

FISICA

Onde

Le onde luminose

*Autore: **prof. Pappalardo Vincenzo***

*docente di **Matematica e Fisica***



MODELLO CORPUSCOLARE E ONDULATORIO

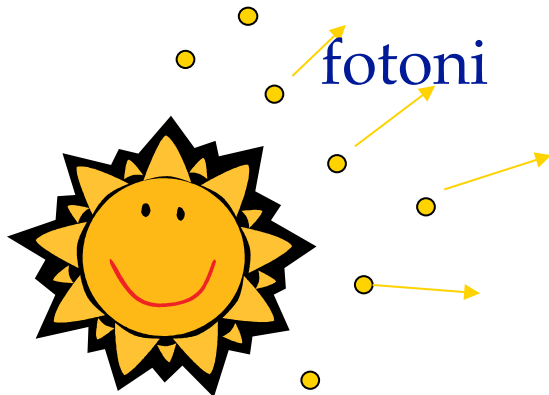
Già gli antichi filosofi greci si erano posti il problema della natura della luce: essi ritenevano che la luce fosse costituita da particelle piccolissime capaci di stimolare il senso della vista, una volta a contatto con gli occhi. Nei secoli successivi questa ipotesi fu sostanzialmente accettata, anche se non si riusciva a separare il concetto fisico della luce dall'aspetto biologico della visione.

Solo a partire dalla seconda metà del Seicento si tentò di capire e interpretare la natura fisica della luce. Iniziò così una lunga controversia scientifica, durata quasi due secoli, che vedeva contrapposti due modelli fondamentali: **il modello corpuscolare** (proposto da **Newton**) e **quello ondulatorio** (proposto da **Huygens**).

TEORIA CORPUSCOLARE

LA LUCE E' UN FLUSSO DI
PARTICELLE
MICROSCOPICHE

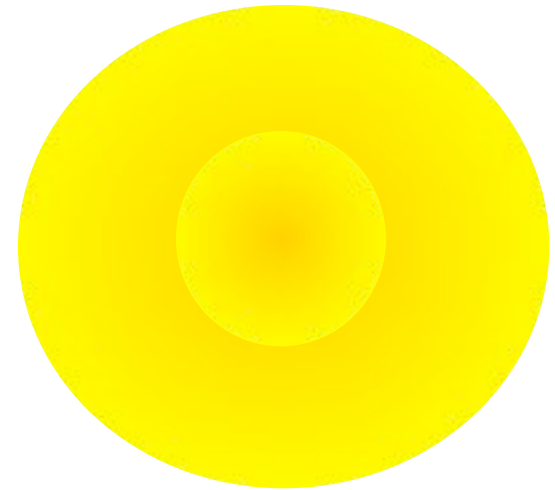
emesse a ritmo continuo dalle
sorgenti luminose



TEORIA ONDULATORIA

LA LUCE E' UN 'ONDA

che si propaga come le onde
meccaniche

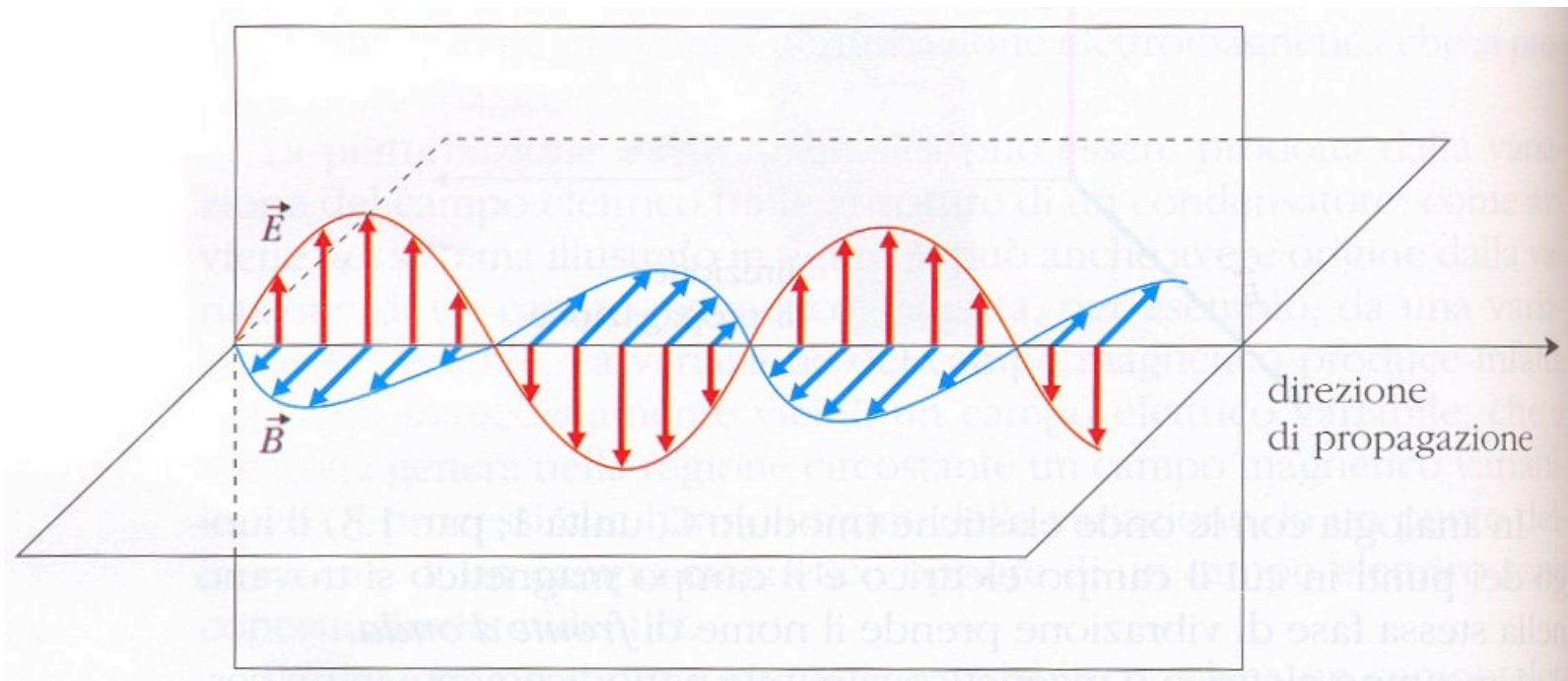


PRO E CONTRO DEI DUE MODELLI – Il modello corpuscolare spiegava bene la propagazione rettilinea della luce e fenomeni come la riflessione, la rifrazione e la formazione delle ombre. D'altra parte, invece, non riusciva a interpretare alcuni fenomeni come l'interferenza e la diffrazione.

Il modello ondulatorio, anche se descriveva molto bene molti fenomeni della luce (riflessione, rifrazione, interferenza), era considerato poco convincente in quanto non era chiaro che tipo di perturbazione fosse la luce e quali fossero le caratteristiche fisiche del mezzo nel quale la luce si propagava.

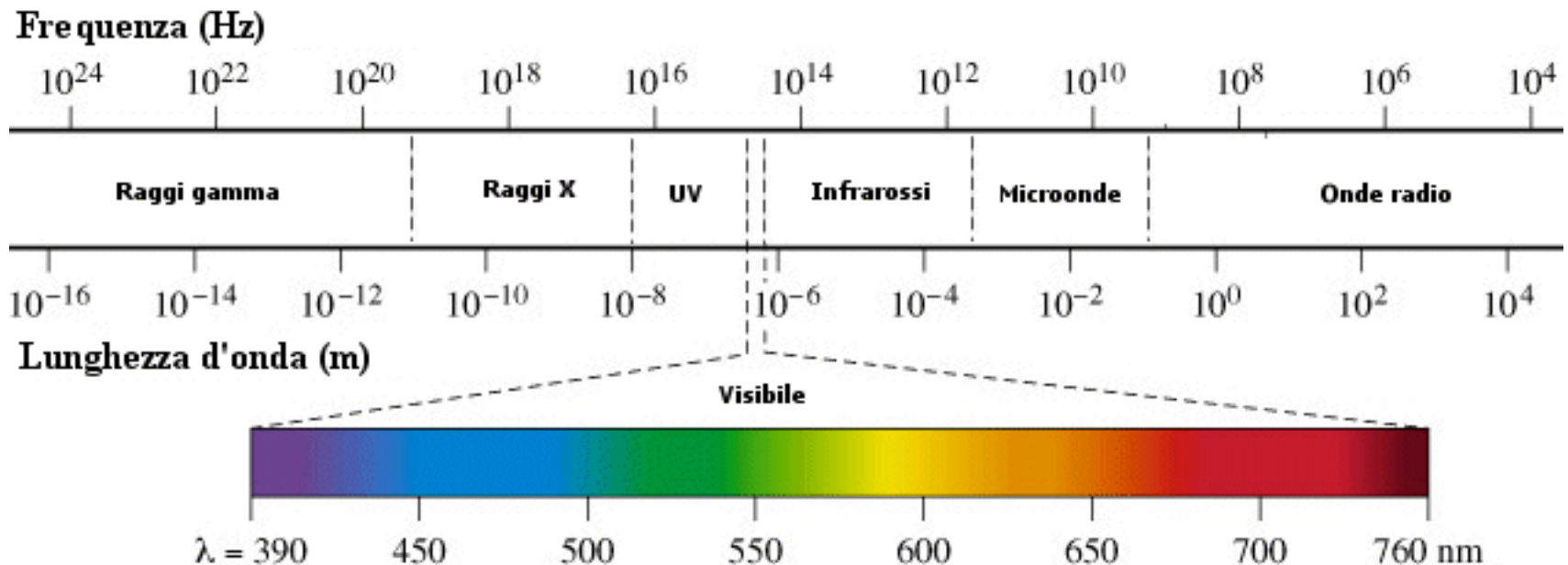
Huygens propose l'esistenza di un elemento leggerissimo (chiamato **etere**, il quinto elemento proposto da Aristotele) e dotato di rigidità estremamente elevata (così da permettere alla luce di propagarsi alla sua alta velocità), presente in ogni punto dello spazio.

Intorno alla metà del XIX secolo, Maxwell specificò meglio la natura della luce: la radiazione luminosa è un'onda elettromagnetica trasversale (vibrazione di un campo elettrico e di un campo magnetico perpendicolari tra di loro e insieme perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda) che, come ogni altra radiazione elettromagnetica, viaggia nel vuoto alla velocità di 300.000 km/s.

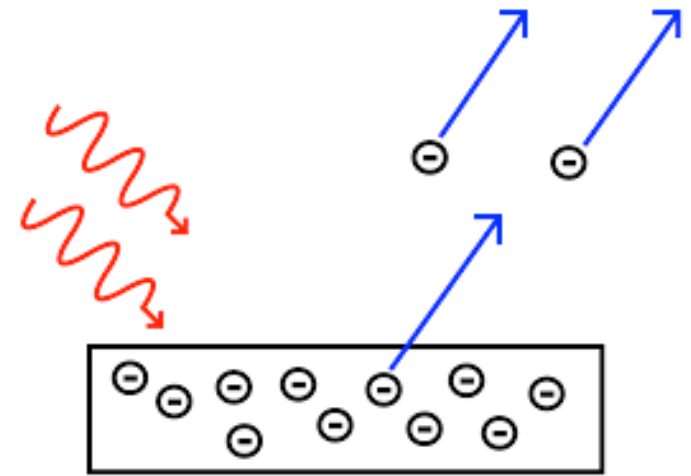


La luce non ha bisogno di alcun mezzo per propagarsi, nemmeno dell'etere.

L'esistenza dell'etere, ancora ammessa da Maxwell, fu negata, alla fine del XIX secolo, da Michelson e Morley, attraverso un famoso esperimento. Con Maxwell l'ottica diventò un capitolo dell'elettromagnetismo. Se infatti consideriamo tutto lo spettro delle onde elettromagnetiche, la luce non è che una frazione minima dello spettro, compresa all'incirca fra $0,8 \mu\text{m}$ e $0,4 \mu\text{m}$.



La disputa sembrava finita con la vittoria del modello ondulatorio, quando nel 1905 il quadro si complicò di nuovo. **Einstein** scoprì che la luce, quando incide su un metallo e provoca l'emissione di elettroni (effetto fotoelettrico), si comporta come se fosse costituita da una pioggia di particelle, i fotoni.



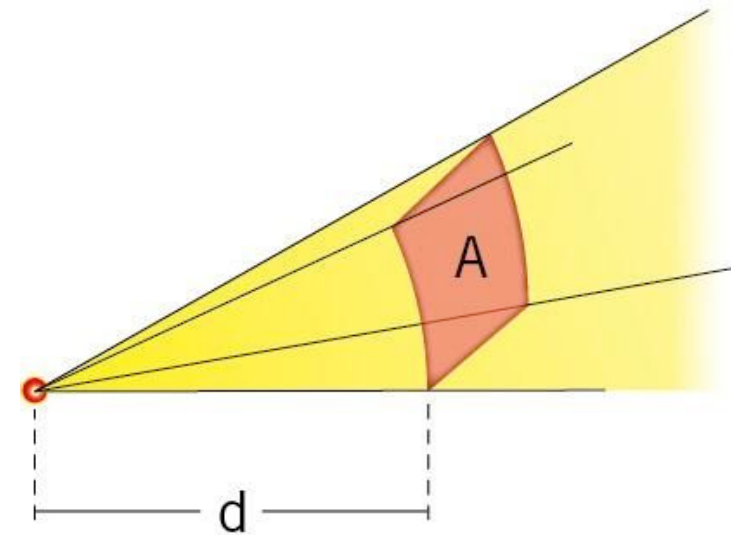
Oggi si ritiene che i modelli siano tutti e due validi, nel senso che la luce ha una doppia natura: corpuscolare e ondulatoria.

In certe situazioni fisiche la luce si comporta come un'onda, in altre come un insieme di corpuscoli.

L'IRRADIAMENTO E L'INTENSITA' DI RADIAZIONE

La luce, essendo un'onda, trasporta con sé energia. La grandezza che descrive con quanta energia un fascio luminoso investe un oggetto si chiama **irradiazione**.

Consideriamo una superficie di area A , perpendicolare a un fascio di raggi luminosi che, nel tempo Δt , la colpiscono trasportando una quantità E di energia. L'irradiazione della superficie è dato dal rapporto:



irradiazione (W/m^2)

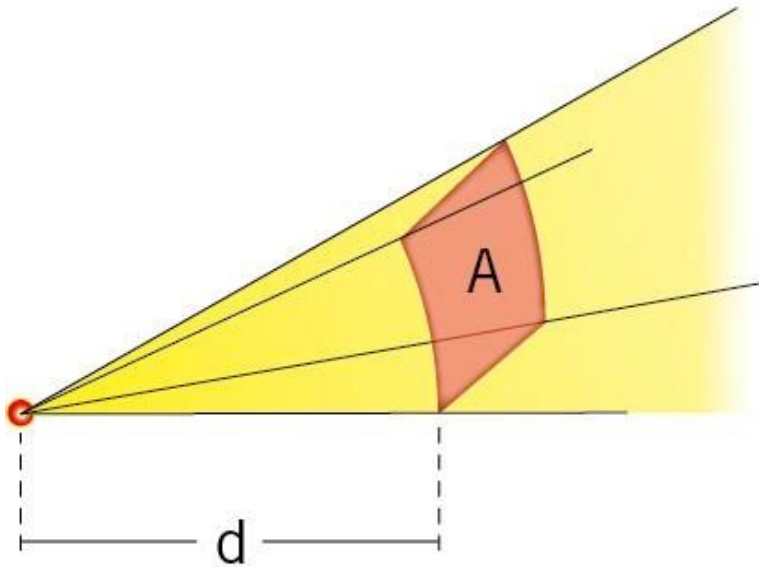
energia (J)

$$E_e = \frac{E}{A \Delta t}$$

area (m^2)

intervallo di tempo (s)

L'irradiazione dice quanta energia (joule) giunge, in ogni secondo, su una superficie ampia 1 m^2 e posta perpendicolarmente ai raggi di luce.



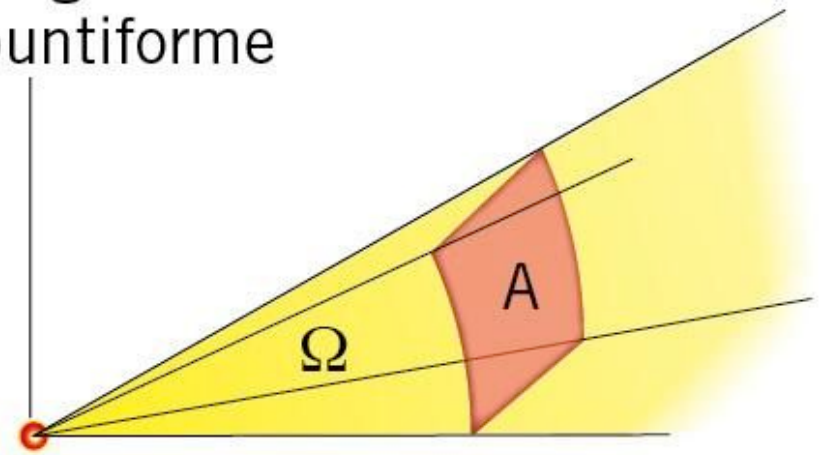
$$E_e = \frac{E}{A\Delta t}$$

$$E_e \propto \frac{1}{d^2}$$

A parità di potenza della sorgente di luce, l'irradiazione diminuisce in modo inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra la sorgente e lo schermo.

La grandezza che descrive quanta potenza una sorgente emette nello spazio è l'intensità di radiazione.

sorgente
puntiforme



Consideriamo una superficie di area A perpendicolare ai raggi di luce ed E l'energia che giunge sulla superficie nell'intervallo di tempo Δt ; indichiamo con Ω l'angolo solido che si ottiene congiungendo il punto in cui si trova la sorgente di luce con i bordi della superficie. L'intensità di radiazione è definita come:

intensità di radiazione (W/sr)

energia (J)

$$I = \frac{E}{\Omega \Delta t}$$

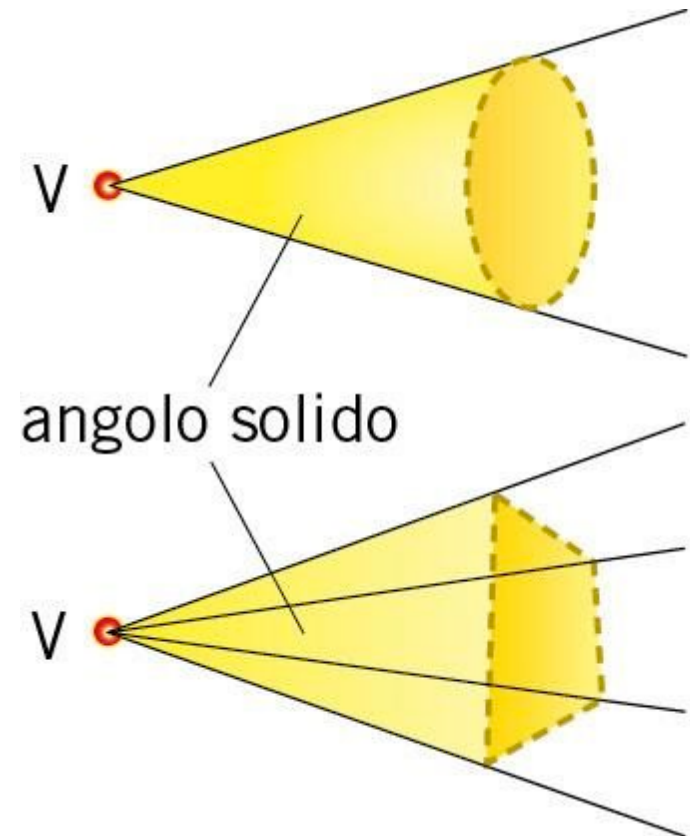
angolo solido (sr)

intervallo di tempo (s)

L'intensità di radiazione dice quanta energia (misurata in joule) è convogliata, in ogni secondo, entro un angolo solido ampio 1 sr (steradiane).

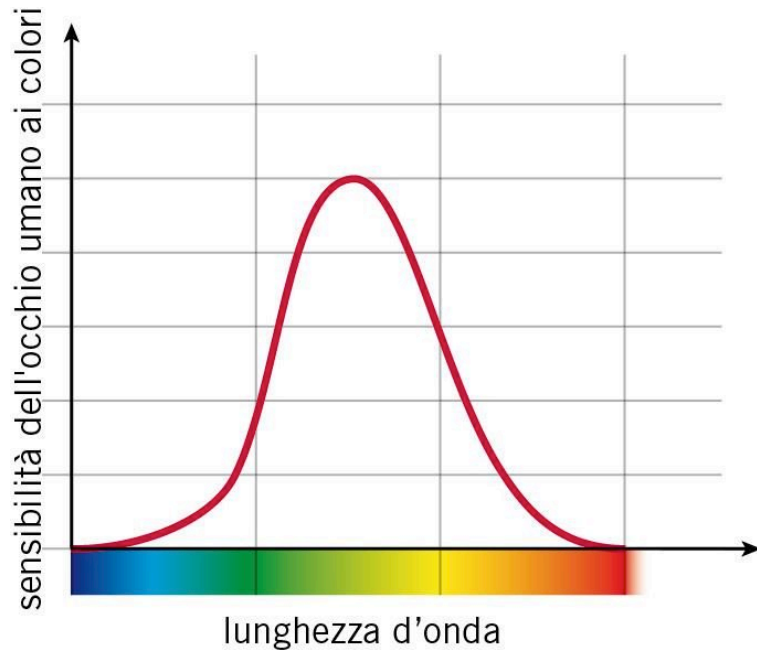
Definiamo l'angolo solido.

Consideriamo un cono infinito con il vertice in un punto V; **si chiama angolo solido la parte di spazio compresa all'interno del cono**. L'angolo solido si può definire anche per figure solide più complesse del cono, purché siano formate da rette uscenti dallo stesso punto V.



L'unità di misura dell'angolo solido si chiama **steradiane**.

Due sorgenti di luce che emettono ogni secondo la stessa quantità di energia, possono apparire più o meno luminose a seconda del colore della luce emessa.



L'occhio umano, infatti, ha una diversa sensibilità per i vari colori: la sua sensibilità è massima per la luce di colore giallo-verde e decresce spostandosi verso gli estremi dei colori visibili.

Per questa ragione la conoscenza dell'irradiazione o dell'intensità di radiazione (chiamate grandezze radiometriche in quanto misurano in modo oggettivo le caratteristiche della radiazione luminosa) non è sufficiente.

Per capire quale sarà l'effetto di quella luce una volta percepita da una persona è utile introdurre le grandezze fotometriche, che tengono conto del sistema fisiologico occhio-cervello.

La grandezza fotometrica di base è *l'intensità luminosa*, che descrive quanto una certa sorgente di luce è brillante secondo la percezione dell'occhio umano. La sua unità di misura è la *candela (cd)*, che è una delle unità fondamentali del sistema SI.

Una **candela** è l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette una radiazione di frequenza 540×10^{12} Hz (luce giallo-verde) con una intensità di radiazione, in quella direzione, pari a $1/683$ W/sr.

L'intensità luminosa emessa da una normale candela è proprio 1 cd.

Altre grandezze fotometriche di uso comune sono:

Il **flusso luminoso Φ_L** fornisce una misura della quantità di luce che una sorgente emette in ogni secondo. Il suo valore tiene conto in modo diverso delle varie lunghezze d'onda, in accordo con la sensibilità dell'occhio umano.

L'unità SI del flusso luminoso è il **lumen (lm)**, che è definito dalla relazione:

$$\text{lm} = 1 \text{ (cd} \cdot \text{sr)}$$

Così una sorgente luminosa dell'intensità di 1 cd, che illumina ugualmente in tutte le direzioni (cioè su 4π sr), ha un flusso luminoso di 4π lm. Di solito il flusso luminoso, in lumen, è indicato sulle lampadine per segnalare al consumatore quanto è vivace la luce emessa.

L'illuminamento E_L è dato dal rapporto tra il flusso luminoso Φ_L e l'area A della superficie illuminata, perpendicolare ai raggi di luce:

$$E_L = \frac{\Phi_L}{A}$$

unità di misura: lux (lx)

L'illuminamento permette di stabilire in modo quantitativo se un foglio di carta è illuminato abbastanza bene da potere leggere ciò che c'è scritto.

L'esposimetro, presente in molte macchine fotografiche, misura l'illuminamento prodotto sulla pellicola, o sul rivelatore elettronico, dalla scena che si vuole fotografare.

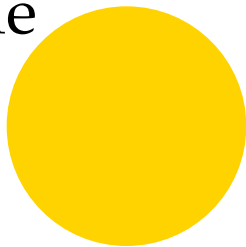
velocità della luce

La luce può propagarsi in un mezzo trasparente (aria, vetro, acqua) ma anche nel VUOTO.

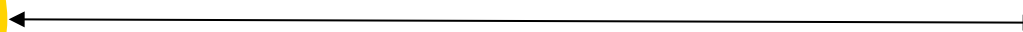
La sua velocità nel vuoto è 300.000 km/s

La luce proveniente dal sole impiega circa 8 minuti per arrivare a noi.

Sole



150 milioni di km = 8 minuti-luce

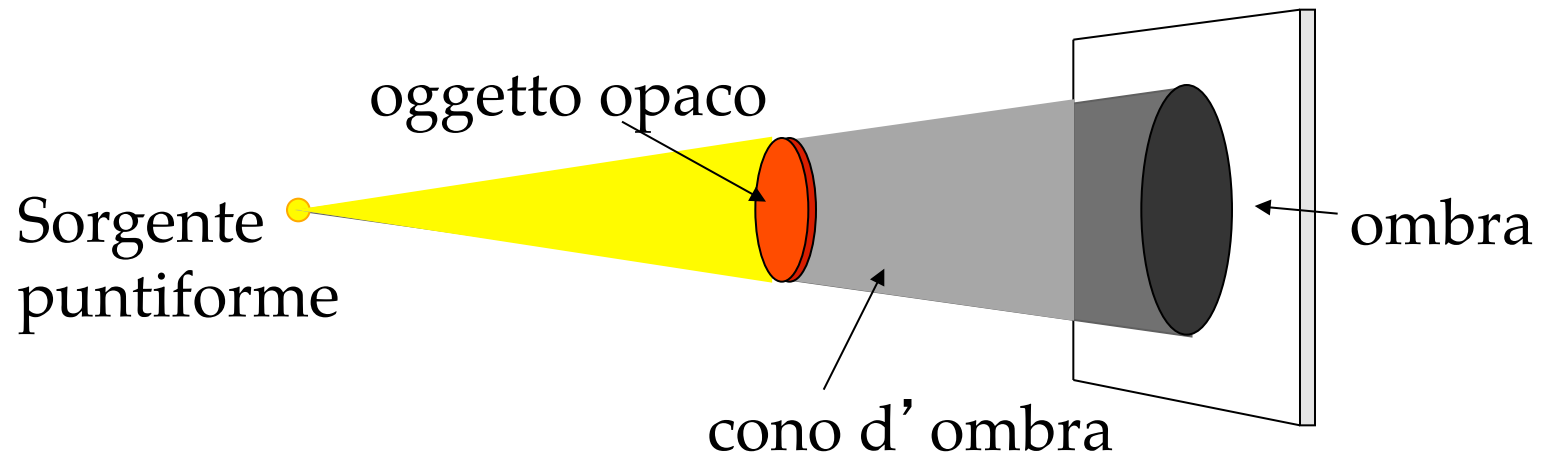


Terra

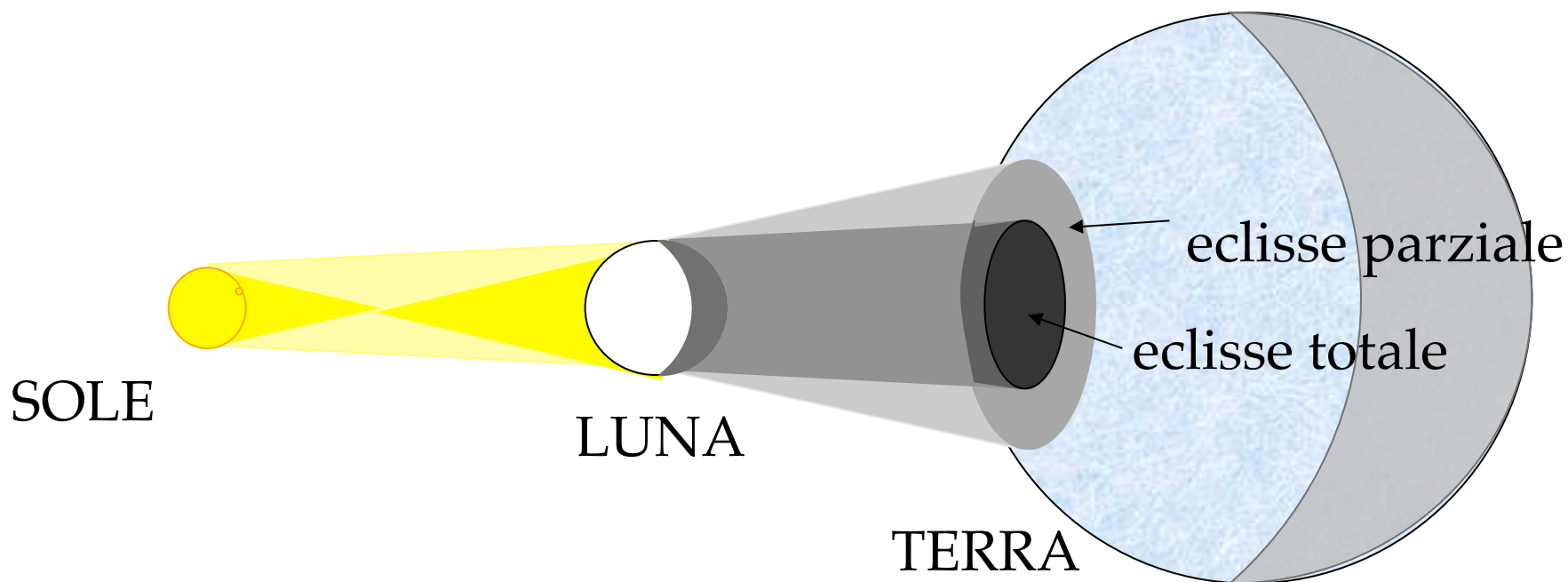
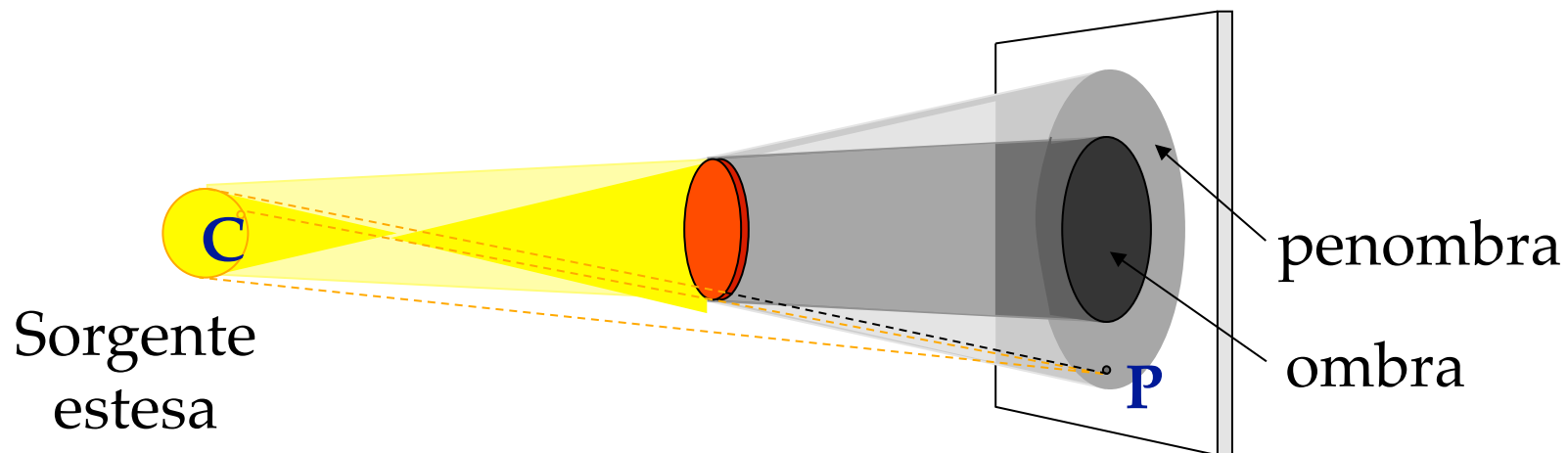
la propagazione della luce

la luce si propaga in linea retta

Grazie a questa caratteristica, possiamo spiegare la formazione delle ombre:



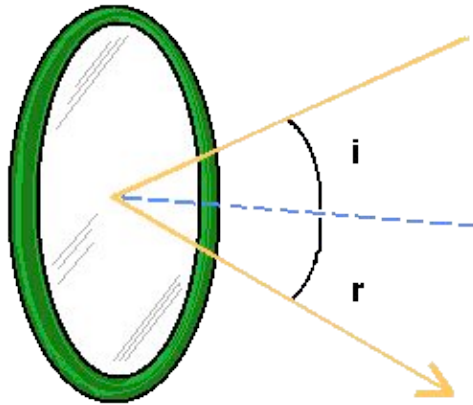
... e della penombra:



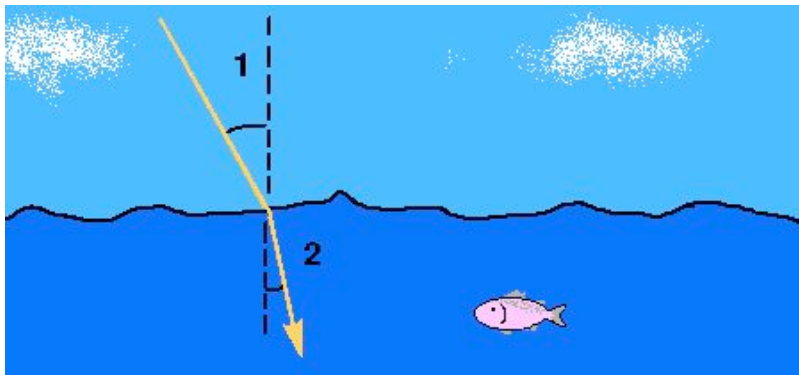
RIFLESSIONE E RIFRAZIONE

Cosa avviene quando la luce colpisce un oggetto?

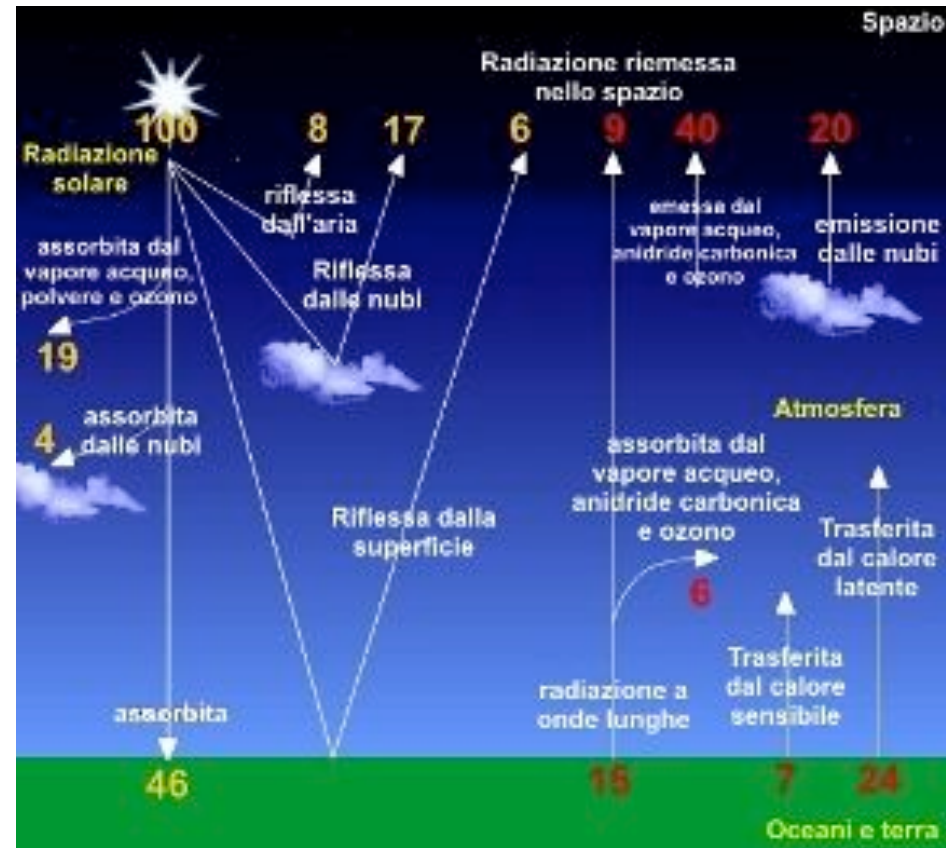
può essere riflessa



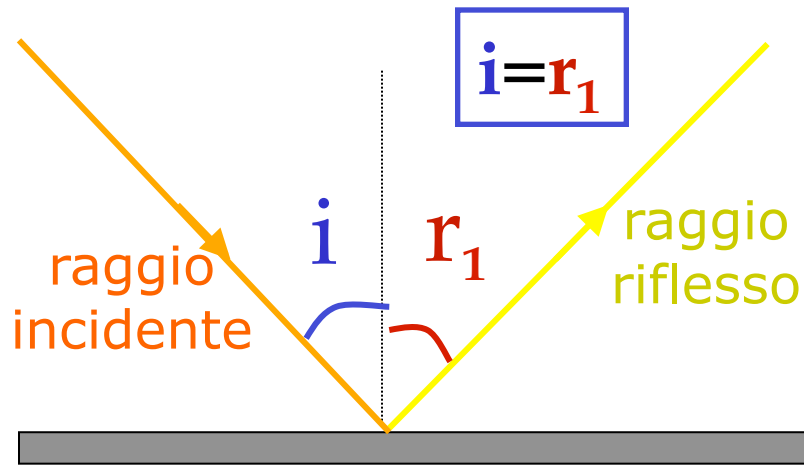
trasmessa



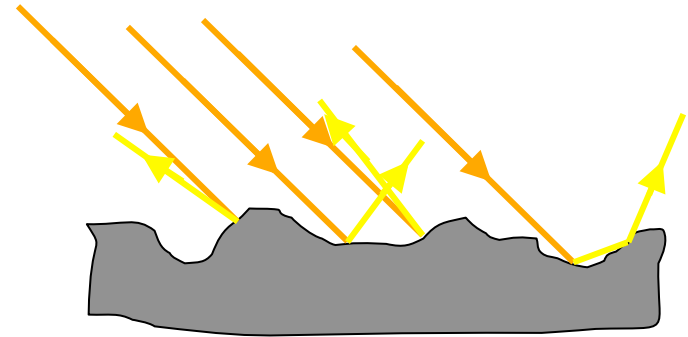
assorbita e poi riemessa



leggi della riflessione



Superficie riflettente liscia
(specchio)



Superficie scabra

1^a legge: il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie riflettente giacciono nello stesso piano.

2^a legge: l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione:

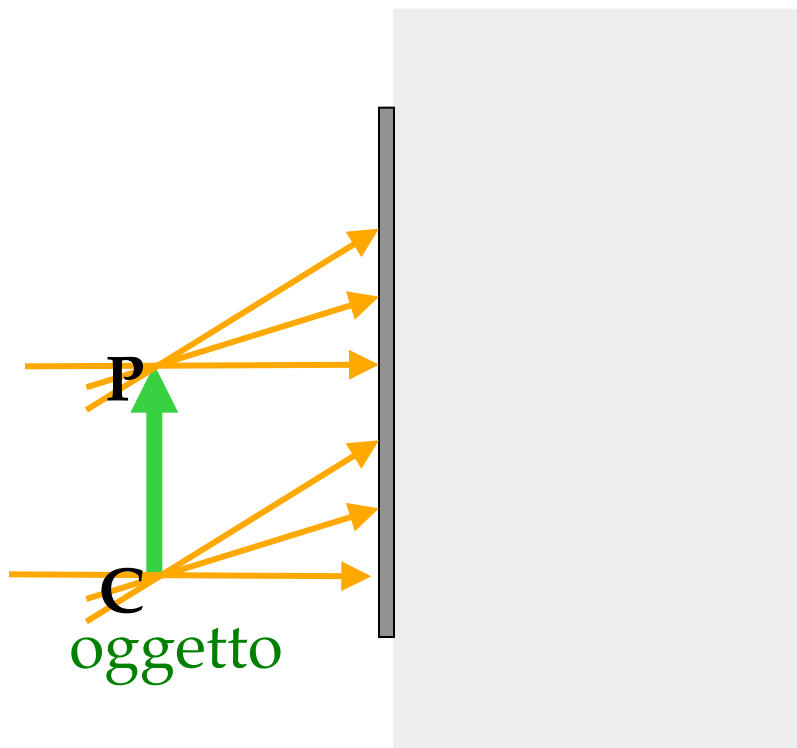
$$i = r_1$$

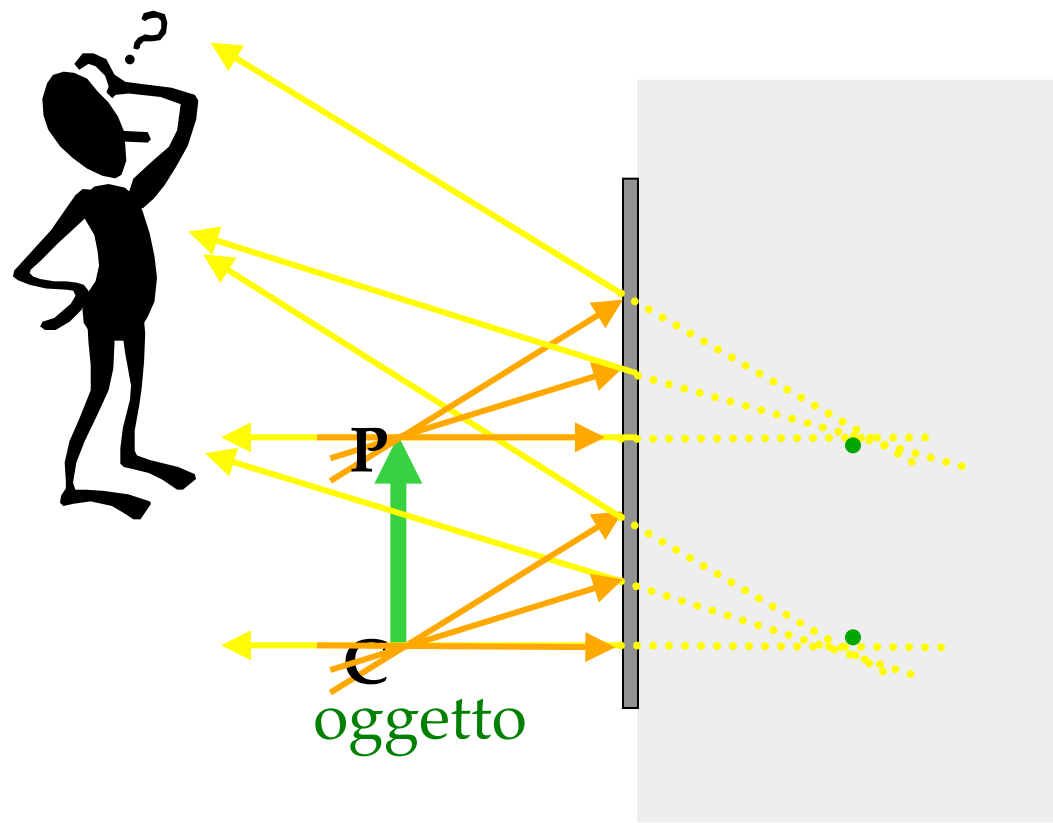
riflessione su uno specchio piano



↑
oggetto

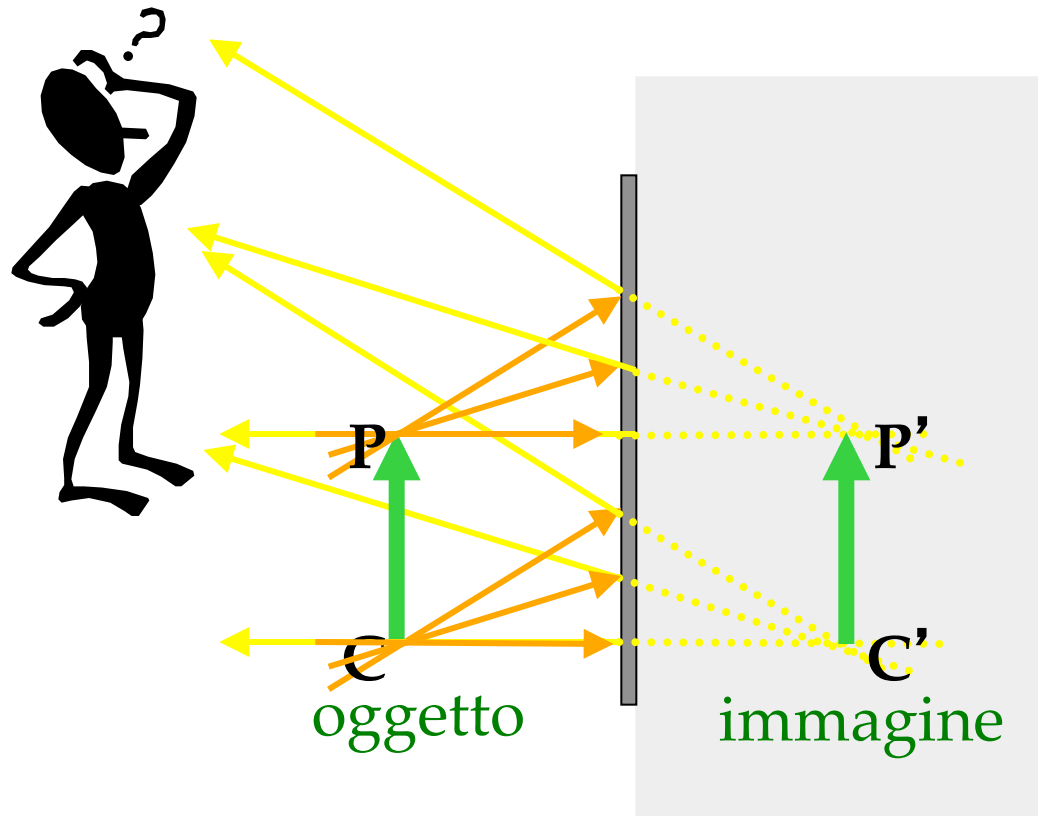






riflessione su uno specchio piano

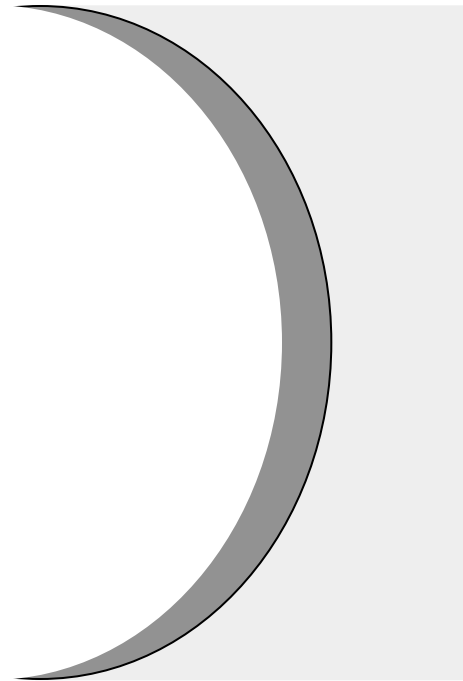
L'immagine è VIRTUALE, delle stesse dimensioni dell'originale, DRITTA, ma NON E' SOVRAPPONIBILE ALL' ORIGINALE

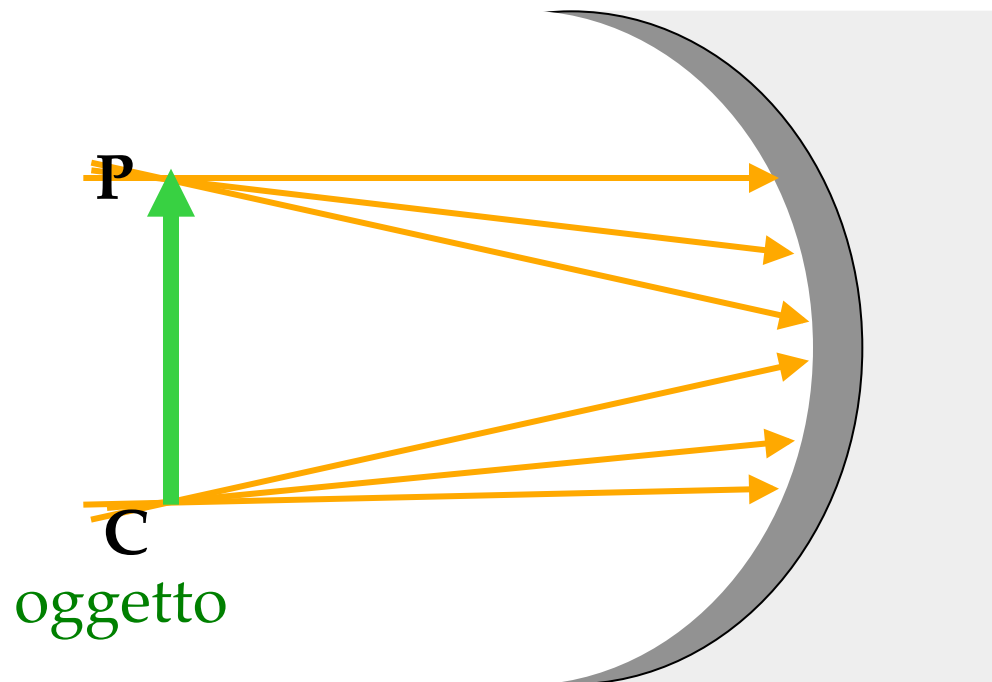


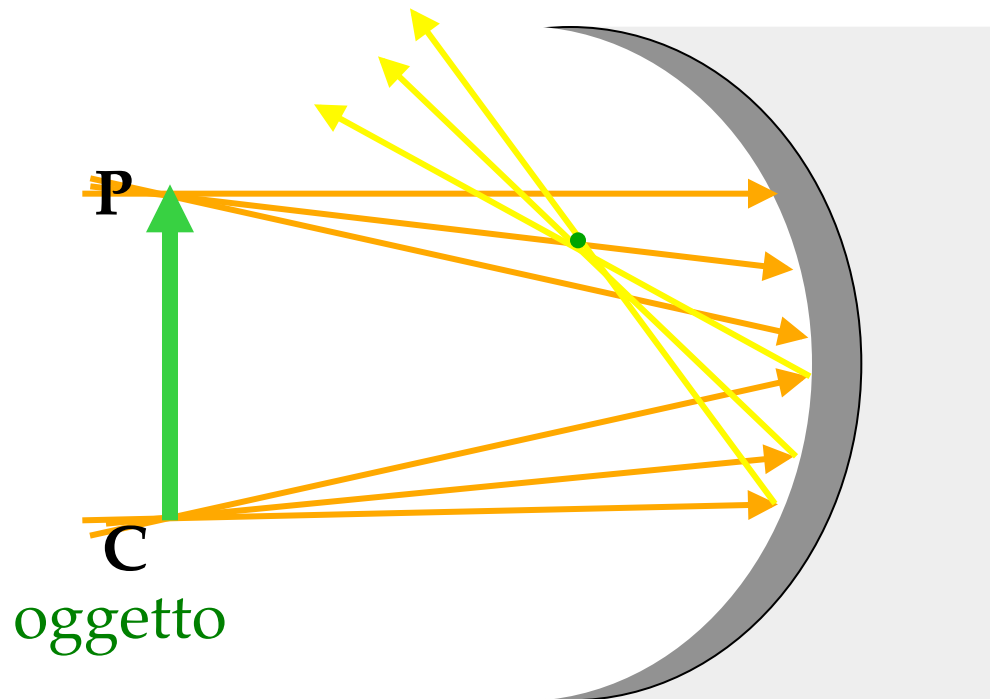
riflessione su uno specchio concavo

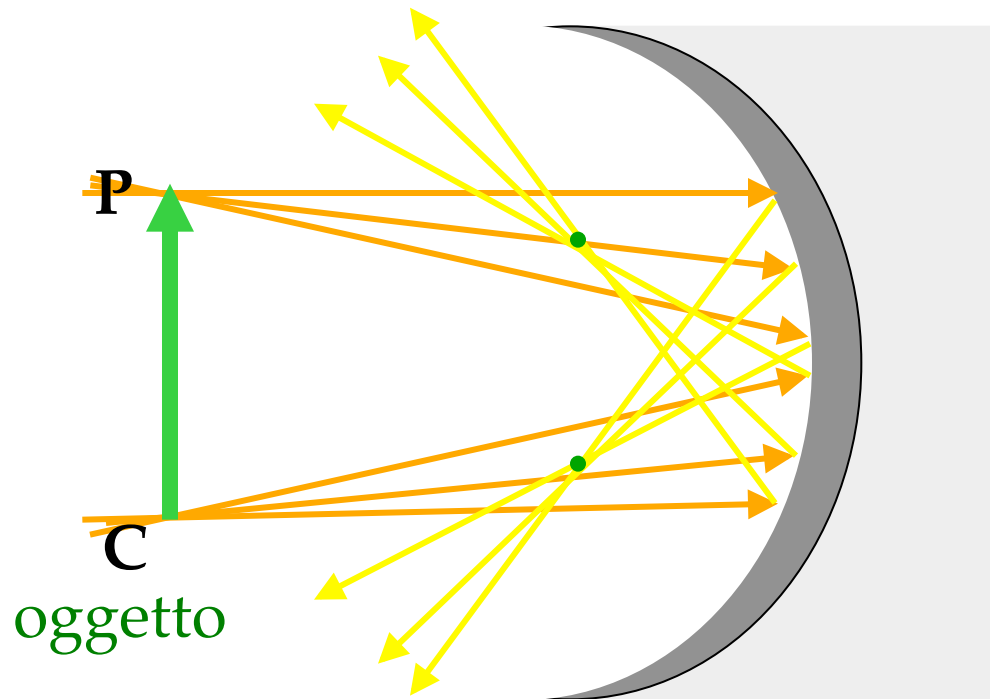


oggetto



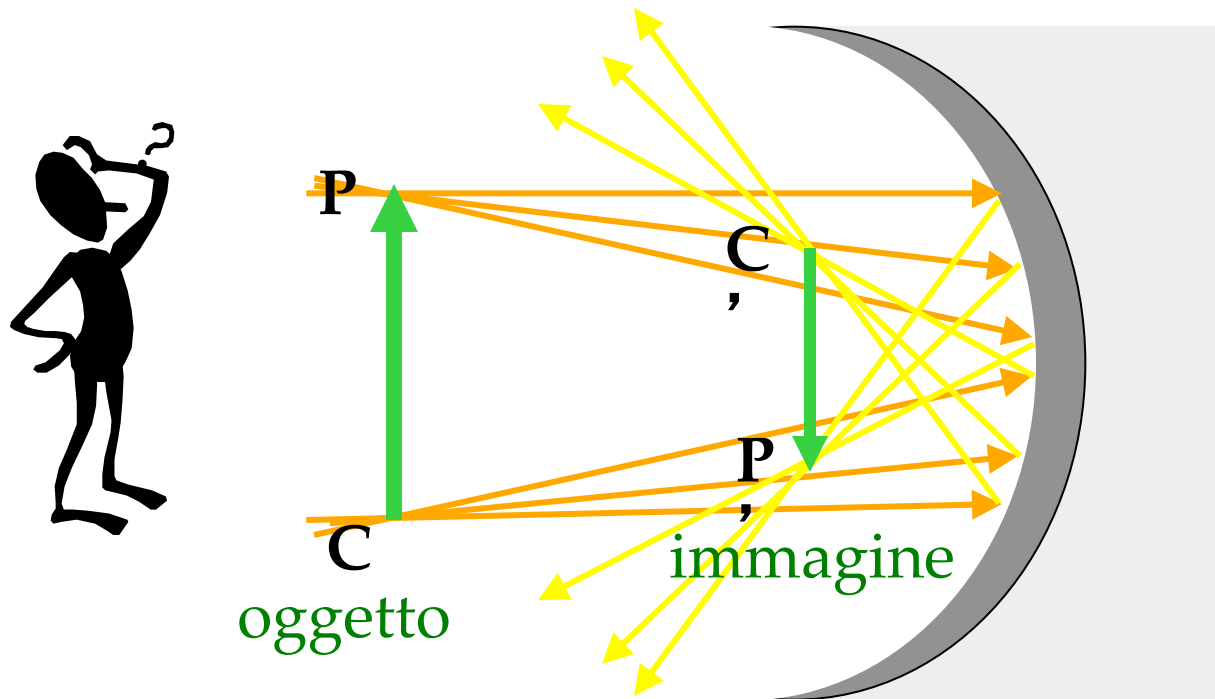




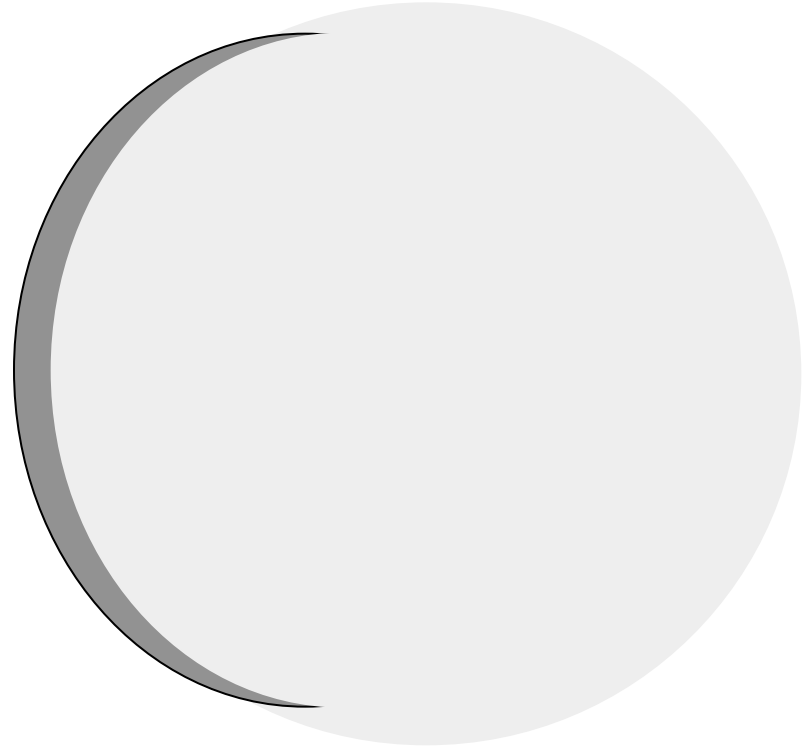
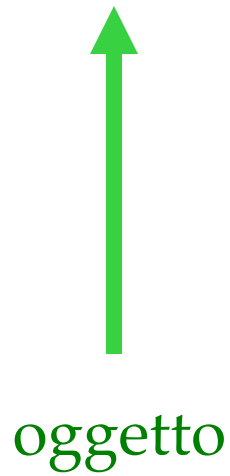


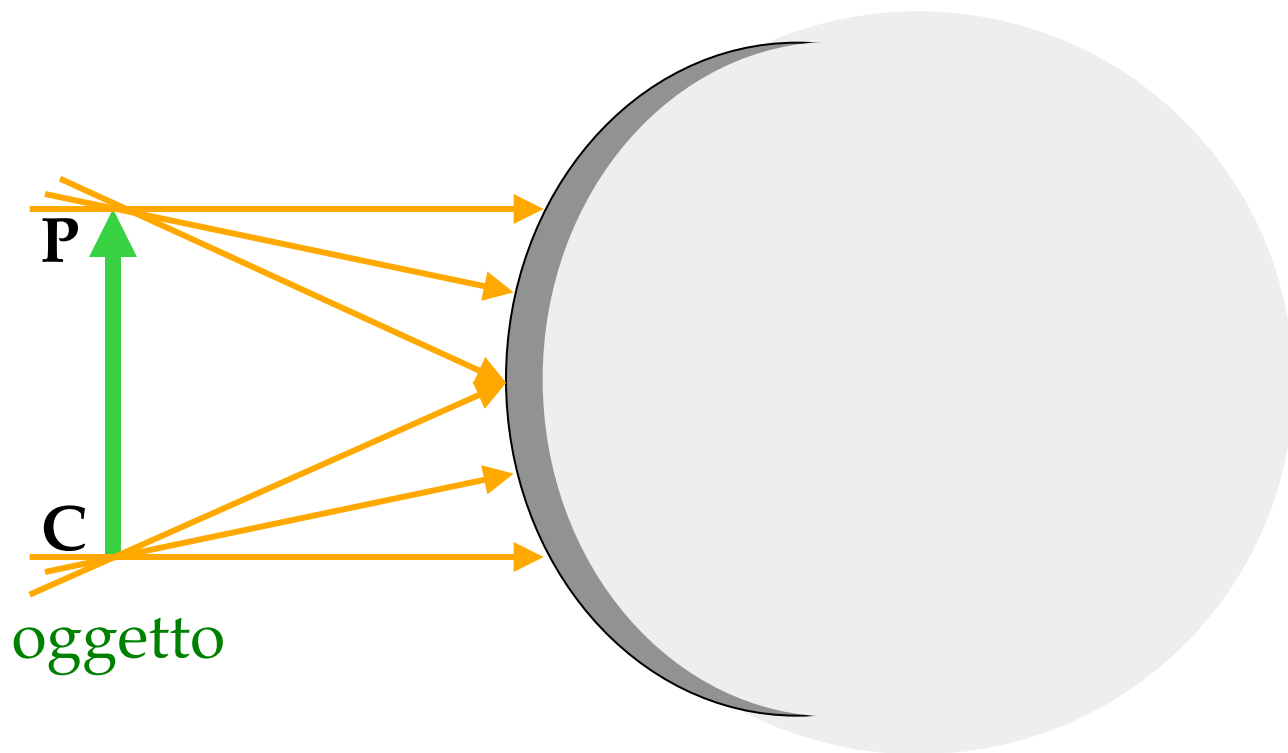
riflessione su uno specchio concavo

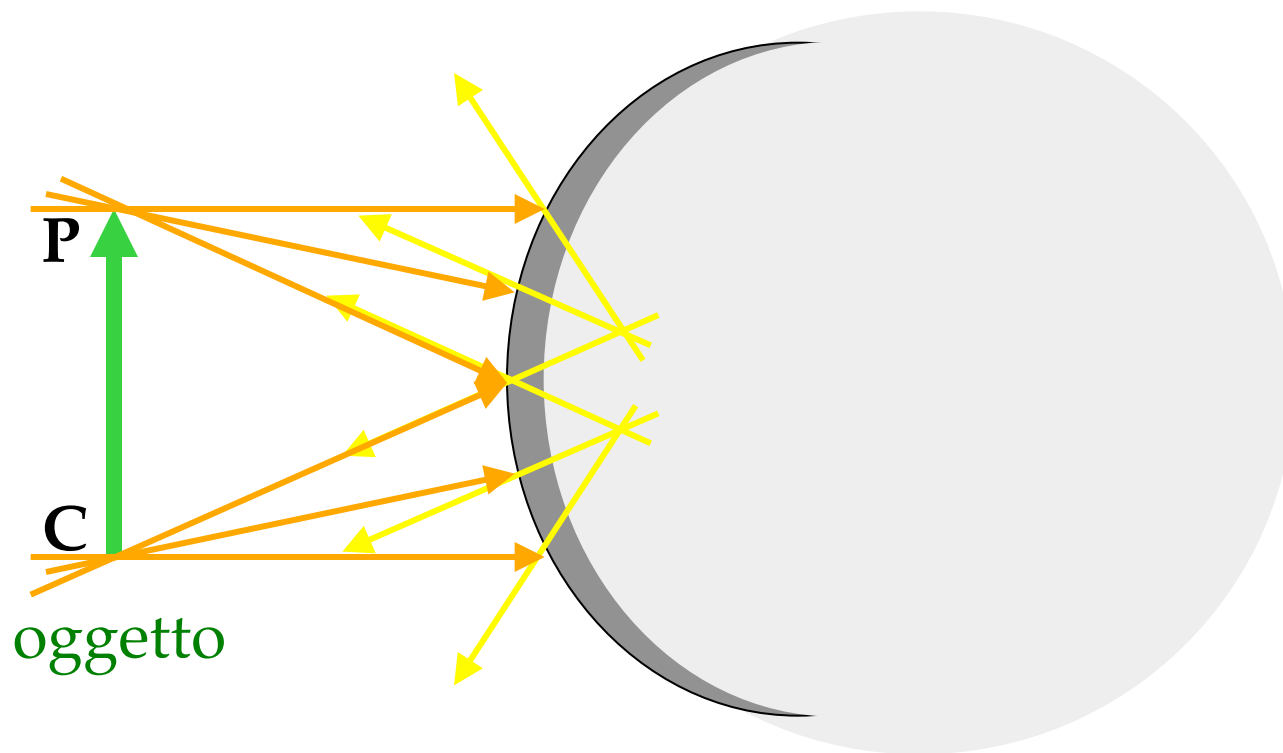
L'immagine è REALE, rimpicciolita e CAPOVOLTA



riflessione su uno specchio convesso

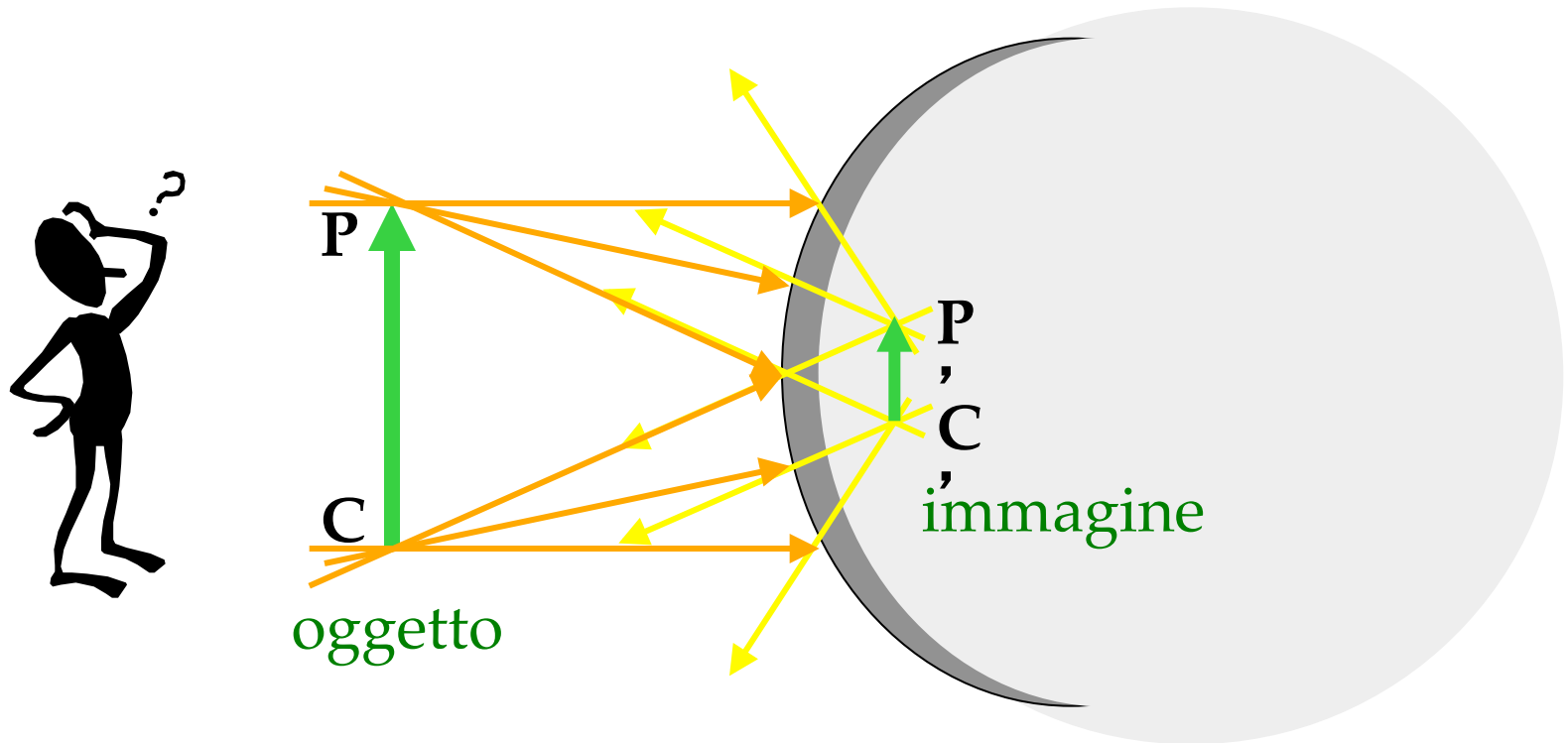




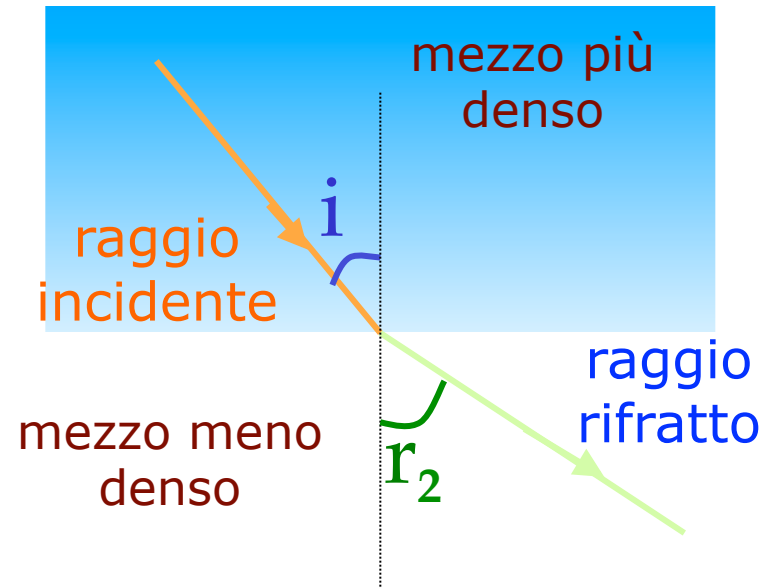
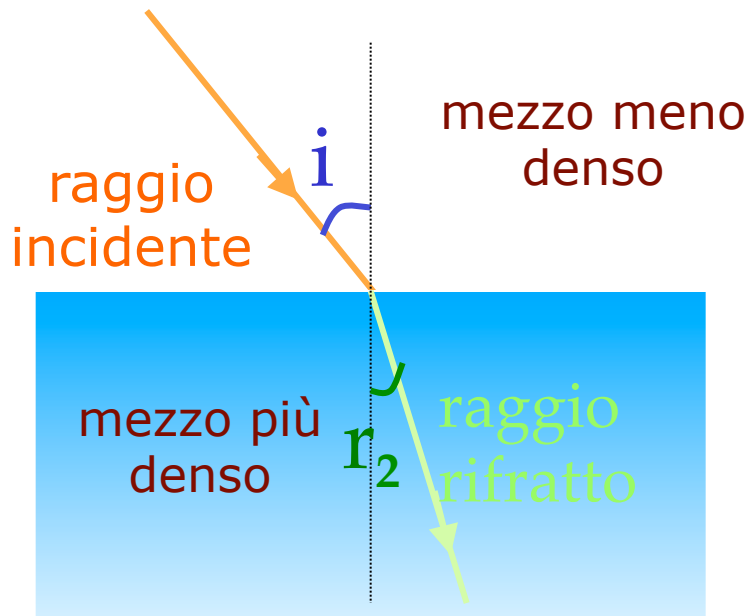


riflessione su uno specchio convesso

L'immagine è **VIRTUALE**, **rimpicciolita** e **DRITTA**



leggi della rifrazione



1ª legge: il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale alla superficie riflettente giacciono nello stesso piano.

2ª legge: quando un raggio luminoso passa da un mezzo meno “denso” a uno più “denso” si avvicina alla normale; se passa da un mezzo più “denso” ad uno meno “denso” si allontana dalla normale

Come per la riflessione, così anche per la rifrazione della luce valgono le stesse leggi introdotte per le onde meccaniche.

$$\frac{\text{seni}}{\text{senr}} = \frac{v_1}{v_2} = n_{12}$$

$n_{12} = v_1/v_2$ = indice di rifrazione relativo del secondo mezzo rispetto al primo

Possiamo caratterizzare ciascun mezzo trasparente mediante un indice di rifrazione assoluto così definito:

L'indice di rifrazione assoluto di un mezzo trasparente è il rapporto fra la velocità c della luce nel vuoto e la velocità v della luce nel mezzo:

$$n = \frac{c}{v}$$

Mezzo o sostanza	Indice di rifrazione	Velocità di propagazione
vuoto	1	$3 \cdot 10^8$ m/s
aria	1,00029	$2,999 \cdot 10^8$ m/s
acqua	1,33	$2,26 \cdot 10^8$ m/s
ghiaccio	1,31	$2,29 \cdot 10^8$ m/s
sale	1,54	$1,95 \cdot 10^8$ m/s
alcool	1,36	$2,2 \cdot 10^8$ m/s
vetro (Crown)	1,5	$2 \cdot 10^8$ m/s
vetro (Flint)	1,65	$1,82 \cdot 10^8$ m/s
solfuro di carbonio	1,63	$1,84 \cdot 10^8$ m/s
sodio liquido	4,22	$0,7 \cdot 10^8$ m/s
arseniuro di gallio	3,6	$0,83 \cdot 10^8$ m/s
silicio	3,4	$0,88 \cdot 10^8$ m/s
diamante	2,417	$1,24 \cdot 10^8$ m/s
quarzo	1,51	$1,98 \cdot 10^8$ m/s

Facendo uso degli indici di rifrazione assoluti, la seconda legge della rifrazione della luce può essere enunciata nella forma seguente:

LEGGE DELLA RIFRAZIONE DELLA LUCE
(legge di Snell)

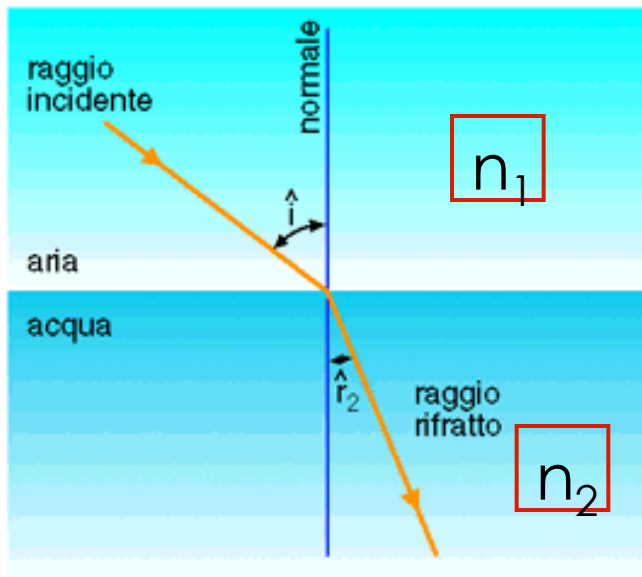
Se n_1 e n_2 sono gli indici di rifrazione assoluti dei mezzi in cui si propagano, rispettivamente, il raggio di luce incidente e quello rifratto, fra i seni degli angoli "i" di incidenza e "r" di rifrazione vale la relazione:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

Un raggio incide sulla superficie di separazione tra aria ($n_1=1$) e acqua ($n_2=1,33$) con un angolo di incidenza $i=46^\circ$. Determinare l'angolo di rifrazione r quando il raggio passa: 1) dall'aria all'acqua; 2) dall'acqua all'aria.

soluzione

Primo caso (aria-acqua): Poiché il raggio passa da un mezzo meno denso (aria) a uno più denso (acqua), ci aspettiamo che $r < i$.



Applichiamo la legge della rifrazione (legge di Snell):

$$n_1 \text{sen} i = n_2 \text{sen} r \xrightarrow{\text{formula inversa}} \text{sen} r = \frac{n_1}{n_2} \cdot \text{sen} i$$

$$\text{sen} r = \frac{1}{1,33} \cdot \text{sen} 46 = 0,541 \xrightarrow{\text{calcolatrice}} r \cong 33^\circ$$

Infatti: $r < i$

Secondo caso (acqua-aria): Poiché il raggio passa da un mezzo più denso (acqua) a uno meno denso (aria), ci aspettiamo che $r > i$.



Applichiamo la legge della rifrazione (legge di Snell), tenendo presente che il raggio proviene dall'acqua (n_1 e i sono l'indice di rifrazione dell'acqua e l'angolo d'incidenza del raggio in acqua; n_2 e r sono l'indice di rifrazione dell'aria e l'angolo di rifrazione in aria):

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \xrightarrow{\text{formula inversa}} \sin r = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin i$$

Infatti: $r > i$

$$\sin r = \frac{1,33}{1} \cdot \sin 46 = 0,956 \xrightarrow{\text{calcolatrice}} r \cong 73^\circ$$

Lenti convergenti e divergenti

Lenti convergenti

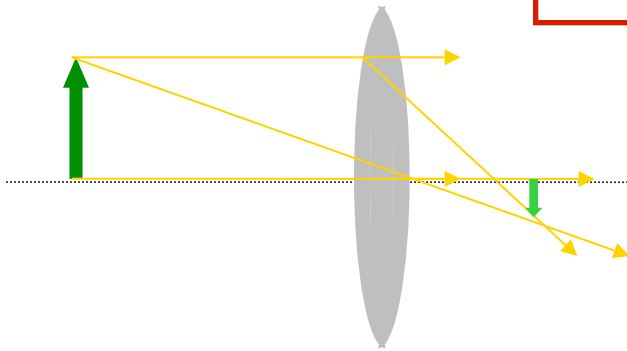


Immagine capovolta e
rimpicciolita

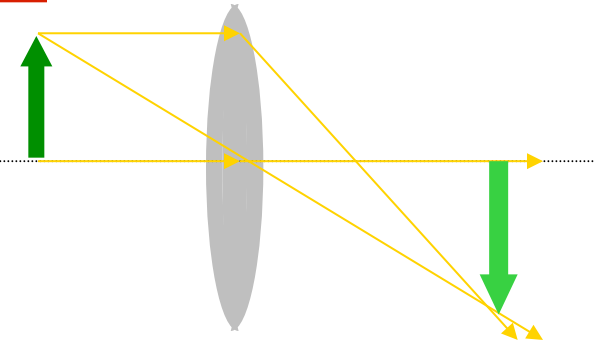
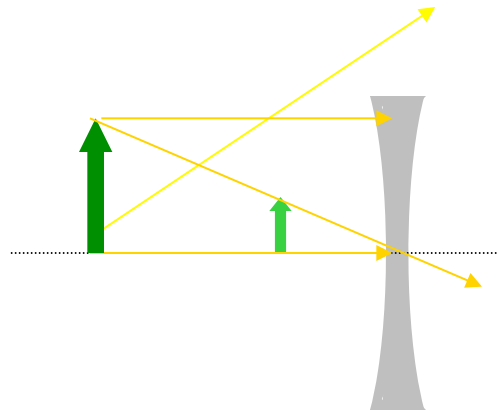


Immagine capovolta e
ingrandita

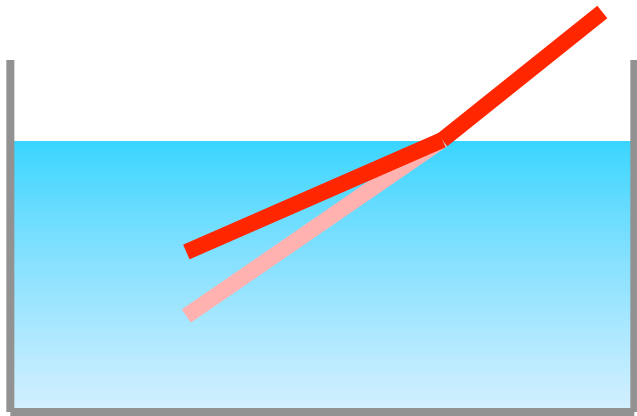


Lenti divergenti

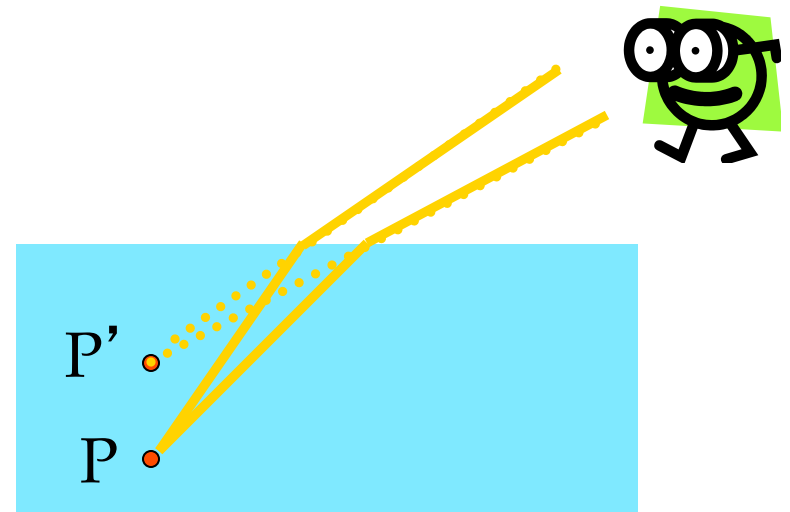
Immagine diritta e rimpicciolita

esempi di rifrazione

Il bastoncino spezzato



Un bastoncino immerso
parzialmente in acqua
sembra spezzato



A causa della rifrazione, gli oggetti in acqua appaiono più in
alto di dove realmente si trovano

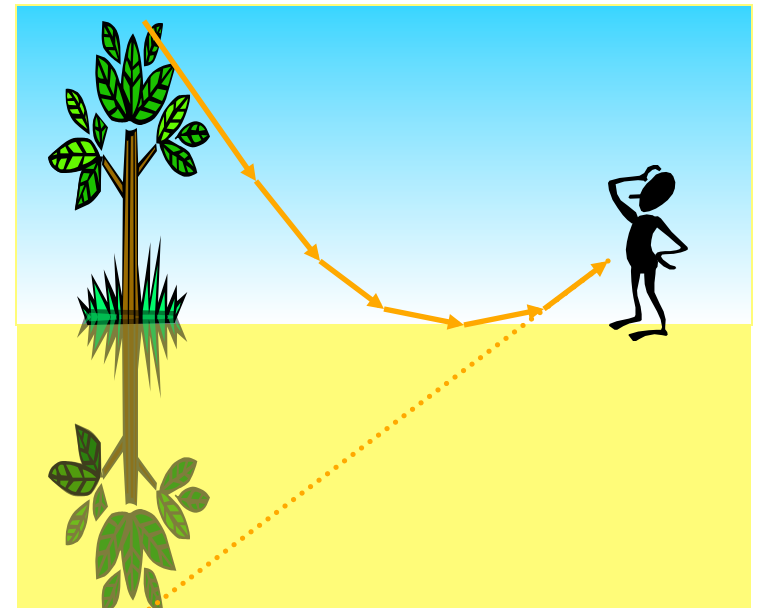


Il miraggio

aria sempre più calda e
quindi sempre meno densa



sabbia bollente



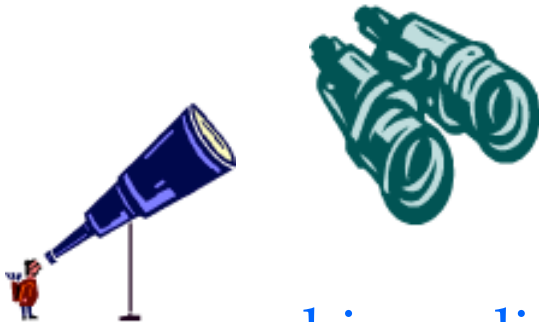
applicazione delle lenti



macchine
fotografiche



microscopi e
lenti di ingrandimento

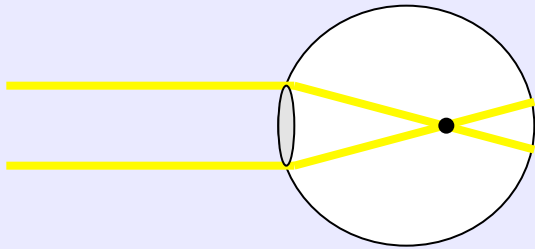


binocoli e
cannocchiali

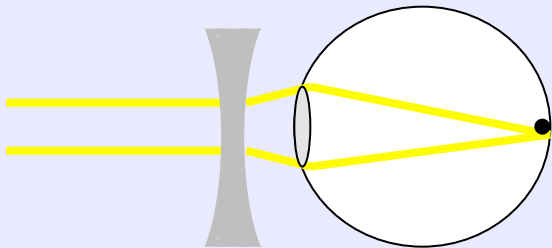


occhiali da
vista

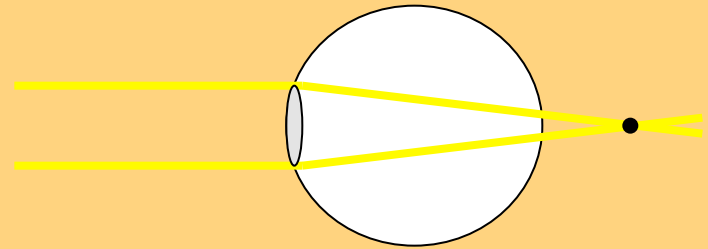
occhiali da vista



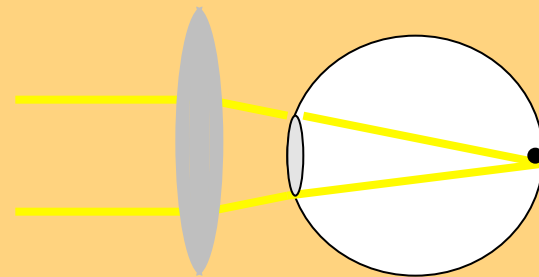
occhio miope



e la sua correzione



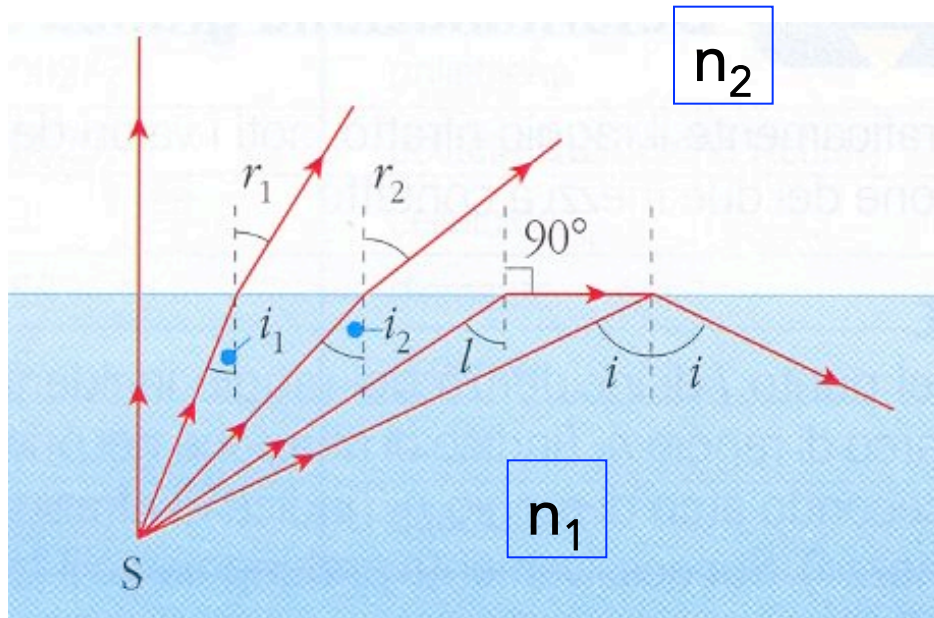
occhio ipermetrope



e la sua correzione

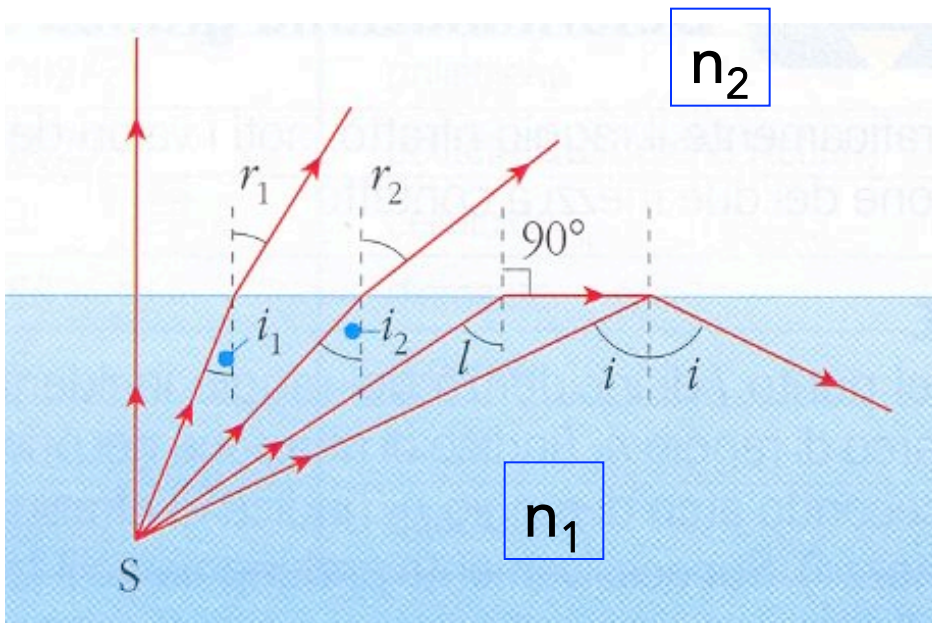
riflessione totale

Vediamo cosa accade quando un raggio luminoso passa da un mezzo più rifrangente n_1 , a un mezzo meno rifrangente n_2 .



Sia S una sorgente luminosa posta nel mezzo n_1 .

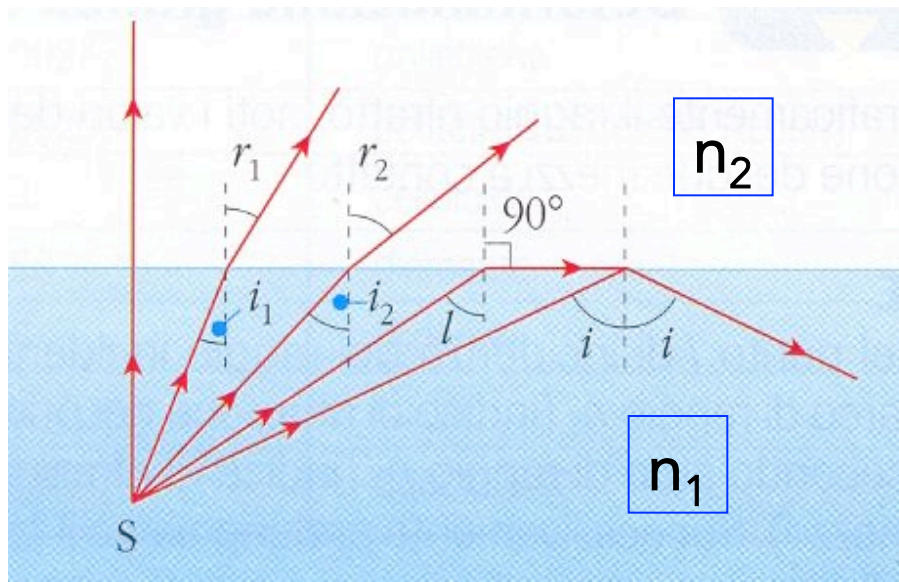
Per la legge della rifrazione, passando da n_1 (mezzo più denso) a n_2 (mezzo meno denso), i raggi si allontanano dalla normale alla superficie di separazione dei due mezzi.



Se consideriamo raggi con "i" sempre crescenti, troviamo a un certo punto un raggio cui corrisponde un raggio rifratto parallelo alla superficie dell'acqua. L'angolo di incidenza di questo particolare raggio, si chiama **angolo limite**.

Nella rifrazione da un mezzo più rifrangente a un mezzo meno rifrangente, *l'angolo limite è l'angolo di incidenza cui corrisponde un angolo di rifrazione di 90° e obbedisce alla seguente relazione:*

$$\text{sen } l = \frac{n_2}{n_1}$$



Se consideriamo un angolo di incidenza maggiore dell'angolo limite, si avrebbe:

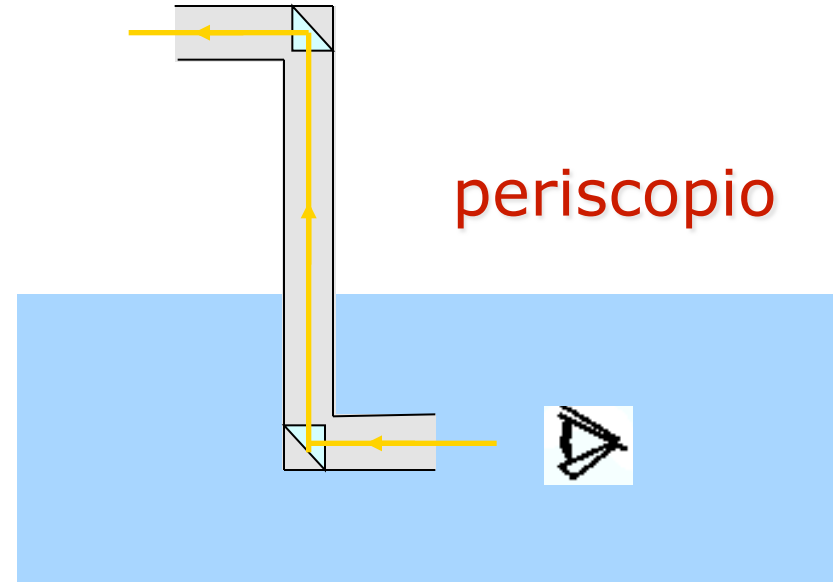
$$\text{sen } i > \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \text{sen } r = \frac{n_1}{n_2} \text{sen } i > 1$$

Risultato assurdo.

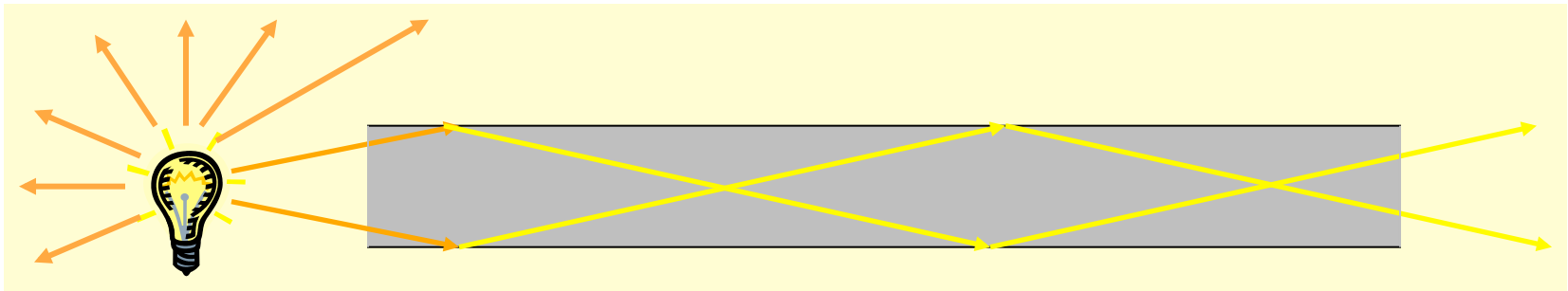
Questa impossibilità matematica corrisponde a un'impossibilità fisica del fenomeno della rifrazione.

Quando l'angolo di incidenza è maggiore dell'angolo limite, non si ottiene alcun raggio rifratto. La luce in tali condizioni non passa nel secondo mezzo, ma viene totalmente riflessa dalla superficie di separazione dei mezzi (**fenomeno della riflessione totale**), che si comporta come uno specchio.

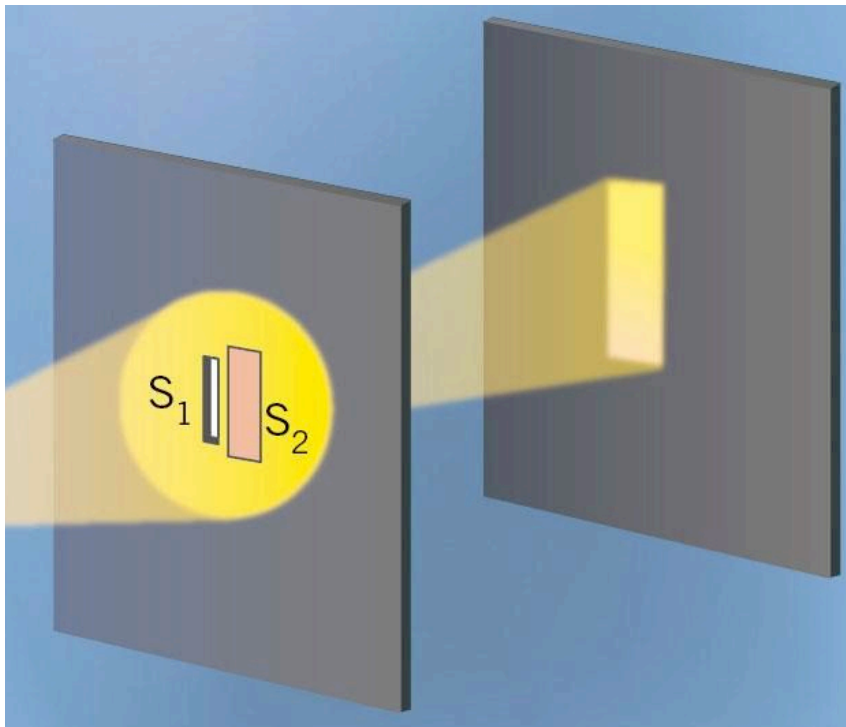
applicazione riflessione totale



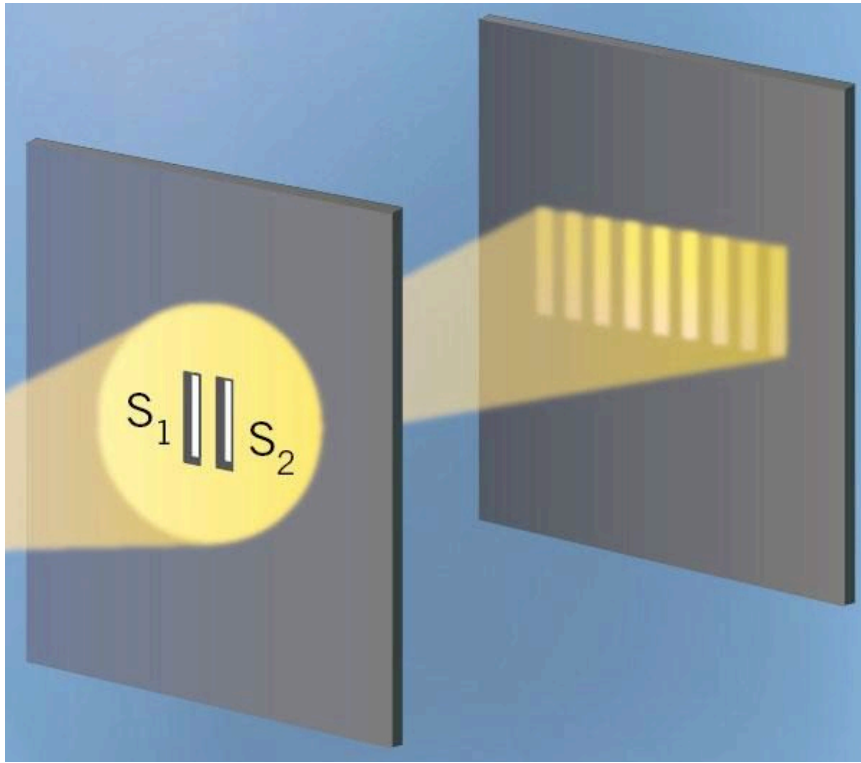
FIBRA OTTICA



Nel 1801, l'inglese **Thomas Young** riuscì a provare per la prima volta la natura ondulatoria della luce grazie all'esperimento sull'interferenza e a misurare la lunghezza d'onda della luce di vari colori.



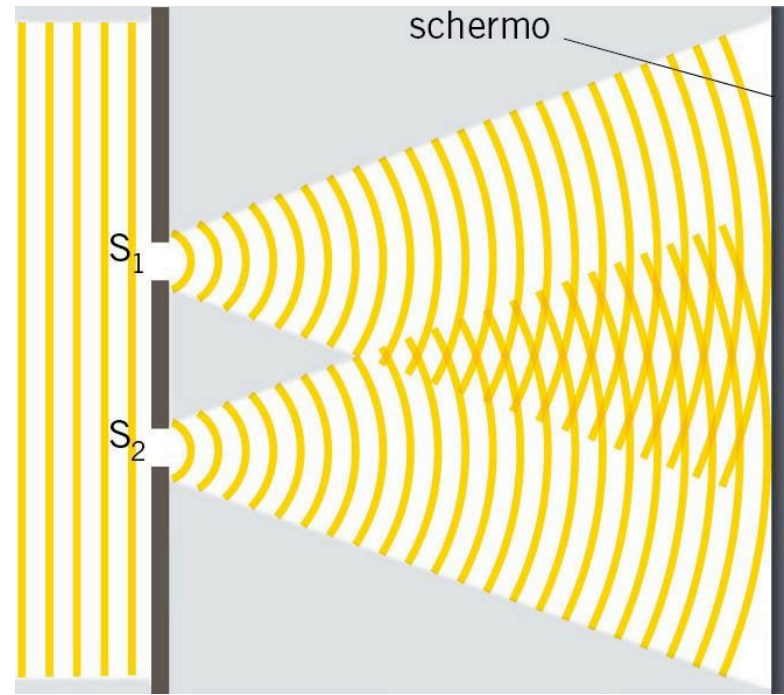
Se chiudiamo una fenditura, la luce proveniente dall'altra illumina lo schermo in modo uniforme.



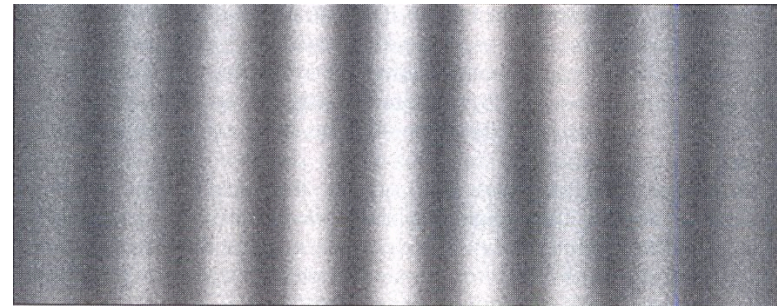
Apriamo entrambe le fenditure, sullo schermo compaiono frange luminose (interferenza costruttiva) intervallate a frange scure (interferenza distruttiva).

Analizziamo da vicino il fenomeno dell'interferenza attraverso l'esperimento di Young.

L'idea fondamentale è che le due fenditure S_1 e S_2 , colpite da un'onda piana, si comportano come sorgenti di luce e generano due onde circolari (principio di Huygens) che sono sempre in fase, perché sono dovute alla stessa onda luminosa che arriva in S_1 e S_2 .

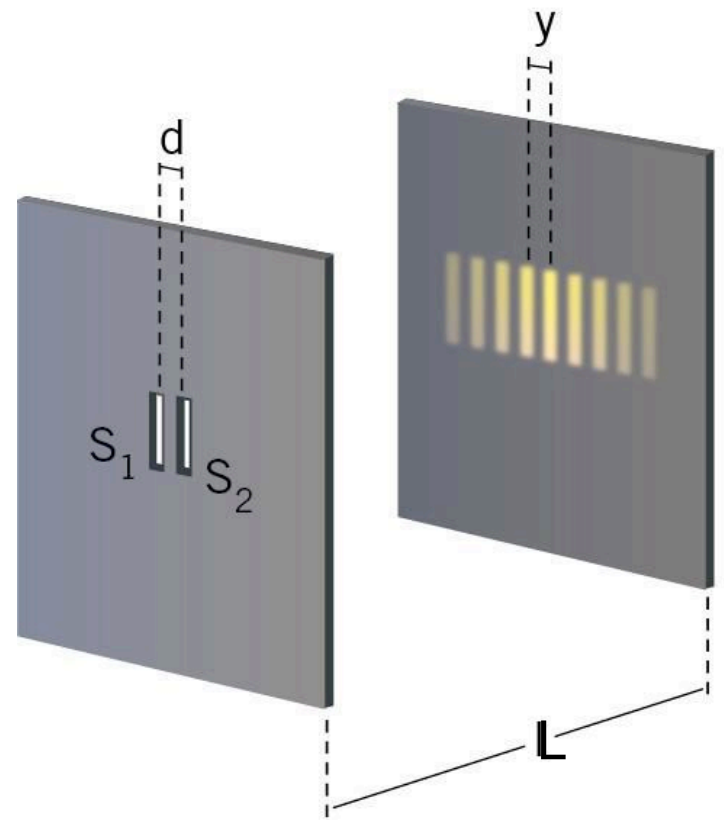


Sullo schermo comparirà una figura d'interferenza composta da frange luminose con una striscia centrale più brillante (interferenza costruttiva) intervallate a frange scure (interferenza distruttiva).



Indichiamo con y la distanza tra la fascia luminosa centrale e la prima frangia luminosa laterale, con d la distanza tra le due fenditure e con L la distanza tra lo schermo e la parete dove si trovano le fenditure.

Si dimostra che:

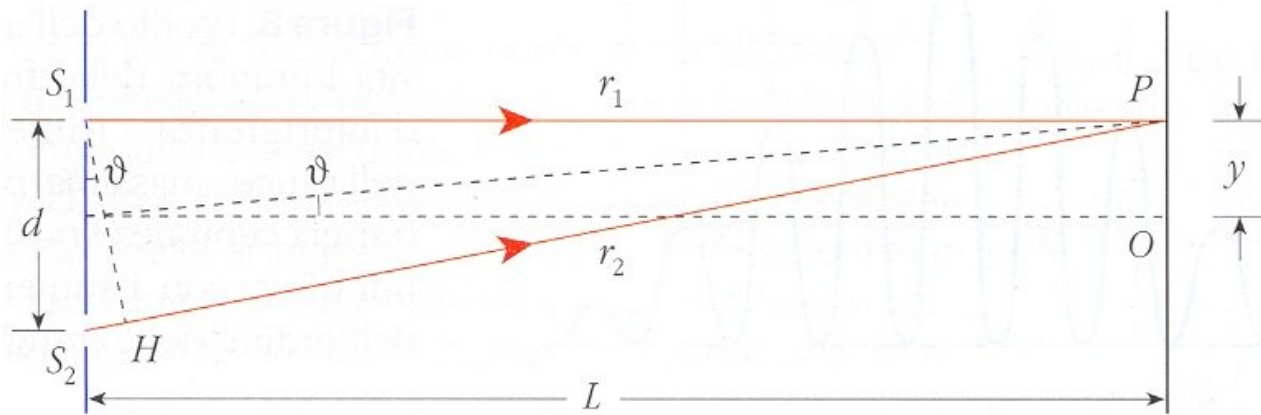


FORMULA DELL'INTERFERENZA

La lunghezza d'onda λ della luce monocromatica impiegata nell'esperimento è data dalla formula:

$$\lambda = \frac{yd}{L}$$

Osservazioni sull'esperimento.



Per motivi grafici, le dimensioni di L e d , e quindi le direzioni dei raggi emergenti, risultano molto diversi da quelli reali.

Poiché $d \ll L$, i raggi di lunghezza r_1 e r_2 , che colpiscono il punto P dello schermo, risultano approssimativamente paralleli alla congiungente condotta dal punto medio del segmento S_1S_2 al punto P . Gli angoli contrassegnati con ϑ sono pertanto all'incirca uguali. Considerando allora il triangolo S_1S_2H risulta:

$$S_2H = \Delta x = r_2 - r_1 = d \sin \vartheta$$

INTERFERENZA COSTRUTTIVA

Nel punto P si ha interferenza costruttiva, e quindi una frangia chiara, se la differenza fra le distanze percorse dai due raggi è uguale a un numero intero m di lunghezze d'onda (come per le onde meccaniche):

$$\Delta x = m\lambda \Rightarrow d \sin \vartheta = m\lambda$$

INTERFERENZA DISTRUTTIVA

Nel punto P si ha interferenza distruttiva, e quindi una frangia scura, se la differenza fra le distanze percorse dai due raggi è uguale a un multiplo dispari di $\lambda/2$ (come per le onde meccaniche):

$$\Delta x = \left(2m + 1\right) \frac{\lambda}{2} \Rightarrow d \sin \vartheta = \left(2m + 1\right) \frac{\lambda}{2}$$

$m = 1, 2, 3, \dots$ è l'ordine della frangia scura d'interferenza.

Tenendo conto dell'ordine della frangia, la formula dell'interferenza diventa:

$$\lambda = \frac{yd}{mL}$$

Misurando il valore di y per una frangia di fissato ordine m , noti i parametri d e L caratteristici del dispositivo, possiamo ricavare il valore della lunghezza d'onda λ .

esempio

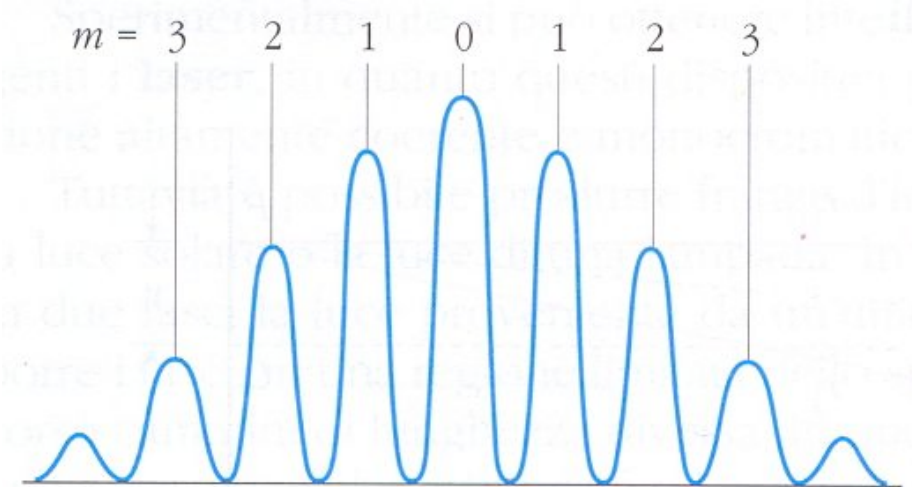
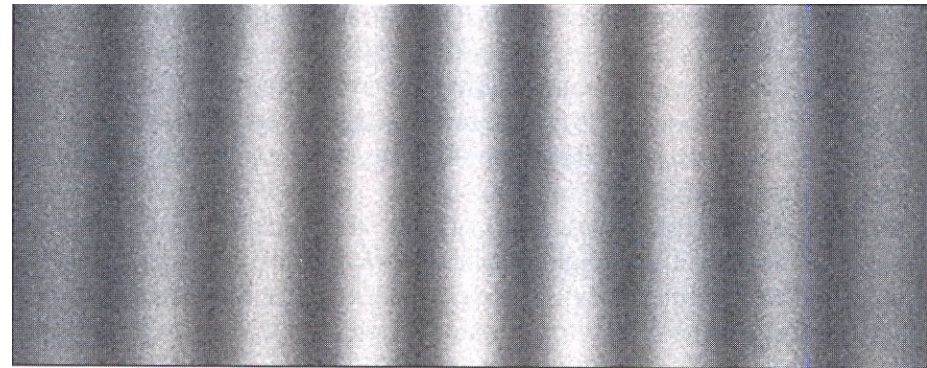
In un esperimento di interferenza la distanza tra le fenditure è $d=0,550$ mm e l'angolo α_3 che individua la quarta fascia scura a fianco del massimo luminoso centrale vale $0,236^\circ$. Determinare la lunghezza d'onda della luce utilizzata nell'esperimento.

Utilizziamo la condizione di interferenza distruttiva con $m=3$:

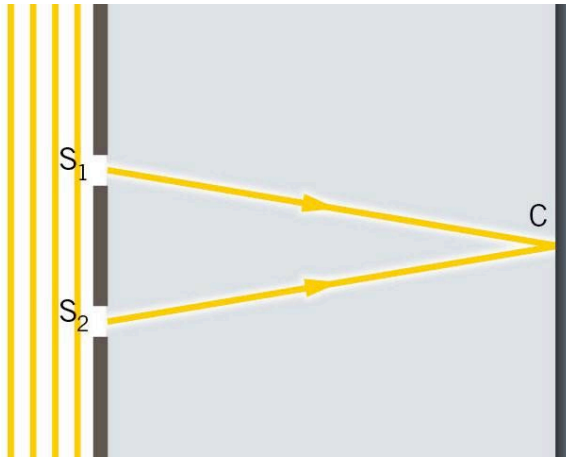
$$d \sin \alpha = \left(2m + 1\right) \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = \frac{2d \sin \alpha}{2m + 1} = \frac{2 \cdot 0,550 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(0,236)}{2 \cdot 3 + 1} = 6,47 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Se si utilizza come sorgente primaria una radiazione monocromatica (caratterizzata da una sola frequenza), la figura d'interferenza è formata da una serie di frange luminose di un solo colore alternate a frange scure.

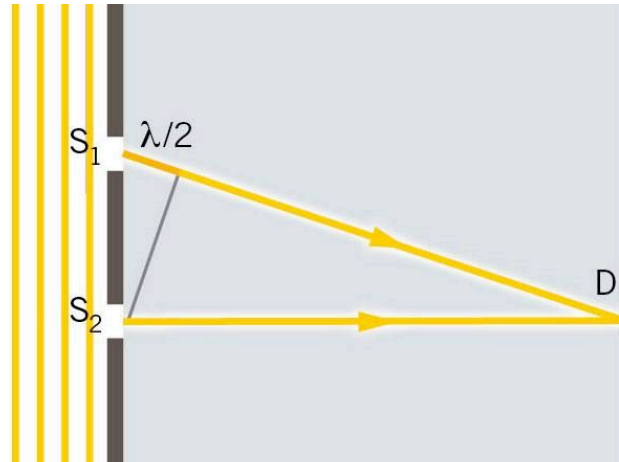
Per quanto riguarda la luminosità delle frange, essa è massima per la frangia di ordine $m=0$ mentre diminuisce con l'aumentare dell'ordine.



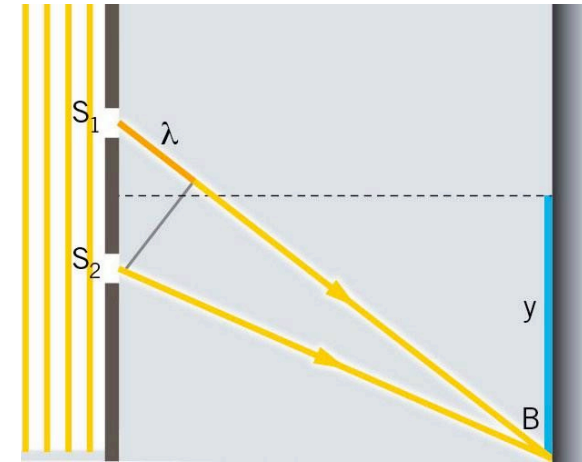
analisi qualitativa dell'interferenza



La frangia brillante centrale è equidistante da S_1 e S_2 : le due onde luminose sono in fase e si ha interferenza costruttiva.

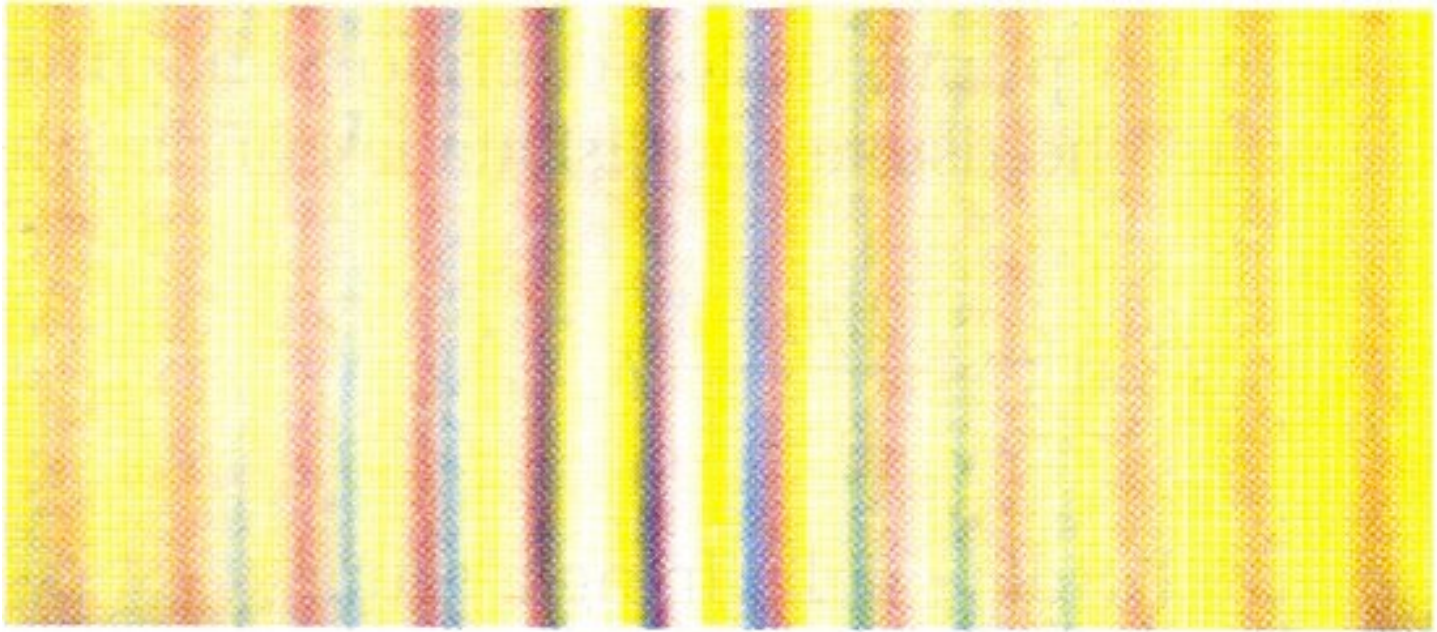


Si ha la prima frangia scura (interferenza distruttiva) in quanto la differenza dei cammini dei due raggi è pari a $\lambda/2$.

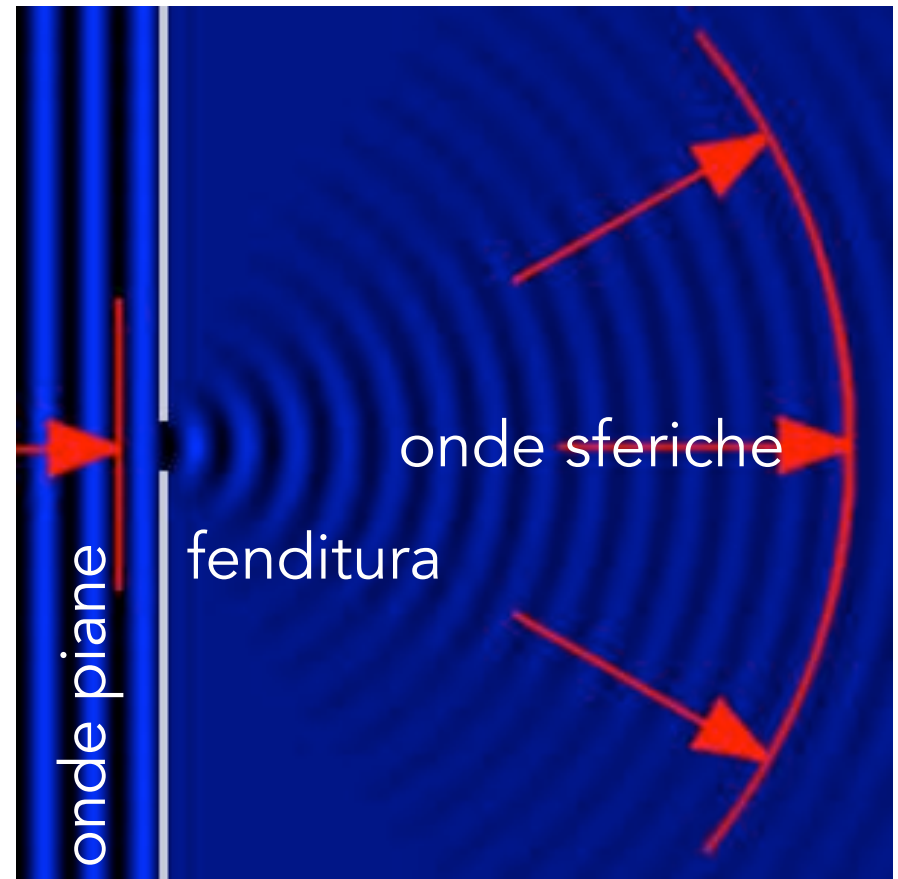


Si ha la prima frangia luminosa (interferenza costruttiva) in quanto la differenza dei cammini dei due raggi è pari a λ .

Se la sorgente primaria è policromatica, ogni singola componente origina una propria figura d'interferenza che va a sovrapporsi con le altre; così la figura risultante è composta da strisce di diverso colore.

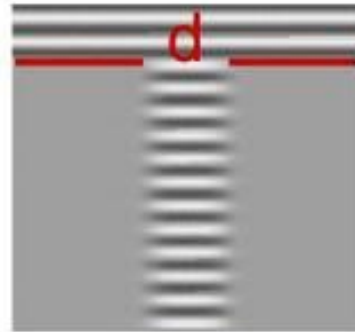
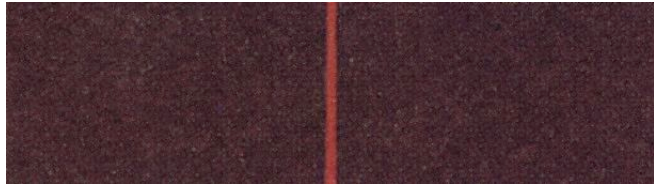


Il fenomeno della diffrazione si ha quando la luce non si propaga in linea retta e si manifesta ogni volta che un'onda incontra un ostacolo o passa attraverso un foro di dimensioni paragonabili alla lunghezza d'onda. Al di là dell'ostacolo o del foro la forma geometrica del fronte d'onda è alterata.



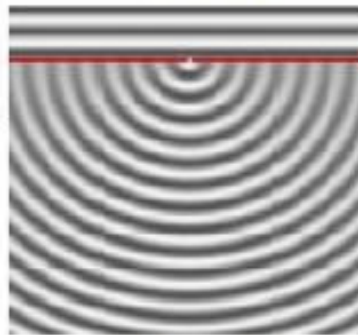
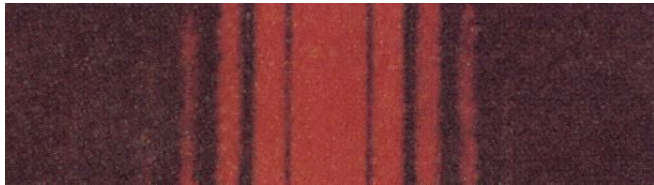
La diffrazione è un fenomeno tipico delle onde che non si spiega con il modello corpuscolare.

Facciamo passare un fascio di luce con lunghezza d'onda λ attraverso una fenditura di larghezza d .



$$d \gg \lambda$$

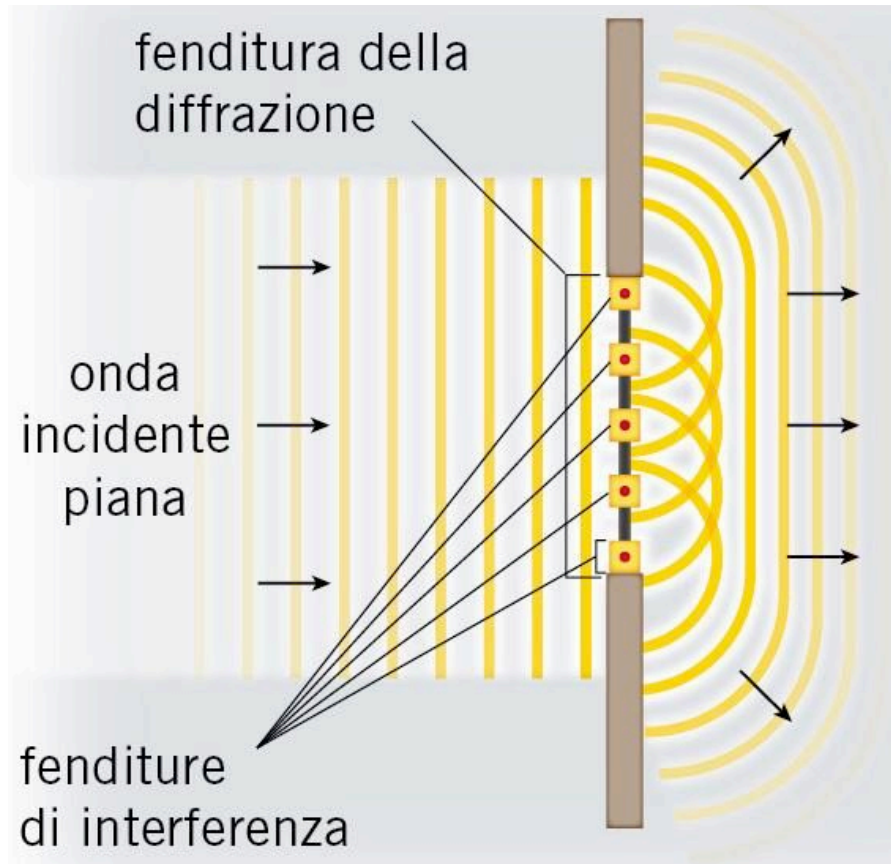
Se la fenditura è larga ($d \gg \lambda$) sullo schermo compare una striscia luminosa molto netta.



$$d \ll \lambda$$

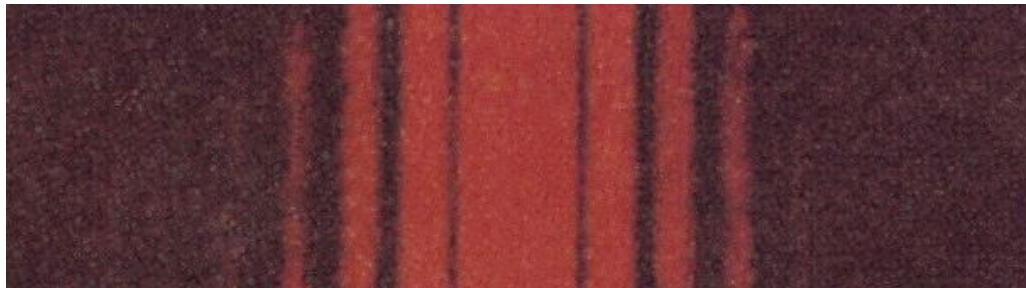
Se restringiamo la fenditura ($d \ll \lambda$) sullo schermo compaiono delle frange luminose alternate a zone scure.

Analizziamo più da vicino il fenomeno della diffrazione.

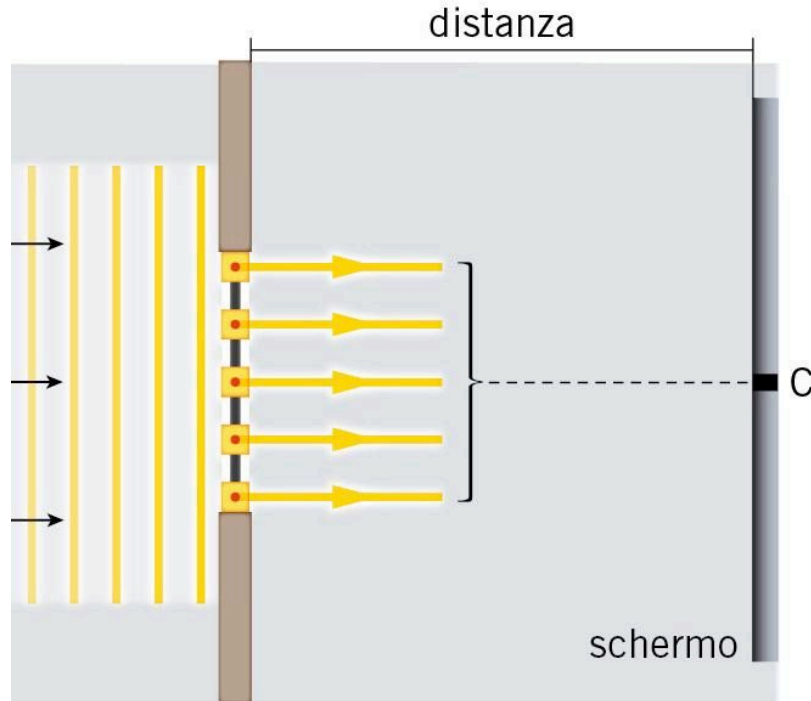


Per il principio di Huygens, ogni piccola sezione della fenditura investita dall'onda si comporta come una sorgente di onde luminose tutte in fase fra loro.

La figura di diffrazione che si ottiene è la sovrapposizione di tutte le frange d'interferenza generate da queste piccole fenditure virtuali.



frangia centrale

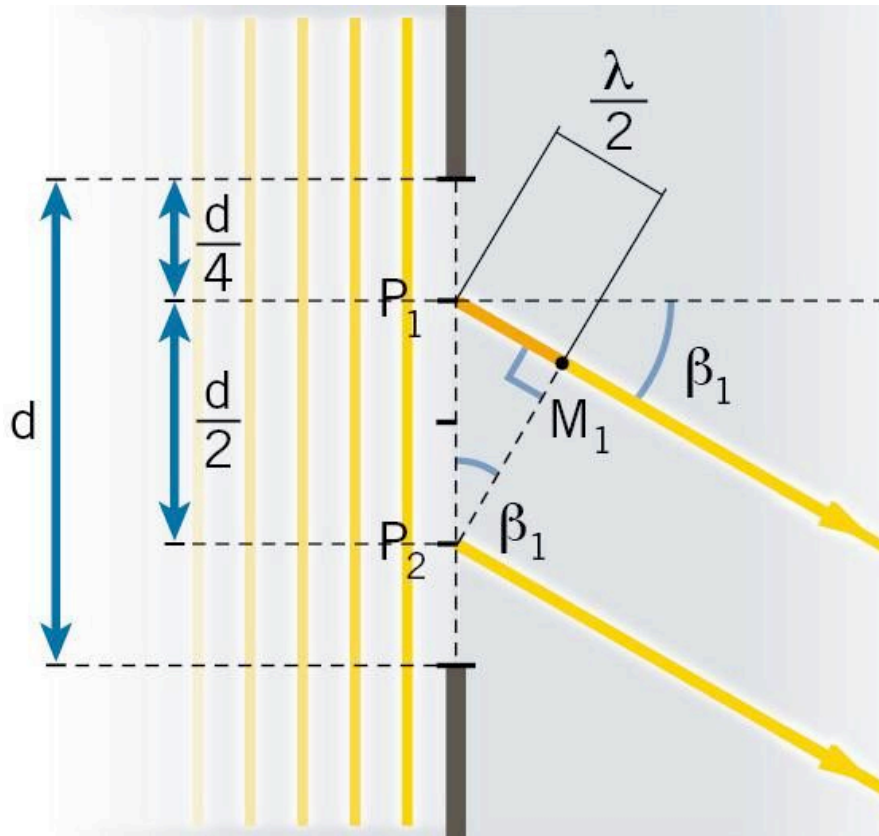


La fascia centrale brillante è dovuta ai raggi di luce che, dalla fenditura, arrivano sullo schermo in direzione perpendicolare a esso.

Infatti, i punti della fenditura hanno praticamente tutti la stessa distanza dal centro C dello schermo (ricorda che la distanza tra le fenditure e lo schermo è molto grande rispetto alla larghezza d della fenditura); quindi le onde che partono da essi arrivano a C in fase e lì interferiscono costruttivamente.

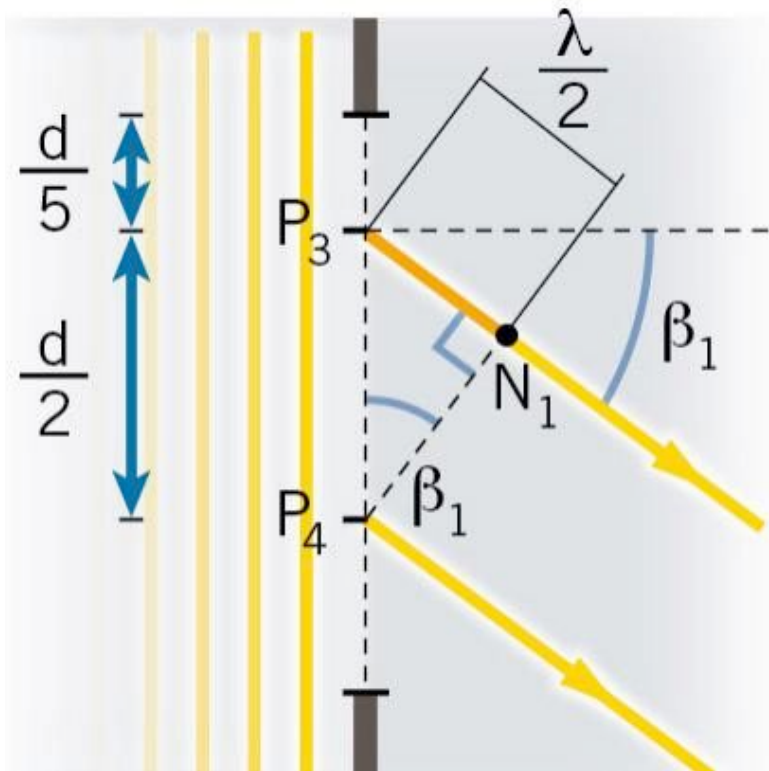
Con un procedimento matematico è possibile determinare la posizione angolare delle frange scure della figura di diffrazione.

prima frangia scura



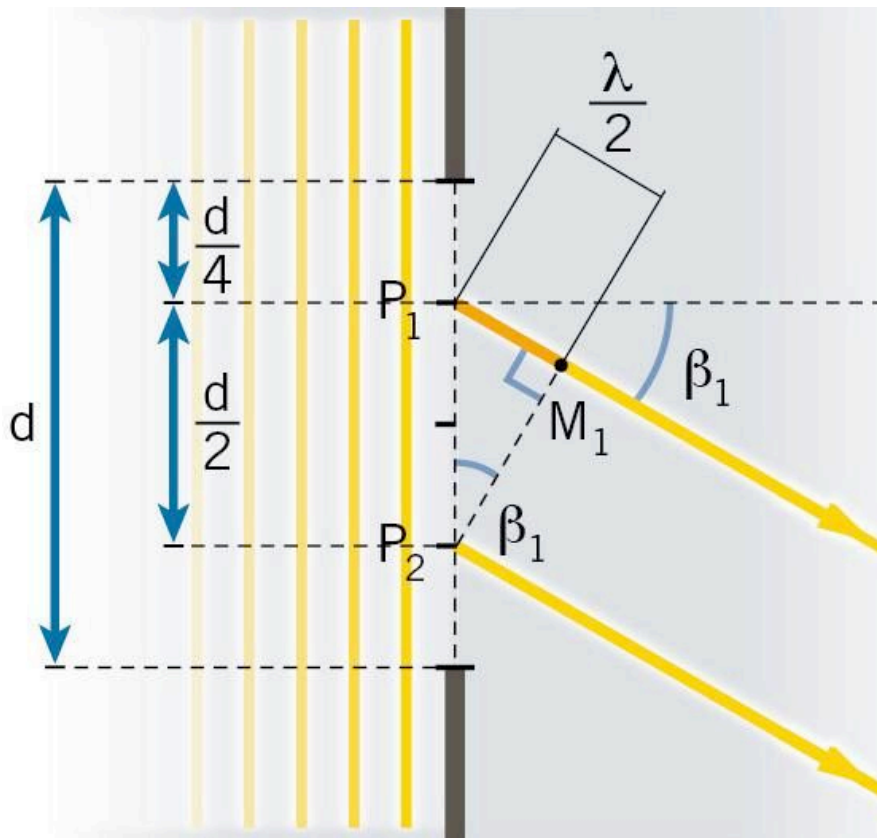
Per fissare le idee, consideriamo due raggi che partono dai punti P_1 e P_2 . Le posizioni di P_1 e P_2 sono quelle indicate in figura.

Scegliamo l'angolo β_1 in modo tale che $P_1M_1 = \lambda/2$. In questo modo si realizza la condizione di interferenza distruttiva $\Delta x = (2k+1) \lambda/2$, tra i due raggi.



Anche tutti gli altri punti della fenditura possono essere presi a coppie che distano $d/2$ tra loro e che interferiscono in modo distruttivo. Quindi i raggi che partono dai punti P_3 e P_4 , che hanno la stessa proprietà dei punti precedenti P_1 e P_2 , interferiscono distruttivamente.

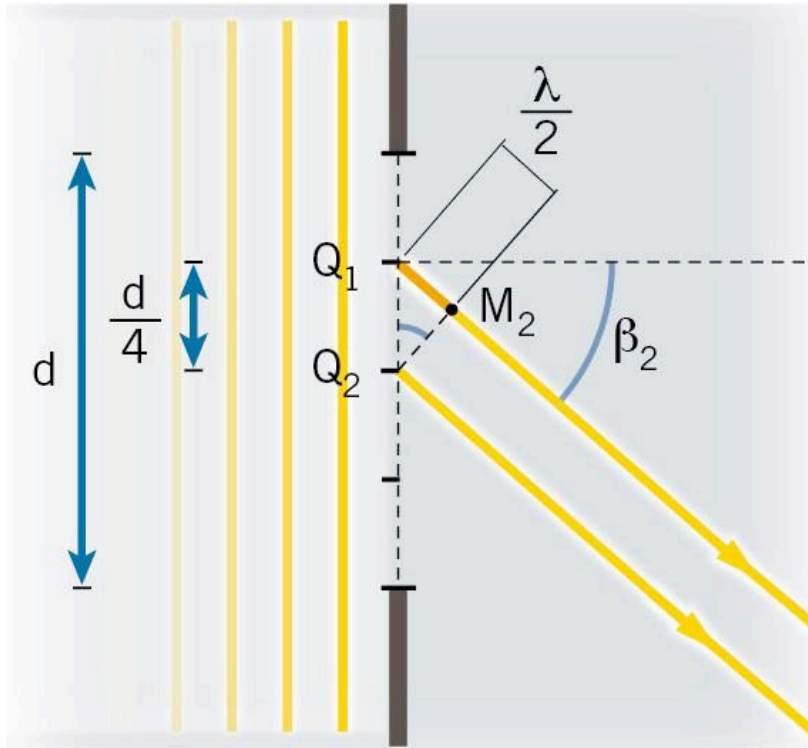
I raggi che partono dalla fenditura con l'angolo β_1 interferiscono distruttivamente e formano la prima frangia scura.



Considerazioni di carattere geometrico ci consentono di affermare che l'angolo $P_1P_2M_1 = \beta_1$. E che per i teoremi sul triangolo del rettangolo (trigonometria) possiamo scrivere:

$$P_1M_1 = P_1P_2 \sin \beta_1 \xrightarrow[\substack{P_1P_2 = d/2}]{P_1M_1 = \lambda/2} \frac{\lambda}{2} = \frac{d}{2} \sin \beta_1 \Rightarrow \sin \beta_1 = \frac{\lambda}{d}$$

altre frange scure



Consideriamo sulla fenditura due punti Q_1 e Q_2 che distano $d/4$ e consideriamo i raggi che escono da questi punti con un angolo β_2 .

Ripetendo il ragionamento di prima, si ottiene:

$$Q_1M_2 = Q_1Q_2 \sin \beta_2 \xrightarrow[Q_1Q_2 = d/4]{Q_1M_1 = \lambda/2} \frac{\lambda}{2} = \frac{d}{4} \sin \beta_2 \Rightarrow \sin \beta_2 = 2 \frac{\lambda}{d}$$

Questo ragionamento può continuare prendendo punti della fenditura che distano $d/6$, $d/8$ e così via. Si ottiene:

Frangie scure della figura di diffrazione

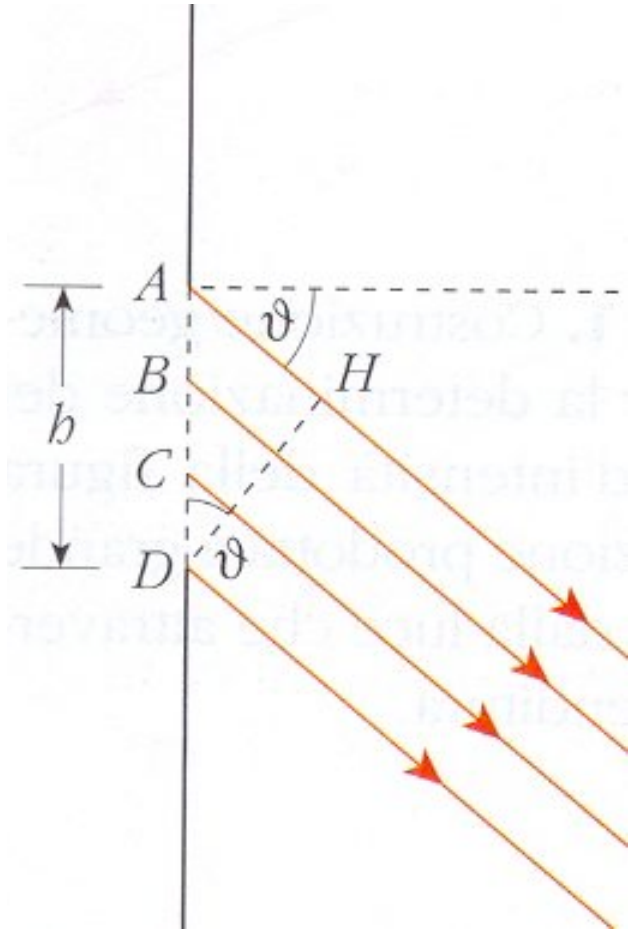
La figura di diffrazione prodotta da una fenditura di larghezza d illuminata perpendicolarmente da luce di lunghezza d'onda λ presenta frangie scure nelle direzioni che formano con la direzione d'incidenza β angoli tali che:

$$\sin \beta_m = m \frac{\lambda}{d}$$

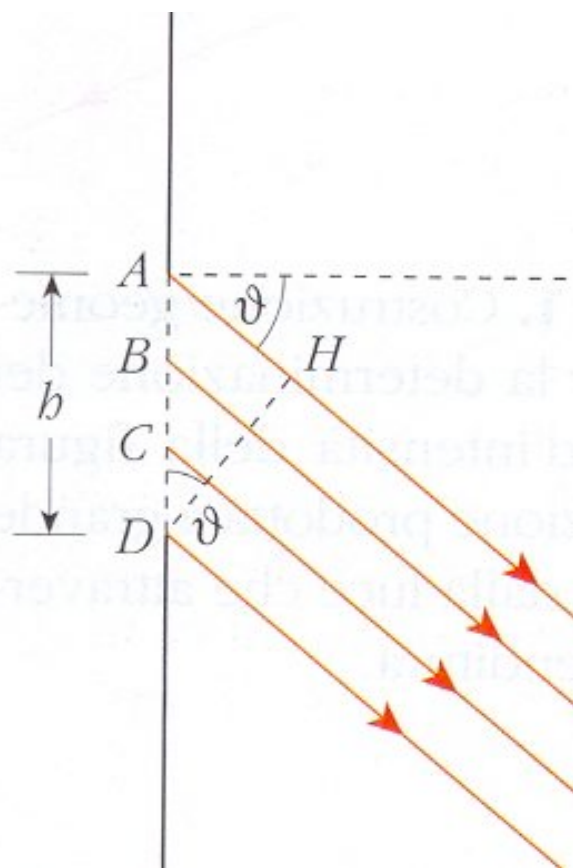
$m=1,2,3,\dots$ ordine della frangia scura

frange luminose

Per trovare la posizione del massimo successivo a quello centrale, dividiamo la fenditura in tre parti uguali, AB, BC e CD. A ogni raggio emesso da un punto del tratto AB facciamo corrispondere il raggio emesso dal punto del segmento BC distante $h/3$ dal primo e il raggio emesso dal punto del segmento CD distante $h/3$ dal secondo. Se consideriamo quella direzione del fascio diffratto per cui i raggi estremi provenienti da A e D presentano una differenza di cammino:



$$\Delta x = \overline{AH} = h \sin \vartheta = \frac{3}{2} \lambda$$



allora ogni raggio emesso dal tratto AB e il corrispondente raggio emesso dal tratto BC hanno fra loro una differenza di cammino $\Delta/3 = \lambda/2$. Pertanto questi due raggi interferiscono distruttivamente sullo schermo. Solo i raggi uscenti da un terzo della fenditura, cioè, nel caso particolare preso come esempio, quelli uscenti dal tratto CD, vanno a illuminare lo schermo senza interferire distruttivamente.

Naturalmente, poiché la luce proviene ora da un terzo della fenditura, l'intensità luminosa della corrispondente frangia è più bassa di quella del massimo centrale.

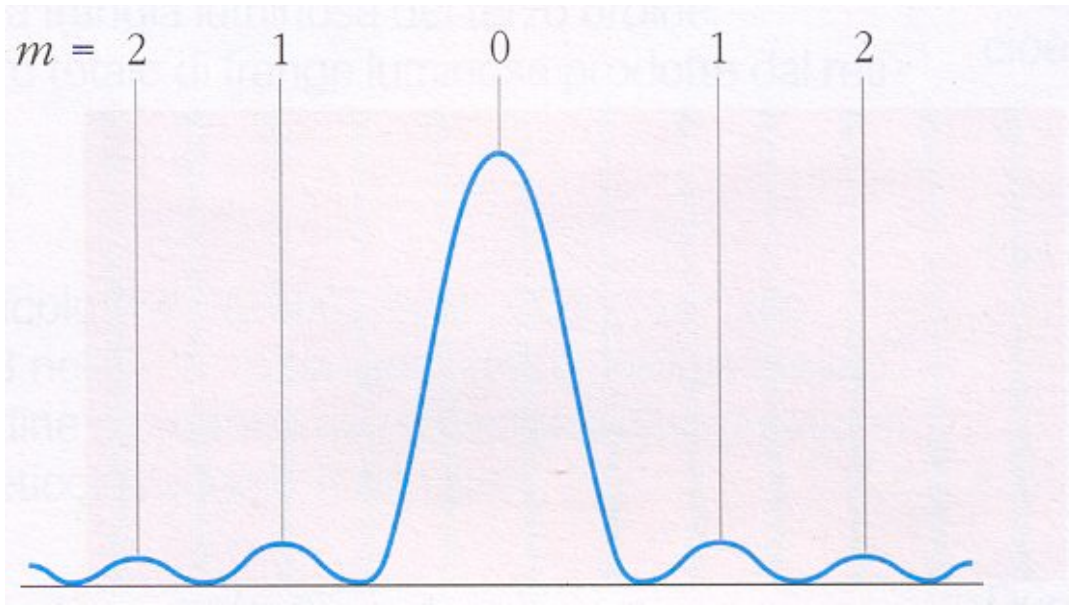
Generalizzando possiamo affermare che:

Frangie chiare della figura di diffrazione

La figura di diffrazione prodotta da una fenditura di larghezza h illuminata perpendicolarmente da luce di lunghezza d'onda λ presenta frangie chiare nelle direzioni che formano con la direzione d'incidenza angoli θ tali che:

$$\sin \vartheta_m = (2m + 1) \frac{\lambda}{2h}$$

$m=1,2,3,\dots$ ordine della frangia chiara



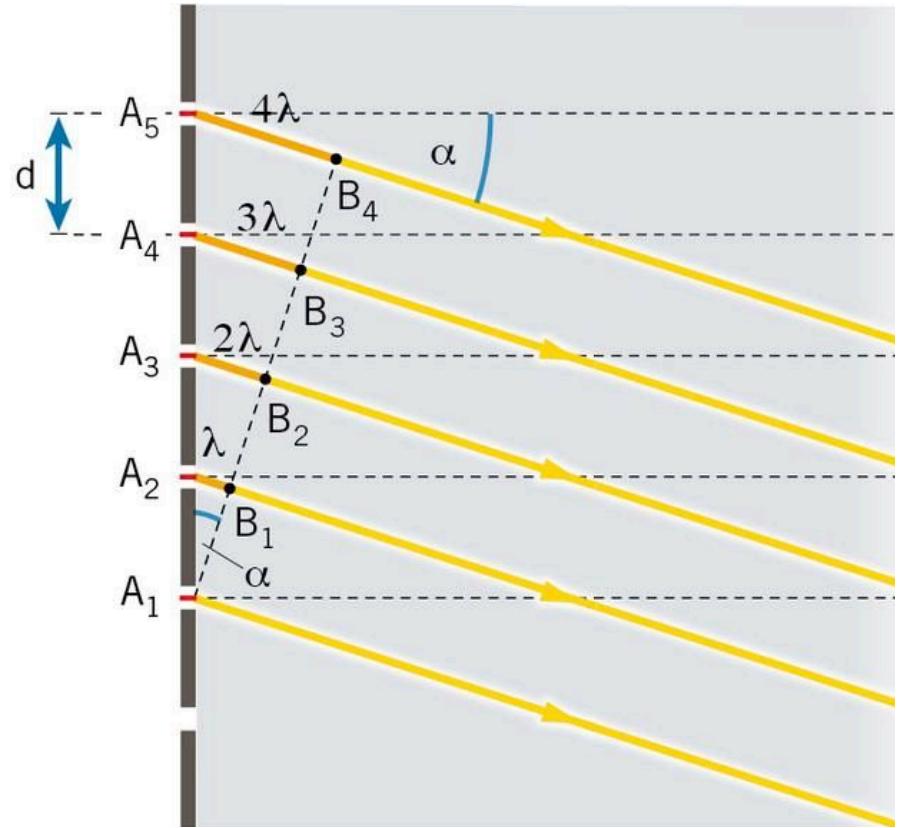
Andamento dell'intensità luminosa della figura di diffrazione prodotta da una fenditura

L'intensità luminosa della figura di diffrazione diminuisce rapidamente passando dal massimo centrale alle fasce chiare laterali.

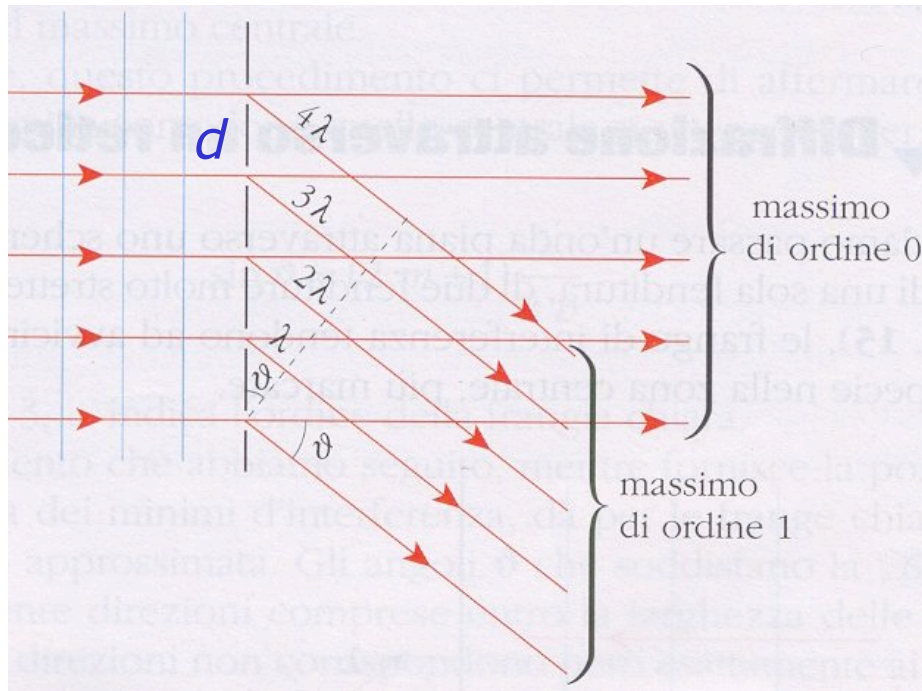
Il fenomeno è simmetrico: anche se ci siamo concentrati sulle frange scure e chiare a destra della striscia centrale luminosa, si ricordi che altrettante frange scure e chiare si trovano alla sinistra di quella centrale, in posizione simmetrica.

RETICOLO DI DIFFRAZIONE

Un **reticolo di diffrazione** è uno schermo su cui sono praticate delle fenditure molto sottili e spaziate in modo regolare (la distanza d tra due fenditure si chiama **passo reticolare**). Vengono usati come strumenti precisi per la misura di lunghezze d'onda.



Un reticolo di diffrazione si costruisce incidendo finissime righe parallele su una lastra di vetro (fino a 10.000 per centimetro). Gli spazi fra le righe sono trasparenti alla luce e quindi fungono da fenditure.



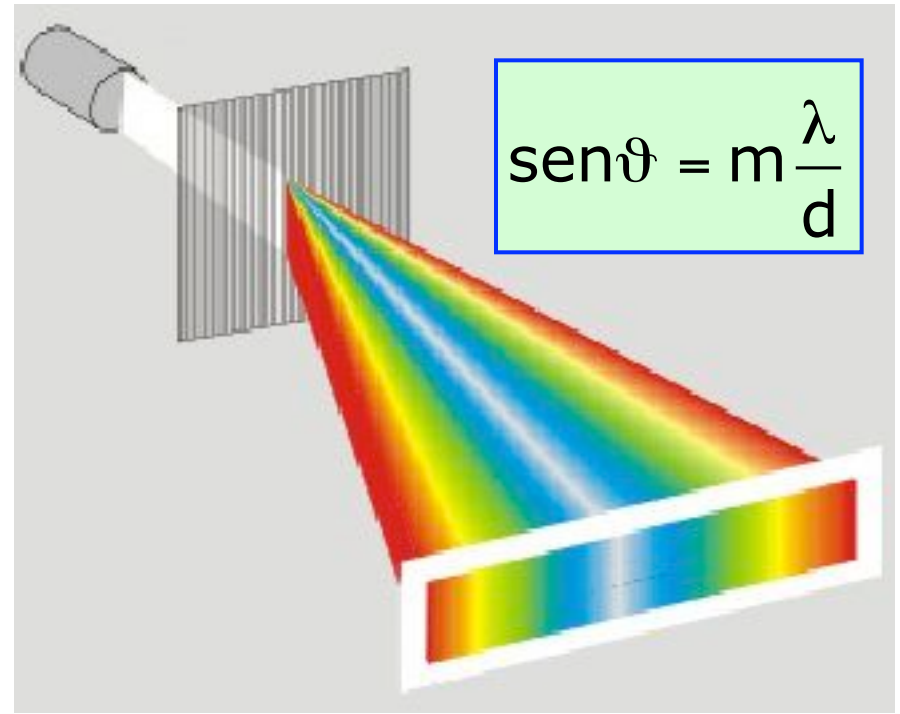
Massimi d'intensità nella diffrazione da reticolo

La figura di diffrazione prodotta da un reticolo di passo d illuminato perpendicolarmente da luce di lunghezza d'onda λ presenta massimi d'intensità nelle direzioni che formano con la direzione d'incidenza angoli θ tali che:

$$d \sin \theta = m\lambda \Rightarrow \sin \theta = m \frac{\lambda}{d}$$

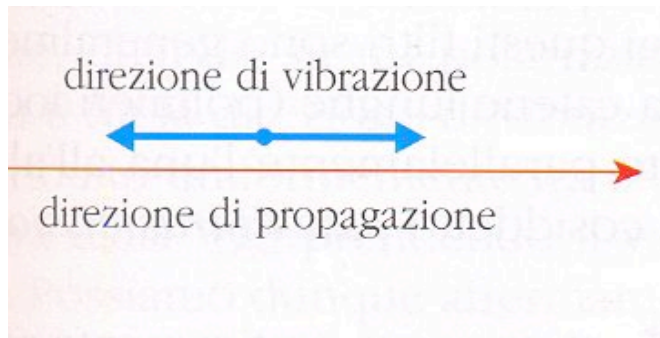
$m=0,1,2,\dots$ ordine della frangia

Lunghezze d'onda diverse hanno massimi di luminosità ad angoli diversi. Pertanto il reticolo di diffrazione separa i colori come fa il prisma, ma le frange luminose sono più sottili e nette, per cui funziona meglio per analizzare la composizione della luce.

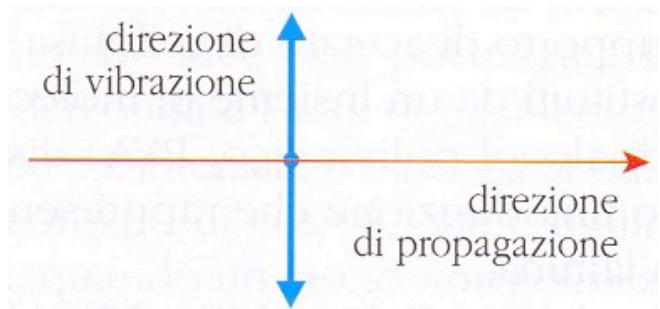


Il CD è un reticolo che funziona in riflessione. Ci sono 625 incisioni per mm e i diversi colori della luce bianca hanno massimi di intensità di riflessione ad angoli diversi tra loro.

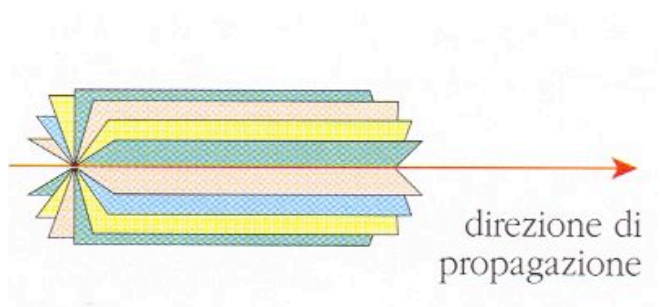
POLARIZZAZIONE DELLA LUCE



Nelle onde longitudinali la direzione di vibrazione coincide con quella di propagazione

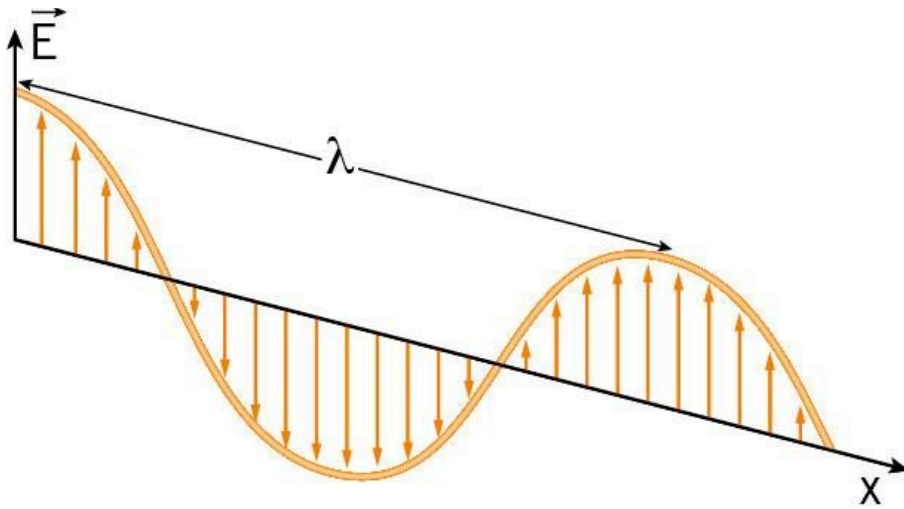


Nelle onde trasversali la direzione di vibrazione è perpendicolare alla direzione di propagazione

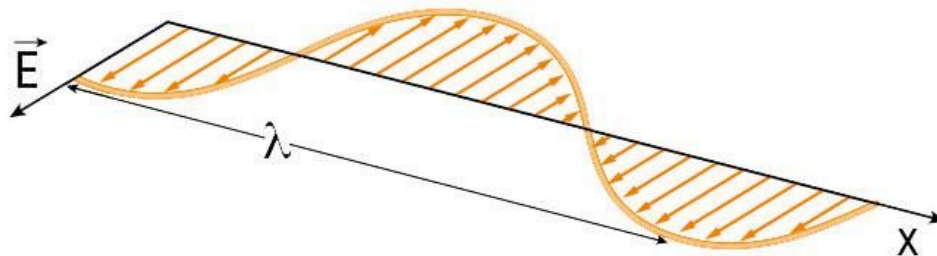


Alcuni fra gli infiniti piani passanti per la direzione di propagazione di un'onda trasversale

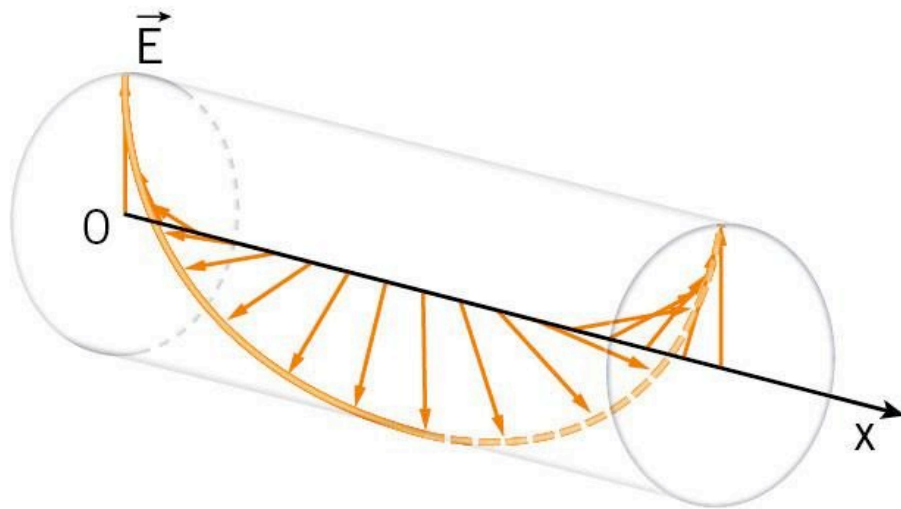
Nella luce, il campo elettrico (così come il campo magnetico) può oscillare (sempre perpendicolarmente alla direzione del moto dell'onda) in modi molto diversi:



Se $\mathbf{E}$ oscilla sempre in un piano verticale, l'onda è polarizzata verticalmente.



Se $\mathbf{E}$ oscilla sempre in un piano orizzontale, l'onda è polarizzata orizzontalmente.



Se $\vec{E}$ ruota attorno alla direzione di propagazione, l'onda è polarizzata circolarmente.

In generale possiamo affermare che:

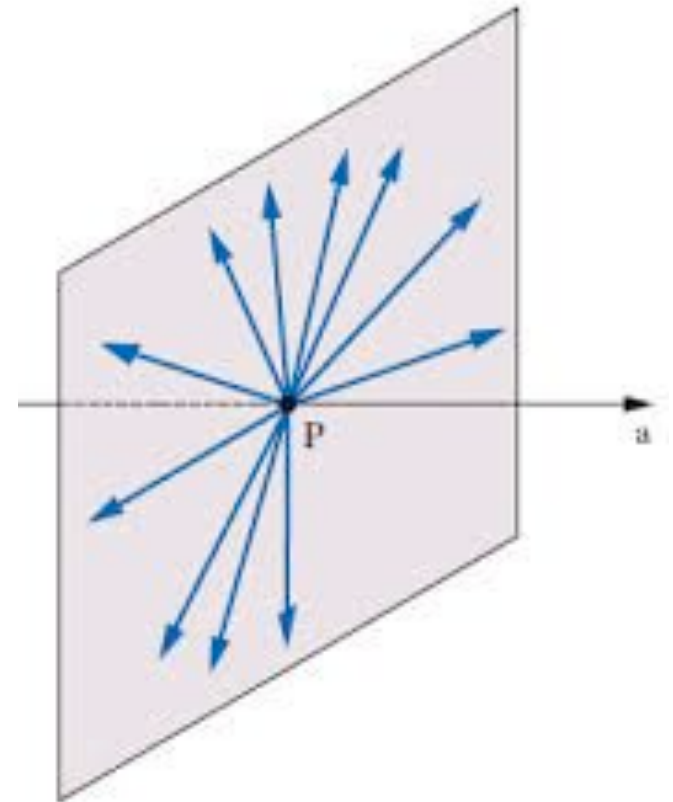
Un'onda si dice polarizzata quando l'oscillazione dei vettori campo elettrico $\vec{E}$ e campo magnetico $\vec{B}$ ha caratteristiche ben definite.

La **polarizzazione** è una proprietà fisica delle onde trasversali; il fatto che interessi anche la luce costituisce una prova della sua natura ondulatoria e, più precisamente, del suo essere **un'onda di tipo trasversale**.

Nei primi due esempi la luce si dice polarizzata linearmente:

Un'onda è **polarizzata linearmente** se la vibrazione avviene costantemente su uno dei piani passanti per la direzione di propagazione. Tale piano, orientato in maniera fissa nello spazio è detto *piano di vibrazione*.

La luce naturale è luce non polarizzata. Infatti, essendo la sovrapposizione di onde luminose emesse in modo casuale da un grande numero di atomi, il campo elettromagnetico oscilla lungo tutte le direzioni perpendicolari alla direzione di propagazione.

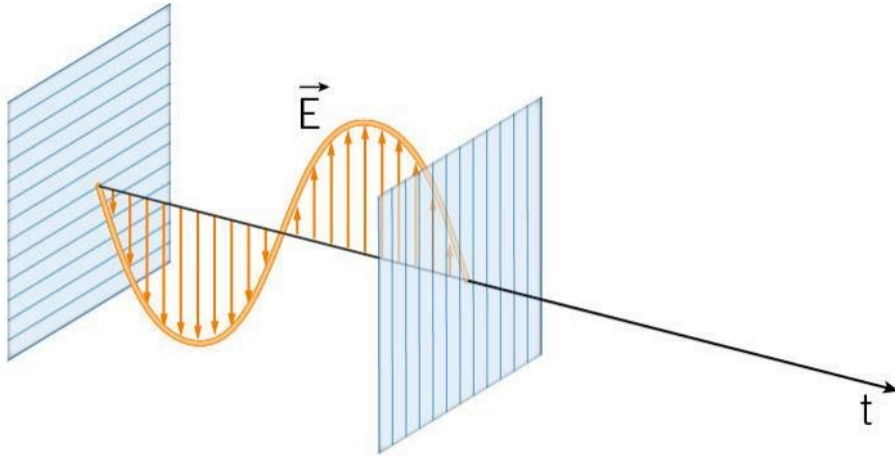


Per ottenere luce polarizzata linearmente si possono usare **filtri polarizzatori**.

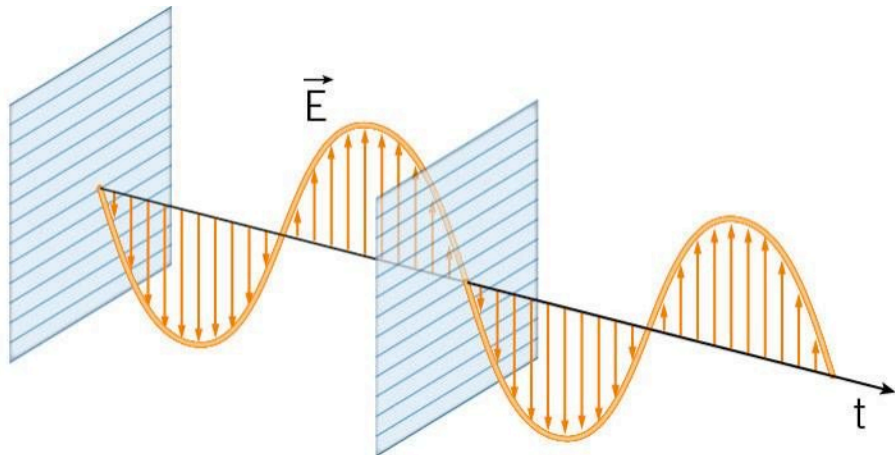


Il filtro si lascia attraversare dalla luce che ha direzione di vibrazione perpendicolare alle fibre conduttrici del filtro, e la luce con direzione di vibrazione parallela viene assorbita.

I filtri polarizzatori lineari vengono sfruttati negli schermi a cristalli liquidi. Vediamo come:



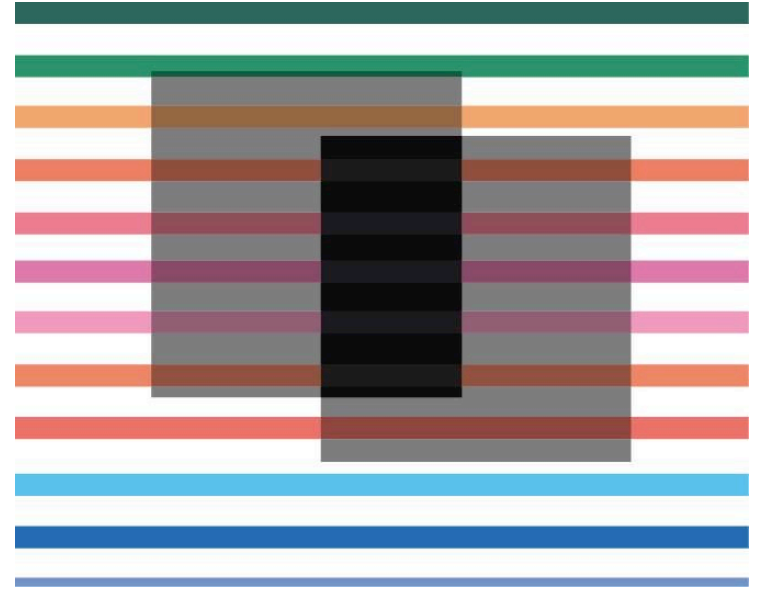
La luce polarizzata è trasmessa inalterata da un secondo polarizzatore con asse di trasmissione parallelo a quello del primo.



Lo stesso polarizzatore, ruotato di 90° , farebbe passare soltanto luce polarizzata orizzontalmente e, quindi, blocca quella che proviene dal filtro verticale.

I due filtri polarizzatori lineari hanno gli assi di trasmissione perpendicolari: ciascuno di essi è trasparente alla luce di frequenza, e quindi di colori, diversi, ma la zona in cui essi sono sovrapposti è scura.

In questo modo sullo schermo a cristalli liquidi si ottengono punti chiari e scuri.

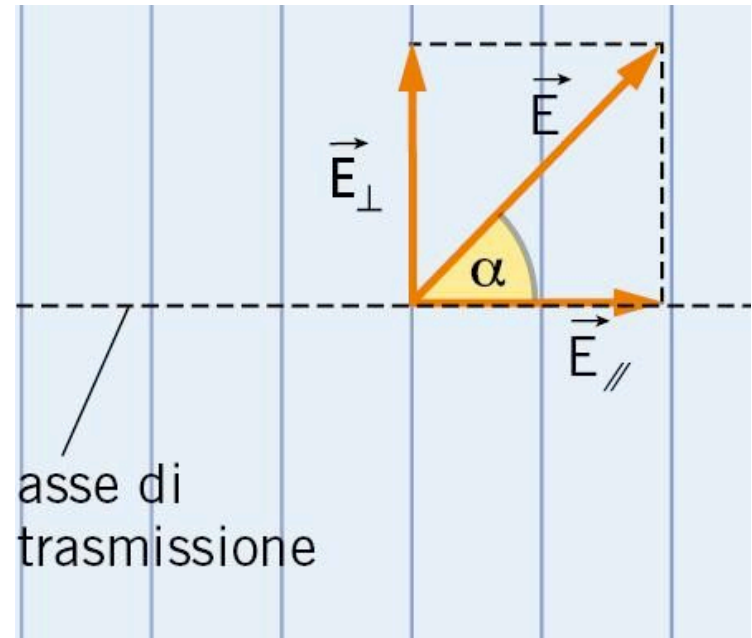


Altra applicazione è nella costruzione degli occhiali da sole.

La luce riflessa e quella diffusa dall'atmosfera terrestre risultano parzialmente polarizzate. Pertanto le lenti, provviste di un filtro polarizzatore, riducono il fascio di luce riflesso da qualche superficie, che potrebbe «accecare» un autista.

La legge di Malus

Se un fascio di luce polarizzato linearmente incide, con un irradianamento $E_e^{(0)}$, su un filtro polarizzatore che ha l'asse di trasmissione inclinato di un angolo α rispetto al piano di polarizzazione della luce, l'irradianamento della luce uscente dal filtro è:



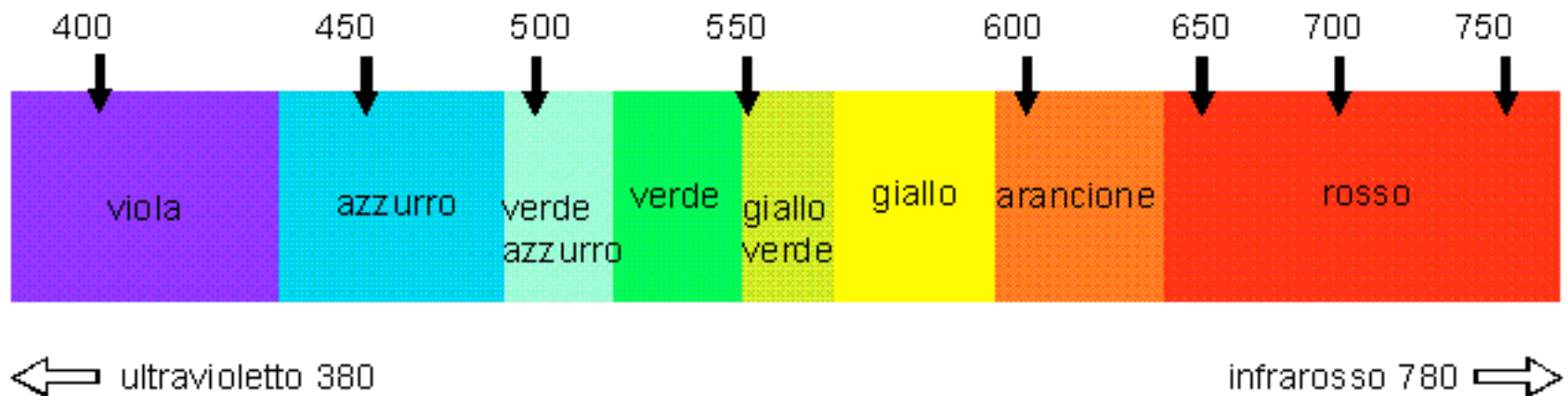
Legge di Malus

$$E_e = E_e^{(0)} \cos^2 \alpha$$

I COLORI E LUNGHEZZA D'ONDA

L'apparato di Young (interferenza), la fenditura di diffrazione e il reticolo di diffrazione sono strumenti di misura che permettono di verificare che:

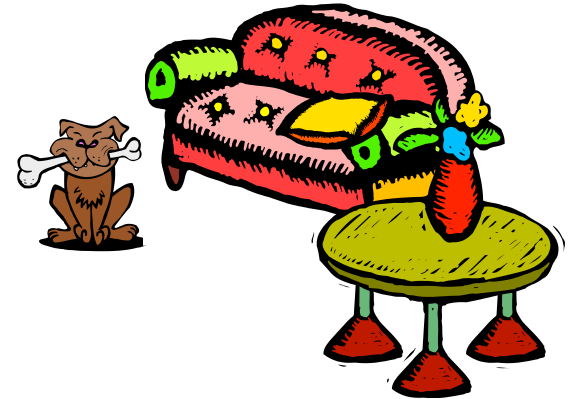
A ciascun colore della luce corrisponde una particolare lunghezza d'onda (o frequenza) dell'onda luminosa.



Perché vediamo gli oggetti?

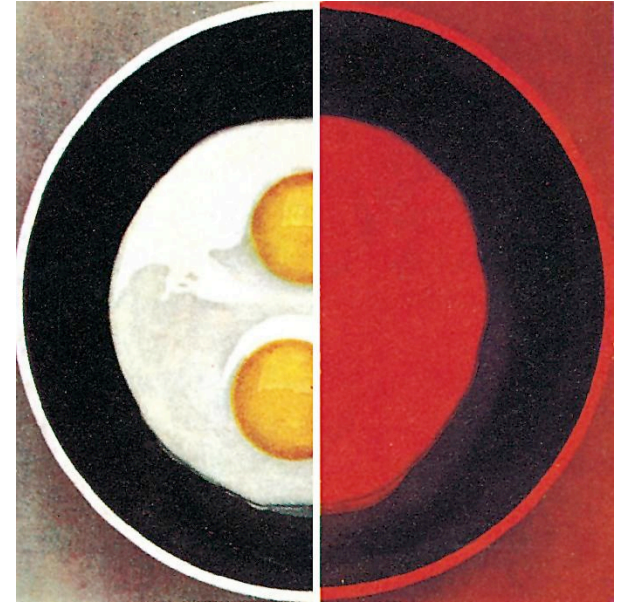
Noi vediamo gli oggetti perché da essi partono radiazioni luminose che giungono al nostro occhio

Una **SORGENTE LUMINOSA** emette luce propria, mentre gli **OGGETTI ILLUMINATI** diffondono in tutte le direzioni la luce da cui vengono investiti.



Perché hanno colori diversi?

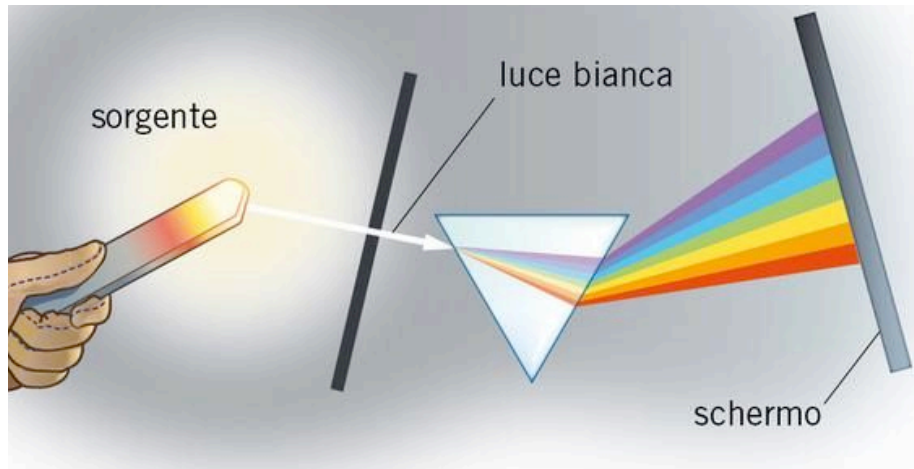
Perché quando gli oggetti sono investiti da luce bianca, come quella del Sole o di una lampadina, assorbono alcuni colori e ne diffondono altri.



Quindi:

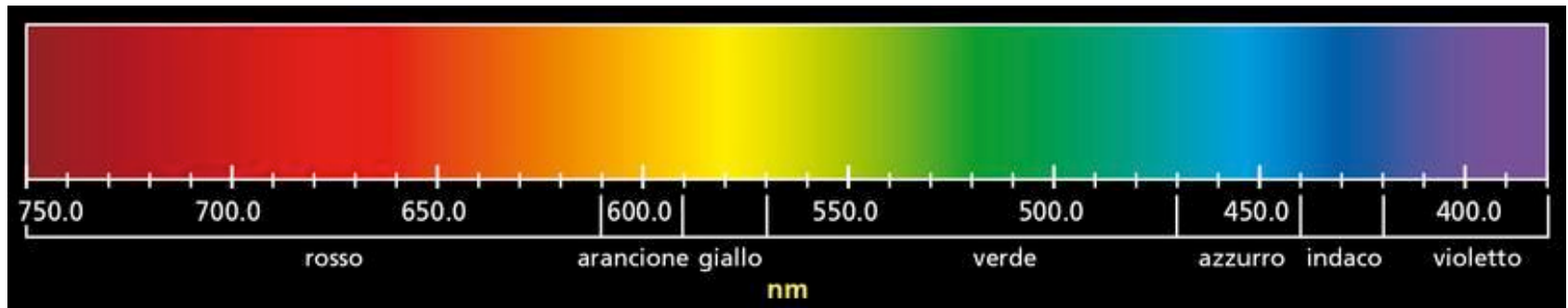
Il colore non è una proprietà tipica di un oggetto, ma dipende dalla luce che lo colpisce.

L'EMISSIONE E L'ASSORBIMENTO DELLA LUCE



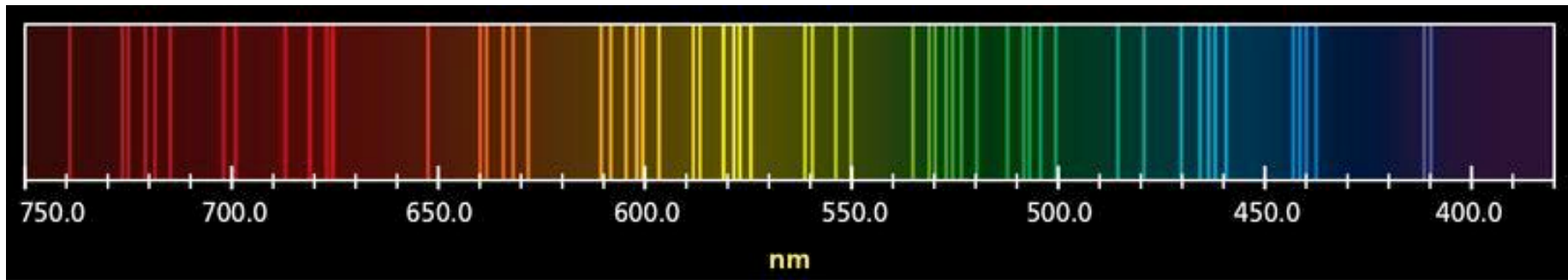
Utilizzando un prisma o un reticolo di diffrazione, si possono ottenere gli spettri di varie sorgenti luminose.

I corpi solidi o liquidi portati all'incandescenza, emettono uno **spettro continuo**, che appare come una striscia luminosa continua di vari colori.



Lo spettro continuo contiene radiazioni elettromagnetiche visibili di tutte le lunghezze d'onda.

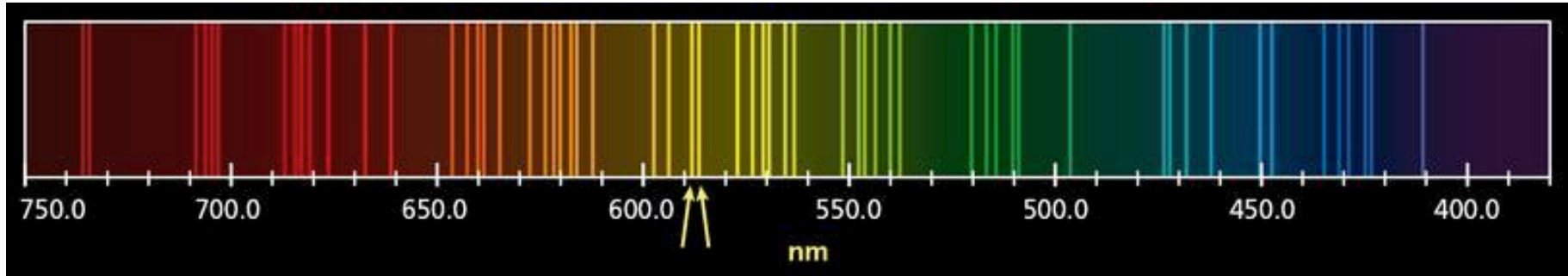
Le sostanze gassose ad alta temperatura o attraversate da una corrente elettrica, emettono uno **spettro di righe**, che appare come un insieme di righe brillanti e separate.



Ogni riga è un'immagine della fenditura di selezione da cui è passata la luce prima di essere scomposta dal prisma o dal reticolo. Quindi:

Una sostanza gassosa emette soltanto alcune lunghezze d'onda.

Gli spettri di righe emessi da gas monoatomici sono caratteristici del particolare elemento chimico di cui il gas è costituito

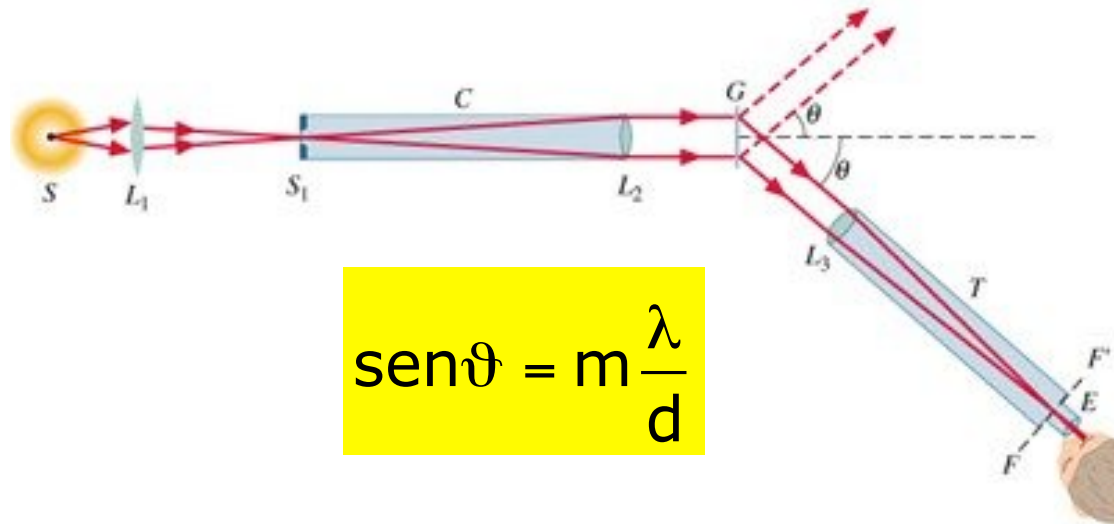


Questo è lo spettro di emissione del sodio (Na). Tra le varie righe emesse, si notano due righe gialle brillanti molto vicine (doppietto del sodio). Pertanto, quando in uno spettro di emissione si osserva questo doppietto, si è sicuri che il corpo luminoso contiene sodio.

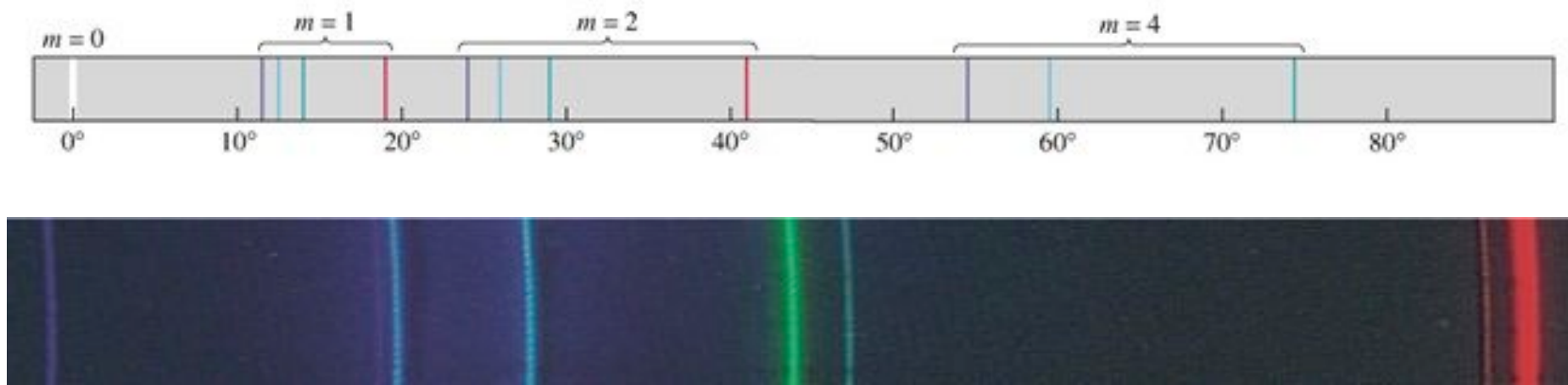
Dall'osservazione di uno spettro di righe si può risalire all'elemento che lo ha emesso.

Applicazione: spettroscopio

Dall'analisi della luce proveniente da corpi lontani, come il Sole e le stelle, grazie allo spettroscopio, è possibile individuare gli elementi chimici in essi presenti.



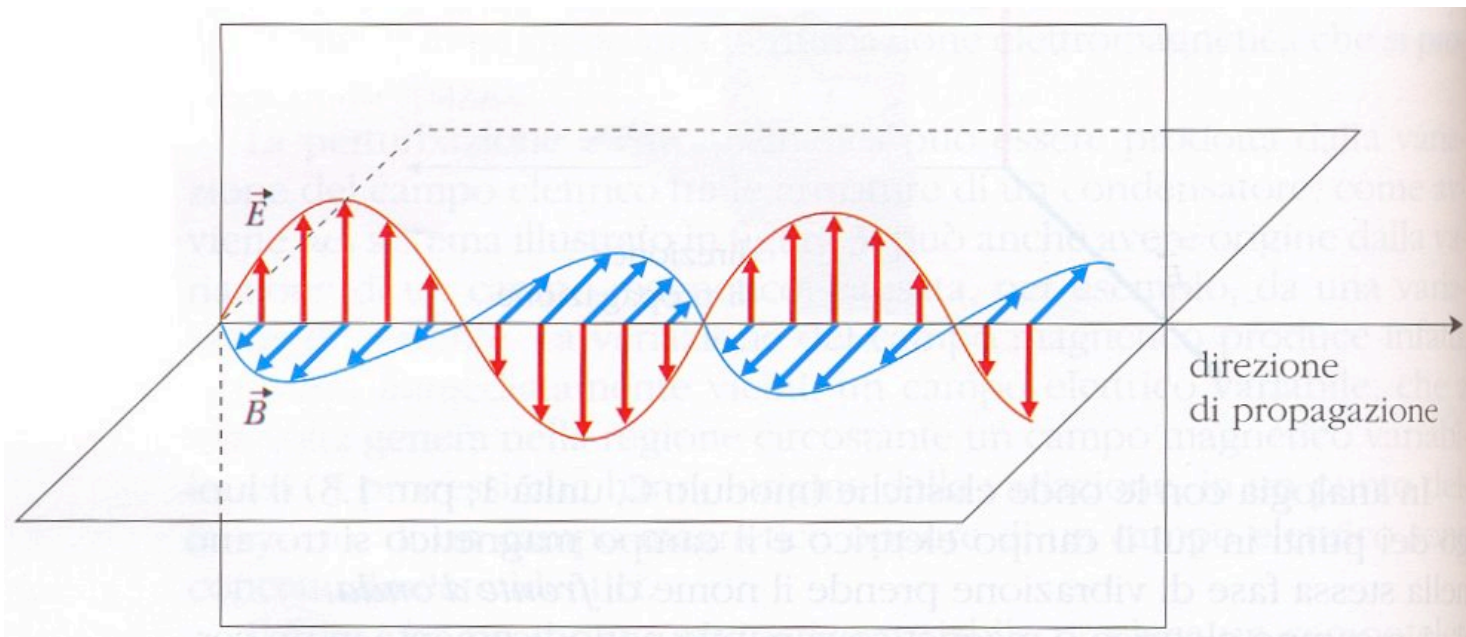
Lo spettroscopio a reticolo permette di osservare l'intensità delle righe spettrali che escono dal reticolo G colpito dalla luce della sorgente S (per esempio una stella) focalizzata attraverso le lenti L_1 e L_2 e la fenditura S_1 , orientando il telescopio (variando l'angolo ϑ).



La riga spettrale osservata quando $\theta=0^\circ$ contiene tutte le lunghezze d'onda. A causa della dispersione (capacità del reticolo di distinguere due lunghezze d'onda molto vicine tra loro), i massimi di ordine m successivo delle varie righe spettrali si osservano a posizioni angolari θ_m distinte.

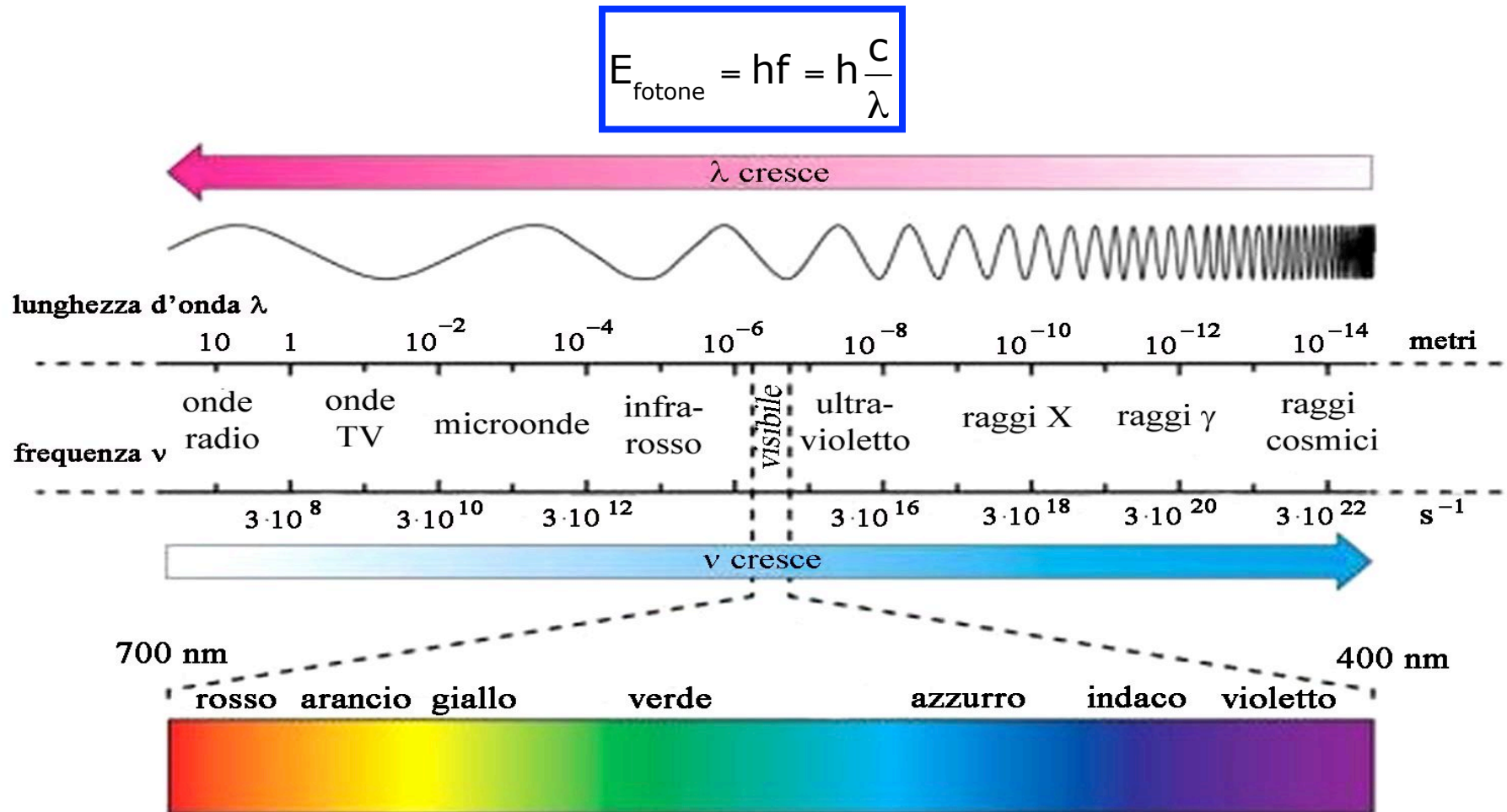
LO SPETTRO ELETRROMAGNETICO

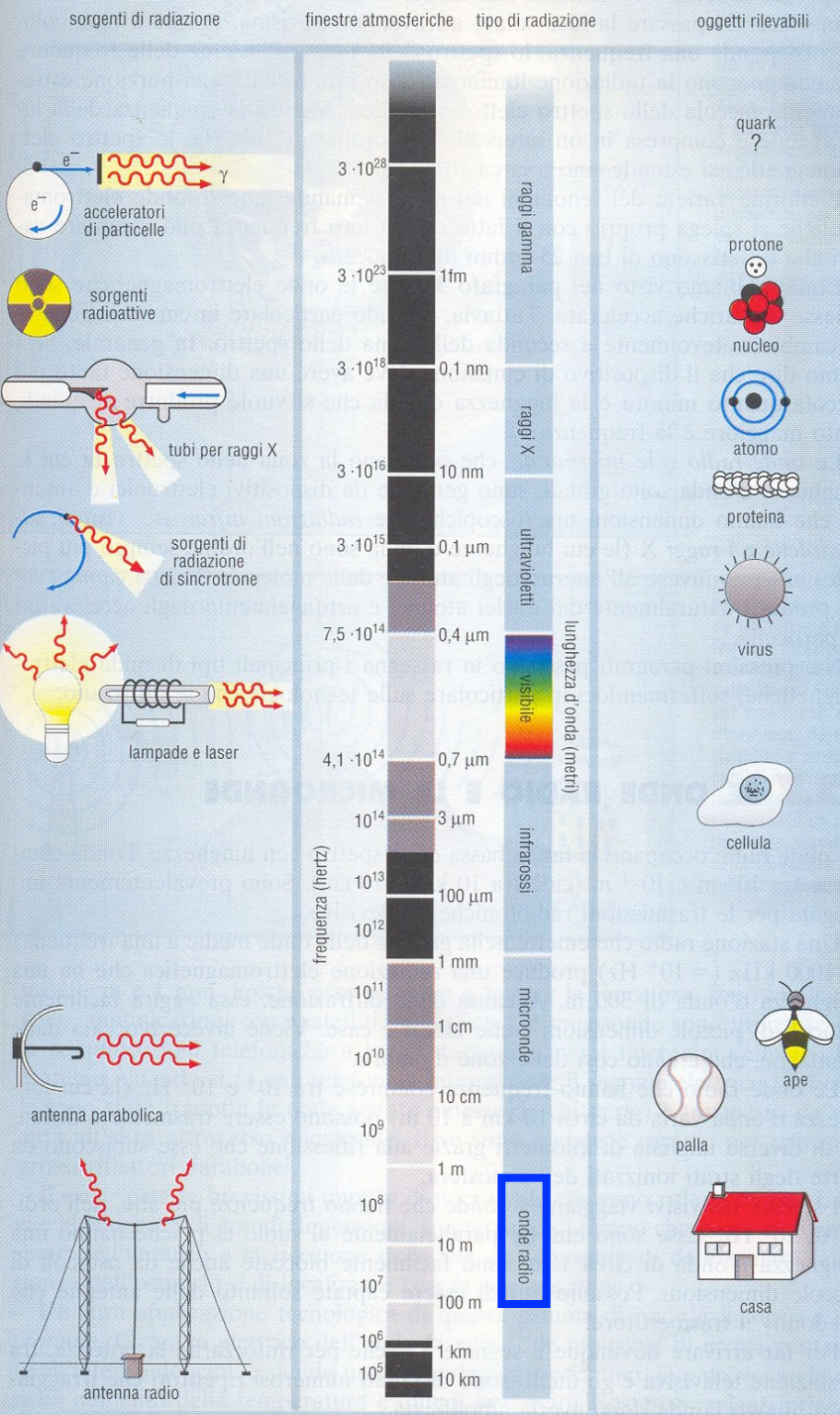
La luce, i raggi X, le onde radio, ecc., sono tutte onde elettromagnetiche (onde trasversali), ossia consistono in vibrazioni dei campi elettrico e magnetico che si propagano nello spazio alla velocità c trasportando energia dal punto in cui sono prodotte al punto in cui sono assorbite.



Le onde elettromagnetiche si distinguono per la frequenza (o la lunghezza d'onda).

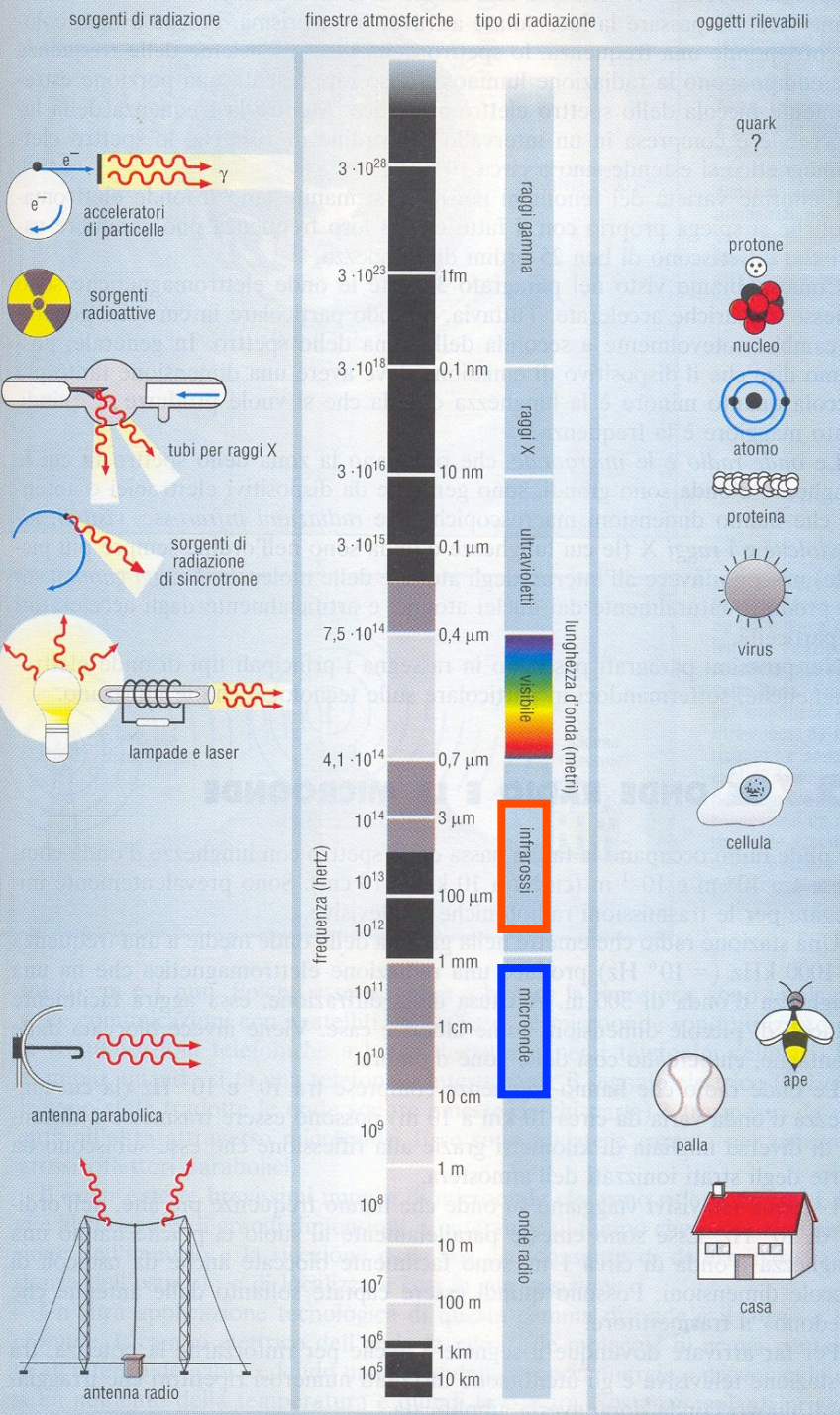
L'insieme delle onde elettromagnetiche costituisce lo
spettro elettromagnetico





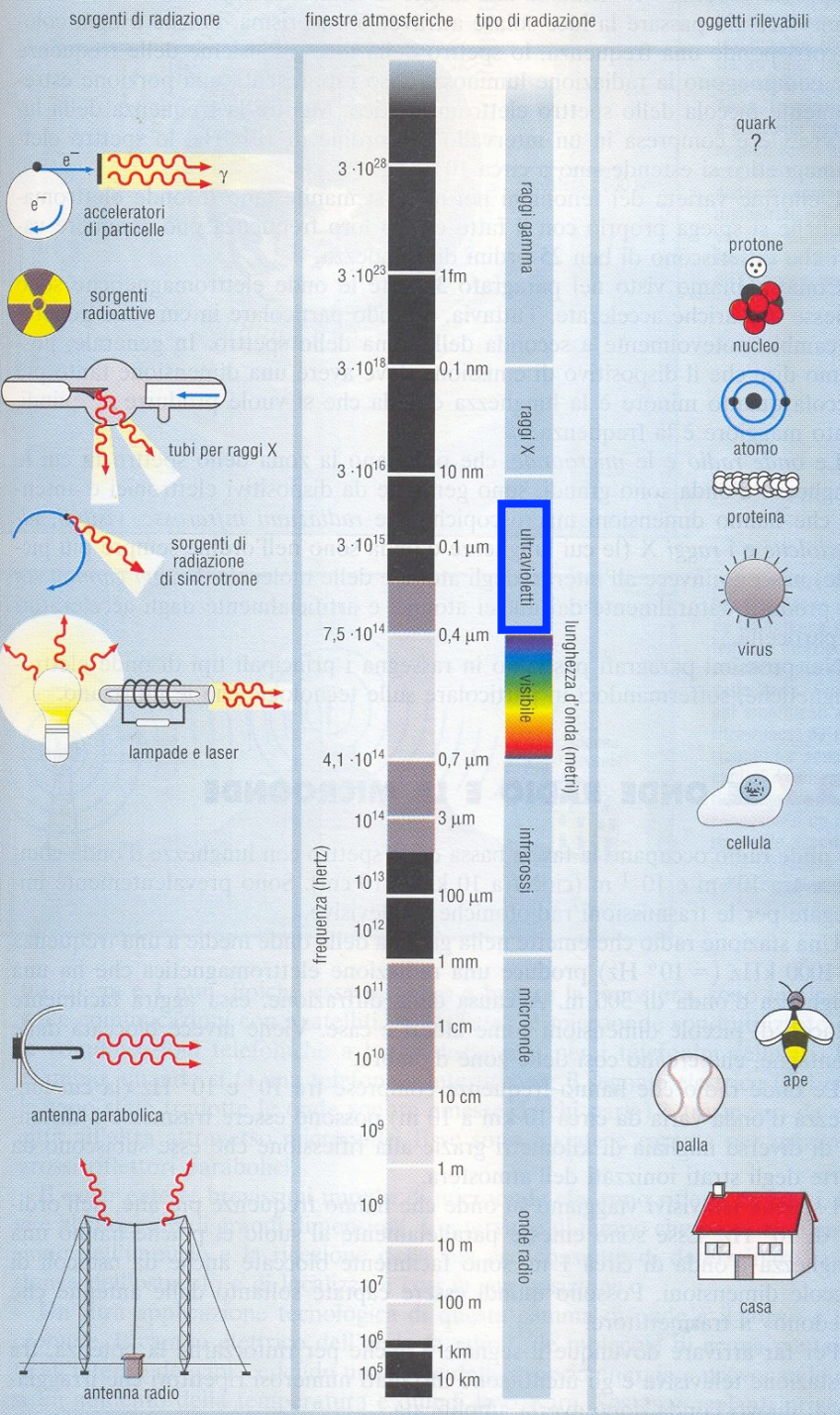
Caratteristiche principali di alcune componenti dello spettro elettromagnetico

ONDE RADIO ($\lambda = 10^4 - 10^{-1} \text{ m}$): generate da dispositivi elettronici e antenne. Prevalentemente impiegate per le trasmissioni radiofoniche e televisive. Le onde radio possono essere trasmesse a distanza di migliaia di chilometri grazie alla riflessione che esse subiscono da parte degli strati ionizzati dell'atmosfera.



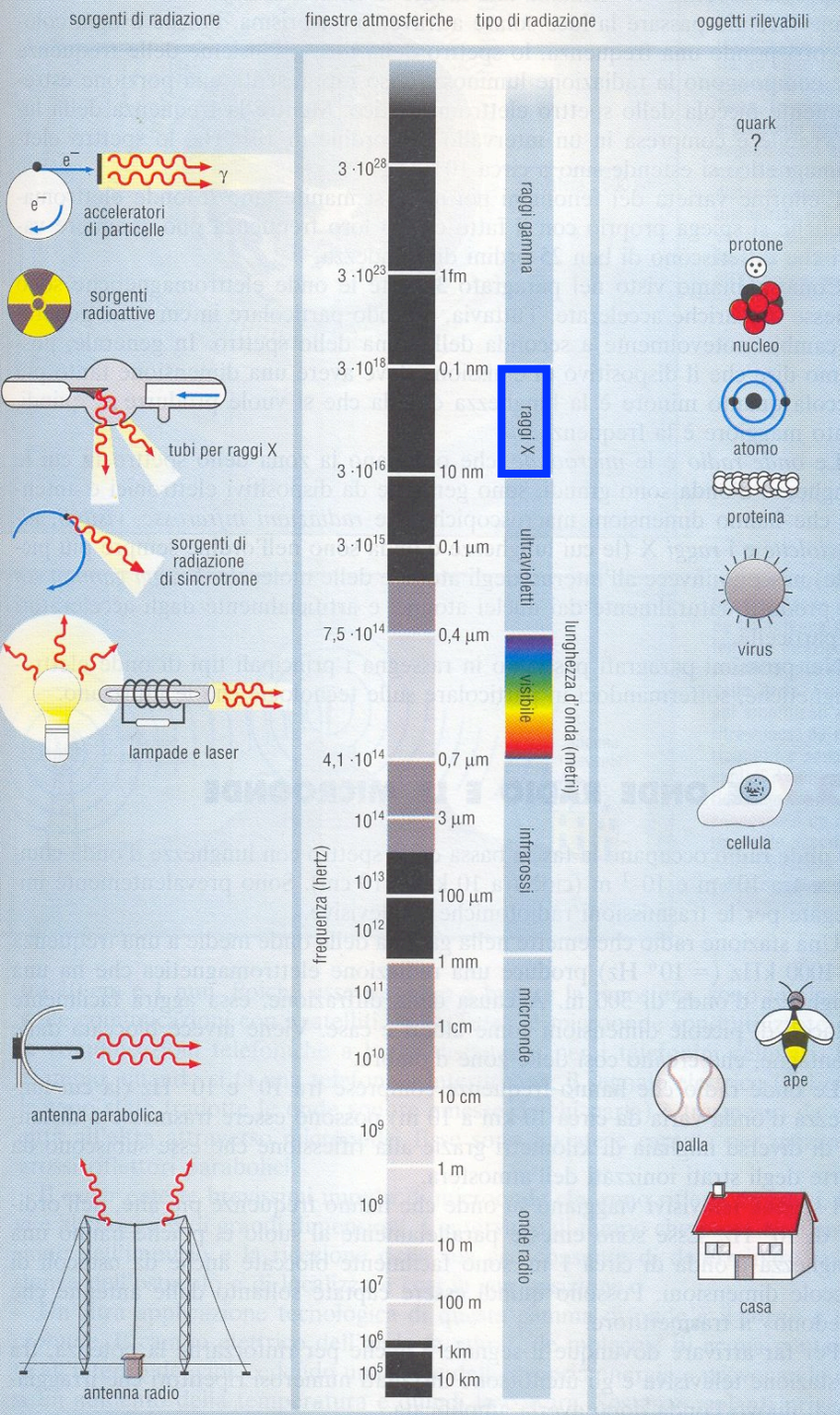
MICROONDE ($\lambda = 10^{-1} - 10^{-3}$ m): poiché riescono a "bucare" la ionosfera, sono impiegate nelle comunicazioni con i satelliti; mentre, sulla Terra, vengono utilizzate per le comunicazioni telefoniche a lunga distanza. Altre applicazioni sono il radar, il forno a microonde, ecc.

RAGGI INFRAROSSI ($\lambda = 10^{-3} - 10^{-6}$ m): nascono all'interno degli atomi e molecole e sono emessi dai corpi caldi. Vengono utilizzati per fare delle fotografie all'infrarosso.

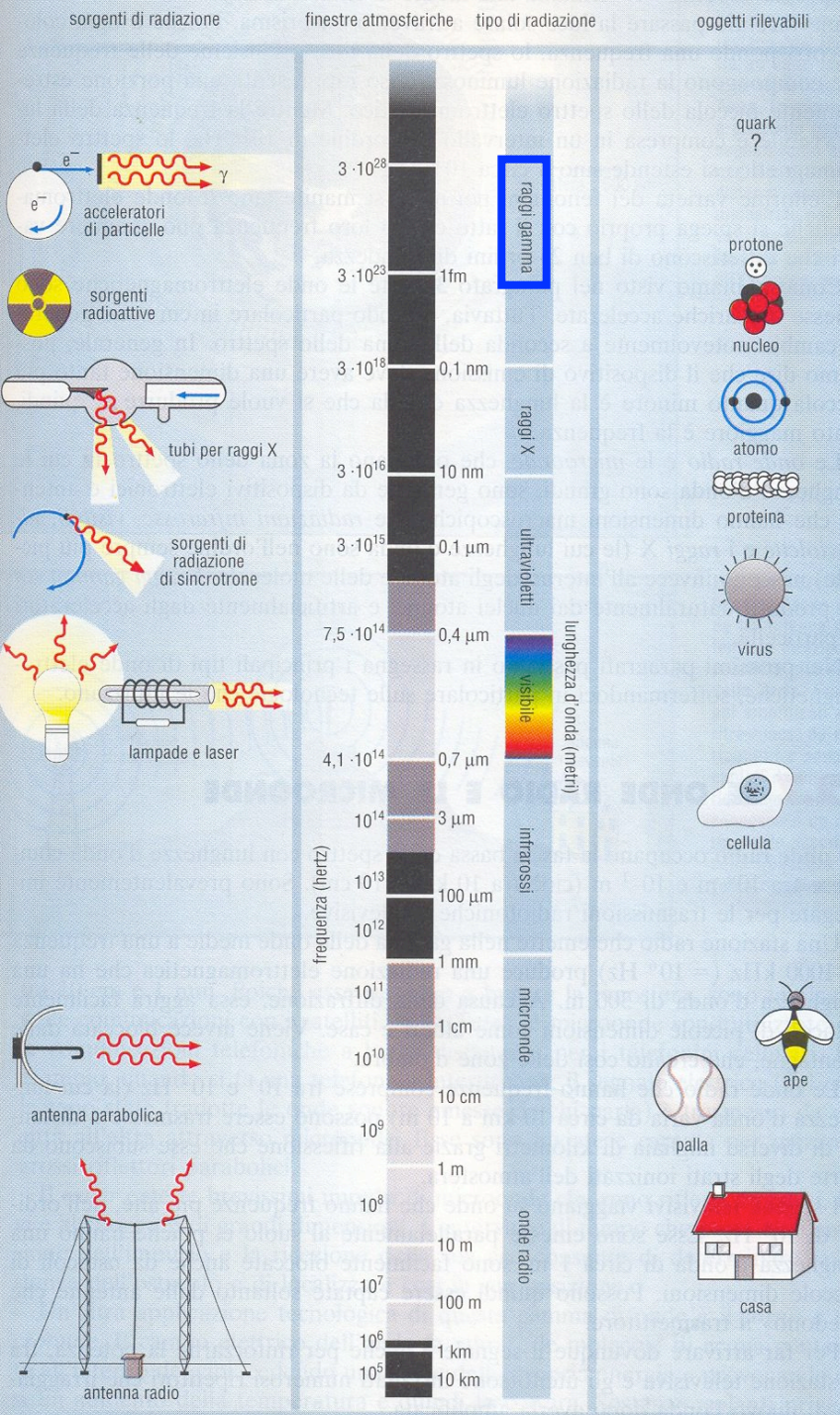


RADIAZIONE VISIBILE ($\lambda=400-700 \text{ nm}$): onde elettromagnetiche che percepiamo sotto forma di luce.

RADIAZIONI ULTRAVIOLETTE ($\lambda=4 \cdot 10^{-4} - 10^{-9} \text{ m}$): hanno origine all'interno di atomi e molecole. Hanno la proprietà di favorire diverse reazioni chimiche, come quella nelle quali si forma l'ozono negli strati alti dell'atmosfera.



RAGGI X ($\lambda=10^{-8}-10^{-11}\text{m}$): hanno origine all'interno degli atomi. Hanno la proprietà, data la loro piccola lunghezza d'onda, di penetrare all'interno della materia e consentono di evidenziare strutture nascoste. Nella radiografia i raggi X passano attraverso la carne come se fosse trasparente, ma sono assorbiti dalle ossa che contengono calcio (numero atomico Z elevato) con cui i raggi X interagiscono maggiormente.



RAGGI GAMMA ($\lambda < 10^{-12}$ m): sono emessi da nuclei atomici radioattivi o da elettroni di alta energia frenati nella materia. Essi accompagnano le trasformazioni radioattive e le reazioni nucleari. Sono radiazioni molto penetranti e hanno una grande capacità di ionizzare gli atomi e possono essere pericolosi per gli esseri viventi. Questi raggi vengono utilizzati per la radioterapia dei tumori, per la sterilizzazione degli strumenti, ed in generale per la ricerca scientifica.