

# Ottica


- **Newton** → teoria **corpuscolare** con cui spiega leggi di riflessione e rifrazione (con ipotesi errata). Respinse la **teoria ondulatoria** anche se spiegava passaggio luce attraverso lamine sottili perché vedeva luce propagarsi in linea retta.
- **Huygens e Hooke** → teoria **ondulatoria** spiega **riflessione e rifrazione**, introduce interferenza e diffrazione

# Ottica

- **Fresnel** (1788-1827) → esperimenti su interferenza e diffrazione .  
Luce è rettilinea dato la bassa  $\lambda$  della luce visibile
- **Focault** misura  $v_{\text{luce}}$  in acqua  $<$   $v_{\text{luce}}$  in aria
- Velocità luce in aria → **c** legata a costanti di teoria *em* di Maxwell
- Descrizione completa necessita di relatività e di meccanica quantistica. Luce è anche particella il fotone
- **c indipendente da sistema di riferimento, massima velocità di un segnale.** Molte misure da Roemer 1676 a Michelson etc

$$\mathbf{c} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad c = 299\,792\,457 \text{ m/s}$$

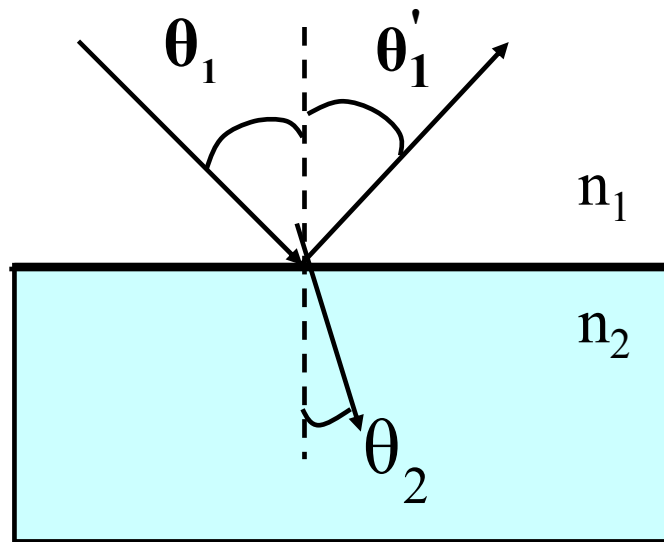
# Ottica

- Se ho onde di qualsiasi tipo che **incidono** su ostacolo piano si generano onde che si allontanano dall'ostacolo → **Riflessione**
- Esempio in superficie di **separazione tra aria e vetro, aria e acqua**
- **Parte di energia** viene **riflessa** e parte **trasmessa**
- Legge di **Snellius**   $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$
- $n_1 \cdot v_1 = n_2 \cdot v_2$

# Riflessione e Rifrazione

Un raggio di luce che si propaga in aria entra in acqua con un dato angolo di incidenza

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



$\theta_1$  = angolo di **incidenza**

$\theta_2$  = angolo di **rifrazione**

$\theta_1'$  = angolo di **riflessione**

l'indice di rifrazione **dell'acqua è  $n_2=1.33$**

l'indice di rifrazione per **l'aria è  $n_1=1$**

l'indice di rifrazione  **$n=c/v$**

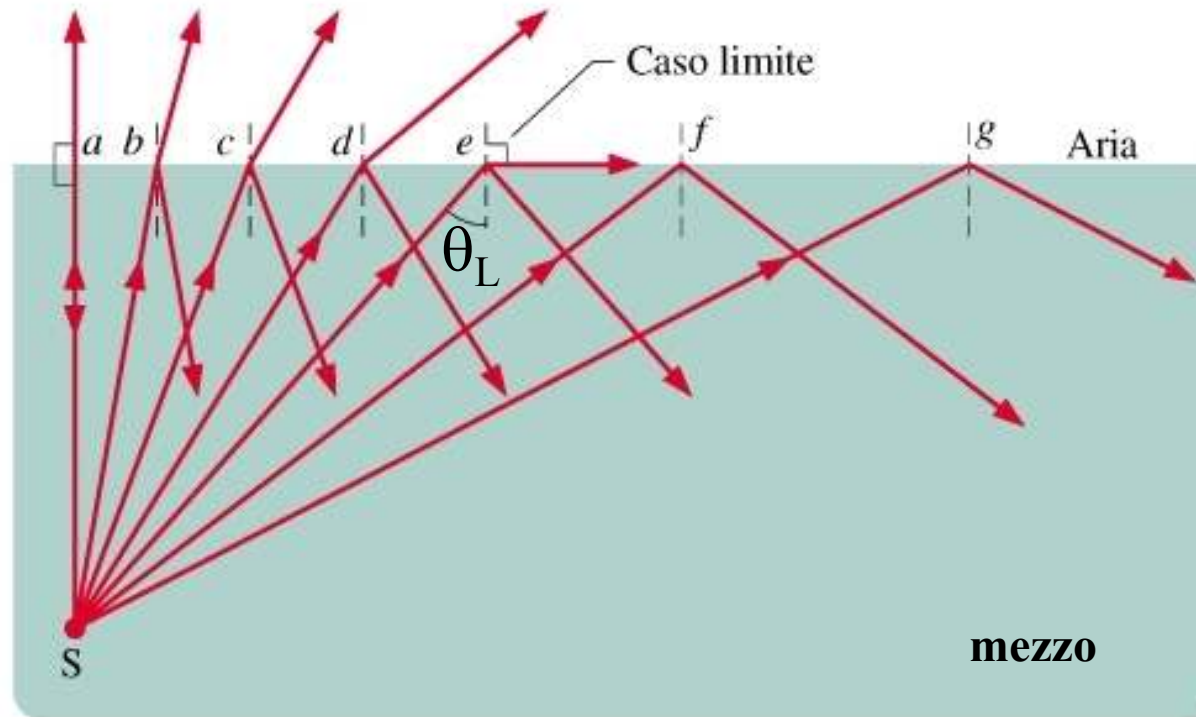
$c$  → velocità luce **in aria**

$v$  → velocità luce nel **mezzo**

Passando da un mezzo meno rifrangente a uno più rifrangente (cioè con indice di rifrazione più alto), **il raggio si avvicina alla normale.**

# Rifrazione totale

La **riflessione totale** della luce proveniente da una sorgente puntiforme S avviene per tutti gli angoli di incidenza maggiori dell'angolo limite  $\theta_L$ . In tal caso **non c'è luce rifratta**. Se invece il raggio incide con angolo pari all'angolo critico, il raggio rifratto segue la superficie di separazione tra i due mezzi.



# Rifrazione totale

La riflessione totale si può verificare solo **passando da un mezzo più rifrangente ad uno meno rifrangente** (cioè con indice di rifrazione più basso). **Qualsiasi mezzo ha indice di rifrazione > di quello dell'aria (= 1)**, per cui consideriamo il caso del raggio che tenta di passare dal mezzo all'aria e non viceversa.

Se l'angolo di incidenza è uguale all'angolo limite, allora l'angolo di rifrazione è pari a  $90^\circ$ :

$$n_1 \sin \theta_L = n_2 \sin 90^\circ$$

**Noto il valore di  $\theta_L$  si ricava il valore dell'indice di rifrazione del mezzo.**

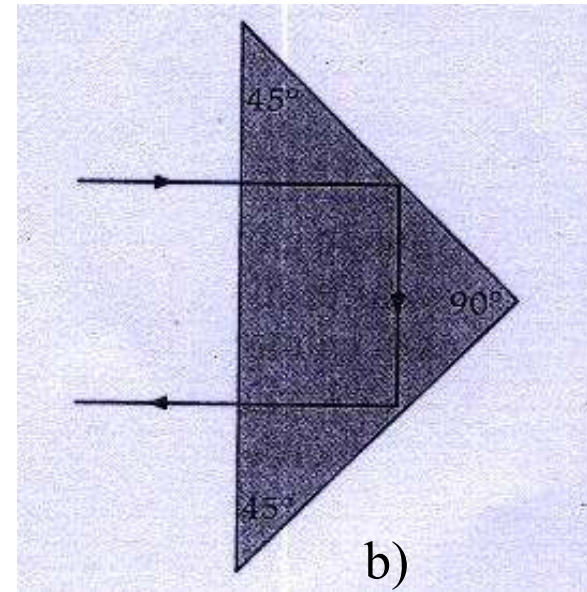
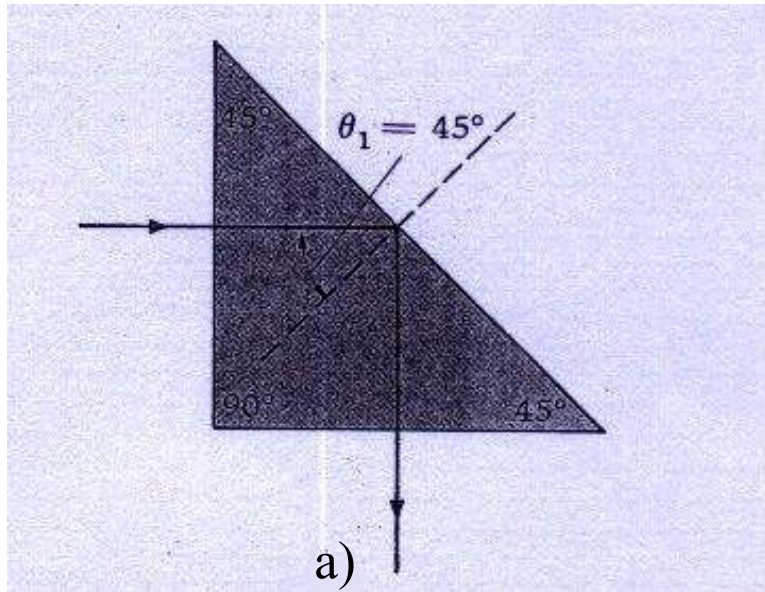
# Rifrazione



Passando da un mezzo meno rifrangente (aria) a uno più rifrangente (acqua), il raggio si avvicina alla normale, cioè **l'angolo del raggio rifratto è minore**. Per questa ragione un cucchiaio o una matita in un bicchiere d'acqua **sembrano piegati**.



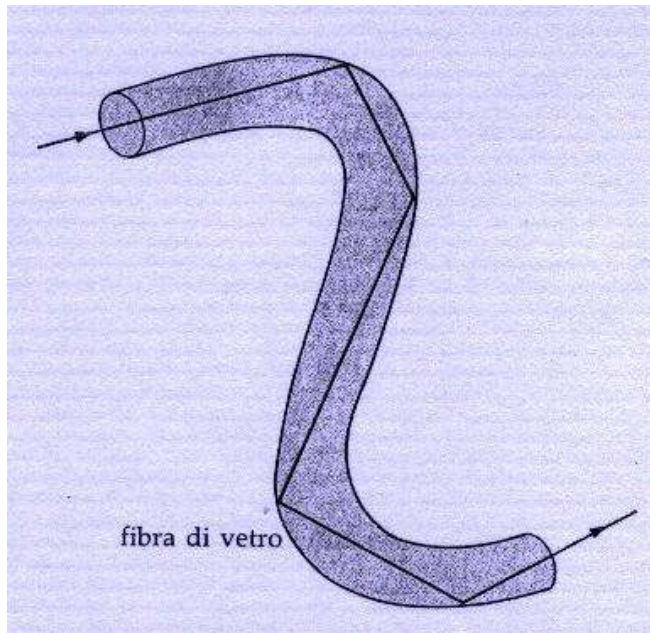
# Prismi



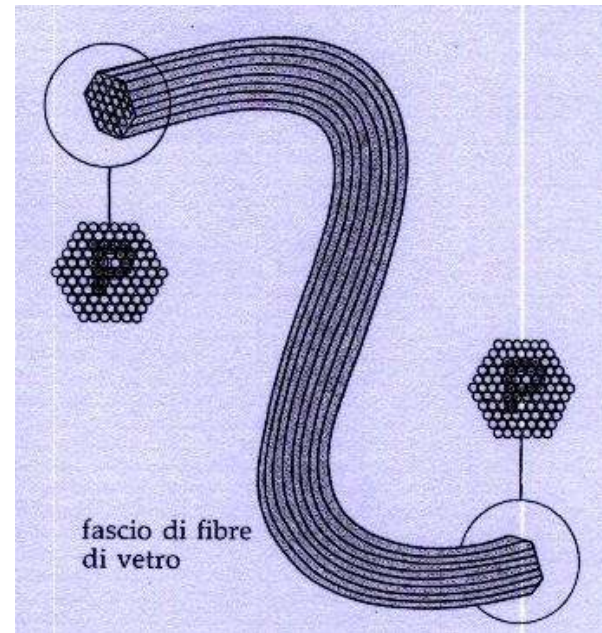
- a) La luce che entra attraverso una delle facce minori di un prisma di vetro  $45^\circ-90^\circ-45^\circ$  è riflessa totalmente nel prisma ed emerge attraverso l'altra faccia minore a  $90^\circ$  rispetto alla direzione del raggio incidente.
- b) La luce che entra attraverso la faccia maggiore del prisma viene riflessa totalmente due volte ed emerge in direzione opposta a quella della luce incidente.



# Fibre ottiche



**Una guida di luce:** la luce all'interno della guida incide sempre sotto un **angolo maggiore dell'angolo limite** e quindi non esce per rifrazione dalla guida

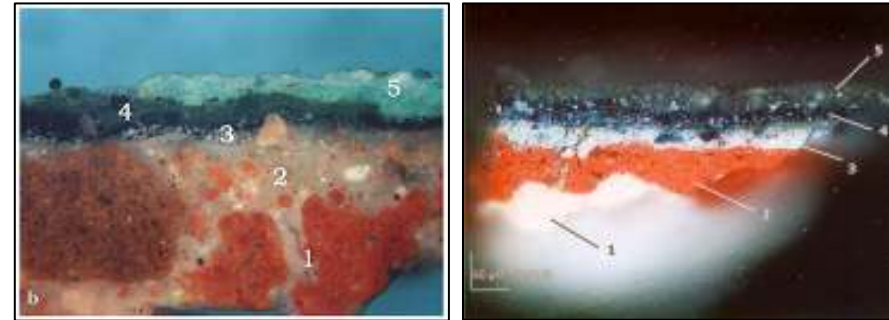


**Un fascio di fibre di vetro.**

La **luce proveniente dall'oggetto** è trasportata dalle fibre e forma **un'immagine dell'oggetto all'altra estremità.**

# Conservazione e restauro

Argomenti di fisica: ottica geometrica



Studio della composizione degli strati in un affresco  
Immagini ottenute per mezzo del **microscopio ottico**.



Filmato dell'endoscopia sul braccio destro della  
statua di Germanico  
Immagini ottenute per mezzo di **fibre ottiche**

# Tabella indice di rifrazione

---

**Tabella**

Indici di rifrazione per la riga gialla del sodio ( $\lambda = 589 \text{ nm}$ )

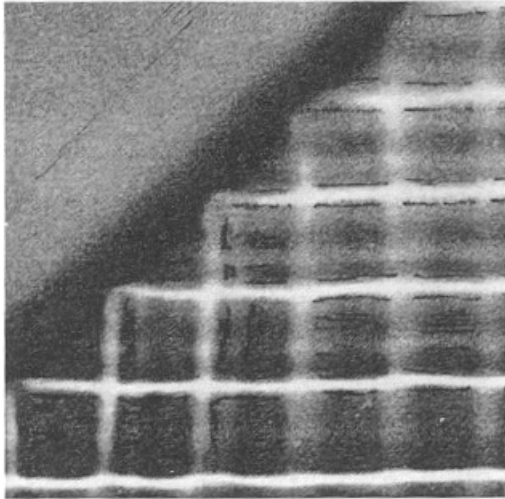
---

Sostanza	Indice di rifrazione
<b>Solidi</b>	
ghiaccio ( $\text{H}_2\text{O}$ )	1,309
fluorite ( $\text{CaF}_2$ )	1,434
salgemma ( $\text{NaCl}$ )	1,544
quarzo ( $\text{SiO}_2$ )	1,544
zircono ( $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ )	1,923
diamante (C)	2,417
<b>Vetri (valori tipici)</b>	
crown	1,58
flint leggero	1,58
flint medio	1,62
flint denso	1,66
<b>Liquidi a 20 °C</b>	
alcool metilico ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )	1,329
acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ )	1,333
alcool etilico ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )	1,36
tetracloruro di carbonio ( $\text{CCl}_4$ )	1,460
essenza di trementina	1,472
glicerina	1,473
benzolo	1,501
bisolfuro di carbonio ( $\text{CS}_2$ )	1,628

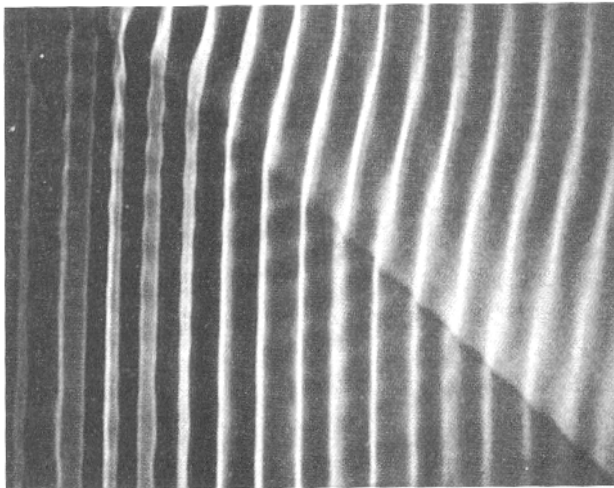
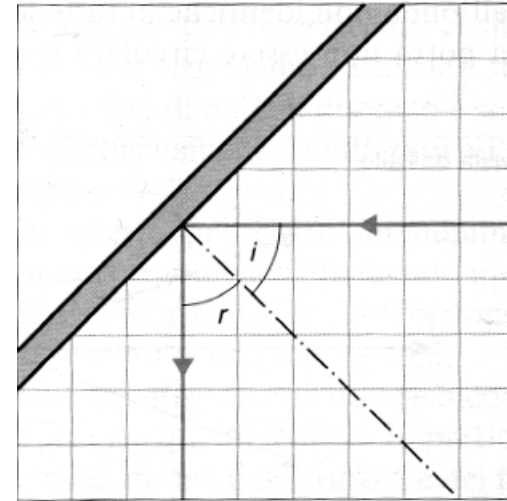
---

# Riflessione e Rifrazione

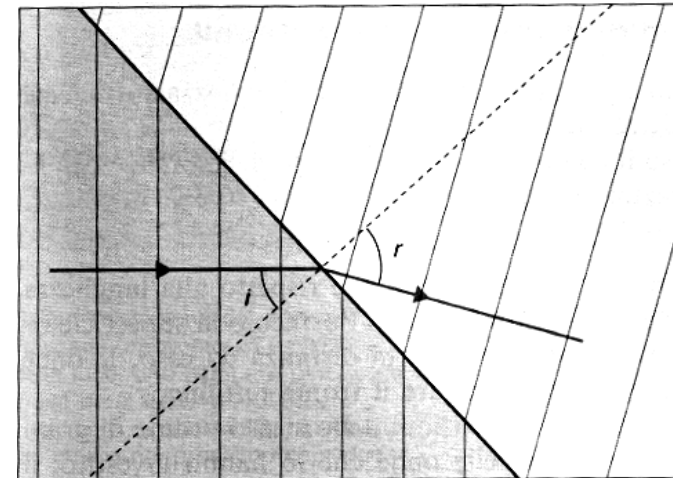
Urto contro superfici piane di dimensioni  $\gg \lambda$ :



Riflessione



Rifrazione



# Frequenza e indice di rifrazione

Se ho un'onda con una data frequenza in un mezzo, che passa in un altro mezzo, la frequenza resta costante e cambia la lunghezza d'onda.

Ricordando la relazione tra lunghezza d'onda e frequenza ho nel vuoto o aria (indice di rifrazione 1) e in un mezzo con indice di rifrazione  $n_1$  variabile a secondo della  $\lambda$

$$v\lambda = c \rightarrow \lambda = \frac{c}{v}$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{v} \text{ e } \lambda_1 = \frac{v_1}{v} \Rightarrow \frac{\lambda_0}{\lambda_1} = \frac{c}{v_1} = n_1$$

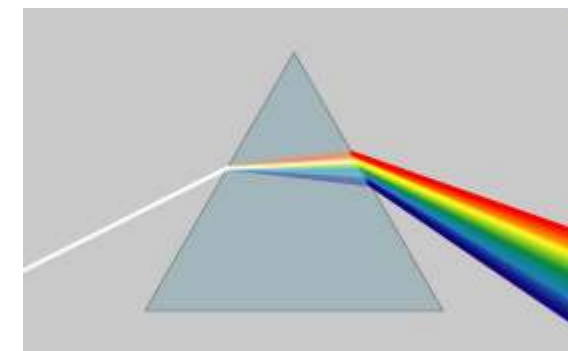
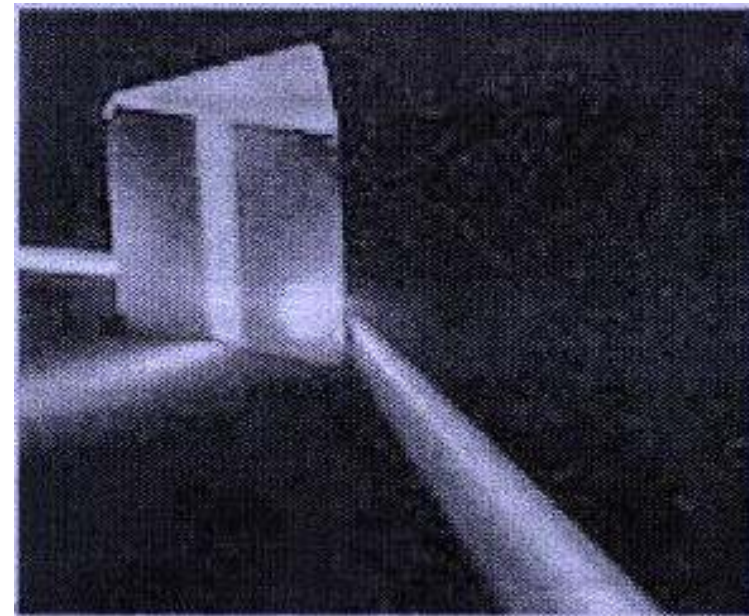
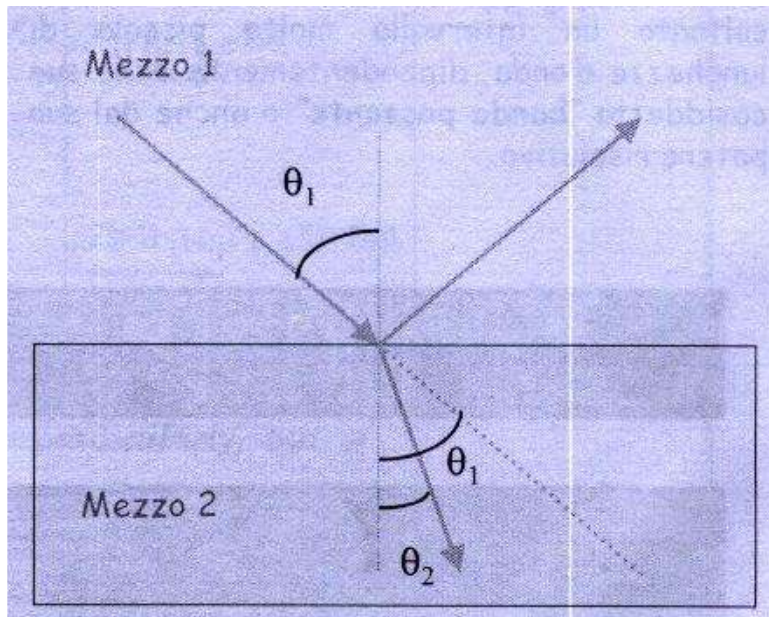
**Esempio :** Un fascio di luce gialla di lunghezza d'onda di 550 nm entra in una lastra di vetro. Qual è la lunghezza d'onda nel vetro se  $n_{\text{vetro}} = 1.58$  per questa lunghezza d'onda ?

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_1} = \frac{c}{v_1} = n_1 \Rightarrow \lambda_1 = \frac{\lambda_0}{n_1} = \frac{550 \cdot 10^{-9}}{1,58} = 348 \cdot 10^{-9}$$



# Dispersione della luce

L'indice di rifrazione dipende dalla lunghezza d'onda della luce incidente, quindi anche l'angolo di rifrazione dipende dalla lunghezza d'onda della luce incidente:  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$



Esempio: monocromatore



# OTTICA GEOMETRICA

Costruzione di immagini di determinati oggetti effettuata con strumenti ottici in cui la luce emessa dagli oggetti subisce *riflessione e rifrazione*

## Definizioni importanti per l'ottica geometrica

- **Oggetto:** corpo esteso o puntiforme che *emette luce* direttamente o *diffonde luce emessa da un altro corpo*.
- **Immagine:** figura puntiforme o estesa in cui *convergono i raggi luminosi* provenienti da oggetto che vengono seguiti attraverso gli strumenti ottici (lenti o specchi)
- **Punti coniugati:** coppia composta dal *punto oggetto* e dal relativo *punto immagine*
- **Immagine reale:** figura nei punti della quale si *incontrano fisicamente i raggi luminosi*
- **Immagine virtuale:** immagine per i punti della quale *passano i prolungamenti dei raggi* ma non i raggi stessi
- **Specchi:** superfici sulle quali avviene la sola *riflessione*
- **Diottri:** superfici su cui avviene la *trasmissione della luce* da un mezzo all'altro per *rifrazione*

# Specchi piani

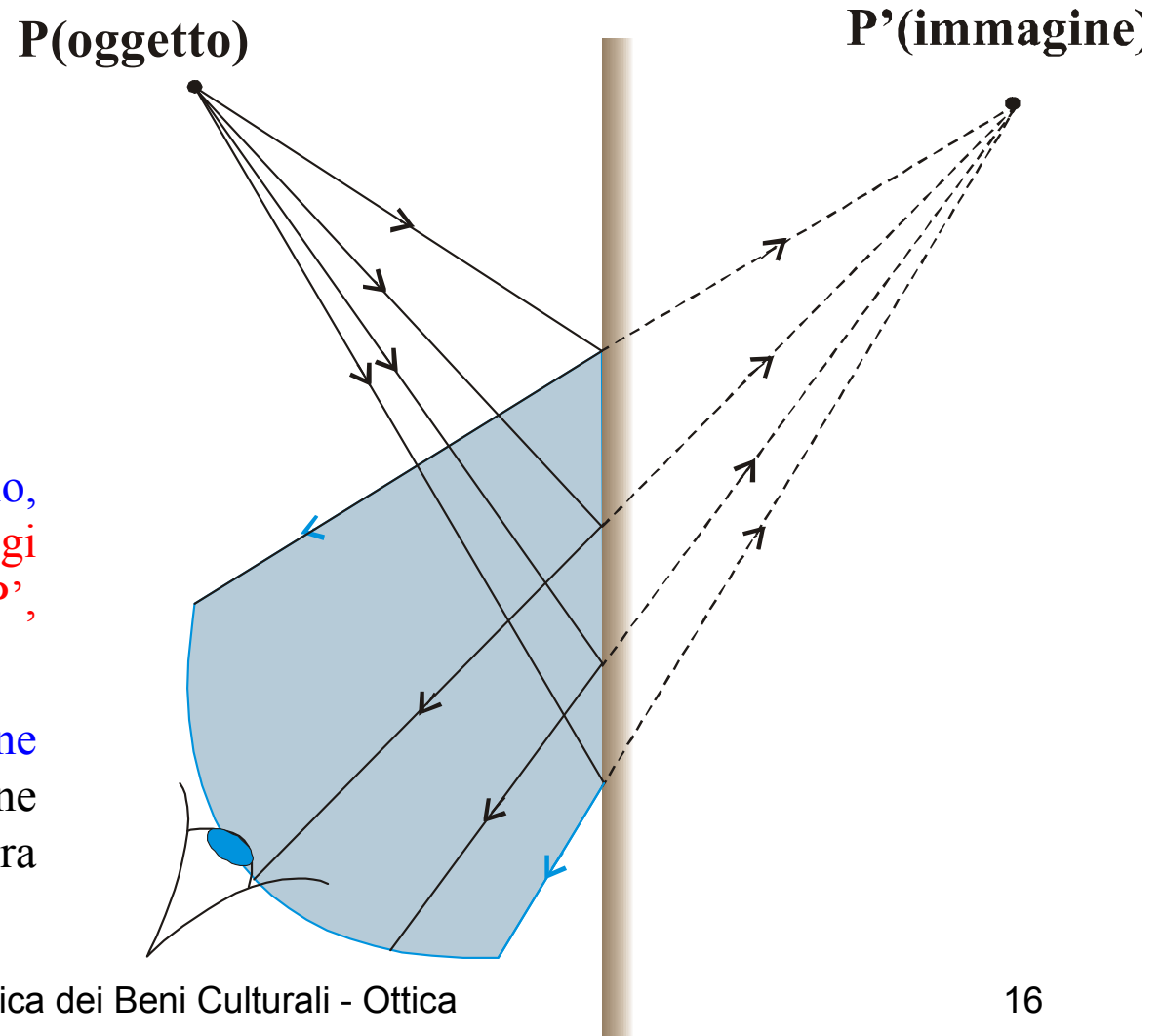
Basandosi sulla **legge della riflessione** si possono **ricostruire le immagini** da specchi piani

Dopo la riflessione, i raggi divergono esattamente **come se provenissero da un punto P'** posto dietro il piano dello specchio stesso

**Il punto P' è detto immagine del punto P**

Quando i raggi entrano **nell'occhio**, **non possono essere distinti dai raggi provenienti da un punto oggetto P'**, senza specchio.

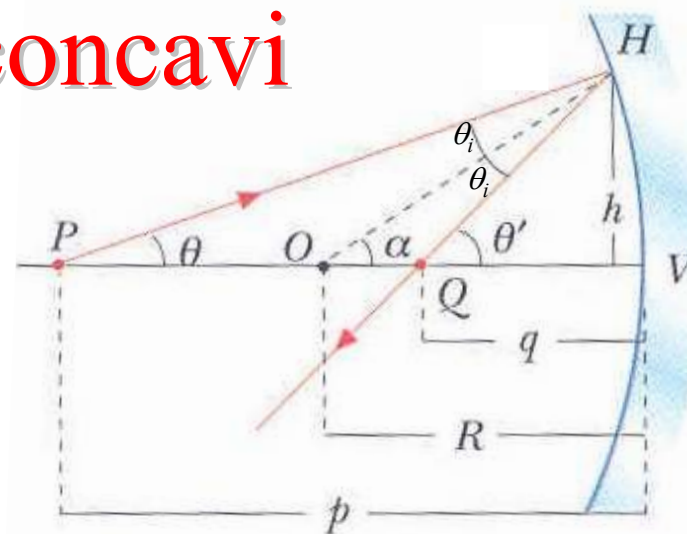
In questo caso si parla di **“immagine virtuale”** perché la luce non proviene realmente dall'immagine ma sembra solo provenire da essa.



# Specchi sferici concavi

Basandosi sulla **legge della riflessione** può essere ricavata **l'equazione dello specchio sferico concavo**

- **P: punto oggetto**
- **Q: immagine di P**
- **O: centro di curvatura dello specchio**
- **p: PV (distanza dell'oggetto)**
- **q: QV (distanza dell'immagine)**
- **R=OV**



In base alla proprietà secondo cui un **angolo esterno di un triangolo è uguale alla somma dei due angoli interni non adiacenti**

$$\Rightarrow \begin{cases} \theta + \theta_i = \alpha \\ \alpha + \theta_i = \theta' \end{cases} \Rightarrow \theta + \theta' = 2\alpha$$

Supponendo gli angoli molto piccoli  $\Rightarrow HV \sim h$

$$\begin{cases} h = PV \operatorname{tg} \theta \approx PV \theta = p \theta \\ h = QV \operatorname{tg} \theta' \approx QV \theta' = q \theta' \\ h = OV \operatorname{tg} \alpha \approx OV \alpha = R \alpha \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \theta = \frac{h}{p} \\ \theta' = \frac{h}{q} \\ \alpha = \frac{h}{R} \end{cases}$$

$$\frac{h}{p} + \frac{h}{q} = 2 \frac{h}{R}$$

$$\boxed{\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}}$$

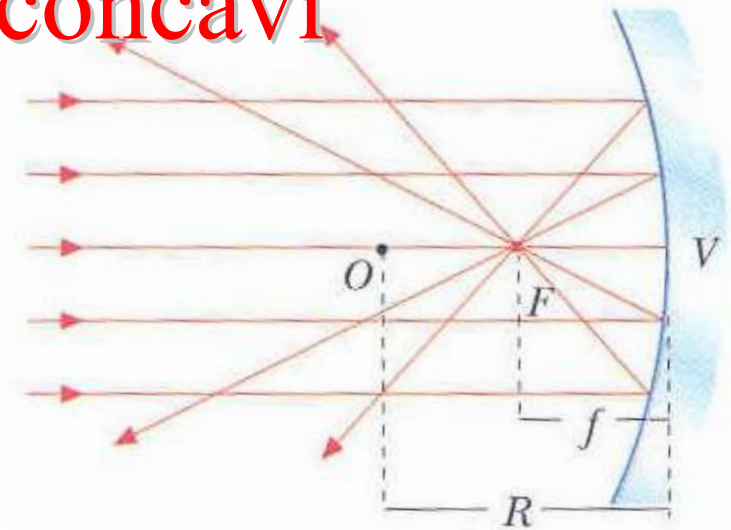
# Specchi sferici concavi

A partire dall'equazione dello specchio sferico concavo, è possibile studiare **dove si forma l'immagine al variare della posizione dell'oggetto**

Se  $p = +\infty$  (cioè i raggi incidenti sono paralleli all'asse dello specchio)

$$\Downarrow$$

dalla:  $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}$  risulta  $q = \frac{R}{2} = f$



Se i raggi incidenti sono paralleli all'asse dello specchio, i raggi riflessi si incontrano in un **punto F posto a distanza R/2 dal vertice, a metà strada tra O e V.**

Tale punto si chiama **fuoco dello specchio concavo.**

La distanza  $f = FV$  è detta **distanza focale**

Con la definizione di distanza focale, è possibile **riscrivere l'equazione dello specchio sferico:**

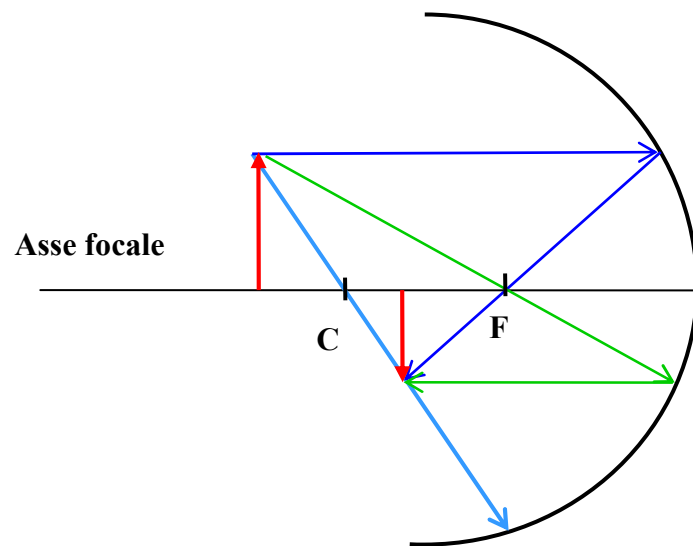
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

oppure se  $p \rightarrow s$  e  $q \rightarrow s'$  riscrivo

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

# Specchi sferici

## La costruzione delle immagini

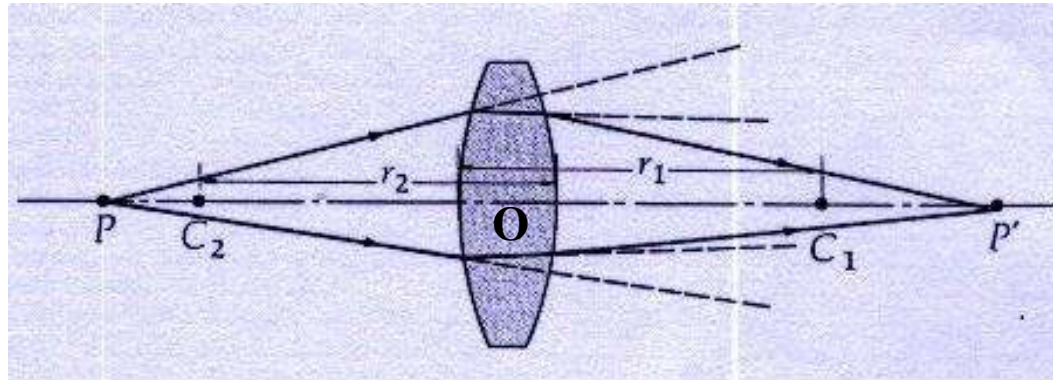


Nella costruzione delle immagini si usano tre raggi principali che sono i seguenti:

- ✓ *Il raggio parallelo all'asse:* si **riflette** passando per il **fuoco**
- ✓ *Il raggio passante per il fuoco:* si riflette **parallelamente all'asse**
- ✓ *Il raggio passante per il centro di curvatura:* incide perpendicolarmente allo specchio e quindi si riflette **nella direzione di incidenza**

# Lenti sottili

Si consideri una lente molto sottile con indice di rifrazione  $n_2=n$ , immersa in aria  $n_1=1$



Applicando le leggi di rifrazione separatamente alle due superfici della lente può essere ricavata l'equazione che collega la **distanza dell'immagine (OP=s)** alla **distanza oggetto (OP'=s')**, all'**indice di rifrazione (n)** al **raggio di curvatura** delle superfici della lente ( $r_1$  e  $r_2$ )

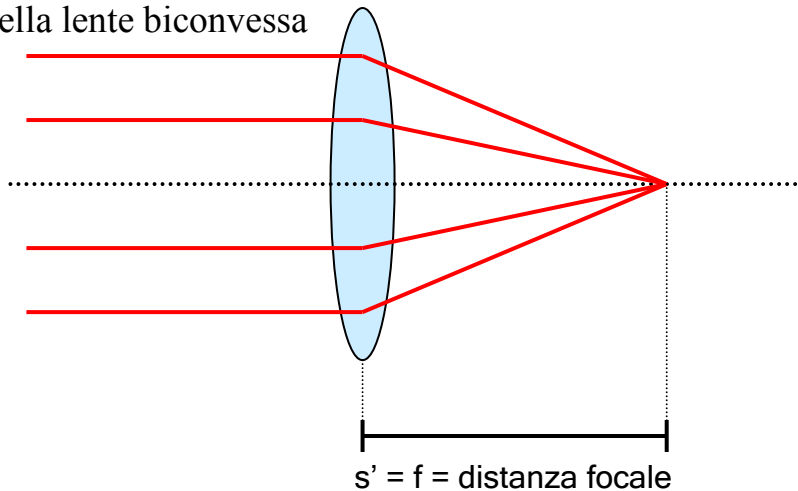
$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = (n-1) \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$



# Lenti sottili

Come per gli specchi, la **distanza focale** è il punto in cui convergono i raggi che provengono dall'infinito (distanza dell'oggetto,  $s$ , molto elevata). Nel caso della lente sottile si ricava ponendo nell'equazione precedente,  $s = \infty$ . In tal caso i raggi convergono nel fuoco, ovvero  $s' = f$ , che quindi risulta avere il valore:

Caso della lente biconvessa



$$\frac{1}{f} = (n - 1) \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

**Formula dei fabbricanti di lenti:**  
infatti, fornisce la distanza focale in funzione delle sue proprietà (raggi di curvatura ed indice di rifrazione)

Nota la distanza focale (caso più frequente) caratteristica di una lente, la legge delle lenti sottili diventa:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

**Formula delle lenti sottili**

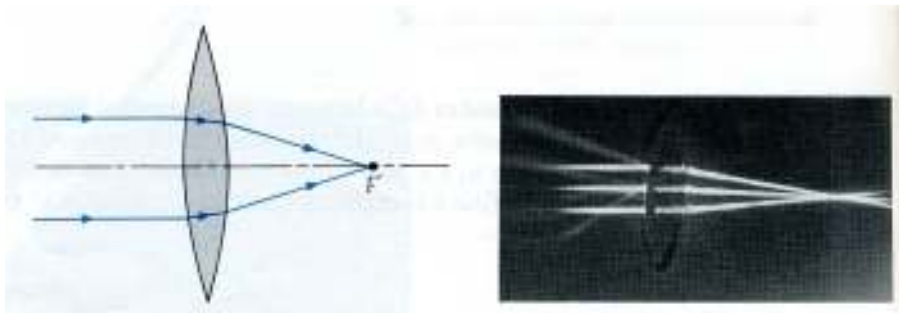
# Lenti sottili

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

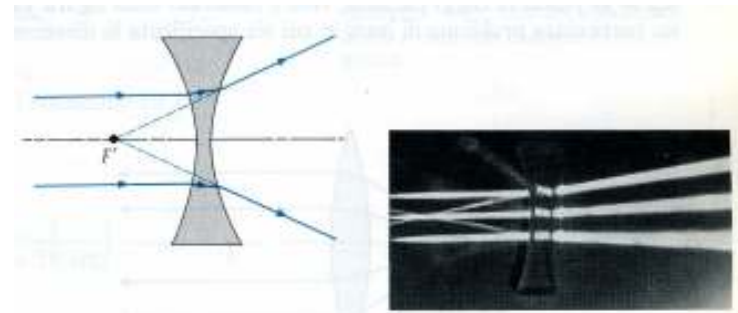
Tale legge è uguale a quella degli specchi **eccetto per le convenzioni sui segni**.

**$s'$  è positiva se l'immagine è dal lato di trasmissione della lente, cioè dal lato opposto a quello d'incidenza della luce.**

Le lenti biconvesse sono convergenti, mentre lenti biconcave sono divergenti.



Lente biconvessa (convergente). I raggi provenienti dall'infinito convergono nel fuoco. Nella fotografia si possono anche vedere i raggi riflessi da ciascuna superficie della lente.



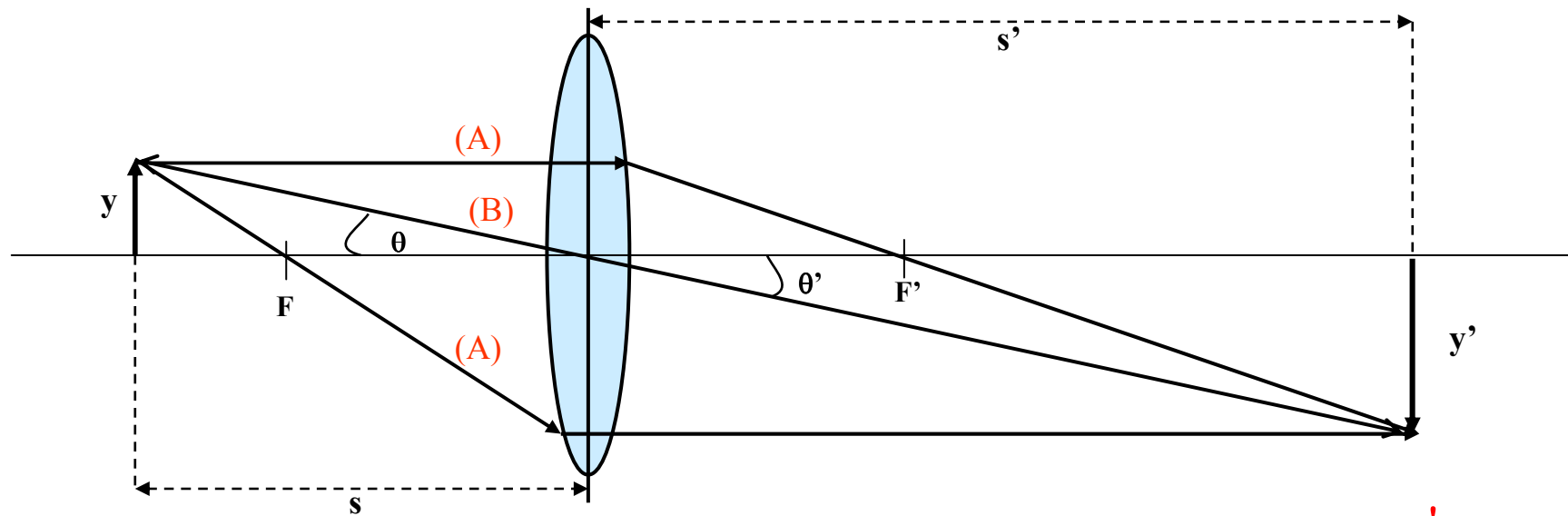
Lente biconcava (divergente). I raggi provenienti dall'infinito divergono come se provenissero dal fuoco. Nella fotografia si possono anche vedere i raggi riflessi da ciascuna superficie della lente.

# Lenti sottili (simmetriche)

La costruzione oggetto-immagine ed il relativo ingrandimento lineare trasversale  $G$  sono i seguenti (considerando un oggetto alto  $y'$ ):

Il fascio parallelo all'asse ottico (dall'infinito) converge nel fuoco e viceversa (A)

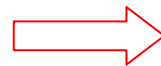
Il fascio che passa nel centro della lente continua senza cambiare direzione (B)



Ingrandimento

$$G = \frac{y'}{y}$$

$$\theta = \theta' \quad \tan\theta = \frac{y}{s} = -\frac{y'}{s'}$$

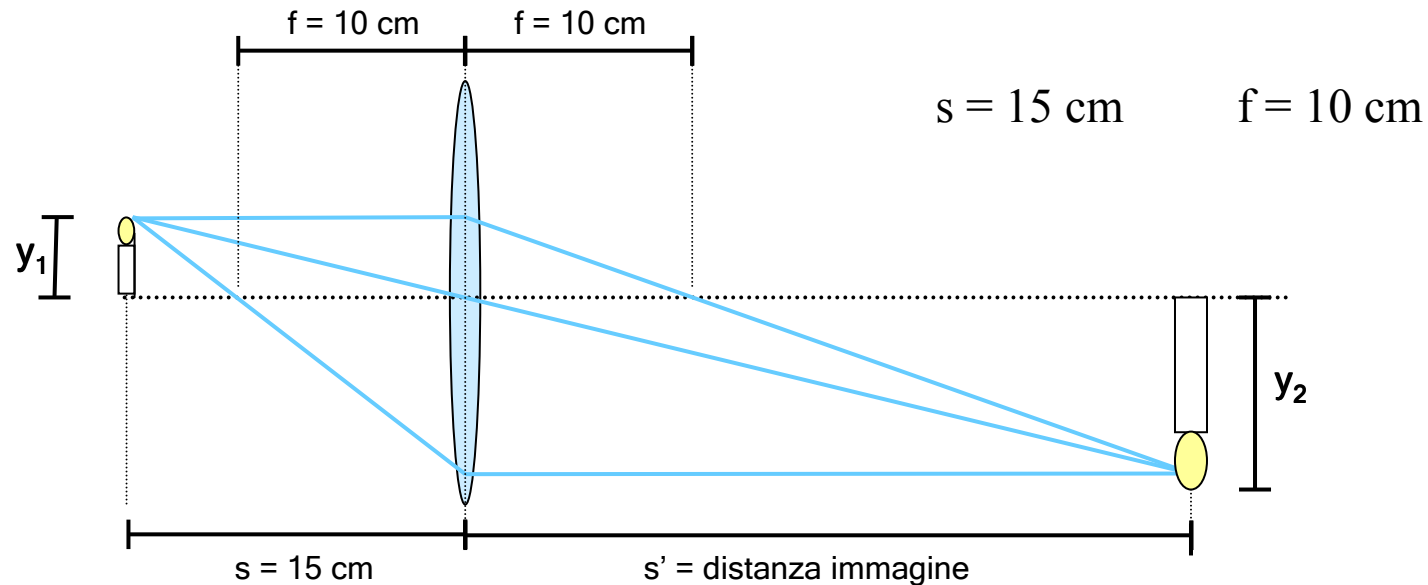


$$G = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

$G < 0$  indica che l'immagine è capovolta

# Lenti sottili

**Esempio:** una candela è posto ad una distanza di 15 cm da una lente biconvessa simmetrica caratterizzata da una distanza focale di 10 cm. A quale distanza si forma l'immagine? E' dritta o capovolta? Qual è l'ingrandimento nel punto immagine?



$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{15} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{10} \Rightarrow \frac{1}{s'} = \frac{1}{10} - \frac{1}{15} = 0,033 \Rightarrow s' = 30 \text{ cm}$$

Il segno positivo indica che l'immagine viene prodotta dall'altro lato della lente (**immagine reale**)

$$G = -\frac{s'}{s} = -\frac{30}{15} = -2$$

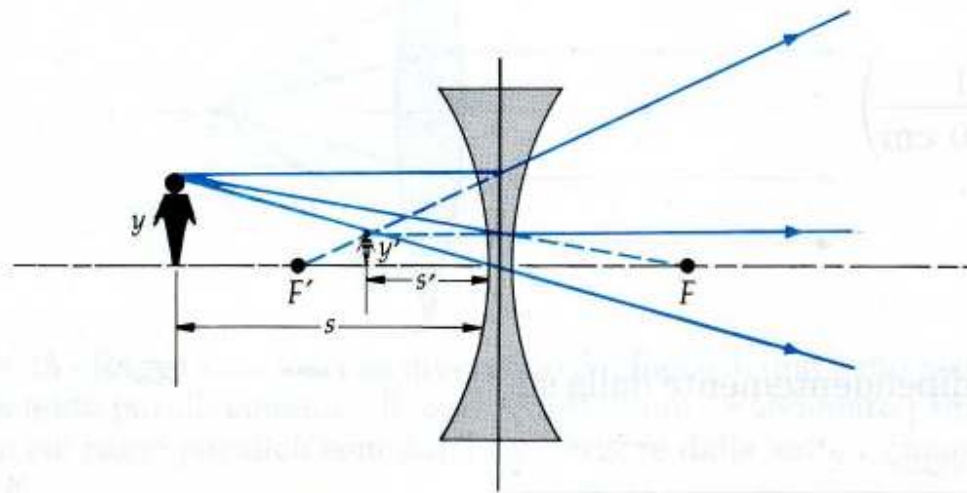
Il segno meno indica che l'immagine è **capovolta**

# Lenti sottili

In modo analogo, nel caso **di lenti biconcave simmetriche (che sono divergenti)** la costruzione oggetto-immagine può essere fatta nel seguente modo.

Il fascio parallelo all'asse ottico diverge in modo che la prosecuzione (tratteggiata in figura) dal lato da cui proviene il fascio, vada a convergere nel fuoco  $F'$

Il fascio che passa nel centro della lente continua senza cambiare direzione il loro punto di incontro è l'immagine.



# Strumenti ottici

Occhio

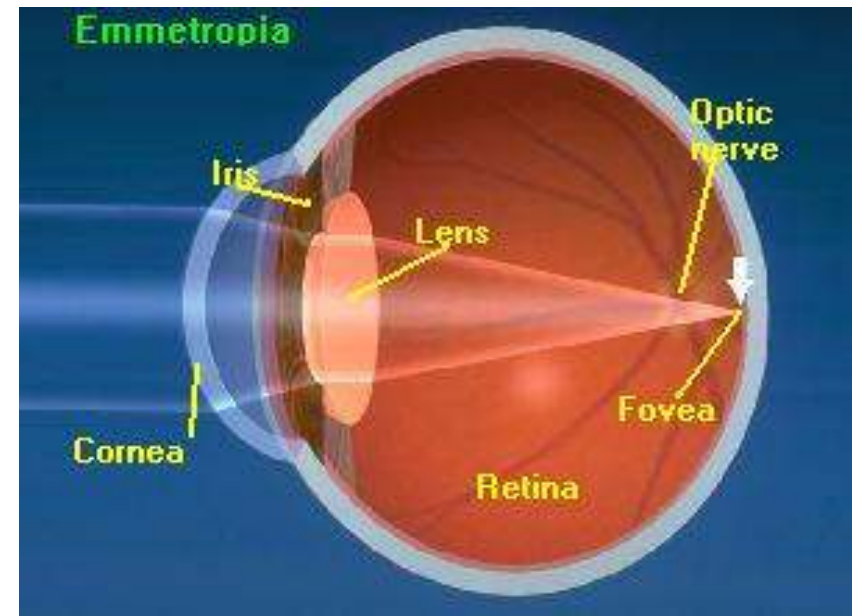
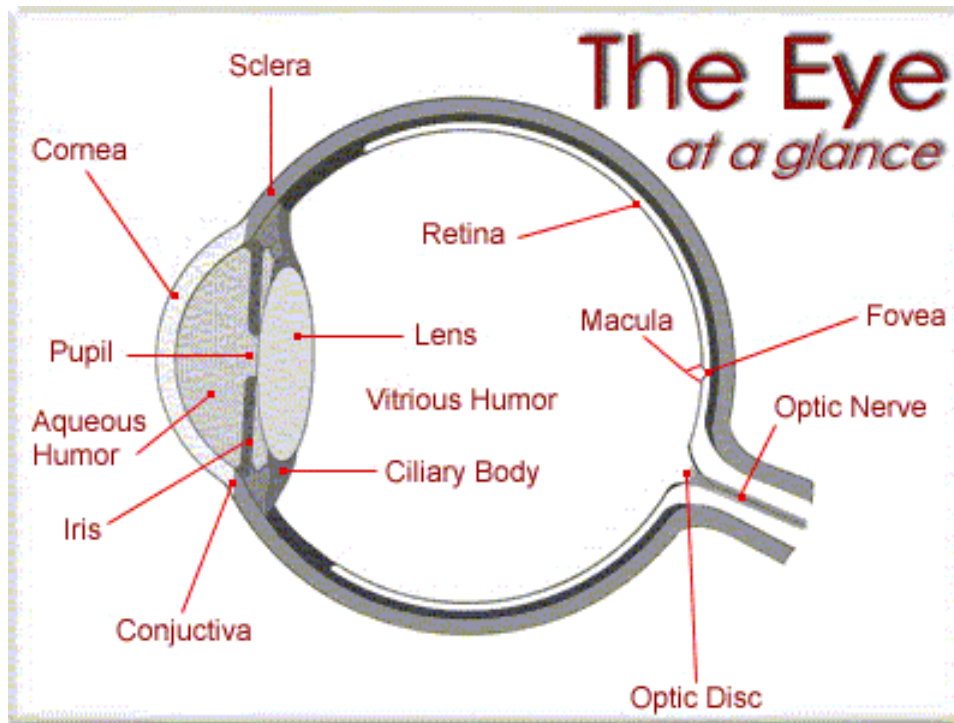
Lente d'ingrandimento

Macchina fotografica

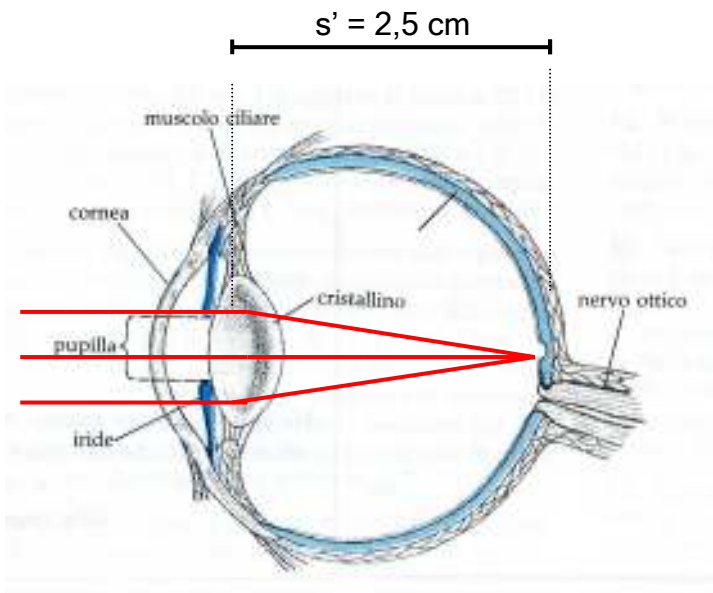
Microscopio

In questo contesto prenderemo in considerazione tali strumenti ottici solo sotto **l'aspetto delle lenti sottili** che li caratterizzano.





# Occhio



Nell'occhio è presente una **lente sottile**, il **cristallino** che ha il compito di focalizzare l'immagine sulla **retina** (strato di cellule nervose che riveste la superficie posteriore del bulbo oculare) che è posta a circa 2,5 cm di distanza.

Il **muscolo ciliare** è in grado di **modificare la forma del cristallino** (cambiandone i **raggi di curvatura**) in modo da modificare la distanza focale (si ricordi la formula dei fabbricanti di lenti).

In **condizioni di riposo**, ovvero quando sulla retina viene **focalizzata** l'immagine che giunge dall'**infinito**, il cristallino ha una distanza **focale di 2,5 cm**.

Se si porta l'oggetto più vicino all'occhio il muscolo ciliare modifica la forma del cristallino in modo da cambiarne la distanza focale (... praticamente applica la formula dei fabbricanti di lenti senza neppure saperlo ...). Il punto più vicino di cui il cristallino riesce a formare un'immagine nitida sulla retina è detto **punto prossimo**. Tale valore varia con l'età, passando da circa 7 cm all'età di 10 anni fino anche a 2 m oltre i 60 anni (perdita di flessibilità del cristallino). **mediamente si considera un valore di 25 cm (detta distanza della visione distinta)**.

# Occhio

**Esempio:** qual è la distanza focale del cristallino quando mette a fuoco un'immagine sulla retina di un oggetto posto a 25 cm? E se l'oggetto si trovasse a 7 cm?

$$s = 25 \text{ cm} \quad s' = 2,5 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{25} + \frac{1}{2,5} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad f = 2,27 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{1}{7} + \frac{1}{2,5} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad f = 1,84 \text{ cm}$$

In ottica si indica con potere diottrico ( $P$ ) l'inverso della distanza focale di una lente misurata in metri, per cui nel caso del cristallino per i casi dell'esercizio, si ha ( $D = \text{Diottrie}$ ):

Distanza:  $\infty$

$$f = 2,5 \text{ cm}$$

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,025} = 40 \text{ D}$$

Distanza: 25 cm

$$f = 2,27 \text{ cm}$$

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,0227} = 44 \text{ D}$$

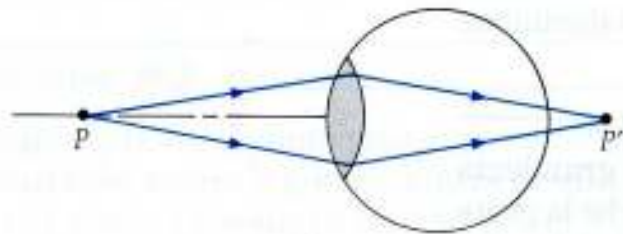
Distanza: 7 cm

$$f = 1,84 \text{ cm}$$

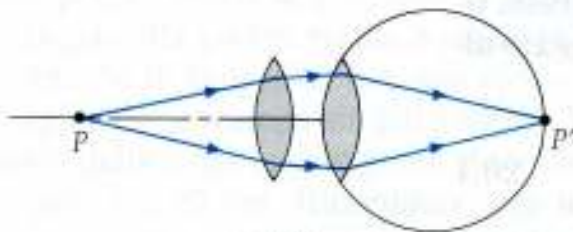
$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,0184} = 54,3 \text{ D}$$

# Occhio

Alcune dei difetti visivi più comuni.

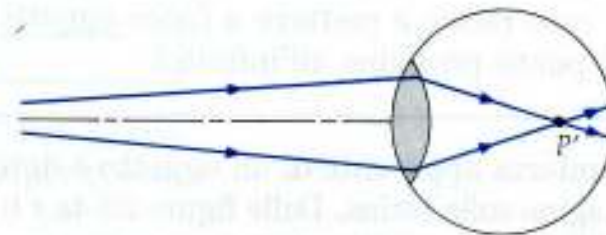


(a)

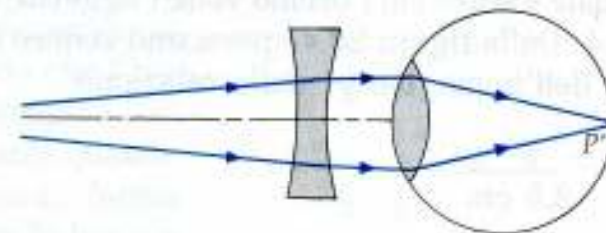


(b)

**Figura 20.2.** Il cristallino di un occhio ipermetrope fa convergere in un punto  $P'$  dietro la retina i raggi provenienti da un oggetto vicino  $P$ . (b) Una lente convergente corregge questo difetto riportando l'immagine sulla retina.



(a)



(b)

**Figura 20.3.** (a) Il cristallino di un occhio miope fa convergere in un punto davanti alla retina i raggi provenienti da un oggetto lontano. (b) Una lente divergente corregge il difetto.

# Occhio

**Esempio:** Supponiamo che il punto prossimo del vostro occhio sia a 75 cm. Quale dovrebbe essere il potere diottrico delle lenti correttive per portare il punto prossimo a 25 cm?

La situazione è questa: voi vedete un oggetto ben a fuoco solo se lo allontanate a 75 cm dal vostro occhio.

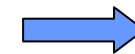
Per mezzo della lente correttiva volete che il punto in cui mettete bene a fuoco sia a 25 cm in modo da leggere comodamente senza dover allontanare il libro.

Vi serve una lente per cui l'oggetto messo a 25 cm centimetri dal vostro occhio sia a fuoco. Ovvero una lente per cui la distanza oggetto dalla lente sia 25 cm e che formi un'immagine virtuale a 75 cm di distanza.

Il vostro occhio infatti mette a fuoco un oggetto a 75 cm di distanza, per cui bisogna fare in modo che la lente sia tale da creare, guardando attraverso di essa, un'immagine virtuale a quella distanza.

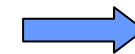
Assegniamo allora i valori alle grandezze :

L'oggetto, reale, si trova a 25 cm dalla lente appoggiata sul vostro occhio

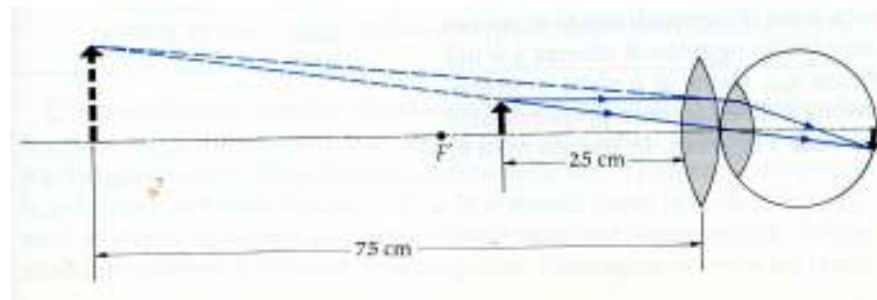


$$s = 25 \text{ cm}$$

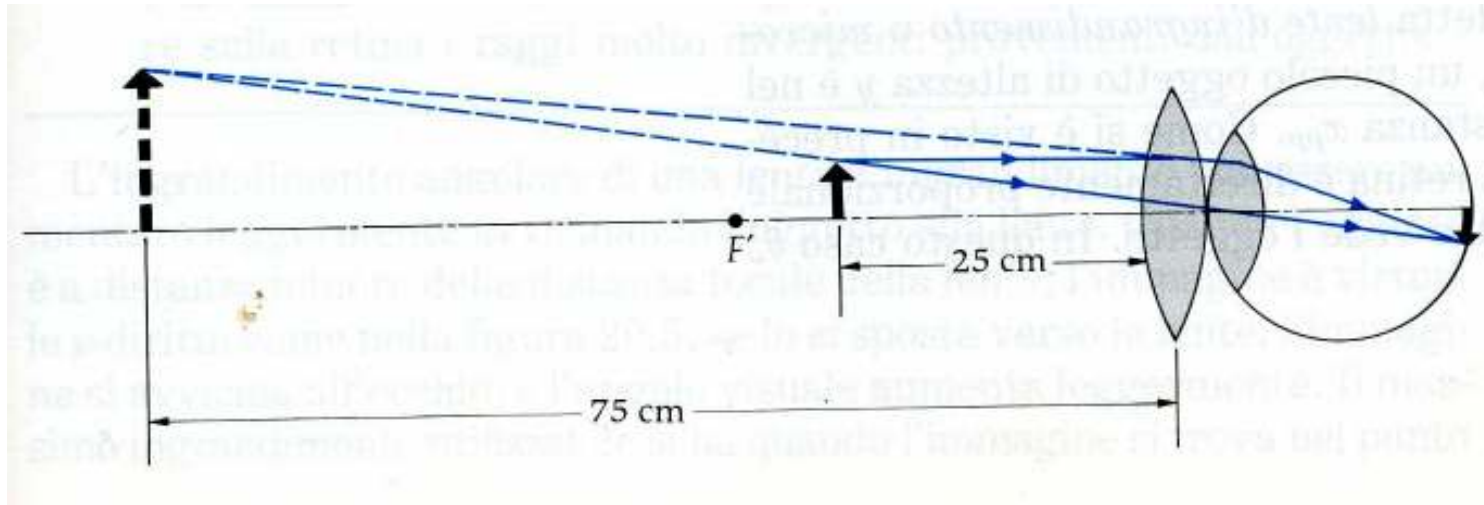
L'immagine, virtuale, deve essere a 75 cm dalla lente. Essendo virtuale e dallo stesso lato, il segno è negativo.



$$s' = -75 \text{ cm}$$



# Occhio



Non resta che fare i conti:

$$s = 25 \text{ cm}$$

$$s' = -75 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{25} + \frac{1}{-75} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad f = 37,5 \text{ cm}$$

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,375} = 2,67 \text{ D}$$



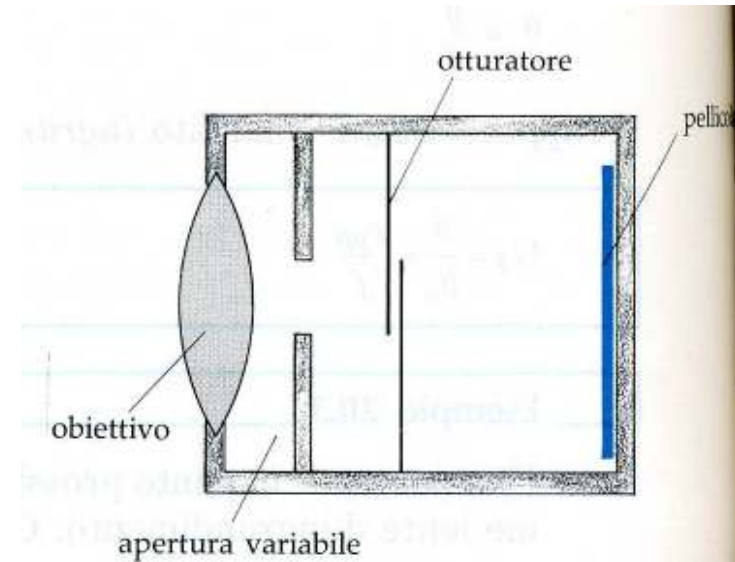
# Macchina fotografica

Una macchina fotografica è costituita da una **lente convergente**, chiamata **obiettivo**, un'apertura variabile detta **diaframma** e un **otturatore** che può venire aperto per un breve intervallo di tempo.

Diversamente dall'occhio umano, che ha una lente di distanza focale variabile, la distanza focale della lente nella macchina fotografica è fissa.

Di solito, la **distanza focale** di una lente normale in una macchina fotografica formato 35 mm è **50 mm** (i 35 mm si riferiscono alla larghezza della pellicola).

La messa a fuoco si ottiene variando la distanza tra la lente e la pellicola, ovvero avvicinando o allontanando l'obiettivo rispetto alla pellicola.



**Esempio:** La distanza focale dell'obiettivo di una macchina fotografica è 50 mm. Di quanto bisogna spostare l'obiettivo per passare dalla formazione dell'immagine nitida di un oggetto molto distante a quella di un oggetto distante 2 m?

$$s = \infty \quad f = 50 \text{ mm}$$

$$s = 2 \text{ m} \quad f = 50 \text{ mm}$$

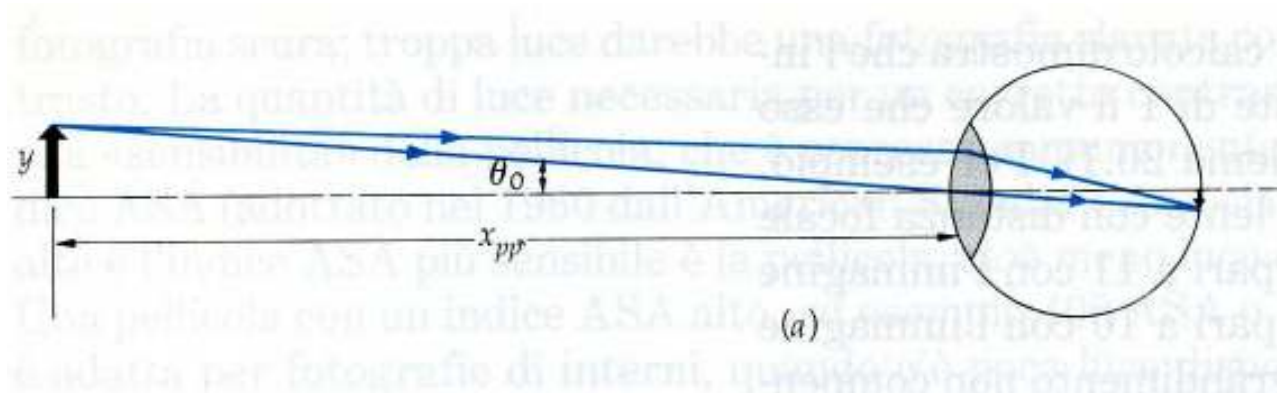
$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{50} \quad \Rightarrow \quad s' = f = 50 \text{ mm}$$

$$\frac{1}{2000} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{50} \quad \Rightarrow \quad s' = f' = 51,3 \text{ mm}$$

# Lente d'ingrandimento

Si è visto che la grandezza apparente di un oggetto può essere aumentata usando una lente convergente, per poter avvicinare l'oggetto all'occhio, aumentando la grandezza dell'immagine sulla retina. Una tale lente convergente è detta **lente d'ingrandimento** o **microscopio semplice**.

Supponiamo di avere un oggetto alto  $y$  nel punto prossimo dell'occhio che indichiamo con  $x_{pp}$ .

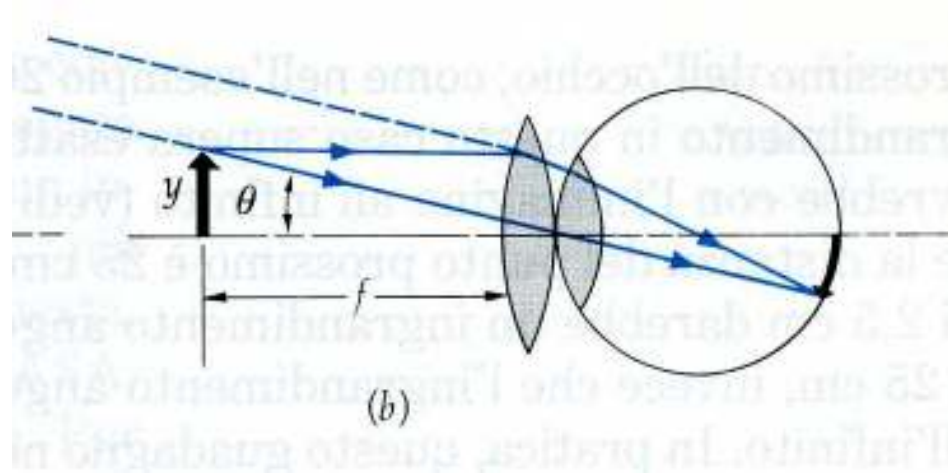


L'altezza dell'immagine sulla retina sarà proporzionale all'angolo  $\theta$ , che considerato le dimensioni angolari in gioco è piccolo, per cui si può scrivere che:

$$\frac{y}{x_{pp}} = \tan \theta_0 \cong \theta_0$$

# Lente d'ingrandimento

Supponiamo ora di frapporre tra l'occhio e l'oggetto una lente con focale  $f$  (minore di  $x_{pp}$ ) in modo che l'oggetto sia ad una distanza dalla lente pari alla distanza focale della stessa.



I raggi paralleli vengono fatti convergere sulla retina dall'occhio rilassato. Supponendo che la lente sia vicina all'occhio, l'angolo visuale dell'oggetto vale ora:

$$\theta \cong \frac{y}{f}$$

Il rapporto, che mi dà l'ingrandimento angolare vale:

$$G = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{x_{pp}}{f}$$

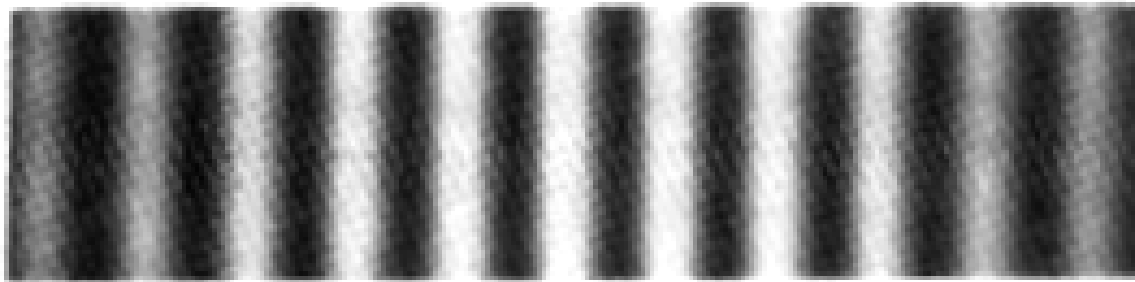
# La luce come un'onda.

La natura ondulatoria della luce scoperta grazie  
all'interferenza

Prova della natura ondulatoria:

*Interferenza da 2 fenditure* (esperienza di Young 1801):

**Se la luce produce figure di interferenza allora è un'onda!**



# La natura della luce: onda o corpuscolo ?

*“Per il resto della mia vita voglio riflettere su cosa sia la luce.”, Albert Einstein, 1916*

## Comportamento ondulatorio:

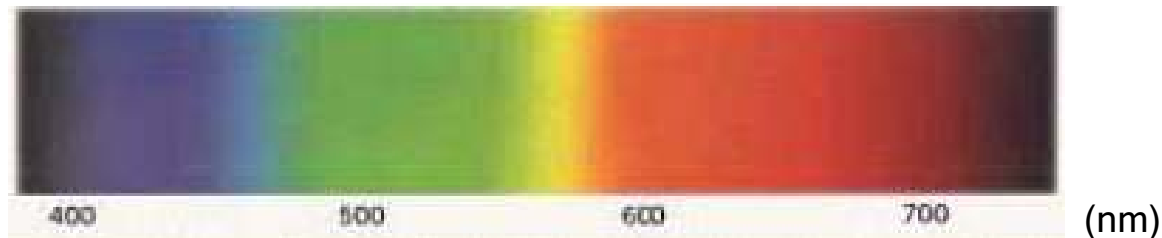
Sono stati osservati sia fenomeni di interferenza che di diffrazione

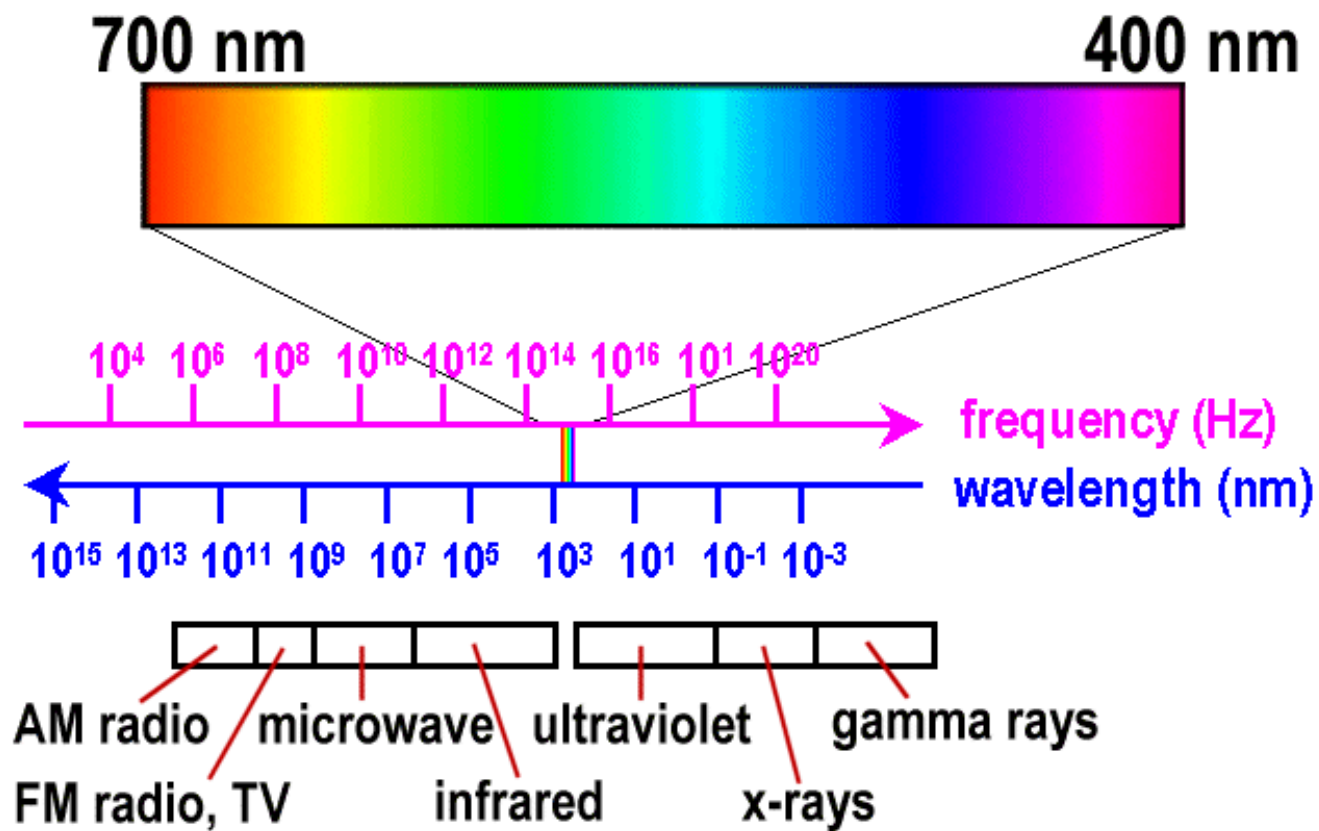
Essendo un'onda è stato possibile misurare la lunghezza d'onda associata ad ogni sua componente.

Le lunghezze d'onda della luce “visibile” vanno da circa 400 a 800 nm.

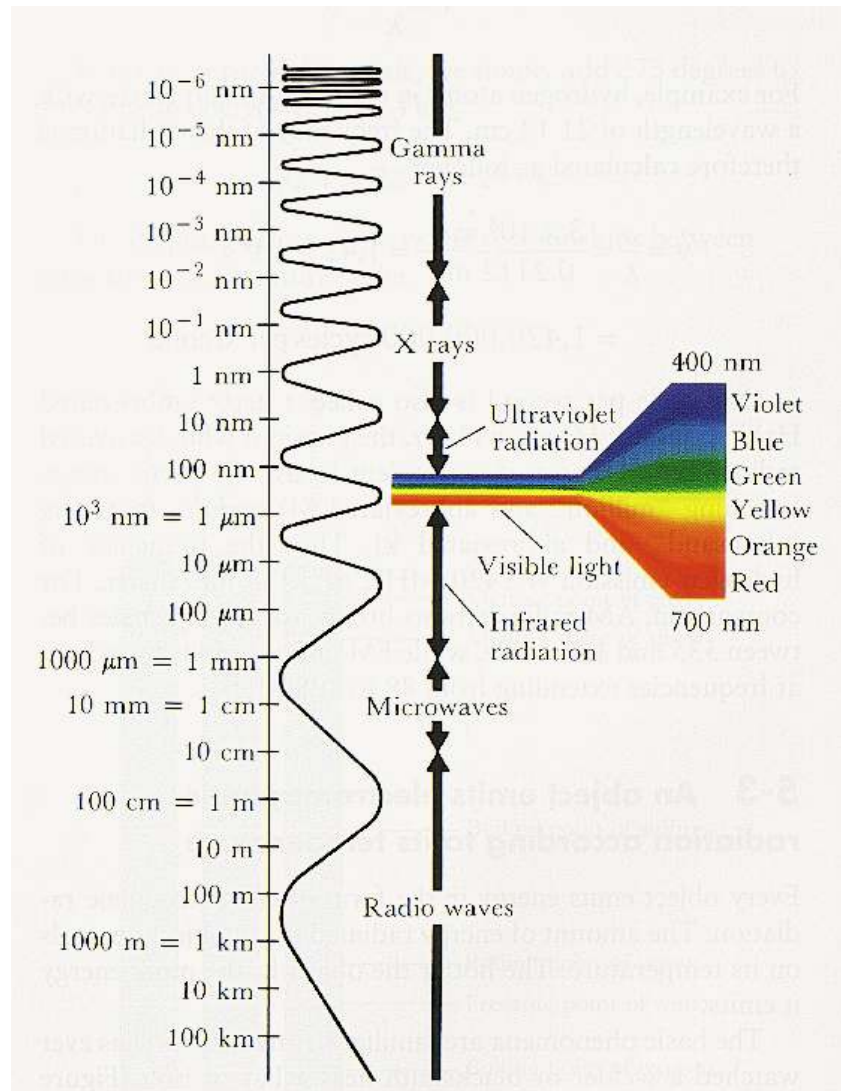


Diffrazione di luce attraverso un foro





# Lo spettro elettromagnetico

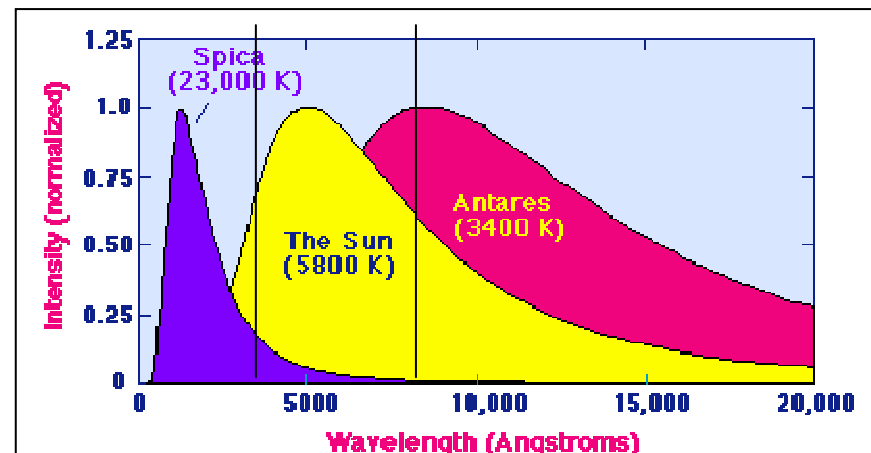


Ci sono onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda inferiore ai 350 nm o superiore a 800 nm.

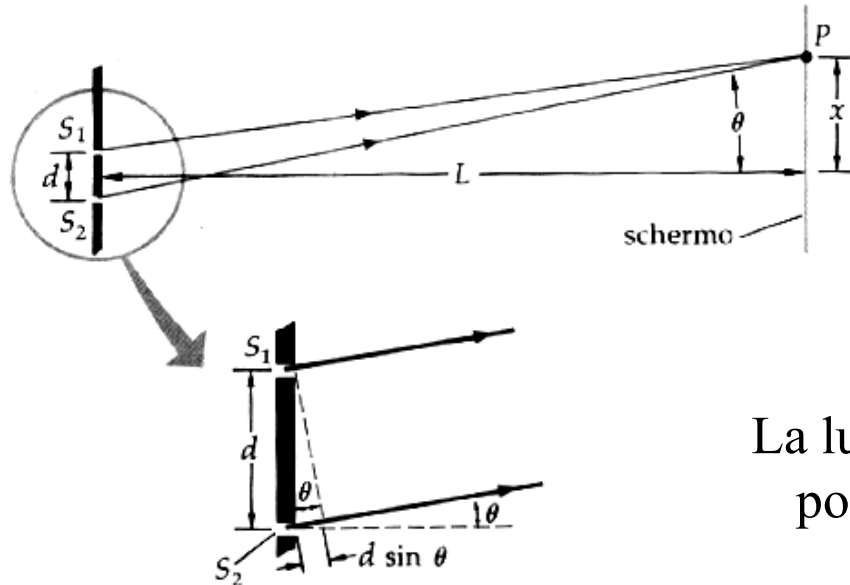
E' stato dimostrato che al di sotto e al di sopra di tali valori sono presenti altre "radiazioni elettromagnetiche" a cui sono stati associati dei nomi.

Noi "vediamo" solo questa parte dello spettro elettromagnetico perché la nostra stella emette il 50% della luce in questo intervallo di lunghezze d'onda.

Se fossimo nati sul sistema di Spica, per esempio, probabilmente avremmo sviluppato la capacità di vedere l'UV. Sul sistema di Antares avremmo invece visto nell'infrarosso.



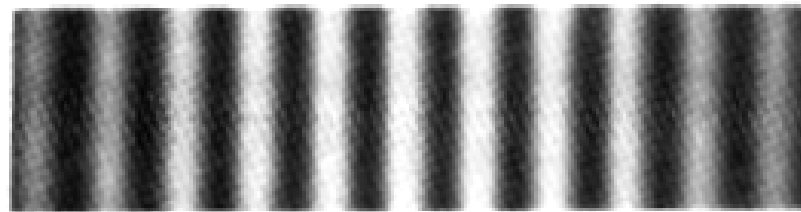
# La prova della natura ondulatoria della luce: *interferenza da due fenditure*



Se si illuminano due fenditure con un fascio di luce proveniente da una singola sorgente, *le due fenditure si comportano come sorgenti coerenti di luce  $S_1$  e  $S_2$*  (cioè in accordo di fase o con una differenza di fase costante)

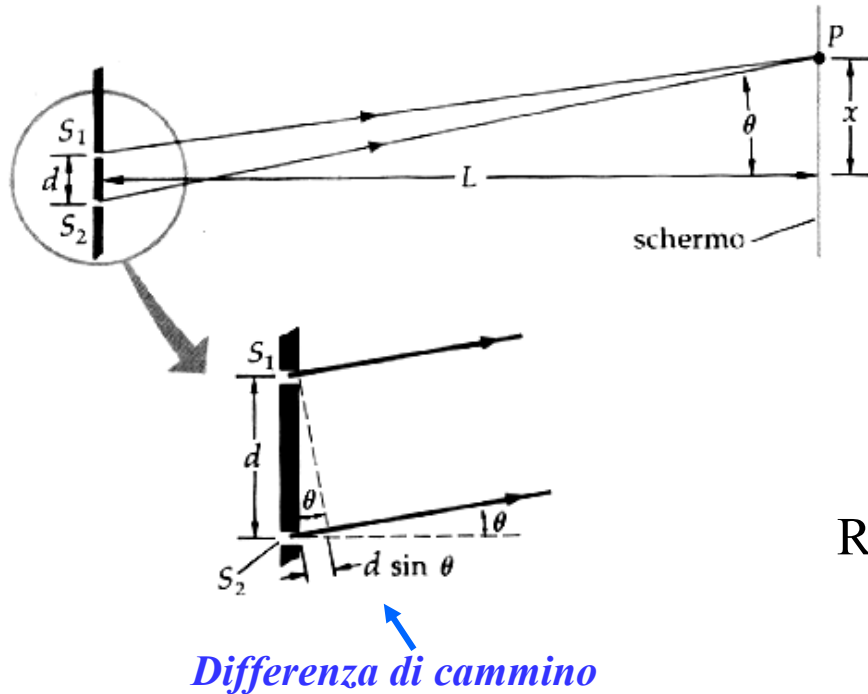
La luce emessa da  $S_1$  e  $S_2$  produce sullo schermo, posto ad una distanza ( $L \gg d$ ), una figura detta “*figura di interferenza*”.

Le frange *chiare* corrispondono ai *massimi di intensità* di luce, (interferenza costruttiva), le frange *scure ai minimi* di intensità di luce (interferenza distruttiva)





# La prova della natura ondulatoria della luce: *interferenza da due fenditure*



Il tipo di interferenza (costruttiva o distruttiva) dipende dalla **differenza di cammino** percorso dai raggi provenienti dalle due sorgenti e incidenti nel punto P.

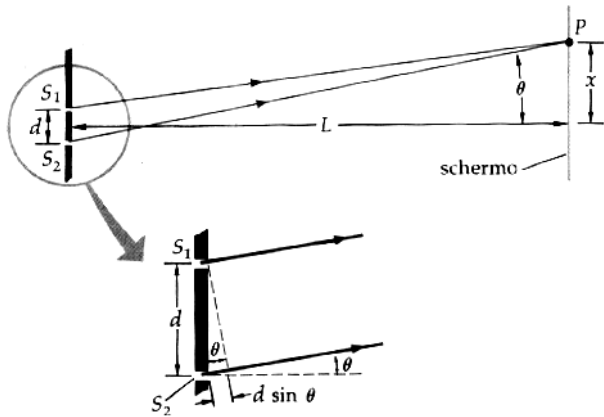
Se  $L \gg d$



Raggi che incidono in P sono quasi paralleli

Raggi quasi paralleli  $\Rightarrow$  Differenza di cammino:  $\Delta s = d \sin \theta$

# La prova della natura ondulatoria della luce: *interferenza da due fenditure*



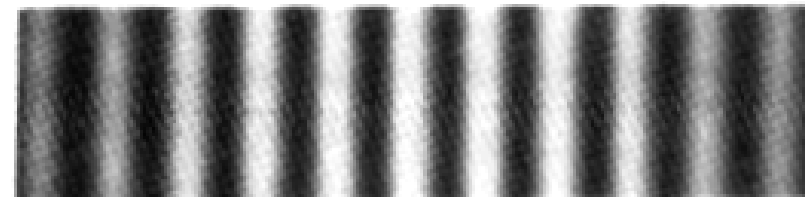
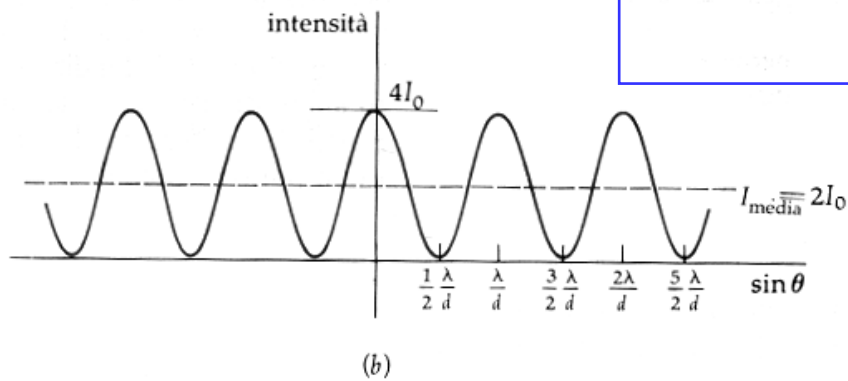
**Interferenza costruttiva**  $\Rightarrow$  Massima intensità  $\Rightarrow$  Banda chiara

Se i cammini differiscono di un numero intero di lunghezze d'onda (cioè la differenza di fase è nulla):

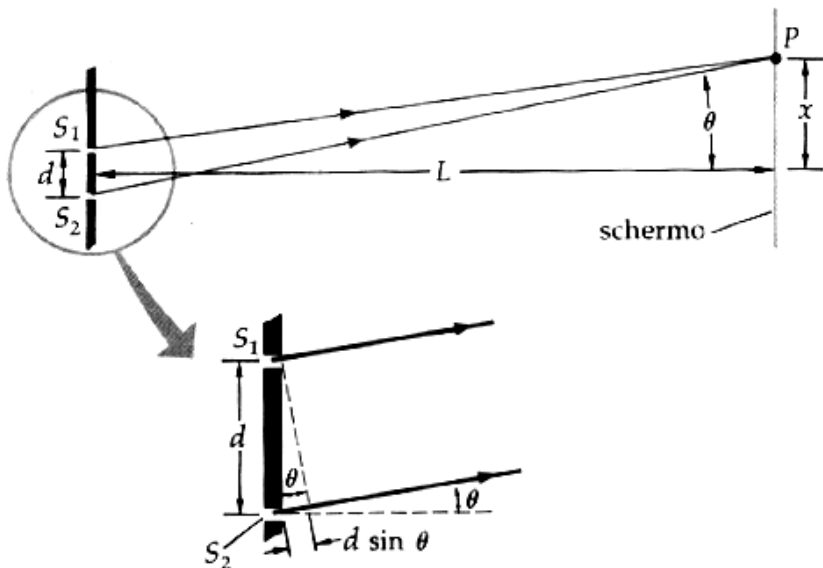
$$\Delta s = d \sin \theta_{max} = m\lambda \Rightarrow d \sin \theta_{max} = m\lambda$$

**Interferenza distruttiva**  $\Rightarrow$  Minima intensità  $\Rightarrow$  Banda scura

Se:  $\Delta s = d \sin \theta_{min} = (m + \frac{1}{2})\lambda \Rightarrow d \sin \theta_{min} = (m + \frac{1}{2})\lambda$



# La prova della natura ondulatoria della luce: *interferenza da due fenditure*



L'andamento dell'intensità con l'angolo  $\theta$  (nel disegno a lato), si può tradurre in differenti valori di intensità per diverse posizioni  $x$  sullo schermo.

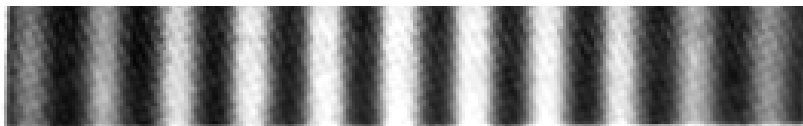
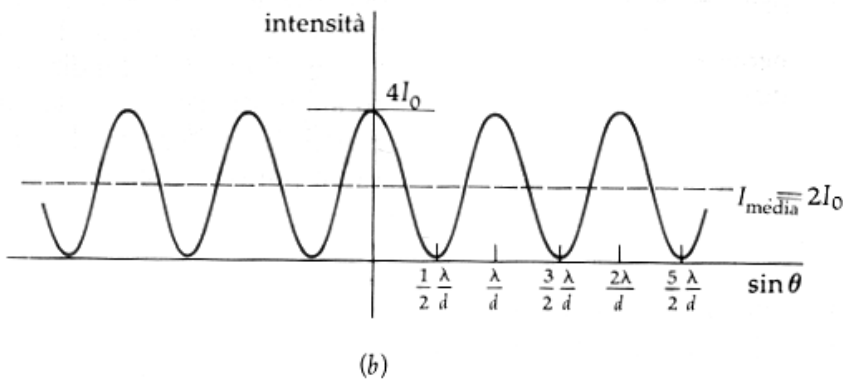
Nell'ipotesi  $L \gg d$ , si può scrivere  $\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{x}{L}$

Le posizioni dei massimi sullo schermo si avranno dunque in posizioni  $x_{\max}$  tali che:

$$\sin \theta_{\max} = \frac{x_m}{L} \quad \Rightarrow \quad x_{\max} = L \sin \theta_{\max}$$

essendo  $\sin \theta_{\max} = m\lambda/d$

$$x_{\max} = m \frac{\lambda L}{d}$$



**NOTA:** dalla formula è evidente che se è nota la distanza tra le due fenditure  $d$  e la distanza dello schermo  $L$ , misurando la posizione del  $m$ -esimo massimo  $x_{\max}$ , è possibile ricavare la lunghezza d'onda della luce incidente

# Esercizio:

## interferenza da due fenditure

Due fenditure sottili distanti **1,5 mm** sono illuminate da luce con una **lunghezza d'onda di 589 nm**. Le frange di interferenza si osservano su uno schermo posto ad una **distanza di 3 metri**. Si trovi la distanza tra le frange nello schermo.

**Sol.:** L' $k$ -esimo massimo di intensità, cioè la  $k$ -esima banda chiara si ha in una posizione  $x_m$  sullo schermo:

$$x_{\max_k} = k \frac{\lambda L}{d}$$

- Dove:
- $L=3\text{m}$
  - $d=1,5 \text{ mm}$
  - $\lambda=589\text{nm}$

$$x_{\max_k} = k \frac{589 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 3 \text{ m}}{1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = k \cdot 1,18 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

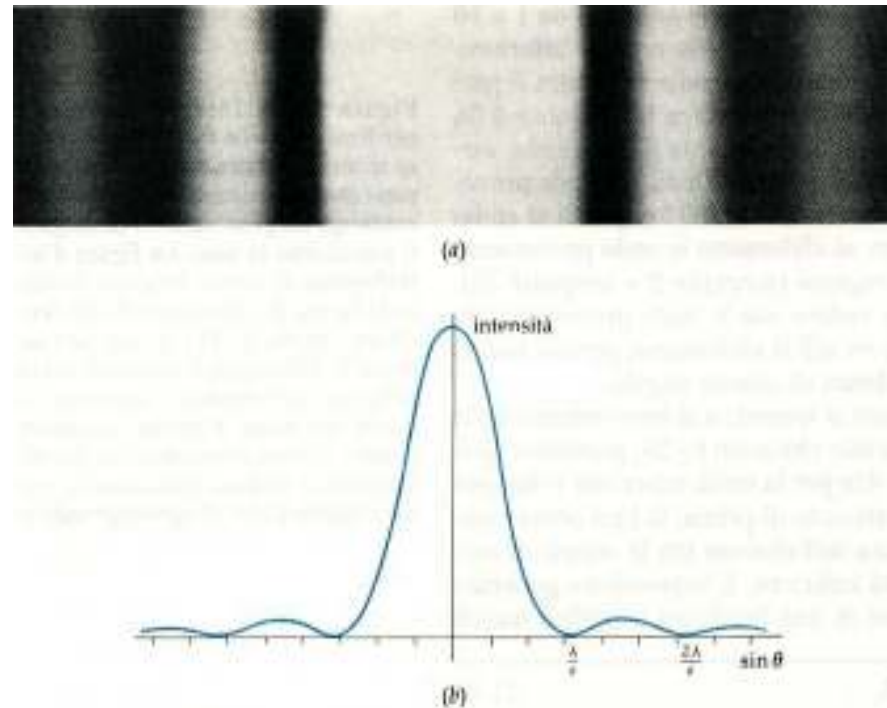
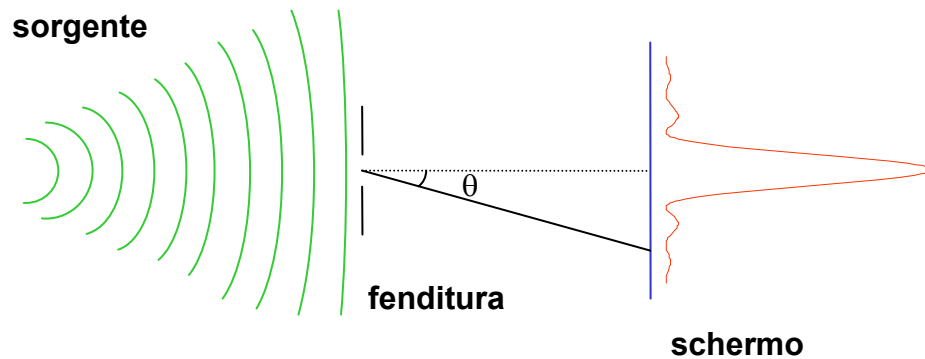
La **distanza 2 frange** sarà pari a questa distanza  $x_{\max_k}$  diviso il numero delle frange  $k$

$$\frac{x_{\max_k}}{k} = 1,18 \text{ mm}$$

**Le frange distano di 1,18 mm**

# Diffrazione della luce da singola fenditura

*Se una fenditura non può essere considerata puntiforme, ovvero se la larghezza della fenditura non è piccola in confronto alla lunghezza d'onda della luce incidente, l'intensità su uno schermo lontano non è indipendente dall'angolo ma diminuisce all'aumentare dell'angolo.*



L'intensità è **massima al centro** ( $\sin\theta = 0$ ) e diminuisce, dopo una serie di minimi secondari fino a  $\theta$  in corrispondenza di un angolo che **dipende** dalla larghezza **a** della fenditura e dalla lunghezza **d'onda**  $\lambda$ . L'intensità trasmessa dalla fenditura si annulla nei cosiddetti minimi di diffrazione per angoli  $\theta$ , tali che:

$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{a} \quad m=1,2,3\dots$$

# La luce presenta il fenomeno della diffrazione da singola fenditura, per cui ha un comportamento ondulatorio



Diffrazione da una fenditura circolare

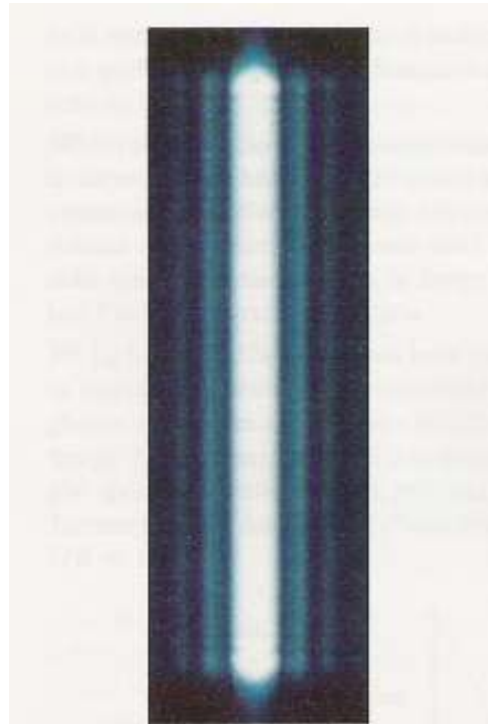


Figura 37.1 Figura di diffrazione prodotta su uno schermo da una luce che passa attraverso una sottile fenditura verticale. Il processo di diffrazione fa deflettere la luce perpendicolarmente ai lati lunghi della fenditura. Esso produce inoltre una figura d'interferenza che consiste di un largo massimo centrale, di massimi secondari di minore intensità e di minimi inframmezzati.

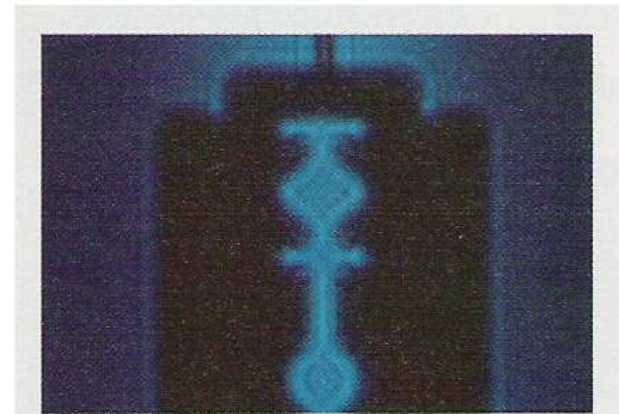
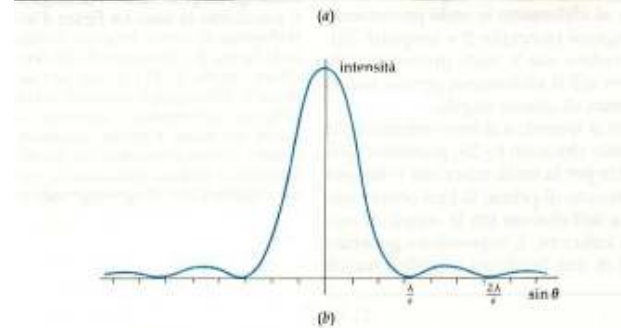


Figura 37.2 Figura di diffrazione prodotta da una lametta da barba, vista in luce monocromatica. Si notino le frange alternate corrispondenti a massimi e minimi d'intensità.

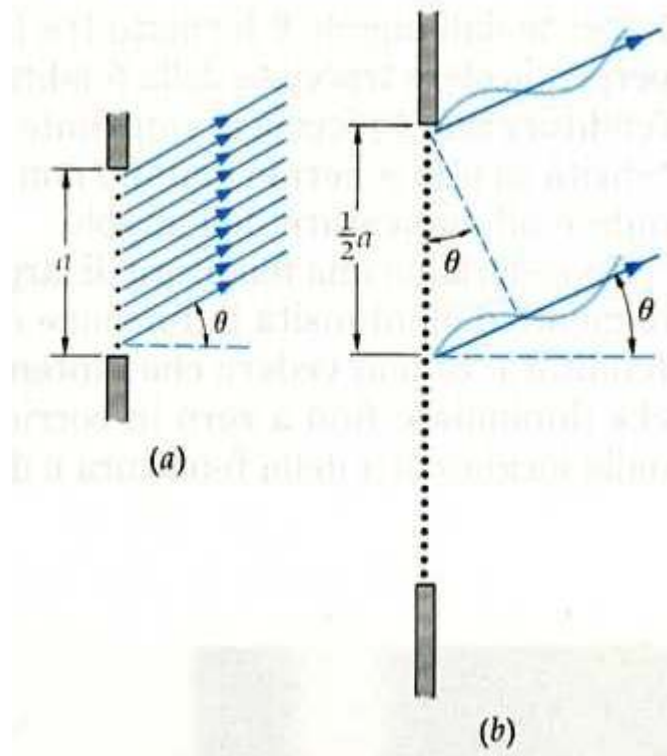
# Diffrazione della luce da singola fenditura

L'intensità trasmessa dalla fenditura si annulla nei cosiddetti **minimi di diffrazione** per angoli  $\theta$ , tali

che:

$$\text{sen}\theta_{\text{min}} = m \frac{\lambda}{a} \quad m=1,2,3\dots$$


$$a \cdot \text{sen}\theta_{\text{min}} = m\lambda$$



Questo risultato per la posizione angolare dei minimi, si può comprendere considerando ciascun punto del fronte d'onda che investe la fenditura come una sorgente luminosa puntiforme.

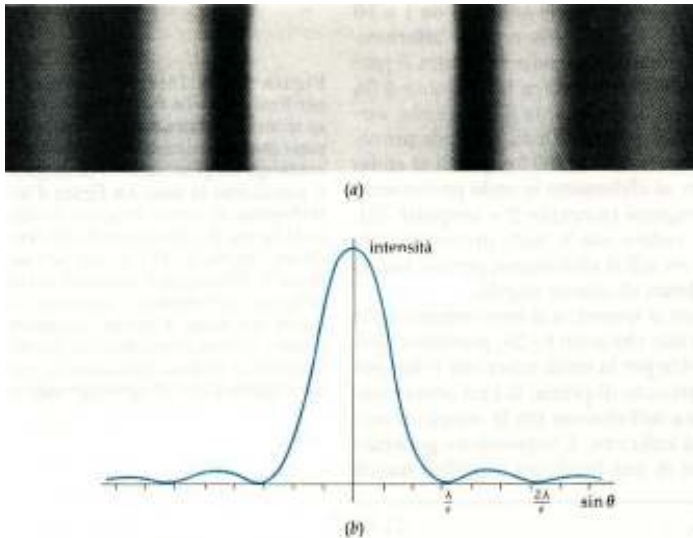
**$a \text{ sen}\theta$**  è la differenza di cammino tra i raggi emessi dalle due **sorgenti** che si trovano alle **due estremità** della fenditura.

Se  **$a \text{ sen}\theta_{\text{min}} = m\lambda$**  le onde provenienti dalle due estremità sono in **accordo di fase**. Si immagini di **dividere la fenditura** in due regioni. Se si considerano i raggi provenienti dalla prima sorgente e da quella centrale essi saranno sfasati di  $180^\circ$  e quindi si elideranno. Per lo stesso motivo si elideranno tutte le onde provenienti da sorgenti che distano tra loro  $a/2$ . Dunque all'angolo  $\theta_{\text{min}}$  **avremmo un minimo di energia luminosa**



# Diffrazione della luce da singola fenditura

Molto spesso ciò che interessa in una figura di diffrazione è la posizione in cui compare il primo minimo dell'intensità della luce, perché *quasi tutta l'energia luminosa è contenuta nel massimo centrale*. I primi zeri nell'intensità si hanno in corrispondenza di angoli  $\theta$  tali che:



$$\sin \theta_{\min} = \frac{\lambda}{a}$$

La distanza angolare tra i primi due minimi è chiamata *larghezza angolare del massimo centrale* di diffrazione ed è pari a  $2 \sin \theta_{\min} = 2 \frac{\lambda}{a}$ . Si può notare che la larghezza del massimo dipende dalla larghezza della fenditura.

- Se  $a \gg \lambda$ , allora il **massimo è molto stretto** e l'effetto della **diffrazione è quasi trascurabile**.
- Se  $a$  diminuisce e **tende a  $\lambda$** , il **massimo si allarga**
- Se  $a = \lambda$ , il **primo ed unico minimo si formerebbe a  $\theta = 90^\circ$**  e
- Se  $a < \lambda$ , l'intensità non si annulla mai, cioè **tutto lo spazio al di là della fenditura è illuminato**

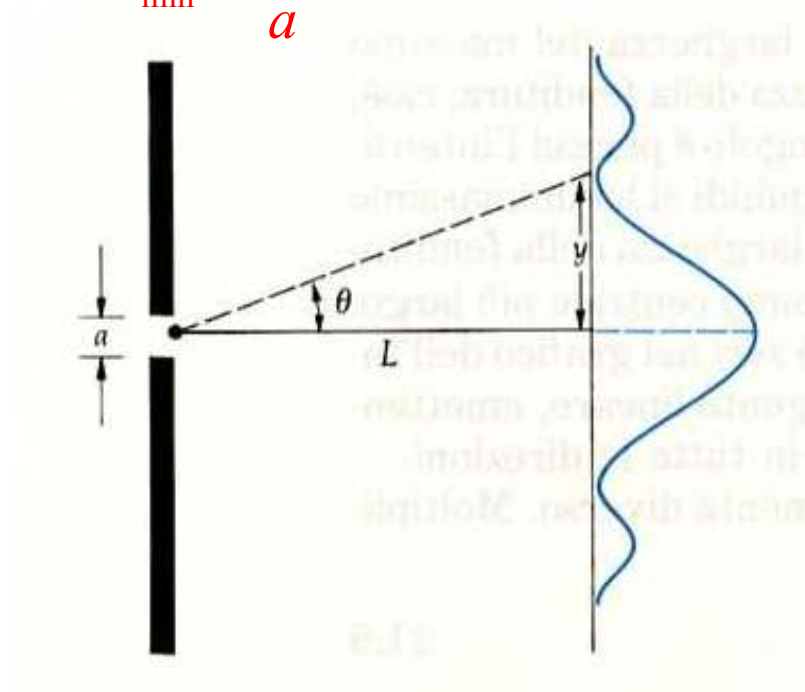


# Diffrazione della luce da singola fenditura

La **larghezza** angolare del **massimo centrale** può naturalmente essere tradotta in termini di **distanza sullo schermo**. La distanza  $y$  dal centro del massimo centrale al primo minimo di diffrazione è legata all'angolo  $\theta_{\min}$  e alla distanza  $L$  tra la fenditura e lo schermo dalla seguente relazione:

$$\sin \theta_{\min} = \frac{\lambda}{a}$$

$$\tan \theta_{\min} = \frac{y}{L}$$



Se l'angolo  $\theta$  è molto piccolo:

$$\tan \theta \cong \sin \theta$$

Dunque:

$$y = L \tan \theta_{\min} \cong L \sin \theta_{\min}$$

⇓

$$y = L \frac{\lambda}{a}$$

## **Esercizio:** **diffrazione da una fenditura**

Un fascio laser di lunghezza d'onda di **700 nm** passa attraverso una fenditura verticale larga **0,2 mm** e incide su uno schermo posto alla distanza di **6 m**. Si trovi la **larghezza orizzontale del massimo di diffrazione** centrale posto sullo schermo, cioè la distanza tra il primo minimo a sinistra e il primo minimo a destra.

**Sol.:** Il primo minimo si ha in una posizione sullo schermo pari a  $y = L \frac{\lambda}{a}$

Dove:

- $L=6\text{m}$
- $a=0,2 \text{ mm}$
- $\lambda=700\text{nm}$

$$y = 6\text{m} \frac{700 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{0,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

La larghezza  $\Delta$  del massimo centrale sarà pari al doppio di questa distanza.

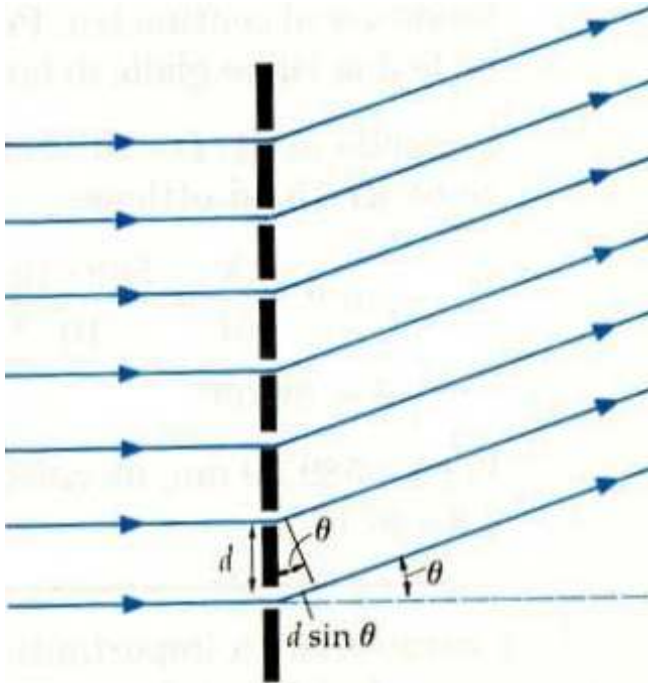
$$\Delta = 2y = 2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 4,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$\Delta = 4,2\text{cm}$$

**La larghezza del massimo è di 4,2 cm**

# Reticolo di diffrazione

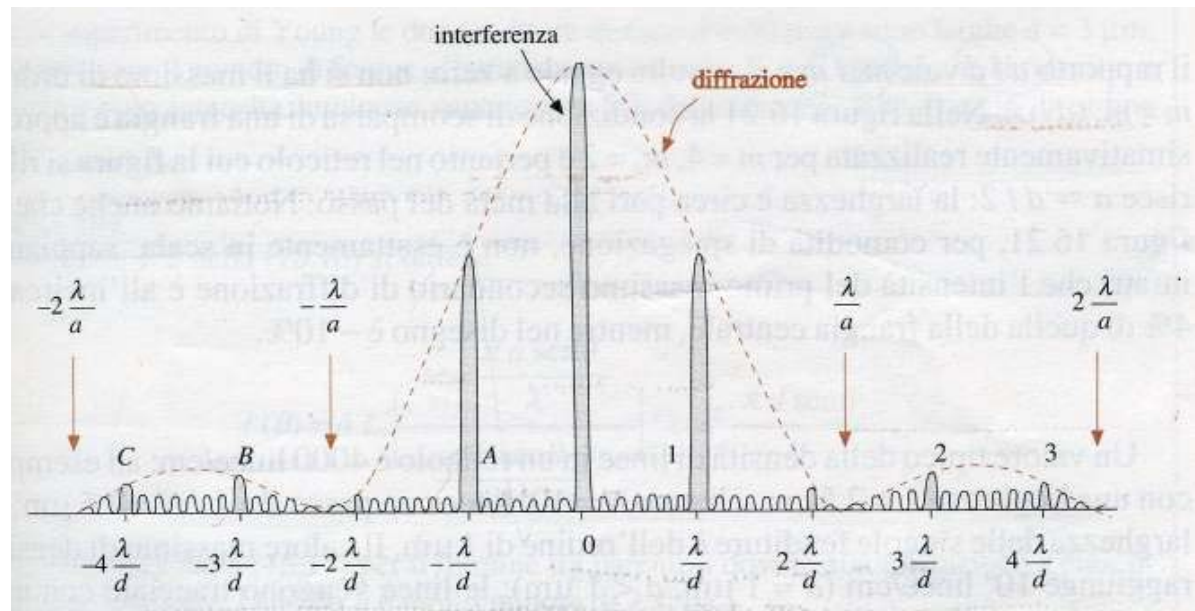
Un reticolo di diffrazione è costituito da un gran numero  $N$  di fenditure di larghezza  $a$ , egualmente distanziate. La distanza  $d$  tra i punti centrali di due fenditure contigue e' il *passo del reticolo*.



Se un' onda piana incide sul reticolo si può studiare la distribuzione della intensità luminosa (figura di diffrazione) su uno schermo posto ad una grande distanza dal reticolo. In ciascuna delle fenditure la luce viene **difratta**, ed i fasci rifratti a loro volta **interferiscono**. Per prevedere l'andamento di questa intensità bisogna tener conto dei fenomeni già visti di:

- ✓ **interferenza** tra  $N$  sorgenti
- ✓ **diffrazione** della luce emessa da ciascuna sorgente

# Reticolo di diffrazione: la figura di diffrazione



I massimi di interferenza sono in corrispondenza degli angoli  $\theta$ , dati da:

$$d \sin \theta_{\max} = m\lambda$$

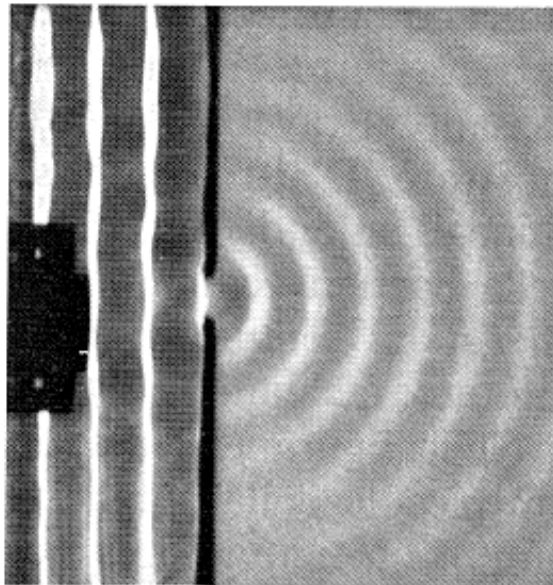
# Le onde e la diffrazione

E' la propagazione in un mezzo con disomogeneita di dimensioni  $\approx \lambda$

Diffrazione da piccola fenditura:

**Dimensione apertura = a**

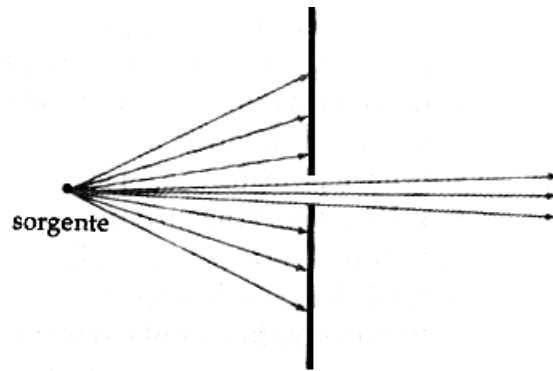
**a  $\ll \lambda$**



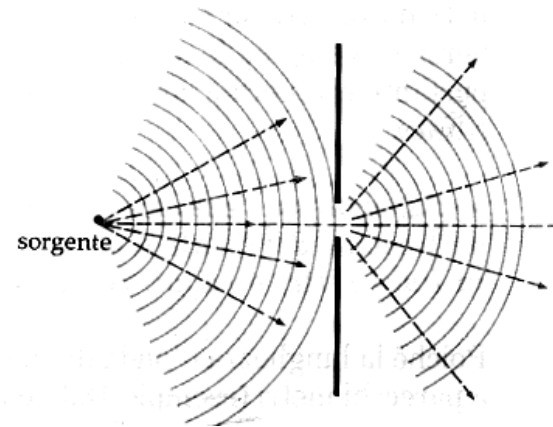
**Propagazione non rettilinea:  
sembra una sorgente puntiforme**

# Diffrazione

Differenza qualitativa rispetto alla propagazione di particelle:



PARTICELLE: ANGOLO  
LIMITATO



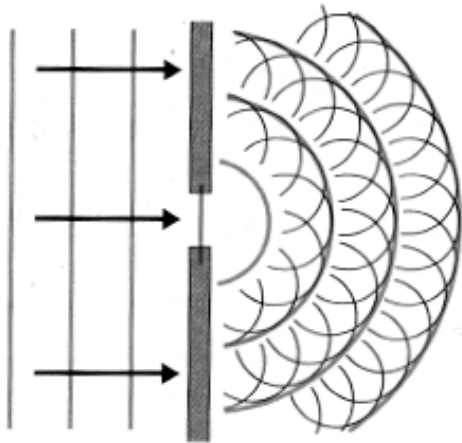
ONDE: ANGOLO AMPIO

Base per l'interpretazione della diffrazione: **principio di Huygens**  
*“Ciascun punto di un fronte d'onda può essere considerato come una sorgente puntiforme di onda secondaria”*

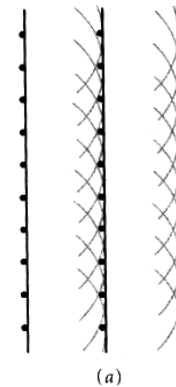
# Diffrazione

Ogni punto di un fronte d'onda è una sorgente puntiforme.  
Nuovo fronte d'onda = **inviluppo onde elementari**

Interpretazione **di Huygens**  
della diffrazione da piccola  
fenditura:



FRONTE D'ONDA  
PIANO



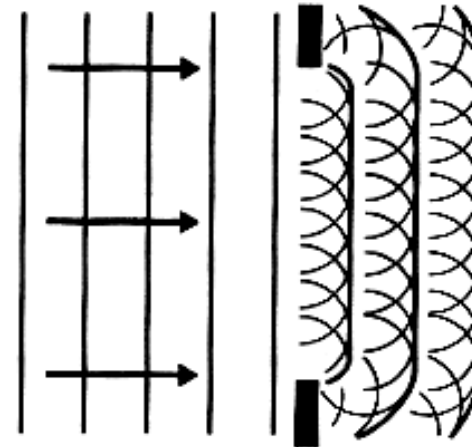
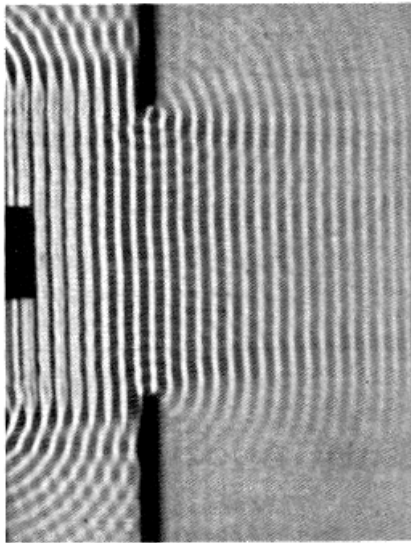
FRONTE D'ONDA  
SFERICO





# Diffrazione

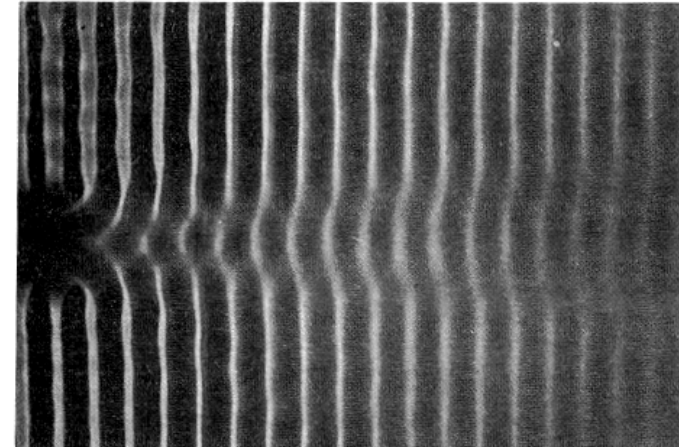
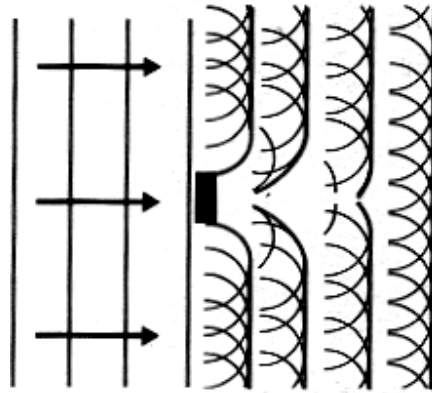
Diffrazione da grande fenditura ( $d \gg \lambda$ ):



**Effetti diffrattivi solo ai bordi**

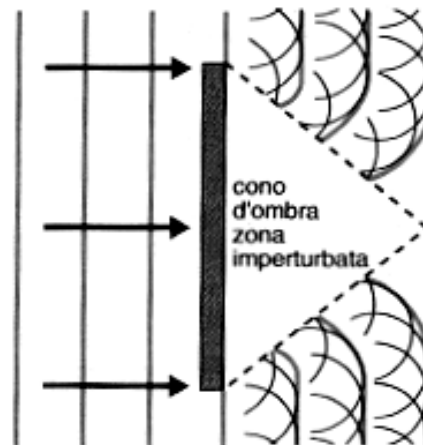
# Diffrazione

- Diffrazione intorno a un piccolo ostacolo ( $d \ll \lambda$ ):



Si ricostruisce il **fronte d'onda piano**

Diffrazione **intorno a un grande ostacolo** ( $D \gg \lambda$ ):



Cono d'ombra sfumato

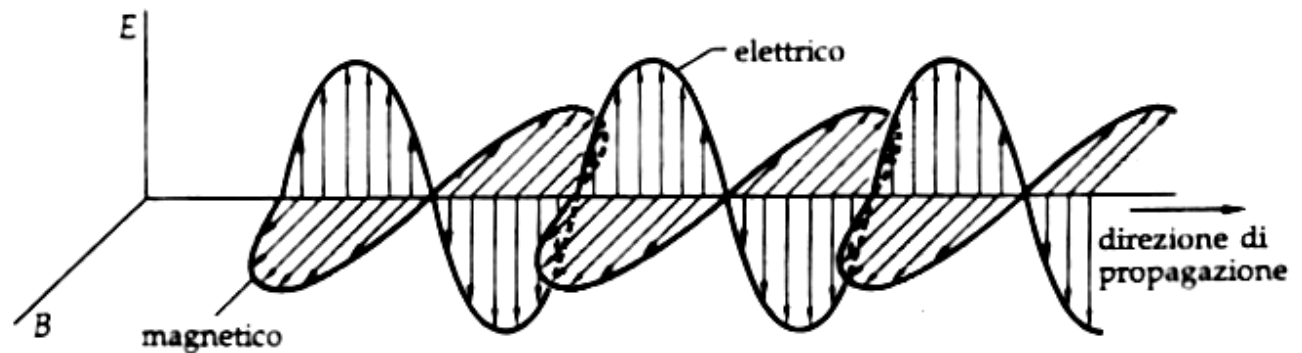
# La luce polarizzata

La luce, in base alla teoria ondulatoria, è costituita da onde elettromagnetiche (OEM). Si tratta di onde trasversali in cui le componenti del campo elettrico (E) e magnetico (B) oscillano ortogonalmente alla direzione di propagazione.

La luce del sole e quasi tutte le altre forme di illuminazione naturale ed artificiale, producono OEM in cui E e B oscillano su tutti i piani perpendicolari rispetto alla direzione di propagazione.

Nel caso in cui l'oscillazione avvenga in **una sola direzione** si parla di **onda elettromagnetica polarizzata linearmente**. Per convenzione, il piano di polarizzazione è quello nel quale oscilla la componente elettrica.

L'occhio umano non è in grado di distinguere se la luce è polarizzata oppure orientata casualmente



*Onda polarizzata linearmente dove il piano di polarizzazione è per convenzione quello nel quale oscilla la componente elettrica (in questo caso l'onda è polarizzata verticalmente)*

# La luce polarizzata

La luce polarizzata linearmente può essere ottenuta per mezzo di:

Cristalli birfrangenti (es. Prisma di Nicol –cristallo di calcite-)

Filtri polarizzatori (Polaroid)

Sfruttando l'angolo di Brewster nella riflessione

Per mezzo dei laser

*(Nelle figure successive viene riportato il solo campo elettrico. Inoltre, per semplicità, per le OEM non polarizzate sono quasi sempre riportate le sole componenti ortogonali con le quali si intende indicare “una qualunque direzione di oscillazione”)*

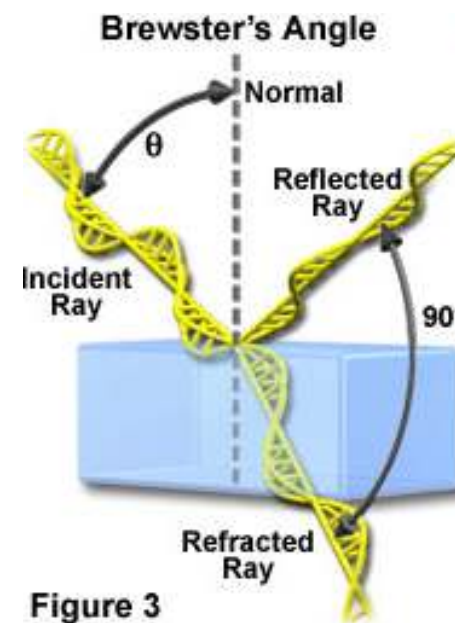


Figure 3

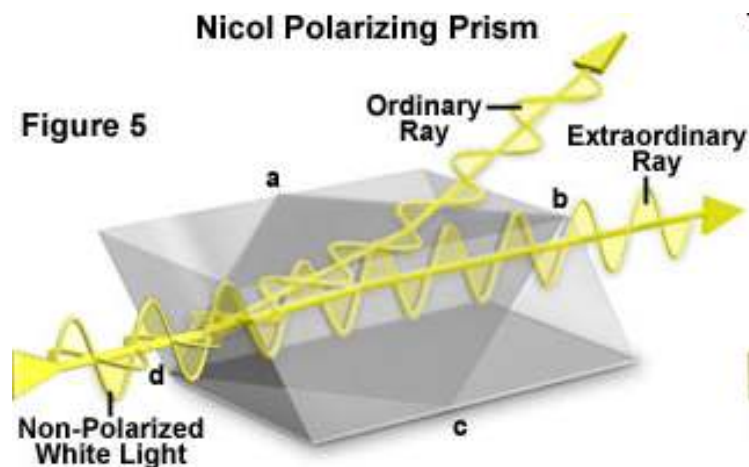


Figure 5

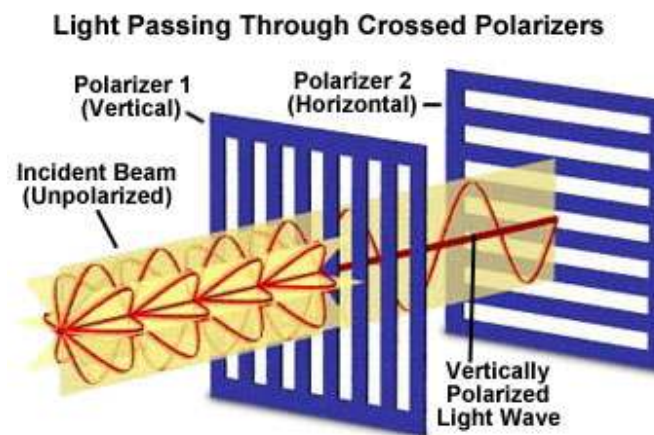


Figure 1

Figure prese da <http://www.microscopy.fsu.edu/>

# Cristalli birifrangenti

Bi-Refraction in Calcite Crystals

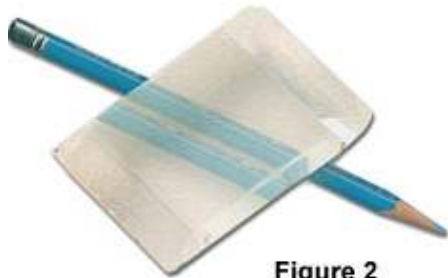


Figure 2

Esistono cristalli detti birifrangenti, come la calcite, in cui il fascio di luce percorre cammini diversi a seconda della direzione di oscillazione del campo elettrico. **Questo fenomeno può essere utilizzato, oltre che in mineralogia per lo studio delle proprietà cristalline dei materiali, anche per produrre fasci di luce polarizzata.**

Il dispositivo più utilizzato (principalmente in passato) è il prisma di Nicol, dove due cristalli sono cementati con balsamo del Canada. Nel prisma di Nicol il **fascio maggiormente deviato (ordinario) viene eliminato grazie alla presenza del balsamo del Canada** (si fa in modo che per questo fascio si raggiunga l'angolo limite di totale riflessione). Il **fascio straordinario, invece attraversa il cristallo e può essere utilizzato come luce polarizzata.**

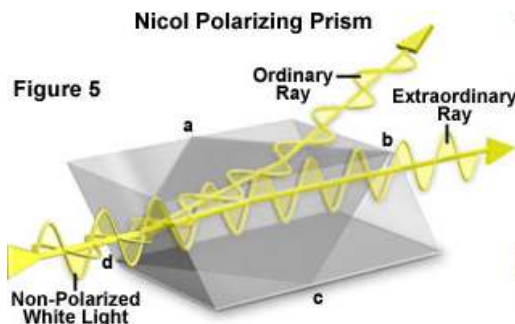
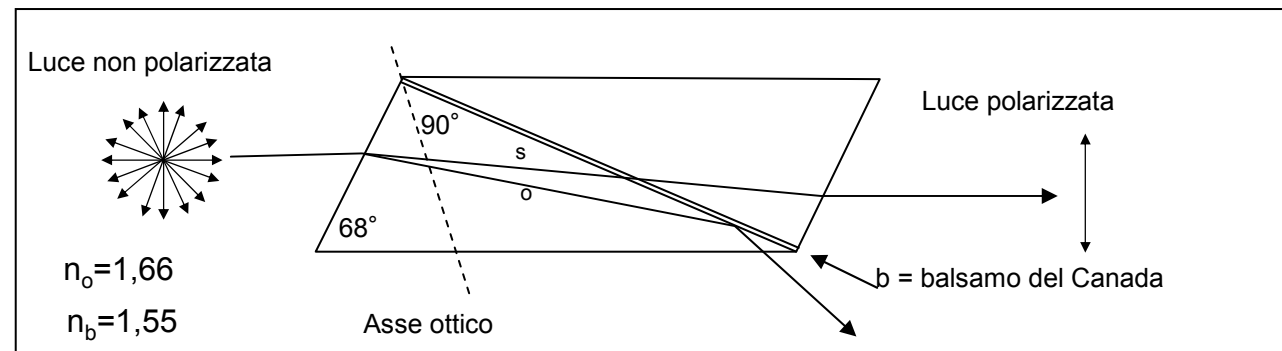
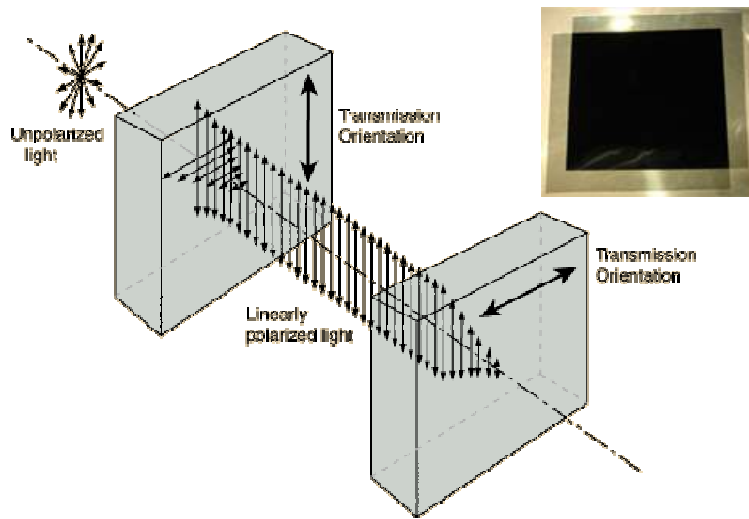


Figure 5



# Polaroid

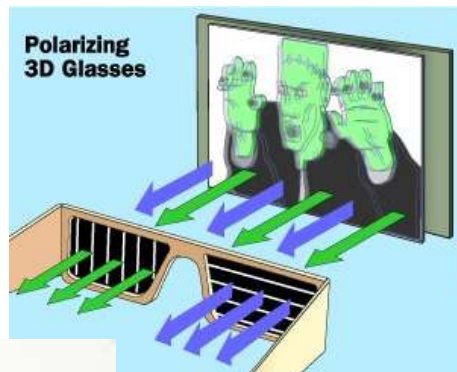


*Due filtri polaroid ortogonali non fanno passare la luce*

La maggior parte dei materiali utilizzati al giorno d'oggi per ottenere luce polarizzata derivano da un film inventato nel 1932 da Dr. Edwin H. Land.

Il film consisteva in microscopici cristalli aghiformi di iodochinina solfato o herapatite (allineati per mezzo di un campo magnetico in fase di produzione) immersi in un polimero trasparente di nitrocellulosa. La luce polarizzata perpendicolarmente alla direzione dell'allineamento dei cristalli viene assorbita.

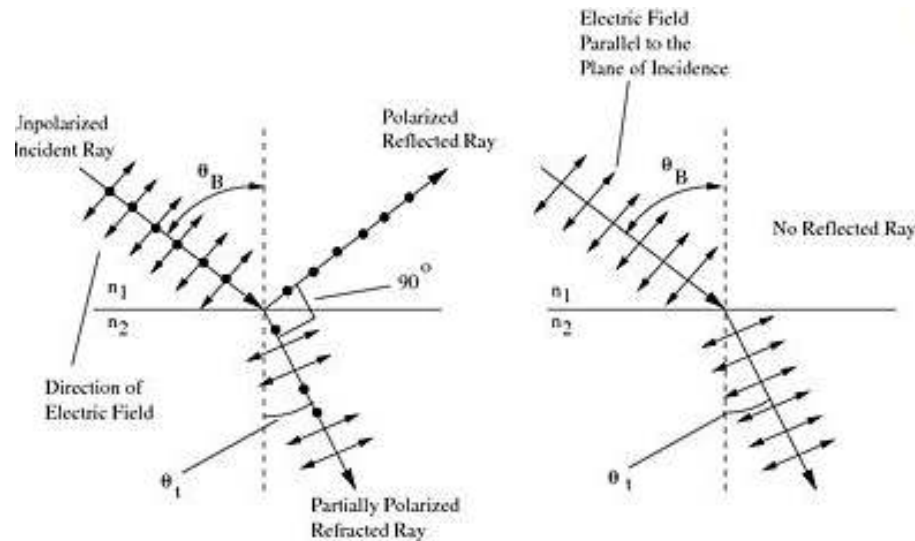
Nel tempo sono stati prodotti film con sostanze chimiche diverse e con proprietà migliori, che vengono comunque generalmente detti filtri Polaroid.



*Il cinema 3D sfrutta la polarizzazione della luce.  
In una delle versioni 3D, le due lenti raccolgono la luce polarizzata nelle due direzioni*



# Angolo di Brewster

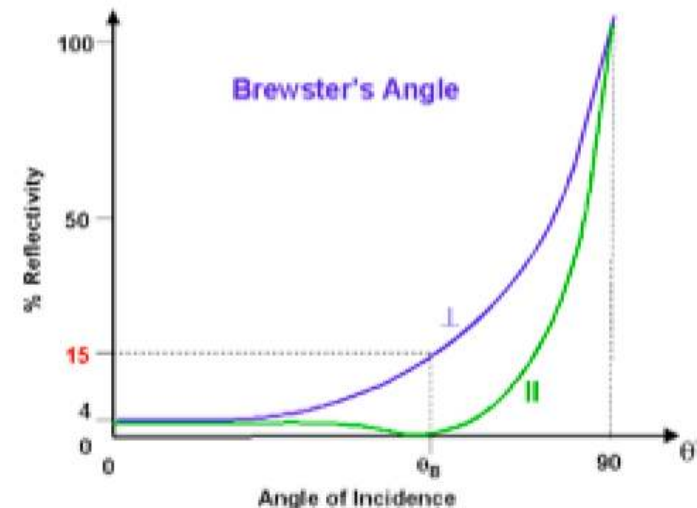


Consideriamo un fascio di luce che incide sulla superficie di un materiale isolante e siano  $n_1$  ed  $n_2$  gli indici di rifrazione dei due mezzi. Il fascio di luce verrà in parte riflesso ed in parte rifratto.

Si osserva che esiste un angolo, detto **angolo di Brewster** per il quale la **direzione di oscillazione** del campo elettrico del fascio riflesso dovrebbe essere **esattamente quella di propagazione**. Ma come sappiamo, **le OEM sono onde trasversali**, per cui questa non è una condizione possibile per la loro propagazione.

Questo vuol dire che **per tale angolo**, solo l'onda il cui campo elettrico **oscilla nel piano ortogonale al piano d'incidenza** può essere riflessa. **Per l'angolo di Brewster, la luce riflessa è polarizzata**.

A destra è riportata l'intensità della componente del campo elettrico parallela e ortogonale in funzione dell'angolo d'incidenza di un vetro con  $n=2$ . Si osserva come per  $\theta_i = \theta_B$  si ha l'annullamento della componente parallela.





# Angolo di Brewster

Con semplici considerazioni trigonometriche è possibile conoscere l'angolo di Brewster,  $\theta_B$ , tra 2 materiali; infatti la condizione è quella per cui:

$$\theta_t + \theta_B = 90^\circ$$

Da cui, ricordando che:

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin \theta_t$$

Si ha:

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin(90 - \theta_B) = n_2 \cos \theta_B \quad \longrightarrow \quad \theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

## ESEMPIO

Calcolare l'angolo di Brewster per l'acqua ( $n=1.33$ ), il vetro ( $n=1.52$ ) e il diamante ( $n=2.42$ ).

$$\theta_{ACQUA} = \arctan(1.33) \cong 53^\circ$$

$$\theta_{VETRO} = \arctan(1.52) \cong 57^\circ$$

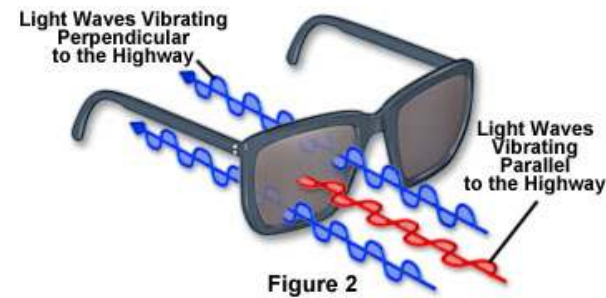
$$\theta_{DIAMANTE} = \arctan(2.43) \cong 68^\circ$$

# Angolo di Brewster

La condizione descritta si verifica ad esempio quando la luce del sole colpisce una superficie quale una strada, un vetro o l'acqua. Essendo la luce riflessa parzialmente polarizzata, **usando una polarizzatore è possibile ridurre il riverbero**. Filtri di questo genere sono applicati a occhiali e macchine fotografiche (di seguito una serie di foto scattate senza e con filtro Polaroid).



*Filtro Polaroid*



# Angolo di Brewster



*Utile anche per fotografie subacquee*