

# Fisica

**Leonello Servoli**

[Leonello.servoli@pg.infn.it](mailto:Leonello.servoli@pg.infn.it)

Tel.: 0039-348-3345847

<http://www.fisica.unipg.it/~servoli>

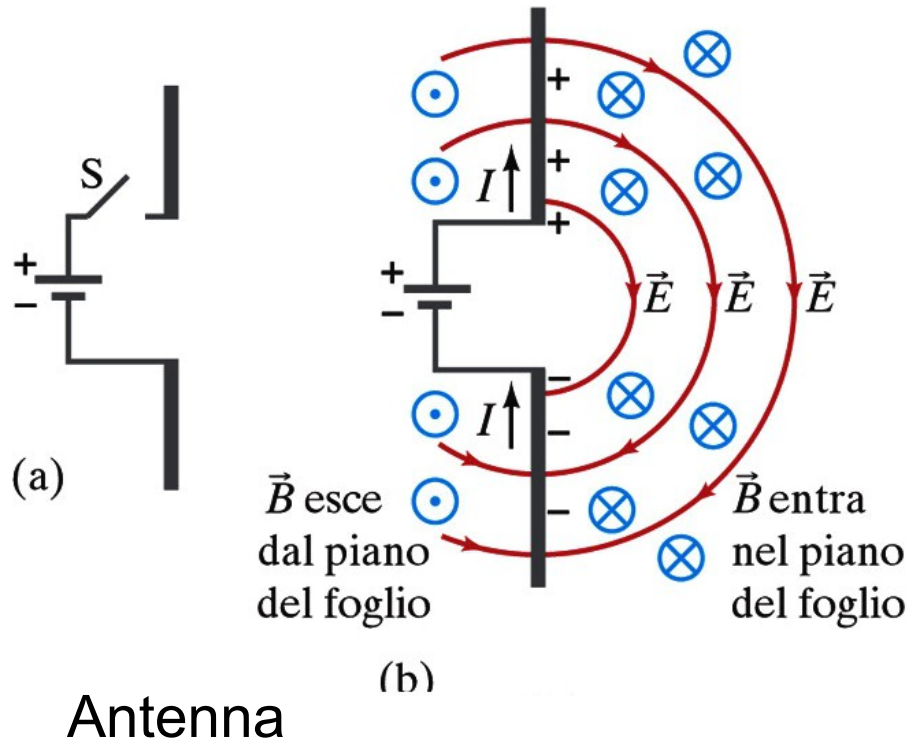
# ONDE ELETTROMAGNETICHE

È possibile dimostrare che come un campo magnetico variabile crea un campo elettrico indotto, così un campo elettrico variabile crea un campo magnetico indotto.

Quindi un campo magnetico può essere generato non soltanto da una normale corrente elettrica, ma anche dalla variazione di un campo elettrico o di un flusso elettrico.

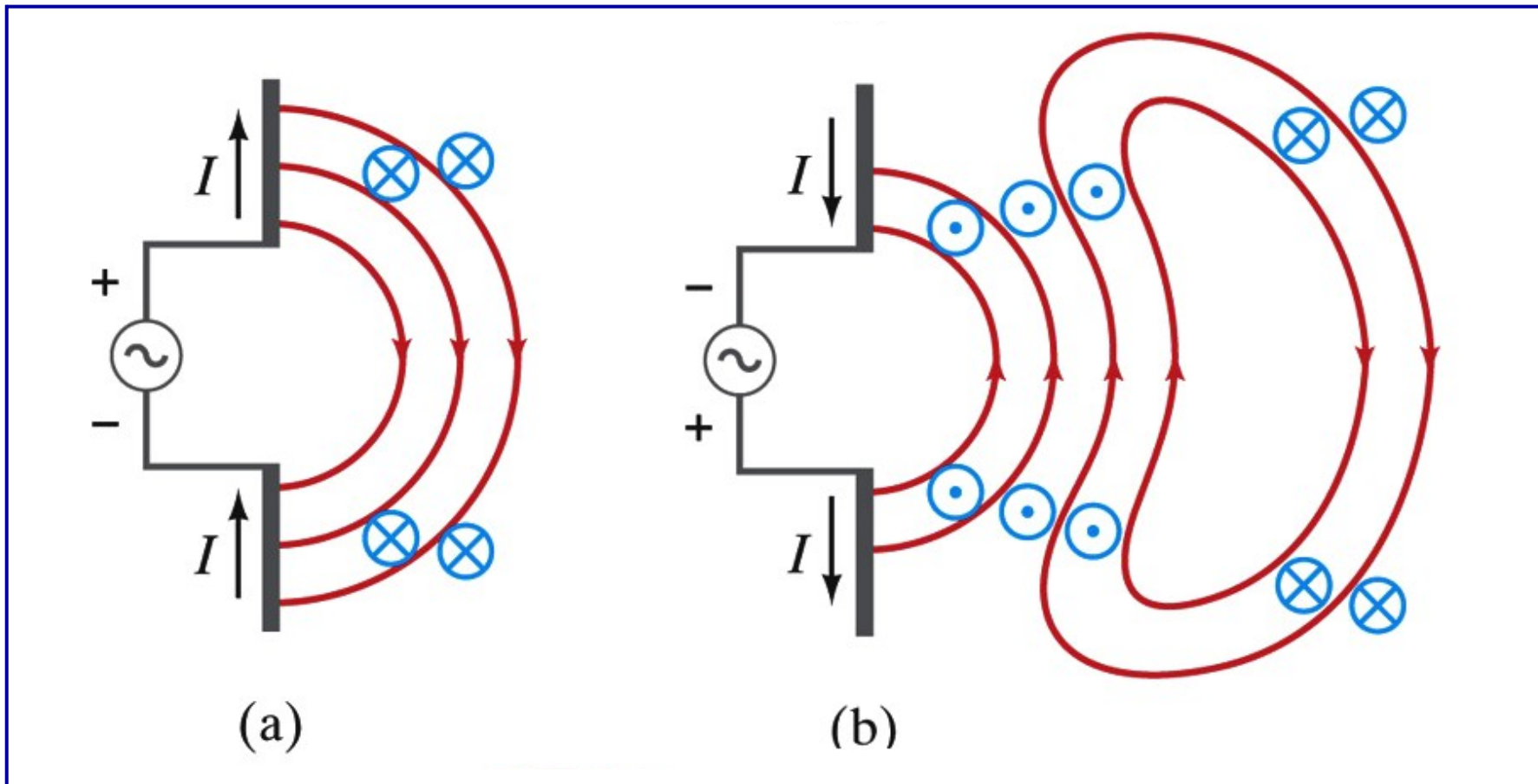
Se un campo magnetico variabile genera un campo elettrico, anche quest'ultimo è variabile, e la sua variazione genererà un campo magnetico variabile, che a sua volta produrrà un campo elettrico variabile e così via  $\Rightarrow$  **onde elettromagnetiche**.

# ONDE ELETTROMAGNETICHE



Campi prodotti da cariche che scorrono nei conduttori alla chiusura dell'interruttore. I campi impiegano un certo tempo per raggiungere zone lontane uscendo dai conduttori.

# ONDE ELETTROMAGNETICHE

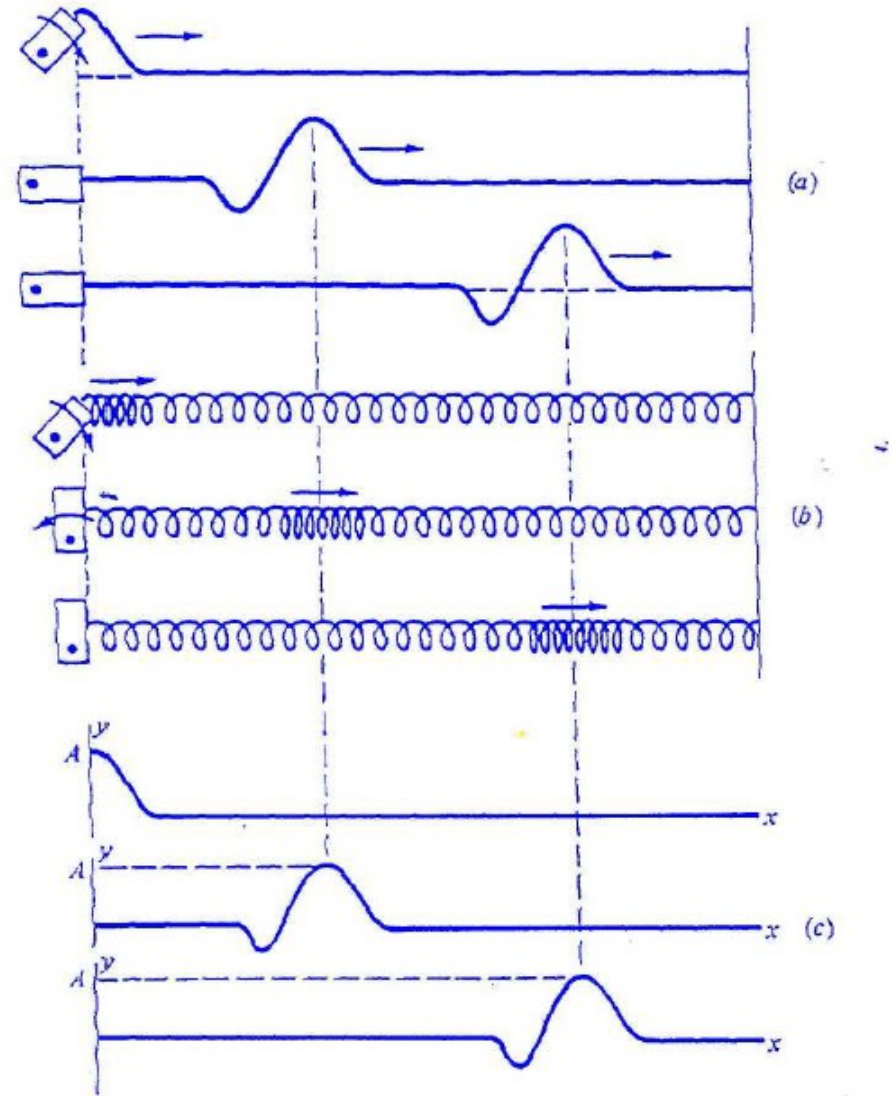


Sequenza che mostra campi elettrici e magnetici, che si diffondono emanati da cariche oscillanti in due conduttori collegati ad una sorgente di corrente alternata.

# ONDE

Un'onda elastica è una perturbazione che si propaga in **un mezzo** senza movimento di materia

Ogni punto del corpo elastico oscilla intorno alla sua posizione di equilibrio con moto periodico



# ONDE

Durante la propagazione di un'onda  
non c'è trasporto di materia,  
ma propagazione di energia.

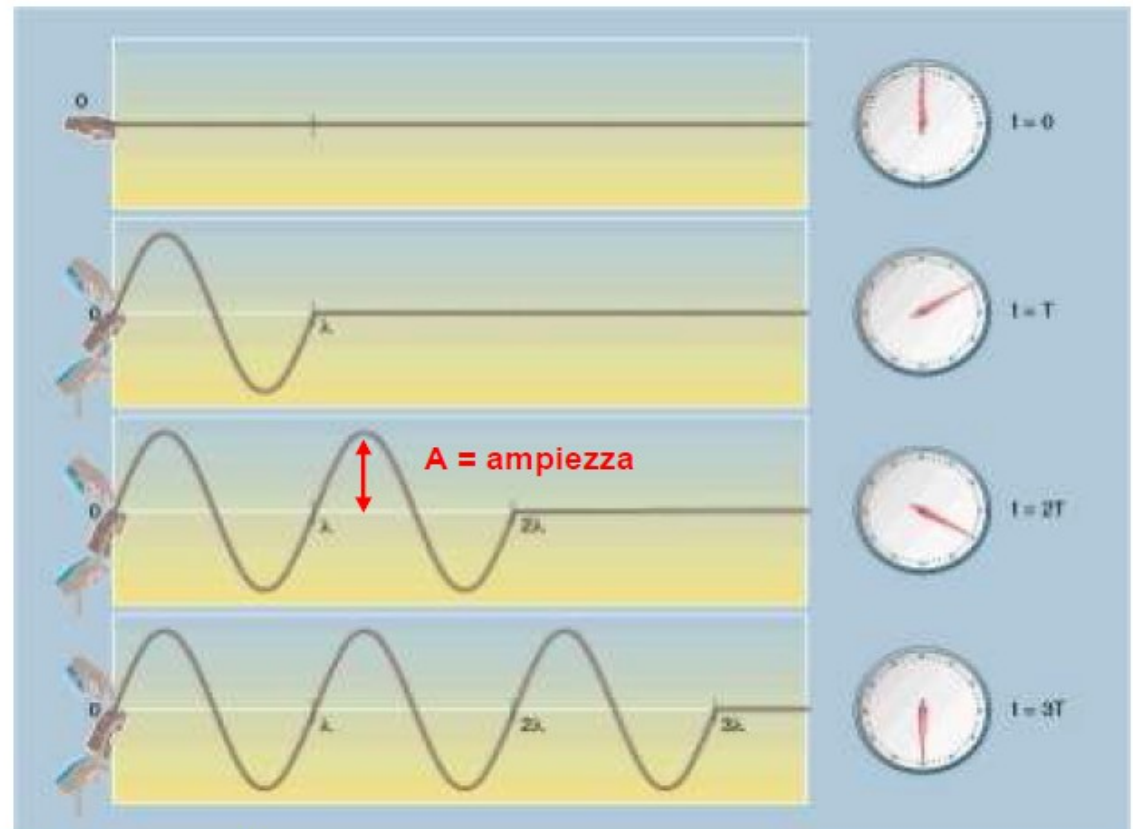
# ONDE SINUSOIDALI

Facendo oscillando con legge armonica l'estremo di una corda tesa si produce un'onda sinusoidale

Nei 4 istanti di tempo intervallati da un periodo  $T$ , l'onda si sposta di una distanza pari a  $\lambda$

Velocità dell'onda  
 $vel = \lambda/T = \lambda \cdot \nu$

Frequenza dell'onda  $\nu = 1/T$



# ONDE

Durante la propagazione di un'onda non c'è trasporto di materia, ma propagazione di energia

Si definisce ***intensità*** di un'onda l'energia che attraversa nell'unità di tempo una superficie unitaria posta normalmente alla direzione di propagazione

$$\frac{\text{joule}}{m^2 \cdot s} = \frac{\text{watt}}{m^2}$$



# ONDE

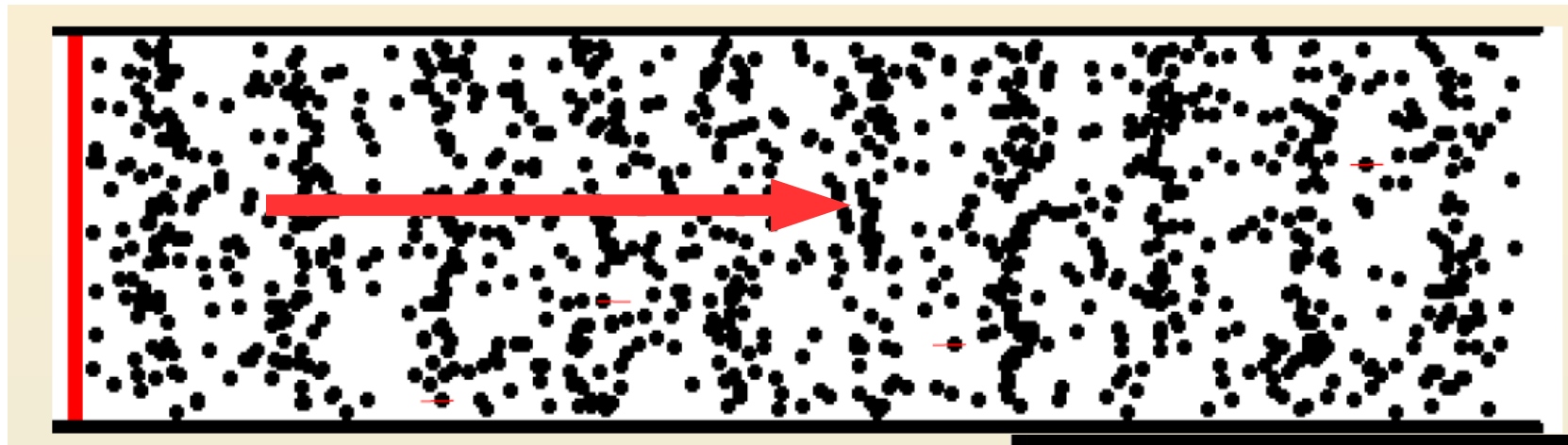
---

Le onde possono essere:

longitudinali: la perturbazione è parallela alla direzione di propagazione dell'onda

trasversali: la perturbazione è ortogonale alla direzione di propagazione dell'onda

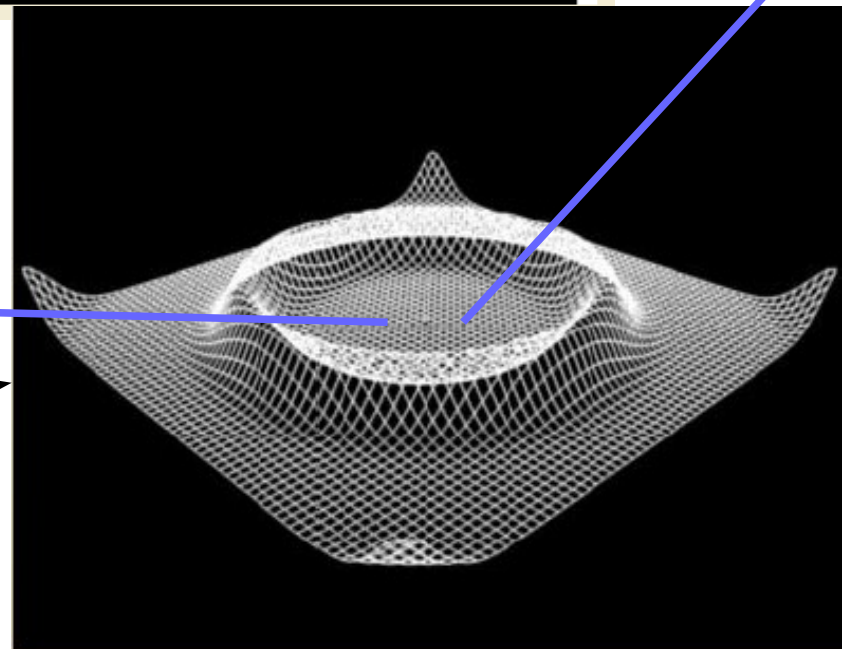
# Onde longitudinali



Direzione di propagazione

Direzione di propagazione

# onde trasversali

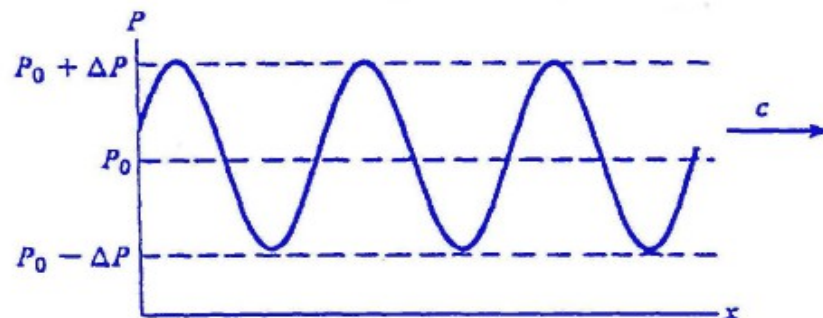
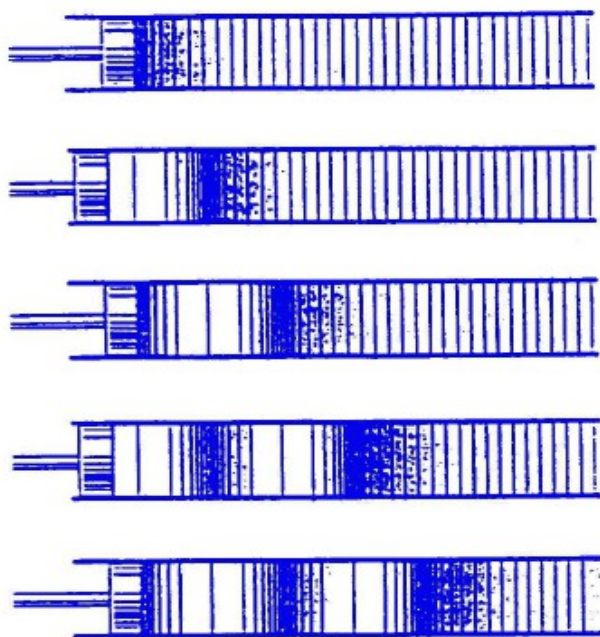


# ONDE SONORE

Qual è la grandezza fisica che oscillando produce il suono?

Un'onda sonora consiste in oscillazioni della **pressione** dell'aria (o di un altro mezzo elastico)

Il suono è un'onda longitudinale



Un'onda è udibile dall'orecchio umano se la sua frequenza è compresa nell'intervallo

**20 Hz – 20000 Hz**

# Equazioni di Maxwell

Campi costanti nel tempo

Campi variabili nel tempo

$$\oint_S \vec{E}_0 \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

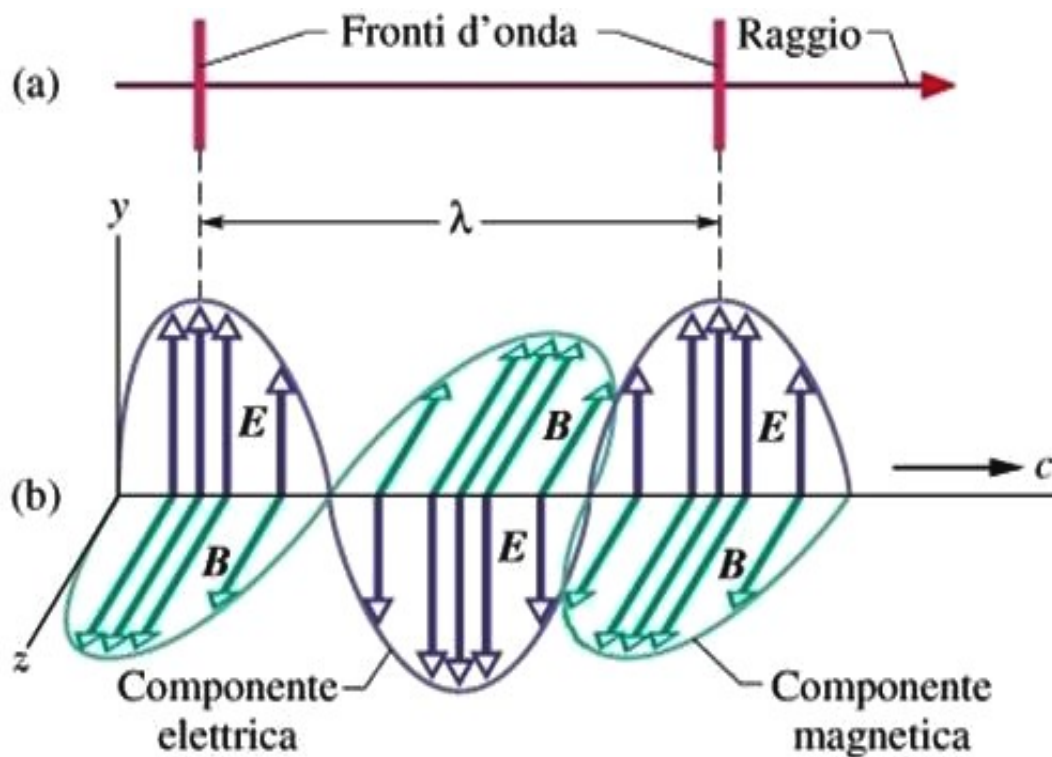
$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$\oint_S \vec{B}_0 \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left( I + \int_S \frac{\partial \vec{E}_0}{\partial t} \cdot d\vec{S} \right)$$

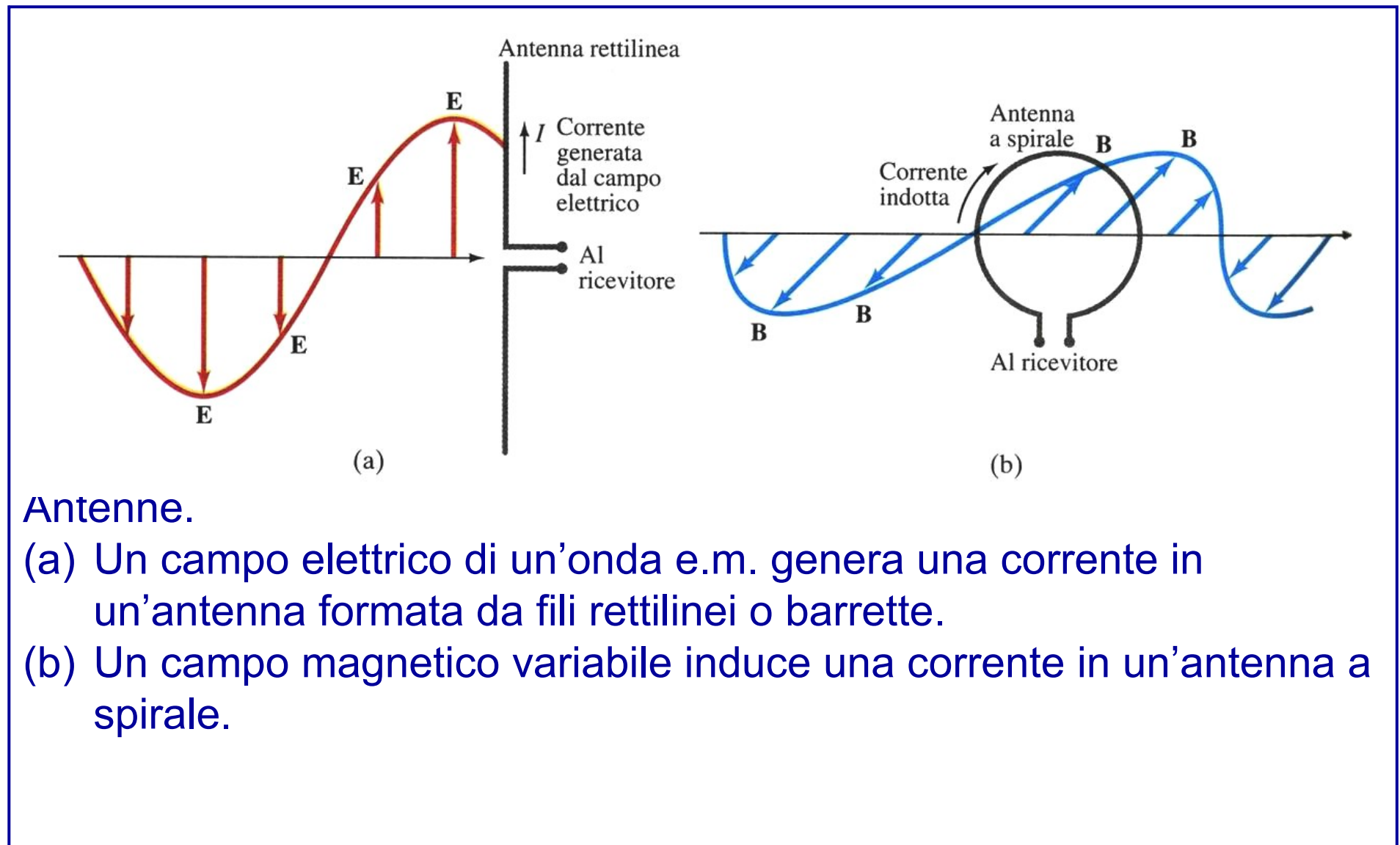
# ONDE ELETTROMAGNETICHE

Un'onda elettromagnetica è costituita da un campo elettrico e da un campo magnetico, variabili nel tempo ed accoppiati. Essi sono in fase, ed in ogni punto perpendicolari fra loro ed alla direzione di propagazione.



- (a) Un'onda e.m. rappresentata da un raggio e da due fronti d'onda.
- (b) La stessa onda rappresentata da una "foto istantanea" dei campi E e B nei punti sull'asse  $x$ , lungo cui l'onda avanza con velocità  $c$ .

# ONDE ELETTROMAGNETICHE



Antenne.

(a) Un campo elettrico di un'onda e.m. genera una corrente in un'antenna formata da fili rettilinei o barrette.

(b) Un campo magnetico variabile induce una corrente in un'antenna a spirale.

# ONDE ELETTROMAGNETICHE (3)

Partendo dalle leggi dell'elettromagnetismo J.C. Maxwell fu in grado di prevedere l'esistenza delle onde elettromagnetiche, calcolandone la velocità nel vuoto mediante le costanti dell'elettromagnetismo.

$$c = \lambda \nu = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

lunghezza d'onda

frequenza

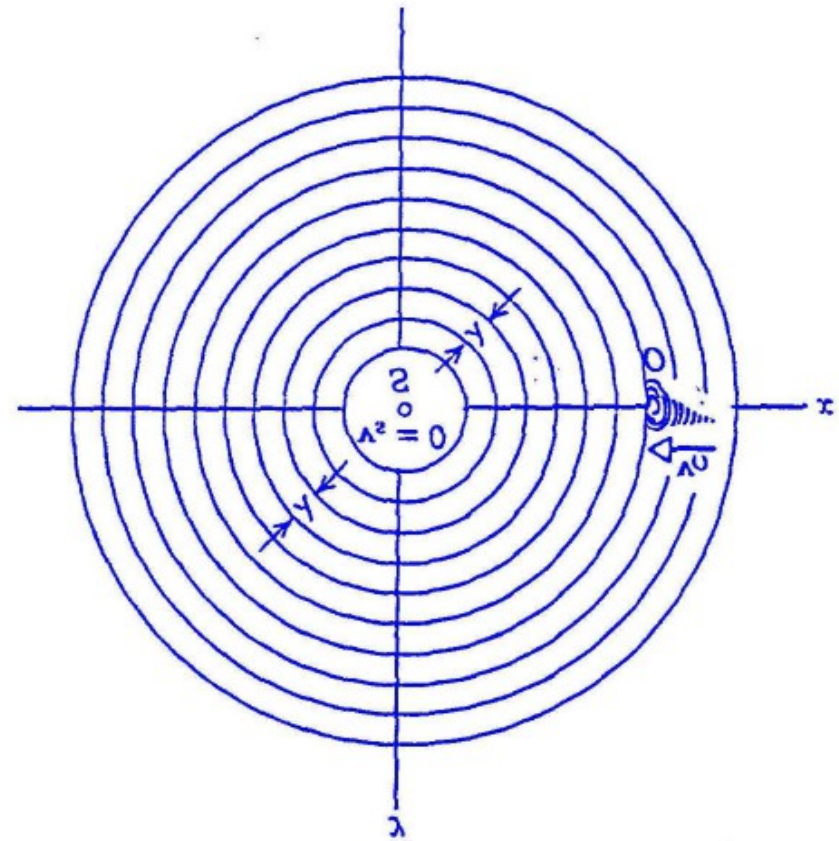
Questo è indipendente dal sistema di riferimento e quindi **non soddisfa la relatività galileiana**

# EFFETTO DOPPLER

Variazione della frequenza di un'onda dovuta al moto relativo fra sorgente ed osservatore

Moto dell'osservatore

Se l'osservatore va incontro (si allontana) con una certa velocità, egli raccoglie in 1 secondo un numero di cicli maggiori (minori) di quelli che raccoglierebbe se si trovasse in quiete



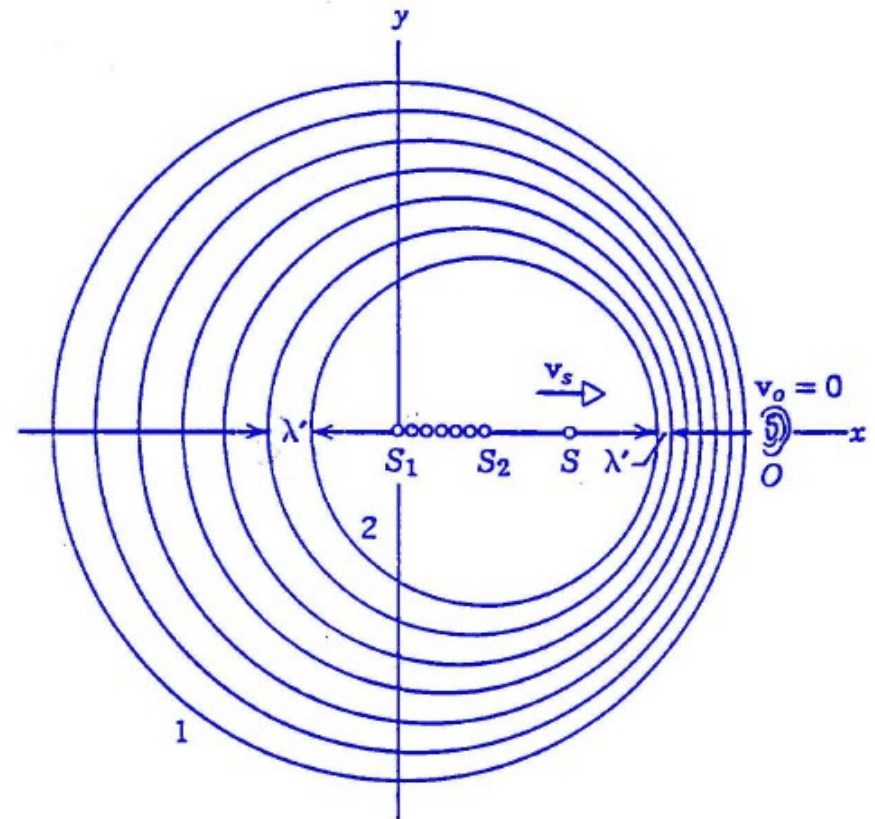


# EFFETTO DOPPLER

Variazione della frequenza di un'onda dovuta al moto relativo fra sorgente ed osservatore

Moto della sorgente

La sorgente emette i cicli ad intervalli di tempo  $T$ , ma si avvicina (si allontana) all'osservatore per cui egli percepisce una frequenza maggiore (minore)



# EFFETTO DOPPLER

Indicando con  $\nu_0$  la frequenza propria dell'onda, per la frequenza percepita  $\nu'$ , possiamo scrivere

$$\nu' = \frac{u_{onda} \pm u_{rivelatore}}{u_{onda} \mp u_{sorgente}} \nu_0$$

dove  $u_{onda}$ ,  $u_{rivelatore}$  ed  $u_{sorgente}$  sono i rispettivi moduli delle velocità dell'onda, del rivelatore e della sorgente.

# Che fare?

---

Si aprono varie possibilità:

(1) la teoria dell'elettromagnetismo è sbagliata

(2) per l'elettromagnetismo non vale un principio di relatività

(3) la meccanica e l'elettromagnetismo hanno principi di relatività diversi

(4) la meccanica newtoniana è sbagliata

# Che fare?.....

---

Le possibilità

(2) per l'elettromagnetismo non vale un principio di relatività

(3) la meccanica e l'elettromagnetismo hanno principi di relatività diversi

produrrebbero degli scenari non accettabili.

Se fosse vero (2) la verifica sperimentale della teoria elettromagnetica sarebbe assai problematica.

La situazione (3) è del tutto plausibile, ma non soddisfacente dal punto di vista della comprensione del mondo fisico.

# Che fare?.....

---

Storicamente, all'inizio del 1900 si sono confrontate le due possibilità

(1) la teoria dell'elettromagnetismo è sbagliata

(4) la meccanica newtoniana è sbagliata

La totalità dei fisici teorici e sperimentali europei si concentrarono sulla possibilità (1) costruendo così, dal punto di vista sperimentale, un poderoso insieme di misure ed esperimenti che confermavano, con precisioni per l'epoca assai spinte, *l'elettromagnetismo*.

# Che fare?.....

---

Accettando il verdetto dell'esperimento Albert Einstein (1879-1955) si convinse che il modello elettromagnetico era giusto e scrisse una relatività funzionante per esso

## *Relatività Ristretta*

e al contempo affermò quindi che la Meccanica Classica, modello perfettamente funzionante dalla fine del 1600, era sbagliata.

# GALILEO



# EINSTEIN

$$\vec{V}' = \vec{V} - \vec{V}_{relativa}$$

$$t' = t$$

$$P = mv \quad \text{impulso}$$

$$E_0 = 0 \quad \text{energia a riposo}$$

$$E = \frac{P^2}{2m} \quad \text{energia cinetica}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V_{relativa}^2}{c^2}}}$$

$$l' = \frac{l}{\gamma} \quad \text{contrazione delle lunghezze}$$

$$t' = t\gamma \quad \text{dilatazione temporale}$$

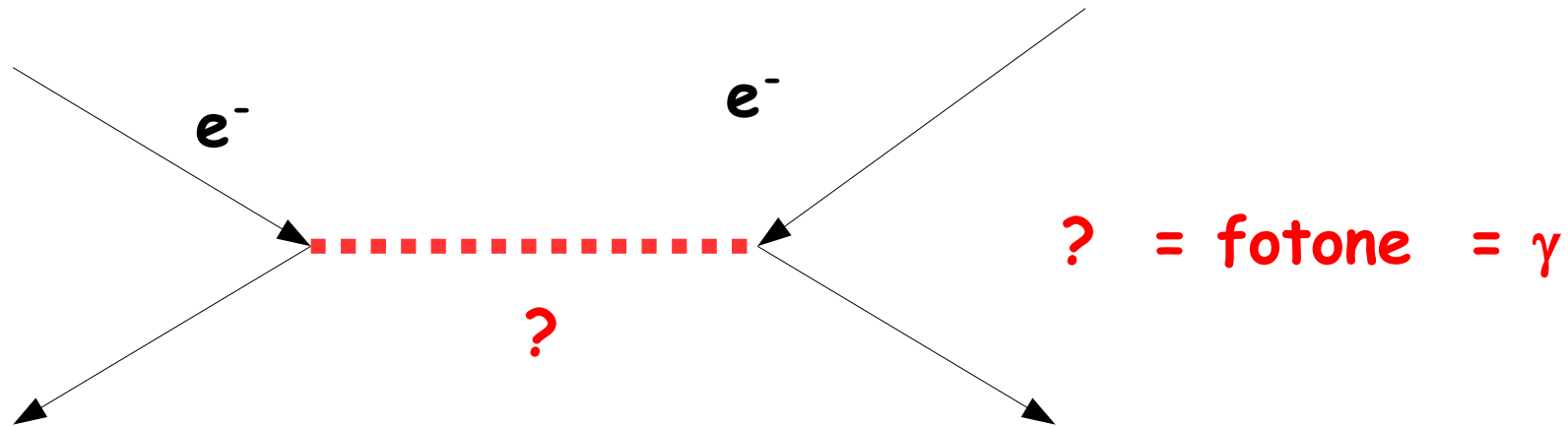
$$P = \gamma mv \quad \text{impulso}$$

$$E_0 = mc^2 \quad \text{energia a riposo}$$

$$E = \gamma E_0 \quad \text{energia cinetica}$$

# Il Fotone

Descrizione del campo elettromagnetico come una particella scambiata tra cariche:



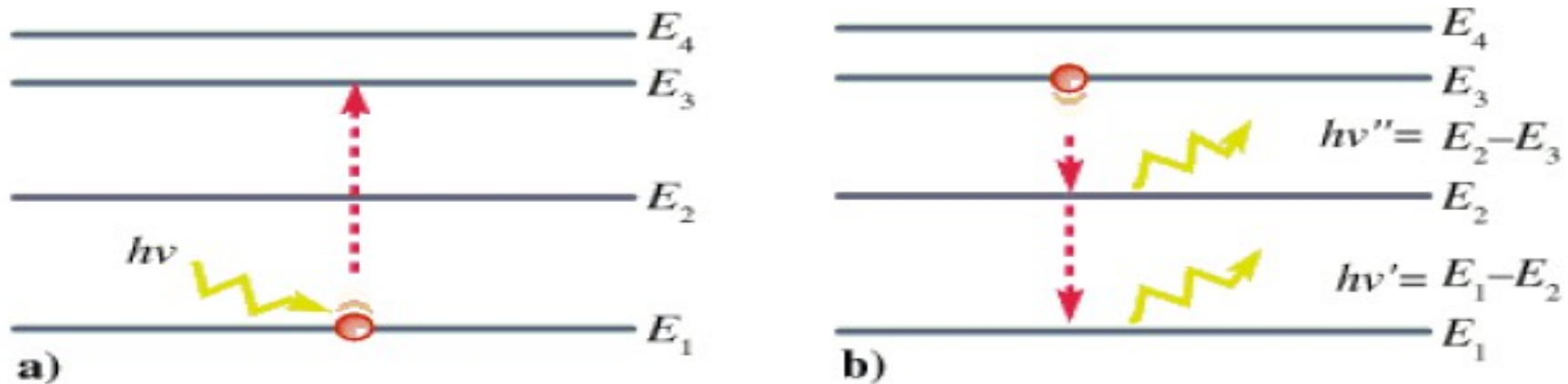
L'energia  $E$  trasportata da un'onda elettromagnetica monocromatica di frequenza  $\nu$  può assumere solo valori discreti, multipli interi di un valore elementare  $\varepsilon$ , l'energia del fotone, proporzionale alla frequenza dell'onda:

$$E = n\varepsilon \quad \varepsilon = h\nu \quad h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad (\text{h = costante di Planck})$$



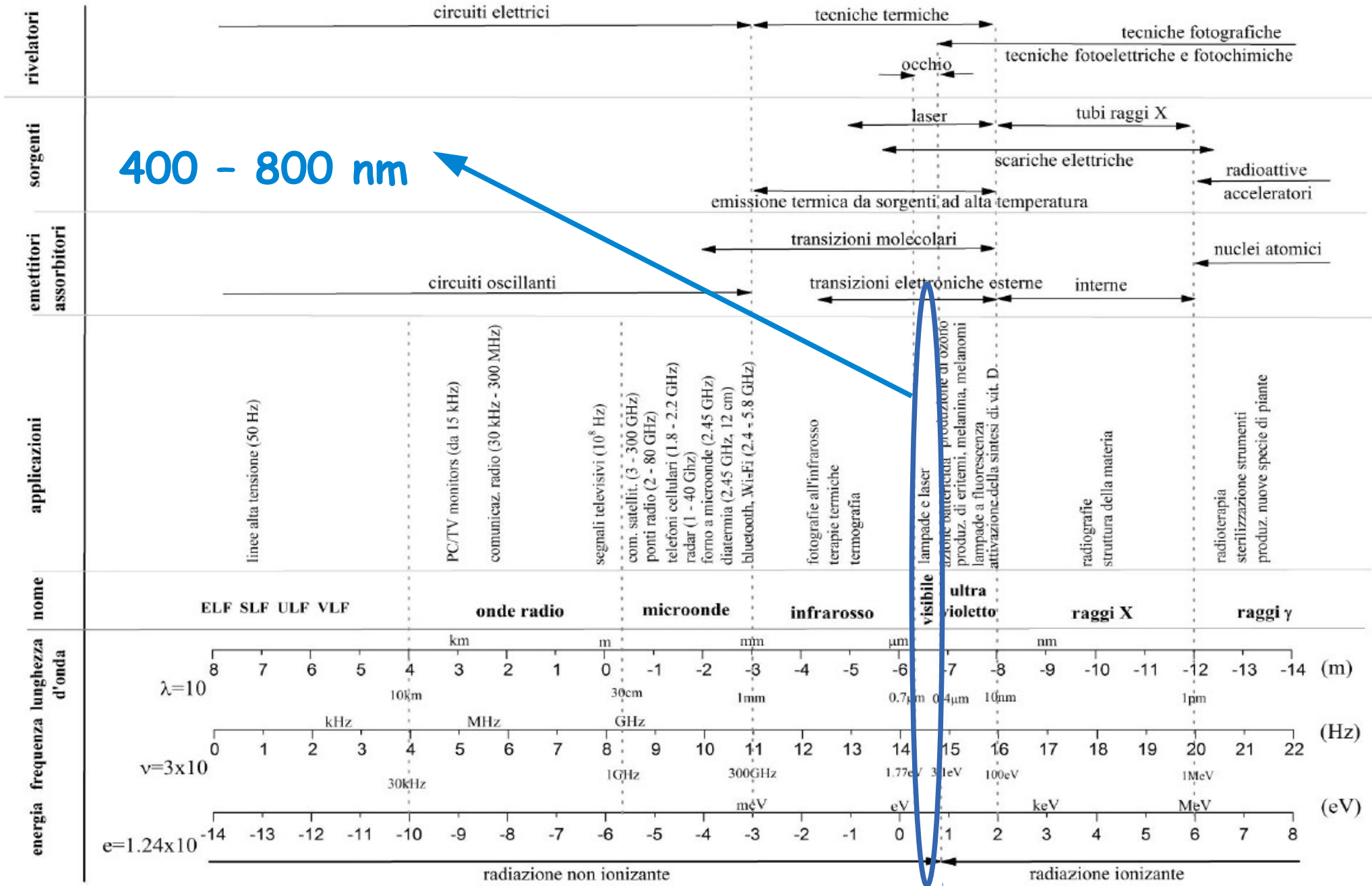
L'assorbimento di un fotone fa passare l'atomo, o la molecola, da un livello fondamentale (di energia  $E_1$ ) a un livello eccitato (energia  $E_n$ ), cedendogli tutta la propria energia:

$$E_n - E_1 = h\nu$$

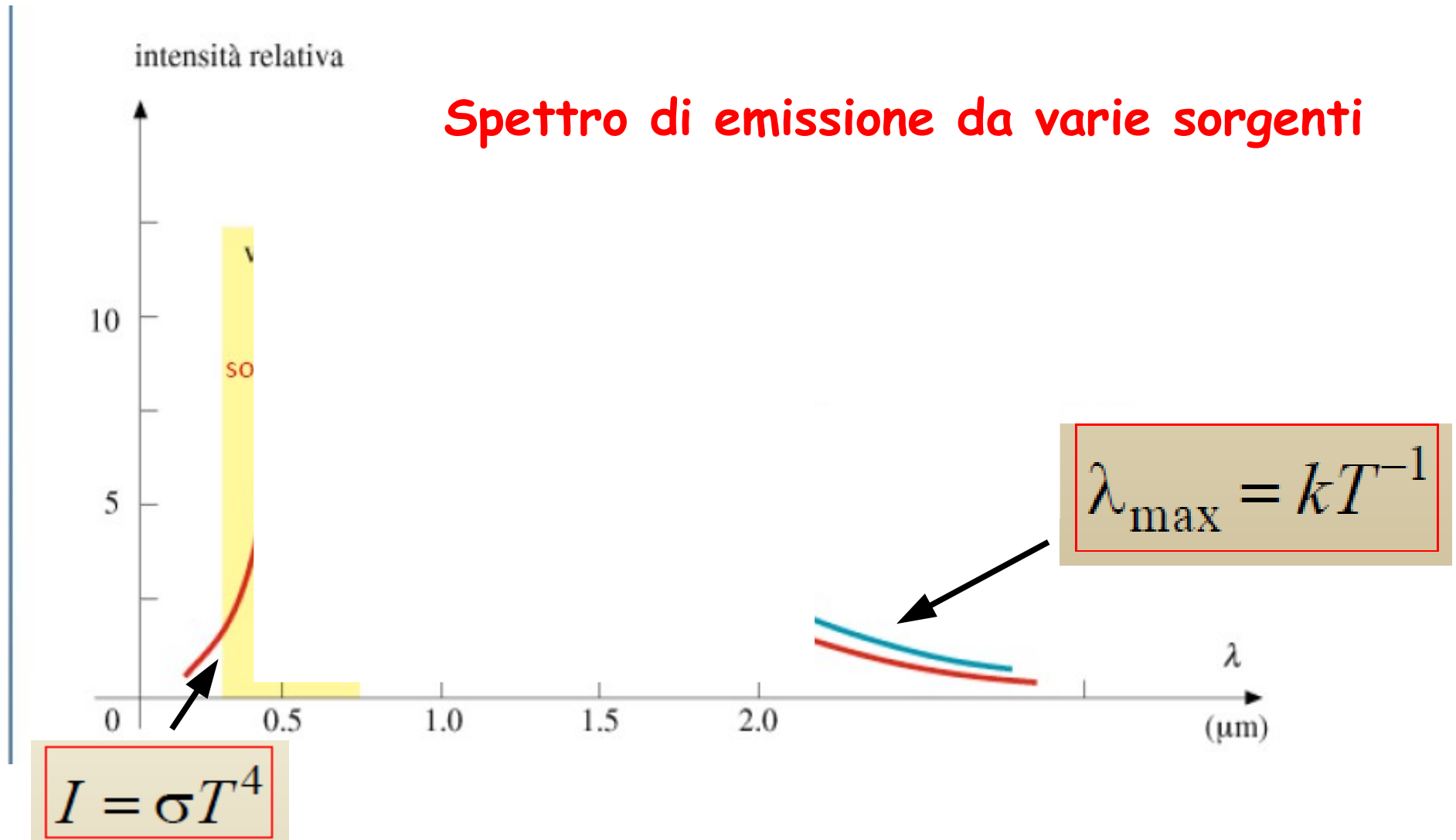


Una volta eccitato, l'atomo torna spontaneamente al livello fondamentale. La diseccitazione può avvenire in un salto unico o con una successione di passaggi a livelli energetici sempre più bassi: ad ogni transizione fra due stati  $i$  e  $j$  (di energia  $E_i$  ed  $E_j$ , con  $E_i > E_j$ ) corrisponde l'emissione di un fotone la cui energia è pari alla differenza di energia dei livelli fra cui avviene la transizione:

$$h\nu = E_i - E_j$$

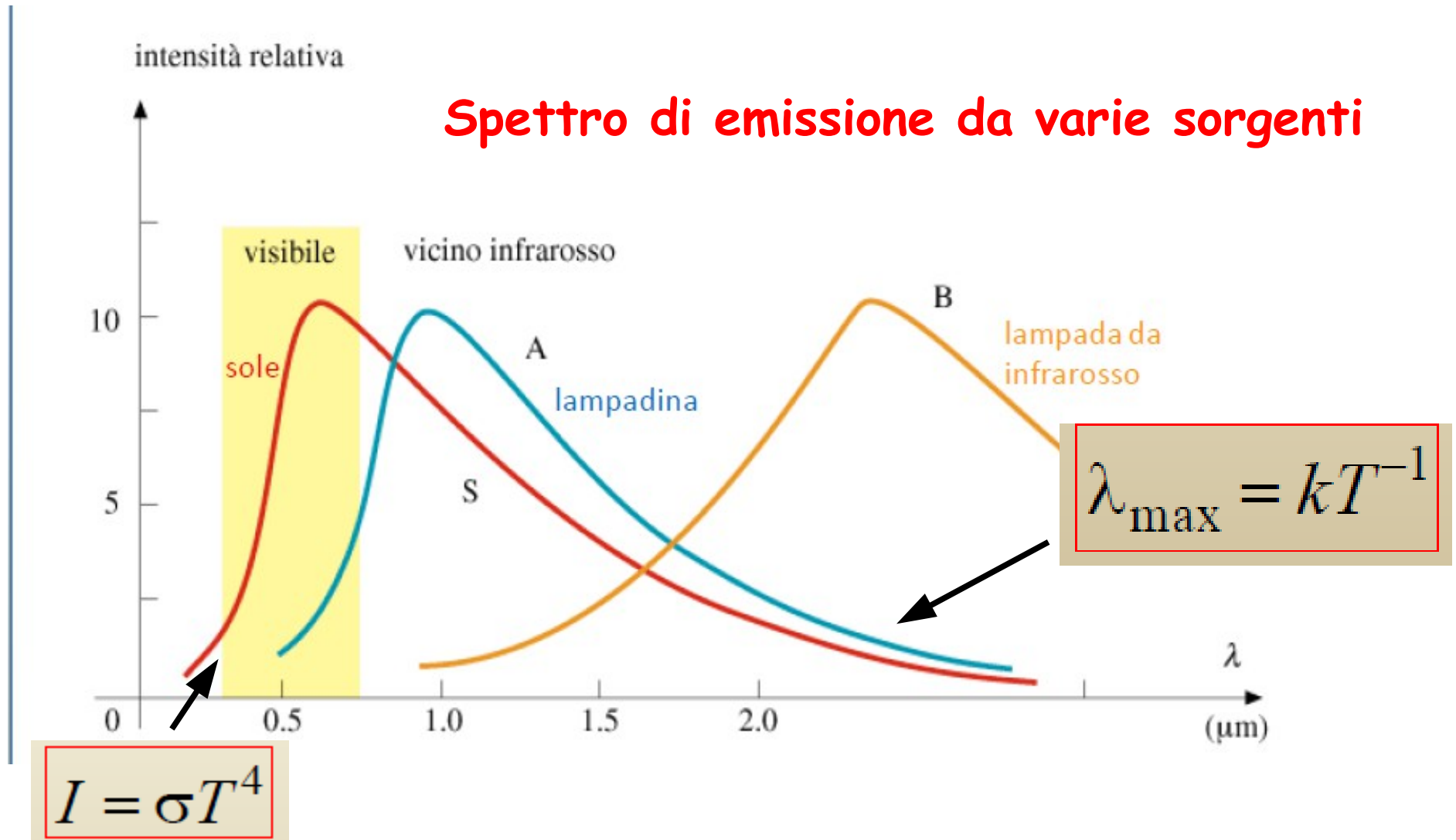


# Emissione di radiazione elettromagnetica

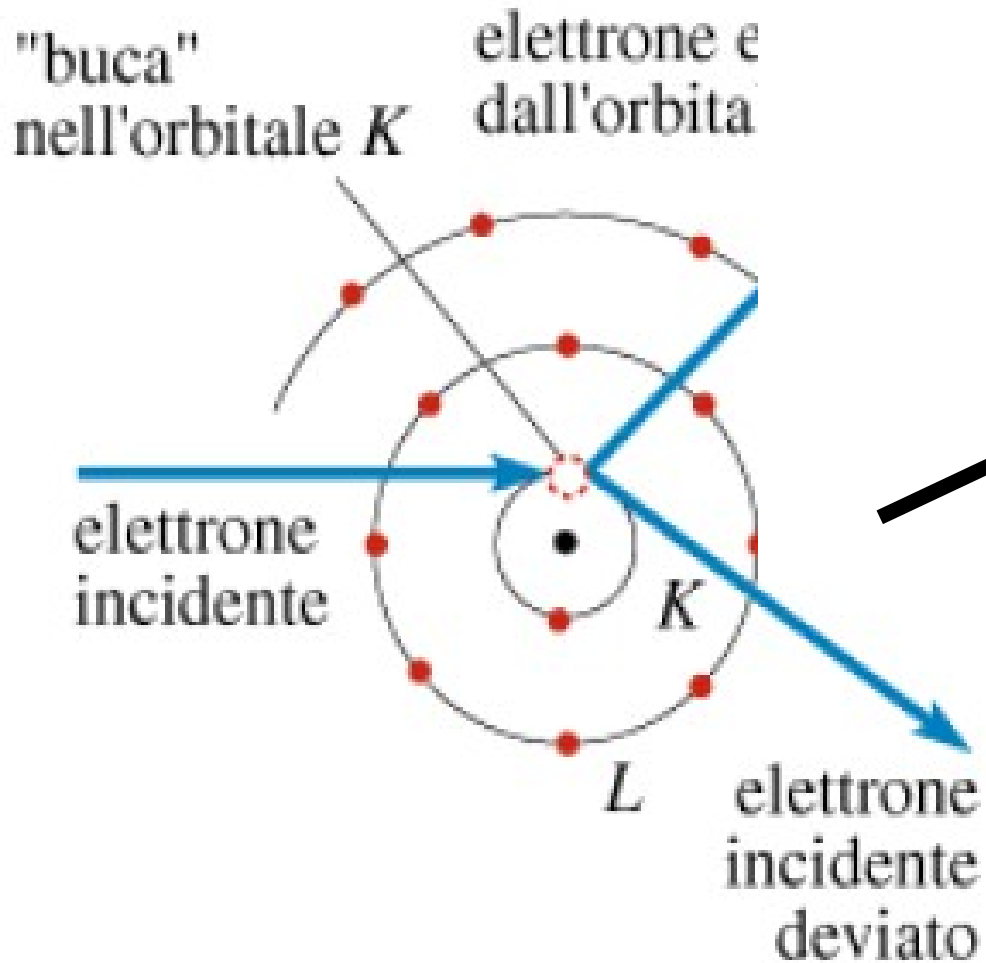


# Emissione di radiazione elettromagnetica

Ipotesi di Plank: energia scambiata solo in maniera quantizzata

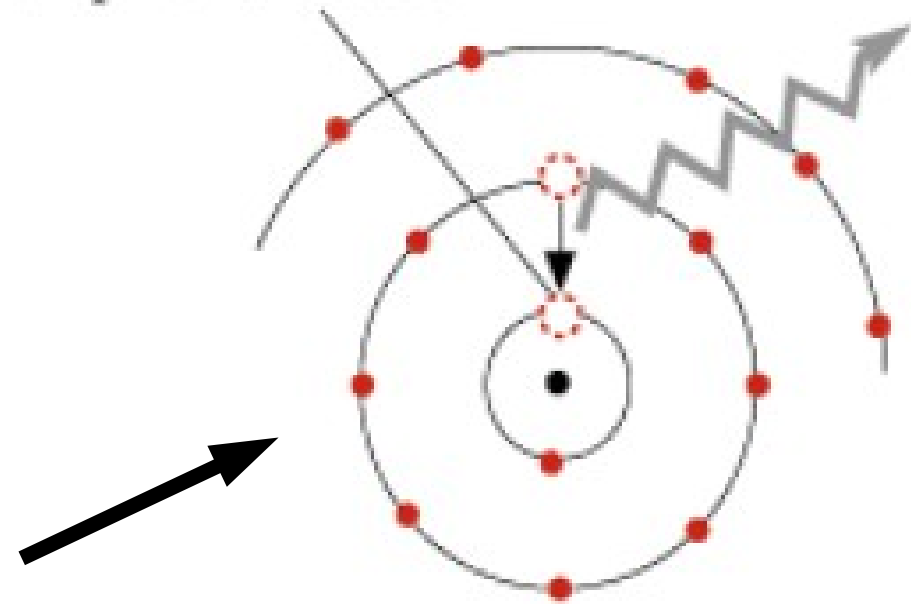


(1)



l'elettrone da un orbitale esterno va a riempire la "buca"

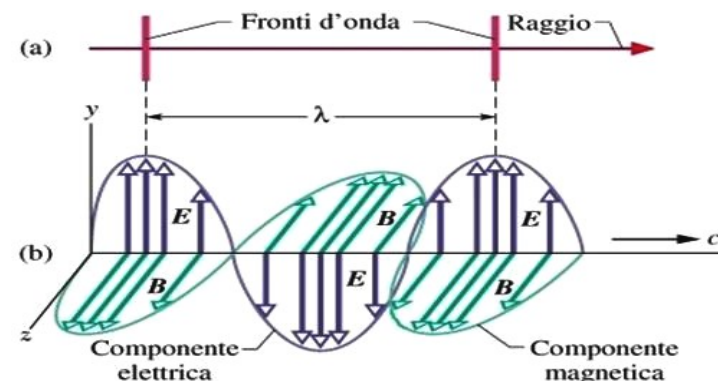
fotone di alta frequenza (raggi X da orbitale  $K$ )



(2)

# OTTICA GEOMETRICA (1)

*Si ignora il carattere ondulatorio della luce e si parla di raggi luminosi che si propagano in linea retta.*



Fenomeni della riflessione e rifrazione: studio dei sistemi ottici centrati.

# OTTICA GEOMETRICA (2)

---

Un'onda e.m. si propaga rettilineamente in un mezzo omogeneo ed isotropo con velocità

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

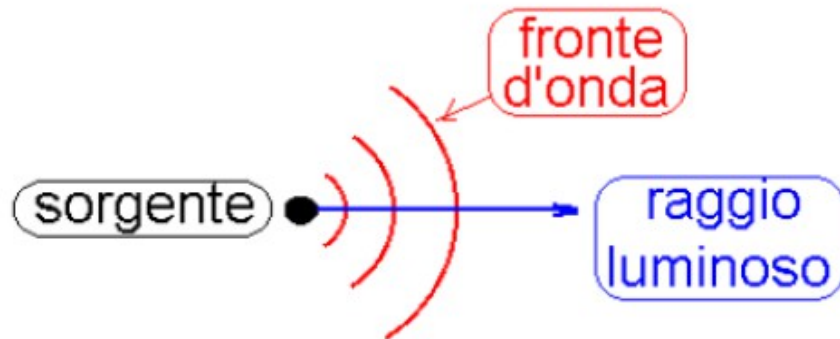
$$n > 1$$

$n$  si chiama indice di rifrazione e dipende sia dal mezzo sia dalla lunghezza d'onda della radiazione

## Principio di Huyghens

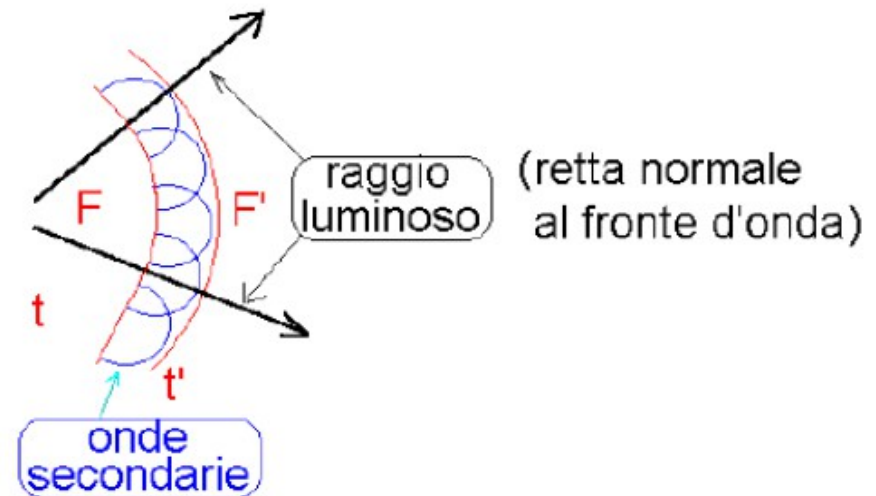
Fronti d'onda: superfici in ogni punto delle quali le onde sono in fase.

Se lo spazio in cui la luce si propaga, partendo da una sorgente puntiforme, è omogeneo e isotropo, le superfici d'onda sono sferiche.

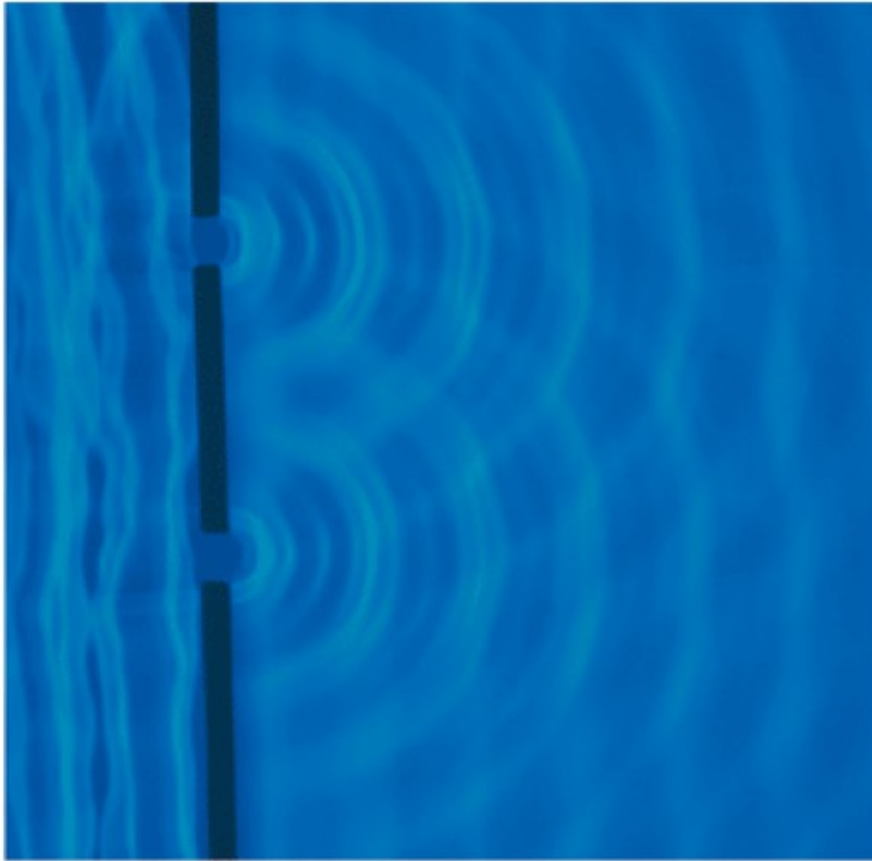


*Principio di Huyghens: Ogni punto di una superficie può essere considerato come sorgente di onde sferiche secondarie.*

Il fronte d'onda ad un istante successivo è dato dalla superficie tangente a tutti gli infiniti fronti d'onda delle onde secondarie, cioè dall'involuppo delle loro superfici.







Onde sulla superficie dell'acqua che evidenziano le onde elementari di Huygens. Un'onda piana incide sulla barriera con due piccole aperture e ciascuna di esse agisce come sorgente di onde elementari circolari.

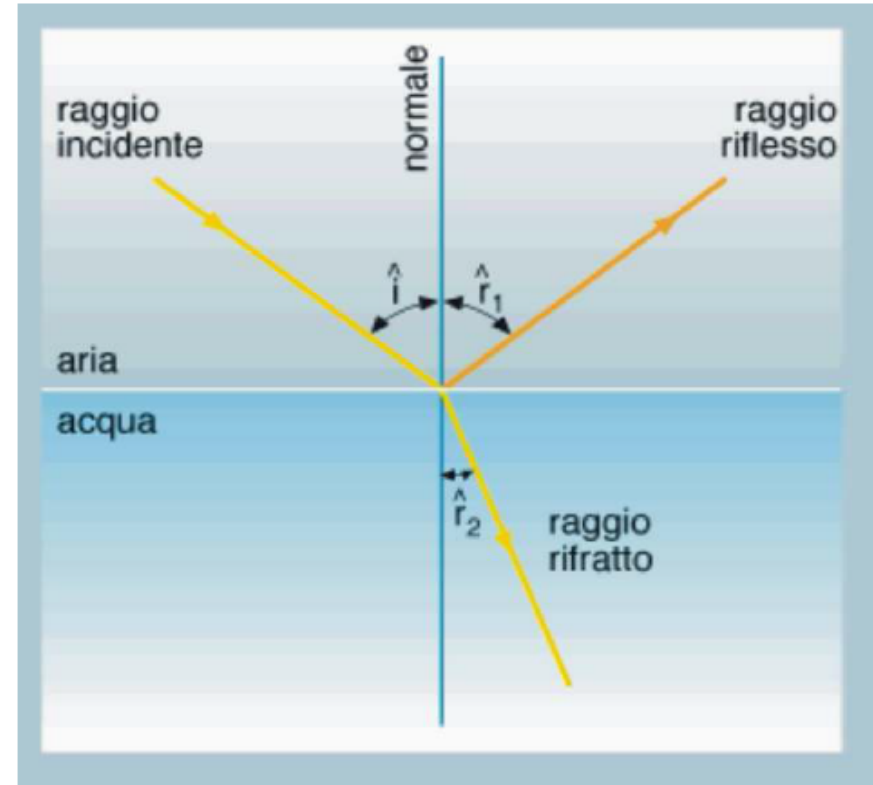
# RIFLESSIONE E RIFRAZIONE

Un'onda e.m., che incide su una superficie di separazione fra due mezzi trasparenti, si suddivide in due raggi: un raggio riflesso ed uno rifratto

Il raggio riflesso, il raggio rifratto e la normale alla superficie nel punto di incidenza sono complanari

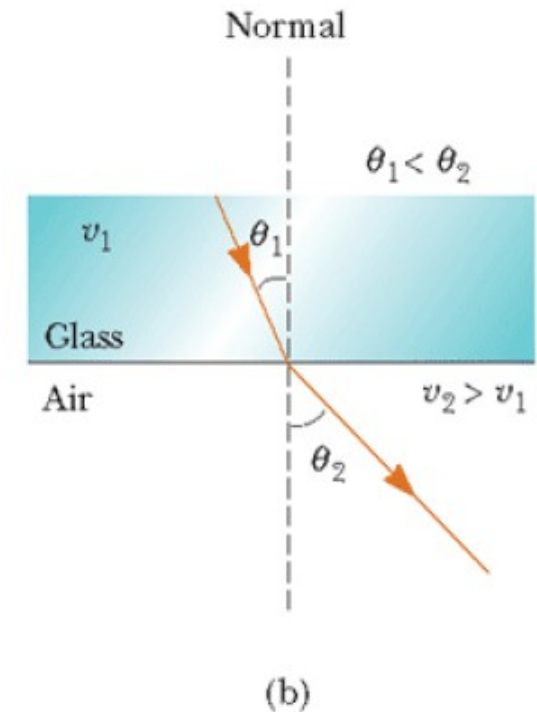
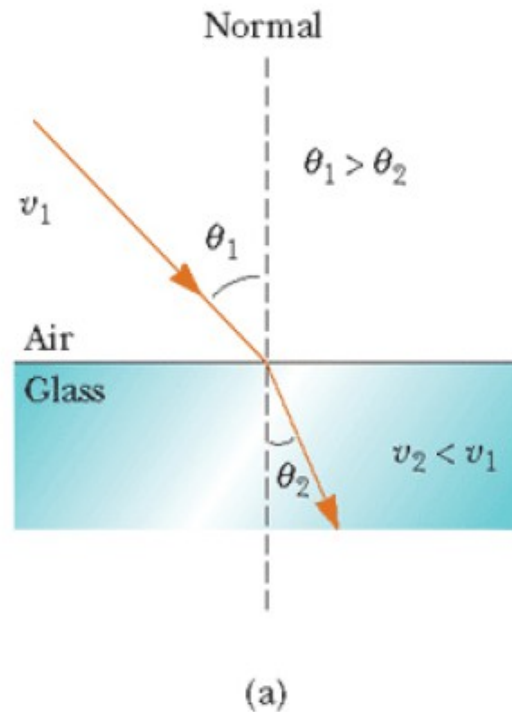
$$\hat{i} = \hat{r}_1$$

$$n_1 \text{sen} \hat{i} = n_2 \text{sen} \hat{r}_2$$



# RIFRAZIONE

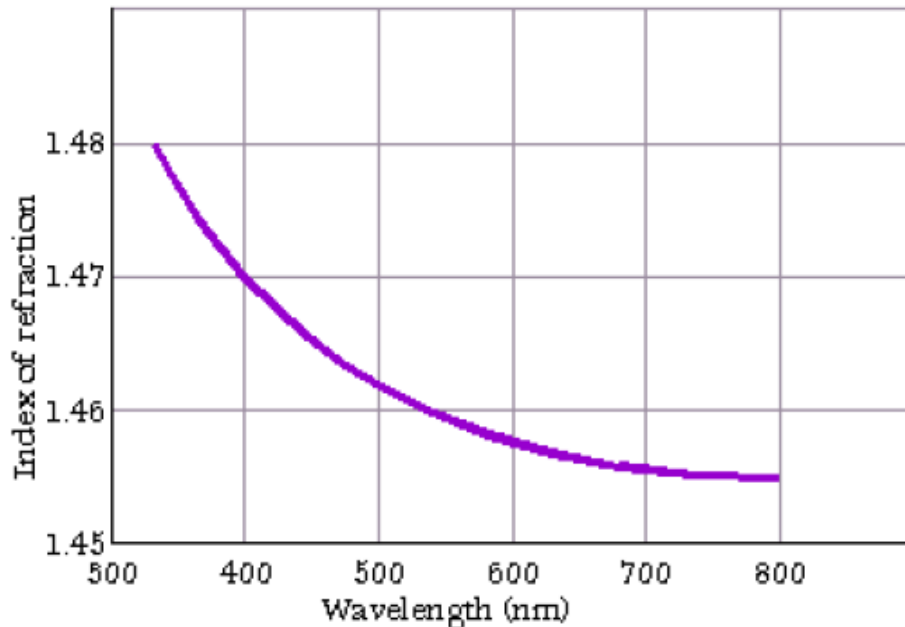
(a) Quando un fascio di luce passa dall'aria al vetro, la sua traiettoria è deviata verso la normale. (b) Quando il fascio passa dal vetro all'aria, la sua traiettoria si allontana dalla normale.



**Deviazione dovuta alla diversa velocità di propagazione tra i due mezzi.**

# INDICE DI RIFRAZIONE

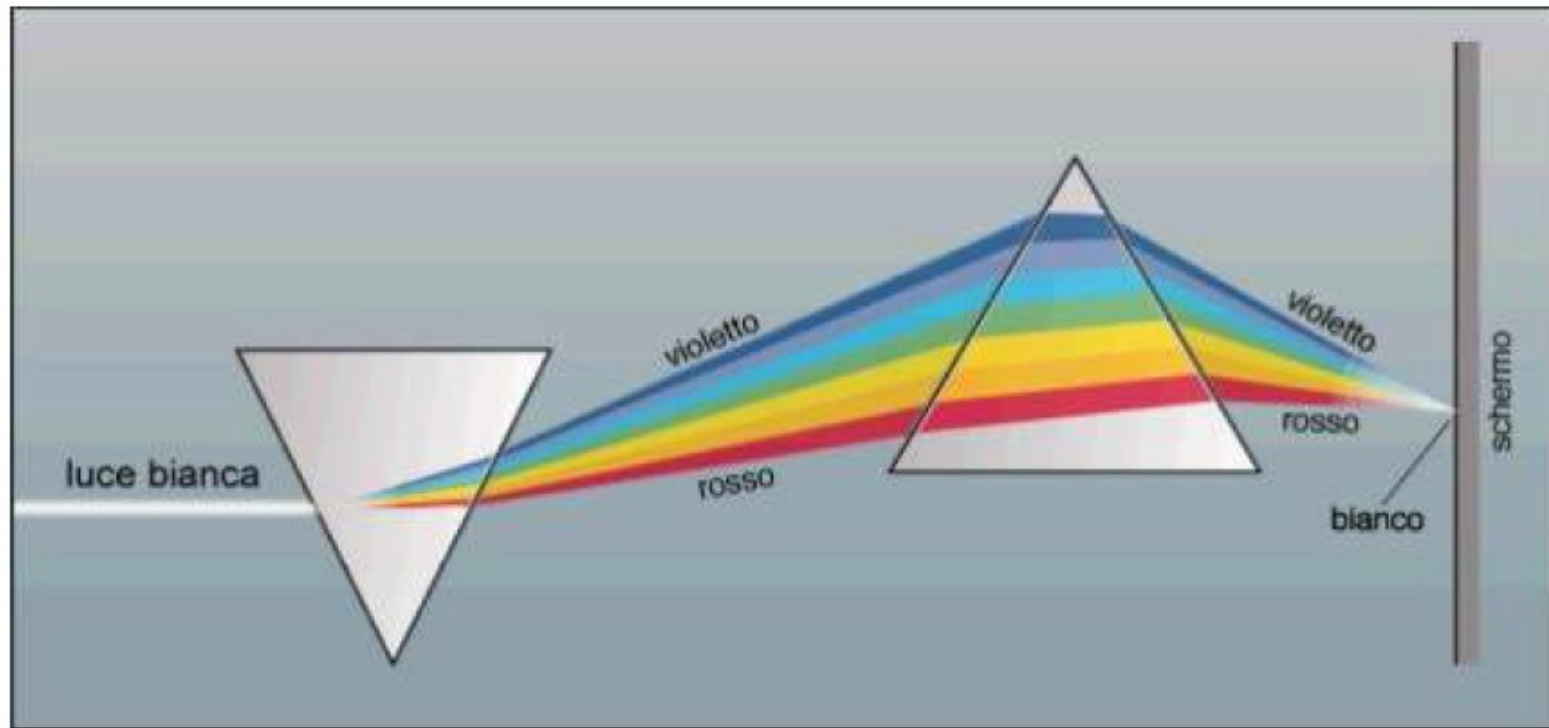
L'indice di rifrazione è caratteristico del mezzo e varia al variare della lunghezza d'onda della luce



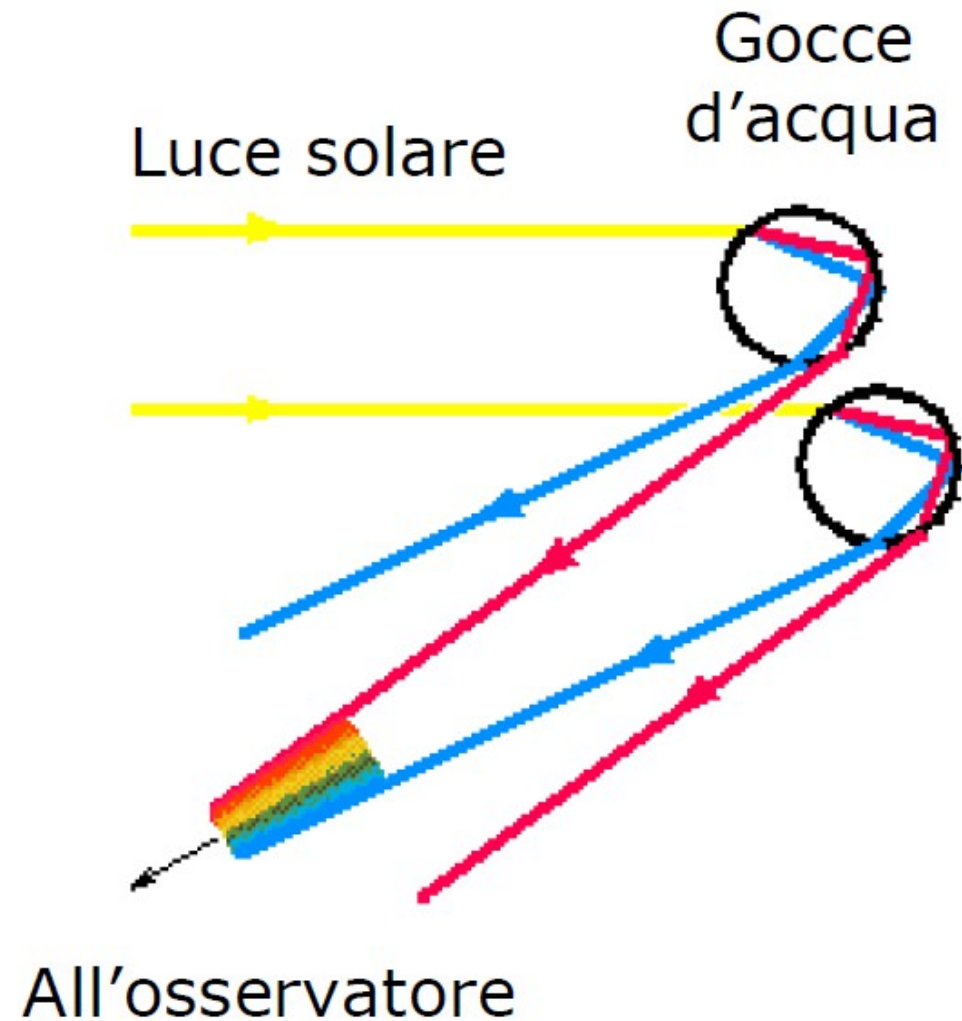
	n
Aria	1.0029
Acqua	1.33
Alcool etilico	1.35
Balsamo del Canada	1.53
Calcite (raggio ord.)	1.66
Diamante	2.42
Vetro Crown	1.52
Vetro Flint	1.63

# INDICE DI RIFRAZIONE

Un raggio di luce bianca passa attraverso un prisma e si suddivide nei vari colori che, mediante un secondo prisma, si ricombinano in un unico raggio di luce bianca

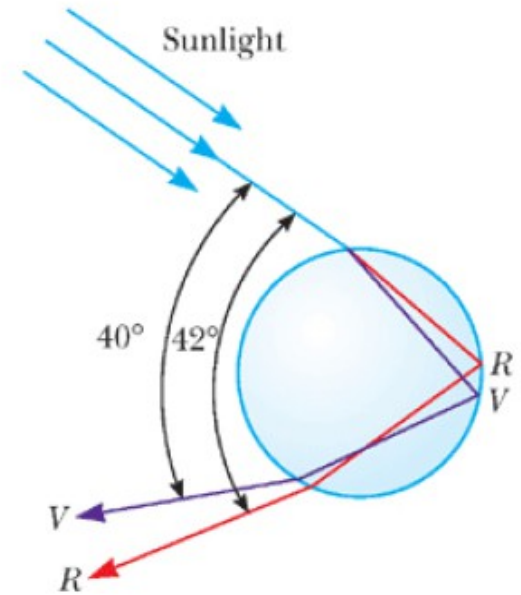
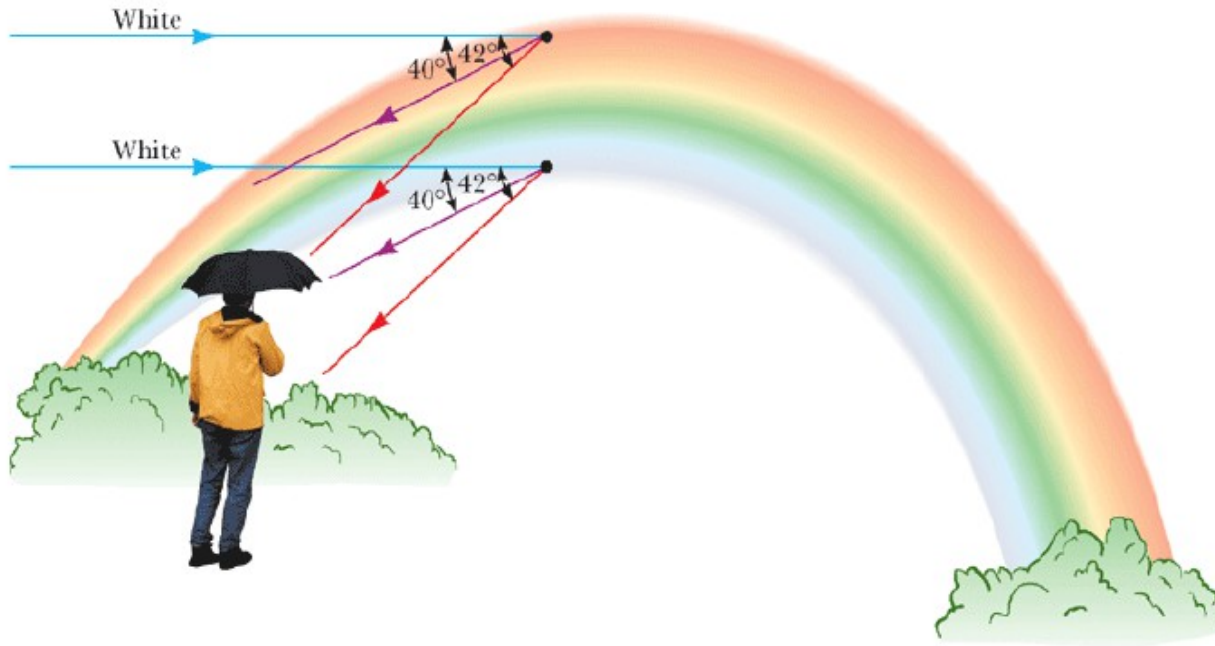


# ARCOBALENO



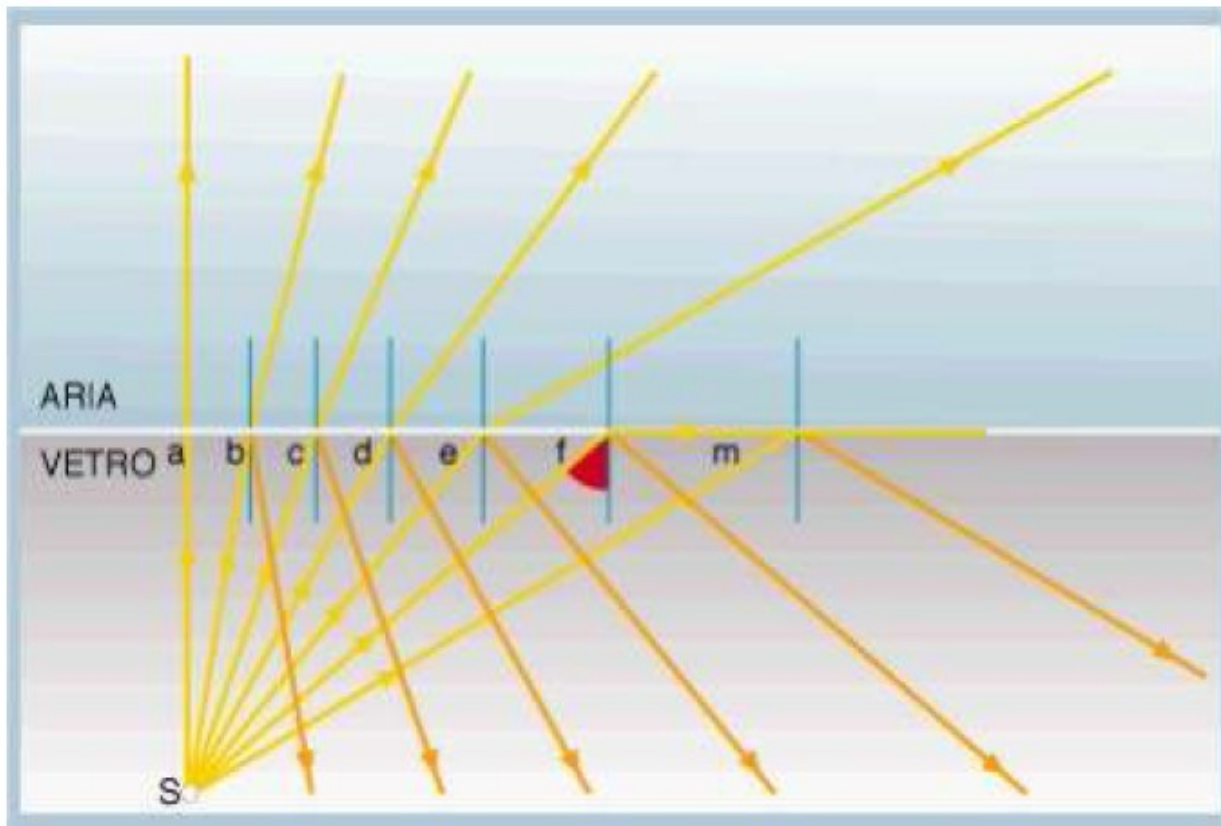
# ARCOBALENO

La rifrazione della luce solare da parte di una goccia sferica contribuisce alla formazione dell'arcobaleno.



# RIFLESSIONE TOTALE

Un raggio di luce che passa da un mezzo più rifrangente ( $n_1$ ) ad un mezzo meno rifrangente ( $n_2 < n_1$ ) si rifrange allontanandosi dalla normale



Il raggio f produce un raggio rifratto a  $90^\circ$ .

Il corrispondente angolo d'incidenza si chiama angolo limite  $\ell$



# RIFLESSIONE TOTALE

Si chiama angolo limite  $\ell$ , l'angolo di incidenza che corrisponde all'angolo di rifrazione di  $90^\circ$

$$\frac{\text{sen } \ell}{\text{sen } 90^\circ} = \text{sen } \ell = \frac{n_2}{n_1}$$

Per angoli di incidenza maggiori dell'angolo limite  $\ell$ , il raggio incidente è totalmente riflesso

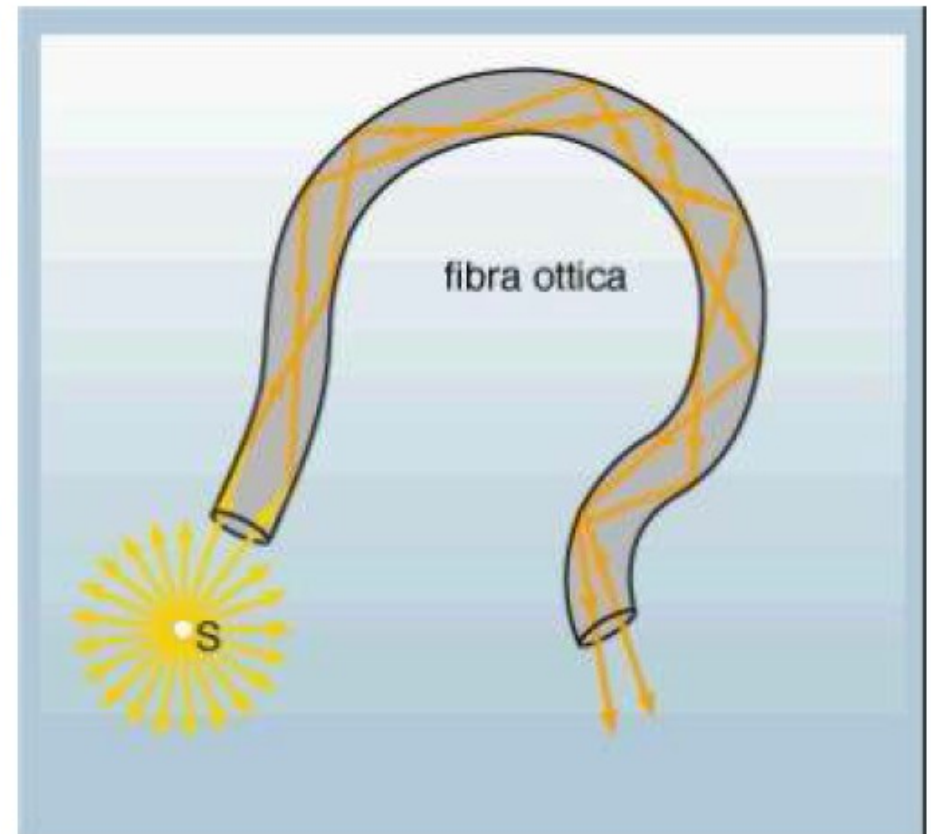
Questa proprietà ha un'importante applicazione nel campo delle fibre ottiche.

# RIFLESSIONE TOTALE

La riflessione totale trova un'importante applicazione tecnologica nelle fibre ottiche.

Le fibre ottiche sono fili molto sottili di plastica con pareti lisce. Un fascio di luce che vi penetra subisce più volte la riflessione totale ed esce all'altra estremità seguendo un percorso curvo

Trovano largo impiego in medicina (endoscopi) e nelle telecomunicazioni



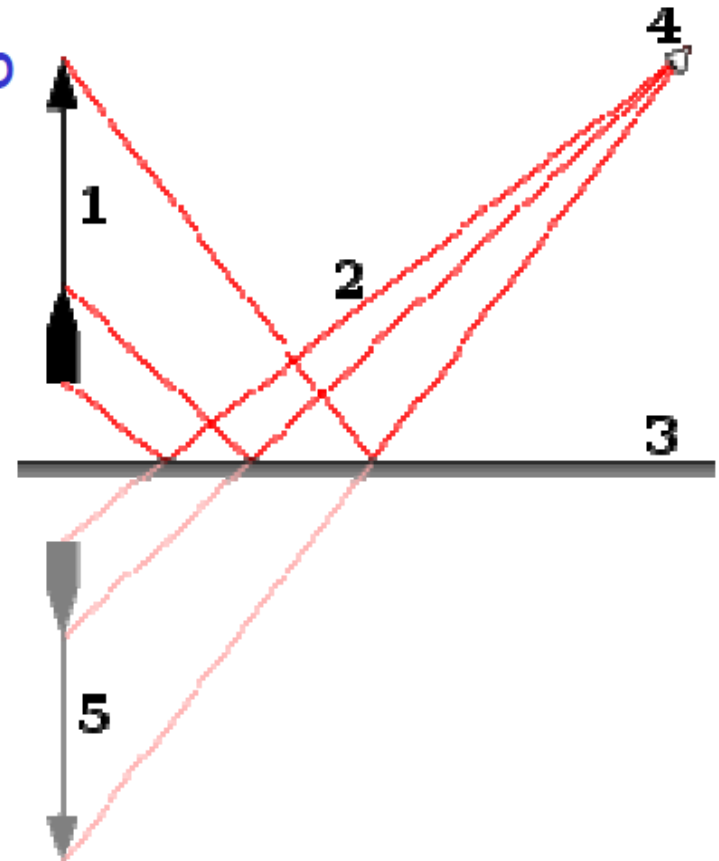
# SPECCHI PIANI

Uno **specchio** è una superficie sufficientemente lucida da permettere la riflessione della luce.

Il tipo più noto è lo specchio piano.

Ciascun raggio che colpisce lo specchio viene riflesso di un angolo identico a quello di incidenza.

1. Oggetto osservato
2. Raggi di luce
3. Superficie riflettente
4. Osservatore
5. Immagine virtuale

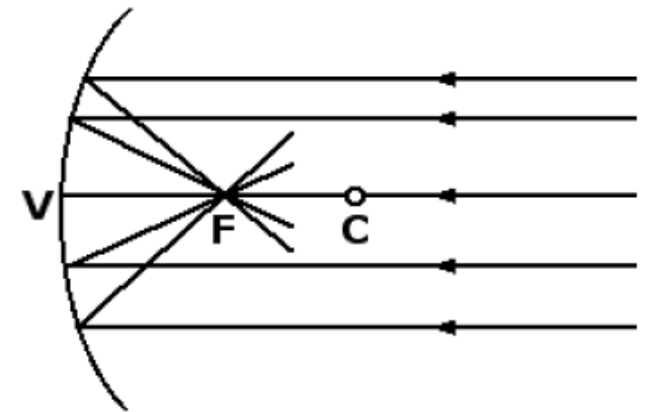


# SPECCHI SFERICI (1)

Prendiamo ora in considerazione uno **specchio sferico**, costituito da una calotta sferica. Lo specchio si dice **concavo** se la superficie riflettente è posta nella parte di calotta rivolta verso il centro della sfera, lo specchio si dice invece **convesso** se la superficie riflettente è rivolta dalla parte opposta rispetto al centro della calotta sferica.

Si definisce **vertice V** dello specchio il punto in cui lo specchio interseca l'asse di simmetria passante per il suo centro **C**. Tale asse di simmetria prende il nome di **asse ottico principale**.

Tutti i raggi provenienti da direzioni parallele all'asse ottico principale vengono riflessi in un punto che prende il nome di **fuoco F** dello specchio.



SPECCHIO CONCAVO

## SPECCHI SFERICI (2)

---

La proprietà del fuoco può essere utilizzata per costruire l'immagine di un oggetto che si riflette in uno specchio sferico assieme alla seguente altra proprietà: un raggio di luce che passa per il centro  $C$  della calotta sferica ha un angolo di incidenza sullo specchio uguale a  $0^\circ$ . Pertanto anche l'angolo di riflessione è uguale a  $0^\circ$  e il raggio riflesso percorre lo stesso cammino ottico del raggio incidente.

# SPECCHI SFERICI (3)

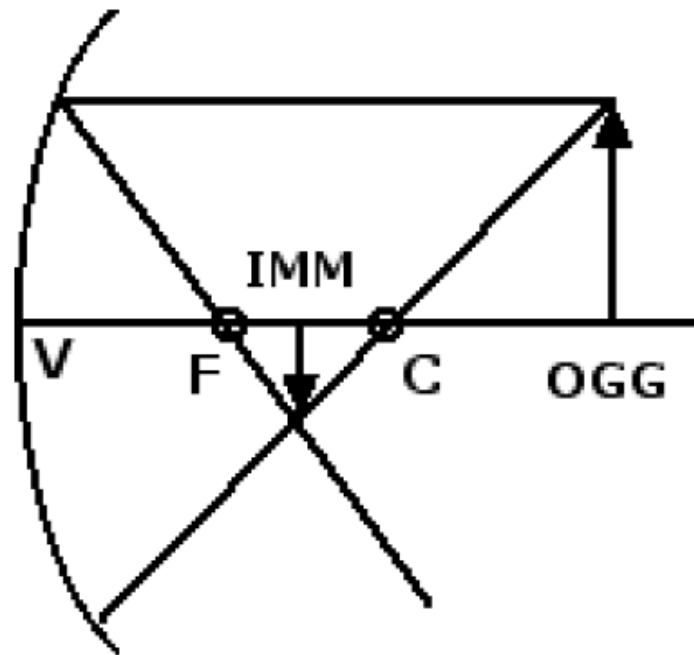
---

Dobbiamo ora distinguere tre casi possibili per quel che concerne la posizione relativa dell'immagine e dell'oggetto:

- 1) l'oggetto si trova alla destra del centro  $C$
- 2) l'oggetto si trova tra il fuoco  $F$  e il centro  $C$
- 3) l'oggetto si trova tra il vertice  $V$  e il fuoco  $F$ .

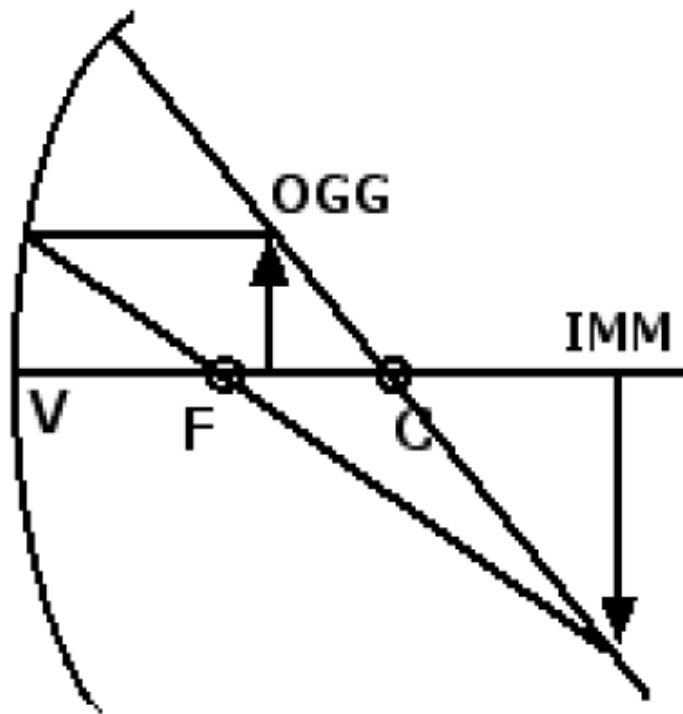
# SPECCHI SFERICI (4)

Se l'oggetto si trova alla destra del centro  $C$  si forma un'immagine reale rimpicciolita e capovolta dell'oggetto. L'immagine è reale perché su di essa arrivano i raggi luminosi.



# SPECCHI SFERICI (5)

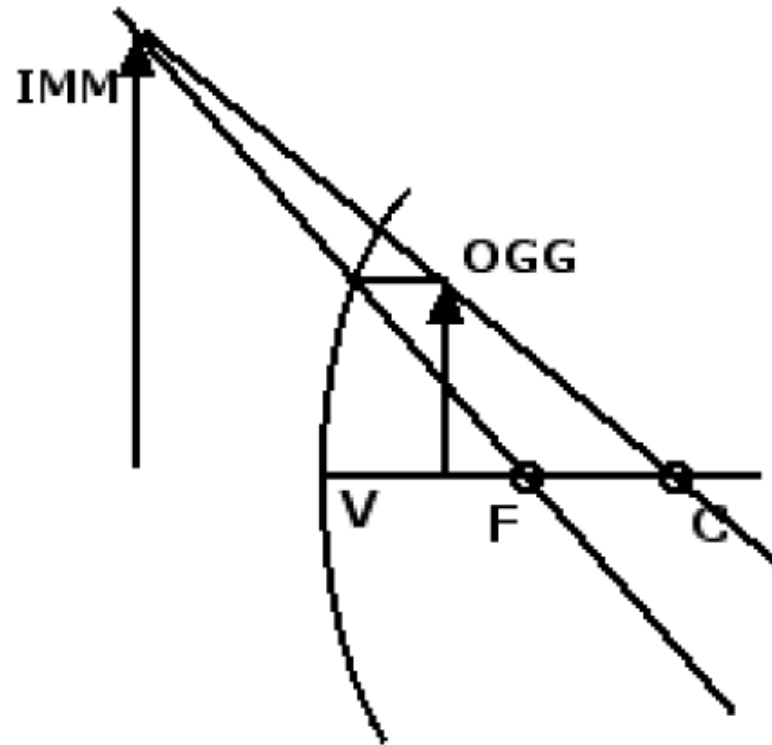
Se l'oggetto si trova tra il fuoco  $F$  e il centro  $C$  si forma un'immagine reale, ingrandita e capovolta dell'oggetto.





# SPECCHI SFERICI (6)

Se l'oggetto si trova tra il vertice  $V$  e il fuoco  $F$  si forma un'immagine virtuale e ingrandita dell'oggetto alla sinistra del vertice  $V$ . L'immagine è virtuale perché si forma sui prolungamenti dei raggi luminosi passanti per l'oggetto.



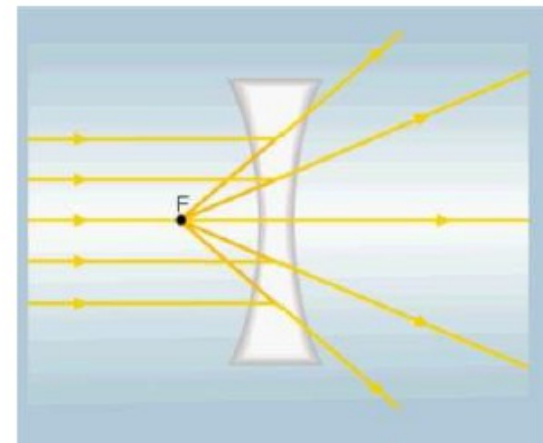
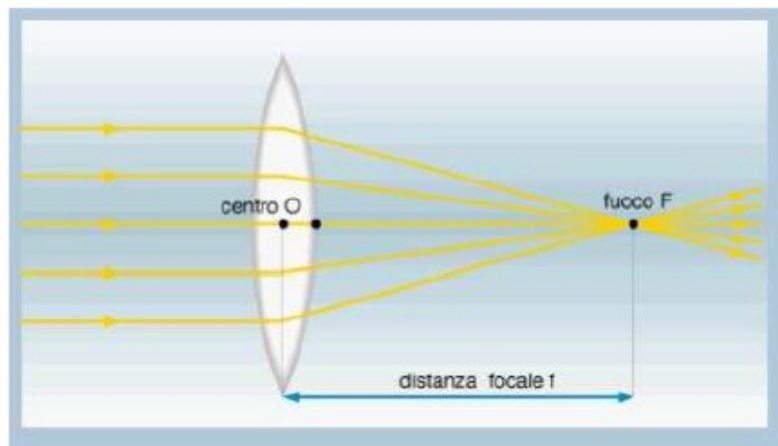
# LENTE SOTTILE

Una lente sottile è formata da un mezzo trasparente racchiuso da due superfici sferiche

I raggi paralleli, all'asse ottico della lente, provenienti da una sorgente (oggetto) sono rifratti dalla lente e si verificano due possibilità:

essi convergono in uno stesso punto (Fuoco)

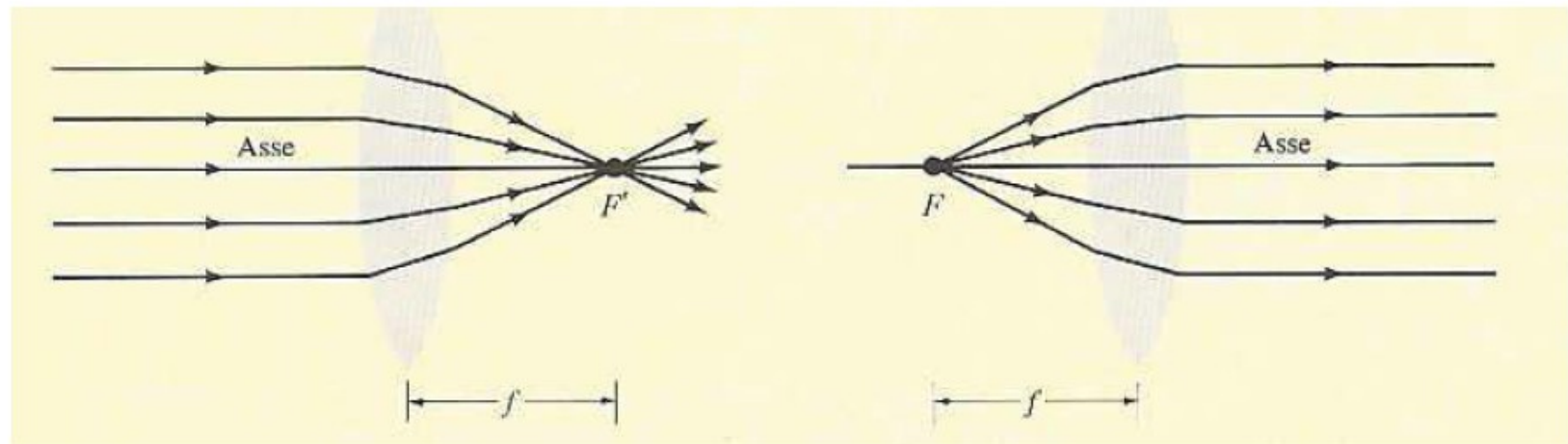
essi divergono in modo che i loro prolungamenti provengano dallo stesso punto (Fuoco)



# LENTE CONVERGENTE

I fuochi di una lente sottile sono due punti situati simmetricamente rispetto alla lente a distanza pari alla distanza focale

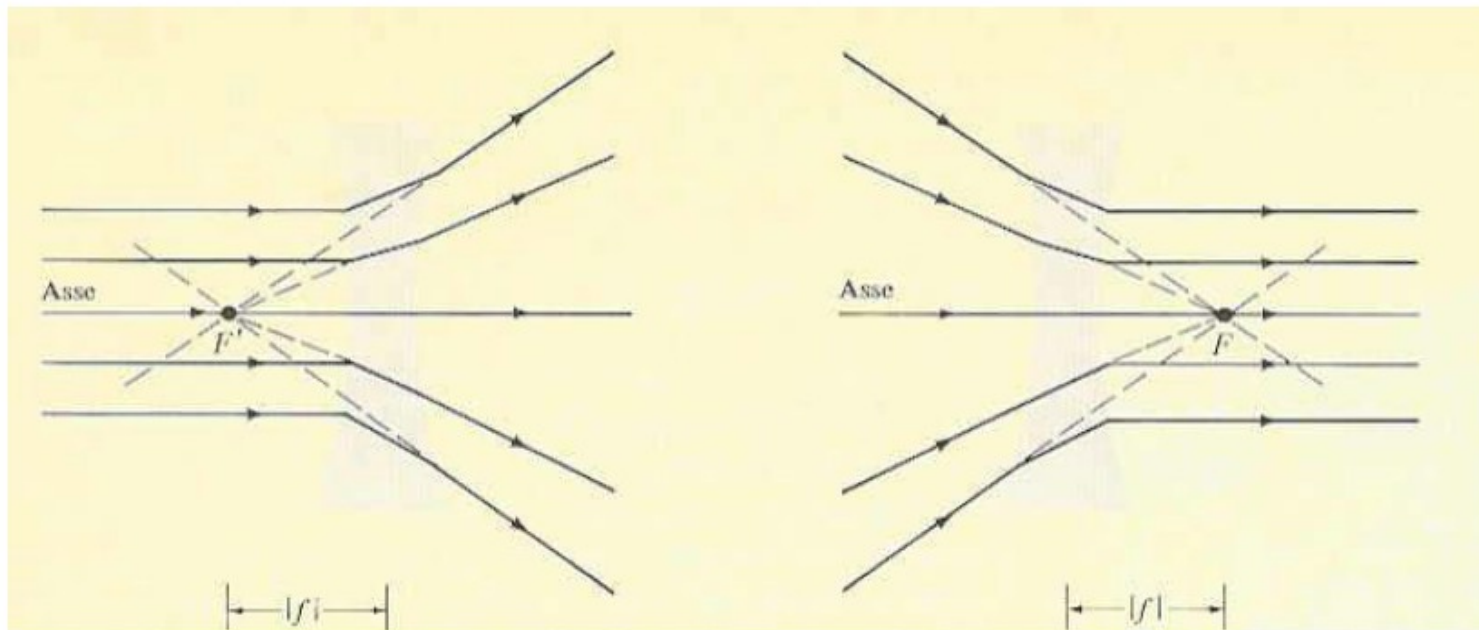
lente convergente



# LENTE DIVERGENTE

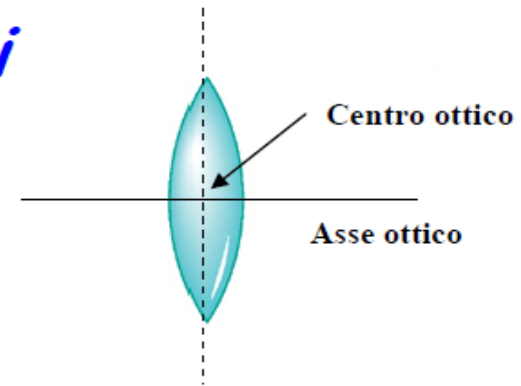
I fuochi di una lente sottile sono due punti situati simmetricamente rispetto alla lente a distanza pari alla distanza focale

lente divergente



# COSTRUZIONE DELL'IMMAGINE (1)

Per costruire l'immagine prodotta da una lente occorre considerare i *raggi notevoli*, cioè i raggi per i quali conosciamo l'effetto geometrico dovuto alla doppia rifrazione alla quale la lente li sottopone.



I raggi paralleli all'asse ottico della lente, convergono in un punto detto fuoco (**lente convergente**) oppure divergono come se provenissero da un punto detto fuoco (**lente divergente**).

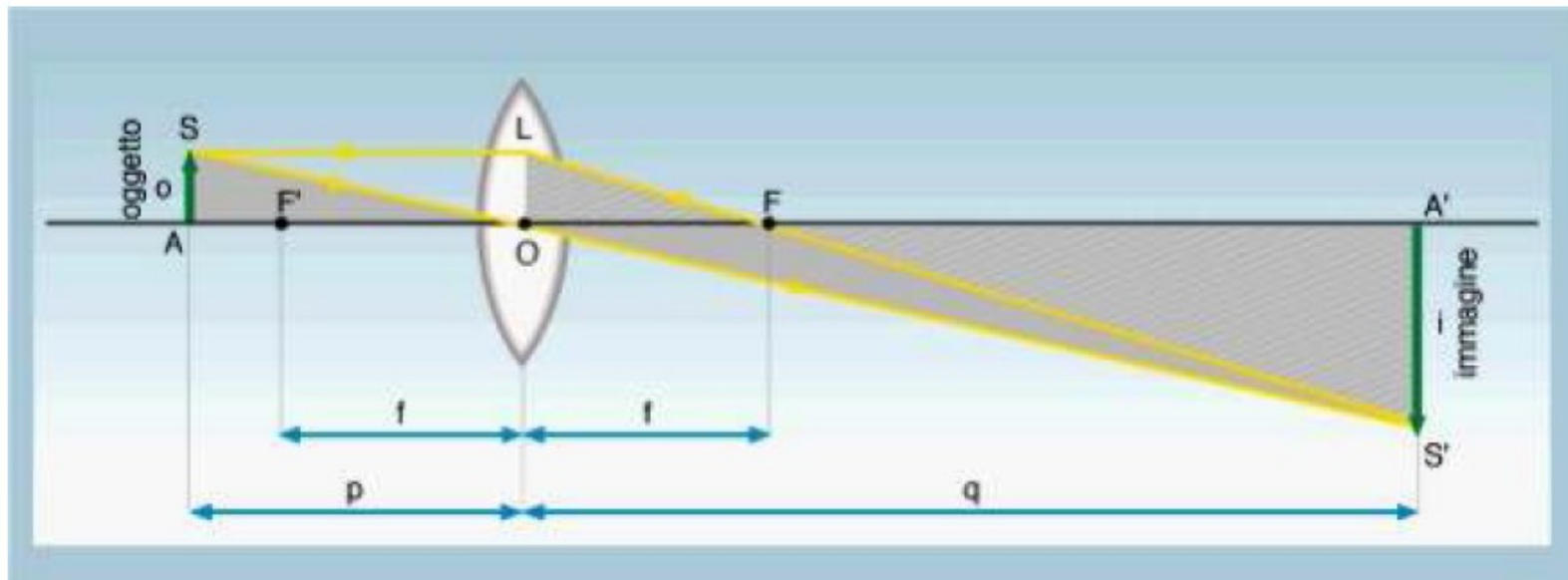
**I raggi che passano per il centro ottico della lente, proseguono indeviati.**

# COSTRUZIONE DELL'IMMAGINE (2)

I raggi di luce uscenti da un punto (oggetto) attraversano la lente e convergono in un punto (immagine)

I due punti, oggetto ed immagine, si chiamano punti coniugati e le loro posizioni  $p$  e  $q$  soddisfano l'equazione

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



# COSTRUZIONE DELL'IMMAGINE (3)

$f$  si chiama distanza focale  
ed il suo segno è tale che

$f > 0 \Rightarrow$  lente convergente

$f < 0 \Rightarrow$  lente divergente

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

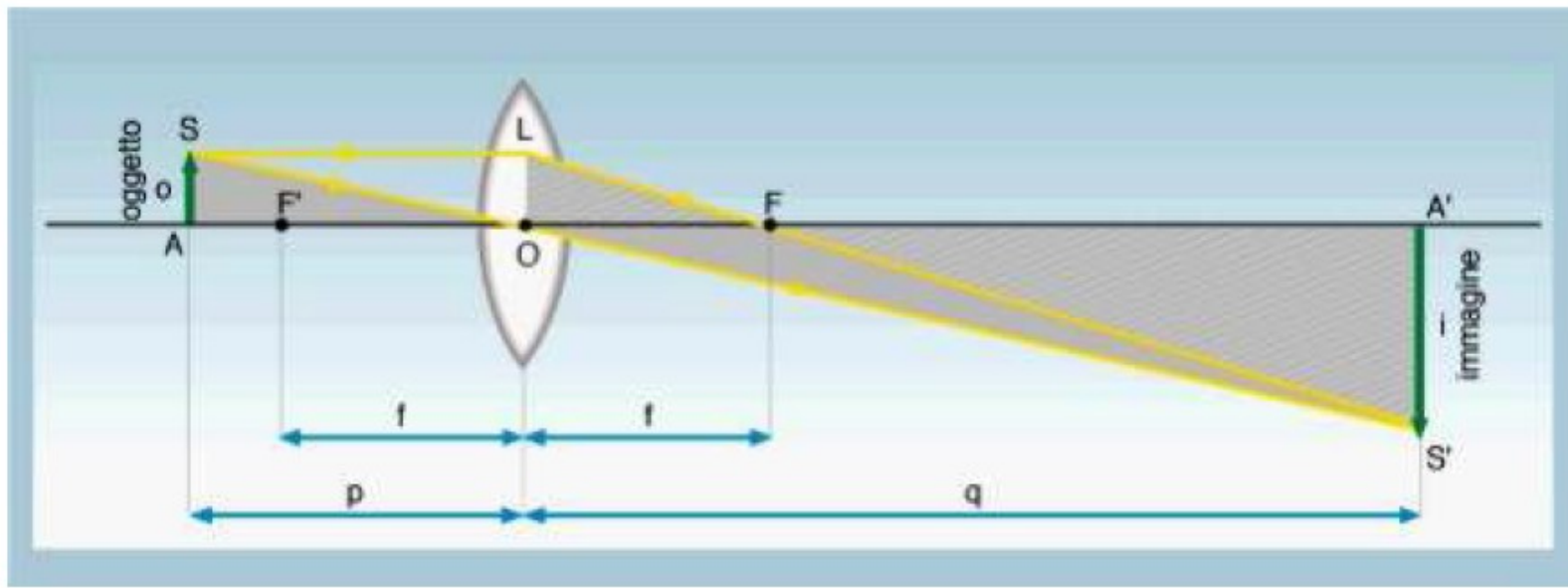
Potere di convergenza  
o potere diottrico

$$D = \frac{1}{f}$$

Si misura in diottrie con la distanza  
focale misurata in metri

**I poteri  
diottrici  
sono  
addittivi**

# COSTRUZIONE DELL'IMMAGINE (4)



I triangoli  $ASO$  e  $A'S'O$  sono simili e quindi

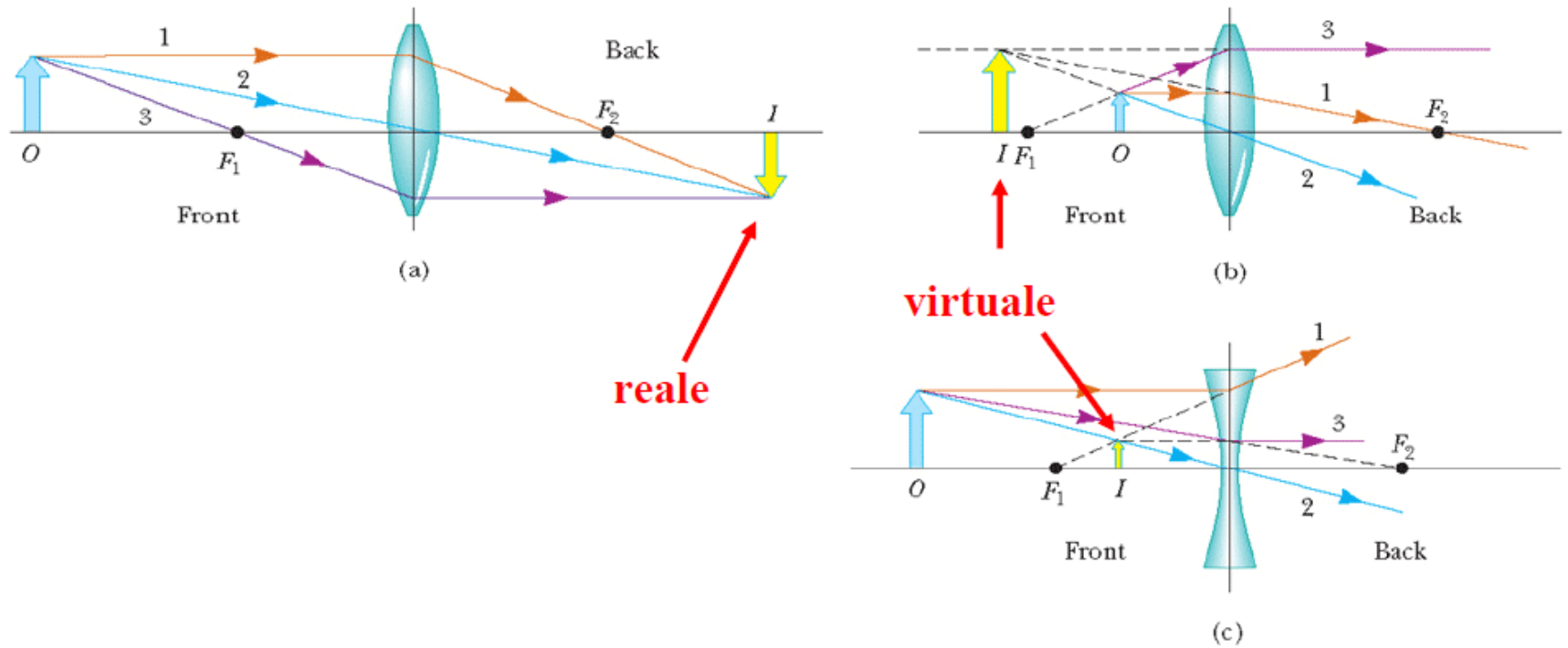
Ingrandimento  
lineare



$$\frac{A'S'}{AS} = \frac{A'O}{AO} = \frac{q}{p}$$



# COSTRUZIONE DELL'IMMAGINE (5)



Le immagini si dicono **reali** se raccogliibili su di uno schermo.

Sono invece chiamate **virtuali** quando questa operazione non è possibile.

# MICROSCOPIO (1)

L'occhio ha una distanza di visione ottimale di ~25 cm, quindi una lente di ingrandimento deve tentare di mettere l'immagine virtuale a 25 cm.

Per l'ingrandimento lineare  $m$  abbiamo

$$m = \frac{25 \text{ cm}}{p} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad \leftarrow f \text{ misurata in cm}$$

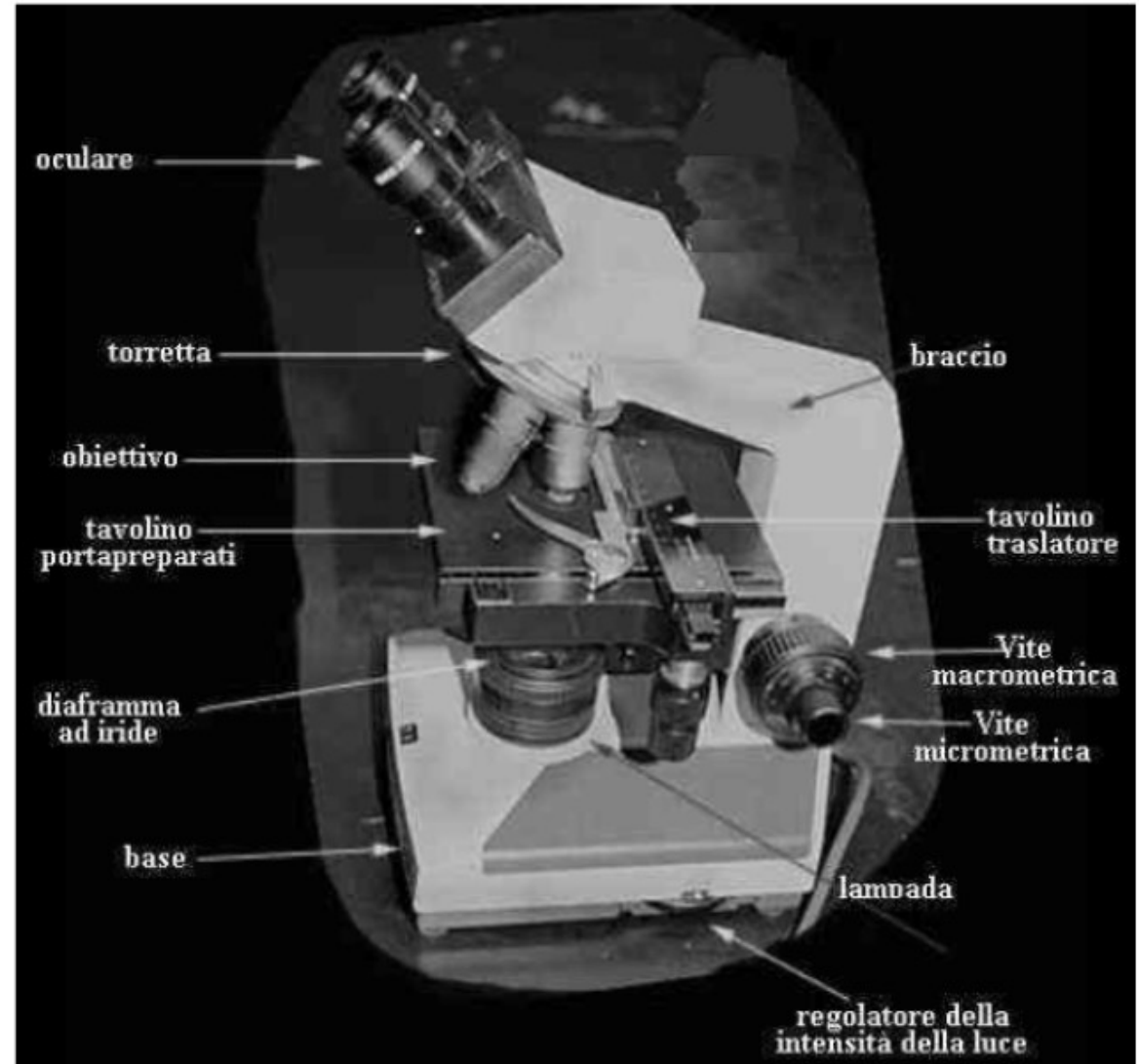
quindi  $m$  aumenta al diminuire di  $f$ . Per esempio

$$f = 1 \text{ cm} \quad \Rightarrow \quad m = 26 \text{ volte} \quad \Rightarrow \quad p = 0.96 \text{ cm}$$

**Questo è un limite all'uso delle lenti di ingrandimento: oggetti troppo vicini!!**

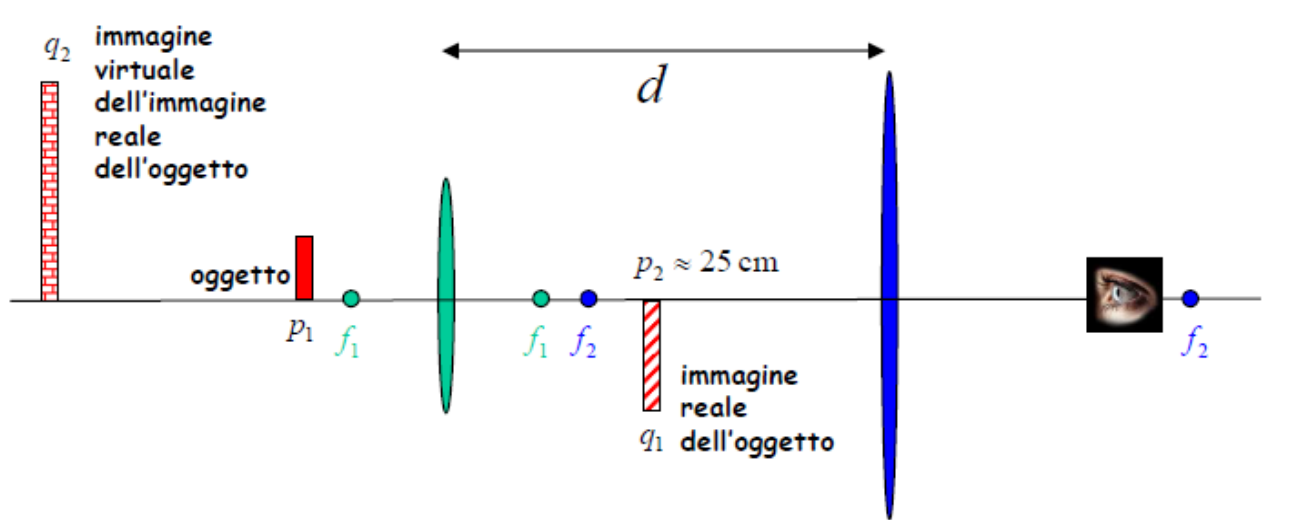
# MICROSCOPIO (2)

Il microscopio ottico è un sistema costituito, essenzialmente, da due lenti convergenti: oculare ed obiettivo.



# MICROSCOPIO (3)

Il microscopio è costituito da due lenti convergenti: (1) obiettivo, (2) oculare. La (1) produce una immagine reale dell'oggetto e la (2) una immagine virtuale dell'immagine reale dell'oggetto.



$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1}$$

si sceglie  $p_1 > \approx f_1$

$$m_1 = \frac{q_1}{p_1} \approx \frac{q_1}{f_1}$$

$$m_2 = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f_2}$$

$$d=18 \text{ cm} \quad p_2=2.7 \text{ cm} \quad f_1=0.5 \text{ cm} \quad f_2=3 \text{ cm}$$

$$q_1 + p_2 = d \rightarrow q_1 \sim 15.3 \text{ cm}$$

$$M = \frac{15.3}{0.5} \left( 1 + \frac{25}{3} \right) \approx 285$$

$$M = m_1 m_2 = \frac{q_1}{f_1} \left( 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f_2} \right)$$

# OTTICA FISICA

---

Quando lungo il percorso della luce vi sono fenditure ed ostacoli con dimensioni dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda incidente gli effetti sperimentali non sono spiegabili con l'ottica geometrica (raggi rettilinei), ma con *l'ottica ondulatoria* (di cui l'ottica geometrica è un caso particolare).

# INTERFERENZA (1)

---

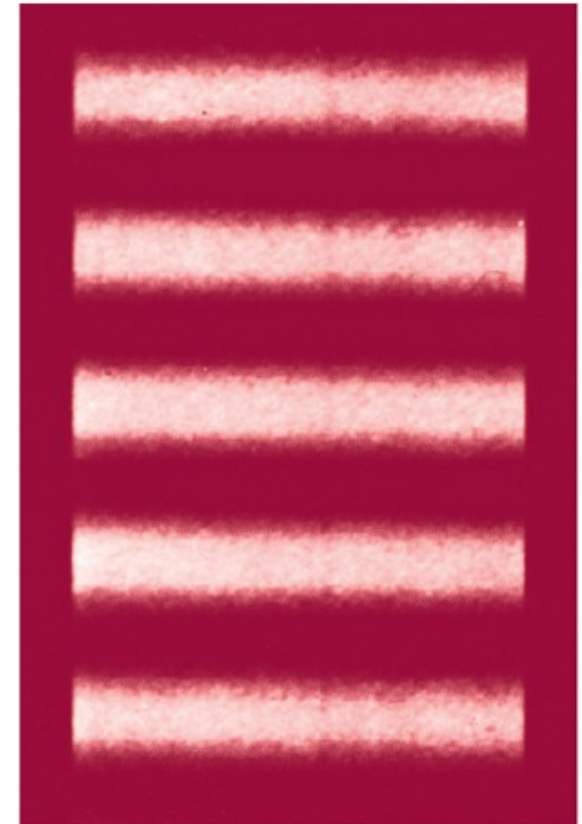
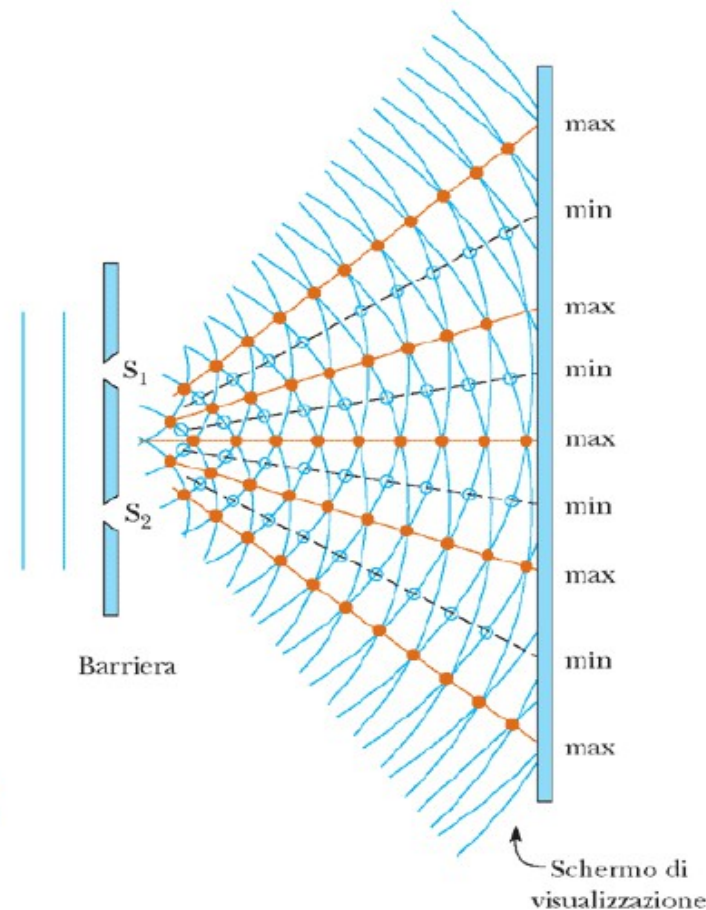
Tomas Young (1801) dimostrò sperimentalmente per primo la validità della teoria ondulatoria della luce e ne misurò la lunghezza d'onda.

In generale si ha **interferenza** quando due o più onde dello stesso tipo e stessa frequenza, con una differenza di fase costante tra di loro, attraversano la stessa regione dello spazio nello stesso istante.

# INTERFERENZA (2)

## Esperimento di Young: interferenza da due fenditure.

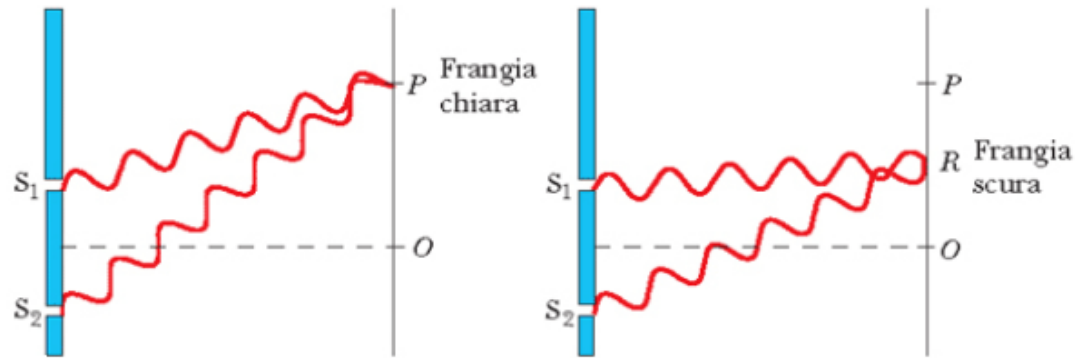
Le fenditure  $S_1$  ed  $S_2$  si comportano come sorgenti coerenti di onde. In alcune direzioni le onde si rinforzano e in altre si elidono per effetto dell'interferenza. Sullo schermo si otterranno massimi di intensità di luce intervallati da minimi di intensità luce



# INTERFERENZA (3)

## Perché sullo schermo vediamo frange chiare e scure?

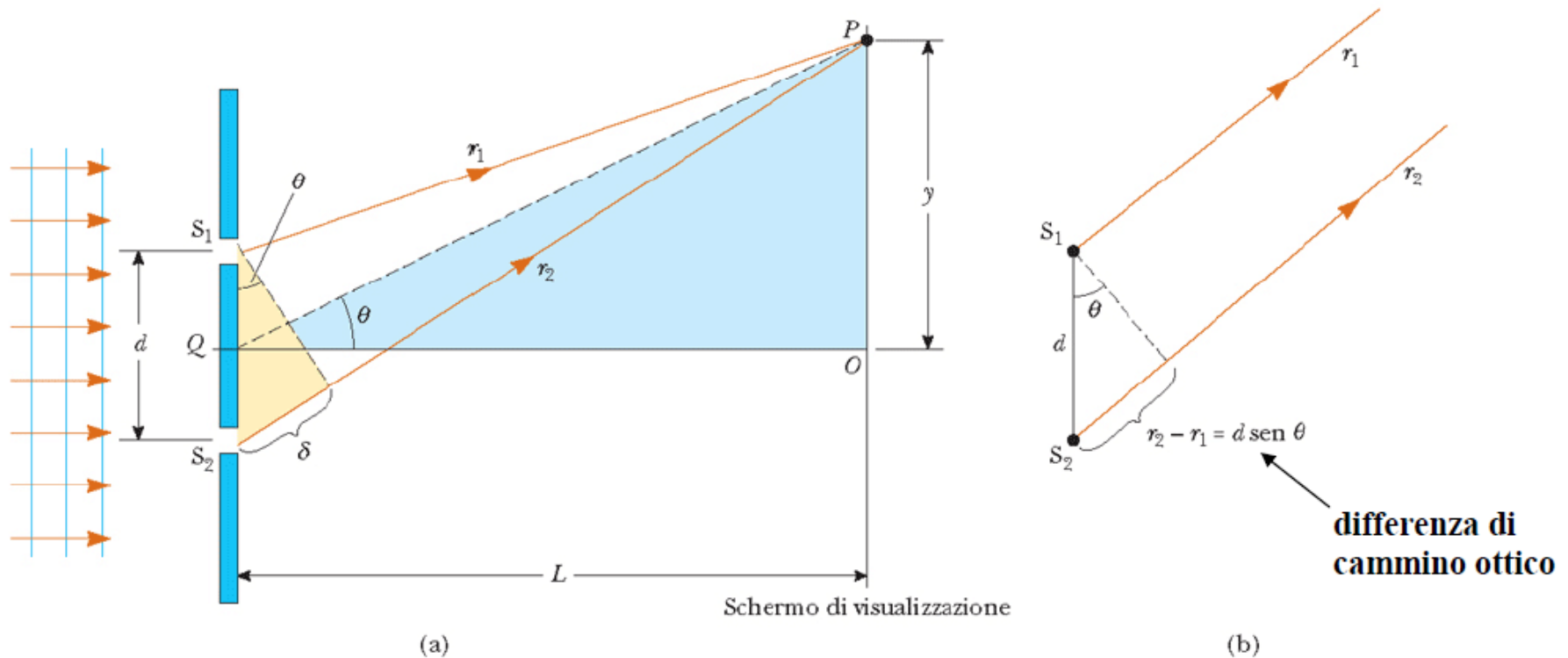
Nel punto P si ha *interferenza costruttiva* perché le onde sono in fase: se una è al massimo, lo è anche l'altra.



Nel punto R si ha *interferenza distruttiva* perché le onde sono in opposizione fase: se una è al massimo, l'altra è al minimo



# INTERFERENZA (4)



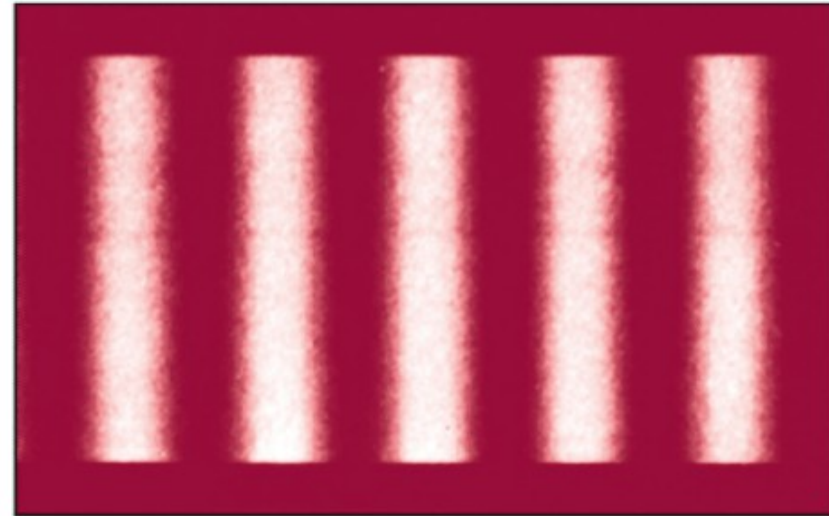
Rappresentazione geometrica (a) dell'esperimento ed ipotesi (b) di parallelismo fra i cammini ottici, cioè  $L \gg d$ , avremo

Interferenza costruttiva (max intensità di luce)    Interferenza distruttiva (intensità di luce = 0)

$$\sin \vartheta = n \frac{\lambda}{d} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$\sin \vartheta = \left( n + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{d} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

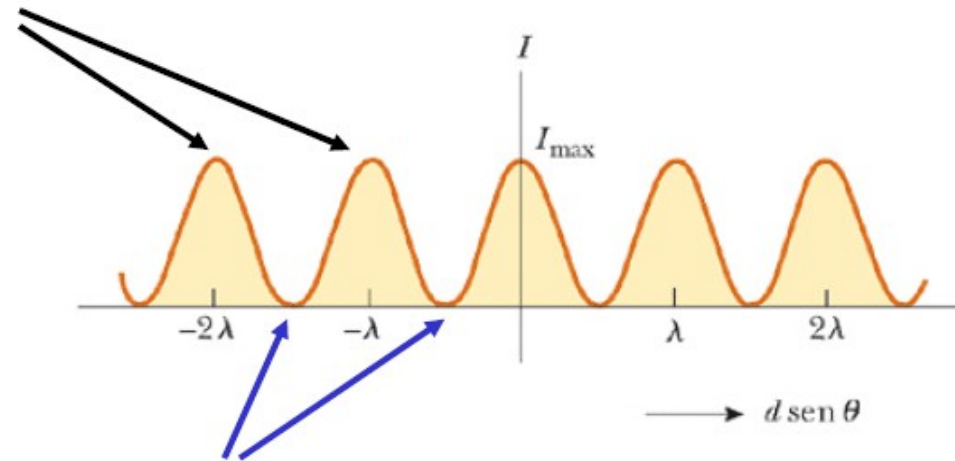
# INTERFERENZA (5)



Massimi

$$d \sin \vartheta = n\lambda$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$



Minimi

$$d \sin \vartheta = \left( n + \frac{1}{2} \right) \lambda$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

# DIFFRAZIONE (1)

---

Quando la luce passa attraverso una fenditura le cui dimensioni sono dello stesso ordine di grandezza della sua lunghezza d'onda, si osserva una figura d'interferenza piuttosto che una macchia luminosa netta proiettata dall'apertura.

Questo fenomeno è chiamato  
**DIFFRAZIONE**

## DIFFRAZIONE (2)

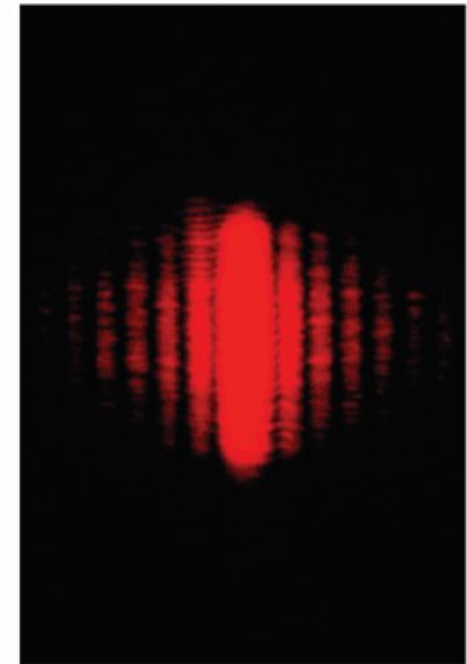
---

Se le onde luminose non si diffondessero dopo essere passate attraverso le fenditure, non si avrebbe interferenza. Le onde luminose nel diffondersi si sovrappongono producendo frange di interferenza. La luce devia da un percorso rettilineo ed entra nella zona che altrimenti sarebbe in ombra.

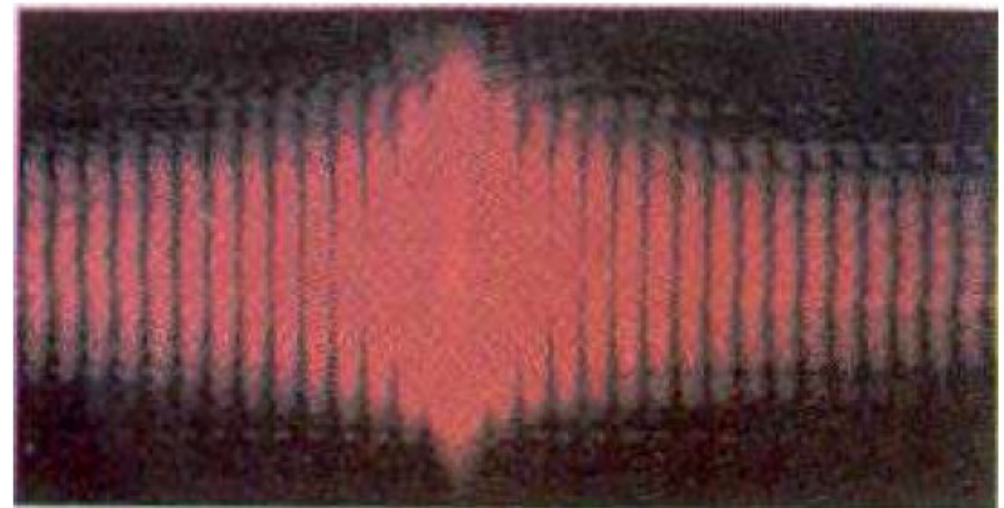
In generale, si ha diffrazione quando le onde passano attraverso piccole aperture, intorno ad ostacoli o nei pressi di spigoli vivi.

Consideriamo il seguente esempio di diffrazione. Quando una stretta fenditura è posta tra una sorgente puntiforme di luce ed uno schermo, il confine tra la zona in ombra e quella illuminata dello schermo non è netto. La zona non in ombra contiene fasce chiare e scure che si alternano.

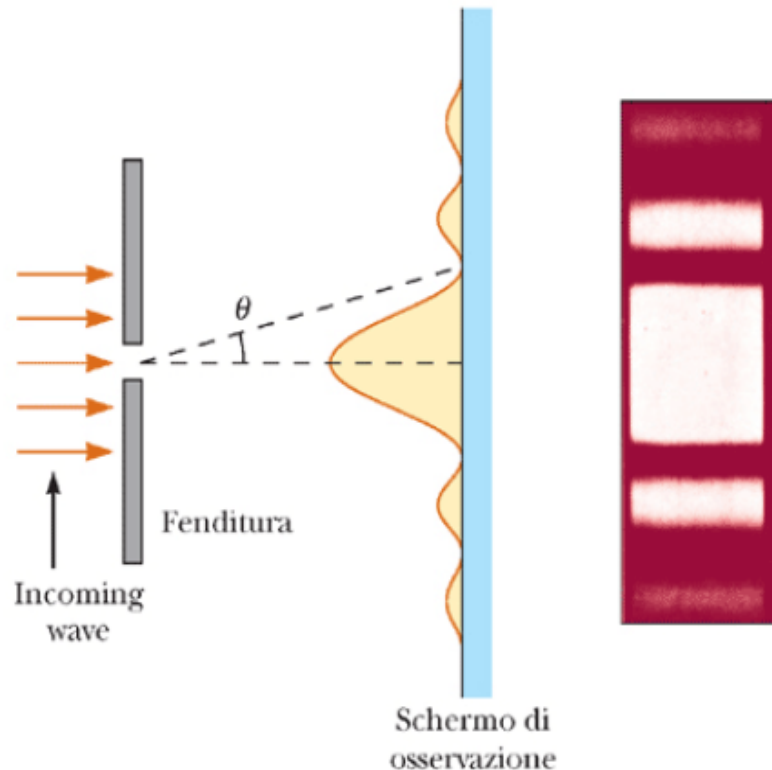
La figura consiste di una banda centrale larga e intensa, il massimo centrale, affiancato da una serie di bande secondarie più strette e meno intense (chiamate massimi secondari) e da una serie di bande oscure, o minimi. Ciò non si può spiegare con l'ottica geometrica, la quale afferma che andando i raggi di luce in linea retta dovrebbero dar luogo a una immagine netta della fenditura sullo schermo.



(Douglas C. Johnson/Cai Poly Pimona)

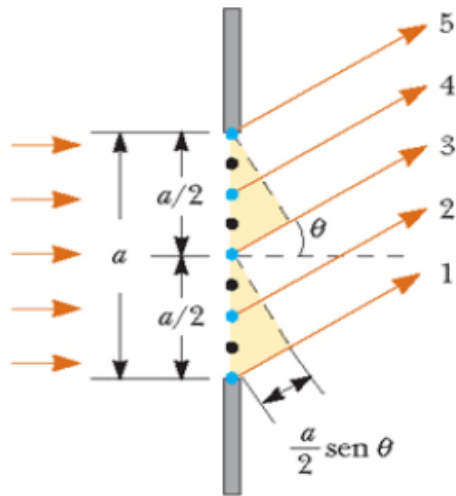


# DIFFRAZIONE ALLA FRAUNHOFER

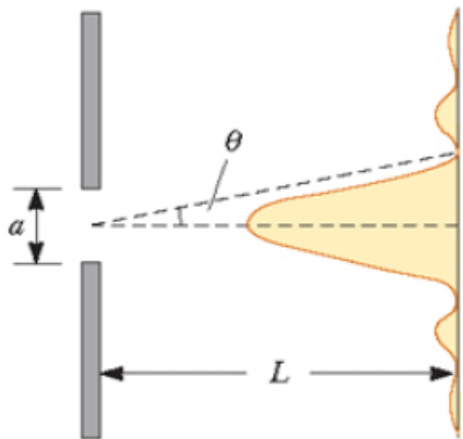


Quando i raggi che arrivano su di una fenditura sono approssimativamente paralleli (sperimentalmente ciò si ottiene ponendo lo schermo lontano dalla fenditura oppure usando una lente convergente per focalizzare i raggi sullo schermo), si osserva una frangia chiara sull'asse a  $\theta=0$ , con frange chiare e scure che si alternano su entrambi i lati della frangia centrale.

# DIFFRAZIONE DA SINGOLA FENDITURA



**Perché vediamo la figura di diffrazione?**  
 Ogni porzione della fenditura sottile di larghezza  $a$  si comporta come una sorgente puntiforme di onde e l'intensità risultante sullo schermo, per il fenomeno dell'interferenza, verrà a dipendere da  $\theta$ . La differenza di cammino ottico fra i raggi 1 e 3 (vedi figura) oppure 3 e 5 è



Schermo di osservazione

$\frac{a}{2} \sin \theta$  se vale che  $\frac{a}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow a \sin \theta = \lambda$   
 $\text{sen } \theta_{\text{scure}} = 2\lambda/a$   
 $\text{sen } \theta_{\text{scure}} = \lambda/a$   
 $\text{sen } \theta_{\text{scure}} = -\lambda/a$   
 $\text{sen } \theta_{\text{scure}} = -2\lambda/a$   
**le onde provenienti dalla metà superiore interferiranno distruttivamente con quelle della metà inferiore.**

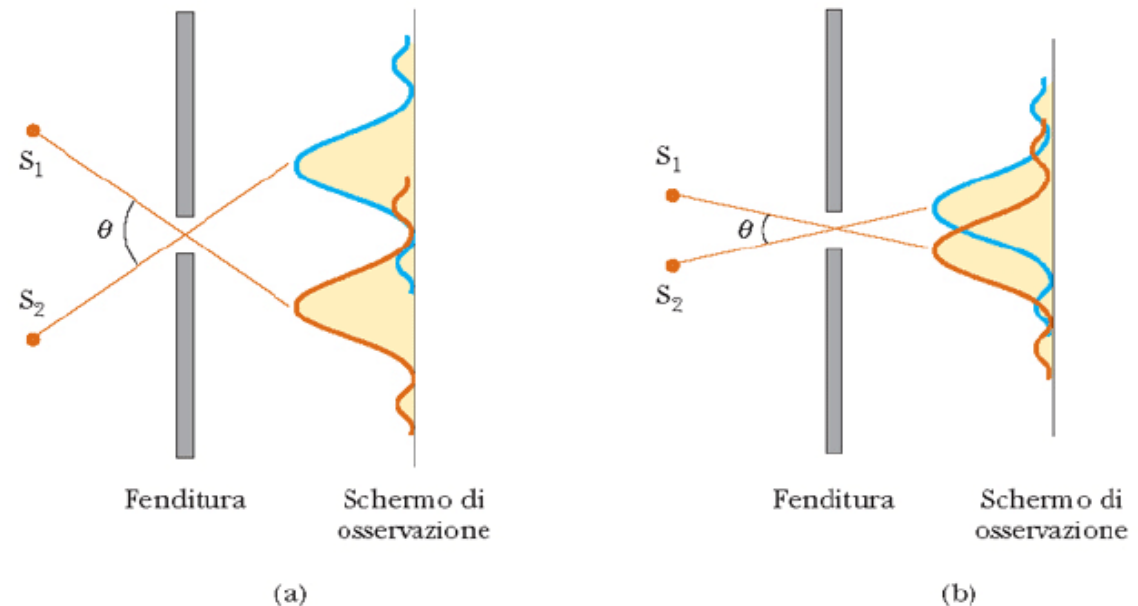
**Condizione generale per interferenza distruttiva:**  $\sin \theta = m \frac{\lambda}{a}$   $m = \pm 1, \pm 2, \dots$

# POTERE RISOLUTIVO OTTICO (1)

La minima distanza tra due punti dell'oggetto che possono essere distinti nell'immagine.

La diffrazione limita le capacità ottiche di distinguere ("risolvere") immagini di oggetti tra loro vicini.

La situazione è descritta in figura: due sorgenti puntiformi distanti da una piccola apertura producono ciascuna una figura di diffrazione. In (a) l'angolo sotteso dalle due sorgenti è abbastanza grande da produrre figure di diffrazione distinguibili (risolte), in (b) no.





# POTERE RISOLUTIVO OTTICO (2)

Si usa il **Criterio di Rayleigh**: **le immagini sono risolte quando il massimo centrale dell'una coincide col primo minimo dell'altra.**

Per aperture rettangolari, posto  $m=1$  nell'equazione:

$$\text{sen } \theta = m \frac{\lambda}{a}$$

il primo minimo si trova a:

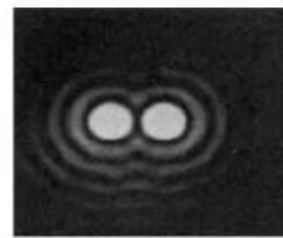
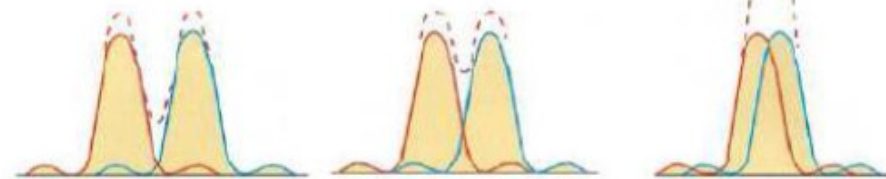
$$\theta \approx \text{sen } \theta \approx \pm \lambda / a$$

che è quindi l'angolo minimo con cui possiamo dire di osservare separati due oggetti.

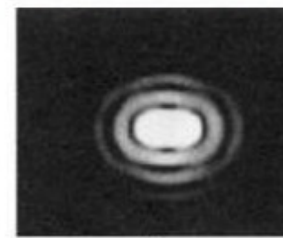
Per aperture circolari, il primo minimo si trova a:

$$\theta \approx 1.22 \lambda / a$$

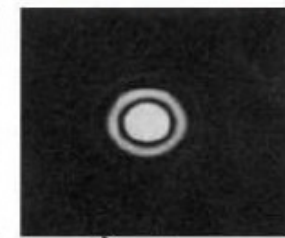
Figure di diffrazione di due sorgenti puntiformi, per diverse separazioni angolari



(a) Sorgenti distanti, immagini ben risolte



(b) Sorgenti vicine, immagini appena risolte



(c) Sorgenti molto vicine, immagini non risolte

# POTERE RISOLUTIVO E MICROSCOPIO OTTICO

I microscopi ottici possono raggiungere facilmente ingrandimenti  $M$  dell'ordine di 1000 volte, ma superare 400÷600 volte è totalmente inutile. La distanza minima risolta  $d$  è:

Occhio nudo	$M=400$	$M=1000$
$\sim 0.2$ mm	$\sim (0.2/400)$ mm = 500 nm	$\sim (0.2/1000)$ mm = 200 nm

Quando la distanza  $d$  tra due punti di un campione diventa confrontabile con la lunghezza d'onda  $\lambda$  della luce che lo illumina, subentrano effetti di diffrazione

dove  $\theta$  è l'angolo di apertura del microscopio.

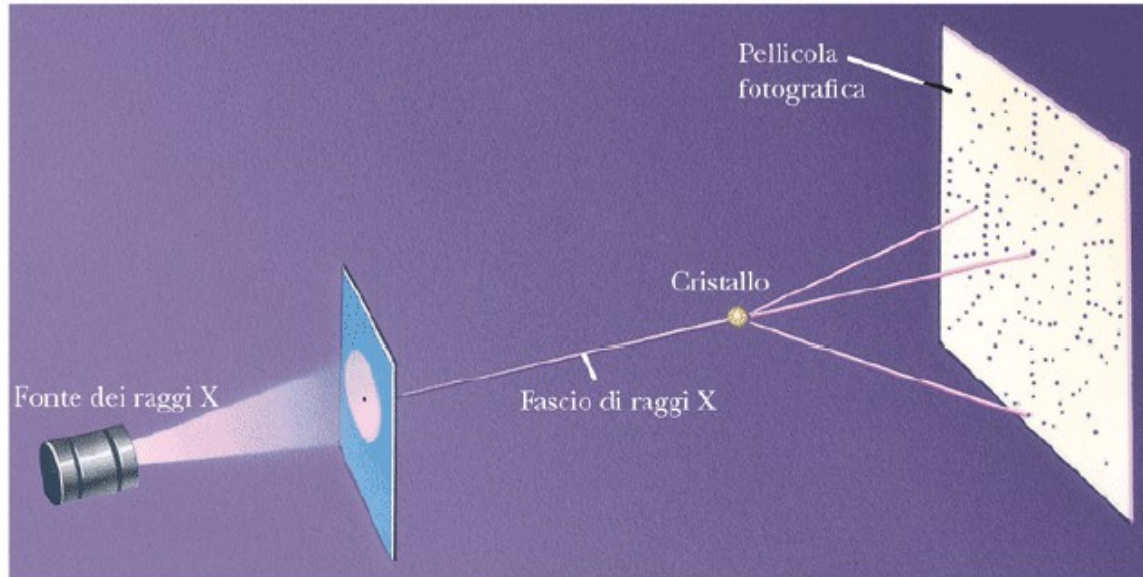
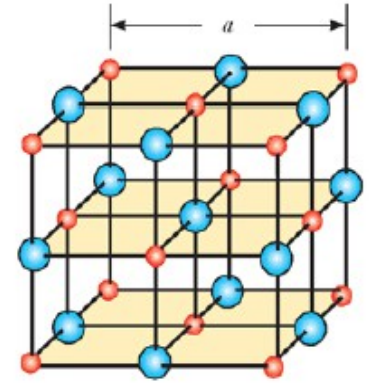
$$d = \frac{\lambda}{\sin \theta}$$

Con  $\theta = 90^\circ$  la minima separazione rivelabile per oggetti posti in aria ed illuminati con luce verde ( $\lambda = 500$  nm)  $\rightarrow d \sim 500$  nm.

Per aumentare la risoluzione conviene usare una minor lunghezza d'onda. E' pratica comune riempire lo spazio tra lastra-oggetto e l'obiettivo con un olio avente un'alto indice di rifrazione  $n$ . Se  $\lambda$  è la lunghezza d'onda in aria, quella nell'olio sarà  $\lambda/n$ . Si può guadagnare un fattore 2.

# DIFFRAZIONE ED IMMAGINI ATOMICHE (1)

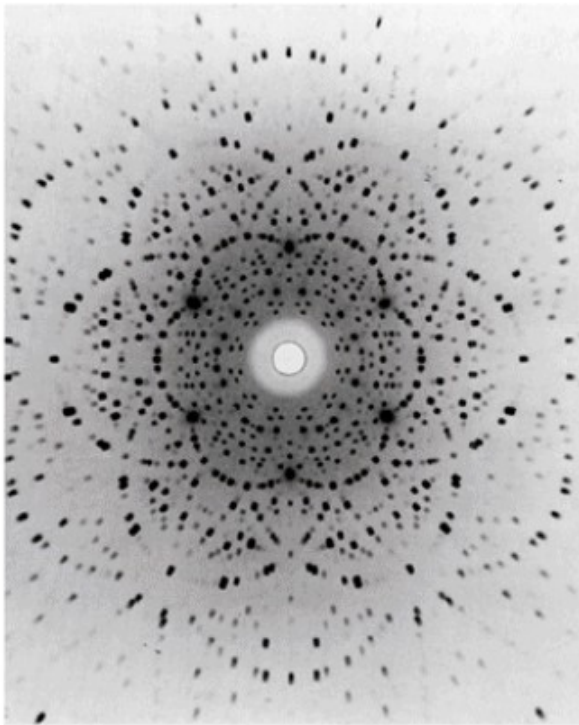
Un cristallo è come un reticolo di diffrazione (tridimensionale) con apertura dell'ordine della diecina di nm. Quindi se facciamo incidere su di un cristallo una "luce" con lunghezza d'onda dello stesso ordine di grandezza vedremo immagini di diffrazione: **la "luce" giusta sono i raggi X**



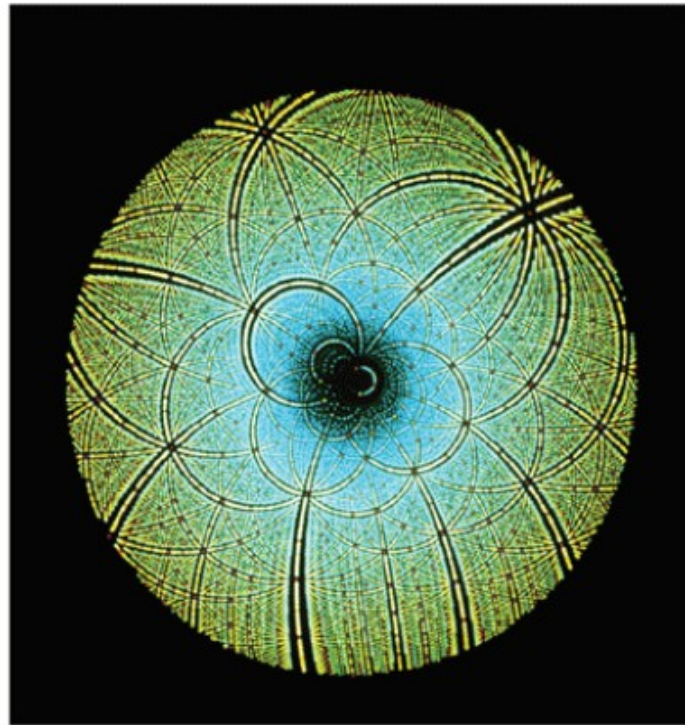
Schema della tecnica usata per osservare la diffrazione di raggi X da un cristallo. La serie di macchie formate sulla pellicola dai fasci diffratti si chiama *spettrogramma di Laue*.

# DIFFRAZIONE ED IMMAGINI ATOMICHE (2)

(a) Macchie di Laue per un singolo cristallo di silicato di alluminio berillio. (b) Spettrogramma di Laue dell'enzima Rubisco. Tale enzima è presente nelle piante ed è coinvolto nella fotosintesi.



(a)

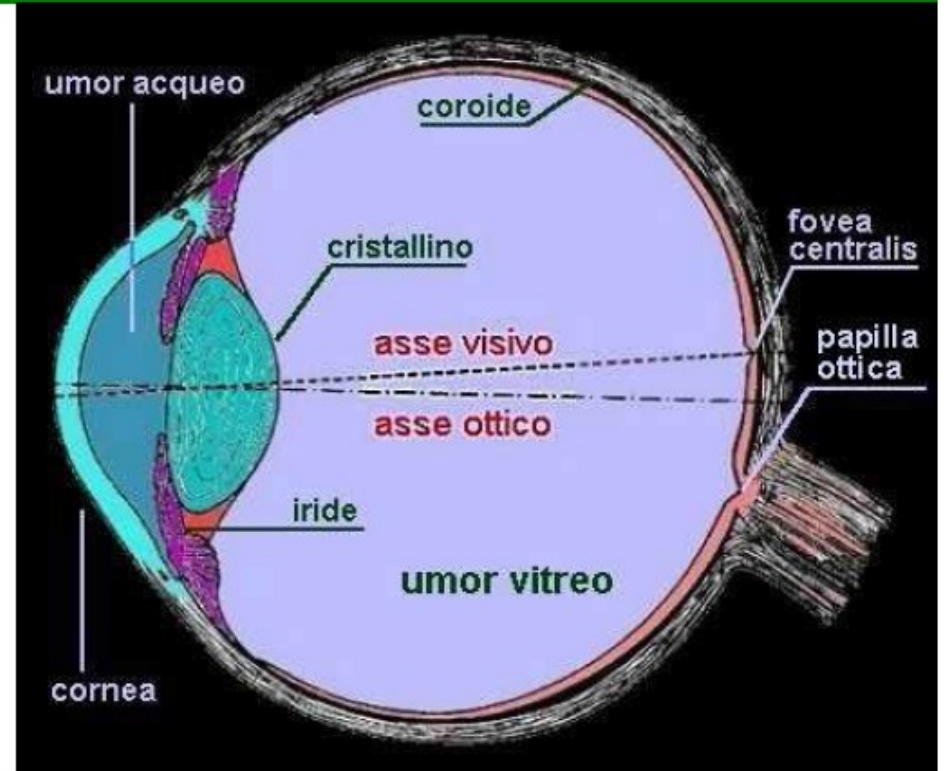


(b)

# VISIONE (1)

La messa a fuoco della luce è fatta principalmente dal sistema cornea-cristallino. La cornea devia la luce verso l'asse ortogonale ad essa, cioè verso la zona della fovea.

**Il cristallino è una lente convergente che si restringe o si allarga cambiando fuoco e permettendo quindi il formarsi sulla retina di immagini di oggetti che si trovano a distanze diverse dal cristallino stesso. L'iride (il cosiddetto colore dell'occhio) stringendosi o allargandosi regola la quantità totale di luce all'interno dell'occhio.**

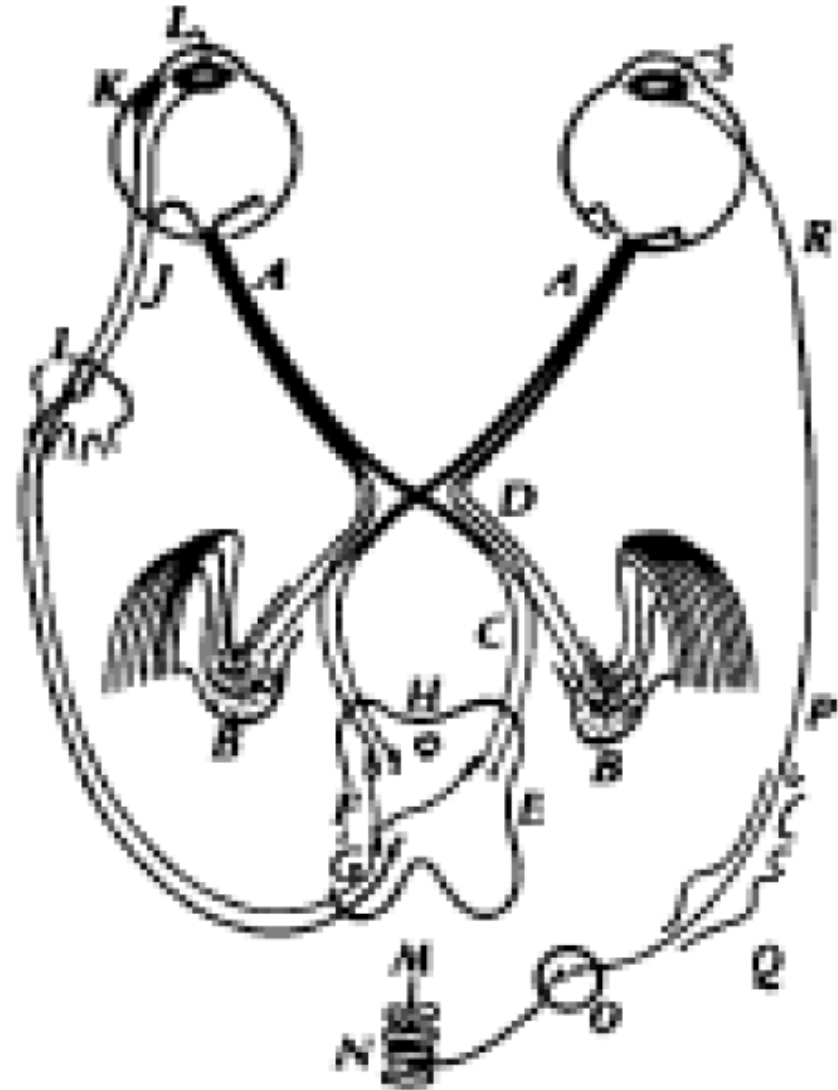


# VISIONE (2)

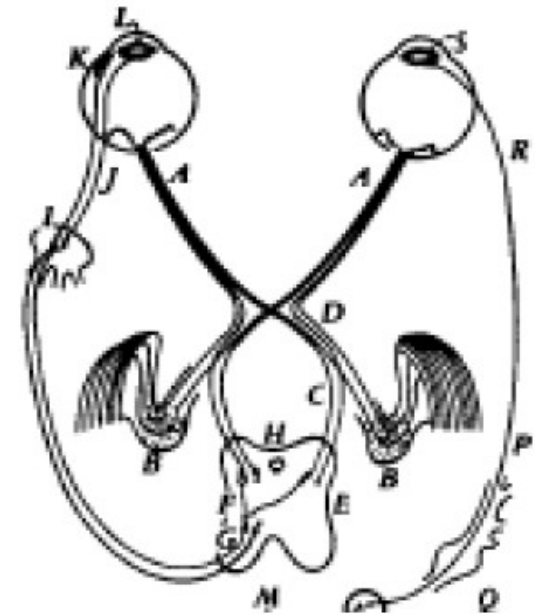
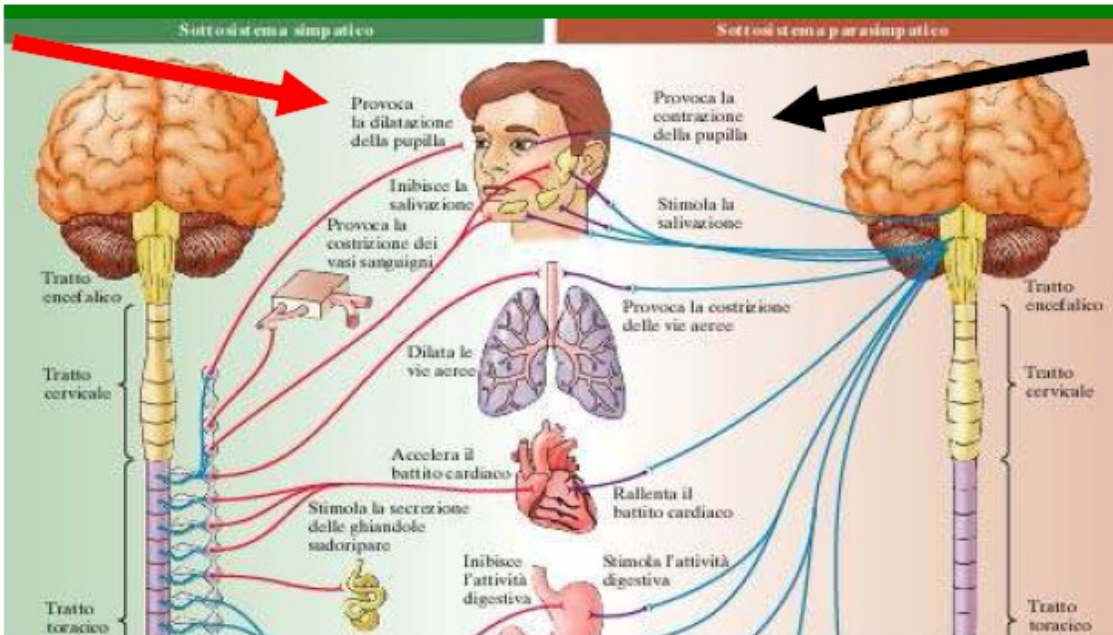
Alcune delle fibre del nervo ottico (A) non vanno direttamente alla corteccia visiva del due emisferi cerebrali (B), ma entrano nel cervello medio (H) e ritornano all'occhio.

Queste fibre misurano

- 1) la luce media e regolano l'iride
- 2) se l'immagine è confusa regolano il cristallino
- 3) se l'immagine è doppia regolano la visione binoculare



# VISIONE (3)



**L'iride ha due sistemi di muscoli:**

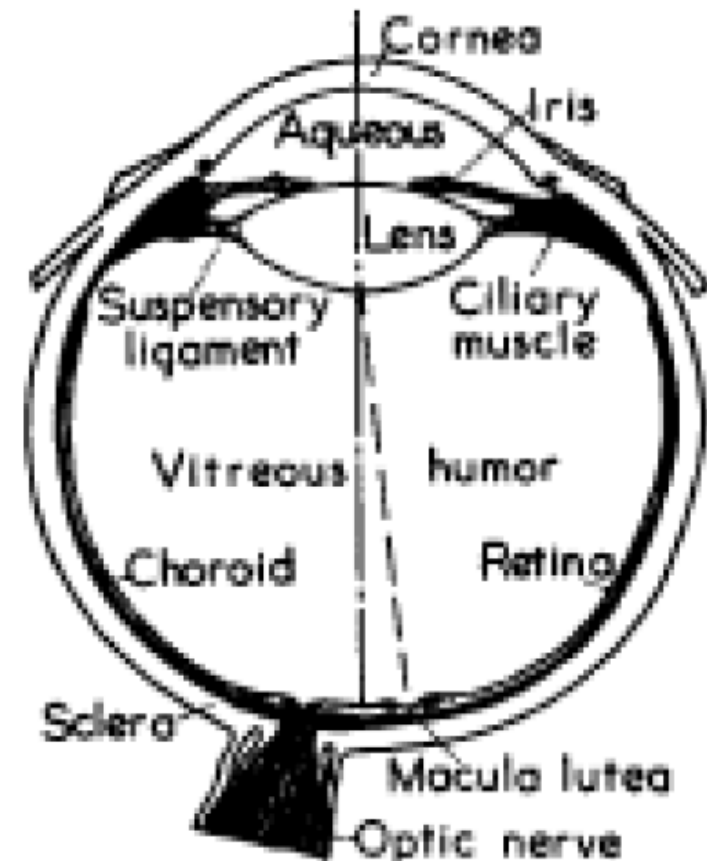
**un muscolo circolare (L) che chiude l'iride; esso agisce rapidamente ed è connesso con brevi fibre al cervello (sistema parasimpatico);**

**muscoli radiali (S) che tirano e fanno dilatare l'iride; essi agiscono lentamente e sono connessi con lunghe fibre che provengono dal tratto toracico del midollo spinale (sistema simpatico).**

# OCCHIO UMANO

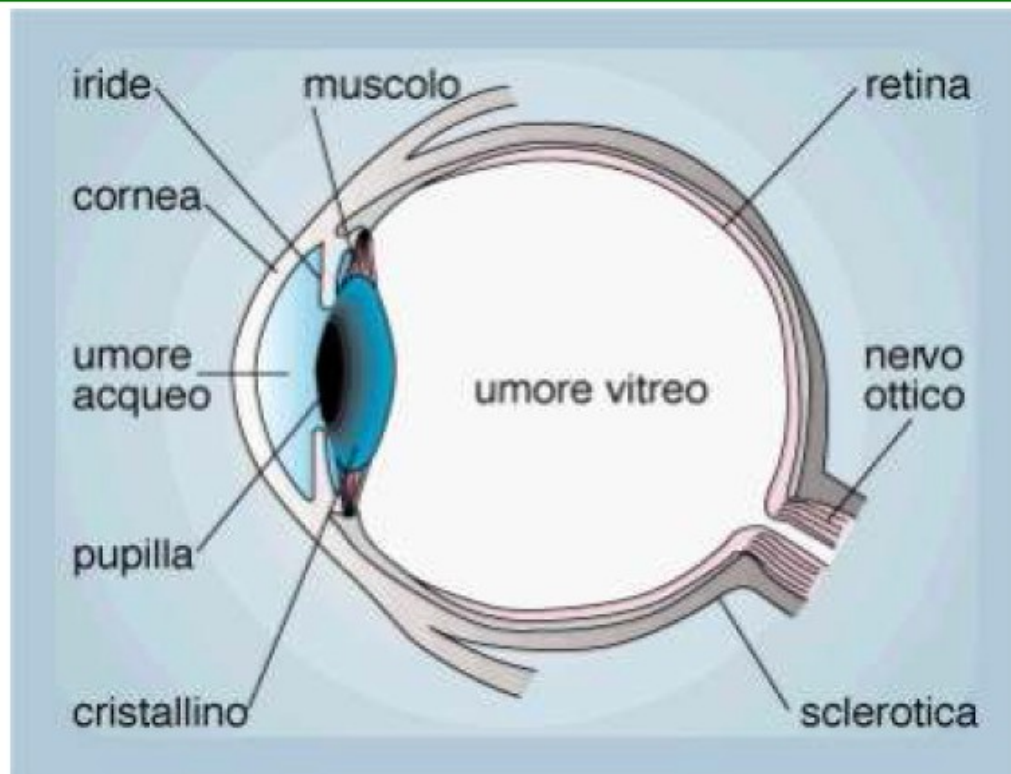
La luce entra nell'occhio attraverso la **cornea**, è rifratta dal **cristallino** e l'immagine si forma sulla **retina**.

Quest'ultima non è per niente uniforme. Vi è una **macchia**, nel centro del campo visivo, nella quale abbiamo la maggior acutezza visiva: **fovea o macula**. Le parti laterali dell'occhio non sono altrettanto efficienti, per vedere i particolari, come il centro. Vi è anche una **macchia cieca**, dove terminano i nervi.





# OTTICA DELLA VISIONE



L'immagine si crea sulla retina,  
quindi nell'equazione

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

il parametro fisso è  $q$  (la distanza  
dell'immagine dal cristallino).

il cristallino deve essere una  
lente a focale variabile

## Parametrici fisici

Indice di rifrazione

Umore acqueo 1.34

Cristallino 1.43

Umore vitreo 1.34

Raggi di curvatura

Cornea 0.8 cm

Cristallino (ant) 1.0 cm

Cristallino (post) 0.6 cm

Diametro del globo oculare  
22-24 cm



# CONI & BASTONCELLI

---

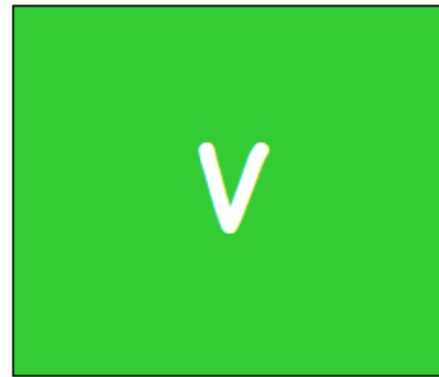
I coni ed i bastoncelli non sono uniformemente distribuiti nella retina:

- (1) non ci sono bastoncelli nella fovea;
- (2) la densità dei coni diminuisce andando ai lati del campo di vista.

La periferia della retina è molto sensibile al moto e quindi per oggetti che sono visti "con la coda dell'occhio", la visione non è nitida, ma l'allerta è rapida. Dentro di noi le connessioni sono fatte in modo da accorgersi velocemente se qualcosa si agita a lato del campo visivo.

# MISURA DELLA SENSAZIONE DEL COLORE

---



$$C = \alpha R + \beta V + \gamma B$$

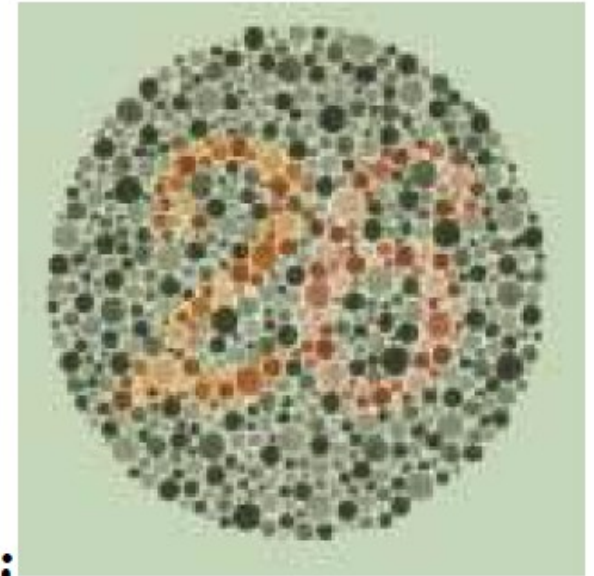
# PIGMENTI E DALTONISMO (1)

---

Per la biofisica della visione del colore, la teoria più semplice, proposta da Young e Helmholtz, suppone che nell'occhio vi siano tre diversi pigmenti con diversi spettri di assorbimento.

Sappiamo che vi sono persone daltoniche (~8% della popolazione maschile e ~0.5% di quella femminile), che hanno una alterata percezione del colore. Ci sono dei daltonici che si chiamano *dicromatici*, per i quali qualsiasi colore è costruito con solamente due colori primari.

# PIGMENTI E DALTONISMO (3)



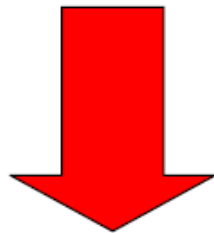
Le persone dotate di normale capacità di discriminazione dei colori, nei riquadri leggono rispettivamente i numeri: 42, 37 e 58.

Quelle affette dalle più comuni forme di daltonismo leggono: 2, 7, 58.

## PIGMENTI E DALTONISMO (2)

---

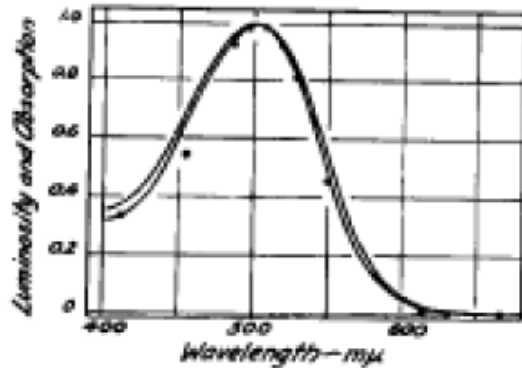
L'idea più ovvia è che i daltonici dicromatici siamo privi di uno dei tre pigmenti.  
Se è così devono esistere tre tipi di daltonici dicromatici.



Esistono tre tipi di daltonismo dicromatico:

1. protanope - confonde il rosso con il verde ed anche con il blu (comune)
2. deuteranope - confonde il rosso con il verde (comune)
3. tritanope - confonde il giallo con il blu (molto raro)

# PIGMENTI E DALTONISMO (4)



Il primo pigmento scoperto è la *porpora retinica*, che si trova nell'occhio di tutti i vertebrati e la cui curva di sensibilità praticamente si sovrappone a quella dell'occhio adattato al buio. Questo è il

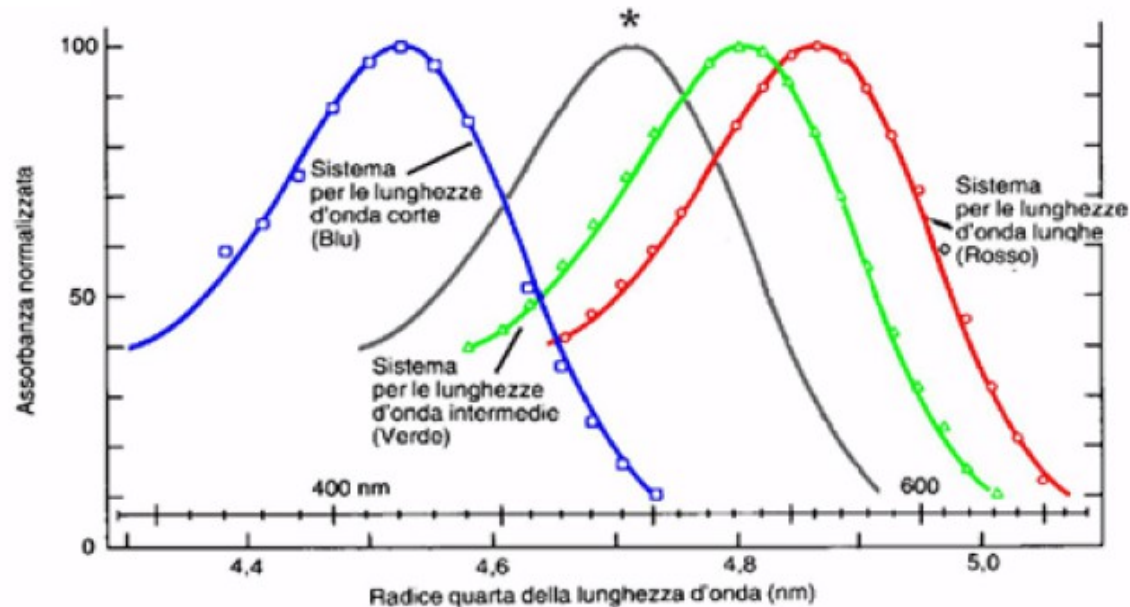
pigmento dei bastoncelli e non ha niente a che vedere con la visione del colore.

Intorno agli anni '70 sono stati scoperti due pigmenti relativi a coni ed è stato scoperto il pigmento mancante per l'occhio protanope.

I lavori fatti sull'occhio deuteranope non mostrano la mancanza di un definito pigmento.



# PIGMENTI



Attualmente conosciamo gli spettri di assorbimento dei tre tipi di coni e dei bastoncelli (\*) nella retina umana