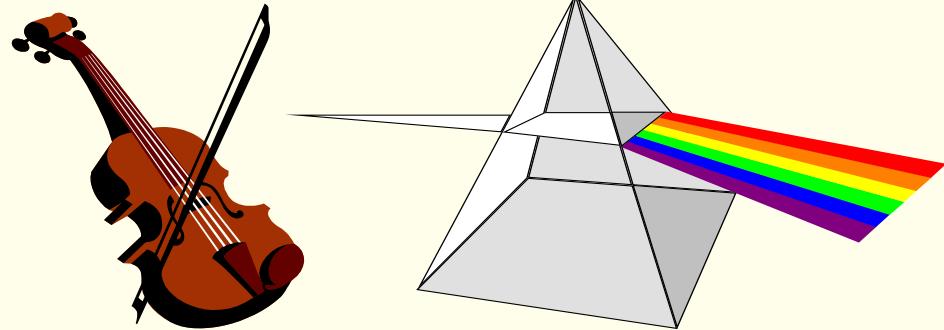


Onde e ottica



➤ Onde

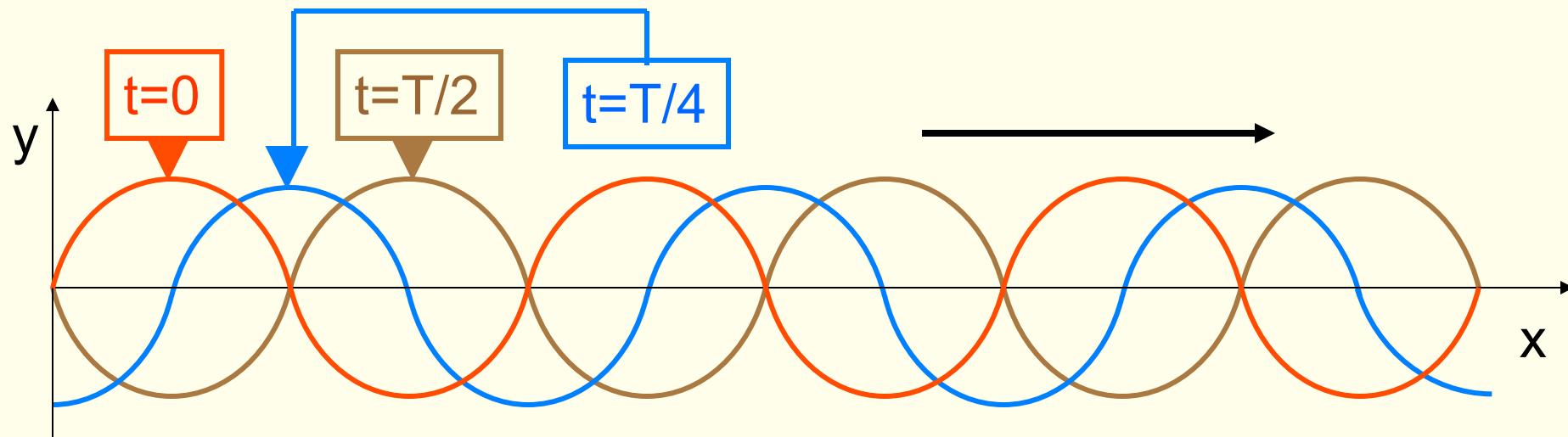
- proprietà delle onde;
- onde sonore;
- il decibel;

➤ Ottica

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

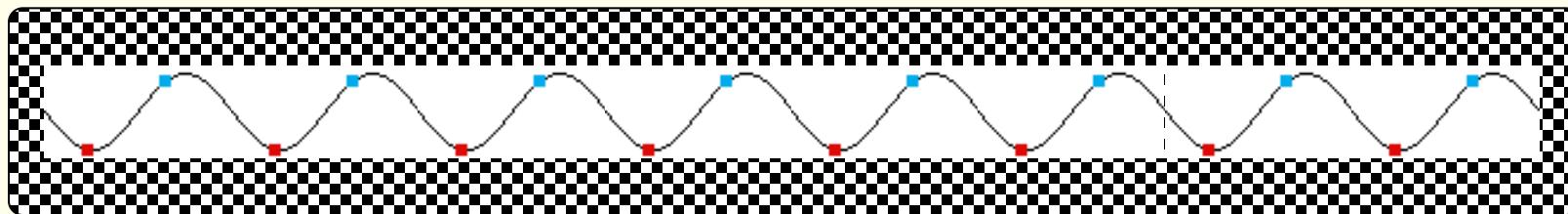
le onde

- 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.

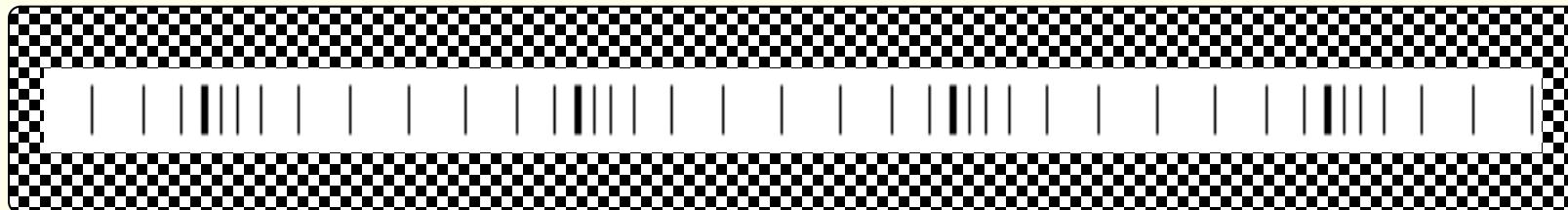


onde trasversali e longitudinali

- 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) :

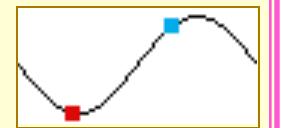


- onde longitudinali (e.g. suono, molle); notare la direzione di vibrazione del materiale (\leftrightarrow), rispetto alla direzione di propagazione dell'onda (\rightarrow) :

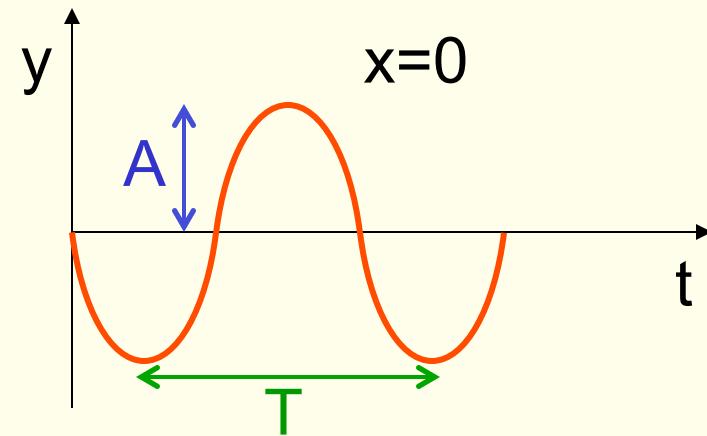
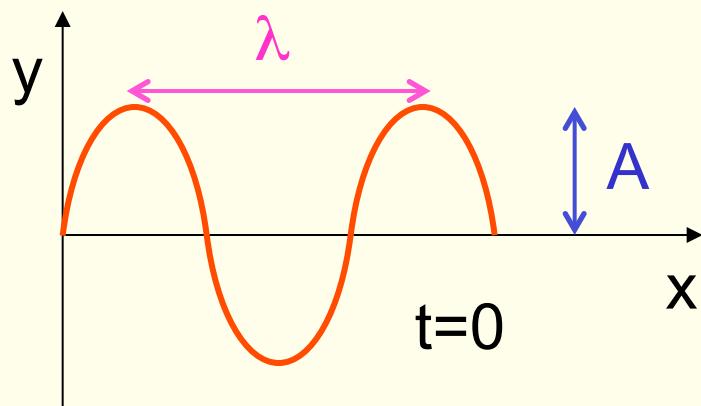
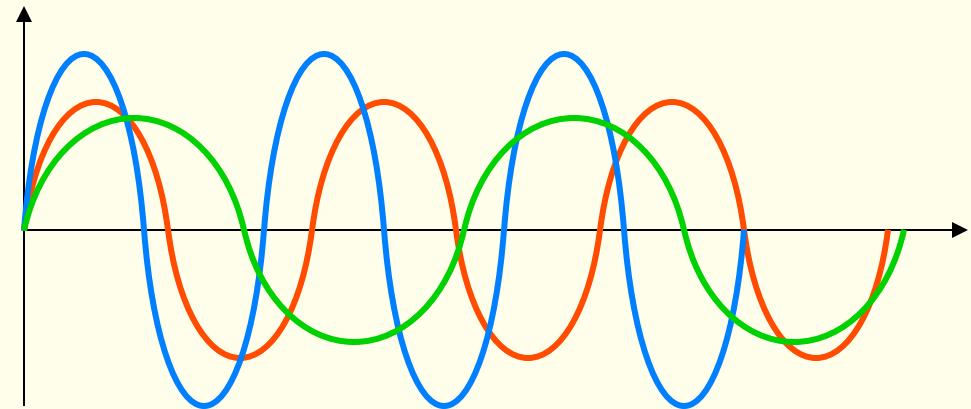


[figure da <http://www.ncat.edu/~gpii/>]

parametri delle onde

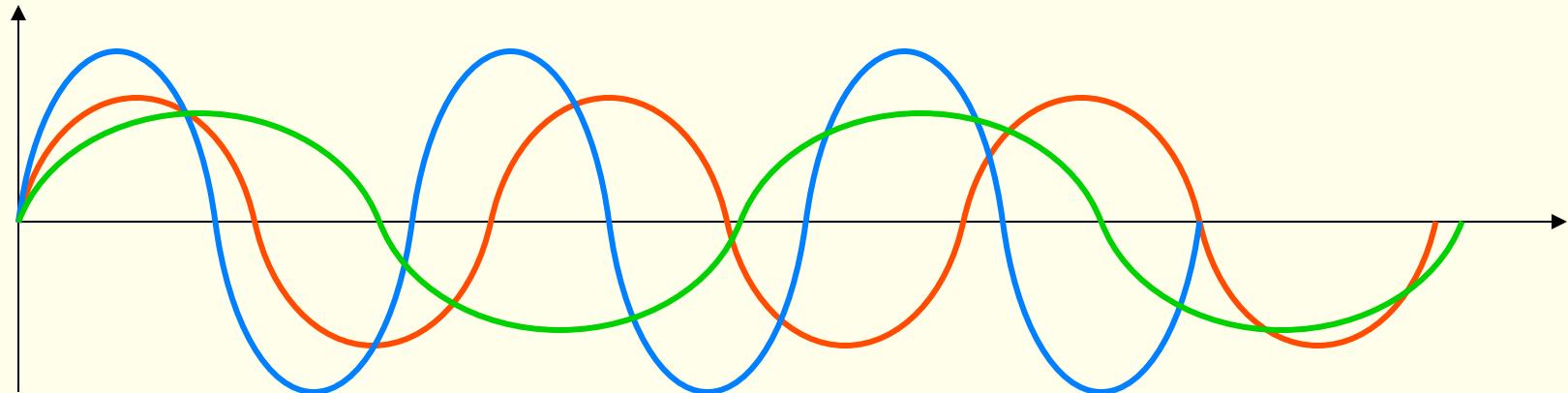


- $y(x,t) = A \sin (kx - \omega t) = A \sin (2\pi x/\lambda - 2\pi t/T);$
- ampiezza A ;
- periodo $T = 2\pi / \omega$;
- lunghezza d'onda $\lambda = 2\pi / k$.



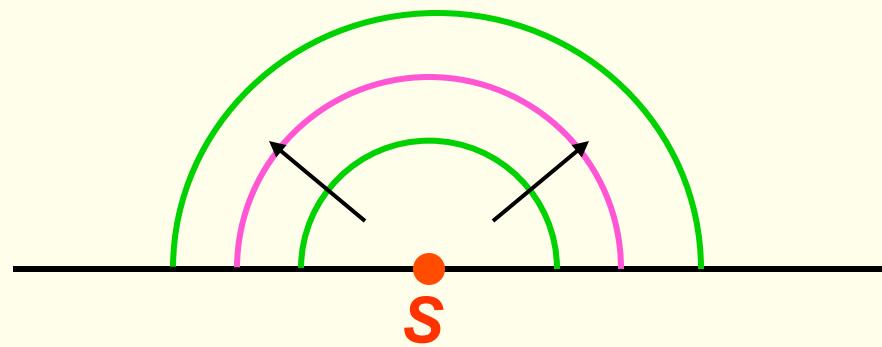
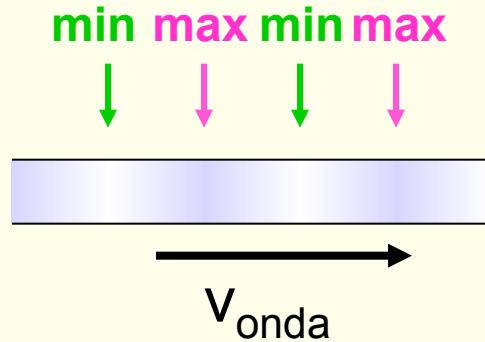
velocità delle onde

- [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) :
 $\beta = \log_{10}(I / I_0)$ [=“bel”];
 $I_0 = 10^{-12}$ W / m² = intensità minima udibile;
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 :

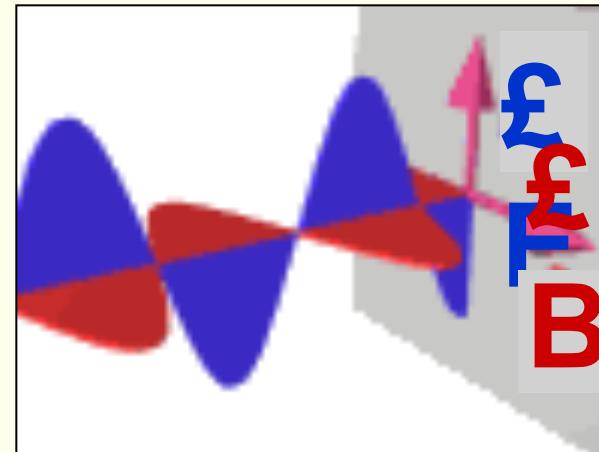
$$\lambda v = c,$$

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

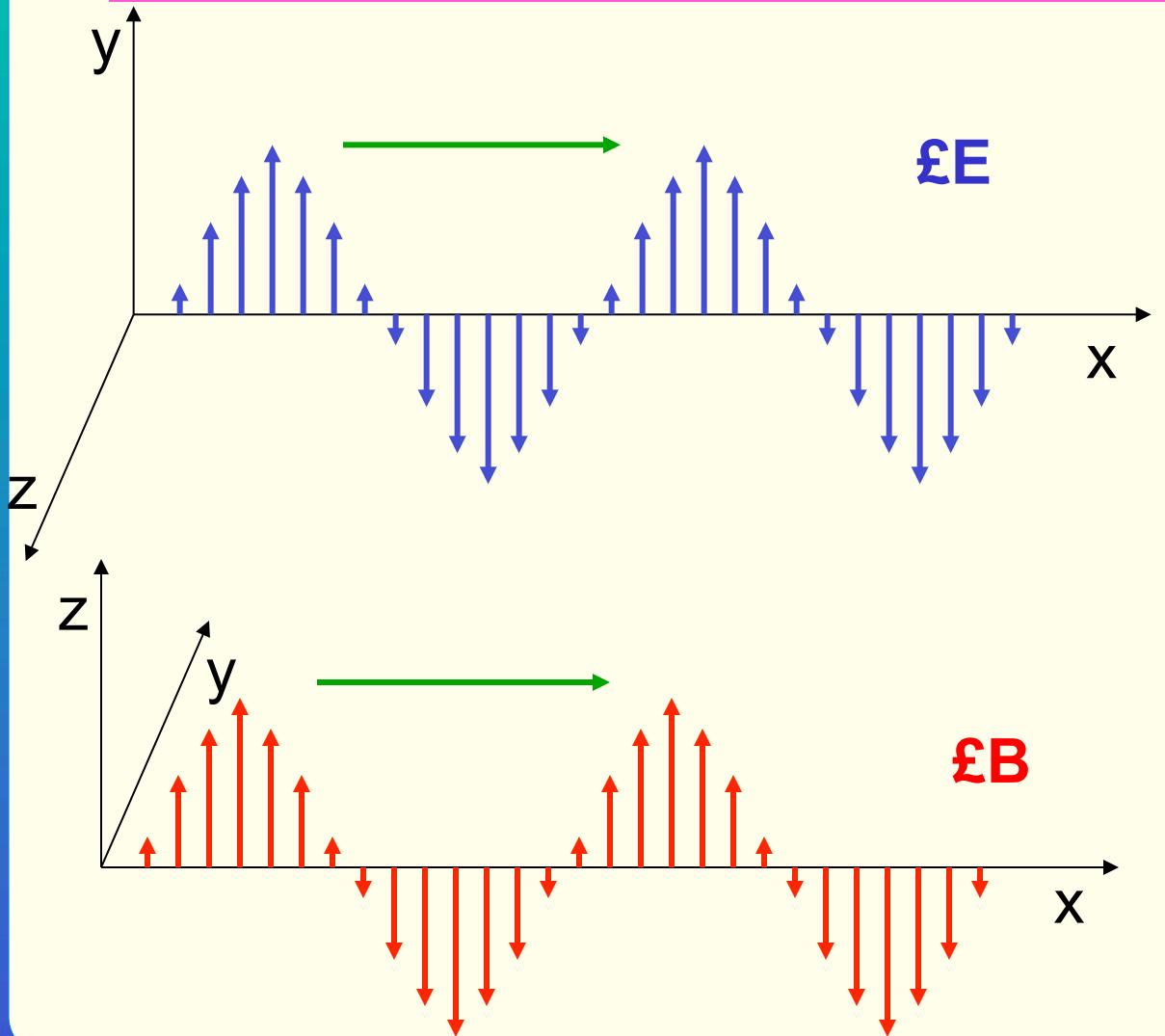
propagazione di un'onda e.m.

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

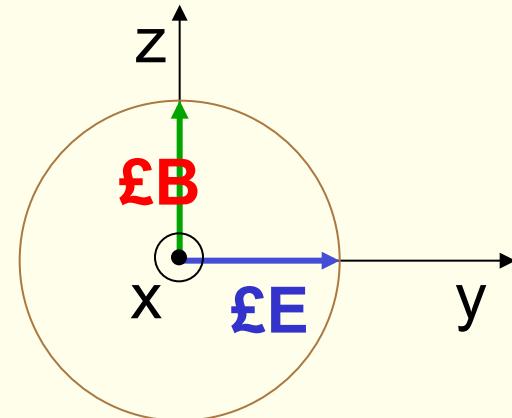
È



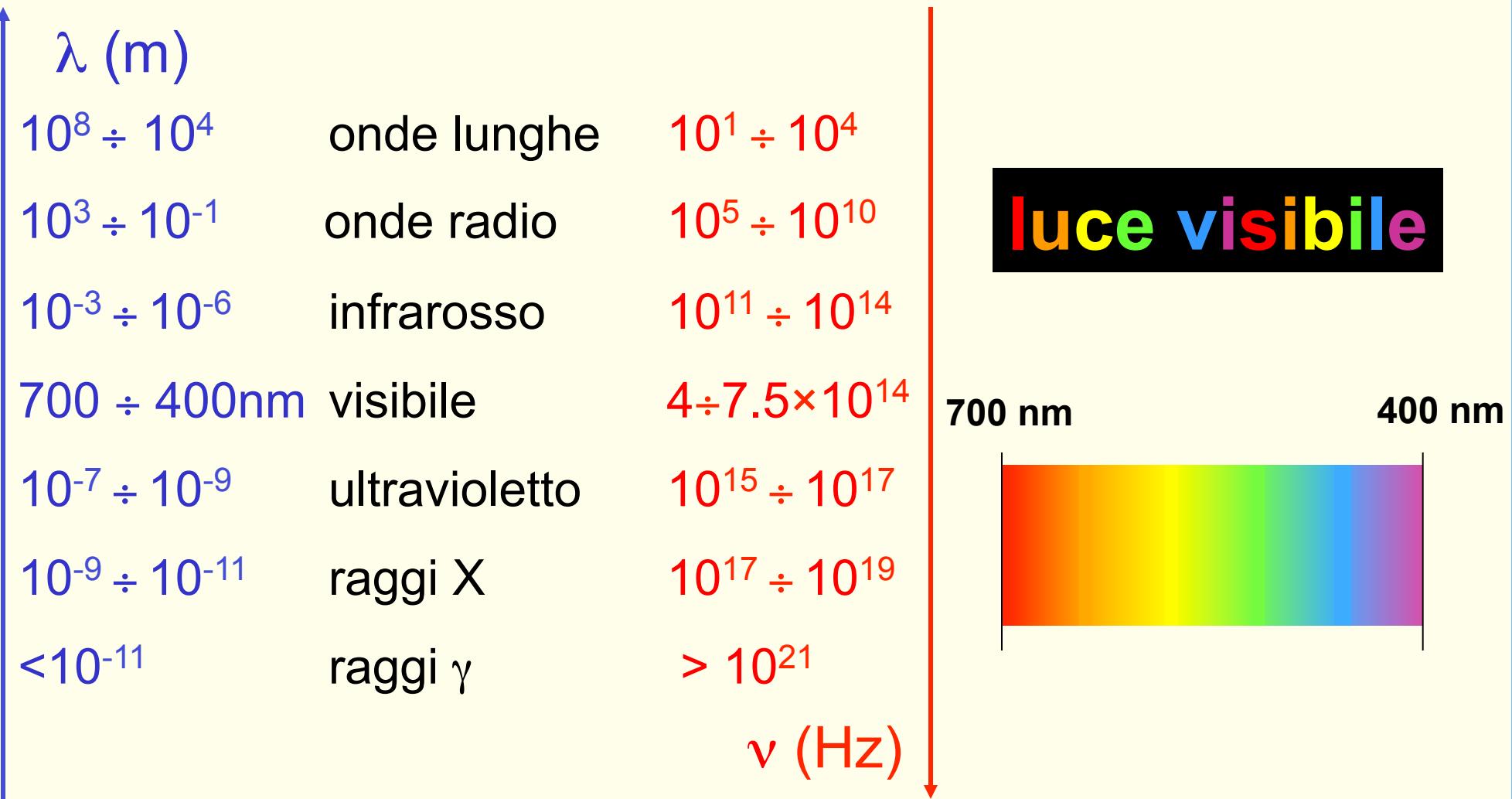
proprietà delle onde e.m.



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



la luce



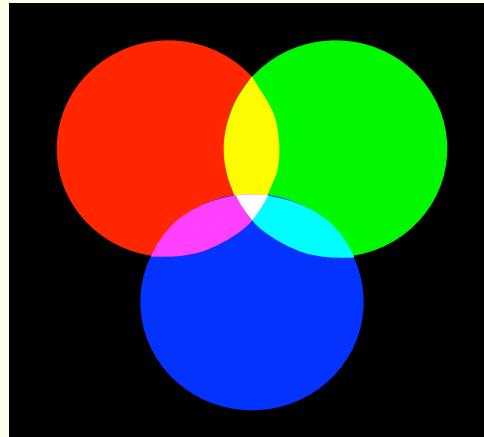
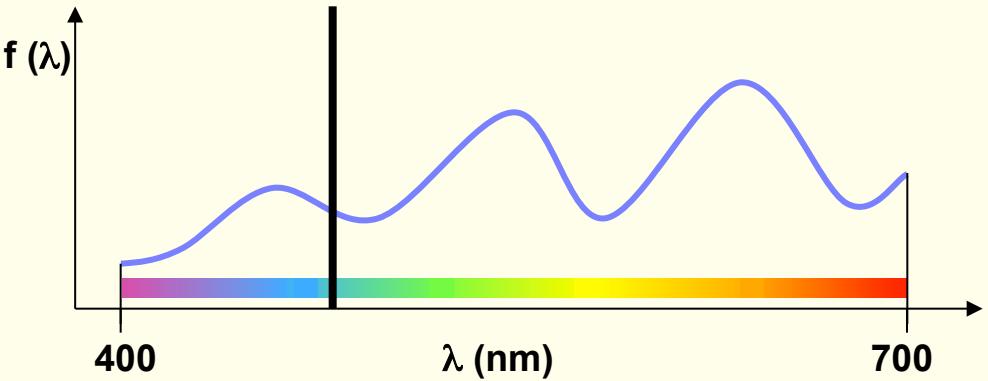
i colori

apparente contraddizione :

- in ottica fisica (“colore ottico”):
 - un colore puro è un’onda luminosa di frequenza e lunghezza data (|);
 - 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

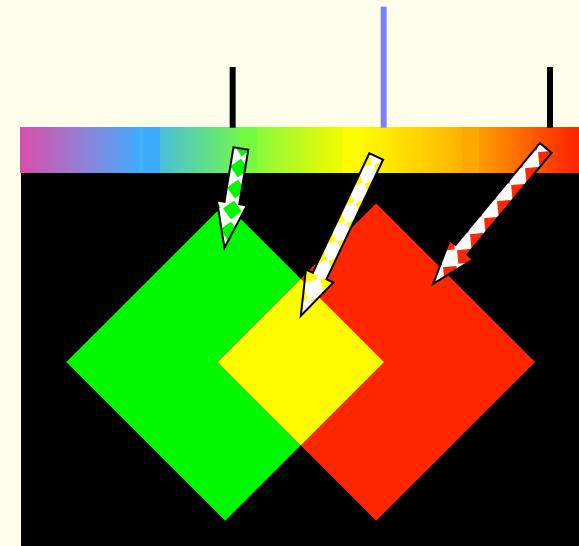
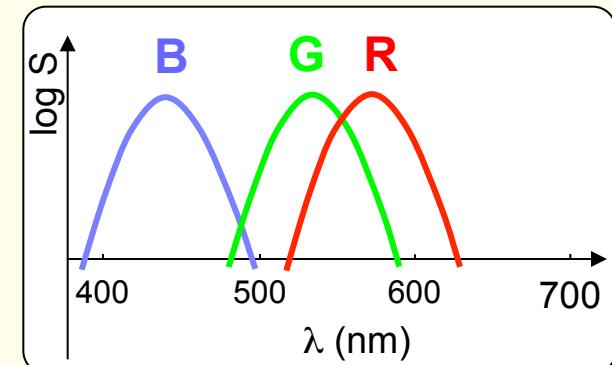
la soluzione è un mix di fisiologia e ottica :

- 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

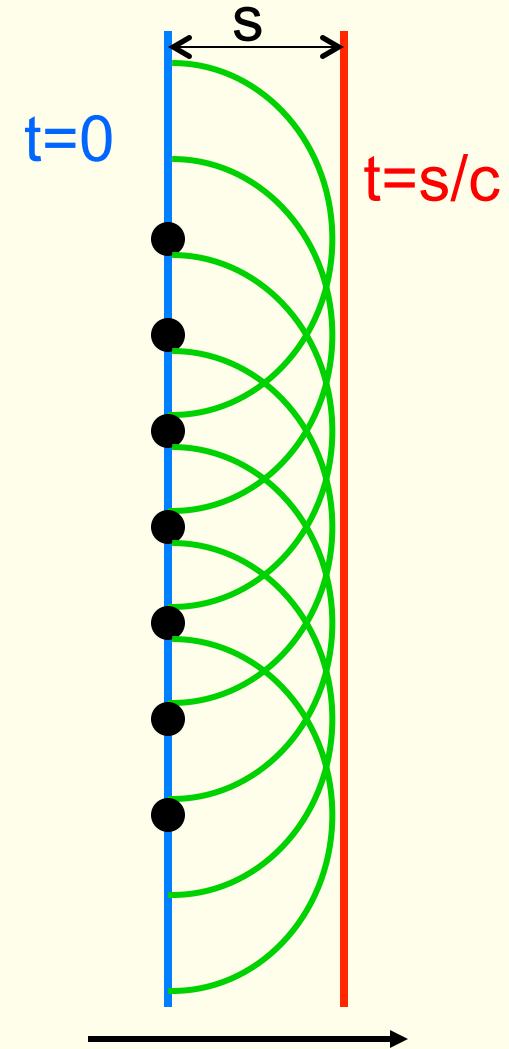
- bisogna distinguere tra colore ottico e colore percepito;
- molti [più esattamente, ∞] colori ottici \Leftrightarrow stesso colore percepito [e.g. $\frac{1}{2}$ rosso + $\frac{1}{2}$ verde = giallo].



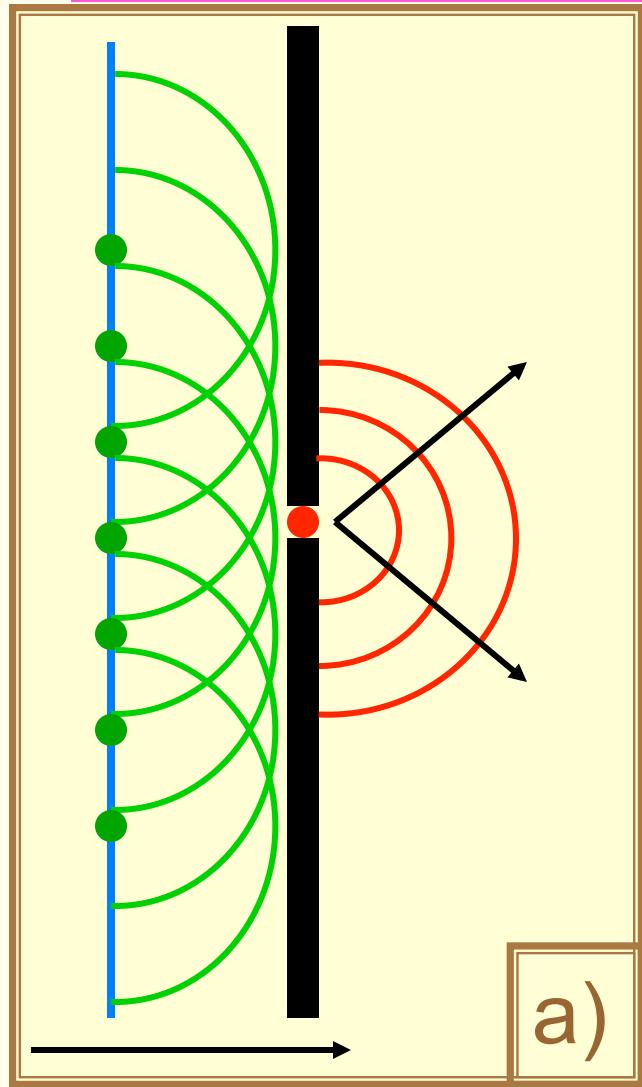
principio di Huygens

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”.

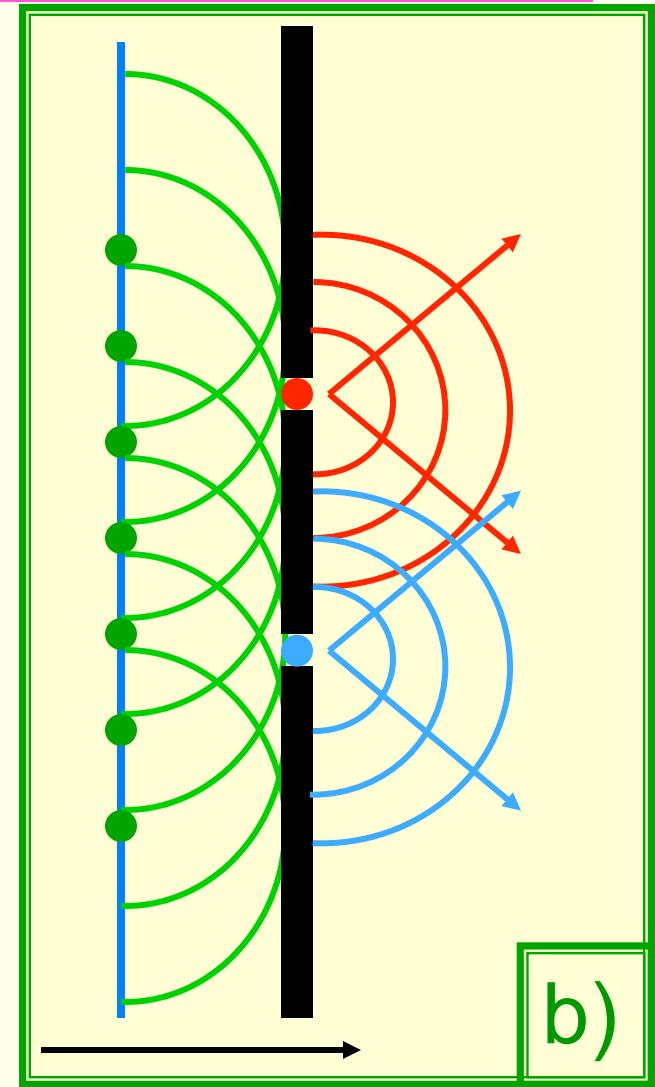


principio di Huygens - fenditure



a)

- caso (a) : una fenditura, onda sferica;
- caso b) : due fenditure, due onde sferiche, interferenza.



b)

indice di rifrazione

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

- definiamo l'indice di rifrazione n :

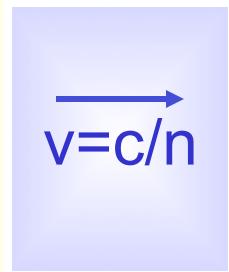
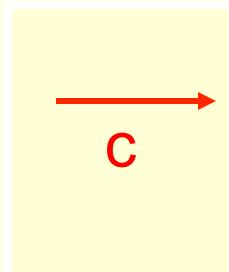
$$n = c / v$$

- 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 [λ_1, θ_1], trovare le proprietà del raggio rifratto [λ_2, θ_2];

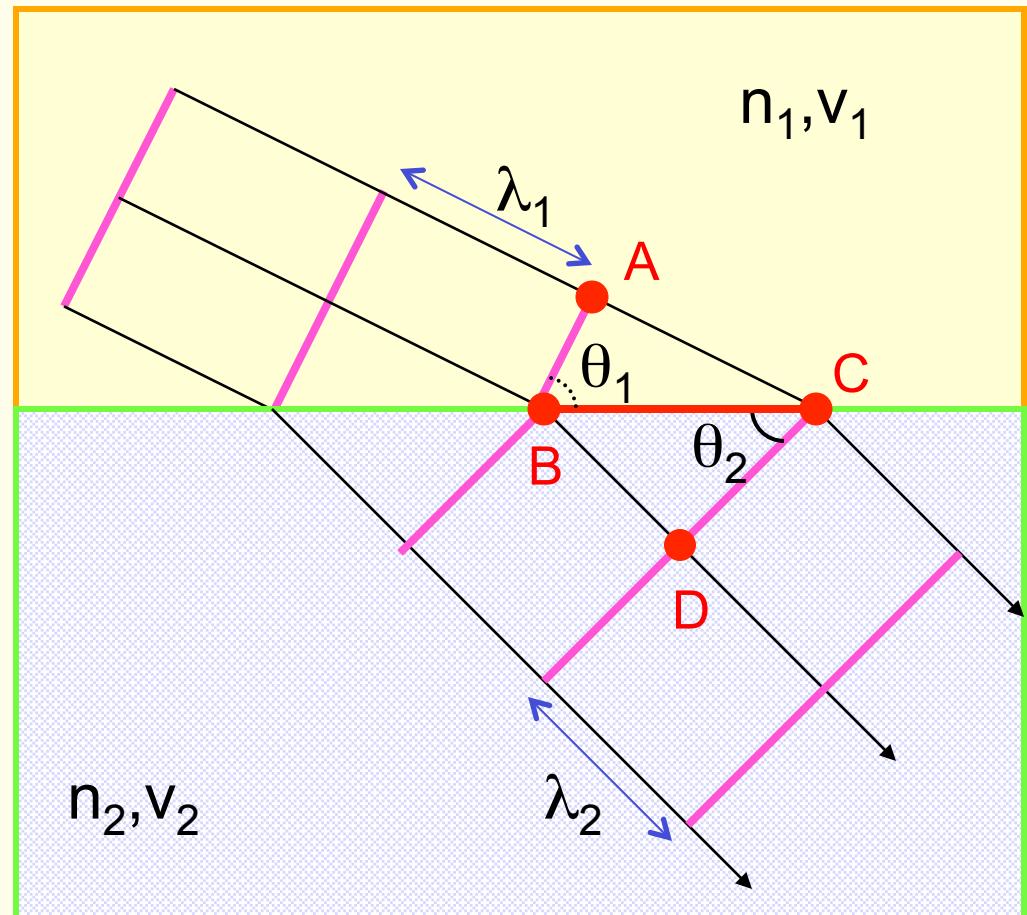
- $\Delta t_1 = \lambda_1 / v_1 = \Delta t_2 = \lambda_2 / v_2 \rightarrow \rightarrow \lambda_1 / \lambda_2 = v_1 / v_2$;

- triangoli BAC e BDC :

$$BC = \lambda_1 / \sin \theta_1 = \lambda_2 / \sin \theta_2 \rightarrow$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \sin \theta_1 / \sin \theta_2 &= \lambda_1 / \lambda_2 \\ &= v_1 / v_2 \\ &= n_2 / n_1 \end{aligned}$$

[legge della rifrazione]



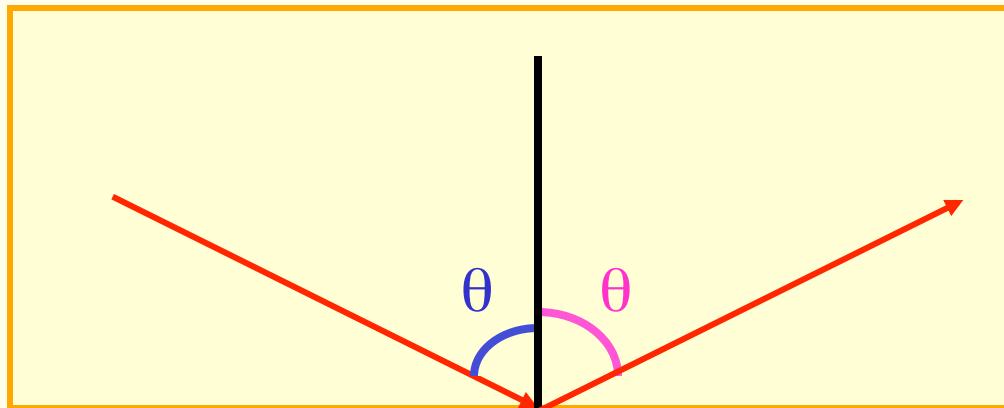
ottica geometrica

- 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.

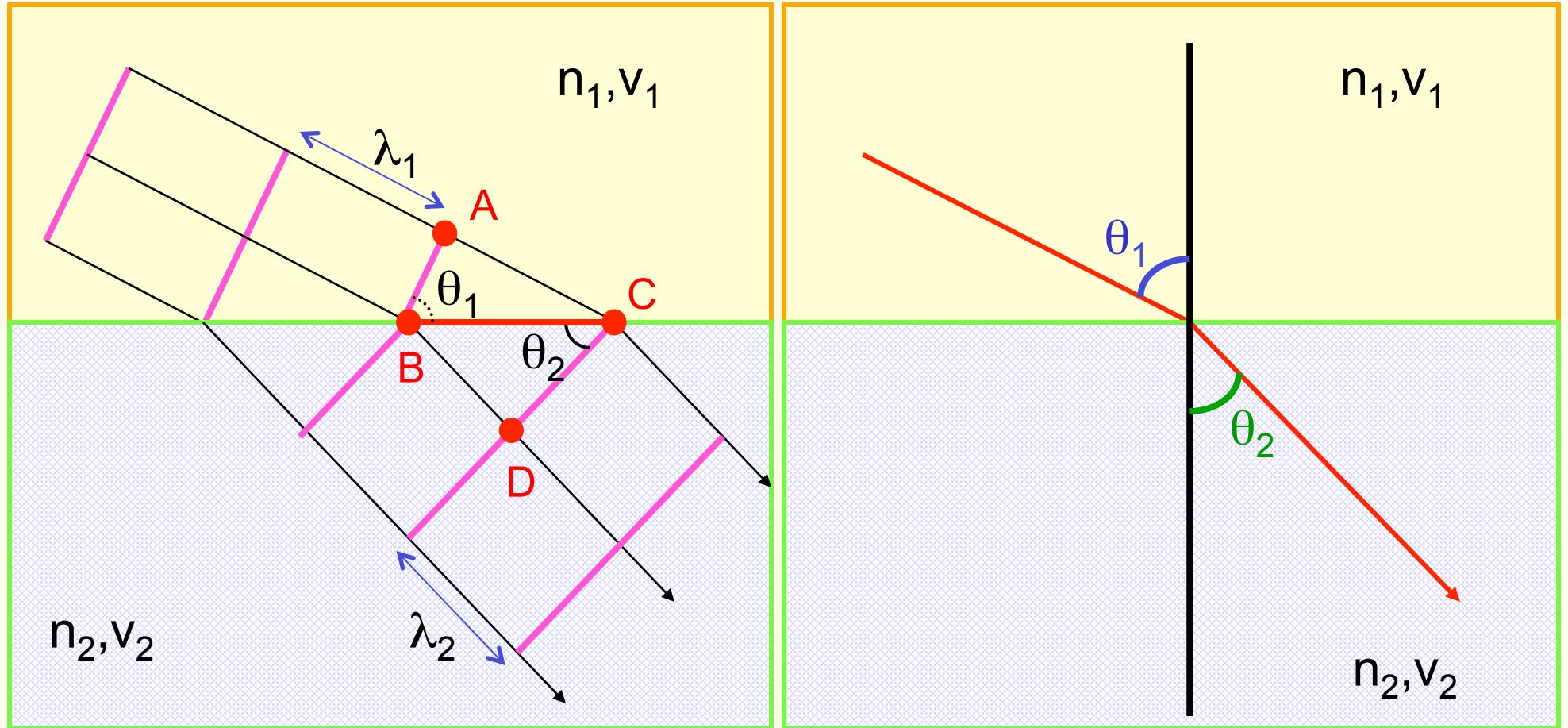
leggi della riflessione

- 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) :

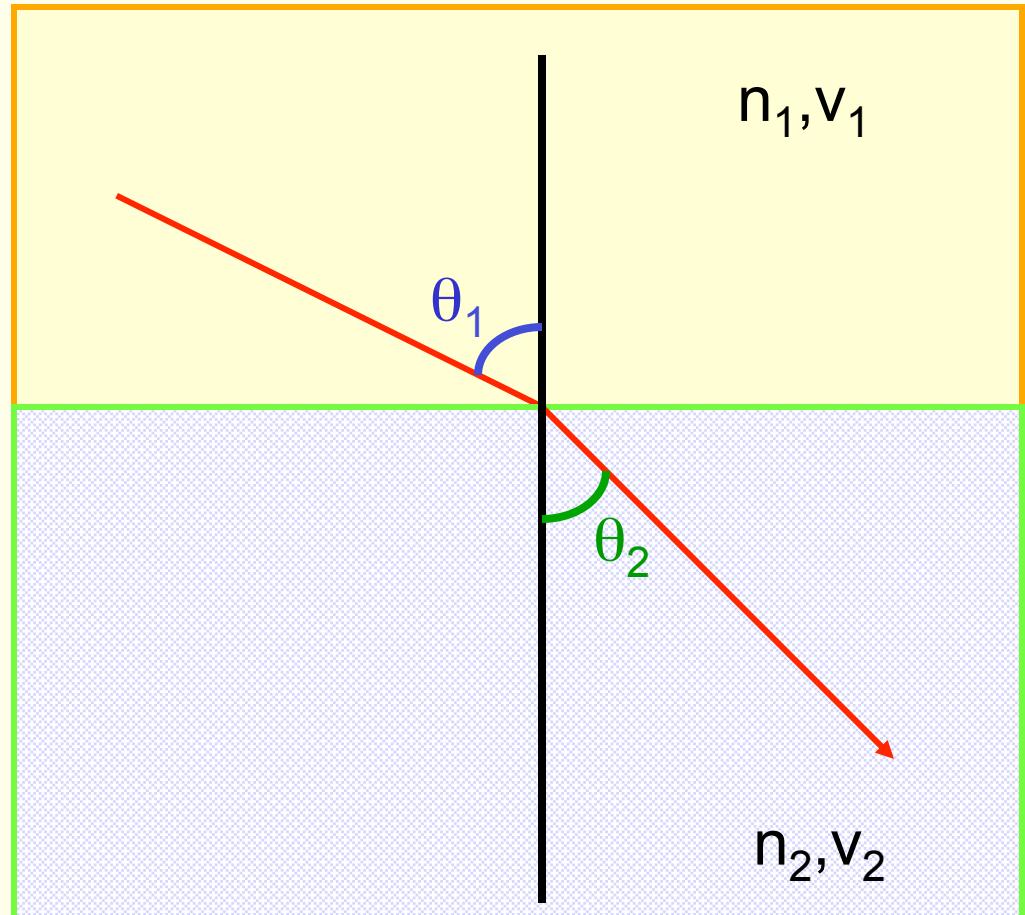
1) legge dei seni :

θ_1 = raggio inc. -normale

θ_2 = raggio rifr. -normale

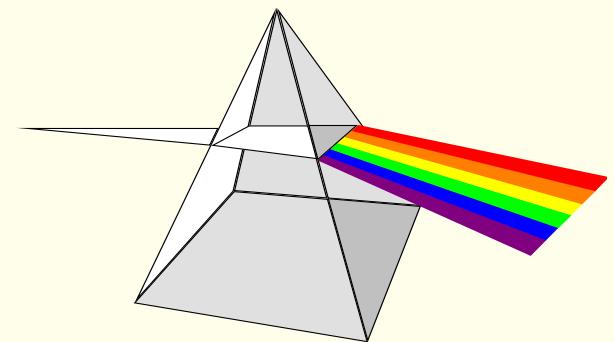
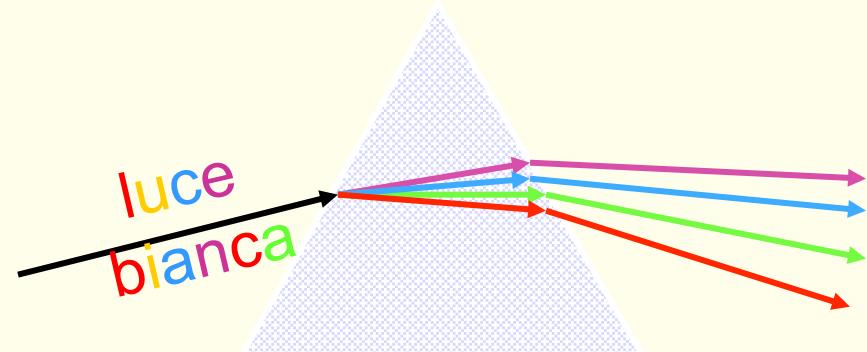
$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1;$

2) raggio inc., raggio rifr., normale sono coplanari.



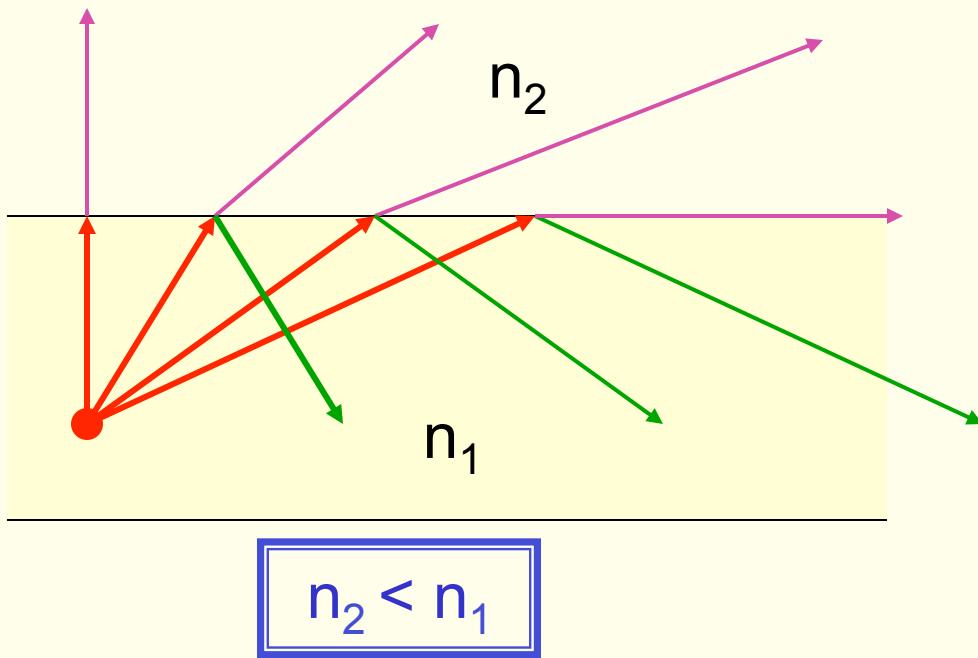
il prisma

- 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

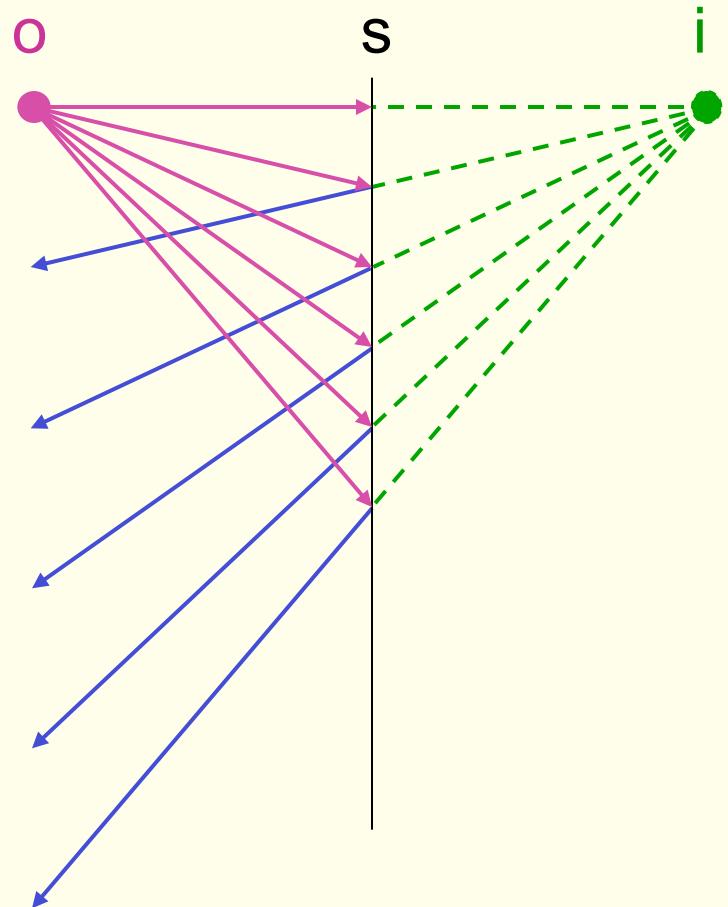
- $\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1;$
- $\sin \theta_2 = n_1 / n_2 \sin \theta_1 \leq 1;$
- $\sin \theta_1 \leq n_2 / n_1 ;$
- $\theta_1 \leq \arcsin(n_2 / n_1) ;$
- se $\theta_1 > \theta_c = \arcsin(n_2 / n_1)$
- riflessione totale (ex. fibre ottiche).



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]

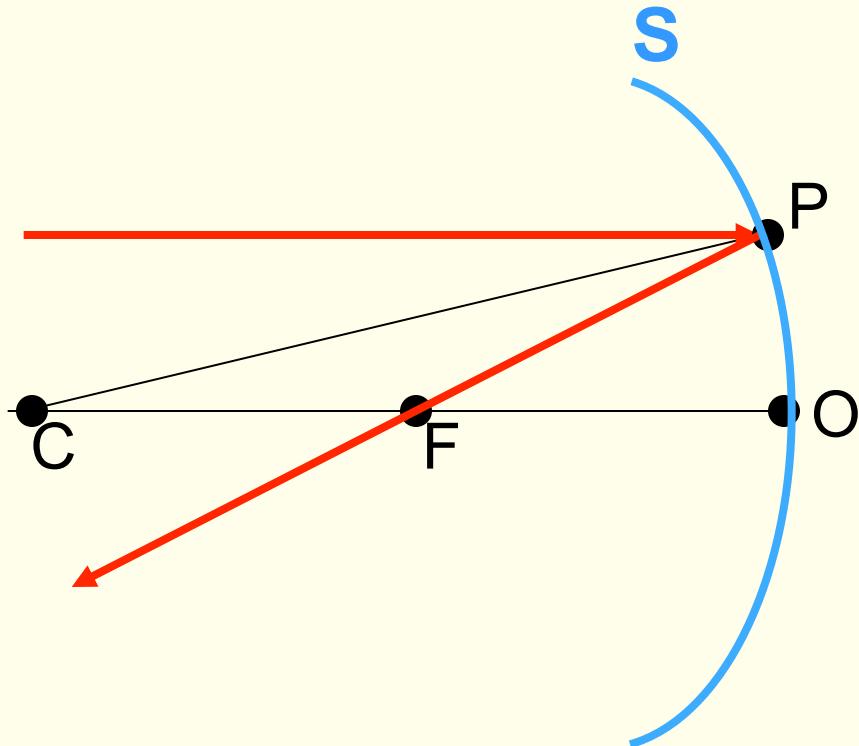


specchi sferici : elementi

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;
- dimostreremo :

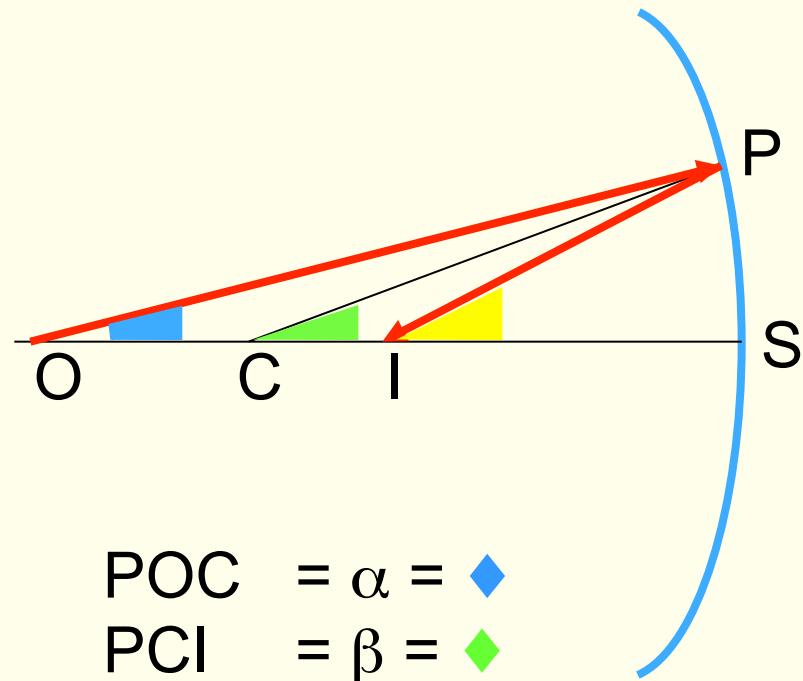
$$f = \frac{1}{2} r.$$



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

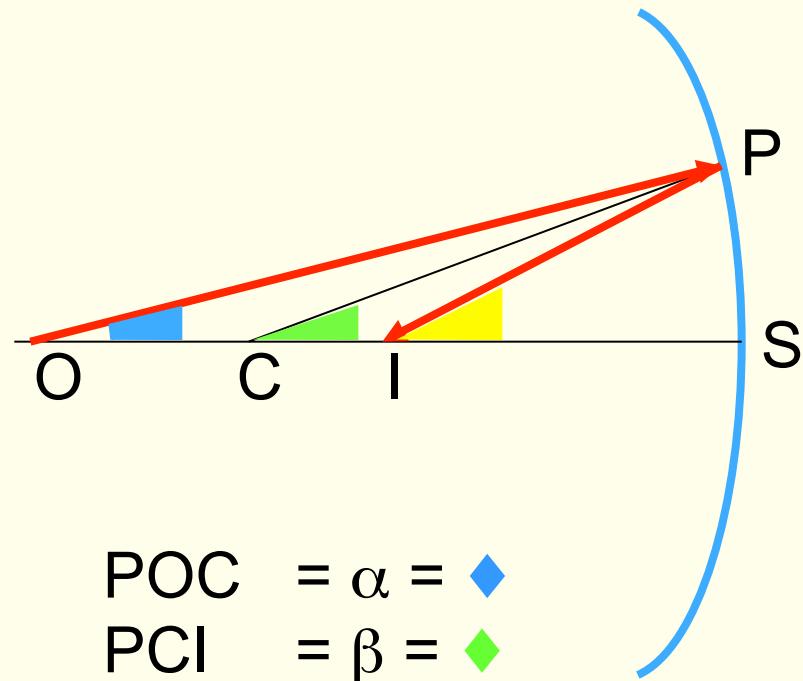
[... segue]

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

- 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, $i \leftrightarrow p$.

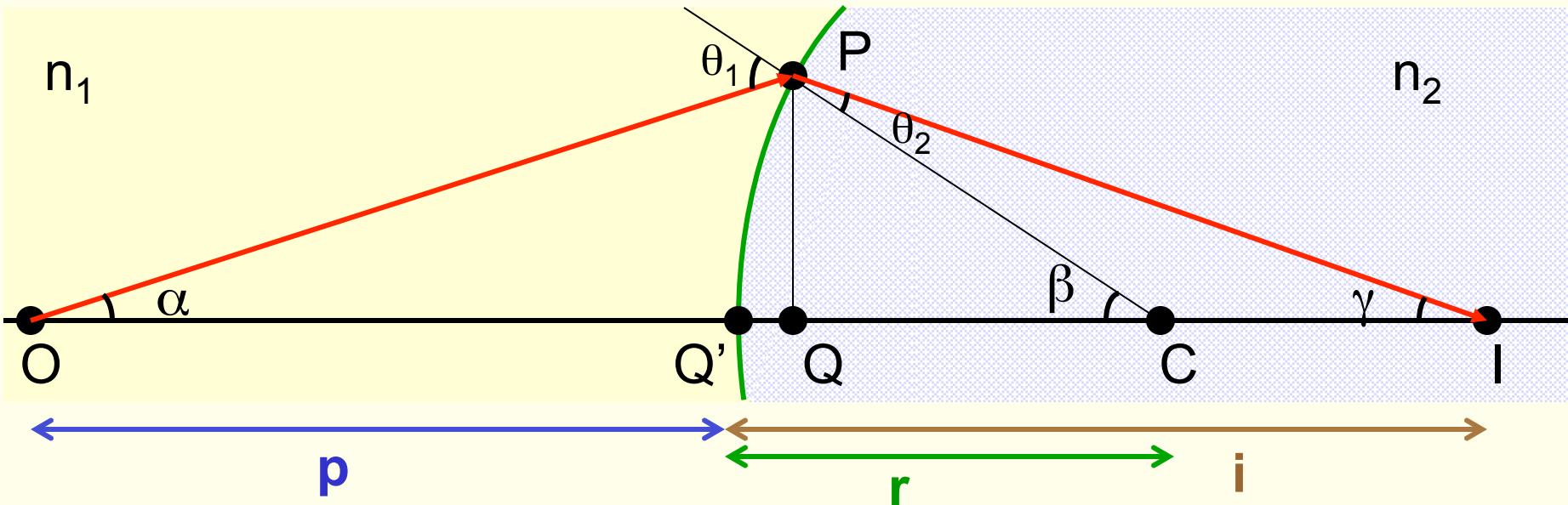
- $i = f p / (p - f)$;
- $p < f \Rightarrow$ immagine virtuale;
- $p > f \Rightarrow$ immagine reale;
- $p = f \Rightarrow ???$;
- ingrandimento $m = |i| / |p|$. [no dim.]



POC	= α = ♦
PCI	= β = ♢
PIS	= γ = ♣
OS	= p ;
CS	= r ;
IS	= i .

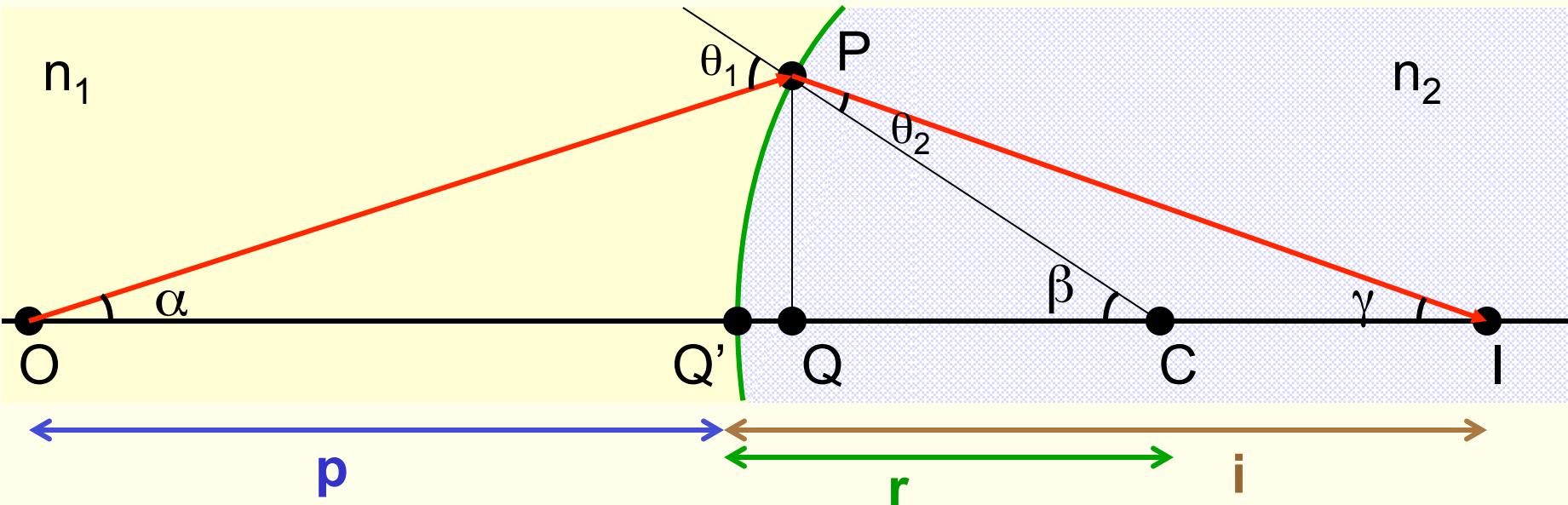
diotto : rifrazione su superfici sferiche

- 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 $\alpha \rightarrow$ 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 \rightarrow oggetto e immagine possono scambiarsi.



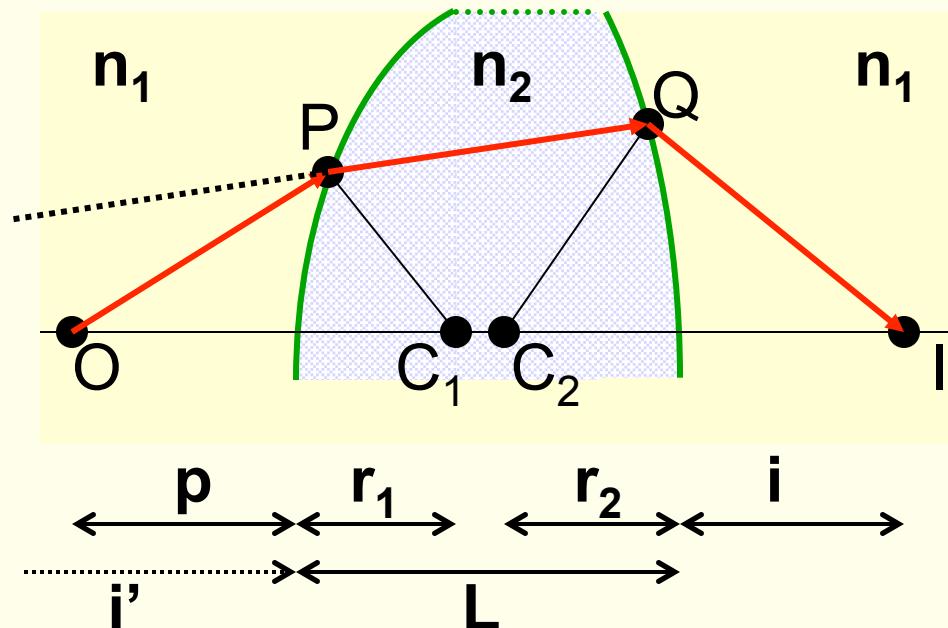
lenti sottili

- 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 :

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

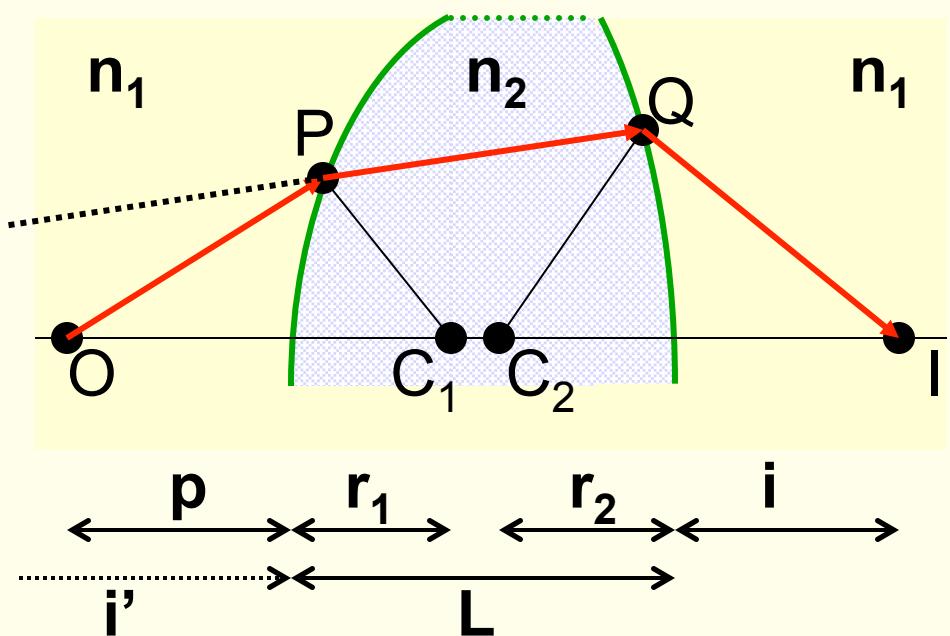
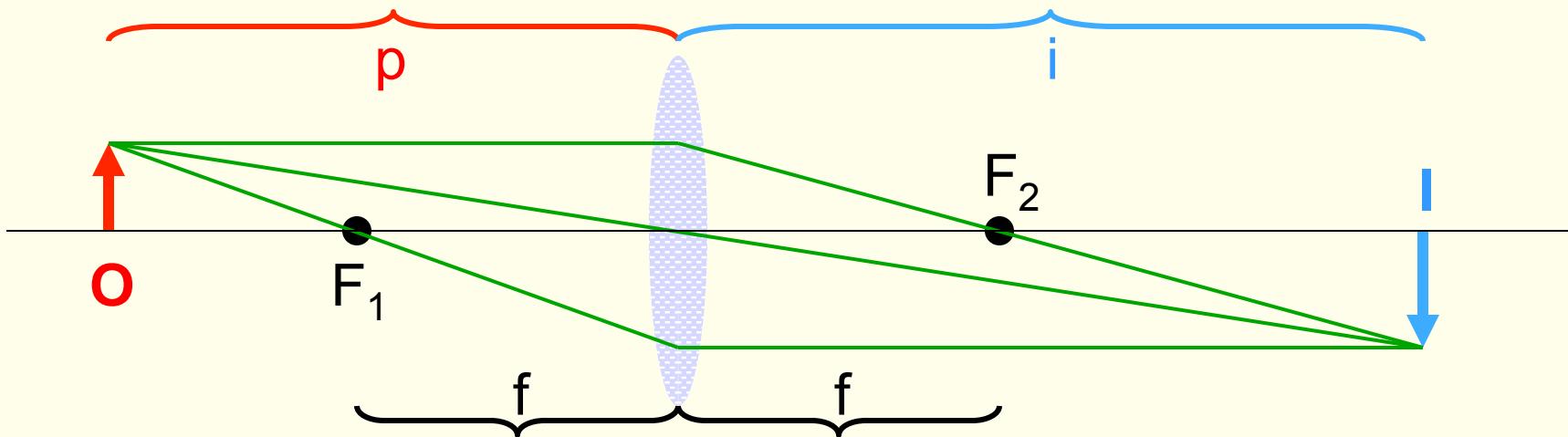


immagine di una lente

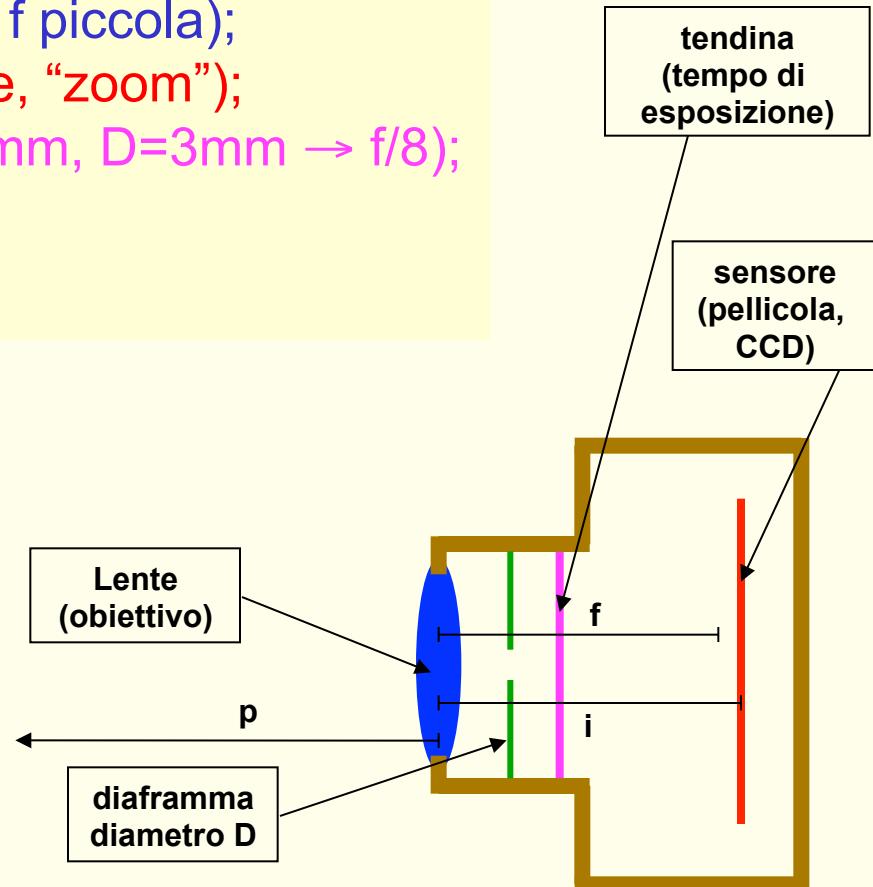
- Ex. lente convergente con oggetto “lontano” ;
- altri casi possibili (ex lenti divergenti) ;
- “costruzione dei raggi” ;
- ingrandimento $m = | i | / p$ (in questo caso $m > 1$).



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, rimpiccolita (variabile, “zoom”);
- “apertura” \equiv f / D del diaframma (ex. f=24mm, D=3mm \rightarrow f/8);
- tempo di esposizione (ex. 1/60 s).

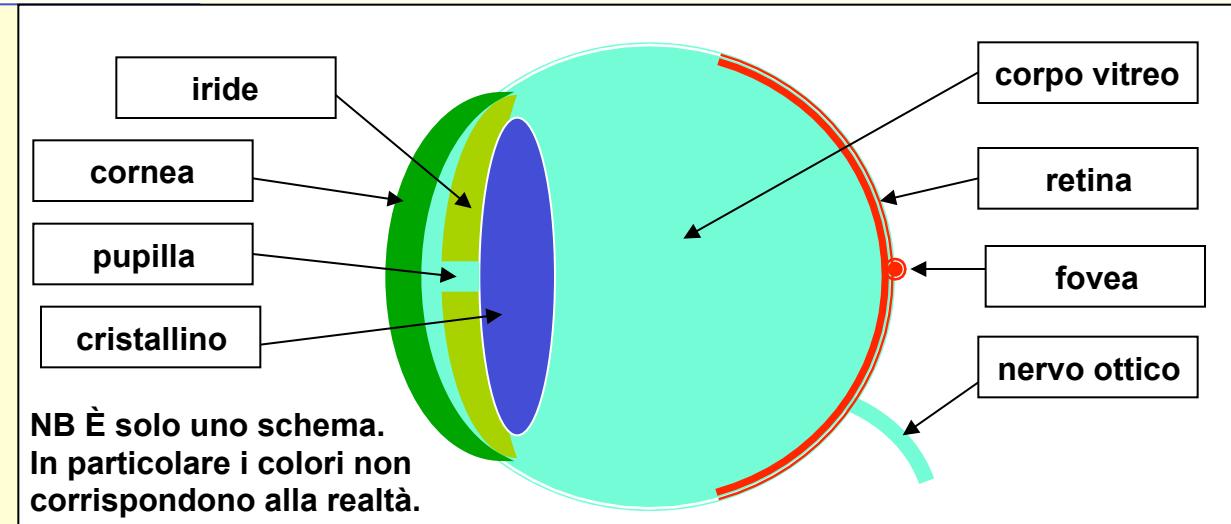
- se eq. non soddisfatta ($1/p + 1/i \neq 1/f$), oggetto “sfuocato” (immagine non sul sensore, pertanto confusa);
- apertura piccola (= grande profondità di campo), tempo di esposizione piccolo (= immagini non “mosse”), grana fine (= alta risoluzione) sono caratteristiche mutuamente contrastanti.



occhio umano

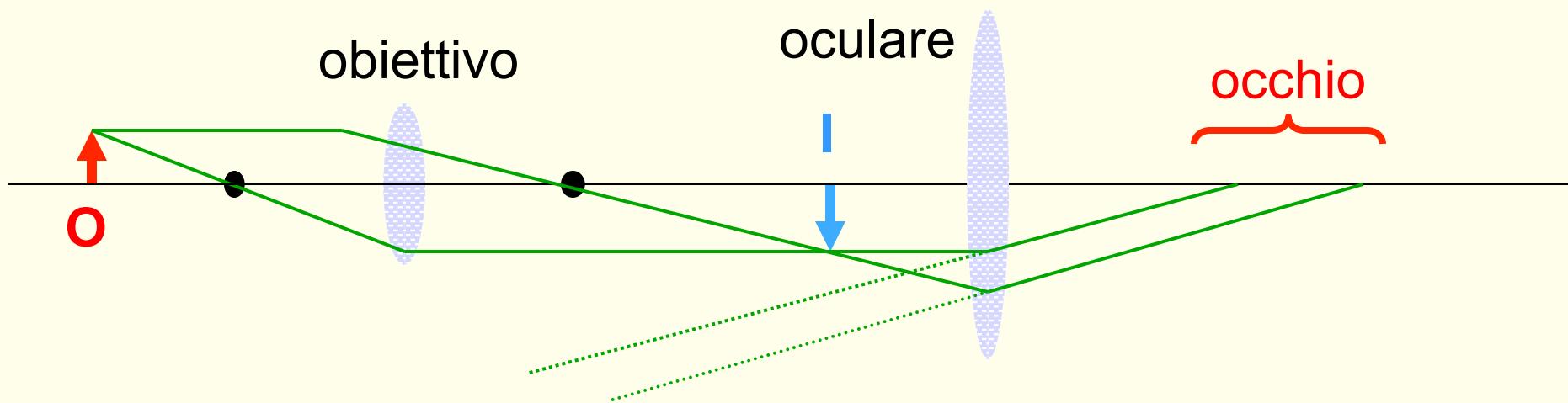
- “simile” alla macchina fotografica : lavora con “i” fisso, modificando “f” al variare di “p”;
- difetti di vista : miopia, presbiopia, ipermetropia, astigmatismo, ...
- correzioni (lenti per la vista).

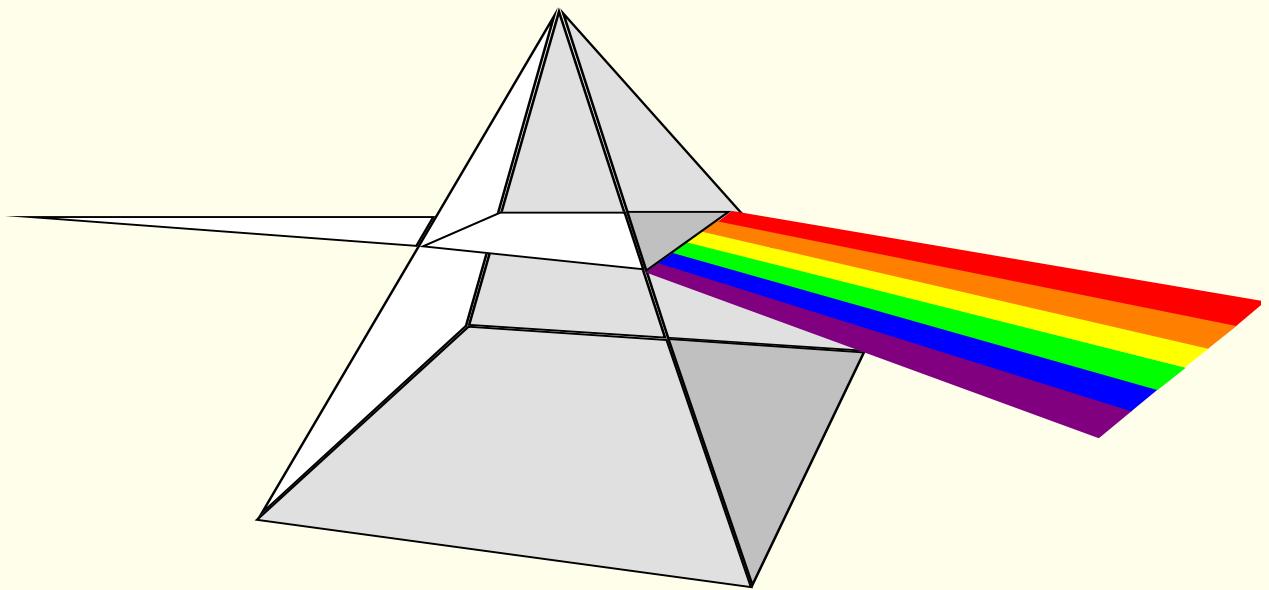
- lente = cornea ($n = 1.376$)
+ cristallino;
- diaframma = iride;
- pellicola/CCD = retina
+ fovea;
- cavo USB = nervo ottico.



microscopio

- due lenti : “obiettivo” + “oculare” ;
- l’immagine complessiva è virtuale e capovolta;
- ingrandimento globale $m = m_{\text{obiettivo}} \times m_{\text{oculare}}$.





Fine parte 5