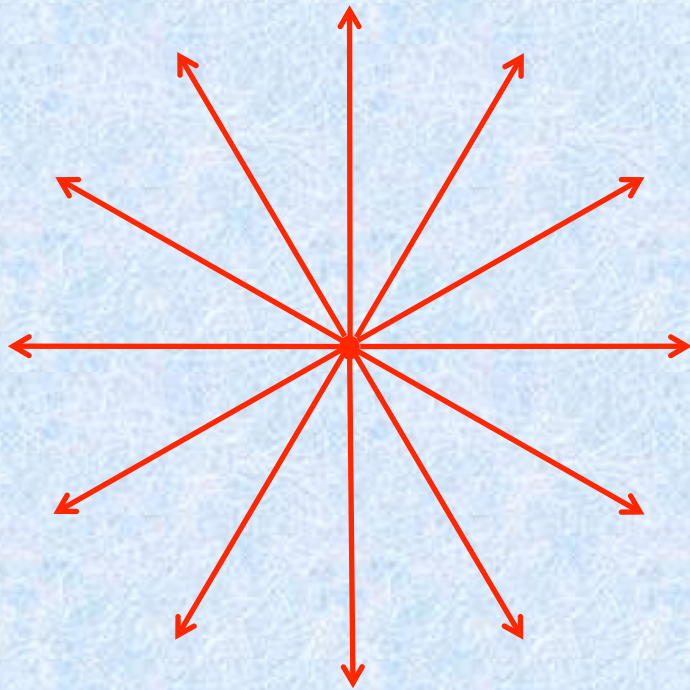


# OTTICA GEOMETRICA

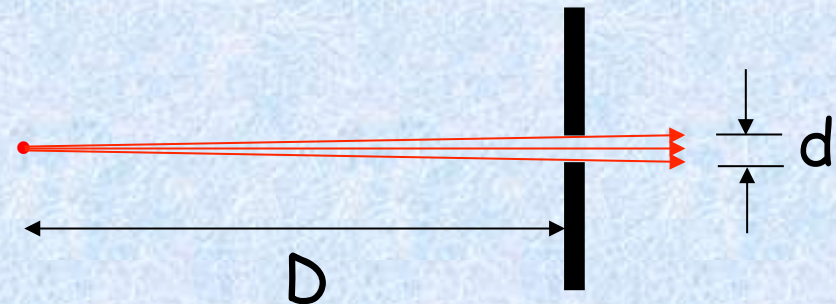
I parte

## IPOSTESI

La propagazione luminosa avviene attraverso sottili “pennelli” di luce detti “raggi luminosi” che si approssimano con una linea retta se il raggio si propaga nello stesso mezzo e a cui è possibile applicare le leggi della geometria euclidea.

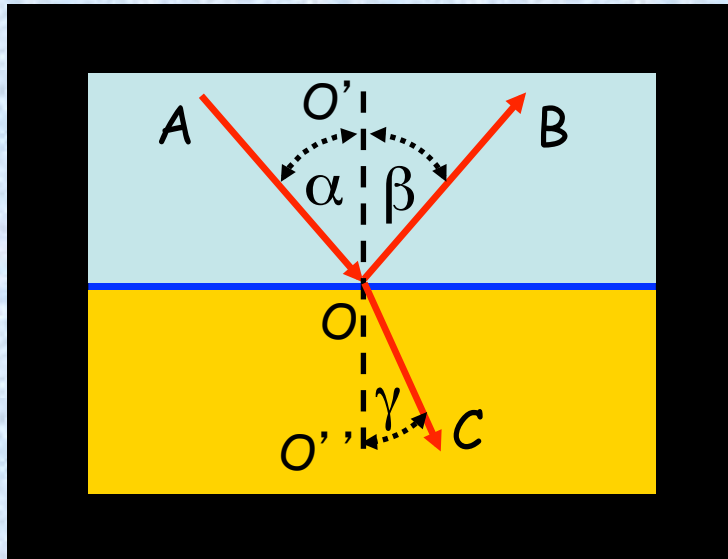


Sorgente puntiforme



Selezionando un fascio sufficientemente stretto con un diaframma posto a grande distanza dalla sorgente ( $D/d \gg 1$ ) si ottiene con buona approssimazione un fascio parallelo 2

## LE LEGGI DELLA RIFLESSIONE E DELLA RIFRAZIONE



mezzo 1



mezzo 2

AO = raggio incidente (luce monocromatica)  
O' OO'' = normale nel punto d'incidenza O  
 $\alpha$  = angolo di incidenza  
OB = raggio riflesso  $\beta$  = angolo di riflessione  
OC = raggio rifratto  $\gamma$  = angolo di rifrazione

1<sup>a</sup> legge della riflessione: AO, O' OO'', OB si trovano nello stesso piano

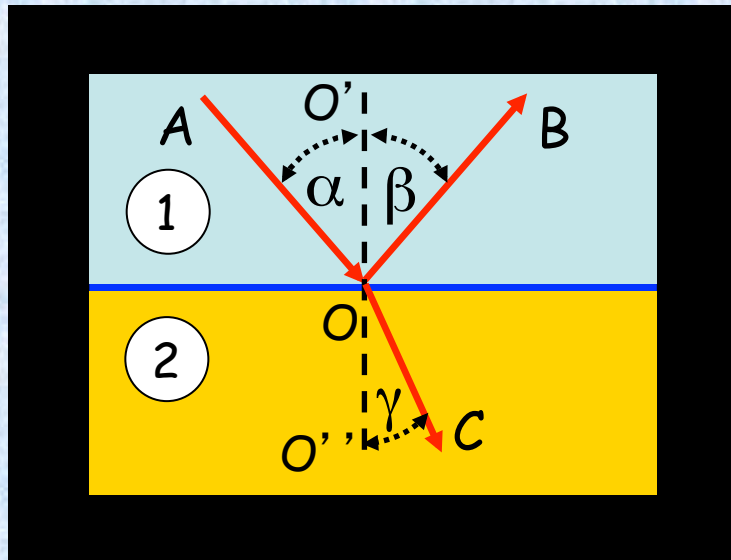
2<sup>a</sup> legge della riflessione:  $\alpha = \beta$

1<sup>a</sup> legge della rifrazione: AO, O' OO'', OC si trovano nello stesso piano

2<sup>a</sup> legge della rifrazione:  $\text{sen}(\alpha) / \text{sen}(\gamma) = n_{12}$

$n_{12}$  = costante che non dipende né da  $\alpha$  né da  $\gamma$ , ma solo dai due mezzi a contatto = **indice di rifrazione relativo** del mezzo 2 rispetto al mezzo 1

## INDICE DI RIFRAZIONE

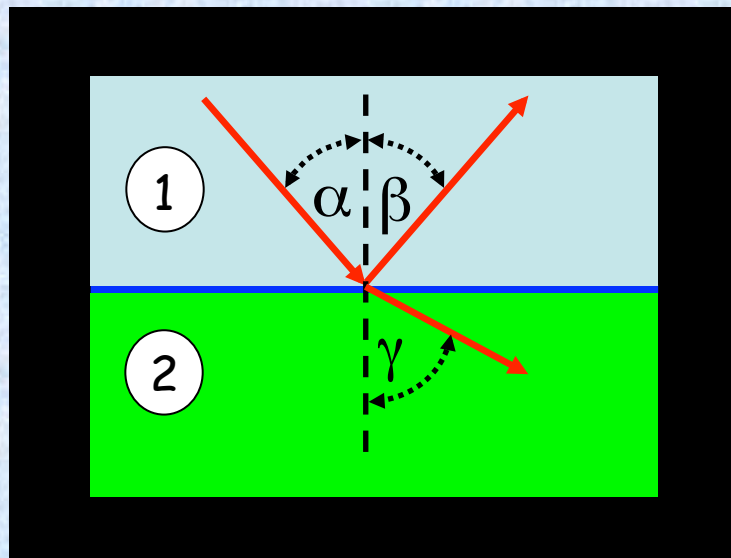


$$\sin(\alpha) / \sin(\gamma) = n_{12}$$

$$\alpha > \gamma \longrightarrow \sin(\alpha) > \sin(\gamma)$$

$$\sin(\alpha) / \sin(\gamma) > 1 \longrightarrow n_{12} > 1$$

Il raggio passa da un mezzo meno rifrangente ad uno più rifrangente.



$$\sin(\alpha) / \sin(\gamma) = n_{12}$$

$$\alpha < \gamma \longrightarrow \sin(\alpha) < \sin(\gamma)$$

$$\sin(\alpha) / \sin(\gamma) < 1 \longrightarrow n_{12} < 1$$

Il raggio passa da un mezzo più rifrangente ad uno meno rifrangente.

## INDICE DI RIFRAZIONE RELATIVO

$n_{12}$  = indice di rifrazione del mezzo 2 rispetto al mezzo 1 = indice di rifrazione per il passaggio della luce dal mezzo 1 al mezzo 2

$n_{21}$  = indice di rifrazione del mezzo 1 rispetto al mezzo 2 = indice di rifrazione per il passaggio della luce dal mezzo 2 al mezzo 1

$$n_{21} = 1 / n_{12}$$

## INDICE DI RIFRAZIONE ASSOLUTO

L'indice di rifrazione assoluto di un mezzo è l'indice di rifrazione relativo per il passaggio della luce dal vuoto al mezzo considerato.

L'indice di rifrazione assoluto del mezzo 1 è l'indice di rifrazione relativo per il passaggio della luce dal vuoto al mezzo 1:

$$n_1 = n_{v1}$$

## INDICE DI RIFRAZIONE ASSOLUTO

L'indice di rifrazione assoluto si può esprimere anche in funzione della velocità di propagazione della luce nel vuoto,  $c$ , e della velocità della luce nel mezzo,  $v_1$ :

$$n_1 = n_{v_1} = c / v_1$$

Poiché la velocità della luce nel vuoto è maggiore della velocità in ogni altro mezzo materiale, l'indice di rifrazione assoluto di qualunque sostanza è sempre maggiore di 1.

## RELAZIONE TRA INDICE DI RIFRAZIONE ASSOLUTO E RELATIVO

$$n_{12} = n_2 / n_1 \longrightarrow n_{12} = n_2 / n_1 = (c/v_2) (v_1/c) = v_1/v_2$$

La 2<sup>a</sup> legge della rifrazione si può scrivere

$$\text{sen}(\alpha) / \text{sen}(\gamma) = n_{12} = n_2/n_1 = v_1/v_2$$

## INDICE DI RIFRAZIONE DI ALCUNI MEZZI

Mezzo materiale	Indice	Mezzo materiale	Indice
Aria(c.n di T e p)	1.000029	Normale vetro crown	1.52
Acqua(20°C)	1.33	Cloruro di sodio	1.54
Fluoruro di sodio	1.33	Polistirene	1.55
Acetone	1.36	Bisolfuro di carbonio	1.63
Alcool etilico	1.36	Vetro flint denso	1.65
Soluzione di zucchero(30%)	1.38	Zaffiro	1.77
Quarzo fuso	1.46	Il più denso vetro flint	1.89
Soluzione di zucchero(80%)	1.49	Diamante	2.42

*Alcuni indici di rifrazione rispetto al vuoto per  $\lambda = 589 \text{ nm}$ .*

Un mezzo che ha un indice di rifrazione maggiore/minore di un altro si dice che è “otticamente più/meno denso” dell’altro.

## RELAZIONE TRA INTENSITA' INCIDENTE, RIFLESSA E RIFRATTA

Intensità di un raggio luminoso = energia trasportata dal raggio / (unità di tempo) (unità di area perpendicolare al fascio) = potenza trasportata dal fascio / unità di area perpendicolare al fascio

Unità di misura dell' intensità luminosa  $\longrightarrow$   $J / (s \ m^2) = W/m^2$

$I_0$  = intensità incidente

$I_{Rifl}$  = intensità riflessa

$I_{Rifr}$  = intensità rifratta

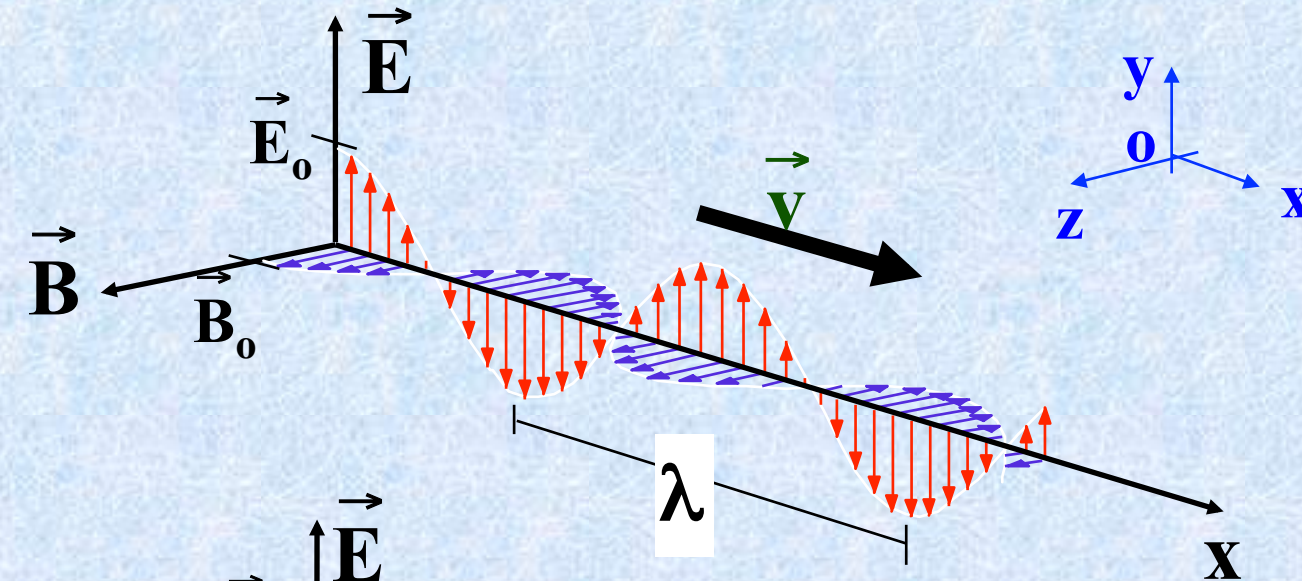
Per incidenza perpendicolare ( $\alpha \approx 0$ )

$$I_{Rifl}/I_0 = (n_2 - n_1)^2 / (n_2 + n_1)^2$$

$$I_{Rifr}/I_0 = (I_0 - I_{Rifl}) / I_0 = 1 - (I_{Rifl} / I_0) = 1 - (n_2 - n_1)^2 / (n_2 + n_1)^2$$

# ONDE ELETTROMAGNETICHE

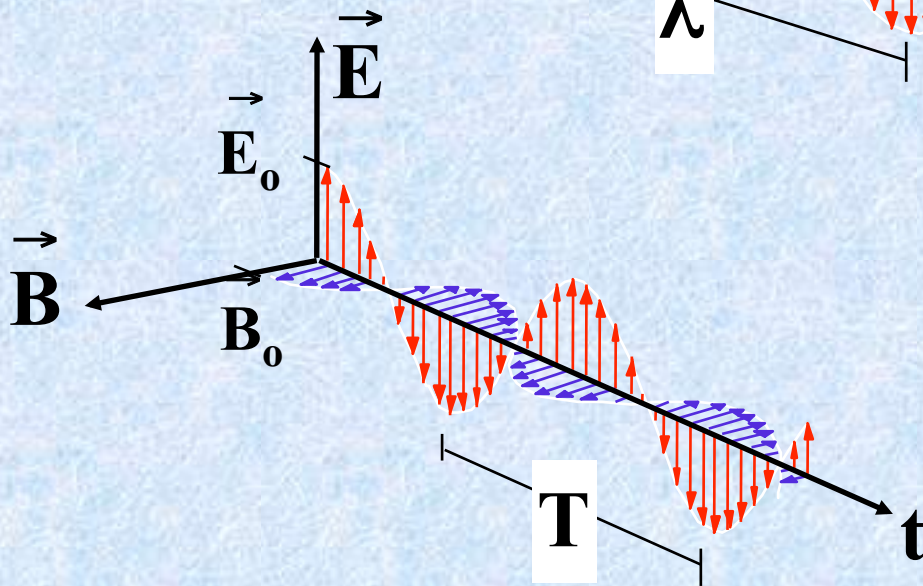
<http://www.pg.inf>  
fisme  
OndeElettromagnet  
,Diaposit



- $\vec{E} = \vec{E}(x,t)$

- $\vec{B} = \vec{B}(x,t)$

$$v = \frac{\lambda}{T}$$



Questa descrizione è valida nel caso di onde e.m. monocromatiche in cui i vettori  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  non cambiano nel tempo (onde em polarizzate linearmente).

Un'onda sonora in aria ha una frequenza di 300 Hz e viaggia alla velocità di 330 m/s. Quanto vale la sua lunghezza d'onda?

La relazione tra lunghezza d'onda  $\lambda$ , frequenza  $\nu$  e velocità di propagazione  $v$  (relazione di dispersione) è

$$\lambda \nu = v$$

$\lambda$  = lunghezza d'onda (m)<sup>(♣)</sup> S.I.

$\nu$  = frequenza = 1/T (sec<sup>-1</sup> = Hz) S.I.

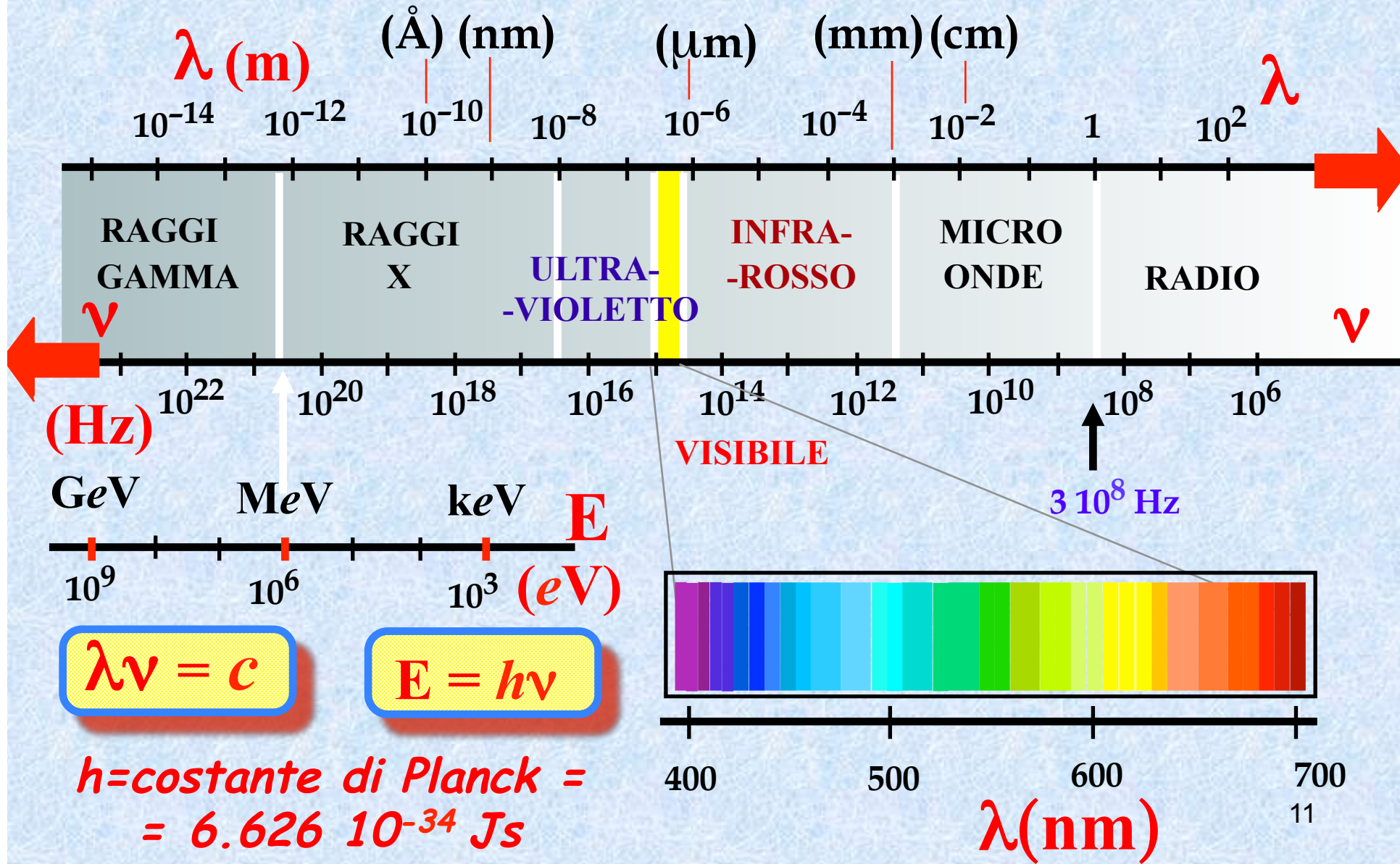
$v$  = velocità di propagazione (m/s) S.I.

$$\lambda = v / \nu = 330 \text{ m/s} / 300 \text{ Hz} = 1.1 \text{ m}$$

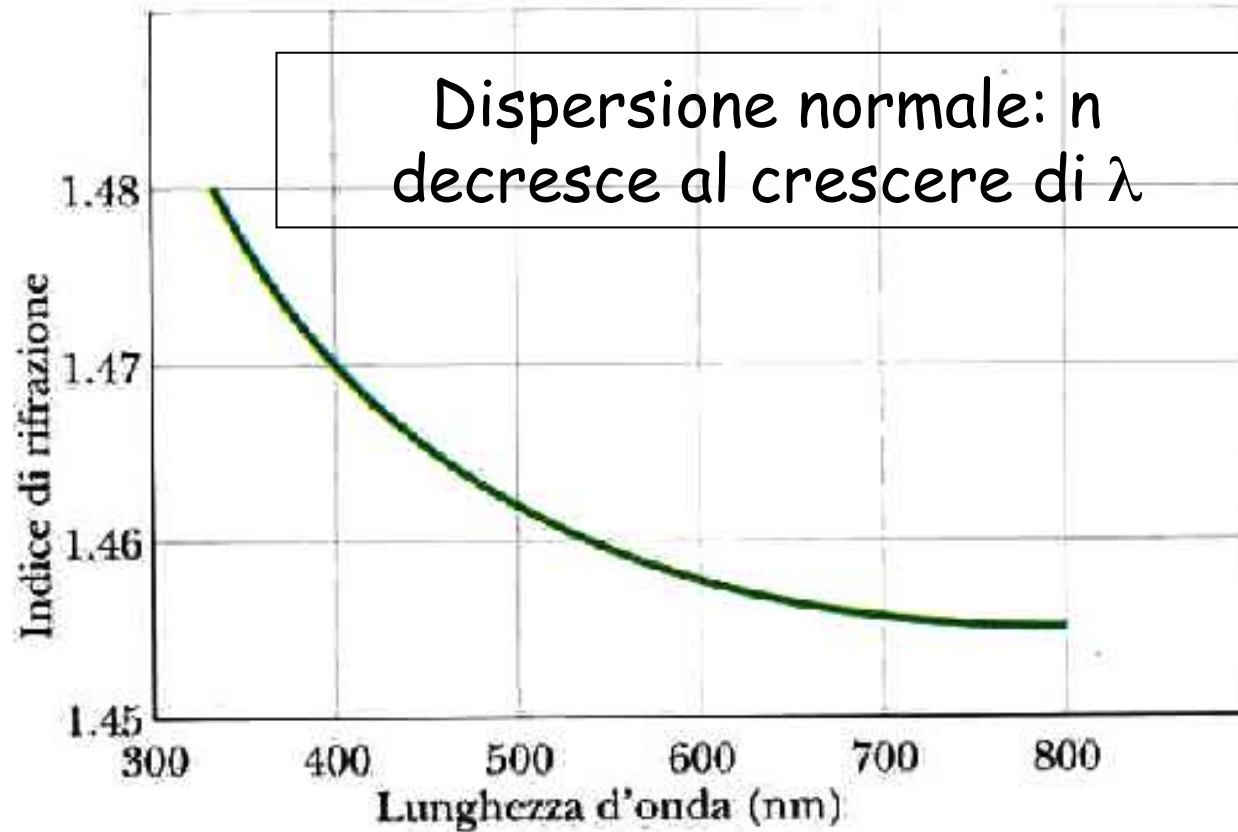
(♣) Altre unità di misura della lunghezza d'onda:

$\mu\text{m}$  (micron) =  $10^{-6}$  m; nm (nanometro) =  $10^{-9}$  m; Å =  $10^{-10}$  m

# SPETTRO ELETTROMAGNETICO



## DIPENDENZA DELL' INDICE DI RIFRAZIONE DALLA FREQUENZA DELLA RADIAZIONE

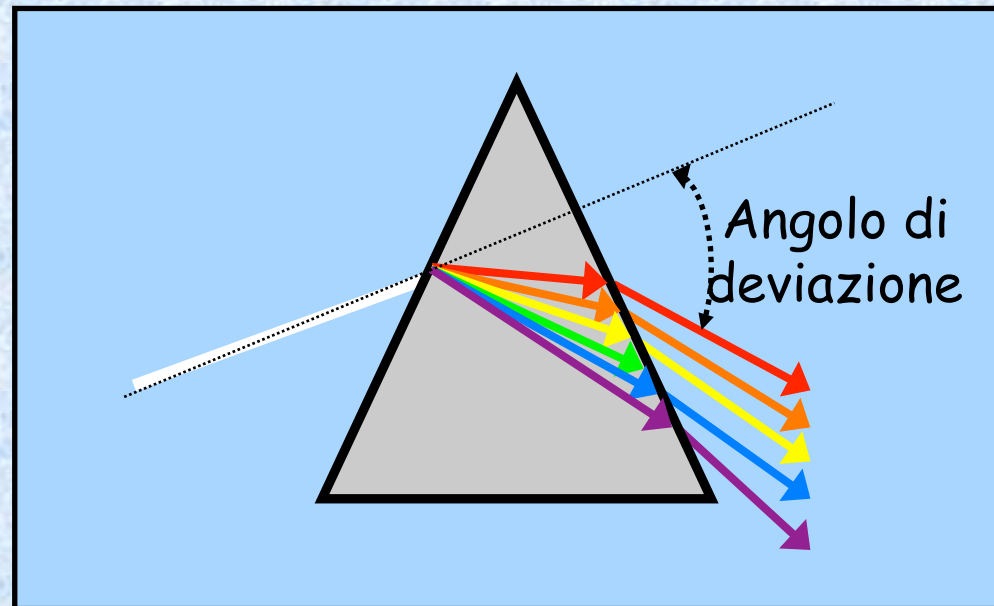


Indice di rifrazione del quarzo fuso in funzione della lunghezza d'onda

## DIPENDENZA DELL' INDICE DI RIFRAZIONE DALLA FREQUENZA DELLA RADIAZIONE

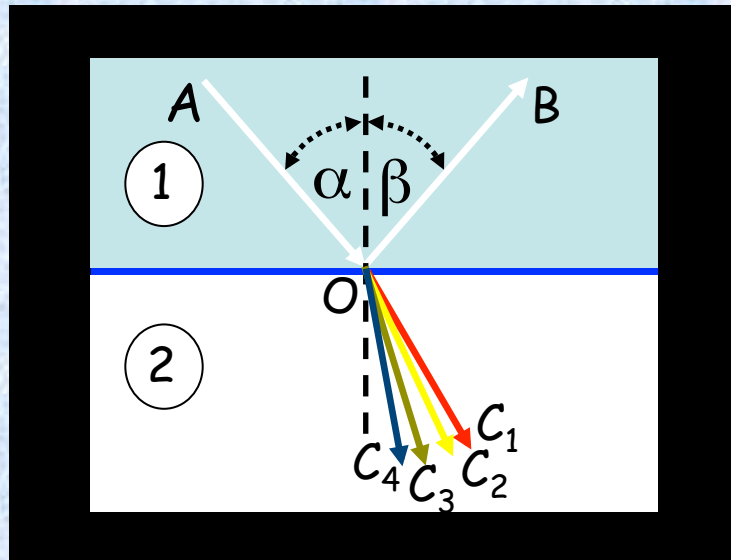
Nella dispersione **anomala** l'indice di rifrazione cresce al crescere di  $\lambda$ .

Lo stesso materiale può avere dispersione normale in un certo intervallo spettrale e dispersione anomala in un altro intervallo spettrale.



Prisma di materiale a dispersione normale: la radiazione rossa ha indice di rifrazione minore e quindi viene deviata di meno

## LA DISPERSIONE NORMALE DELLA LUCE



AO = raggio incidente (luce bianca)

OB = raggio riflesso (luce bianca)

OC<sub>1</sub> = raggio rifratto (luce rossa)

OC<sub>2</sub> = raggio rifratto (luce gialla)

OC<sub>3</sub> = raggio rifratto (luce verde)

OC<sub>4</sub> = raggio rifratto (luce blu)

Tutte le radiazioni di lunghezza d'onda diversa contenute nel raggio di luce bianca incidono con lo stesso angolo d'incidenza.

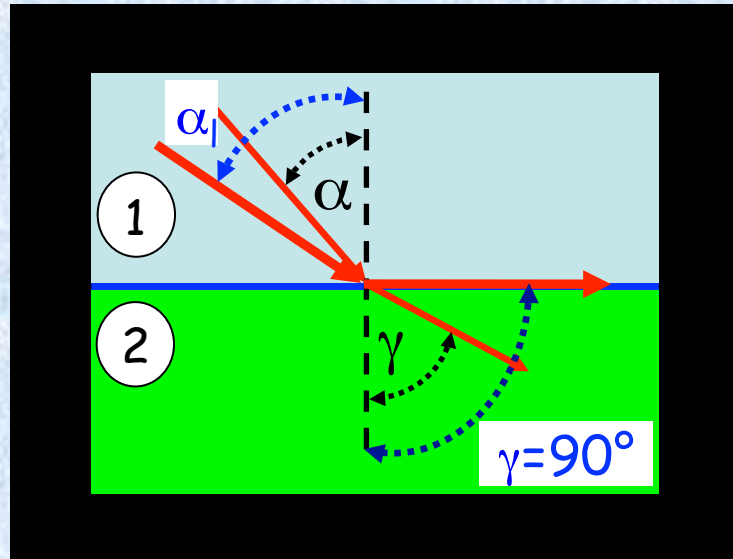
Per la radiazione rossa la legge della rifrazione dà

$$\text{sen } (\gamma) = \text{sen } (\alpha) / n_{12} (\lambda_{\text{rosso}})$$

dove  $n_{12} (\lambda_{\text{rosso}})$  rappresenta il valore dell'indice di rifrazione alla lunghezza d'onda della radiazione rossa.

Formule simili si possono scrivere per tutte le lunghezze d'onda. Esse mostrano che l'angolo di rifrazione  $\gamma$  è diverso per le diverse componenti monocromatiche contenute nel fascio di luce bianca (dispersione della luce).

## RIFLESSIONE TOTALE



Consideriamo un raggio luminoso monocromatico che passa da un mezzo più rifrangente ad uno meno rifrangente ( $n_1 > n_2$ ).



L'angolo di rifrazione,  $\gamma$ , sarà sempre maggiore dell'angolo d'incidenza,  $\alpha$ .

Ad un raggio rifratto con angolo di rifrazione  $\gamma = 90^\circ$  (rifrazione radente) corrisponde un angolo d'incidenza  $\alpha_1 < 90^\circ$ .

Un raggio incidente con un angolo  $\alpha > \alpha_1$  non può essere più rifratto, ma sarà riflesso con le stesse leggi della riflessione normale, ma senza perdite d'intensità (riflessione totale).

Il valore dell'angolo  $\alpha_1$  (angolo limite) si può ottenere dalla 2<sup>a</sup> legge della rifrazione applicata all'incidenza con l'angolo limite:

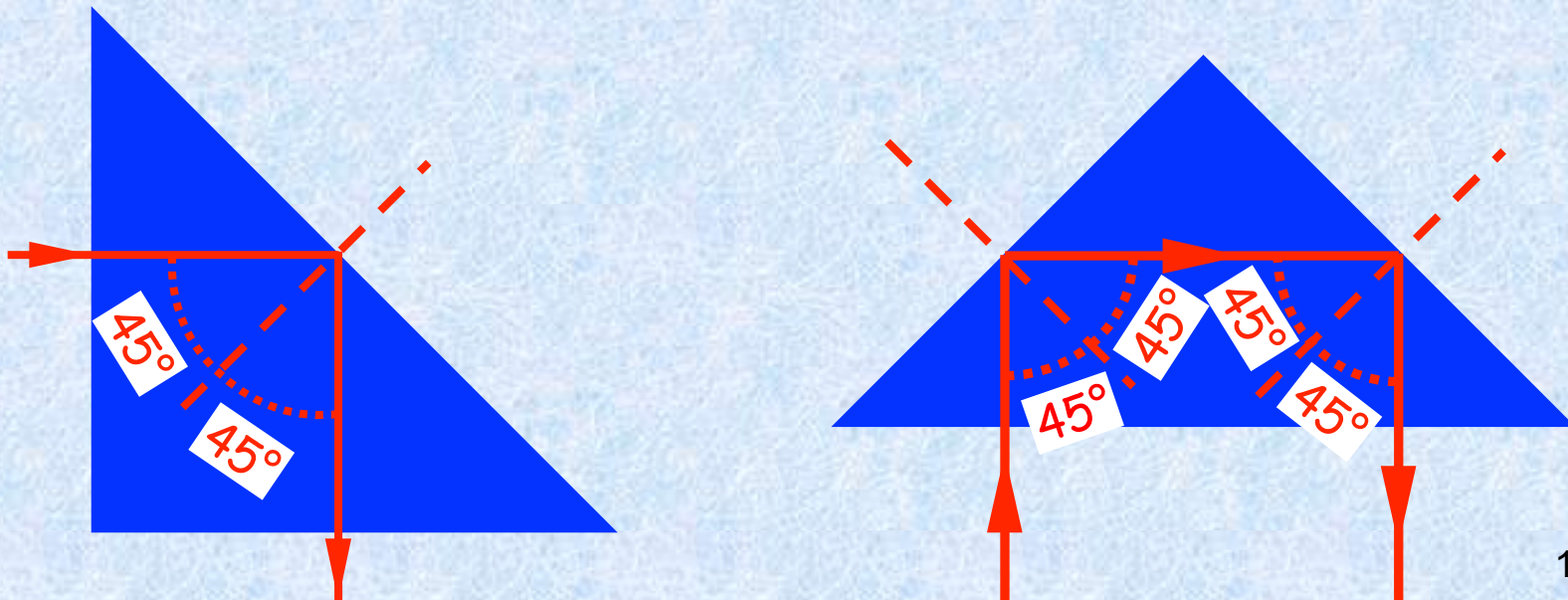
$$\left. \begin{array}{l} \text{sen } (\alpha) / \text{sen } (\gamma) = n_{12} \\ \alpha = \alpha_1 \quad \gamma = 90^\circ \end{array} \right\} \longrightarrow \text{sen } (\alpha_1) = n_{12} \longrightarrow \alpha_1 = \arcsen (n_{12})$$

## RIFLESSIONE TOTALE

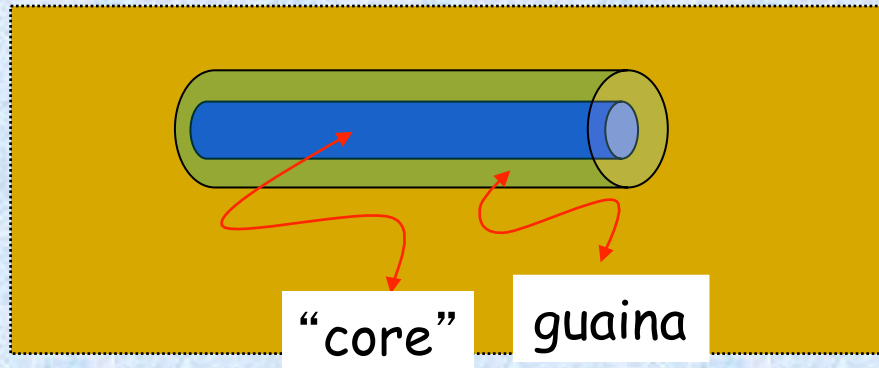
Nel passaggio della luce dal vetro ( $n = 1.5$  (vetro crown) -  $1.65$  (vetro flint)) all'aria ( $n \approx 1$ ) si può avere il fenomeno della riflessione totale per angoli d'incidenza maggiori dell'angolo limite  $\alpha_l = \arcsen(1/1.5) = 41.8^\circ$  per il vetro crown e  $\alpha_l = \arcsen(1/1.65) = 37.3^\circ$  per il vetro flint.

Angolo limite per il passaggio della luce dall'acqua ( $n=1.33$ ) all'aria ( $n \approx 1$ ) è  
 $\alpha_l = \arcsen(1/1.33) = 48.8^\circ$

## PRISMI A RIFLESSIONE TOTALE



## FIBRE OTTICHE

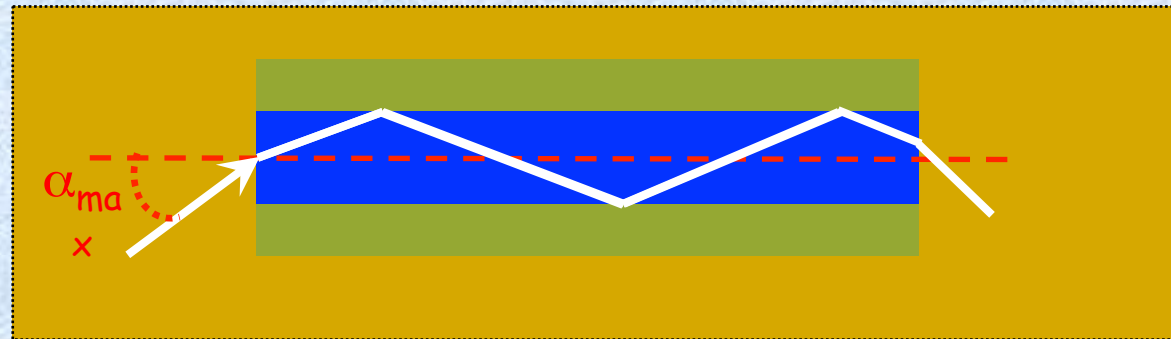


$n_c$  = indice di rifrazione assoluto del core

$n_g$  = indice di rifrazione assoluto della guaina

$$n_g/n_c \ll 1 \rightarrow \alpha_l = \arcsen(n_g/n_c) \ll 45^\circ$$

$\alpha_{max}$  = angolo di accettazione della fibra = angolo massimo che forma un raggio entrante nella fibra affinché possa uscire dall'altra estremità.



$$\text{Apertura numerica (NA)} = n_o \text{sen}(\alpha_{max}) = (n_c^2 - n_g^2)^{1/2}$$

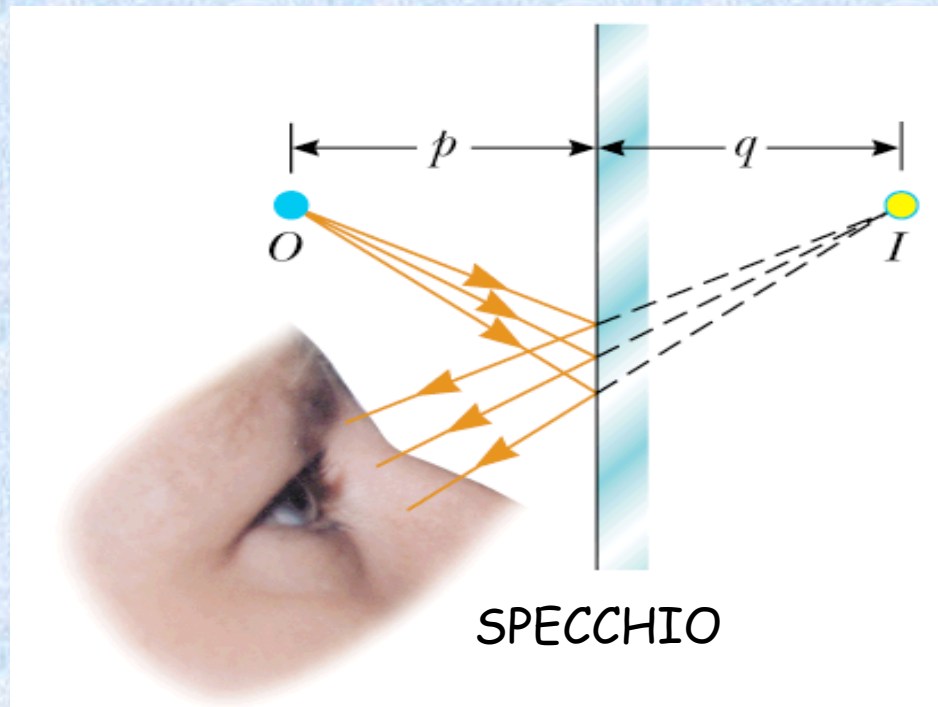
Generalmente

$$0.1 \leq NA \leq 1.0$$

$$NA = 1.0 \rightarrow$$

La radiazione incidente con qualsiasi angolo viene trasmessa dalla fibra.

## Specchio piano



$O$  = sorgente puntiforme

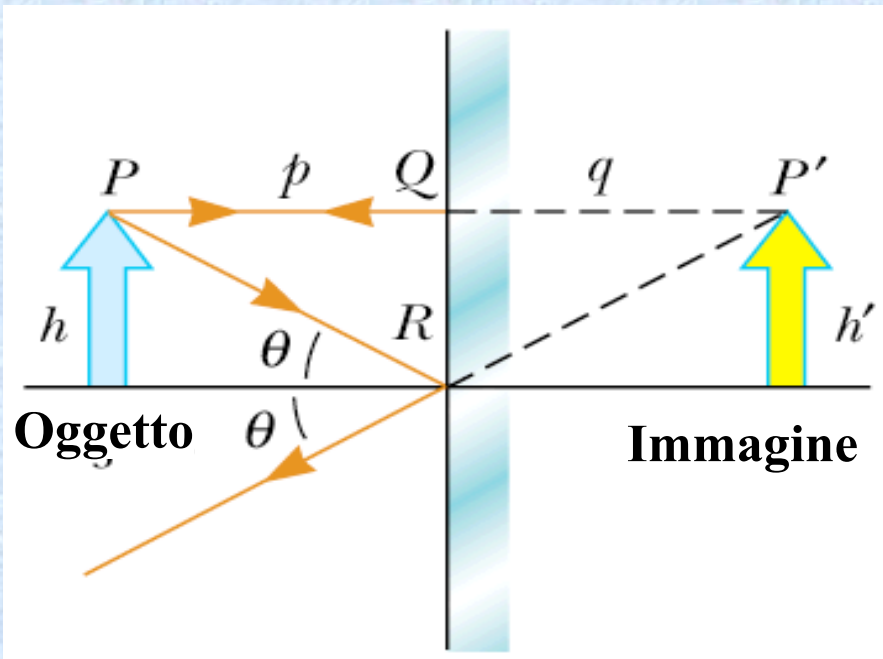
$I$  = immagine

I raggi riflessi divergono, mentre i loro prolungamenti si incontrano nel punto  $I$ .

$I$  è l'immagine del punto  $O$  e si forma in posizione simmetrica alla sorgente rispetto al piano dello specchio ( $p = q$ ).

L'immagine formata da uno specchio piano è un'immagine **virtuale**: in essa non c'è effettiva concentrazione di energia luminosa (**immagine reale**), ma tutto va come se i raggi luminosi provenissero dall'immagine, anche se essi non si incontrano effettivamente in essa.

## Specchio piano



$M$  = ingrandimento lineare =  
= dimensione lineare immagine /  
corrispondente dimensione lineare oggetto

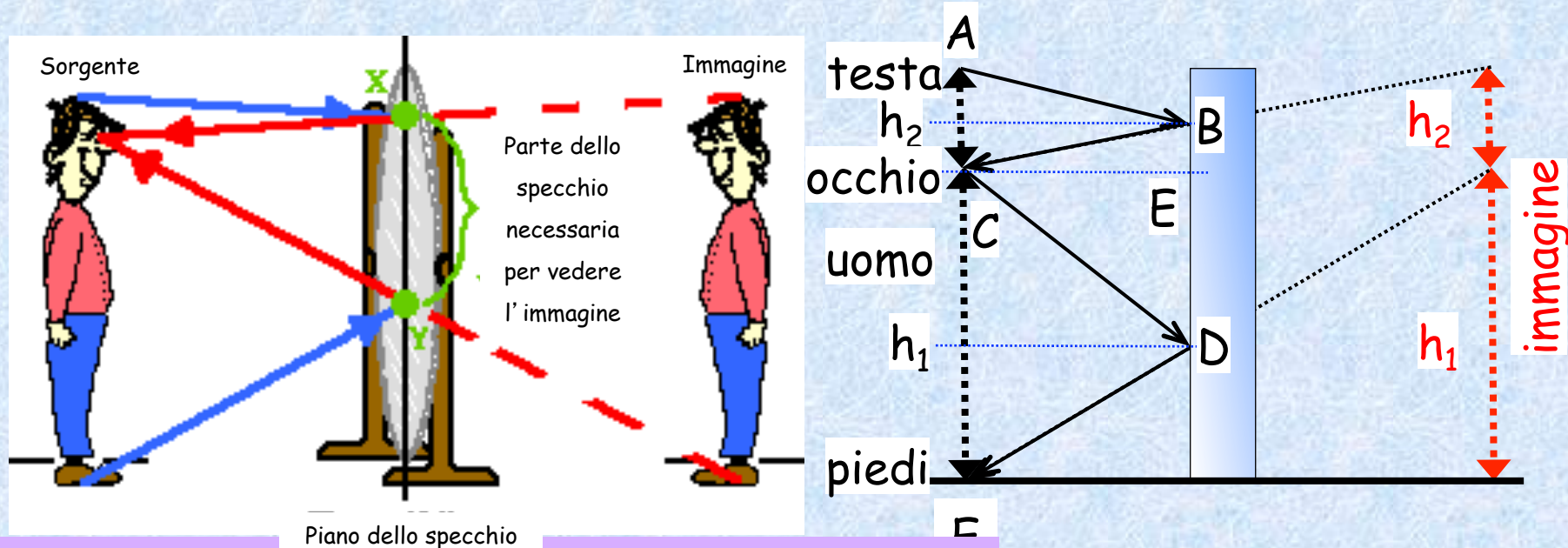
$$M \equiv \frac{\text{altezza immagine}}{\text{altezza oggetto}} = \frac{h'}{h} = \frac{q}{p} \left. \vphantom{\frac{h'}{h}} \right\} M = 1$$

$p = q$

Gli specchi piani hanno ingrandimento = 1

- La distanza immagine-specchio è uguale alla distanza oggetto-specchio.
- L'immagine non è ingrandita nè rimpicciolita, è virtuale e non capovolta.

Una persona di altezza 160 cm è in piedi di fronte ad uno specchio piano verticale. Quale deve essere l'altezza minima dello specchio affinché la persona si possa specchiare completamente?



[www.physicsclassroom.com/class/refln/U13l2d.cfm](http://www.physicsclassroom.com/class/refln/U13l2d.cfm)

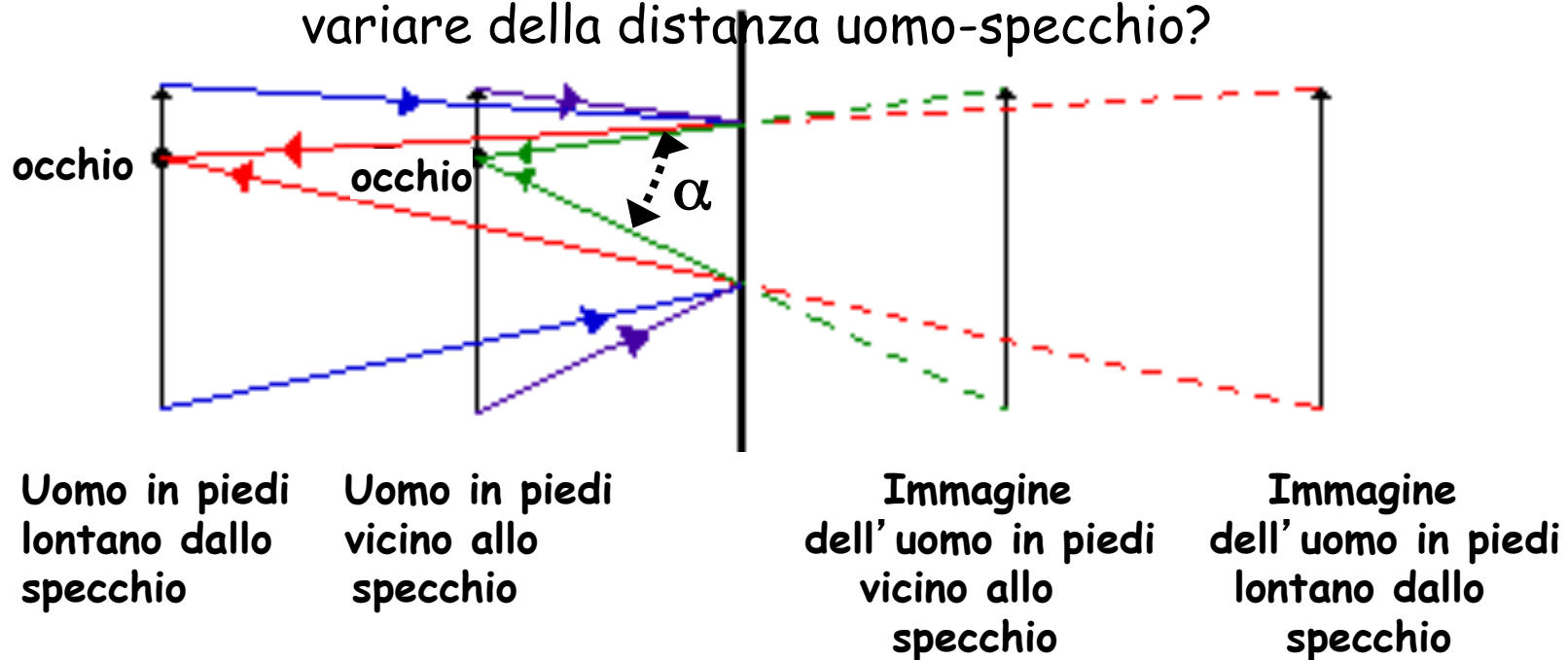
$h_1 =$  altezza base piedi - occhi     $h_2 =$  altezza occhi - sommità della testa

$h_1 + h_2 = h =$  altezza dell' uomo

Poiché i due triangoli ABC e CDE sono isosceli, il tratto di specchio BD necessario a formare l'immagine sarà

$$BD = BE + ED = h_2/2 + h_1/2 = (h_1 + h_2)/2 = h/2 = 80 \text{ cm}$$

La porzione di specchio necessaria a formare l'immagine cambia al variare della distanza uomo-specchio?

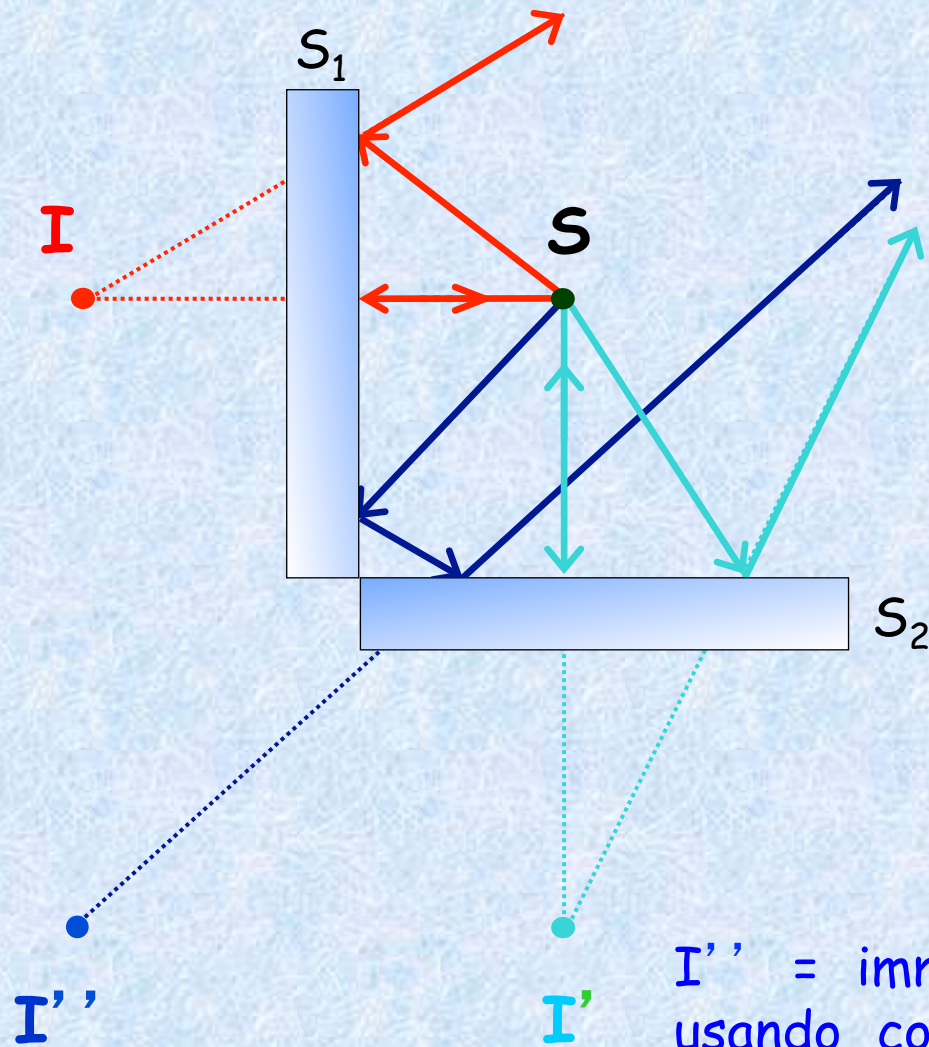


<http://www.physicsclassroom.com/class/refln/U13l2d.cfm>

La figura col ray-tracing dei raggi con l'uomo a diverse distanze dallo specchio mostra che la porzione di specchio necessaria a formare l'immagine non cambia al variare della distanza uomo-specchio, se si suppone che l'angolo di accettazione dei raggi luminosi da parte dell'occhio è di  $180^\circ$ .

Poiché l'angolo di accettazione dell'occhio (considerato fisso)  $\alpha_{\max}$  è di  $140^\circ$  (2.44 rad), questo pone un limite alla minima distanza  $d$  a cui, usando uno specchio di altezza  $h/2$ , si può vedere l'intera immagine della persona.

Una sorgente puntiforme si trova tra due specchi piani che formano un angolo di  $90^\circ$ . Quante sono le immagini che si formano?



S = sorgente puntiforme

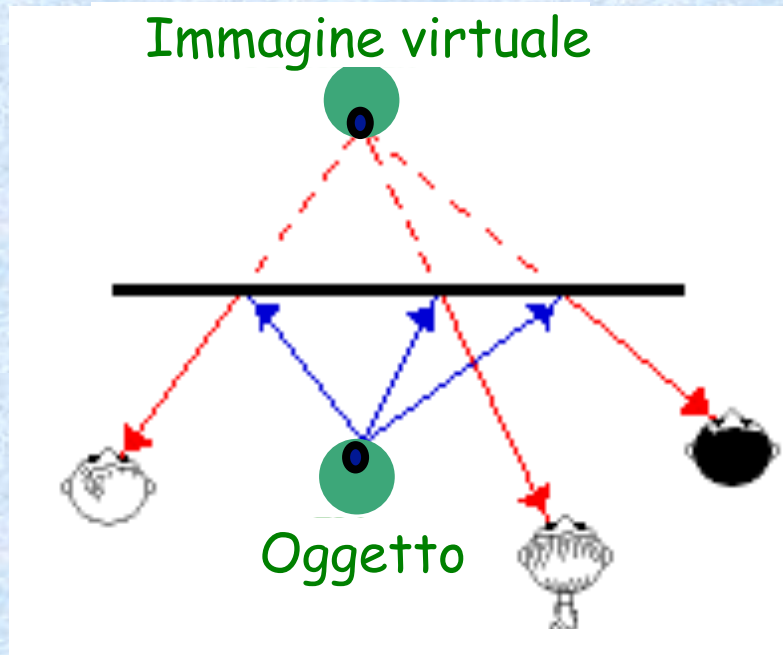
I = immagine della sorgente S prodotta dallo specchio  $S_1$  (raggi che si riflettono solo su  $S_1$ )

I' = immagine della sorgente S prodotta dallo specchio  $S_2$  (raggi che si riflettono solo su  $S_2$ )

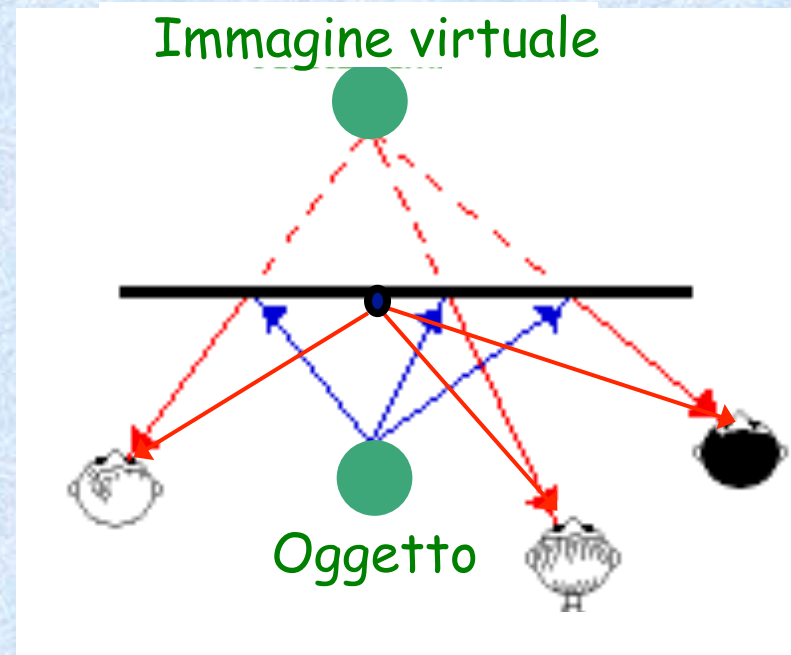
I'' = immagine prodotta dallo specchio  $S_2$  usando come sorgente l'immagine I (raggi che si riflettono prima su  $S_1$  e poi su  $S_2$ )

I'' = immagine prodotta dallo specchio  $S_1$  usando come sorgente l'immagine I' (raggi che si riflettono prima su  $S_2$  e poi su  $S_1$ )

Come si fa a capire, osservando l'immagine di un oggetto, se una macchiolina si trova sull'oggetto e sullo specchio?



Se la macchiolina si trova sull'oggetto la sua posizione rispetto all'oggetto non cambia.



Se la macchiolina si trova sullo specchio la sua posizione rispetto all'oggetto cambia.

<http://www.physicsclassroom.com/Class/refln/u13l2b.cfm>