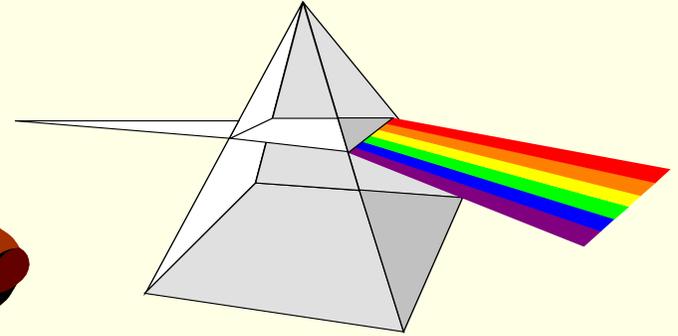


Onde e ottica



➤ Onde

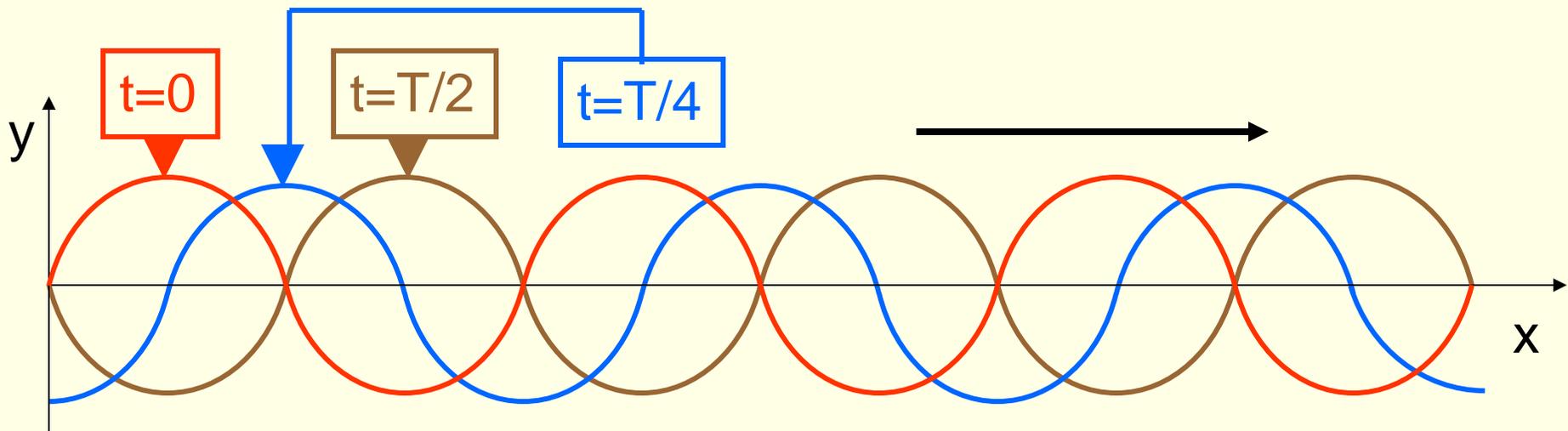
- proprietà delle onde;
- onde sonore;
- il decibel;

➤ Ottica

- la luce;
- il principio di Huygens;
- la rifrazione;
- ottica geometrica;
- riflessione e rifrazione;
- specchi, lenti, microscopi.

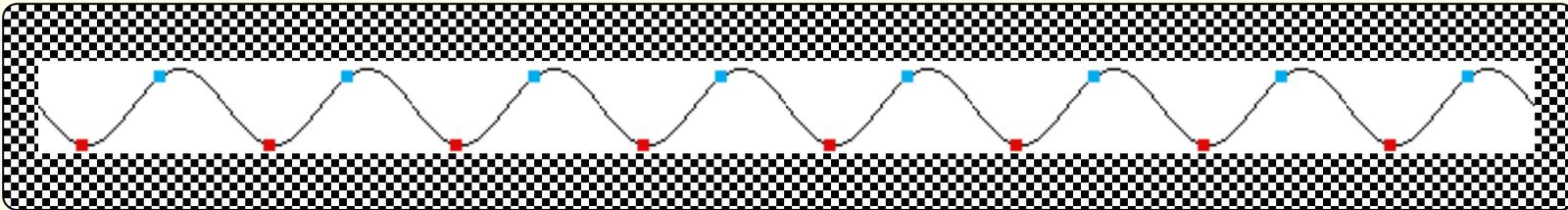
le onde

- onde del mare, corde vibranti, onde elettromagnetiche ...
- fenomeno periodico (T);
- caso semplice : onda sinusoidale in due dimensioni;
- l'onda si muove nello spazio e nel tempo.

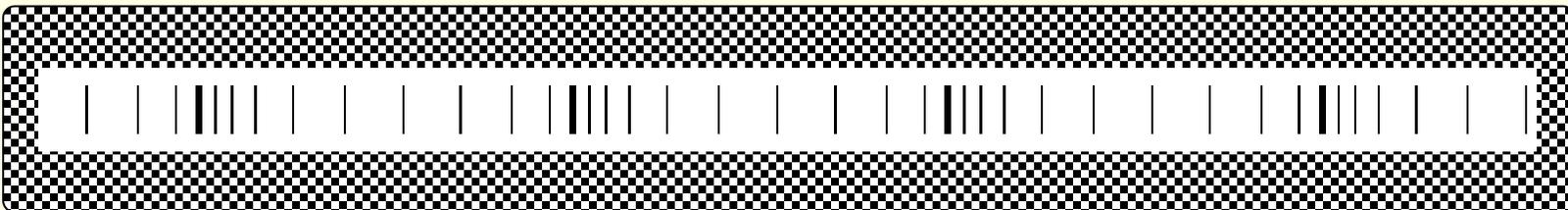


onde trasversali e longitudinali

- onde trasversali (e.g. luce, corda di violino, mare); notare la direzione di vibrazione del materiale (\updownarrow), rispetto alla direzione di propagazione dell'onda (\rightarrow):

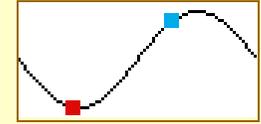


- onde longitudinali (e.g. suono, molle); notare la direzione di vibrazione del materiale (\leftrightarrow), rispetto alla direzione di propagazione dell'onda (\rightarrow):

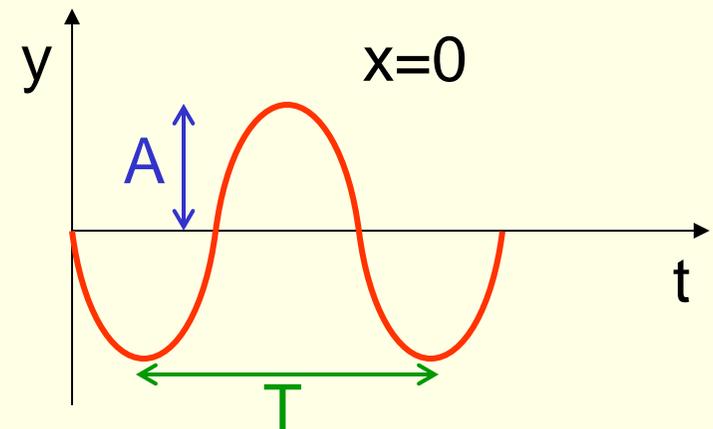
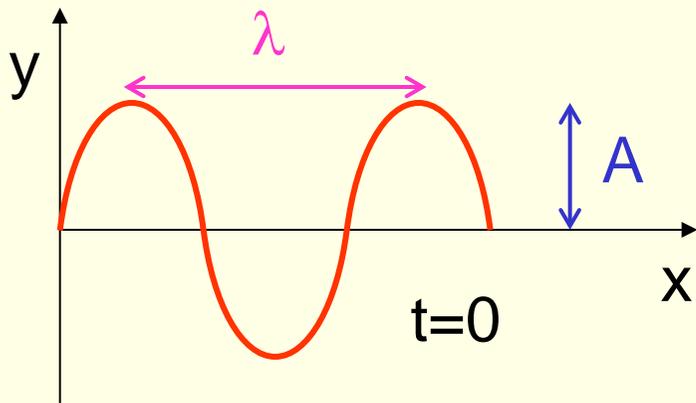
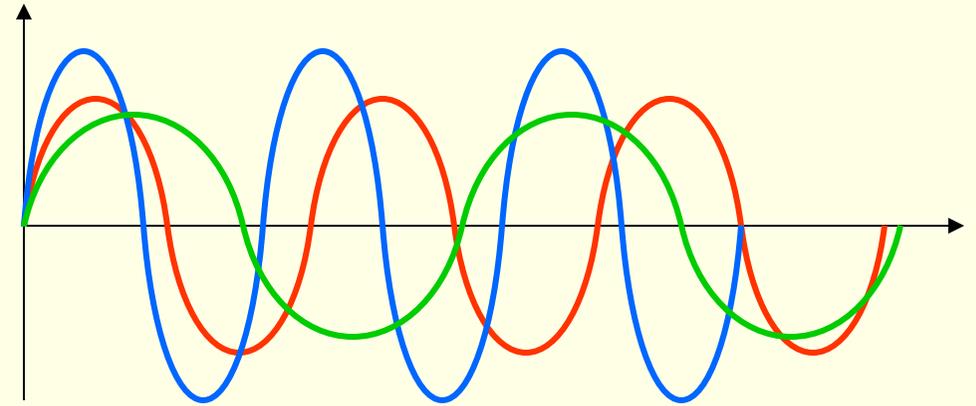


[figure da <http://www.ncat.edu/~gpil/>]

parametri delle onde

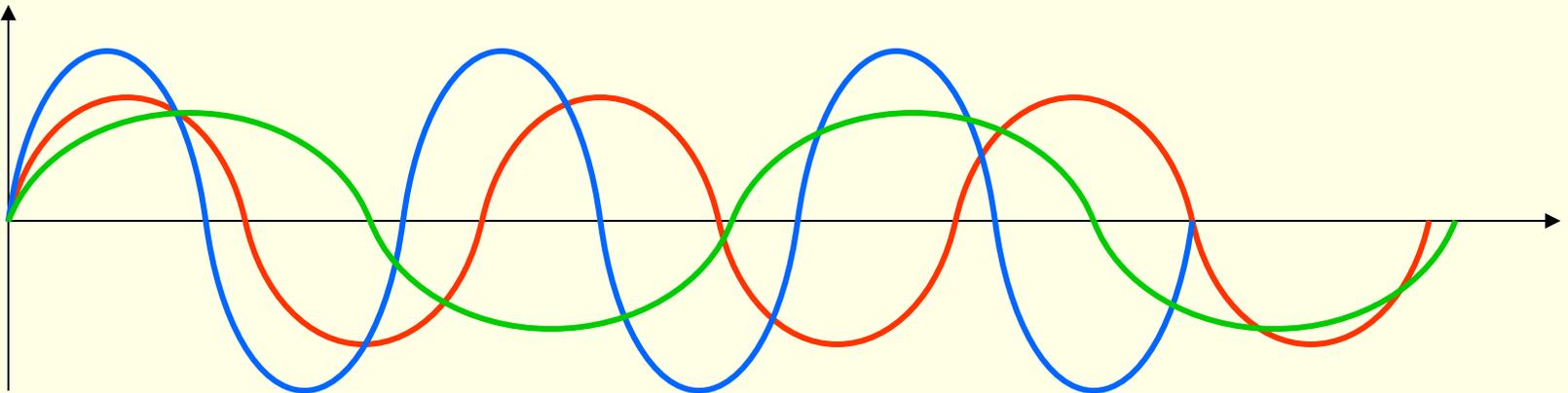


- $y(x,t) = A \sin(kx - \omega t) = A \sin(2\pi x/\lambda - 2\pi t/T)$;
- ampiezza A ;
- periodo $T = 2\pi / \omega$;
- lunghezza d'onda $\lambda = 2\pi / k$.



velocità delle onde

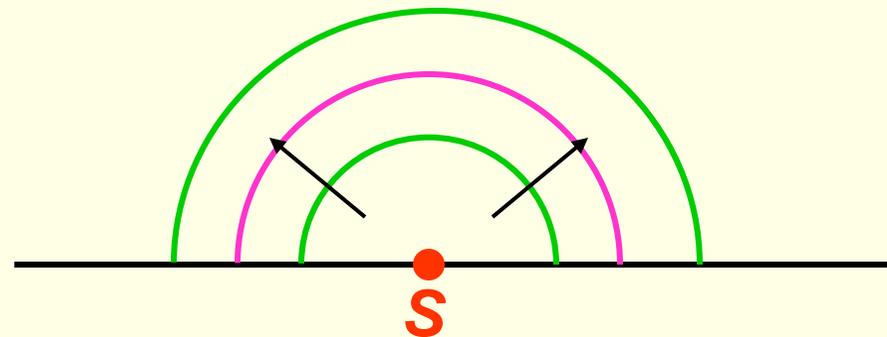
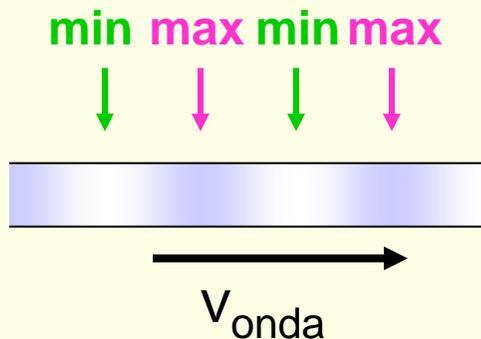
- [attenzione al significato di “velocità”] ;
- in un tempo T [= periodo] una cresta si sposta di una distanza λ [= lunghezza d'onda];
- più in generale, v si calcola da : $kx - \omega t = \text{costante}$;
- $v = \Delta x / \Delta t = \lambda / T = \omega / k = \lambda v$;



il suono



- le onde sonore sono “longitudinali”;
- il mezzo vibrante è il materiale interposto tra la sorgente (ex. violino) e il ricevitore (ex. orecchio) : ex. aria;
- il metodo elementare di propagazione sono gli urti tra le molecole del mezzo;
- il mezzo, in media, non si muove;
- i fronti d'onda sono sfere centrate nella sorgente.



misura del suono : il decibel

- la sorgente emette suoni con potenza W_S ;
- un ricevitore a distanza r , di superficie S , riceve una potenza $W_R = W_S \times S / (4 \pi r^2)$;
- si definisce “intensità sonora” $I = W_R / S = W_S / (4 \pi r^2)$;
- l'intensità sonora si misura in Watt / m²;
- altro modo di misurare (più usato) :

$$\beta = \log_{10}(I / I_0) \text{ [="bel"]};$$

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W / m}^2 = \text{intensità minima udibile};$$

$$\text{intensità in decibel (dB)} = 10 \times \beta = 10 \log_{10}(I / I_0).$$

le onde elettromagnetiche

[trattazione qualitativa, si può dimostrare dalle eq. di Maxwell]

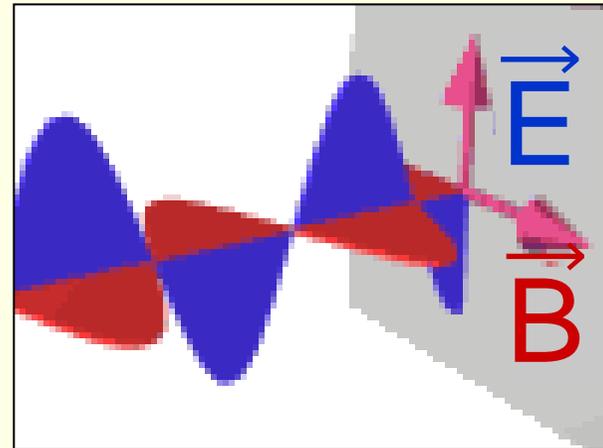
- le onde e.m. sono onde trasversali del campo e.m. ;
- la loro velocità nel vuoto è costante [$c=3\times 10^8$ m/s] ;
- $c = 1 / \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$;
- “costante” significa indipendente da :
 - proprietà delle onde (frequenza, lunghezza d'onda, ampiezza);
 - sistema di riferimento della misura (¿?) → relatività speciale;
- pertanto, per un'onda e.m. nel vuoto :

$$\lambda \nu = c,$$

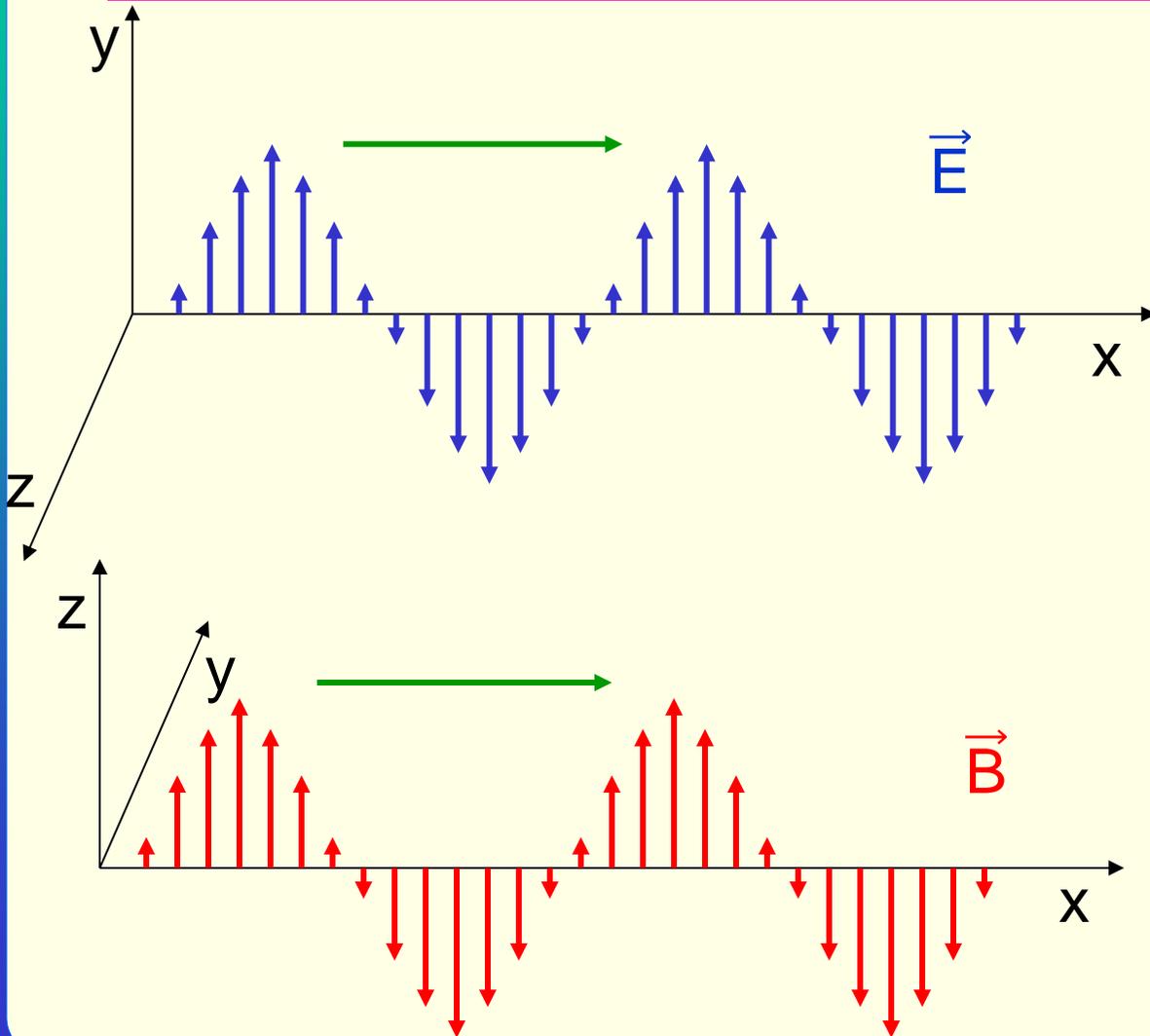
i.e. lunghezza d'onda e frequenza non sono indipendenti, $\lambda = c / \nu$, $\nu = c / \lambda$.

propagazione di un'onda e.m.

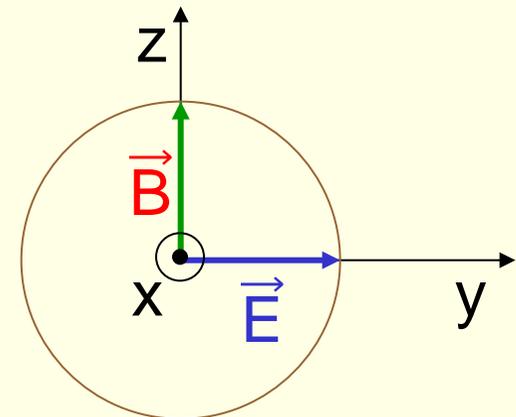
- x : propagazione dell'onda;
- y : campo elettrico \vec{E} ;
- z : campo magnetico \vec{B} .



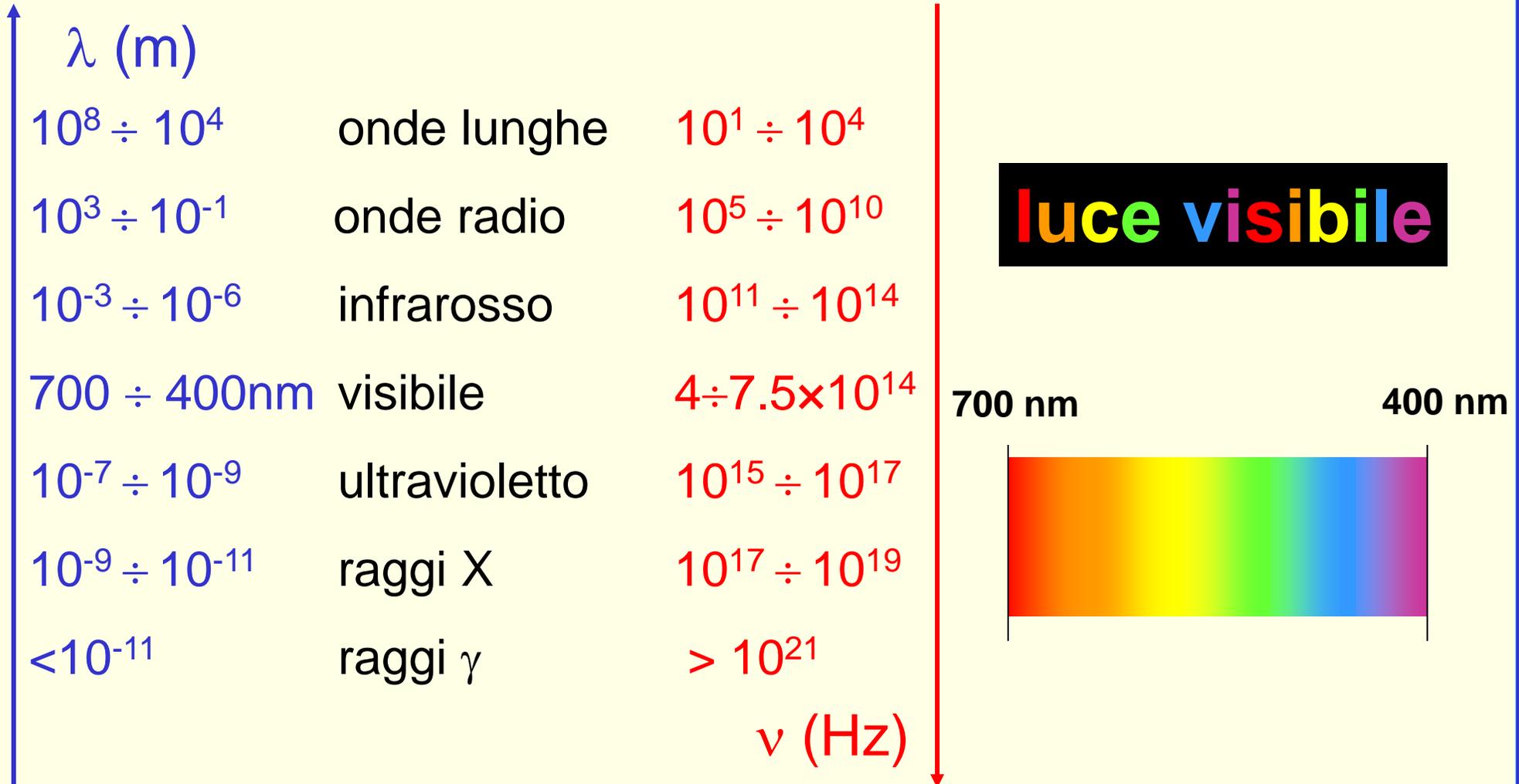
proprietà delle onde e.m.



- x : propagazione dell'onda;
- y : campo elettrico \vec{E} ;
- z : campo magnetico \vec{B} .



la luce



i colori

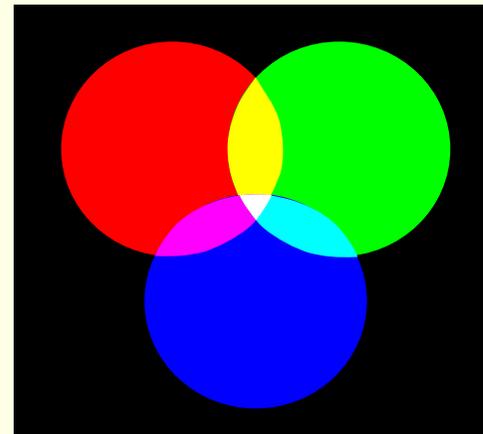
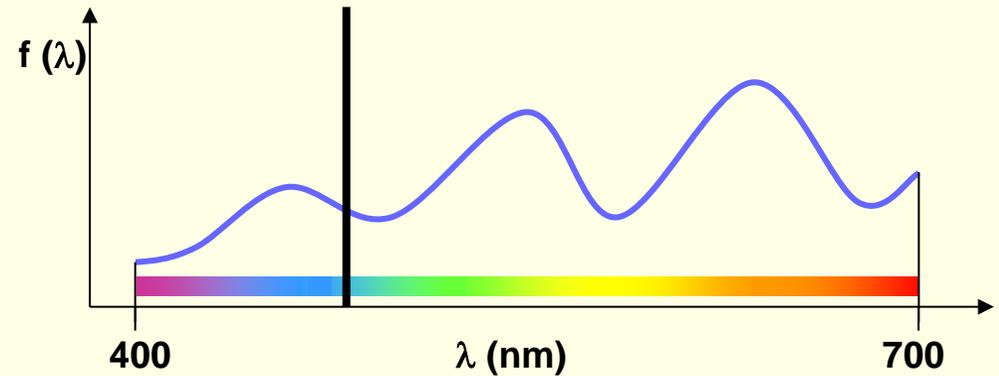
apparente contraddizione :

➤ in ottica fisica (“colore ottico”) :

- un colore puro è un’onda luminosa di frequenza e lunghezza data (λ);
- un colore composto è una mistura di colori puri, cioè una sovrapposizione di onde di frequenza differente (—);

➤ per gli uomini (“colore percepito”) :

- tutto lo spettro può essere riprodotto con tre colori primari;
- RGB (televisore);
- CMY (fotografia).



percezione del colore

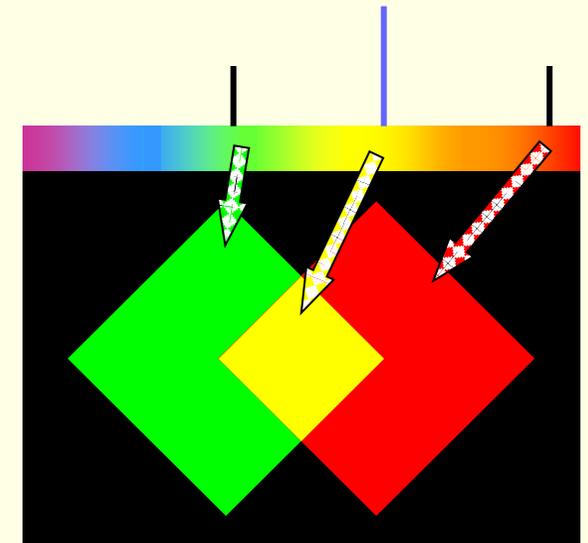
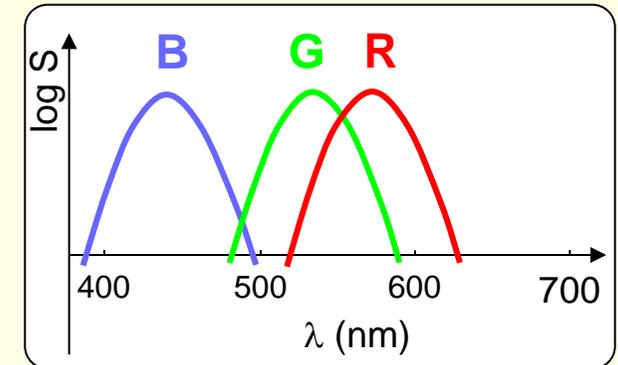
la soluzione è un misto di fisiologia e ottica :

- nella retina il “colore” è rivelato da sensori (**coni**) di tre tipi (**R G B**), con curve di sensibilità (**S**) differenti;
- il colore è ricostruito a livello di percezione;

pertanto :

→ cd. teoria di
Helmholtz - Young

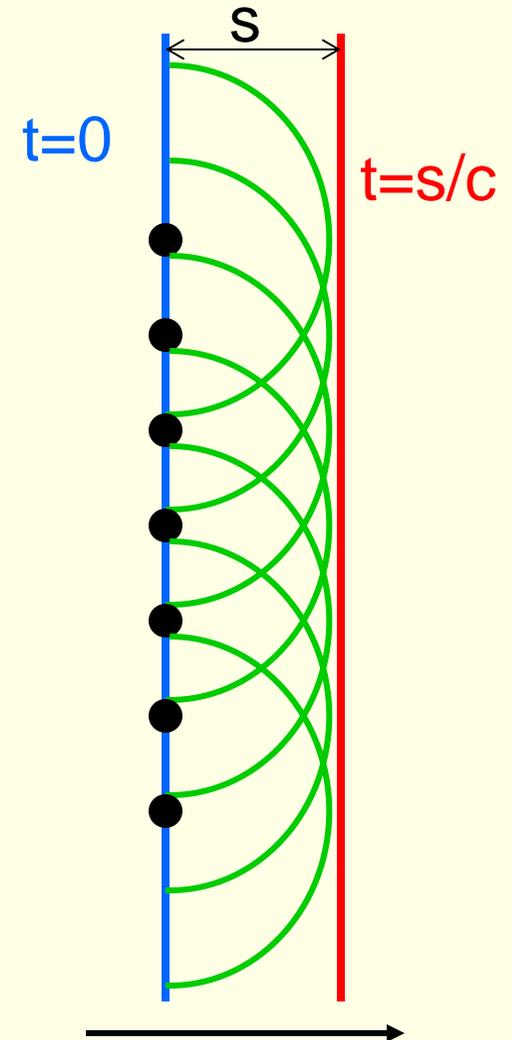
- bisogna distinguere tra colore ottico e colore percepito;
- **molti** [più esattamente, ∞] **colori ottici** \leftrightarrow **stesso colore percepito** [e.g. $\frac{1}{2}$ rosso + $\frac{1}{2}$ verde = giallo].



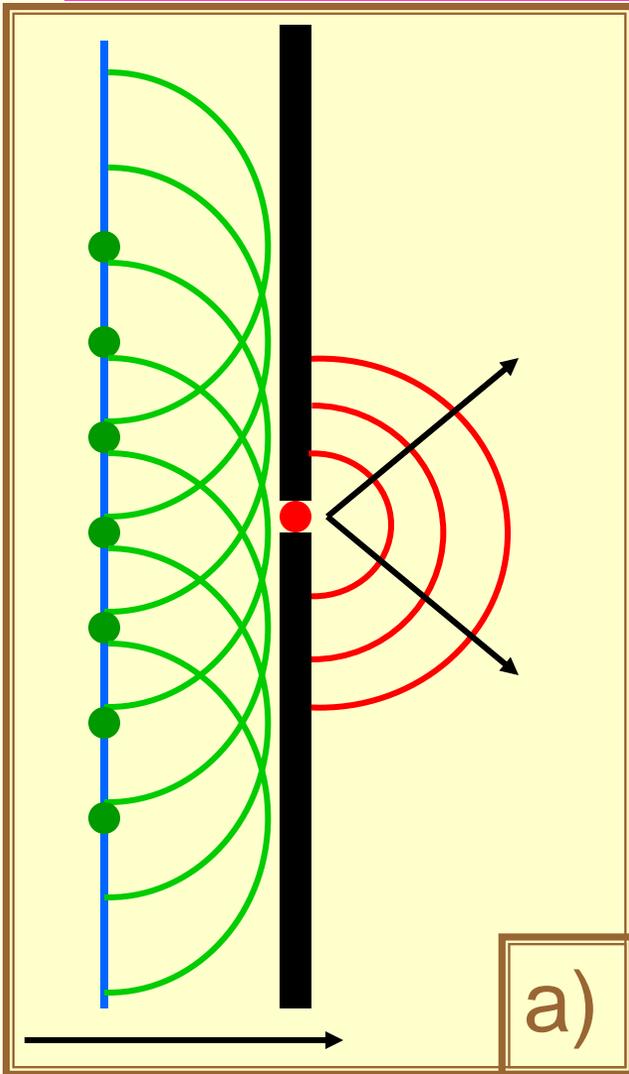
principio di Huygens

principio di Huygens

“la luce si propaga con onde sferiche. Tutti i punti sulla superficie di un fronte d'onda si comportano come sorgenti puntiformi di un nuovo fronte d'onda sferico. L'onda totale è data dall'inviluppo delle onde elementari”.

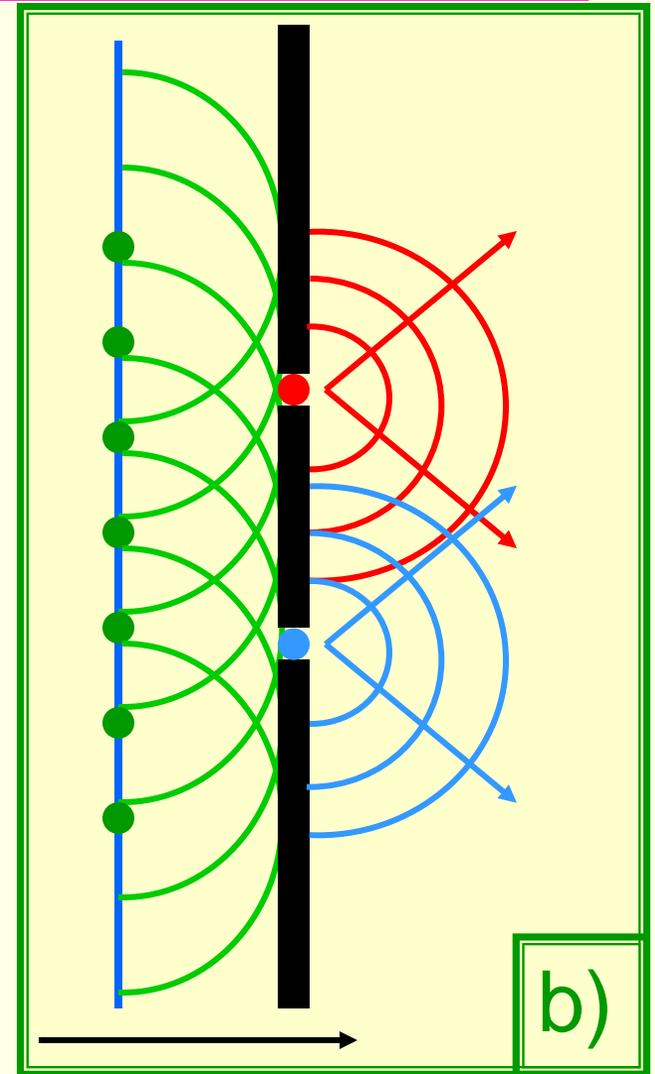


principio di Huygens - fenditure



➤ caso (a) : una fenditura, onda sferica;

➤ caso b) : due fenditure, due onde sferiche, interferenza.



indice di rifrazione

- la velocità v della luce nei mezzi è minore di quella nel vuoto;

- definiamo l'indice di rifrazione n :

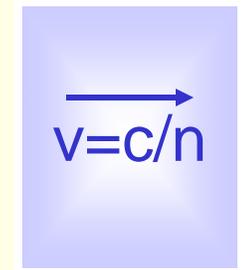
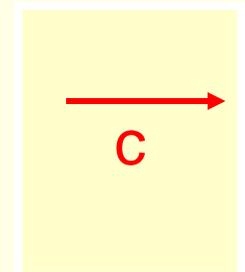
$$n = c / v$$

- se $v \leq c$:

$$1 \leq n \leq \infty$$

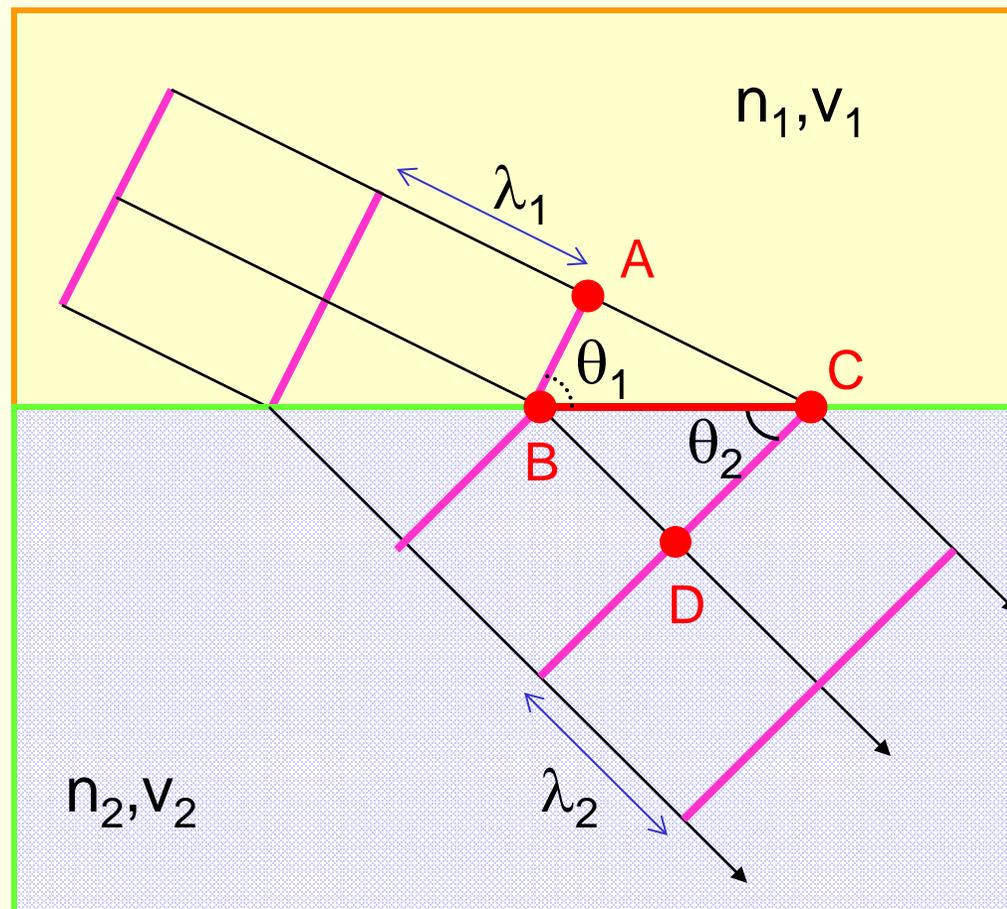
- n dipende da :

- proprietà del mezzo;
- [quasi indipendente dalle] proprietà della luce (λ).



rifrazione

- note le proprietà dei mezzi $[n_1, n_2, v_1=c/n_1, v_2=c/n_2]$ e le proprietà del raggio incidente $[\lambda_1, \theta_1]$, trovare le proprietà del raggio rifratto $[\lambda_2, \theta_2]$;
- $\Delta t_1 = \lambda_1 / v_1 = \Delta t_2 = \lambda_2 / v_2 \rightarrow$
 $\rightarrow \lambda_1 / \lambda_2 = v_1 / v_2$;
- triangoli BAC e BDC :
 $BC = \lambda_1 / \sin \theta_1 = \lambda_2 / \sin \theta_2 \rightarrow$
 $\rightarrow \sin \theta_1 / \sin \theta_2 = \lambda_1 / \lambda_2$
 $= v_1 / v_2$
 $= n_2 / n_1$
[legge della rifrazione]



ottica geometrica

- approssimazioni :
 - “dimentichiamo” che la luce è un’onda e.m.;
 - assumiamo che sia data da “raggi” che si propagano in linea retta nei mezzi omogenei trasparenti;
 - alcuni mezzi sono riflettenti (= specchi) → leggi della riflessione;
 - assumiamo valida la legge della rifrazione (riformulata, vedi seguito) quando i raggi incontrano una superficie di separazione tra due mezzi trasparenti;
- ricaviamo, con “semplici” dimostrazioni geometriche, leggi valide per specchi, lenti, microscopi, occhio umano, macchine fotografiche, etc.

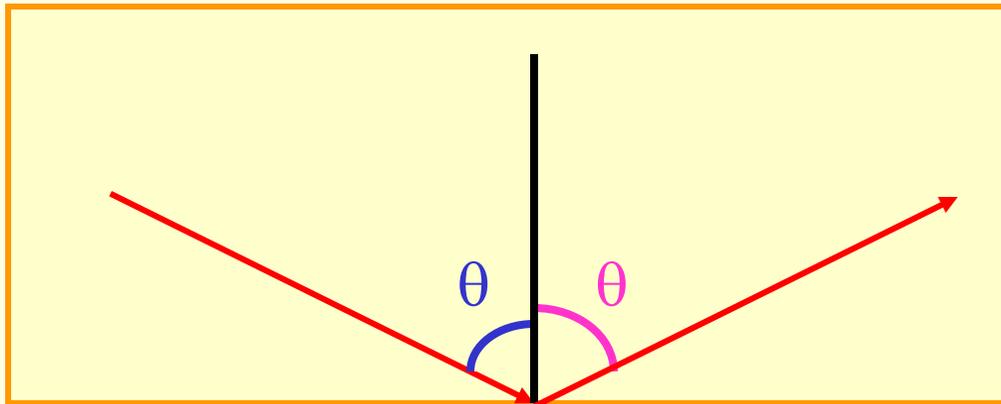
leggi della riflessione

- leggi della riflessione:

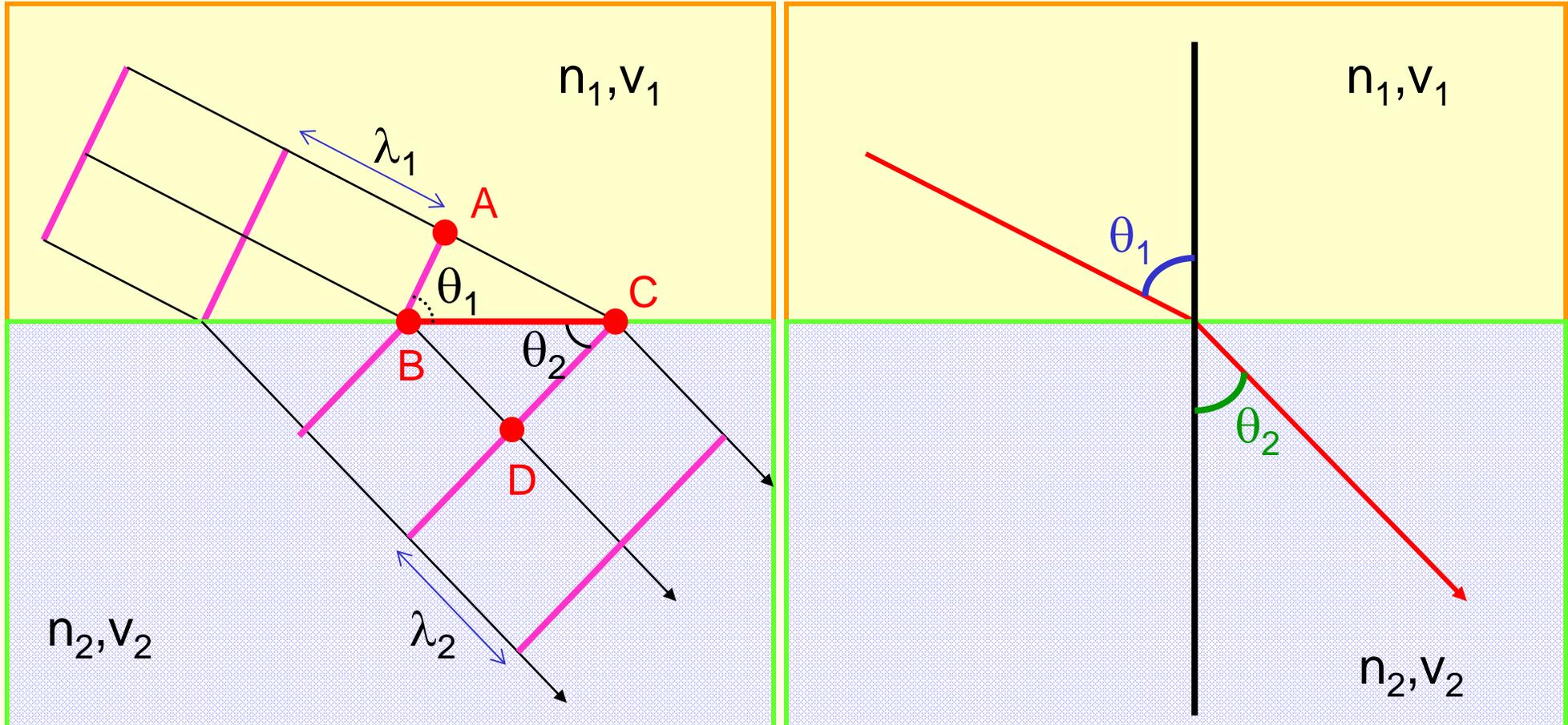
1) angolo di incidenza θ = angolo di riflessione;

2) raggio incidente, raggio riflesso e normale coplanari.

[NB se superficie riflettente non planare, si prende la normale nel punto di incidenza → ex. specchi sferici]



rifrazione in ottica geometrica



ottica ondulatoria (legge di Huygens) → ottica geometrica (legge di Snell)

leggi della rifrazione

- leggi della rifrazione (Snell-Cartesio) :

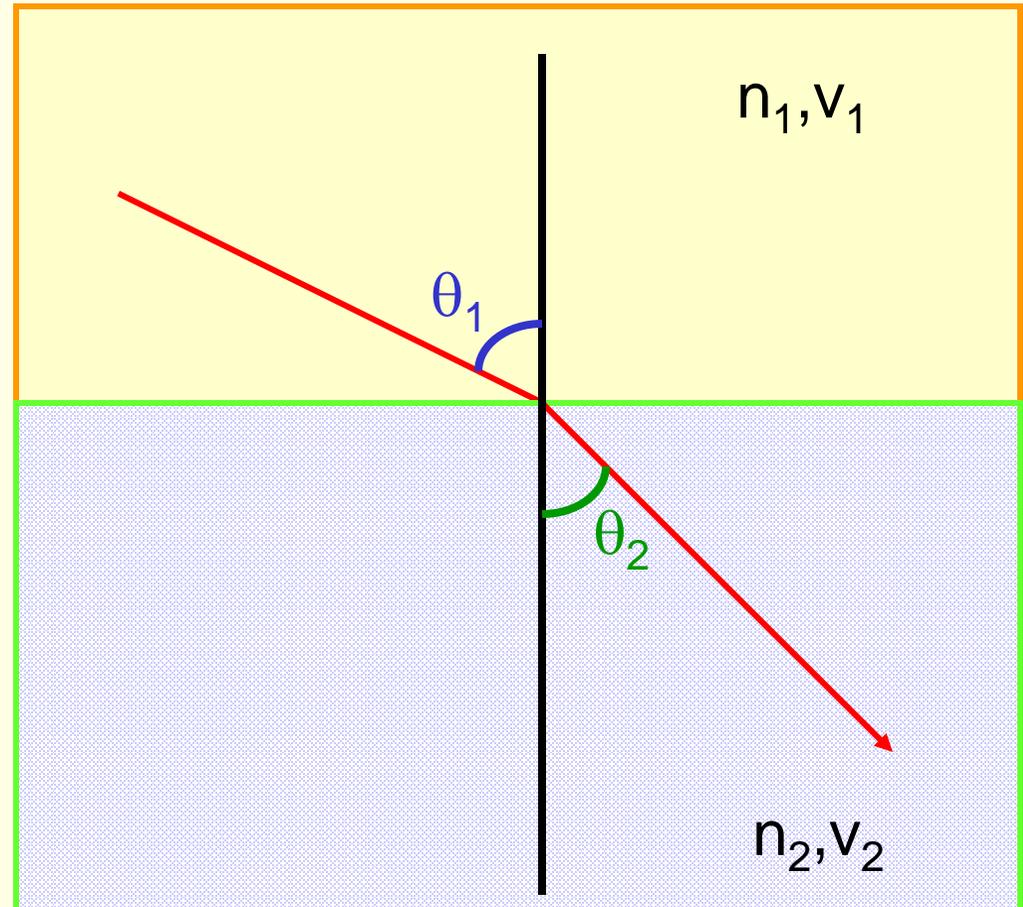
1) legge dei seni :

θ_1 = raggio inc. -normale

θ_2 = raggio refr. -normale

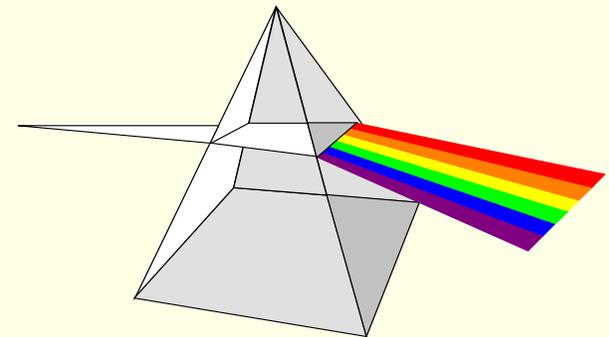
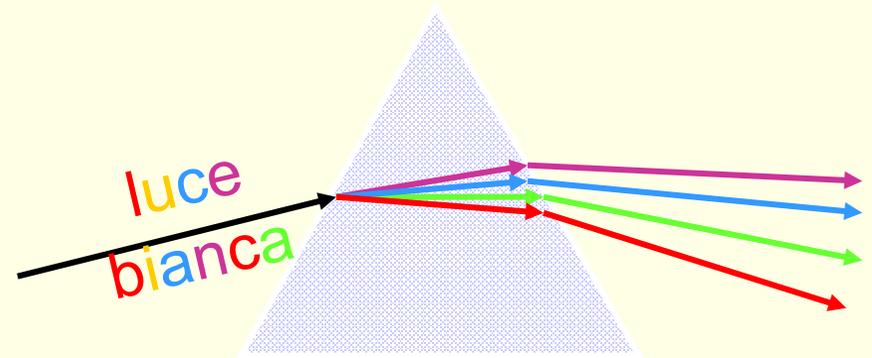
$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1;$$

- ## 2) raggio inc., raggio refr., normale sono coplanari.



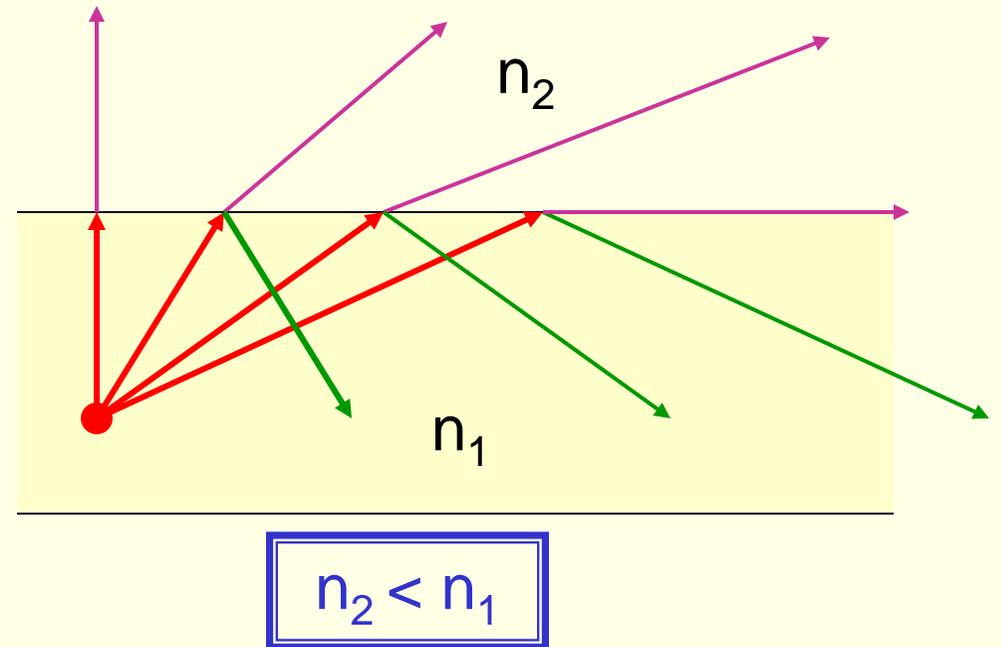
il prisma

- n dipende (un poco) da λ
- ex. quarzo :
 - $n(\lambda=400 \text{ nm}) = 1.52$;
 - $n(\lambda=500 \text{ nm}) = 1.51$;
 - $n(\lambda=700 \text{ nm}) = 1.50$;
- un prisma investito da un raggio di luce bianca (mistura di più λ) separa la luce di differenti λ ;
→ **escono raggi colorati**;
- **ex arcobaleno.**



riflessione totale

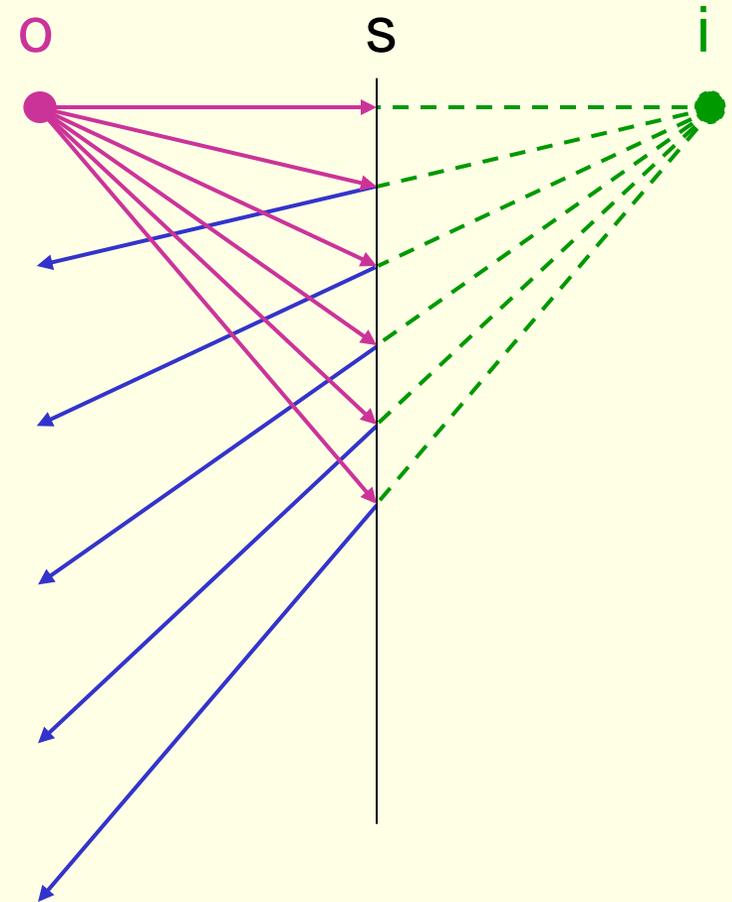
- $\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1$;
- $\sin \theta_2 = n_1 / n_2 \sin \theta_1 \leq 1$;
- $\sin \theta_1 \leq n_2 / n_1$;
- $\theta_1 \leq \text{asin}(n_2 / n_1)$;
- se $\theta_1 > \theta_c = \text{asin}(n_2 / n_1)$
- riflessione totale (ex. fibre ottiche).



specchi piani

- riflessione;
- def. di oggetto e immagine;
- immagine reale o virtuale;
- immagine diritta o capovolta;
- per gli specchi piani :
 - $|p| = |i|$;
 - $i = - p$;
 - immagine virtuale, diritta.

[per convenzione, $p > 0$, $i > 0$ se reale,
 $i < 0$ se virtuale]

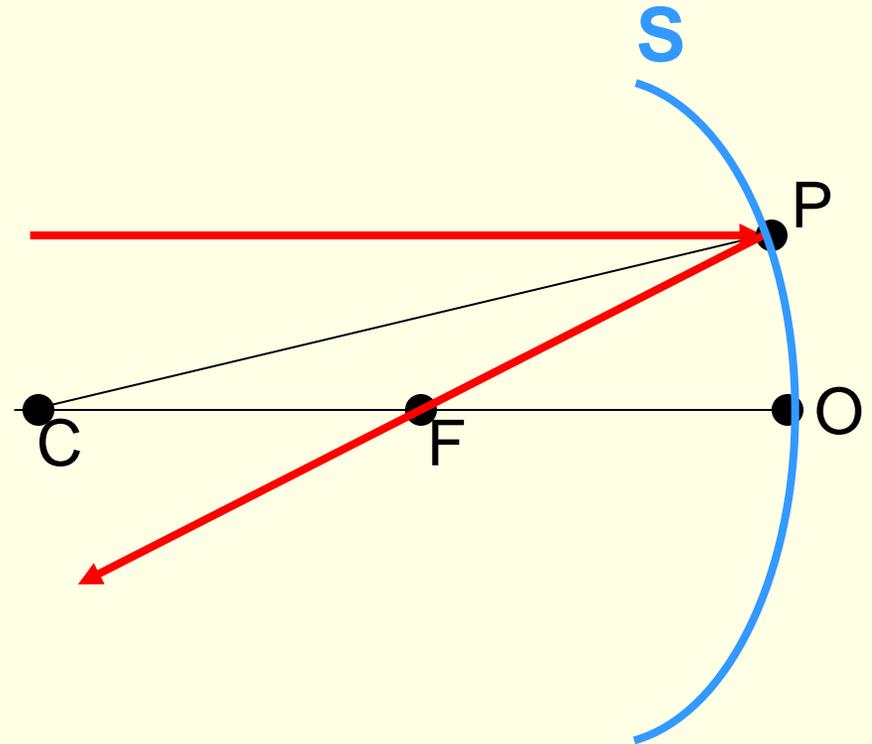


specchi sferici : elementi

definizioni :

- specchio concavo (ex, altri casi possibili);
- $PC = r =$ raggio dello specchio;
- $OC =$ asse dello specchio;
- $F =$ fuoco = punto in cui convergono tutti i raggi paralleli all'asse;
- $OF = f =$ distanza focale;
- dimostriamo :

$$f = \frac{1}{2} r.$$

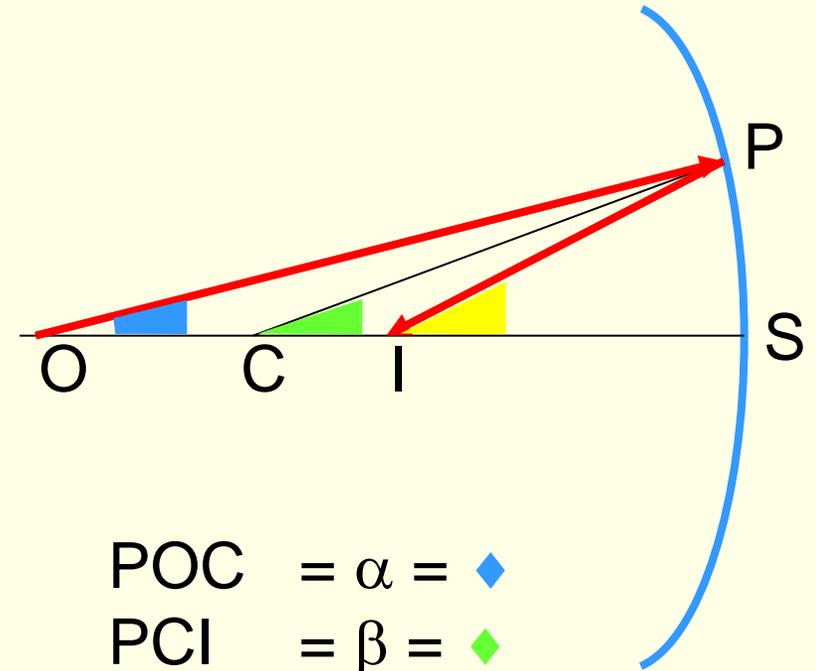


specchi sferici : dimostrazione

dimostrazione :

- $\alpha \approx PS / OS = PS / p$;
- $\beta \approx PS / CS = PS / r$;
- $\gamma \approx PS / IS = PS / i$;
- OPC : $\alpha + \theta + (180 - \beta) = 180$;
- OPI : $\alpha + 2 \theta + (180 - \gamma) = 180$;
- $2 \alpha + 2 \theta = 2 \beta$;
- $\alpha + 2 \theta = \gamma$;
- $\alpha = 2 \beta - \gamma$;
- $\alpha + \gamma = 2 \beta$;

$$1 / p + 1 / i = 2 / r \quad [\dots \text{ segue}]$$



POC	=	α	=	◆
PCI	=	β	=	◆
PIS	=	γ	=	◆
OS	=	p ;		
CS	=	r ;		
IS	=	i ;		
OPC = CPI	=	θ .		

specchi sferici : equazione

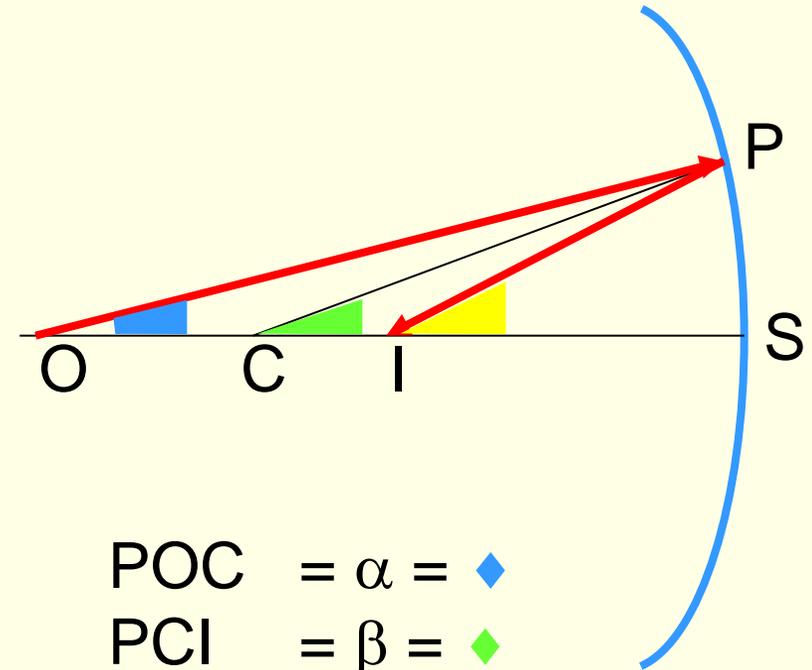
[... segue]

$$1 / p + 1 / i = 2 / r ;$$

- per def., se $p \rightarrow \infty \Rightarrow i \rightarrow f$;
- $0 + 1 / f = 2 / r$;
- $f = r / 2$ [QED] ;
- $1 / p + 1 / i = 1 / f$.

NB. nella dim., non si usa la direzione dei raggi; pertanto, $i \leftrightarrow p$.

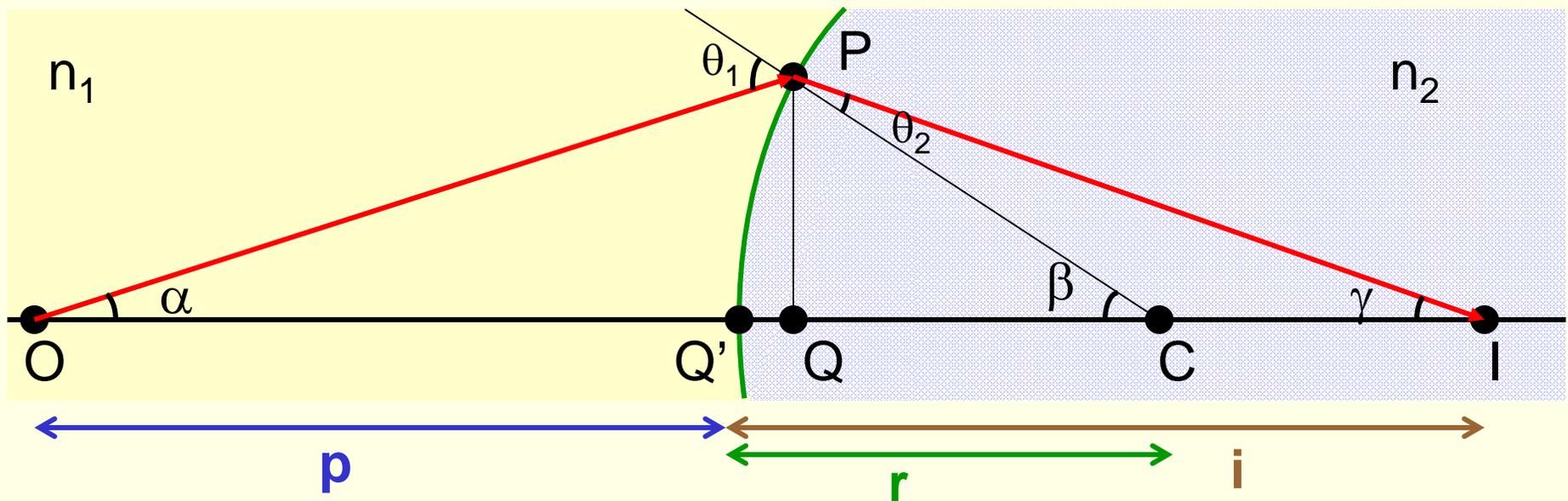
- $i = f p / (p - f)$;
- $p < f \Rightarrow$ immagine virtuale;
- $p > f \Rightarrow$ immagine reale;
- $p = f \Rightarrow ???$;
- ingrandimento $m = | i | / | p |$. [no dim.]



POC	= α =	◆
PCI	= β =	◆
PIS	= γ =	◆
OS	=	p ;
CS	=	r ;
IS	=	i .

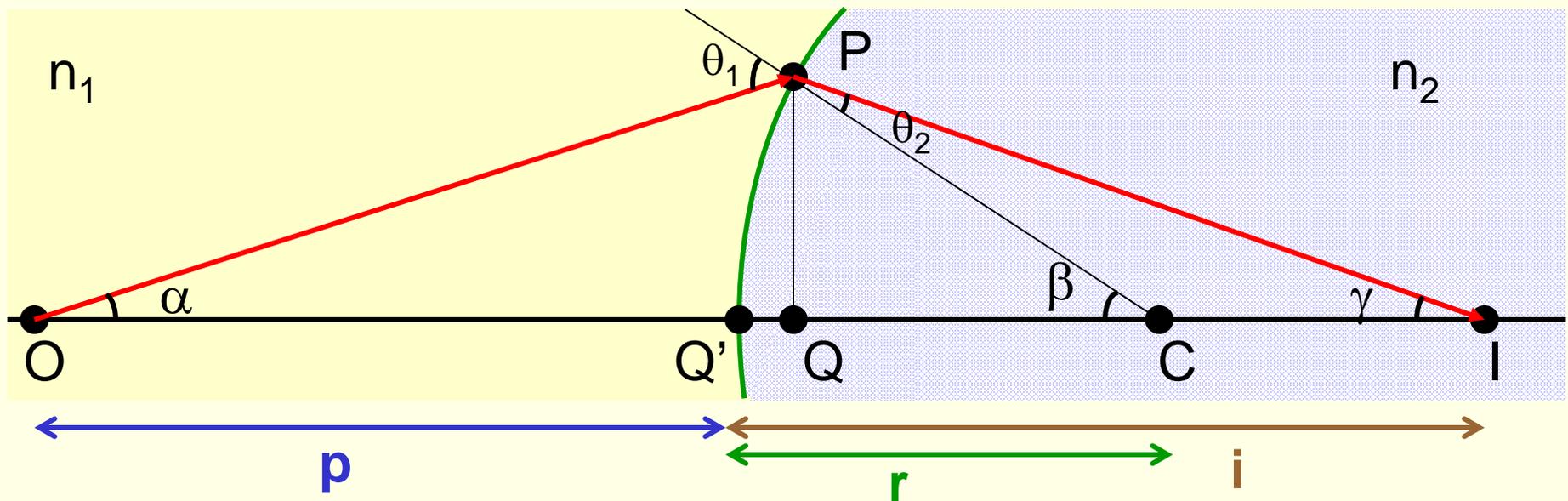
diottro : rifrazione su superfici sferiche

- approssimazione : $Q' \approx Q$ (cioè r grande, γ piccolo) ;
- OPC : $\alpha + \beta + (180 - \theta_1) = 180 \rightarrow \alpha + \beta = \theta_1$;
- IPC : $\gamma + \theta_2 + (180 - \beta) = 180 \rightarrow \gamma + \theta_2 = \beta$;
- $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \rightarrow \theta_1, \theta_2$ piccoli $\rightarrow n_1 \theta_1 \approx n_2 \theta_2$;
- $n_1 (\alpha + \beta) \approx n_2 (\beta - \gamma) \rightarrow n_1 \alpha + n_2 \gamma = \beta (n_2 - n_1)$ [... segue ...]



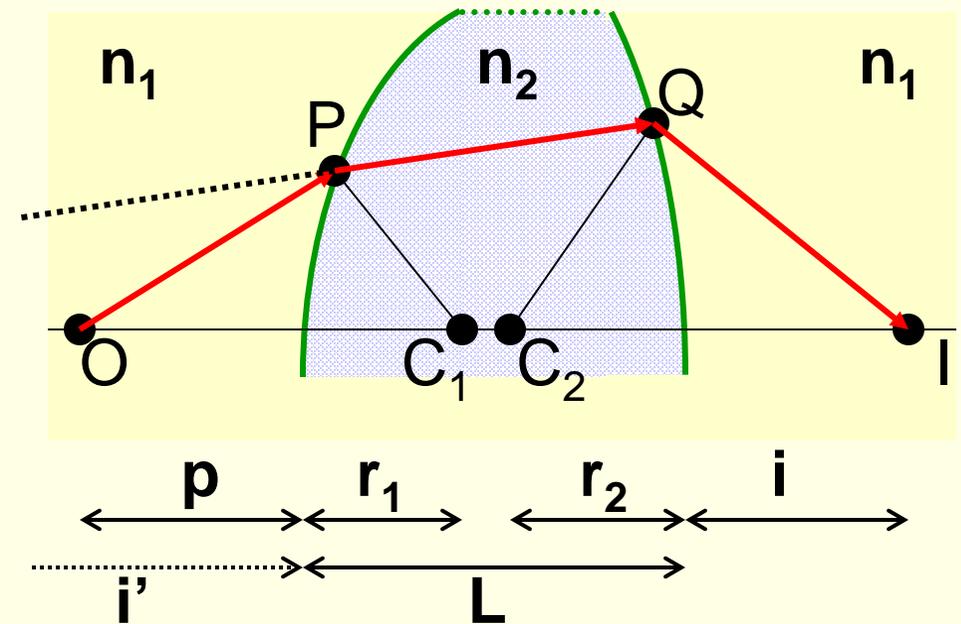
diottro (2)

- $n_1 \alpha + n_2 \gamma = \beta (n_2 - n_1)$;
- $\sin \alpha \approx \alpha \approx PQ / p$; $\sin \beta \approx \beta \approx PQ / r$; $\sin \gamma \approx \gamma \approx PQ / i$;
- $n_1 / p + n_2 / i = (n_2 - n_1) / r$;
- la formula non dipende da α → tutti i raggi uscenti da O convergono in I ;
- noti i mezzi (n_1, n_2, r), $p \leftrightarrow i$;
- non dipende dal verso dei raggi → oggetto e immagine possono scambiarsi.



lenti sottili

- prendiamo $n_1 \approx 1$, $n_2 = n$;
- passaggio 1 \rightarrow 2 :
 $1/p - n / i' = (n-1) / r_1$; [“-”]
- passaggio 2 \rightarrow 1 :
 $n / (i'+L) + 1/i = (1 - n) / r_2$;
- $L \rightarrow 0$ (“lente sottile”) ;
- $n / i' = 1/p - (n-1) / r_1 =$
 $= (1 - n) / r_2 - 1 / i$;
- $1/p + 1/i = (n-1)(1/r_1 - 1/r_2)$;



equazioni delle lenti sottili

- $1/p + 1/i = (n-1)(1/r_1 - 1/r_2)$;
- $p \rightarrow \infty \Rightarrow i \rightarrow f$ (dist. focale);

- Equazione delle lenti sottili :

$$1/p + 1/i = 1/f;$$

- Equazione dei costruttori di lenti :

$$1/f = (n-1)(1/r_1 - 1/r_2) .$$

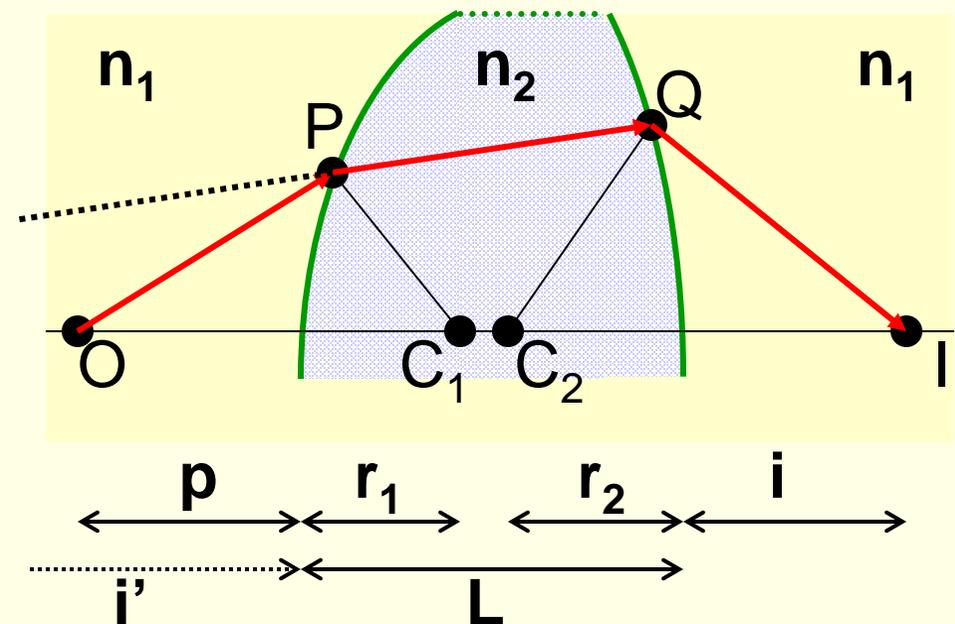
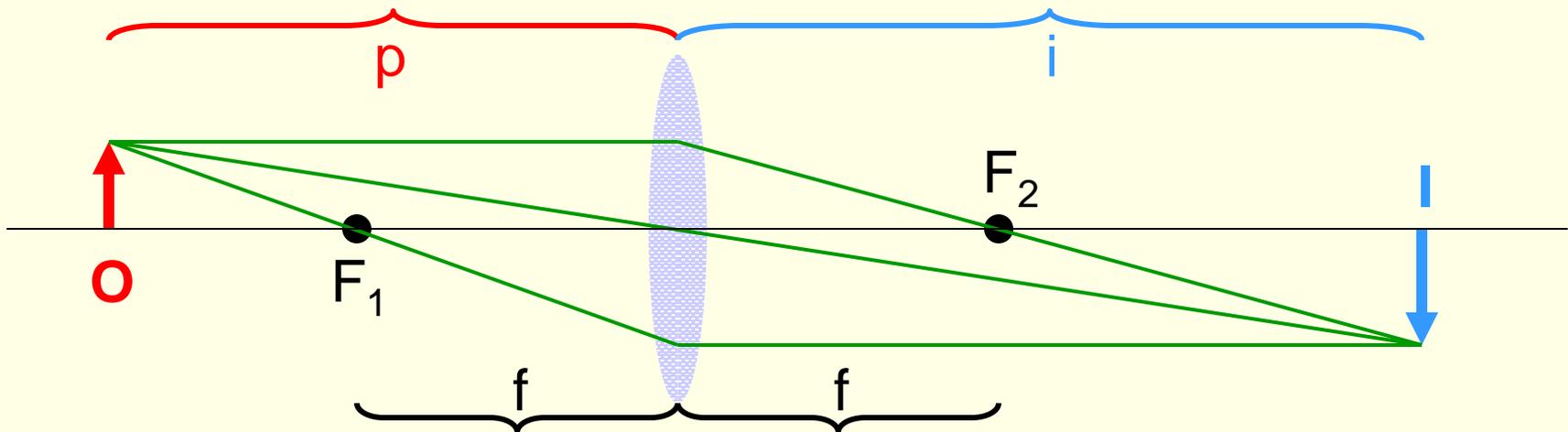


immagine di una lente

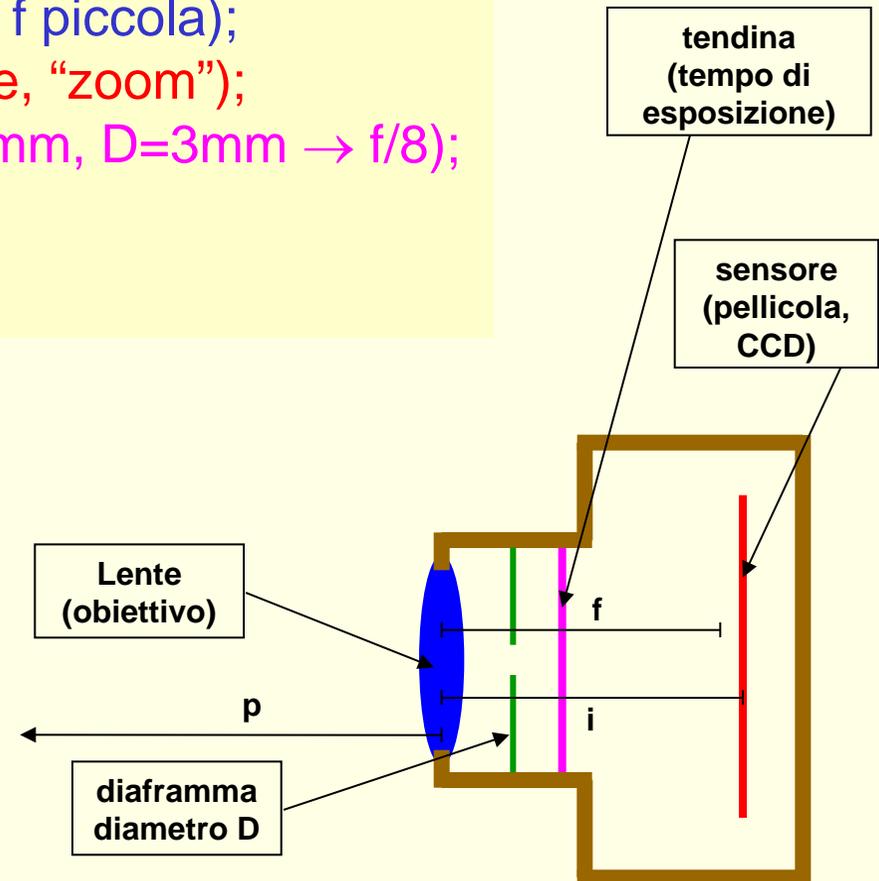
- Ex. lente convergente con oggetto “lontano” ;
- altri casi possibili (ex lenti divergenti) ;
- “costruzione dei raggi” ;
- ingrandimento $m = |i| / p$ (in questo caso $m > 1$).



macchina fotografica

- i costante (\rightarrow distanza lente – pellicola/sensore CCD);
- p variabile \rightarrow si cambia la distanza focale (“mettere a fuoco”, “teleobiettivo” $\equiv f$ grande, “grandangolo” $\equiv f$ piccola);
- immagine capovolta, rimpicciolita (variabile, “zoom”);
- “apertura” $\equiv f / D$ del diaframma (ex. $f=24\text{mm}$, $D=3\text{mm} \rightarrow f/8$);
- tempo di esposizione (ex. $1/60$ s).

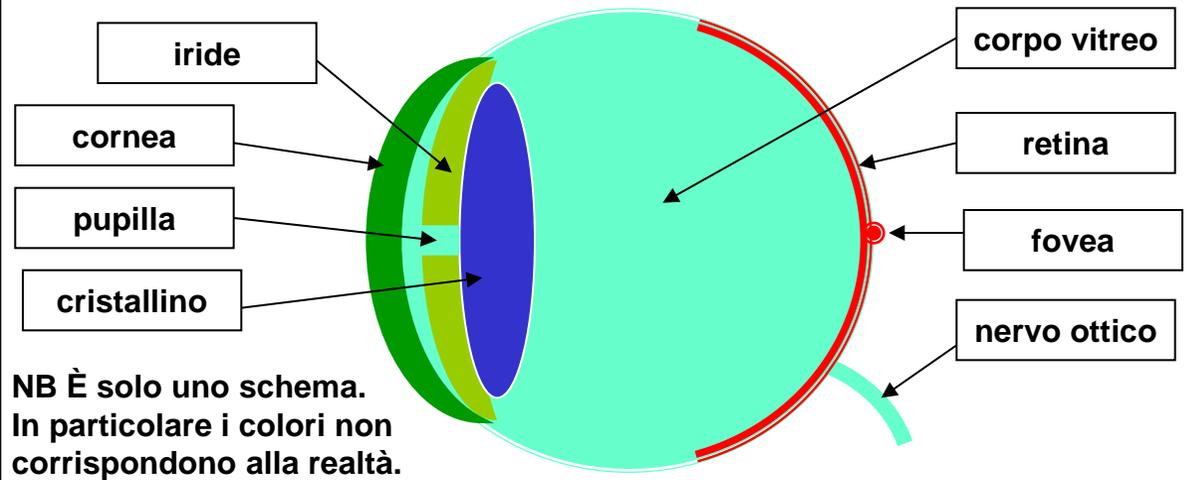
- se eq. non soddisfatta ($1/p + 1/i \neq 1/f$), oggetto “sfuocato” (immagine non sul sensore, pertanto confusa);
- apertura piccola (= grande profondità di campo), tempo di esposizione piccolo (= immagini non “mosse”), grana fine (= alta risoluzione) sono caratteristiche mutuamente contrastanti.

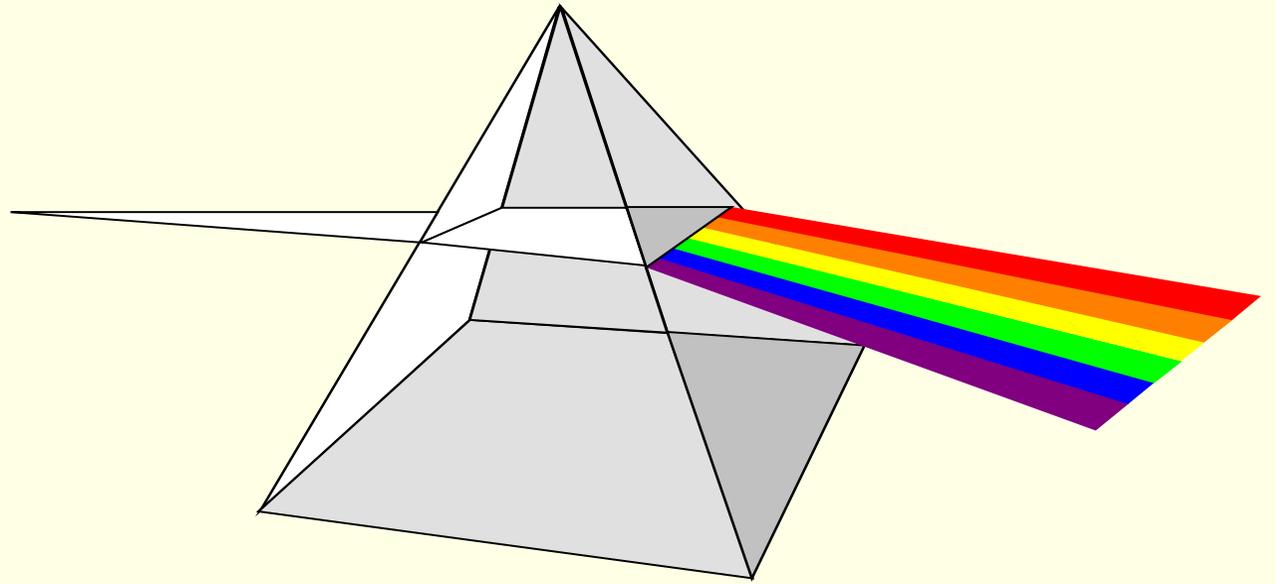


occhio umano

- “simile” alla macchina fotografica : lavora con “i” fisso, modificando “f” al variare di “p”;
- difetti di vista : miopia, presbiopia, ipermetropia, astigmatismo, ...
- correzioni (lenti per la vista).

- lente = cornea ($n = 1.376$)
+ cristallino;
- diaframma = iride;
- pellicola/CCD = retina
+ fovea;
- cavo USB = nervo ottico.





Fine parte 5