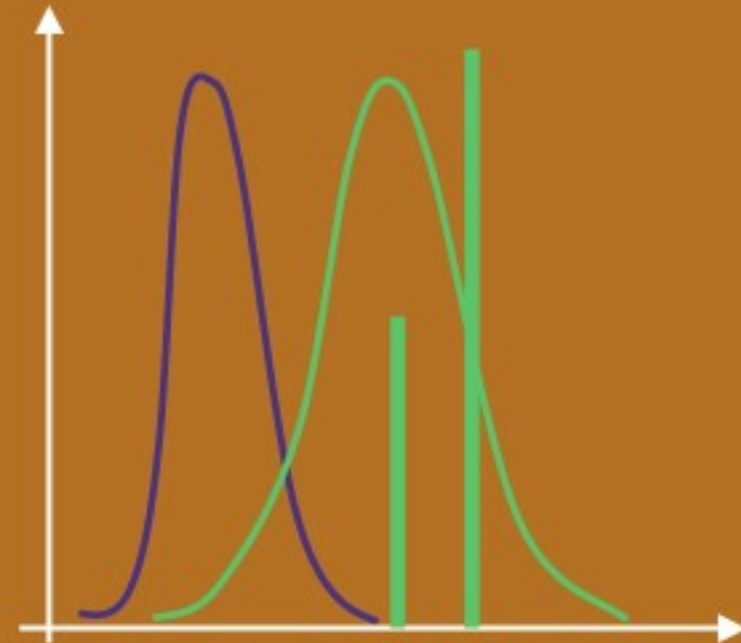


Daltonismo

Caso classico: manca il cono di un tipo (es. Rosso)
E' impossibile distinguere alcuni spettri



differenziati



Stessa risposta

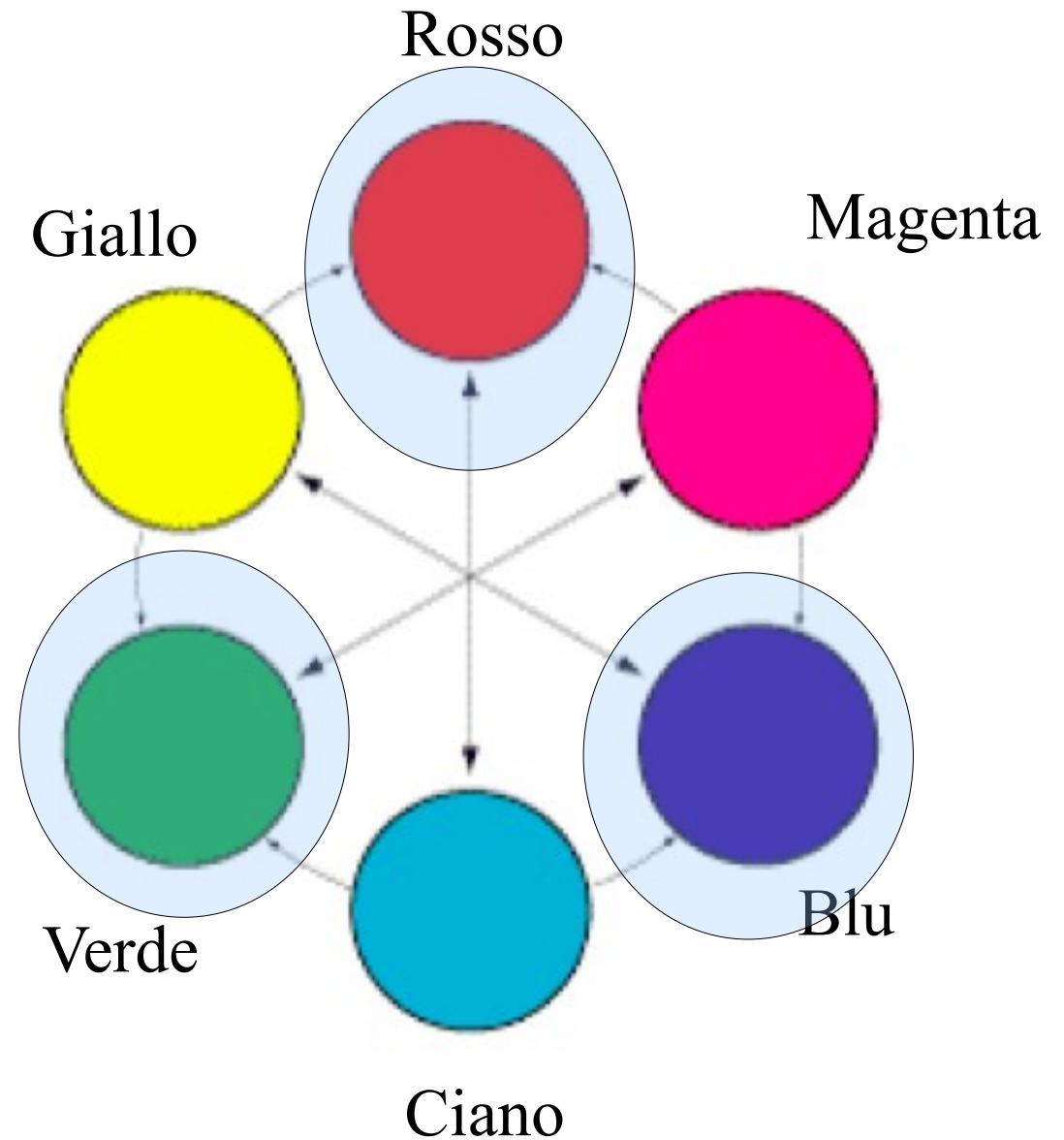
Cerchio di Goethe – colori primari

$R + Ve + B = \text{bianco}$

$R + Ve = \text{Giallo}$
(manca di 1/3 di spettro, il B);

$R + B = \text{Magenta}$
(o rosso porpora, manca del Ve);

$B + Ve = \text{Ciano}$
(blu-verde, manca del R).



Cerchio di Goethe – colori complementari

$R + Ve + B = \text{bianco}$

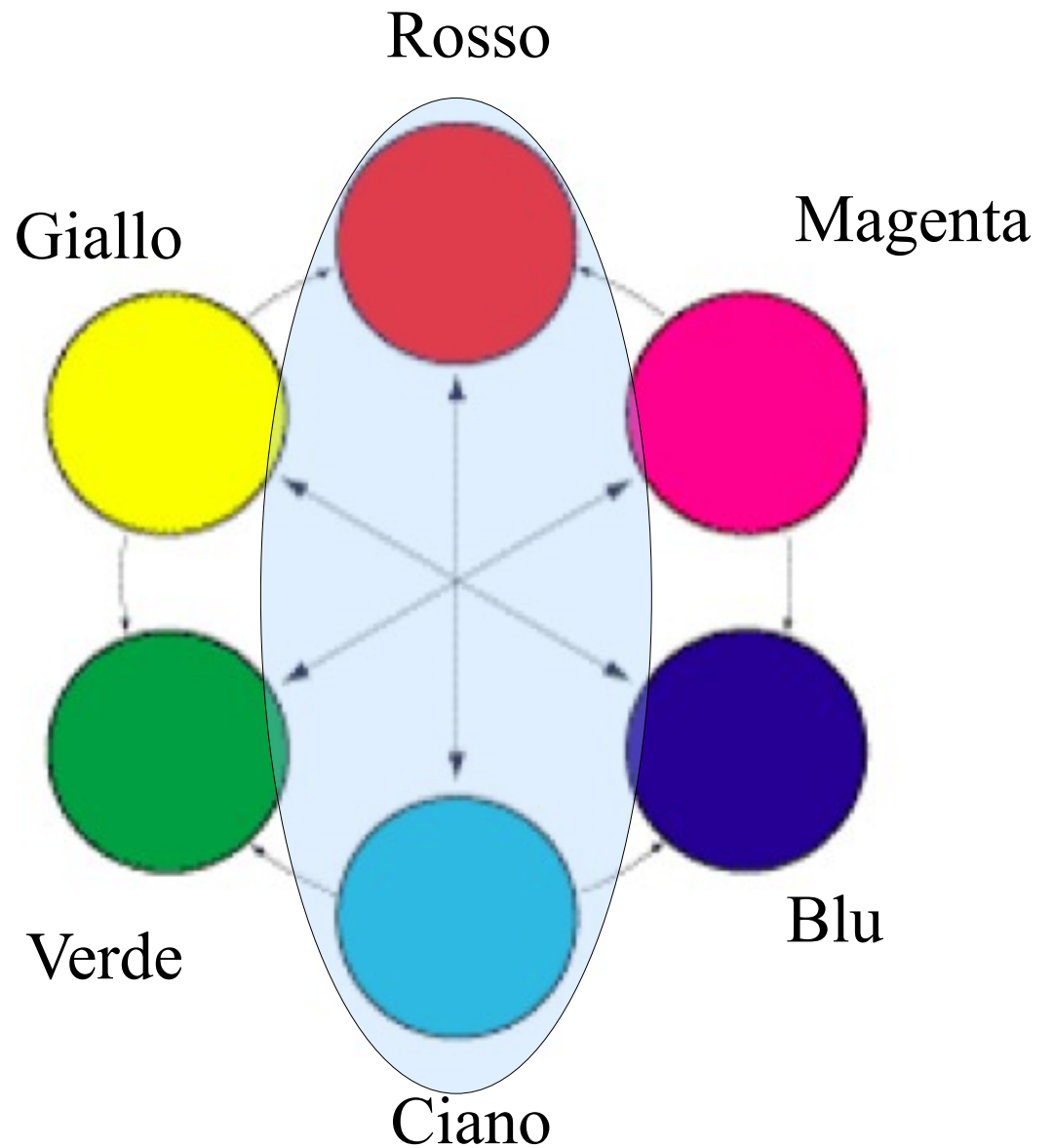
$R + Ve = \text{Giallo}$
(manca di 1/3 di spettro, il B);

$R + B = \text{Magenta}$
(o rosso porpora, manca del Ve);

$B + Ve = \text{Ciano}$
(blu-verde, manca del R).

Se si somma a un colore complementare il colore primario mancante si ha il bianco:

$G + B = \text{bianco}$
 $\text{Cian} + R = \text{bianco}$
 $\text{Mag} + Ve = \text{bianco}$



Cerchio di Goethe

$R + Ve + B = \text{bianco}$

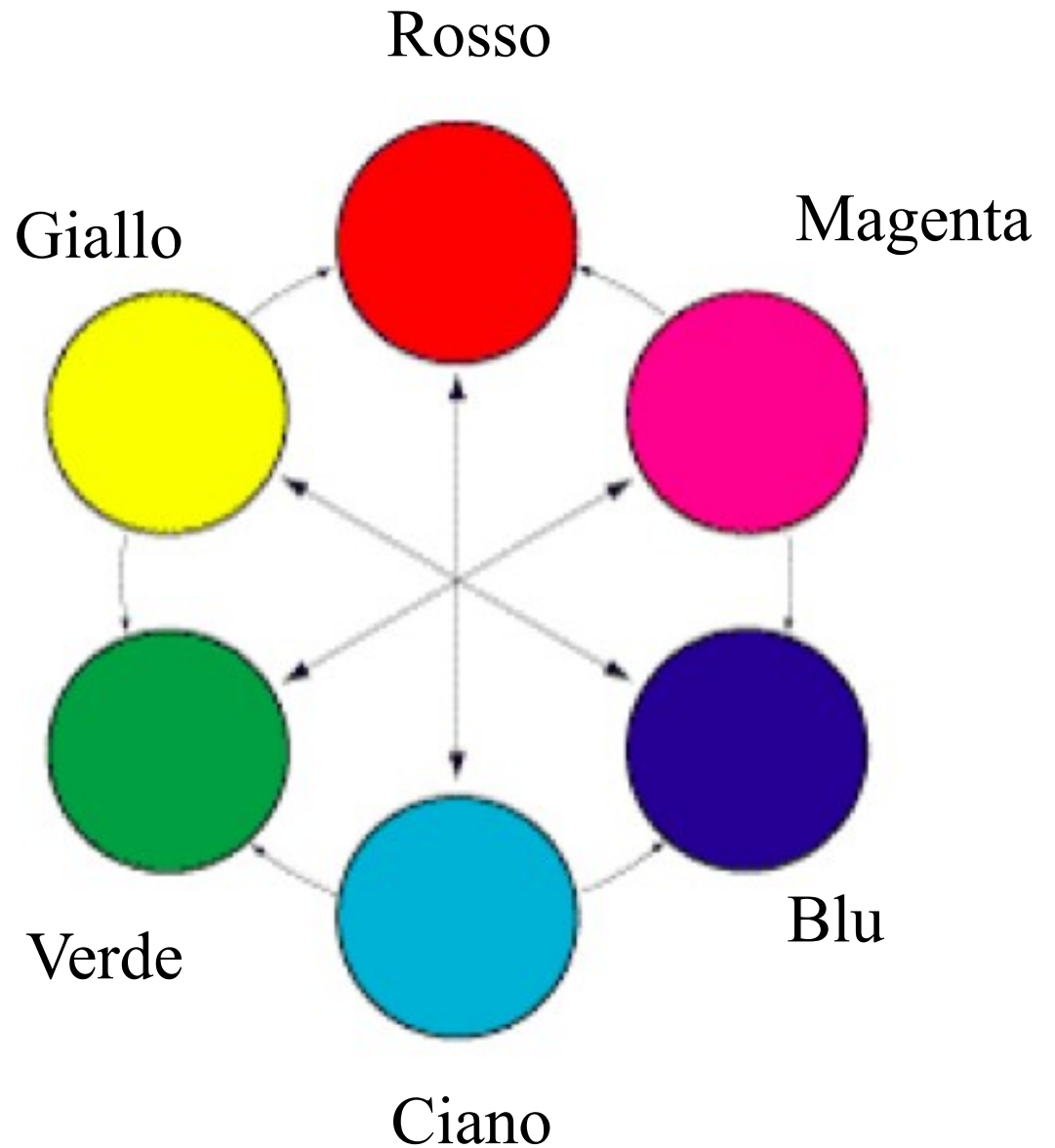
$R + Ve = \text{Giallo}$
(manca di 1/3 di spettro, il B);

$R + B = \text{Magenta}$
(o rosso porpora, manca del Ve);

$B + Ve = \text{Ciano}$
(blu-verde, manca del R).

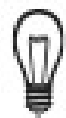
Se si somma a un colore complementare il colore primario mancante si ha il bianco:

$G + B = \text{bianco}$
 $\text{Cian} + R = \text{bianco}$
 $\text{Mag} + Ve = \text{bianco}$



Sintesi additiva

Nella sintesi additiva i colori si ottengono sovrapponendo su uno schermo fasci di luce colorata oppure affiancando piccole sorgenti di luce dei colori primari, sia come punti di colore su una superficie (stampa a colori, alcuni tipi di fotografia istantanea a colori), sia come sorgenti attive di luce (monitor a colori di TV e computer)



lampade

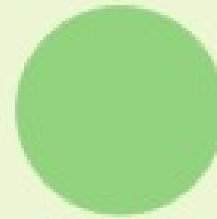


Sintesi additiva

**COLORI
PRIMARI**



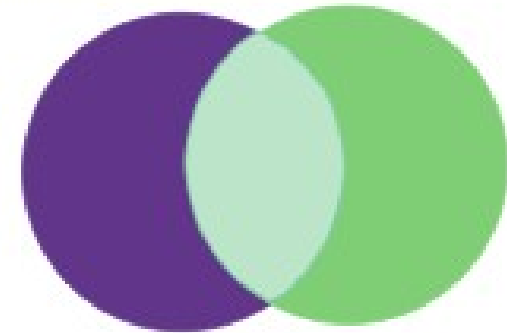
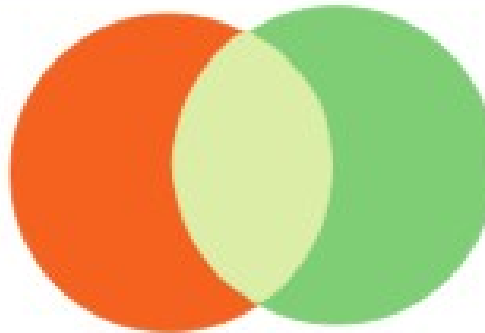
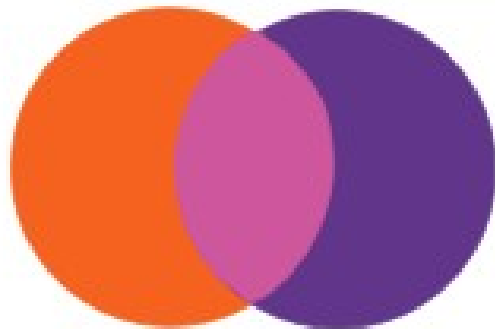
rosso



verde



blu

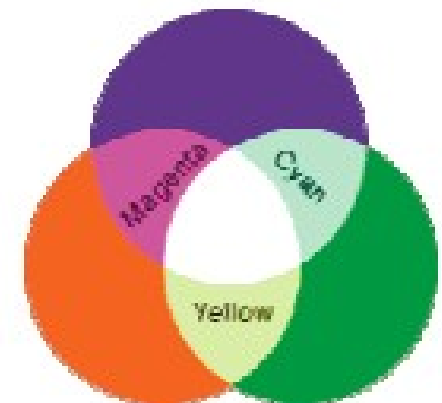


rosso + blu \Rightarrow magenta

rosso + verde \Rightarrow giallo

blu + verde \Rightarrow ciano

rosso + blu + verde \Rightarrow bianco



Sintesi sottrattiva

Nella sintesi sottrattiva si mescolano i pigmenti dei colori primari. Ciascun tipo di pigmento assorbe, cioè non fa passare, un certo tipo di luce. La sintesi sottrattiva è quello che avviene quando mescoliamo fisicamente dei colori, come le tempere e le vernici e i colori nelle stampanti

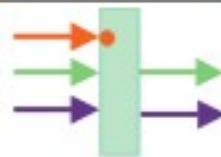


Sintesi sottrattiva

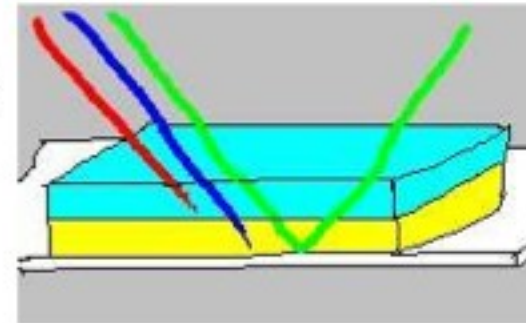
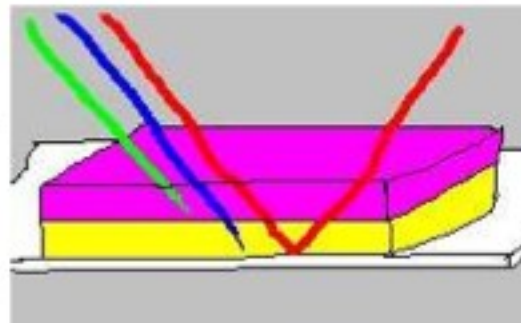
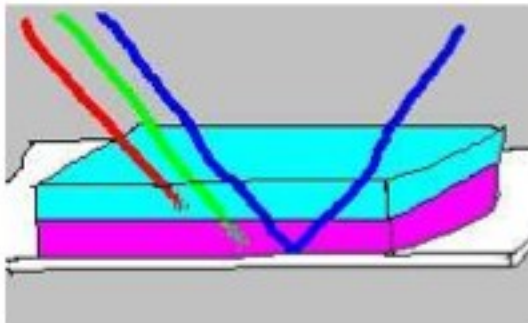
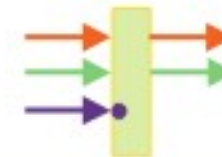
Un filtro **magenta** blocca il **verde** e fa passare solo il rosso e il blu



Un filtro **ciano** blocca il **rosso** e fa passare solo il verde e il blu



Un filtro **giallo** blocca il **blu** e fa passare solo il rosso e il verde

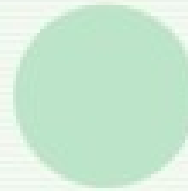


Sintesi sottrattiva

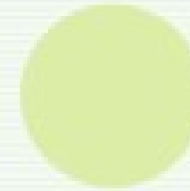
**COLORI
PRIMARI**



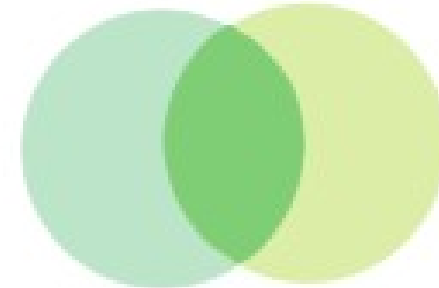
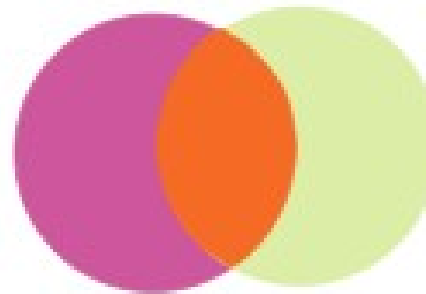
magenta



ciano



giallo



bianco - magenta - ciano \Rightarrow blu

bianco - magenta - giallo \Rightarrow rosso

bianco - ciano - giallo \Rightarrow verde

bianco - magenta - ciano - giallo \Rightarrow nero



Sintesi additiva: schermi LCD

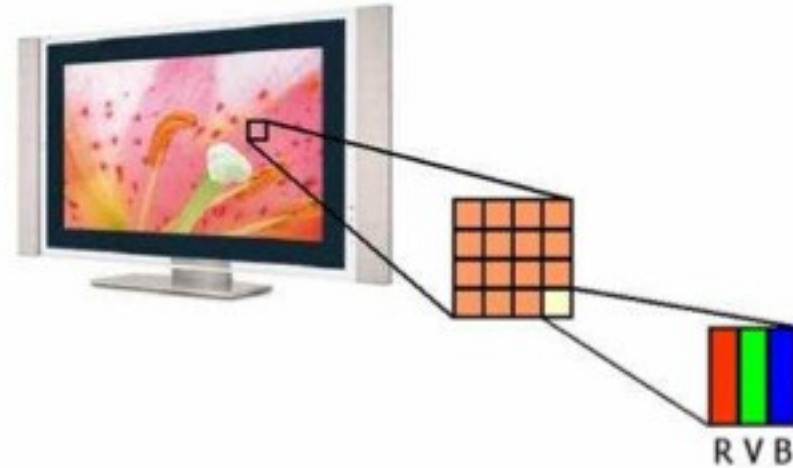
Sintesi additiva



verde + blu = ciano



verde + rosso = giallo



rosso + blu = magenta



verde + rosso + blu = bianco

La visione degli animali

Cani e Gatti hanno solo due coni
Gli uccelli ne hanno quattro:
vedono colori a noi sconosciuti
comprese tinte UV!!



Immagine ottica

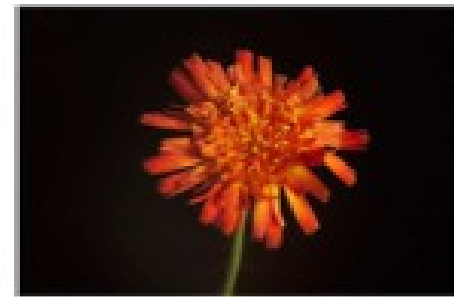
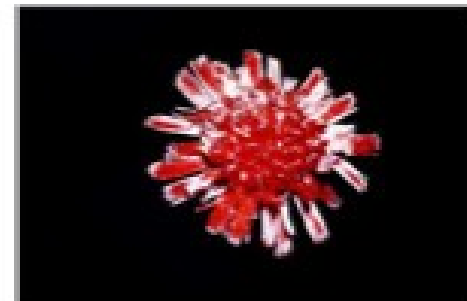
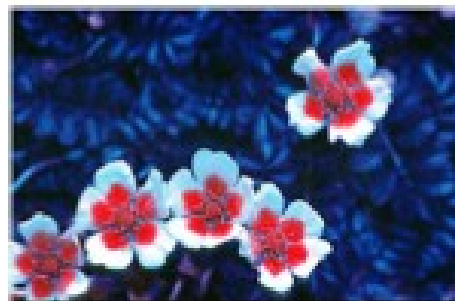
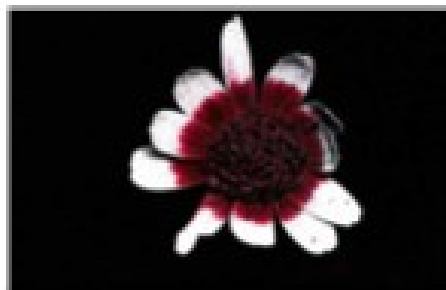
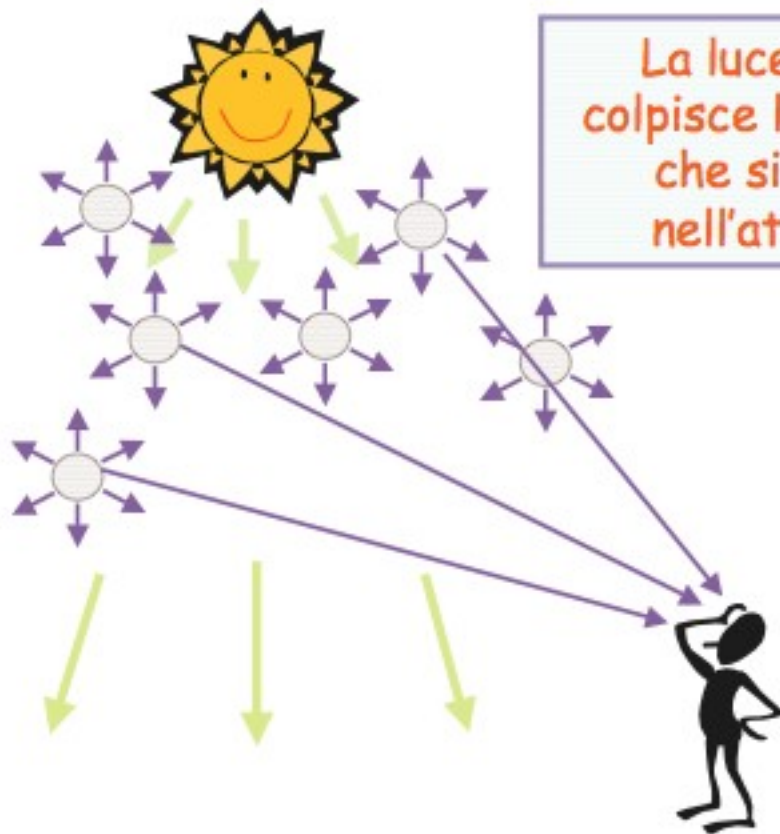


Immagine Ultravioletta



Perché il cielo è blu?

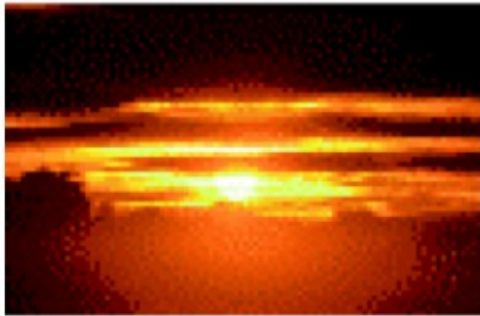


La luce del sole
colpisce le particelle
che si trovano
nell'atmosfera

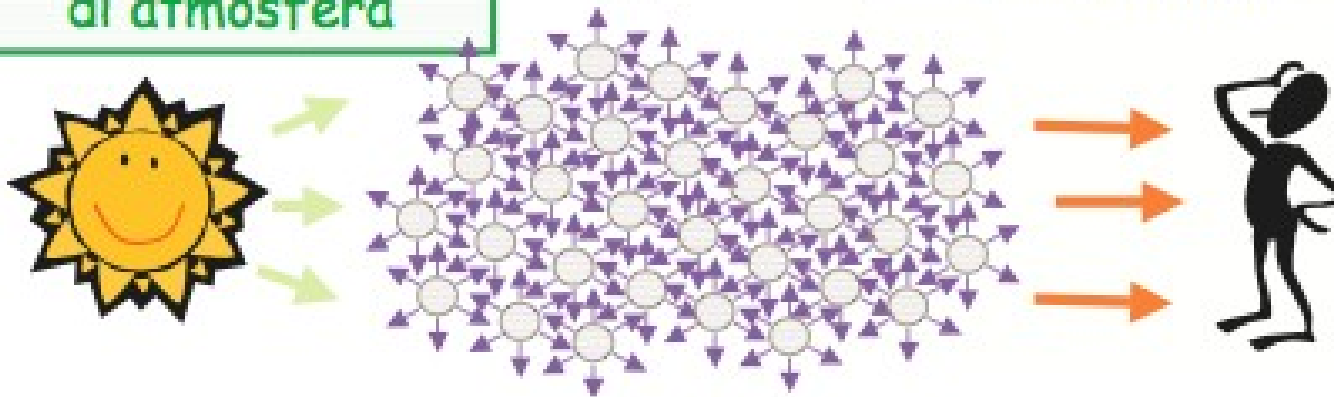
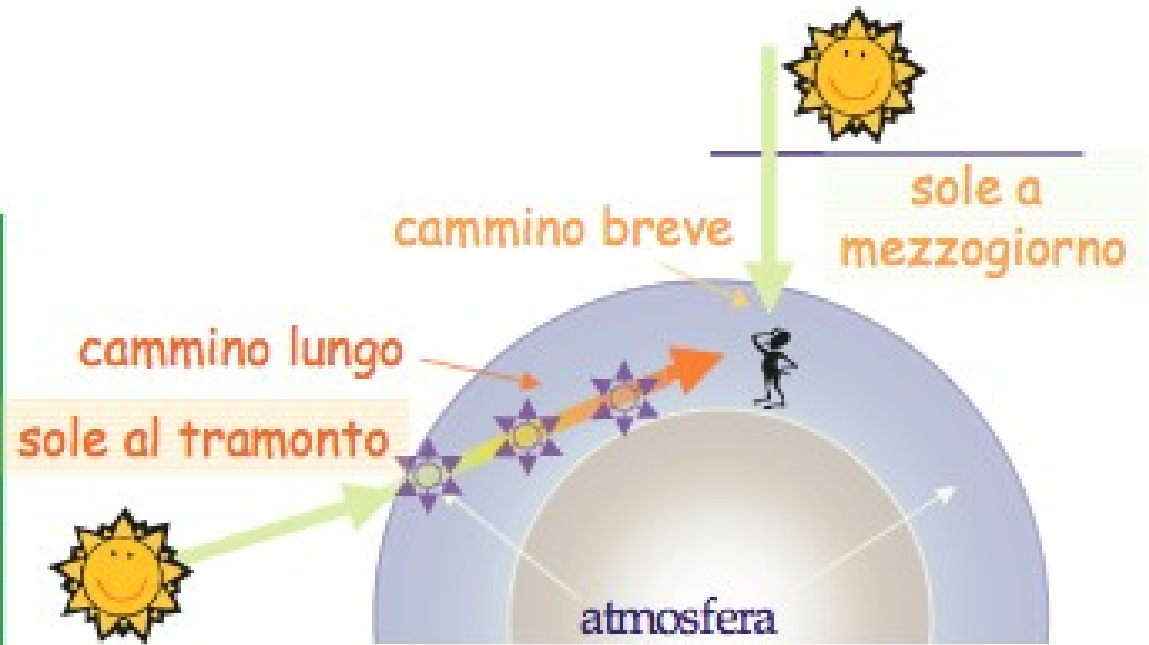
Le particelle
DIFFONDONO
proporzionalmente a
 $\frac{1}{\lambda^4}$
Quindi soprattutto la
radiazione
blu-violetta in tutte le
direzioni, ed anche
verso di noi

**Scattering
di Rayleigh**

Perché il sole al tramonto è rosso?



Quando il sole è basso sull'orizzonte i suoi raggi devono attraversare uno spessore maggiore di atmosfera



La diffusione della radiazione blu è molto intensa, e nella direzione dei raggi riesce a passare solo la luce rosso-arancio

Esperienza I – Luce e Colori

Sommario:

1. Teoria

- 1.1 Percezione del colore
- 1.2 Riflessione e rifrazione

2. Esperimenti proposti

- 2.1 Sintesi additiva
- 2.2 Sintesi sottrattiva

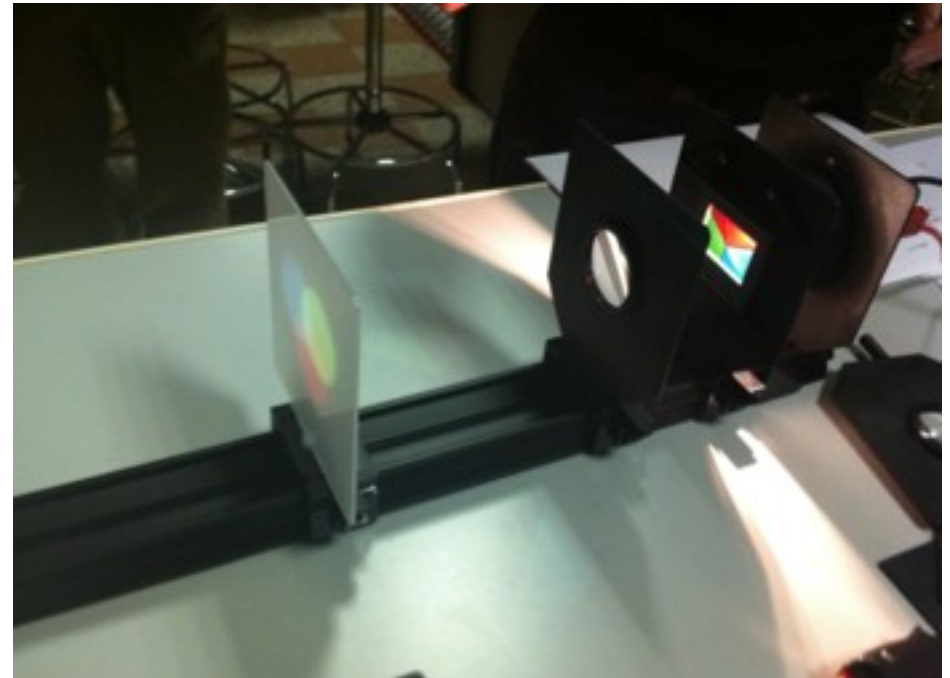
3. Analisi dei risultati



Esperienza I – Luce e Colori

1. Composizione dei colori mediante somma dei raggi luminosi di colore rosso, verde e blu:

- Accendere la lampada a tre filamenti
- Disporre sul supporto il filtro colorato numero 46797 della Leybold
- Osservare l'immagine sullo schermo e prendere nota dei colori delle aree



Esperienza I – Luce e Colori

2. Determinazione dei colori componenti mediante composizione additiva:

- Accendere la lampada a tre filamenti disponendo l'interruttore in modo da accendere solo due lampade
- Inserire in successione le seguenti coppie di filtri nel supporto per diaframmi e diapositive rispettando questi abbinamenti: rosso e ciano, verde e magenta, blu e giallo.
- Per ciascun abbinamento osservare l'immagine sullo schermo e prendere nota dei colori delle singole aree.
- Inserire in modo arbitrario altre combinazioni di filtri nel supporto per diaframmi e diapositive e confrontare in risultati delle varie aree di sovrapposizione con i risultati ottenuti precedentemente.



Sintesi additiva: osservazione

*Esperimento dimostrativo
sulla sintesi additiva dei
colori primari*

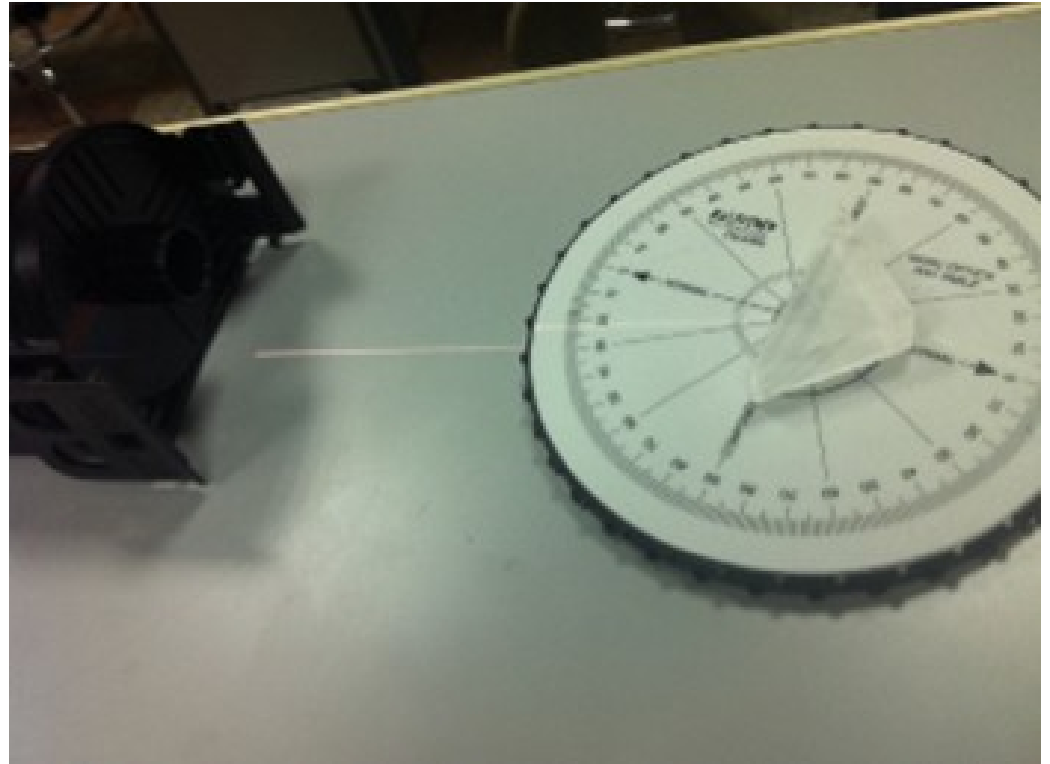
(sommare luce colorata a
luce colorata).



Esperienza I – Luce e Colori

3. Osservazione della decomposizione della luce bianca attraverso un prisma retto:

- Far incidere un fascio di luce bianca selezionato da una fenditura su di un prisma a sezione triangolare
- Il fascio esso subisce una doppia rifrazione: la prima quando incontra la superficie del prisma, la seconda quando, dopo averlo attraversato, riemerge nell'aria
- Sullo schermo bianco che raccoglie la luce proveniente dal prisma si osserva la successione dei colori dell'iride.



RIFLESSIONE E RIFRAZIONE



RIFLESSIONE E RIFRAZIONE

Concetti e nozioni chiave:

- sorgenti
- mezzi, superfici di separazione
- raggi luminosi
- propagazione, riflessione, diffusione, rifrazione, dispersione
- legge di Snell, indice di rifrazione, angolo limite, angolo di riflessione interna totale.
- prisma di deviazione, di inversione, prisma analizzatore.
- dispersione normale

La luce

Cosa è la luce?



Onda

(R. Hooke; C.Huygens -1678)

1. Fenomeno oscillatorio dove **non c'è propagazione di materia ma solo di energia**
2. Aggira gli ostacoli
3. Segue anche traiettorie **non rettilinee**



Fascio di Particelle

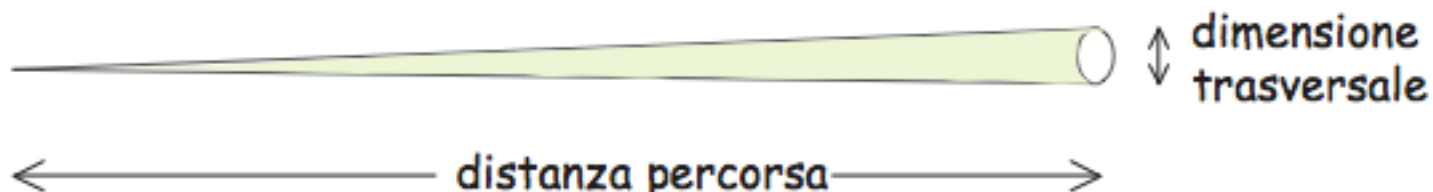
(I. Newton - Optiks 1704)

1. Si propaga in linea retta
2. Contorni netti delle ombre
3. Non aggira gli ostacoli

L'ottica geometrica

Cosa è la luce ?

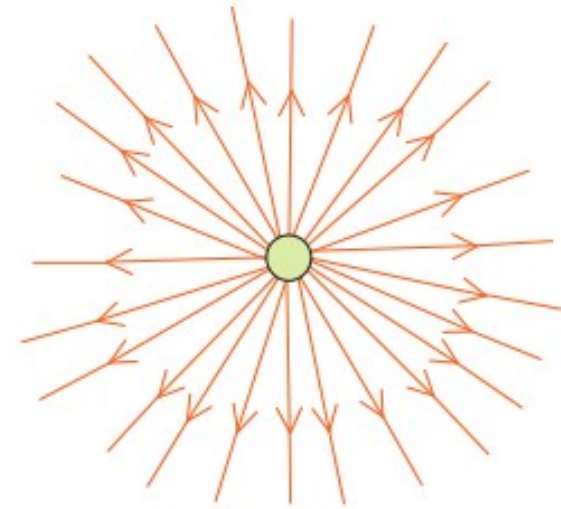
Per il momento **non** risponderemo a questa domanda, perché sarebbe più corretto chiedere: *quale modello è più efficace per descrivere il comportamento della luce in un dato esperimento?* La risposta dipende dalle condizioni dell'esperimento. Utilizzeremo invece un *modello di lavoro*. Supporremo di essere capaci di isolare un componente elementare della luce, un fascio infinitesimo che chiameremo *raggio luminoso*, e penseremo alla luce come decomponibile nei suoi raggi



Raggio luminoso: *cono di luce la cui dimensione trasversale sia molto piccola rispetto alla distanza percorsa negli esperimenti di nostro interesse. E' rappresentato da una freccia orientata nel verso della propagazione*

Sorgente di luci

Da una sorgente **puntiforme** escono raggi di luce in tutte le direzioni



Ogni punto di un *oggetto esteso*, sia esso una sorgente che emette luce propria, sia esso un corpo che diffonde luce di riflesso, può essere considerato una sorgente puntiforme.



Sorgente estesa che emette



Corpo esteso che diffonde

Esperienza II – Riflessione e rifrazione

Consideriamo un raggio luminoso che viaggia attraverso un mezzo trasparente, ad esempio l'aria. Se sul suo cammino incontra un nuovo mezzo trasparente, nel passaggio dall'uno all'altro mezzo il raggio subisce una deviazione abbastanza netta. Il raggio luminoso, prima di incontrare la superficie di separazione dei due mezzi trasparenti, viene detto raggio incidente; dopo la rifrazione raggio rifratto.

La rifrazione è la causa di numerosi fenomeni visivi facilmente osservabili.

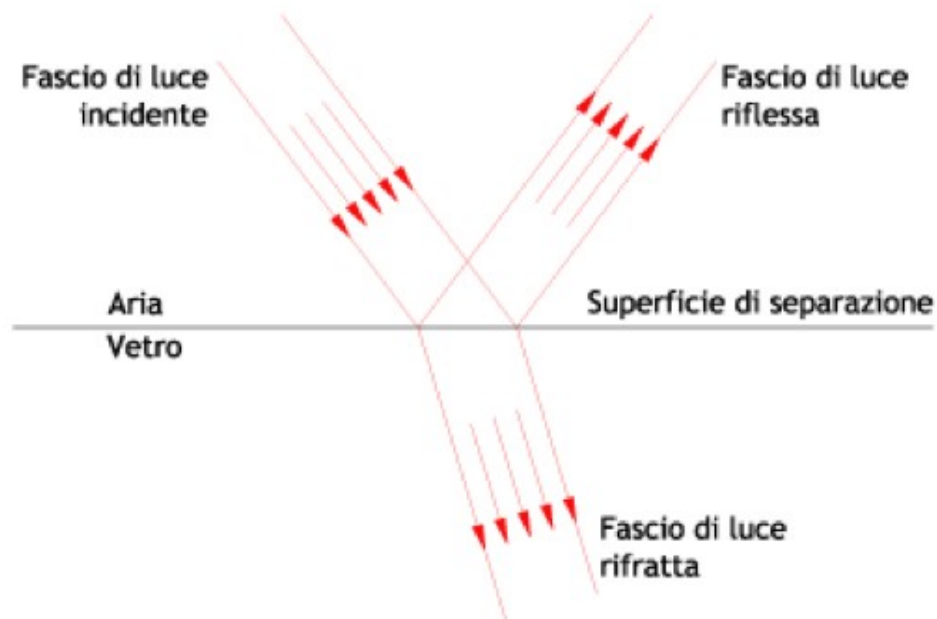


Figure 1: Schema della riflessione e della rifrazione della luce incidente su di un mezzo.

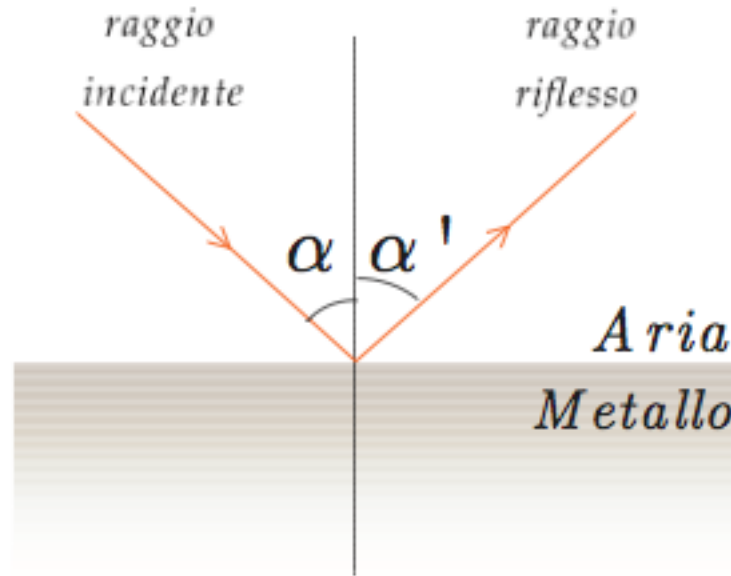
Riflessione

RIFLESSIONE SPECULARE

E

RIFLESSIONE DIFFUSA

Si produce un raggio riflesso per ogni raggio incidente sulla superficie di separazione di due mezzi a differente densità ottica



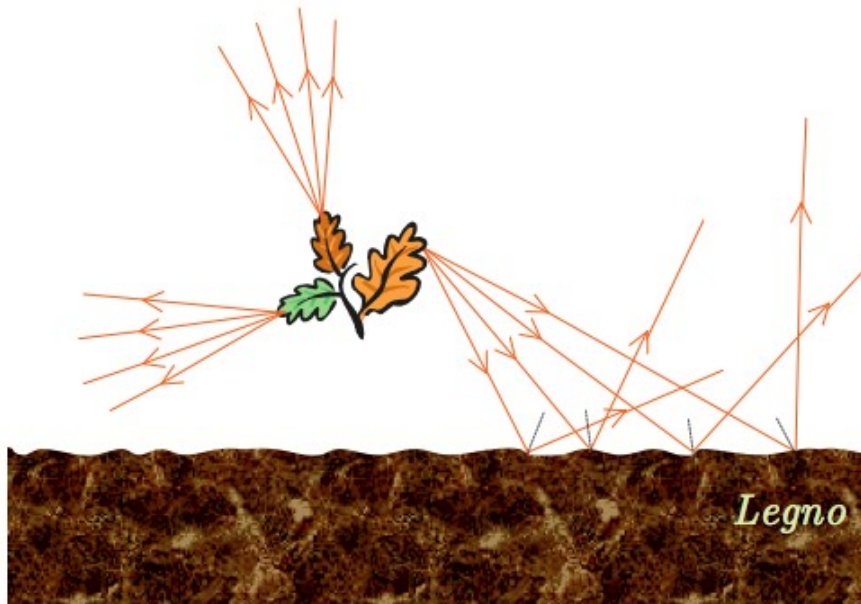
$$\alpha' = \alpha$$

LEGGE DELLA RIFLESSIONE PER UN RAGGIO SINGOLO

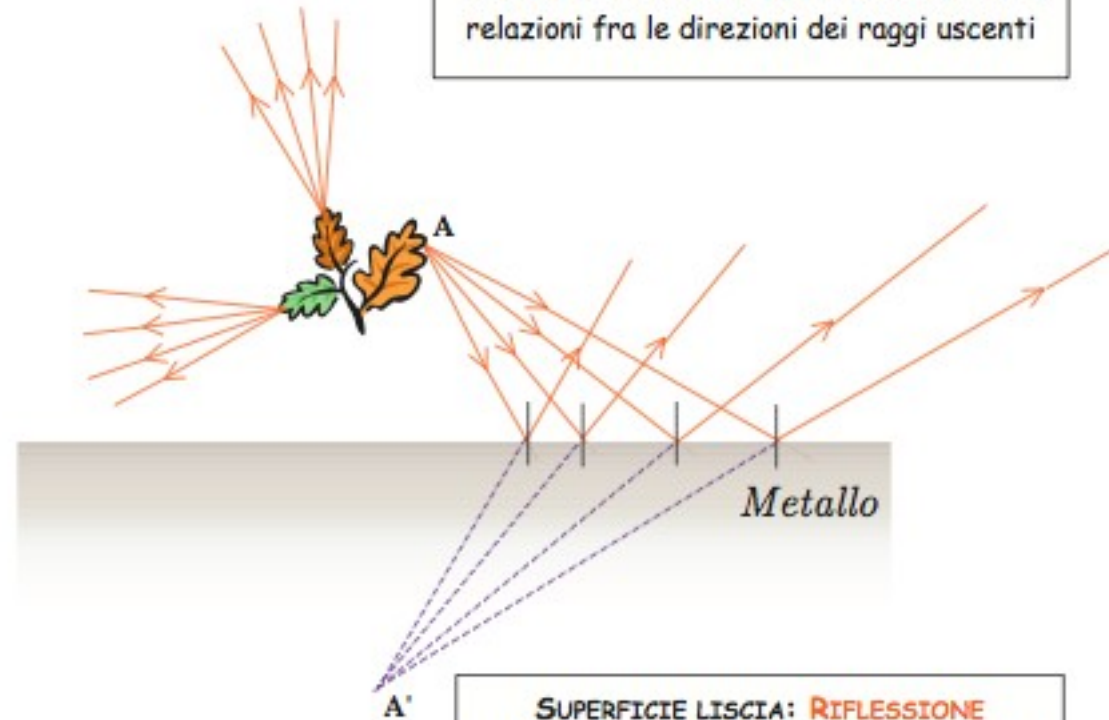
L'angolo che il raggio incidente forma con la normale è uguale all'angolo che forma con essa il raggio riflesso. Normale, raggio incidente e raggio riflesso appartengono allo stesso piano.

Riflessione da diverse superficie

CORPO ESTESO



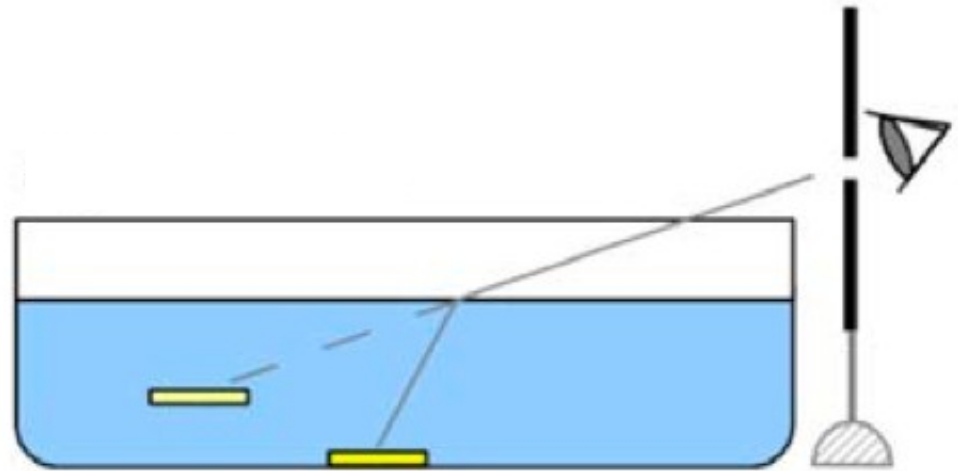
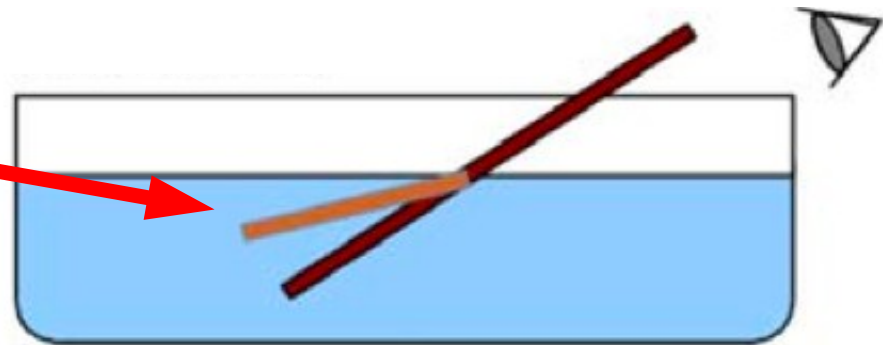
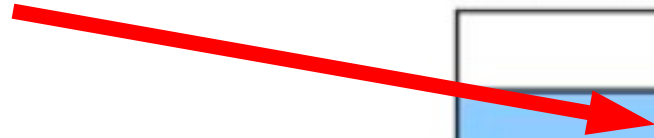
SUPERFICIE IRREGOLARE: DIFFUSIONE
Le normali hanno direzioni casuali e così le relazioni fra le direzioni dei raggi uscenti



SUPERFICIE LISCIA: RIFLESSIONE
Le normali sono tutte parallele e così i *prolungamenti* dei raggi uscenti da ogni punto dell'oggetto convergono in un altro punto ideale oltre la superficie

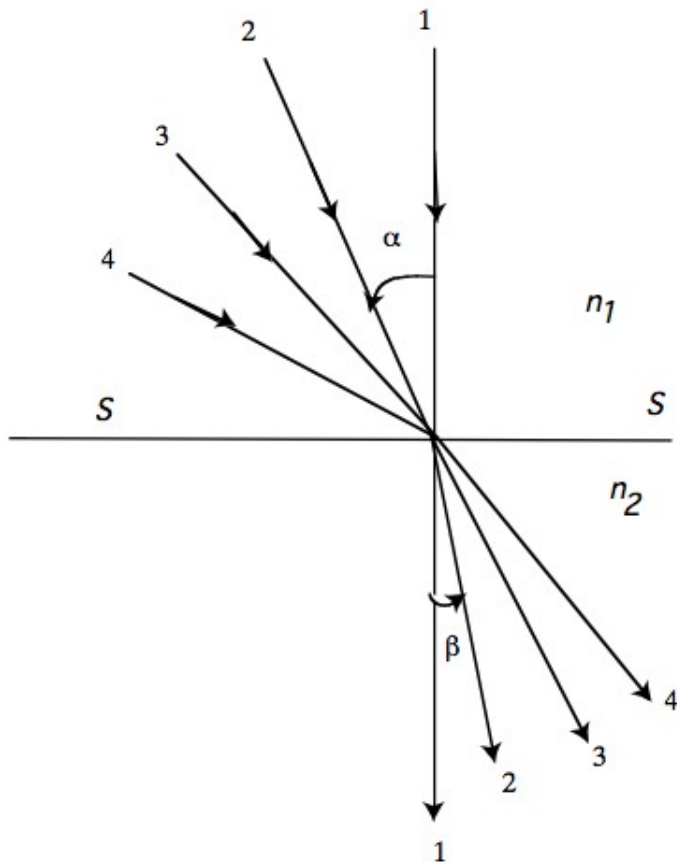
La legge della rifrazione

Immagine percepita



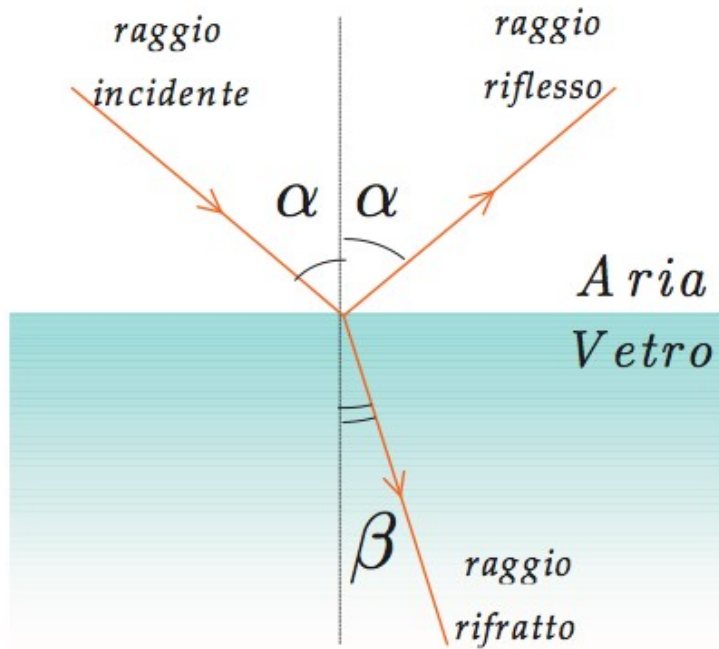
La legge della rifrazione o di Cartesio-Snell

$$n_1 < n_2$$



La luce si propaga da un mezzo
trasparente meno denso a uno più denso

La legge della rifrazione o di Cartesio-Snell



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$$

α angolo del mezzo meno denso

β angolo del mezzo più denso

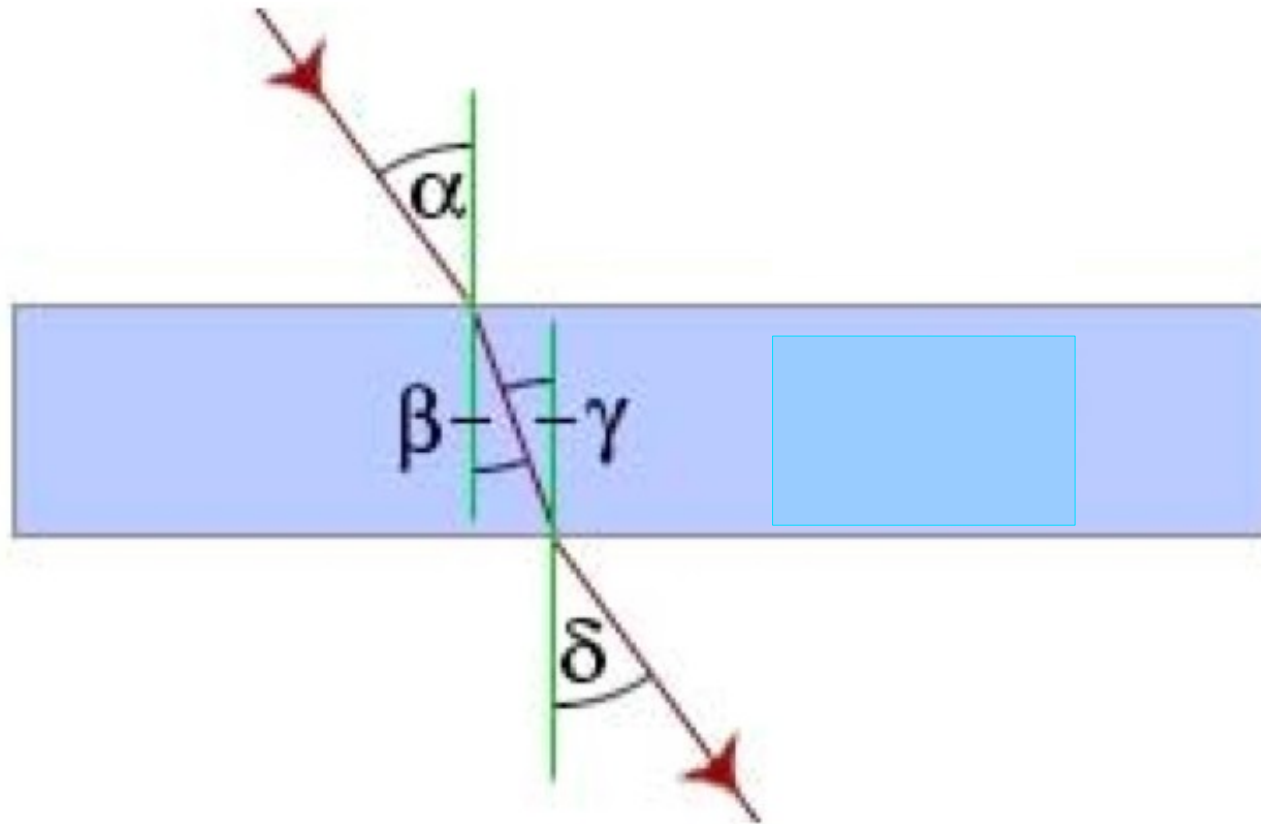
LEGGE DELLA RIFRAZIONE

Entrando in un mezzo più denso otticamente, il raggio si avvicina alla normale .

Il numero n si chiama indice di rifrazione del materiale,

ad esempio $n_{\text{vetro}} \approx 1.51$; $n_{\text{acqua}} \approx 1.33$

La legge della rifrazione: Lamina a faccie piane e parallele



Esperienza II – Riflessione e rifrazione

Rifrazione e legge di Snell

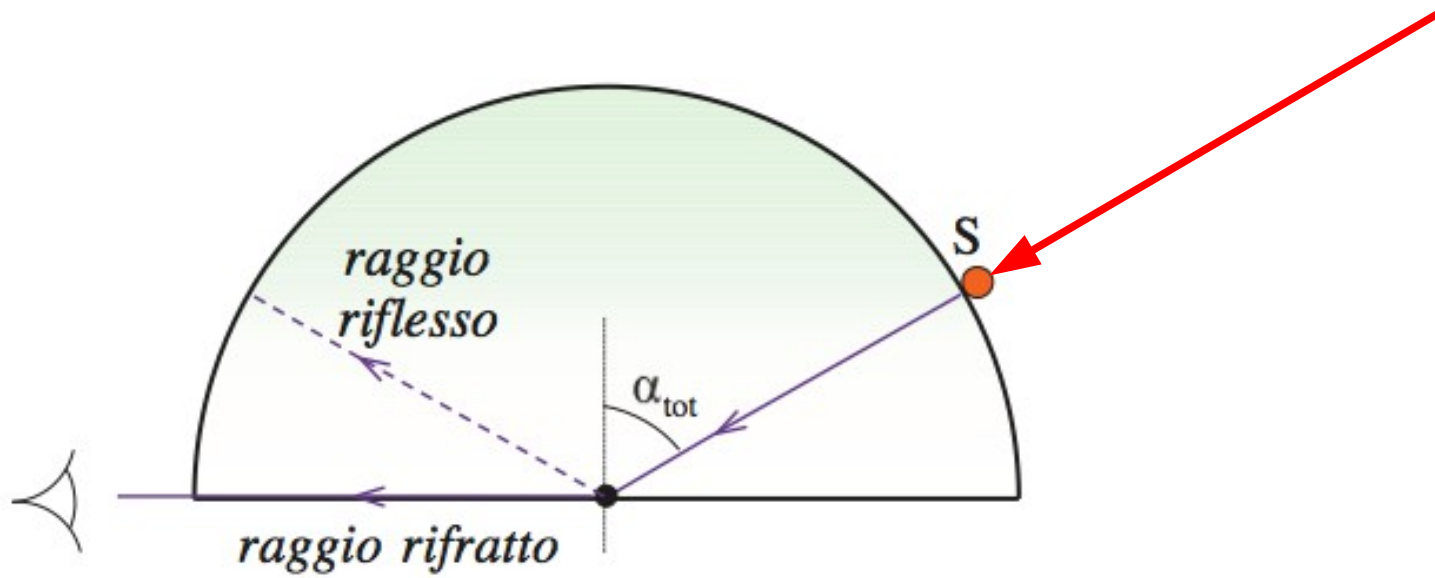
Nel fenomeno della rifrazione gli angoli di incidenza e di rifrazione sono legati dalla legge di Snell, che descrive quanto i raggi sono deviati quando passano da un mezzo ad un altro, in relazione ai rispettivi indici di rifrazione dei due mezzi attraversati. L'indice di rifrazione di un materiale è un parametro macroscopico, solitamente indicato col simbolo n , che rappresenta il fattore numerico per cui la velocità di propagazione di una radiazione elettromagnetica viene rallentata, rispetto alla sua velocità nel vuoto, quando questa attraversa un materiale. Se il raggio proviene da una regione con indice di rifrazione n_1 ed entra in un mezzo ad indice n_2 gli angoli di incidenza α e di rifrazione β sono legati dall'espressione:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

Riflessione totale

Se $n_2 > n_1$, quindi se il secondo mezzo è otticamente più denso del primo, $\sin \beta < \sin \alpha$, per cui per ogni angolo di incidenza α ci sarà un angolo di rifrazione β reale. Viceversa se $n_2 < n_1$ (passaggio da un mezzo più rifrangente ad uno meno rifrangente), si avrà un valore reale per β solo per un angolo di incidenza minore di un certo valore α_* per cui si ha $\sin \alpha < n_2$. Per angoli di incidenza maggiori di α_* si ha riflessione totale e la radiazione non viene trasmessa nel mezzo meno rifrangente.

Riflessione totale ed angolo limite



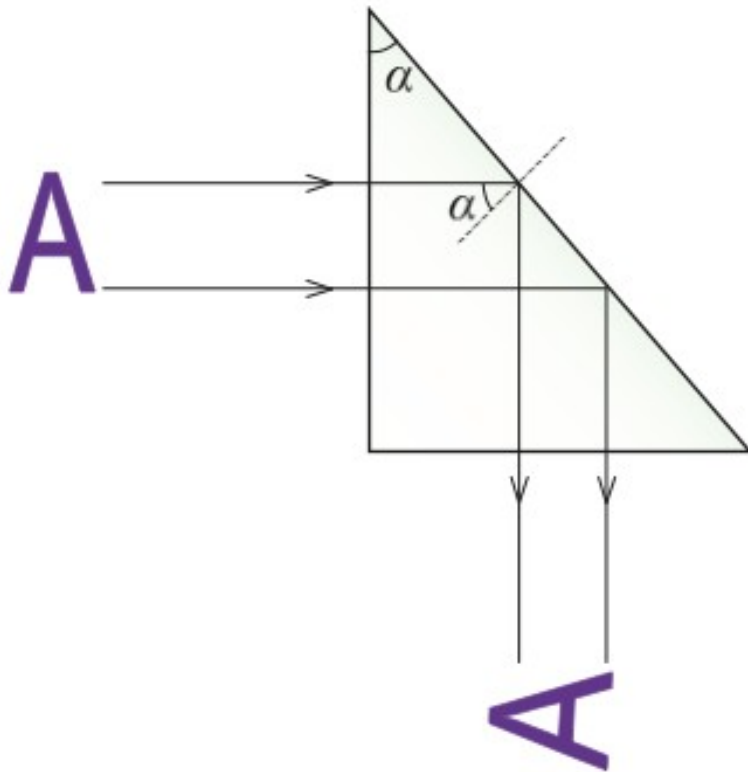
Accade se passo da un mezzo più denso ad uno meno denso:

$$n = \frac{\sin(\text{angolo mezzo meno denso})}{\sin(\text{angolo mezzo più denso})} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin \alpha_{tot}} = \frac{1}{\sin \alpha_{tot}}$$

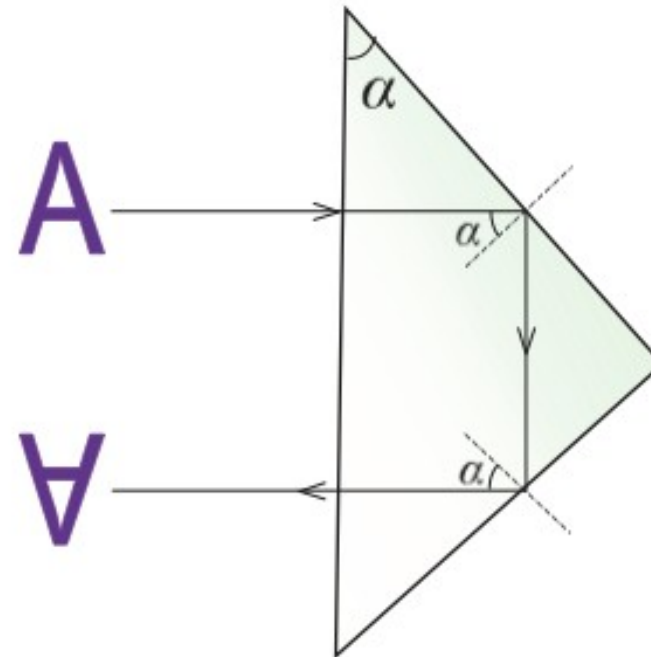
$$\alpha_{tot} = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right) \approx \arcsin\left(\frac{1}{1.487}\right) \approx 42.25^\circ$$

Applicazioni della riflessione totale

Prisma deviatore



Prisma invertitore



La fibra ottica

Le fibre ottiche sono dei filamenti di materiale dielettrico trasparente realizzate in modo da condurre la luce per riflessione totale interna. Se la luce viaggia nella fibra con un angolo di incidenza sufficientemente elevato, viene riflessa totalmente senza uscire. Le fibre ottiche sono normalmente disponibili sotto forma di cavi e hanno un impiego importante nel campo delle telecomunicazioni su grandi distanze.

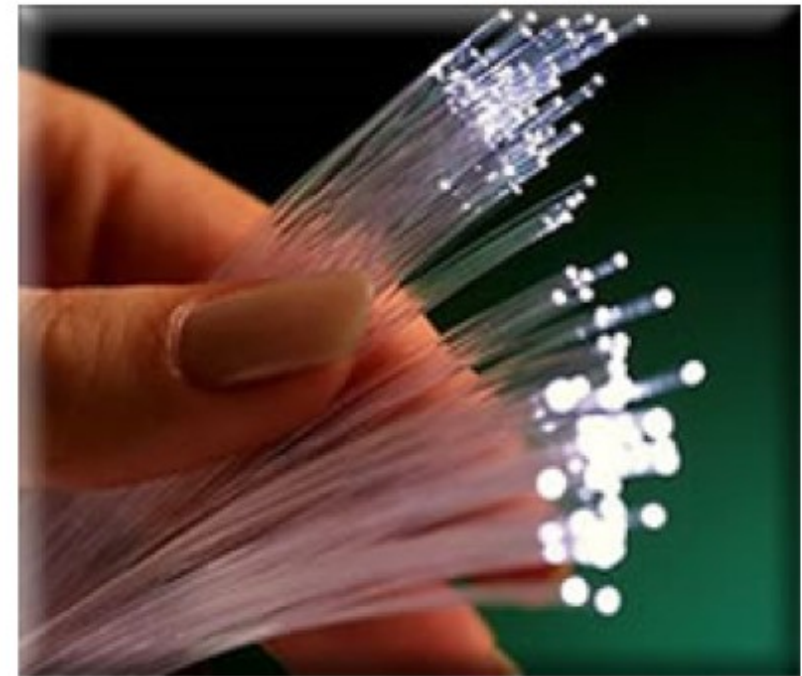
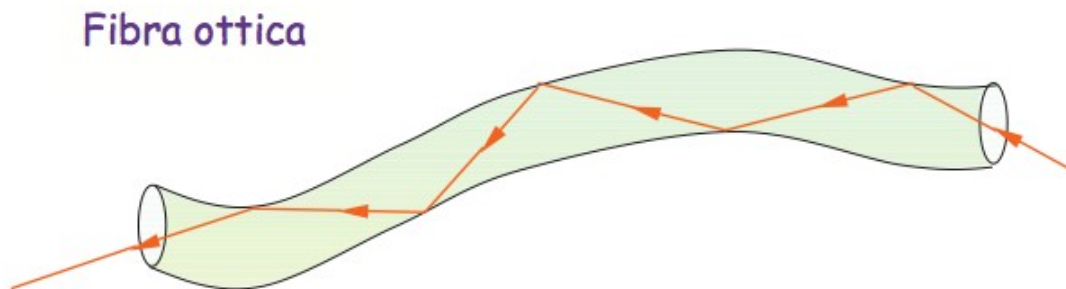


Figure 3: Fibra ottica.

La dispersione della luce

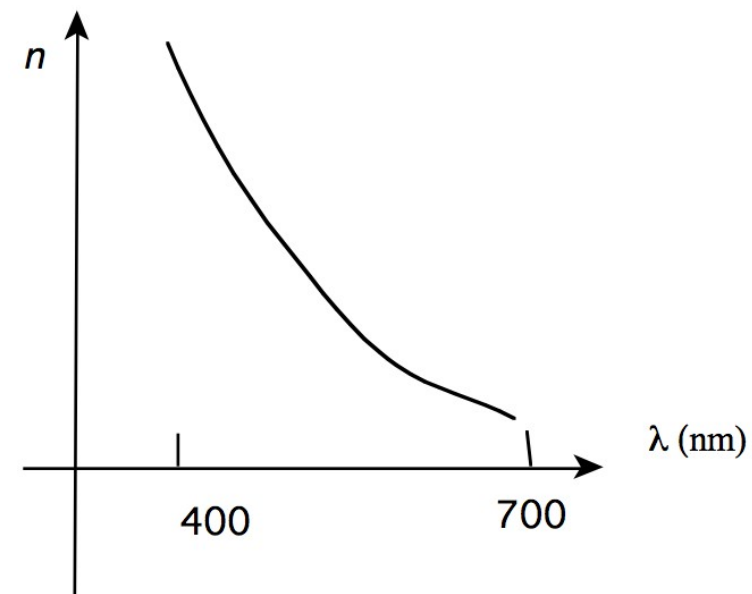
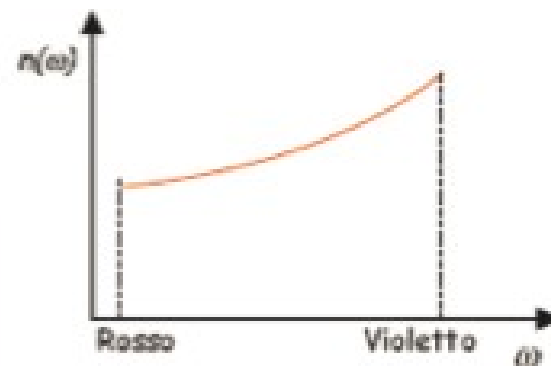
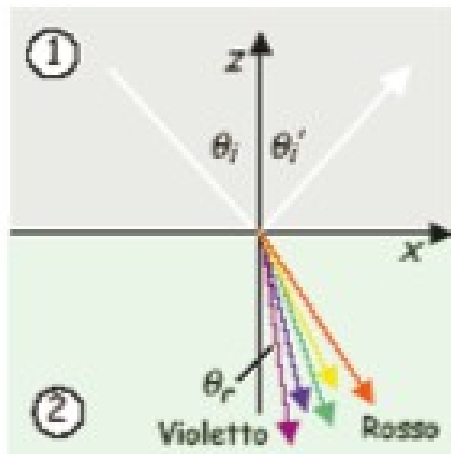
La luce bianca risulta composta di colori, componenti che hanno

differente velocità nei mezzi otticamente densi: $n = \frac{c}{v}$

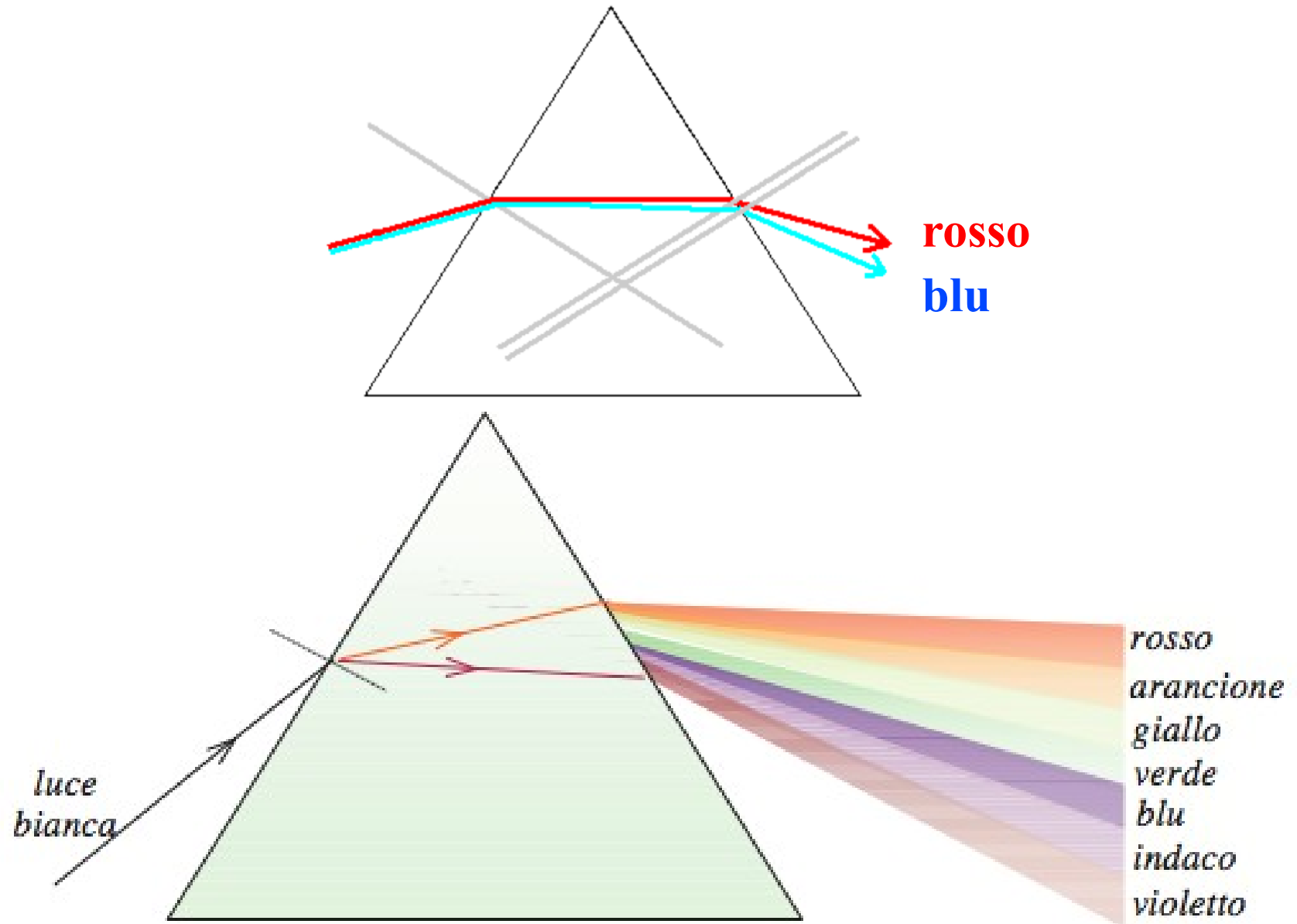
il rosso è di poco più veloce, il blu di poco più lento e così la rifrazione cambia.

	Vetro	Acqua	Diamante	Zirconia Cubica
Rosso	1.514	1.331	2.410	2.220
Giallo	1.517	1.333	2.417	2.230
Blu	1.523	1.340	2.450	2.280

Maggiori sono le differenze, più efficacemente i colori sono mostrati

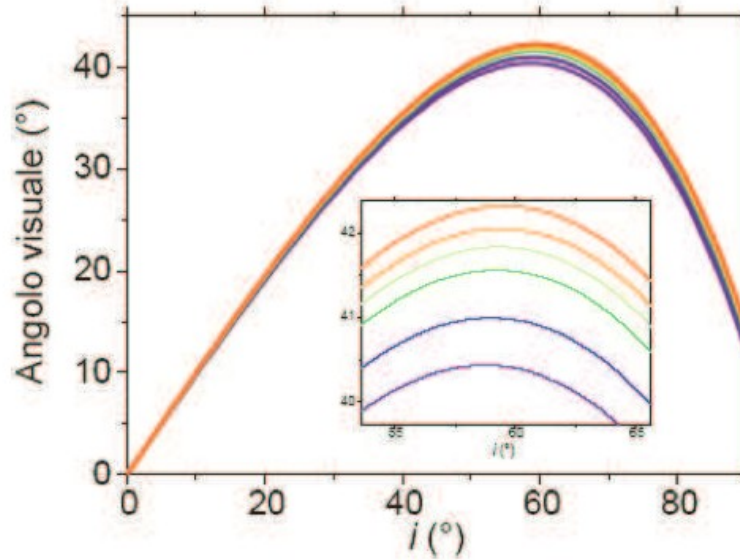


La dispersione della luce: il prisma

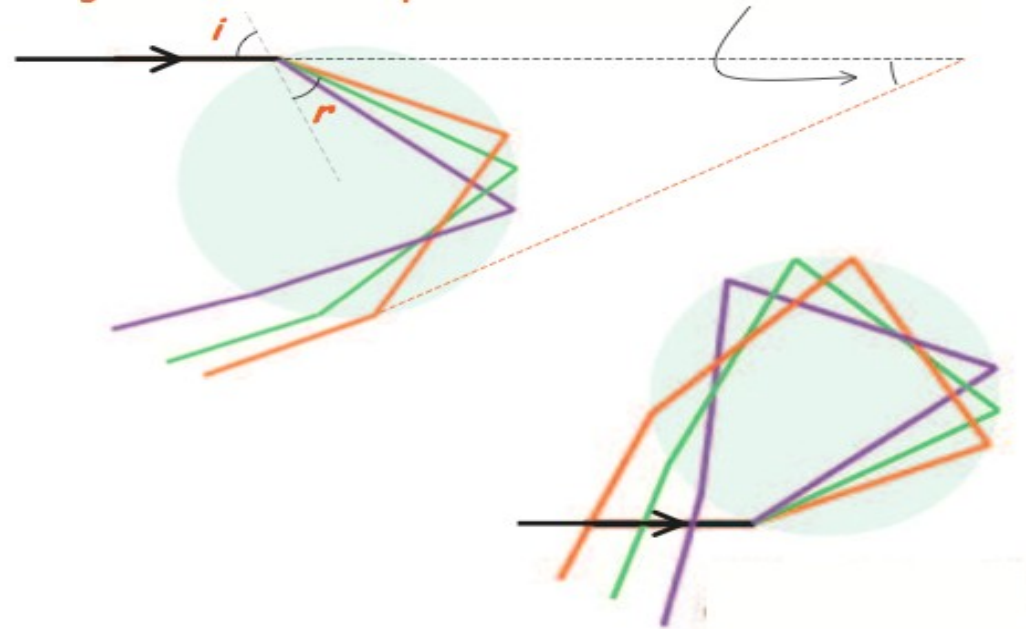


L'arcobaleno

λ (nm)	n	
400	1.34451	
425	1.34235	
450	1.34055	
475	1.33903	
500	1.33772	
525	1.33659	
550	1.33560	
575	1.33472	
600	1.33393	
625	1.33322	
650	1.33257	
675	1.33197	
700	1.33141	

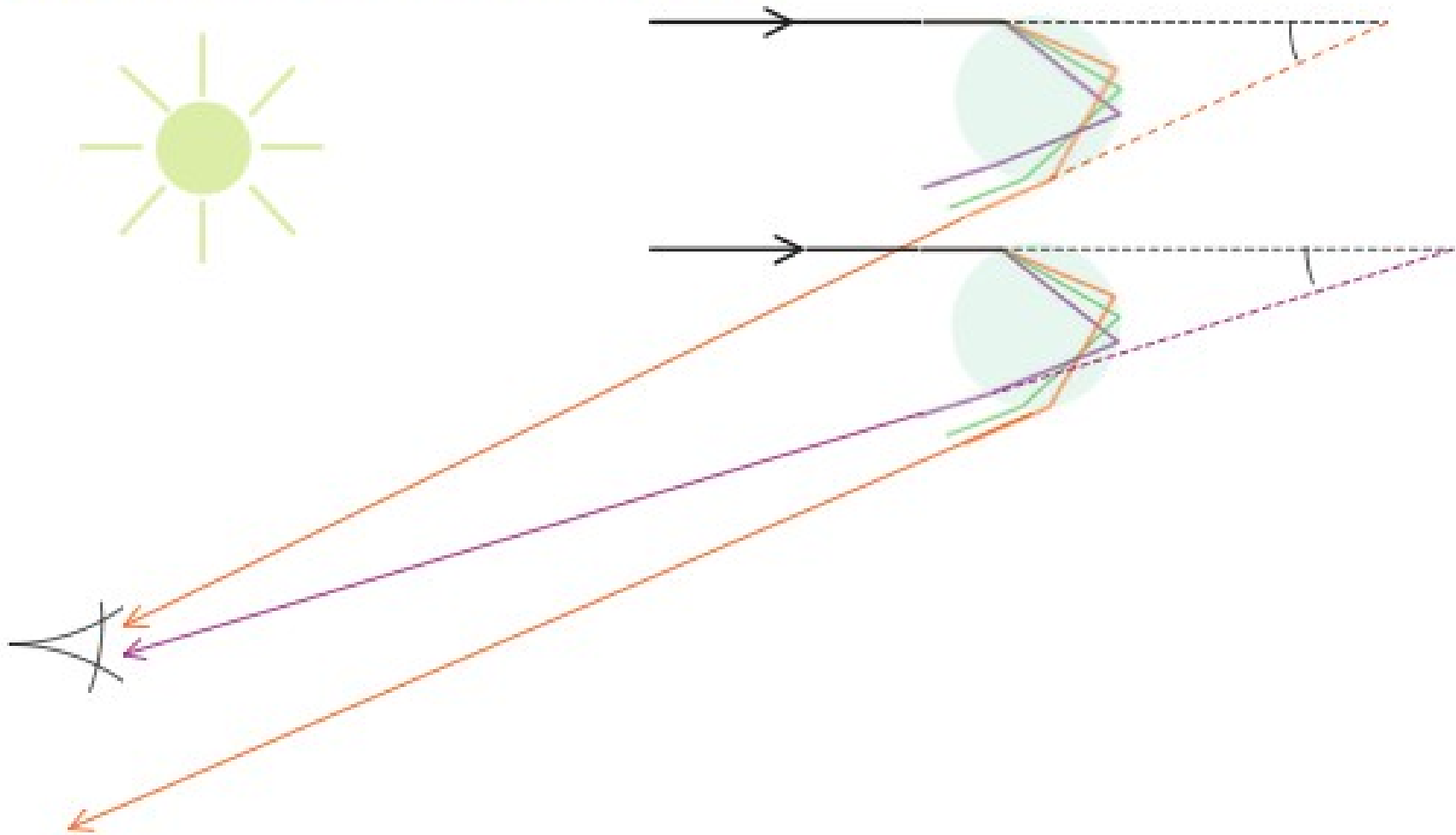


angolo di deviazione dipende dai colori: $\delta = 4r - 2i$



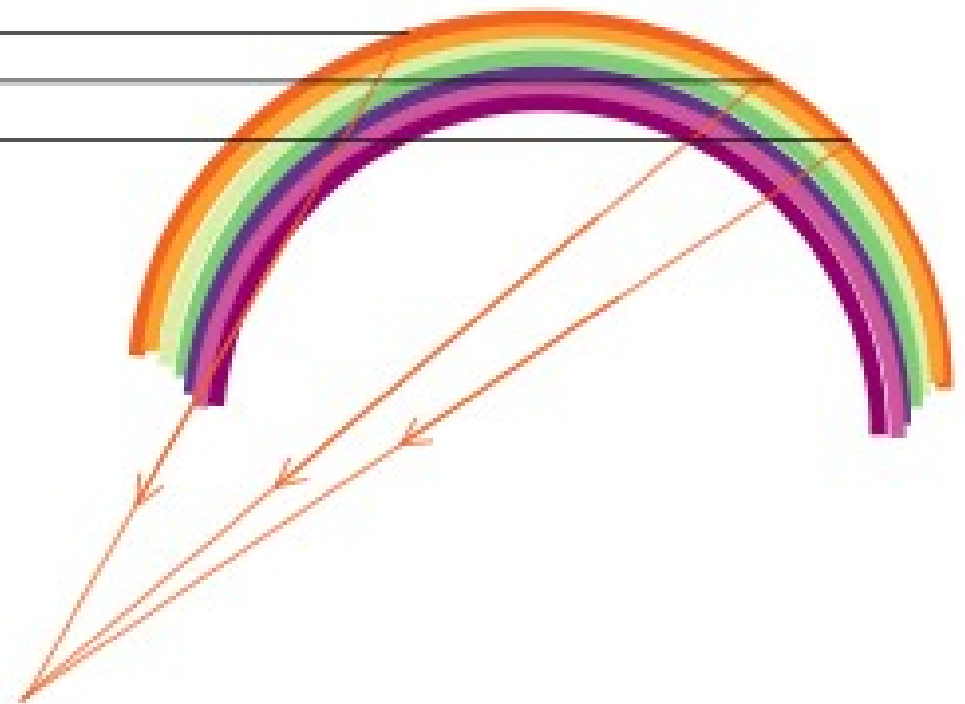
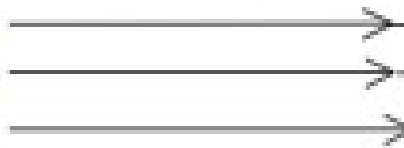
L'arcobaleno

Ogni goccia trasmette un solo colore in un punto di osservazione



L'arcobaleno

Ma perché un arco?

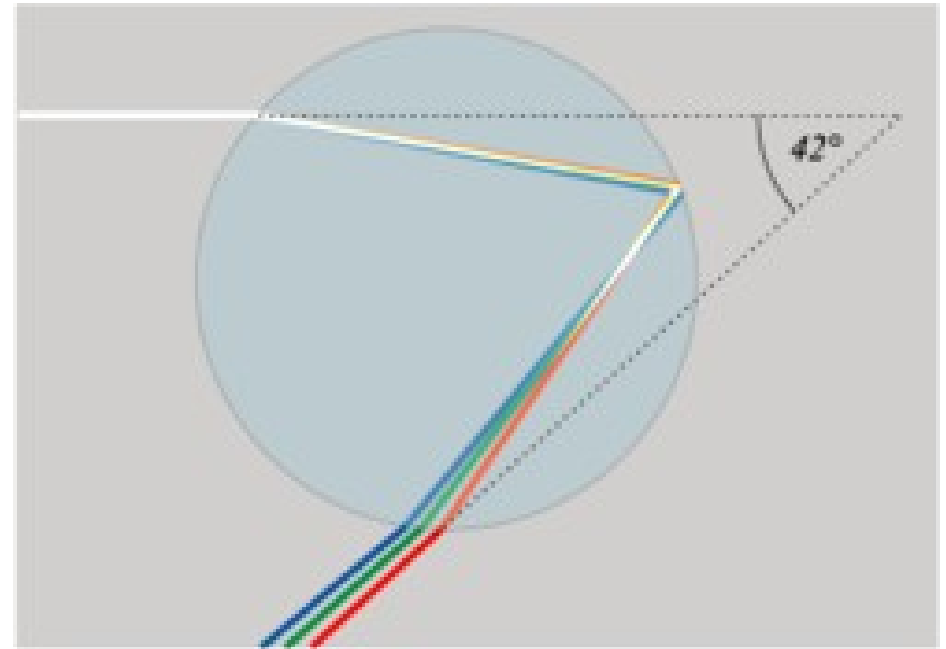
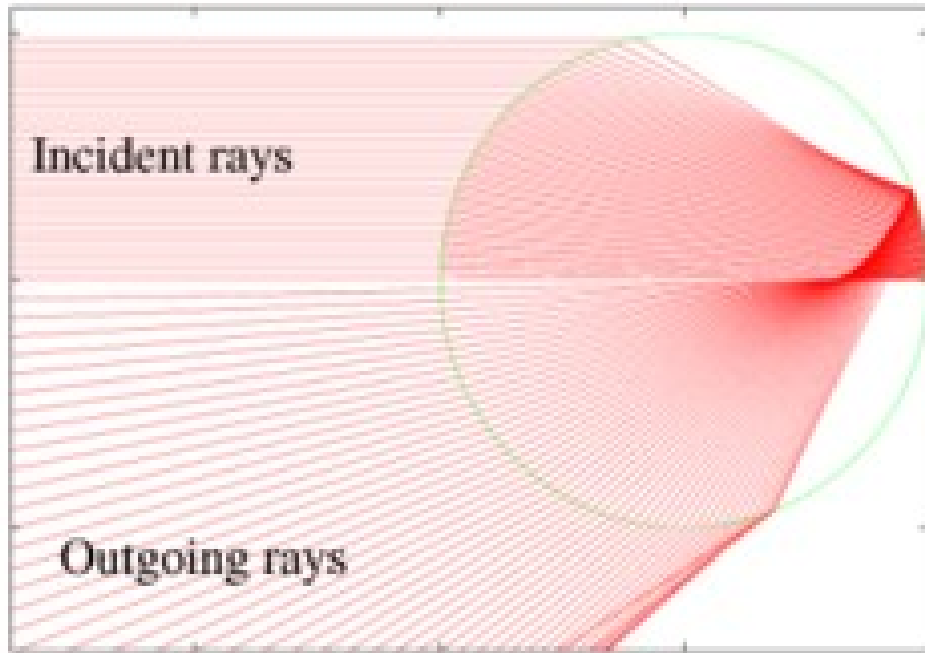


E' su un cono con centro nell'osservatore che l'angolo di deviazione rimane costante. Se non ci fosse la Terra vedremmo un "cerchiobaleno". Ognuno vede il proprio arcobaleno personale che lo segue man mano che si sposta. E' impossibile vedere l'arcobaleno di taglio!

L'arcobaleno



L'arcobaleno



Un po' di luce si riflette due volte all'interno della goccia prima di uscire verso l'osservatore. Quando la luce incidente è molto luminosa, questa può essere vista come arcobaleno secondario, più luminoso a 50° – 53° .

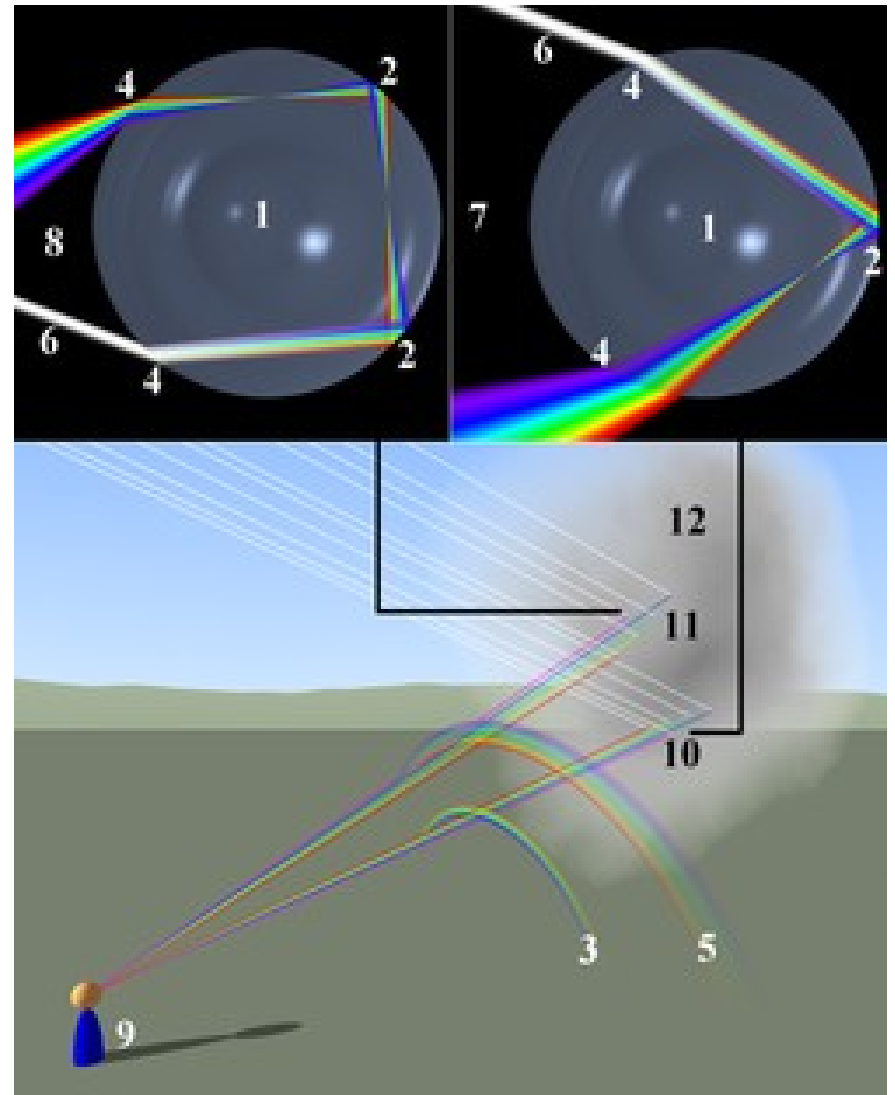
Il «cerchio baleno»



Una porzione di « cerchio baleno »

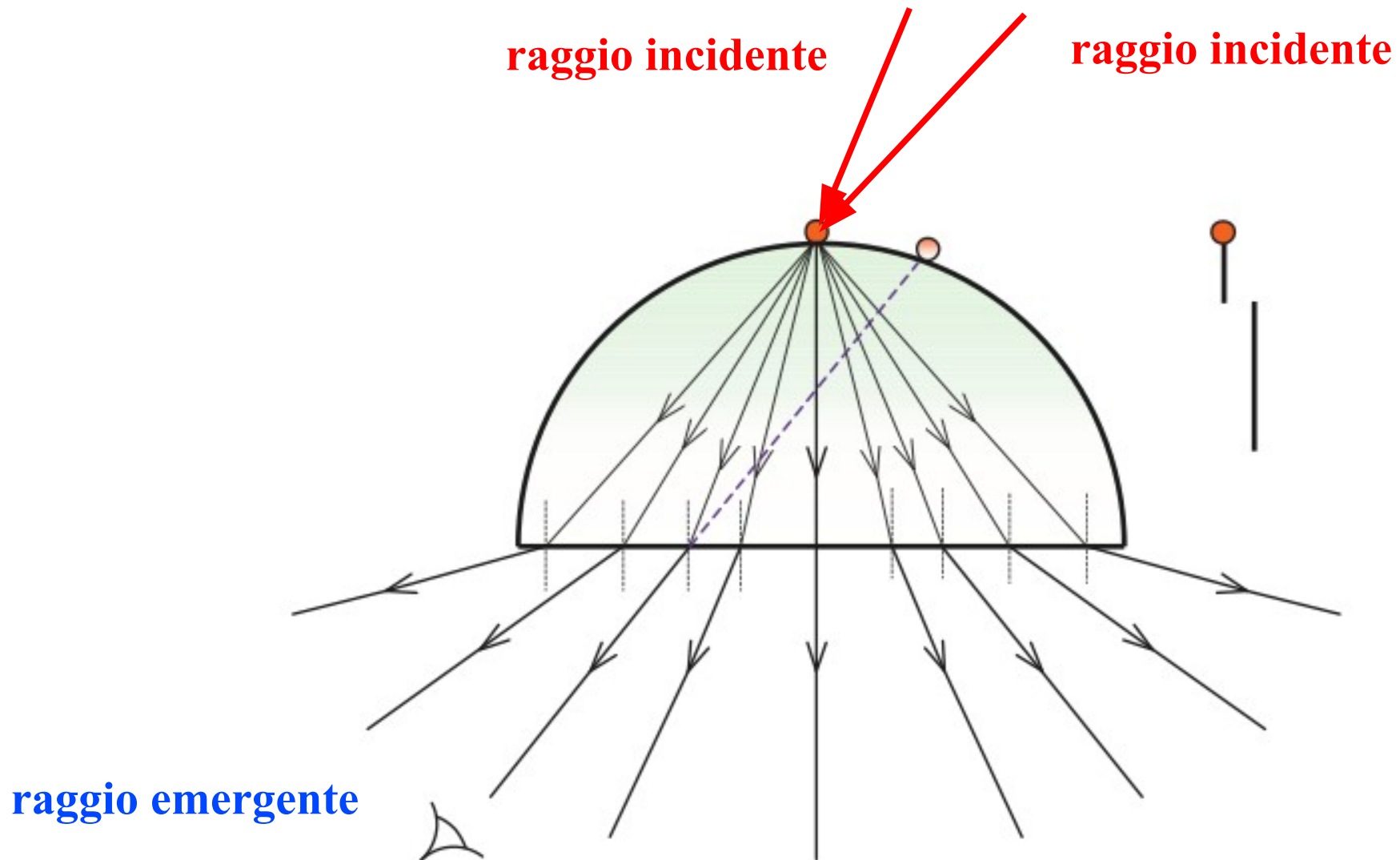
Visto da un aereo

Il doppio arcobaleno



Formazione di un arcobaleno secondario. A destra (7) la formazione dell'arcobaleno primario, il raggio di luce bianca (6) subisce una rifrazione (4) sulla superficie della gocciolina sferica (1) in sospensione (12), poi una riflessione interna (2) infine esce dalla gocciolina formando l'arcobaleno primario (3). A sinistra (8) il raggio di luce bianca (6) dopo la rifrazione (4) subisce una doppia riflessione (2) generando l'arcobaleno secondario (5).

Misura dell'indice di rifrazione del plexiglass con la mezzaluna



Esperienza II – Riflessione e Rifrazione della luce

In questa esperienza affrontiamo il tema della riflessione e della rifrazione della luce. Osserveremo come al variare dell'angolo di incidenza della luce che illumina una mezzaluna vari l'angolo del fascio riflesso dalla mezzaluna stessa. Inoltre verificheremo il fenomeno della rifrazione, osservando come aumentando l'angolo di incidenza, l'angolo di rifrazione aumenta più rapidamente, e che l'angolo di rifrazione è sempre maggiore dell'angolo di incidenza.

Assorbimento, riflessione e trasmissione sono i fenomeni che avvengono quando la luce interagisce con la materia.

Quando l'energia radiante incide su un corpo, una parte viene assorbita, una parte viene riflessa e una parte viene trasmessa. Per la legge di conservazione dell'energia, la somma delle quantità di energia rispettivamente assorbita, riflessa e trasmessa è uguale alla quantità di energia incidente.



Esperienza II: strumentazione adottata

Per l'implementazione degli esperimenti proposti sono necessari i seguenti strumenti:

- Diodo laser
- Diodo laser con diverse lunghezze d'onda (facoltativo)
- Goniometro su piatto rotante
- Mezzaluna di plexiglas
- Specchio triangolare
- Schermo bianco

Esperienza II: Fase operativa

Riflessione della luce da specchio piano

In questa esperienza si chiede agli studenti di verificare la relazione tra angolo incidente e angolo riflesso quando la luce viene inviata su uno specchio piano.

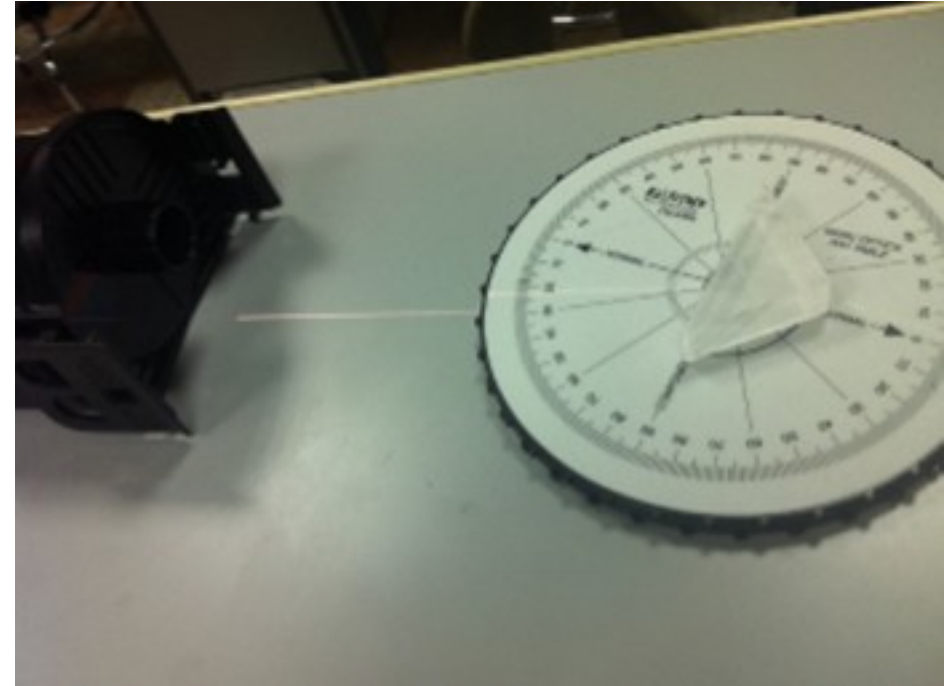
Rifrazione da mezzaluna e verifica della legge di Snell

Vogliamo studiare come si comporta la luce entrando e uscendo da una mezzaluna di plexiglas. Mettendo in relazione la misura degli angoli di incidenza con quella degli angoli di rifrazione relativi all'interazione della mezzaluna con la radiazione luminosa.

Strumentazione adottata

Per l'implementazione degli esperimenti proposti sono necessari i seguenti strumenti:

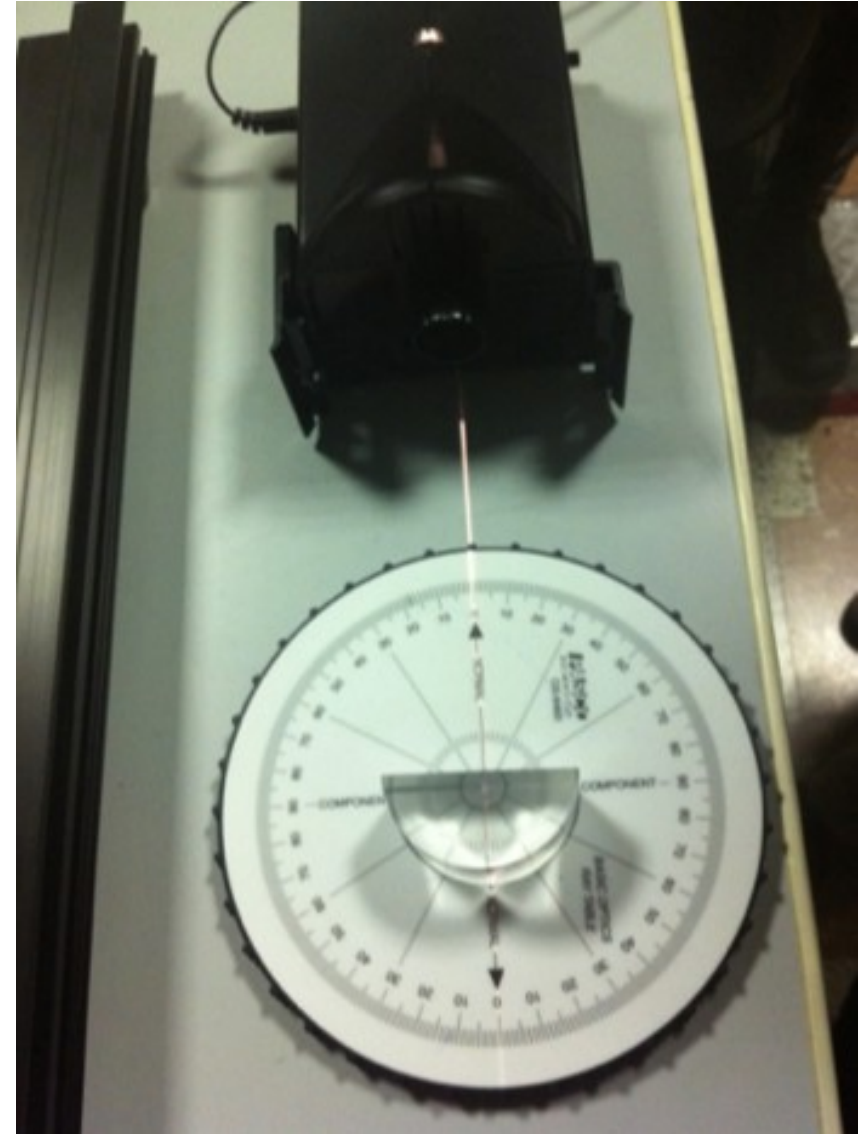
- Mezzaluna di plexiglas
- Lampada di luce bianca
- Carta millimetrata
- Goniometro su piatto rotante
- Schermo bianco



Esperienza II: Procedimento di misura

1. Osservazione del fenomeno della riflessione.

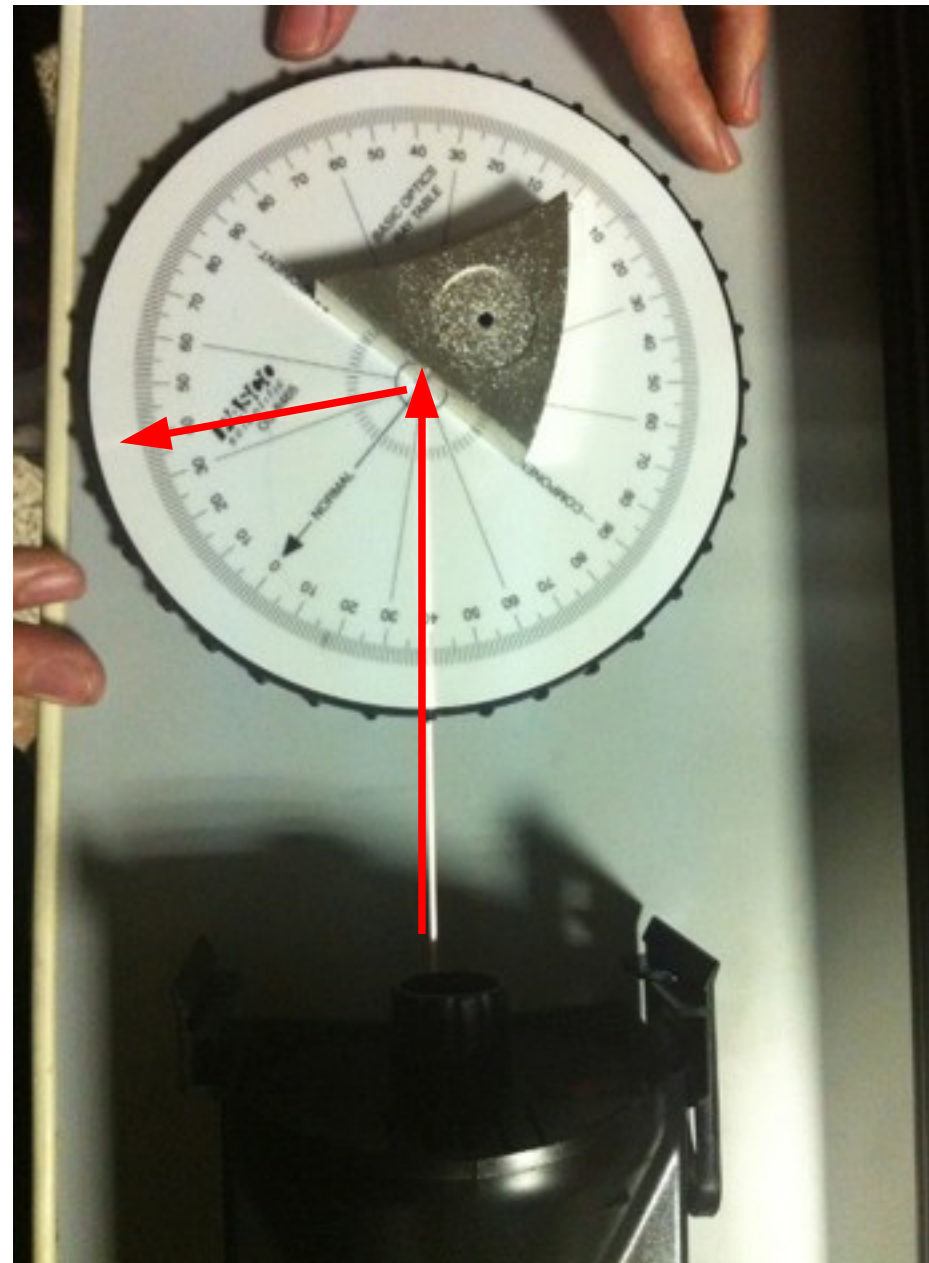
- Disporre lo specchio di forma triangolare sul goniometro rotante
- Inviare su un lato dello specchio un fascio generato da un diodo laser
- Ruotando il goniometro osservare la direzione del fascio riflesso (vedi Fig. 5).
- Per ogni posizione, segnare angolo d'incidenza e angolo riflesso.



Esperienza II: Procedimento di misura

2. Osservazione del fenomeno della rifrazione e della riflessione totale.

- Disporre la mezzaluna di plexiglas sul goniometro rotante
- Inviare alla mezzaluna un fascio generato da un diodo laser
- Ruotando il goniometro osservare la direzione del fascio rifratto.
- Per ogni posizione, segnare angolo d'incidenza e angolo rifratto.
- Raggiunto l'angolo limite si osserva che la luce non viene più rifratta ma riflessa completamente.
- Segnare il valore dell'angolo limite.



Esperienza II: Fase operativa

Misura dell'angolo limite

Nel precedente esperimento proposto è stato verificato che quando aumenta l'angolo di incidenza, l'angolo di rifrazione aumenta più rapidamente, e che l'angolo di rifrazione è sempre maggiore dell'angolo di incidenza. Ciò significa che esiste un angolo limite per il quale l'angolo di rifrazione è di 90° . L'angolo limite può essere determinato come:

$$\alpha_{lim} = \arcsin \frac{1}{n}$$

Nella condizione di luce incidente all'angolo limite α_{lim} non si osserva luce rifratta ma la luce viene interamente riflessa, per tale motivo si parla di fenomeno di riflessione totale. La determinazione dell'angolo limite inoltre consente di stimare l'indice di rifrazione n del mezzo attraverso il quale si propaga la luce.

Studio dell'indice di rifrazione di un mezzo (facoltativo)

Come osservato nell'esperienza precedente, la misura dell'angolo limite consente di ricavare l'indice di rifrazione del mezzo attraverso il quale si propaga la luce. Tale indice di rifrazione dipende dal valore della lunghezza d'onda λ della luce incidente. Facendo incidere sul prisma di plexiglas della luce con diverse lunghezze d'onda (es. luce rossa, verde, blu) è possibile ricostruire l'andamento dell'indice di rifrazione in funzione di λ , un andamento noto come dispersione normale del mezzo.

Esperienza II: Analisi

1. Analisi dell'esperimento sulla riflessione.

- Si riportino in una tabella i valori dell'angolo incidente (variabile x) ed il corrispettivo angolo riflesso misurato (variabile y).
- Su carta millimetrata riportare i valori di x e y e verificare che i punti si dispongono lungo la bisettrice del primo quadrante.



Esperienza II: Analisi

2. Analisi dell'esperimento sulla rifrazione e verifica della legge di Snell.

- Si riportino in una tabella i valori dell'angolo incidente ed il corrispondente angolo rifratto misurato.
- Calcolare il valore del seno dell'angolo incidente e dell'angolo rifratto e riportarli in una nuova tabella.
- Riportare su un grafico su carta millimetrata i punti della tabella e verificare la proporzionalità tra angolo incidente e angolo rifratto ed in particolare che tale retta passa per l'origine degli assi.
- Calcolando il rapporto tra il seno dell'angolo incidente ed il seno dell'angolo rifratto, determinare il coefficiente angolare della retta ottenuta nel punto precedente, pari all'indice di rifrazione del mezzo usato per l'esperimento (plexiglas).
- Utilizzando la relazione tra angolo limite e indice di rifrazione, stimare il valore dell'indice di rifrazione del mezzo usato direttamente dal valore dell'angolo limite misurato in laboratorio, e confrontarlo con il valore ottenuto al punto precedente.

Esperienza II: Analisi

3. Studio dell'indice di rifrazione di un mezzo al variare di λ (facoltativo).

- Si riportino in una tabella i valori dell'angolo limite misurato in laboratorio per le tre lunghezze d'onda incidenti.
- Utilizzando la relazione tra angolo limite e indice di rifrazione, stimare il valore dell'indice di rifrazione del mezzo usato direttamente dal valore dell'angolo limite misurato in laboratorio.
- Riportare su una tabella il valore dell'indice di rifrazione determinato dai diversi angoli limite per le tre lunghezze d'onda.
- Riportare su un grafico su carta millimetrata i punti della tabella con l'indice di rifrazione in funzione della lunghezza d'onda.
Che tipo di relazione è possibile ipotizzare tra le grandezze considerate?