

Ottica

la scienza di come si muove la radiazione elettromagnetica

Le sorgenti di radiazione e.m.

- Si chiamano sorgenti **primarie** di radiazione tutte quelle sorgenti nelle quali avviene una trasformazione in radiazione elettromagnetica di una forma di energia di tipo diverso.
- Si chiamano sorgenti **secondarie** tutte quelle sorgenti che rielaborano energia radiante.

In parole povere, le **sorgenti primarie sono quelle che fanno luce, le sorgenti secondarie sono quelle rimettono se illuminate.**

Sorgenti primarie di radiazione



Lampadine ad incandescenza

Convertono energia elettrica in termica e quindi radiante.

Tubi al neon e fulmini

Convertono energia elettrica in energia di eccitazione o ionizzazione atomica, e poi radiante.



Stelle, ad es. Sole

Convertono energia nucleare in energia radiante.

Fiamma

Converte energia chimica (combustione) in energia radiante.



Aurore

Convertono energia cinetica di elettroni/ioni in energia di eccitazione atomica in energia radiante.

Sorgenti di radiazione secondarie



Assorbimento



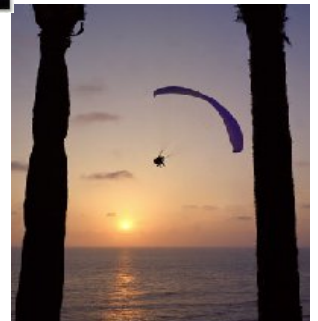
Riflessione



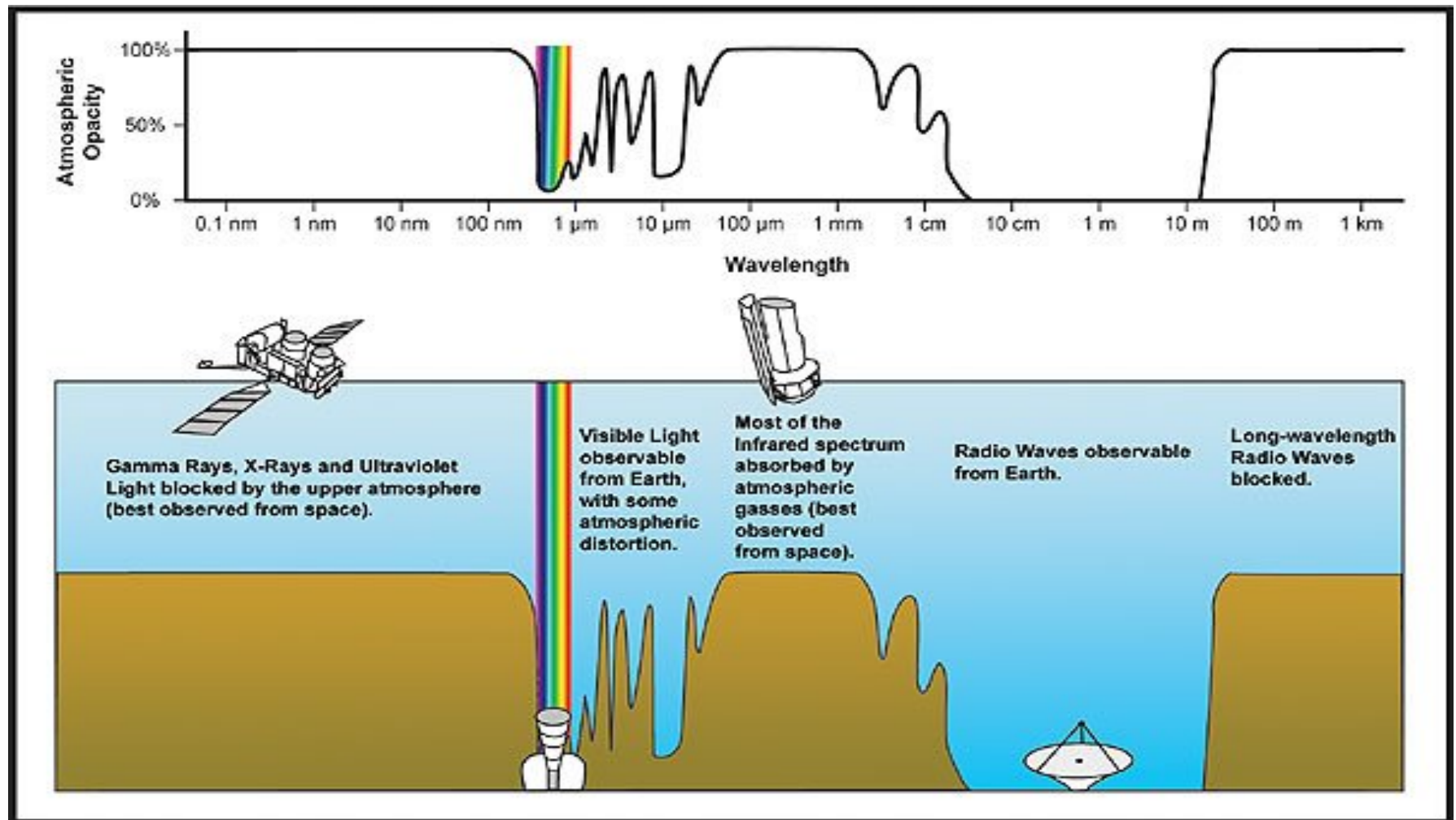
Rifrazione



Diffusione



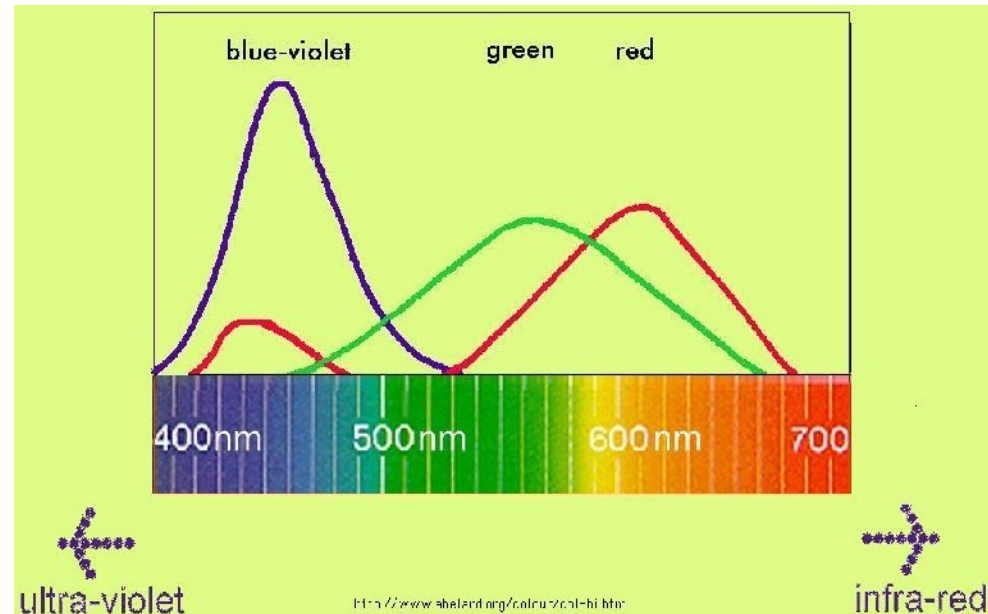
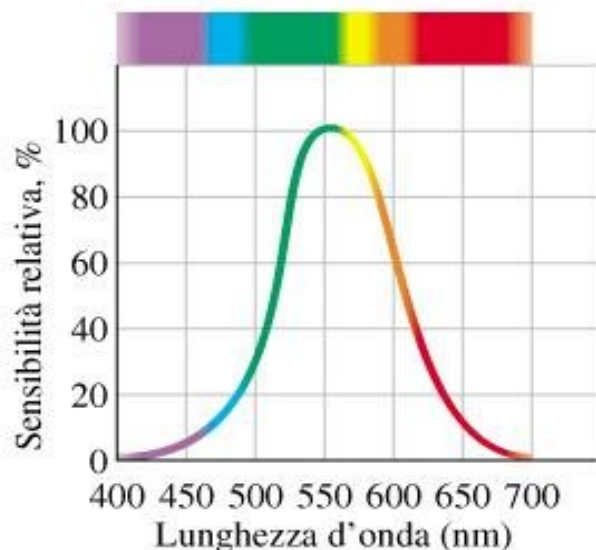
Trasparenza dell'atmosfera



Occhio umano e luce visibile

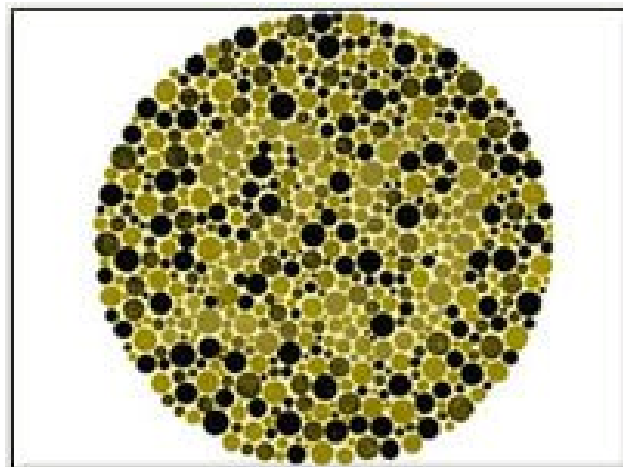
La sensibilità dell'occhio umano è maggiore nel colore verde, dov'è in grado di percepire più sfumature.

- La retina è l'organo sensibile alla luce ed è costituito da sensori detti **coni e bastoncelli**. I bastoncelli sono molto sensibili ma ciechi al colore e vengono utilizzati nella visione notturna.
- Di coni ve ne sono di tre tipi, ciascuno sensibile ad un differente "blend" di lunghezza d'onda. I picchi di sensibilità sono circa
- **Cono S (blu ~430 nm)**
- **Cono M (verde ~540 nm)**
- **Cono L (rosso ~570 nm)**



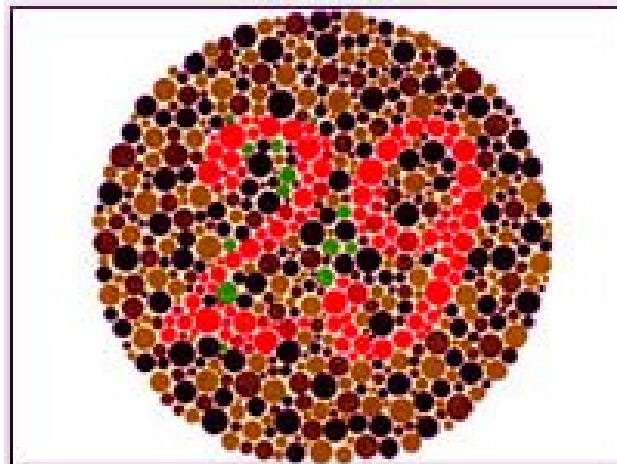
Cecità dei colori

- **Acromasia:** un solo tipo di coni
- **Dicromatismo:** (noto anche come daltonismo)
 - **Protanopia (assenza di coni L rosso)**
 - **Deuteranopia (assenza di coni M verde)**
 - **Tritanopia (assenza di coni S blu)**



Cecità dei colori

- **Acromasia:** un solo tipo di coni
- **Dicromatismo:** (noto anche come daltonismo)
 - Protanopia (assenza di coni L rosso)
 - **Deuteranopia (assenza di coni M verde)**
 - Tritanopia (assenza di coni S blu)



Cecità dei colori

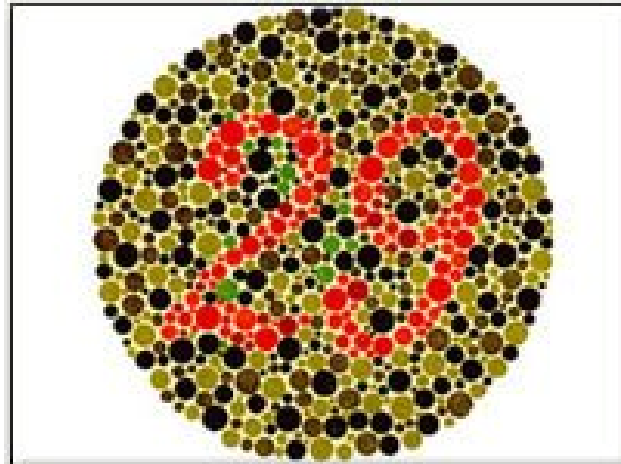
- **Acromasia:** un solo tipo di coni
- **Dicromatismo:** (noto anche come daltonismo)
 - **Protanopia** (assenza di coni L rosso)
 - **Deuteranopia** (assenza di coni M verde)
 - **Tritanopia** (assenza di coni S blu)



Cecità dei colori

- **Acromasia:** un solo tipo di coni
- **Dicromatismo:** (noto anche come daltonismo)
 - **Protanopia** (assenza di coni L rosso)
 - **Deuteranopia** (assenza di coni M verde)
 - **Tritanopia** (assenza di coni S blu)

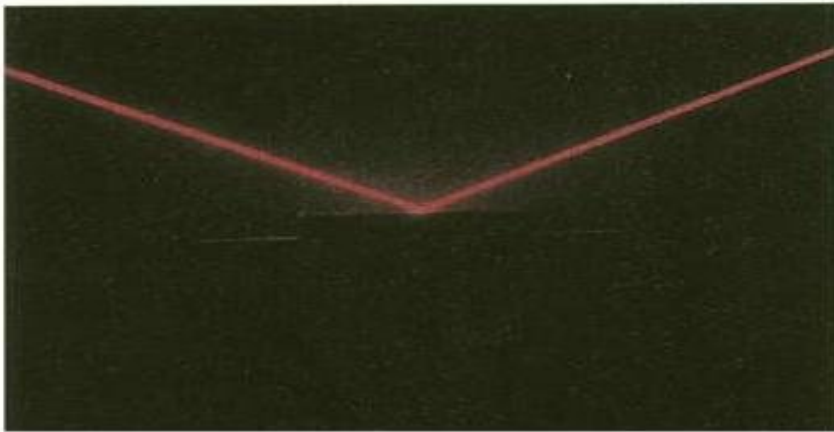
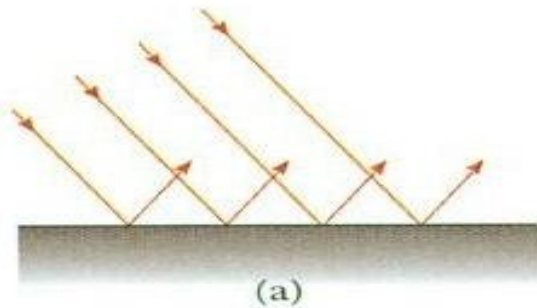
Occhio normale



Ottica geometrica: riflessione

Speculare

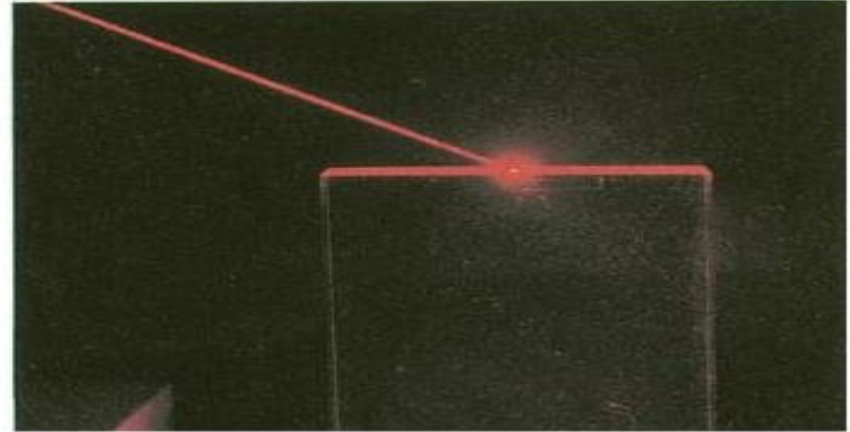
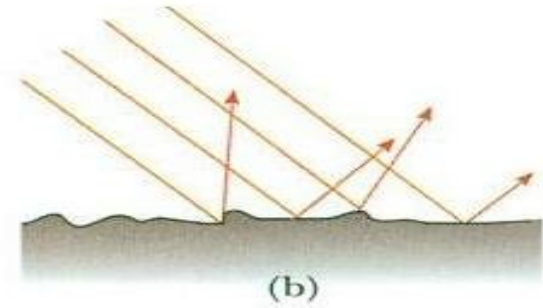
Raggi riflessi
paralleli tra loro



Superfici lisce

Diffusione

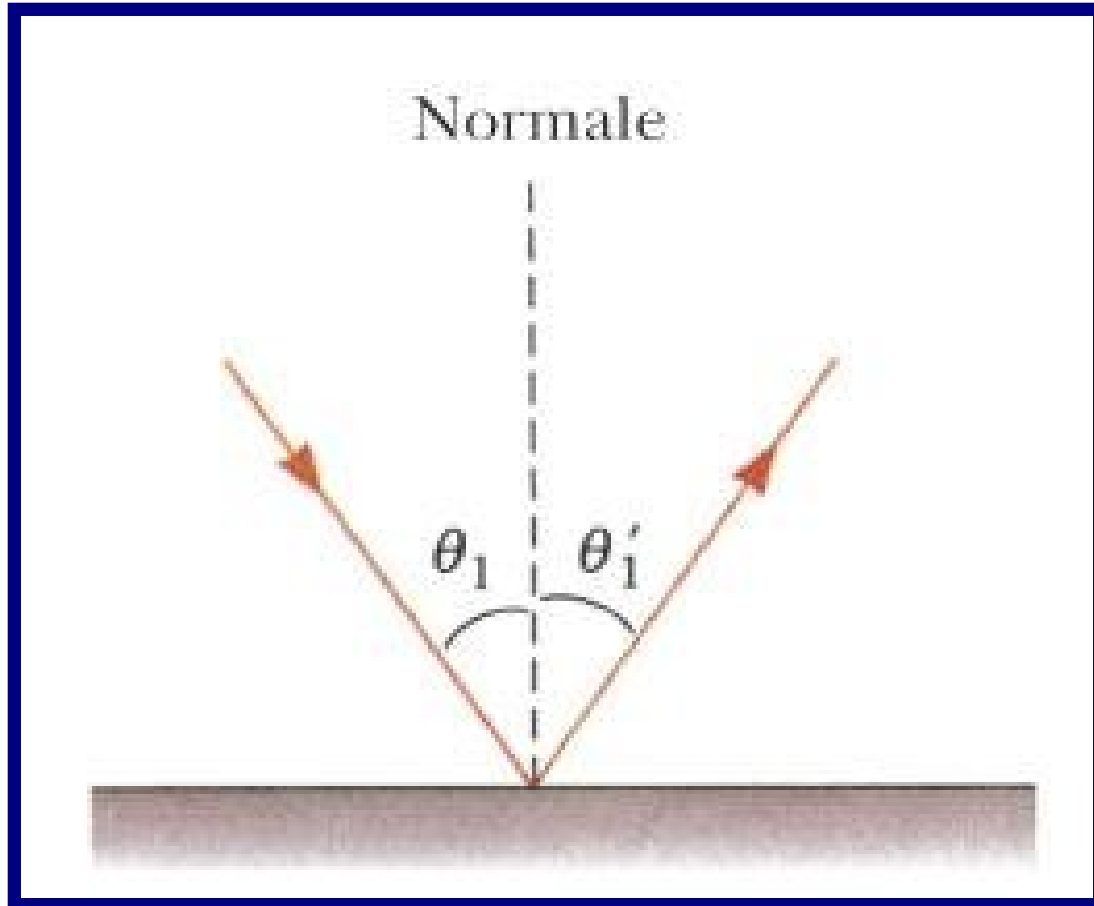
Raggi riemessi in
direzioni casuali



Superfici ruvide

Leggi della riflessione

(su una superficie liscia – otticamente lavorata)

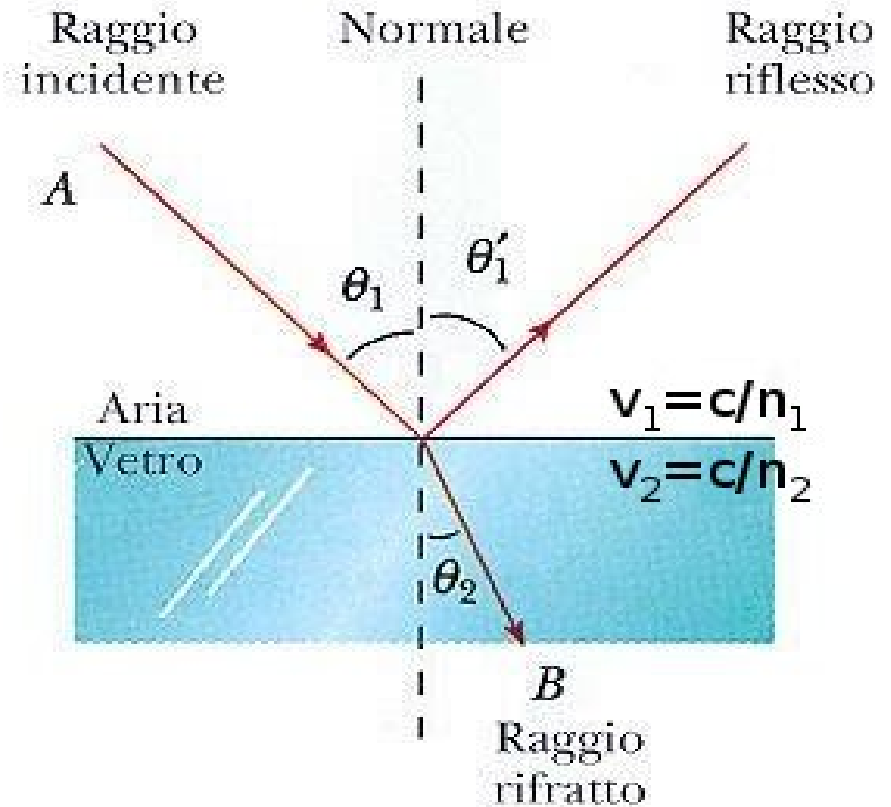
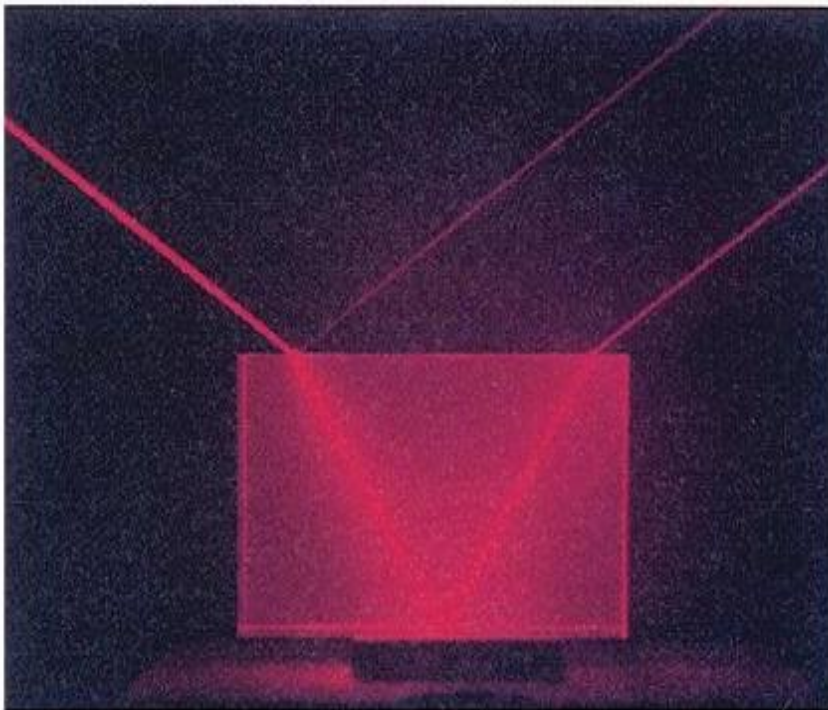


raggio **incidente**, raggio **riflesso** e **normale** (=perpendicolare) alla superficie giacciono tutti **nello stesso piano**

$$\theta_1 = \theta'_1$$

Leggi della rifrazione

anche il raggio **rifratto** sta **nello stesso piano** con i raggi **incidente e riflesso** e con la **normale** alla superficie



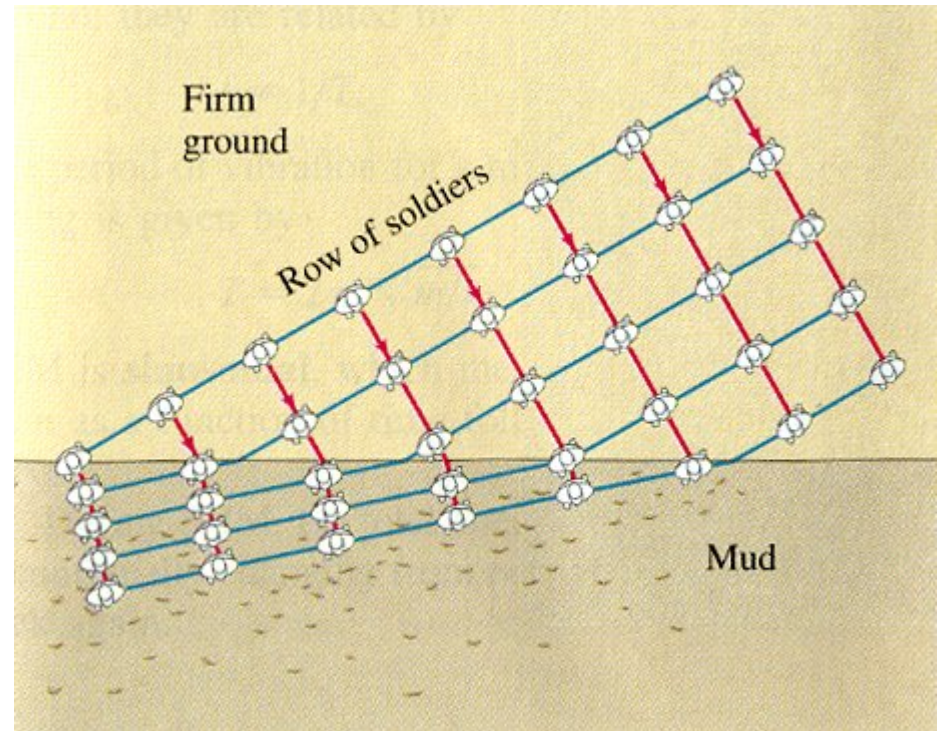
$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

Il meccanismo della rifrazione

Paragonando i fronti d'onda della radiazione a righe di soldati che marciano veloci sul terreno solido e lenti sul fango, se la pattuglia incontra la linea solido/fango a un angolo, chi la raggiunge prima (a sin.) è rallentato prima, cosicché le file di soldati si piegano.

L'indice di rifrazione n è legato alla velocità della luce da:

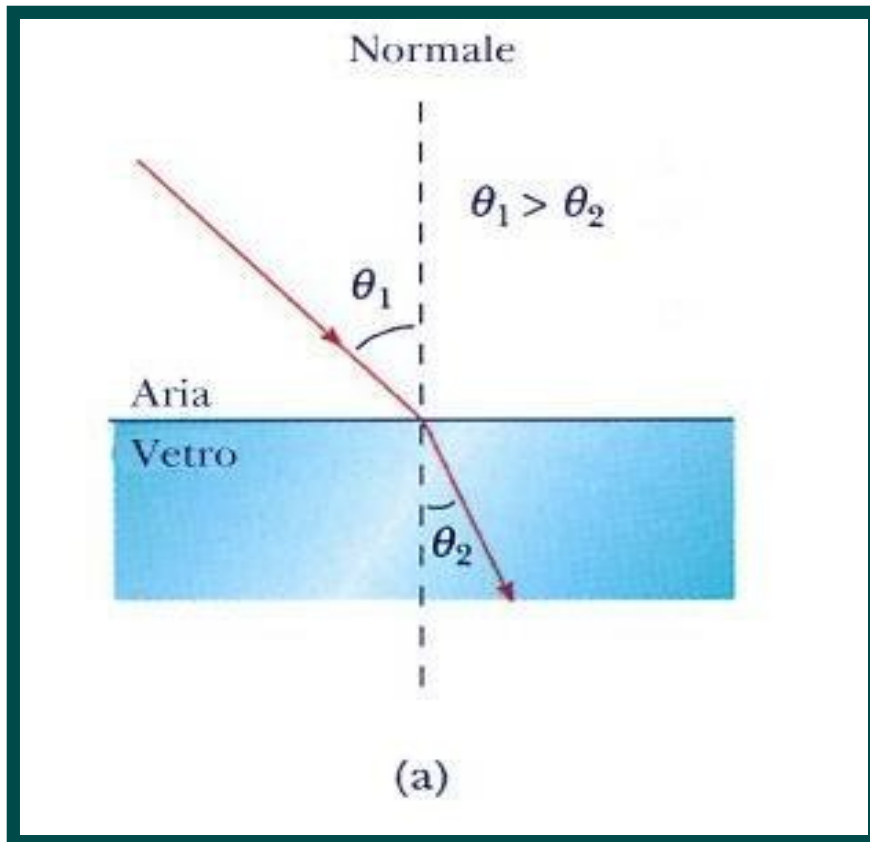
$$v = c / n$$



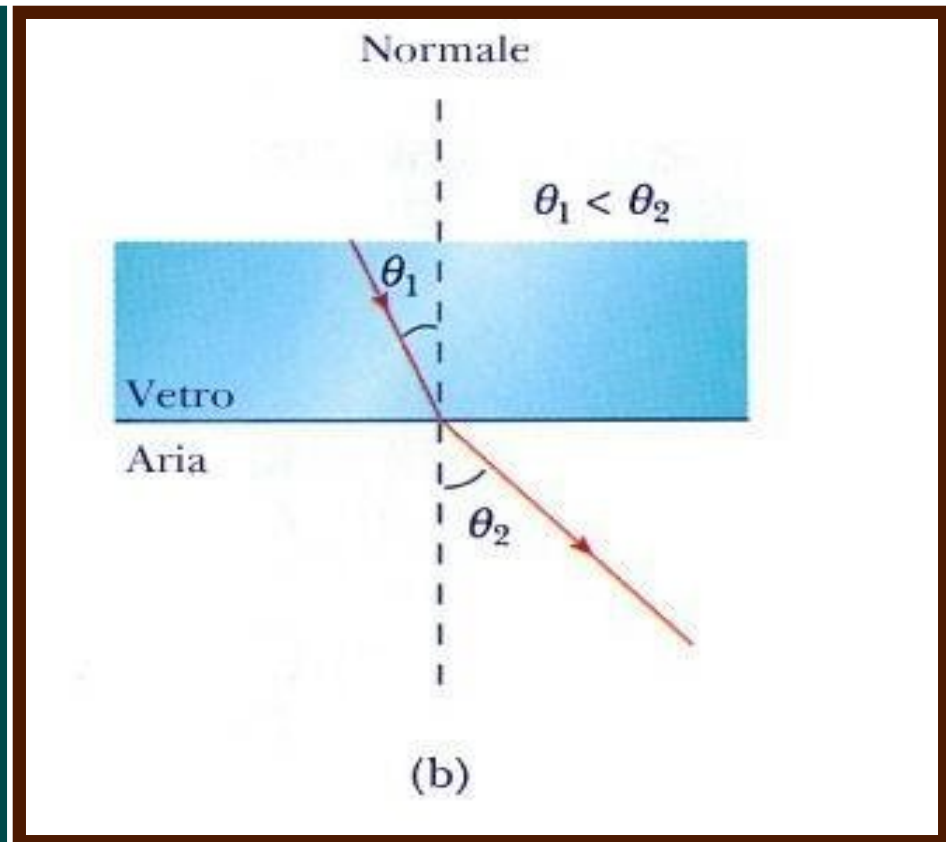
$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

Esempi di rifrazione

$$n_1 < n_2$$



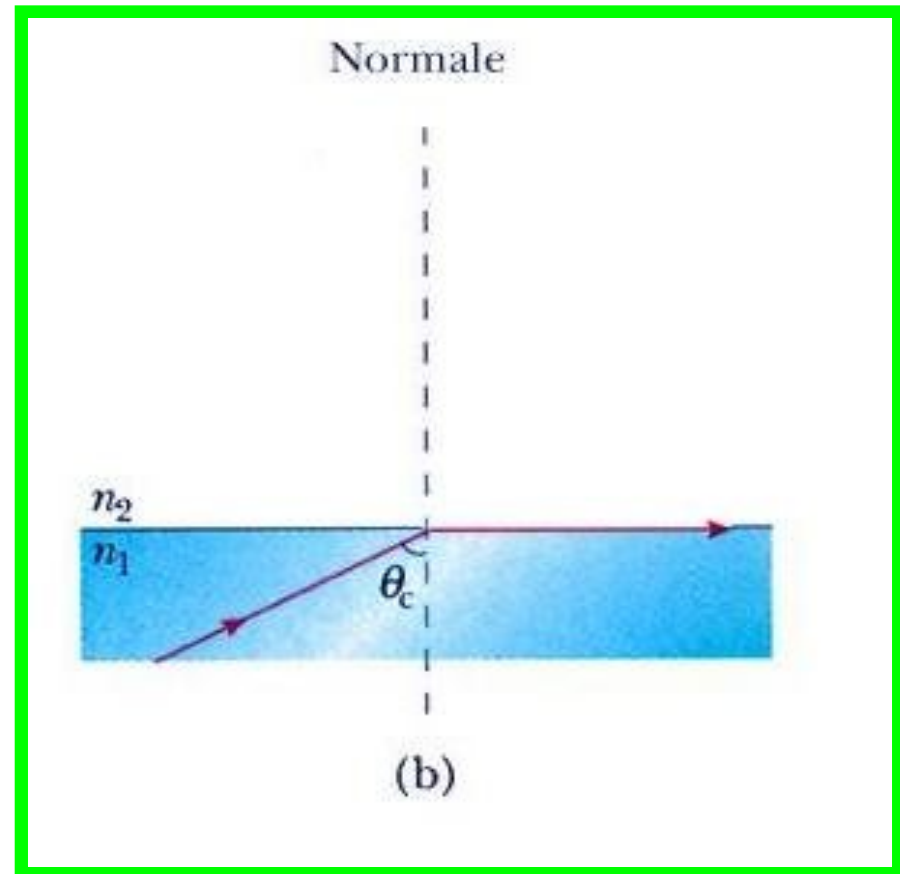
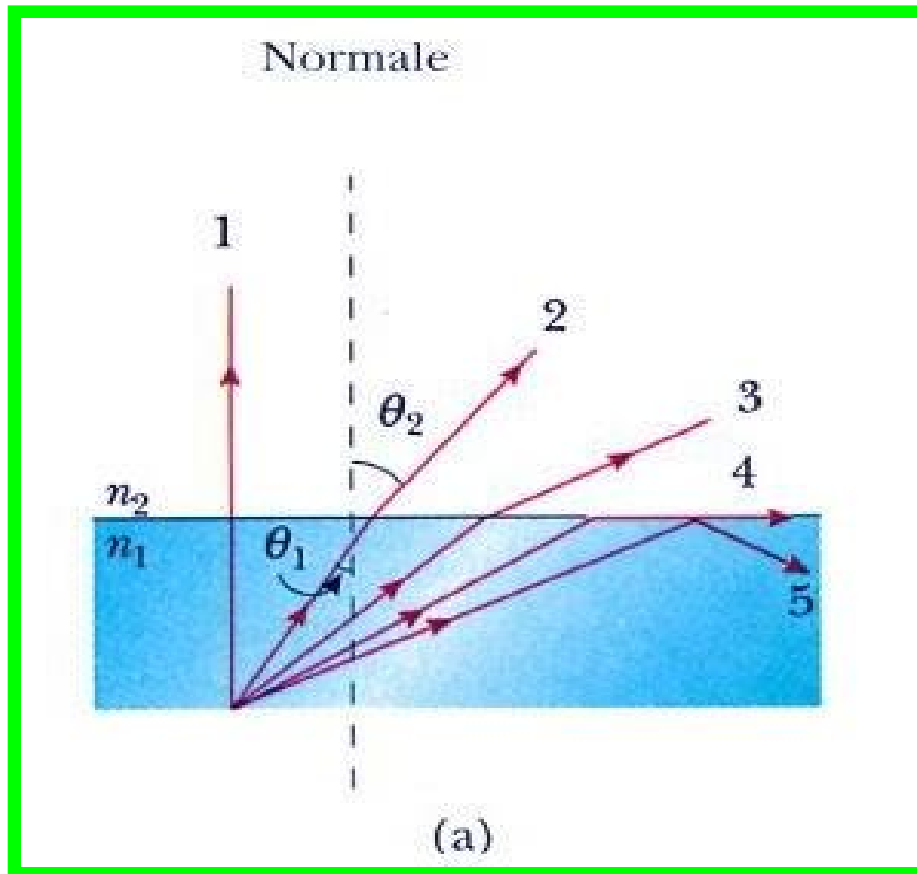
$$n_1 > n_2$$



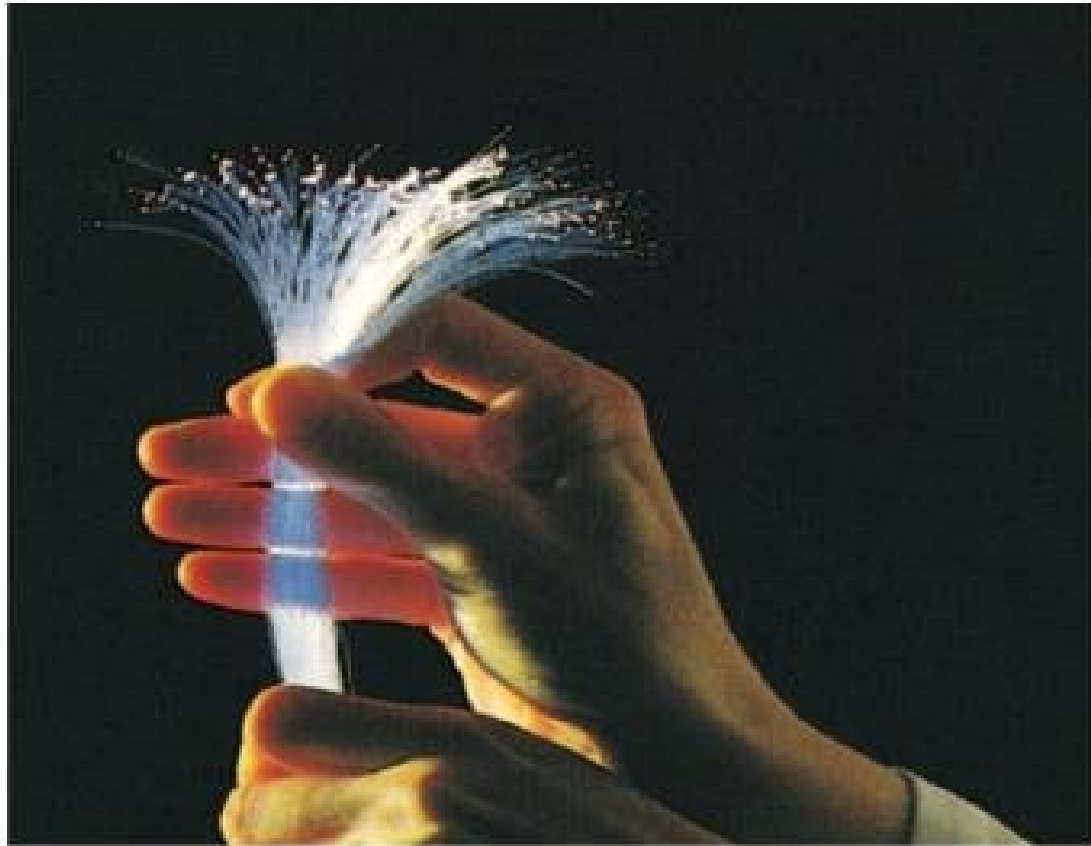
Riflessione interna totale

caso $n_1 > n_2$: il raggio rifratto scompare quando l'angolo incidente θ_1 supera un

angolo critico: $\sin(\theta_c) = n_2/n_1$



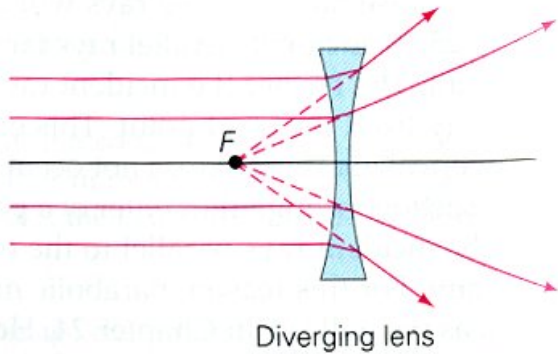
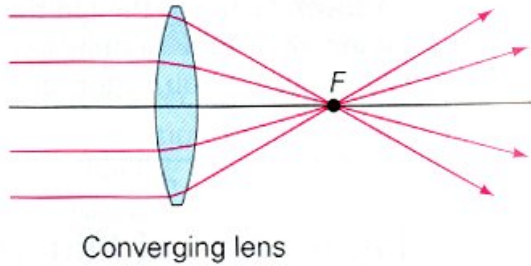
Fibre ottiche



Sfruttando la riflessione totale interna vetro-aria, una fibra ottica trasmette luce immessa ad un'estremità fino all'estremità opposta con una perdita minima di luminosità

Applicazioni dell'ottica geometrica:

Lenti, specchi & c.



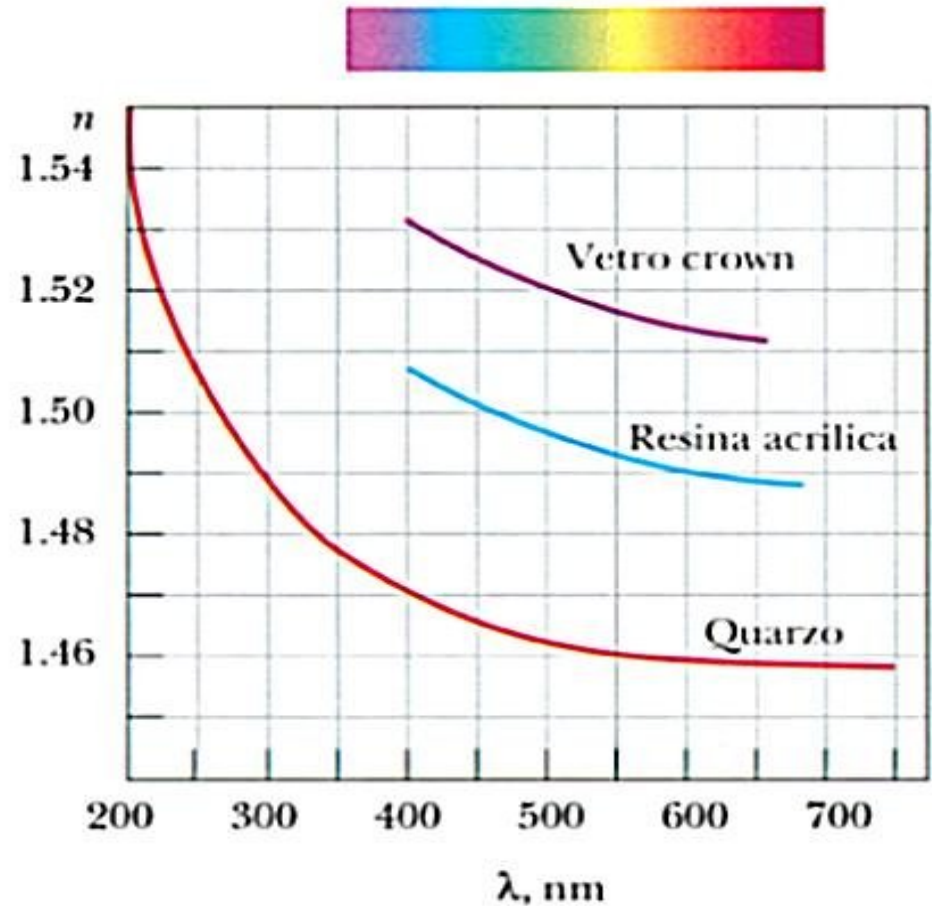
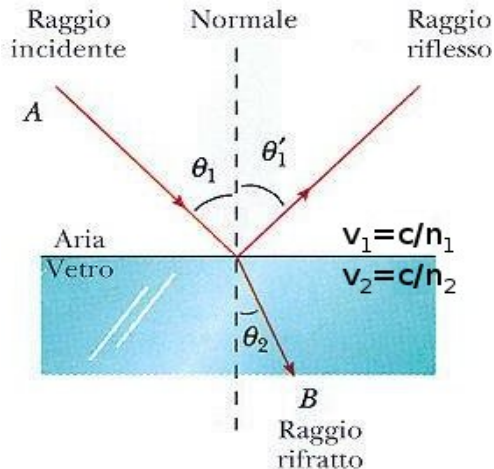
microscopi, telescopi,...

Sfruttando la rifrazione e la riflessione su superfici curve (di solito sferiche, spesso vetro-aria), si può deviare la luce, concentrarla, focalizzarla, defocalizzarla...

Indice di rifrazione

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

- $n > 1$
- n dipende dalla lunghezza d'onda della luce
- n di solito diminuisce al crescere della lunghezza d'onda

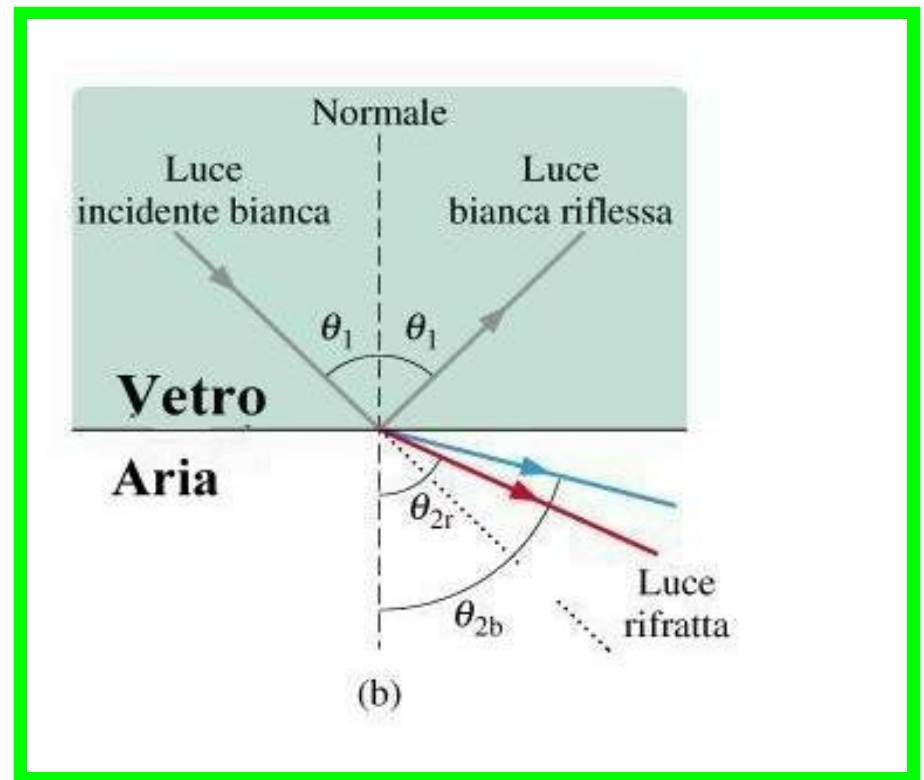
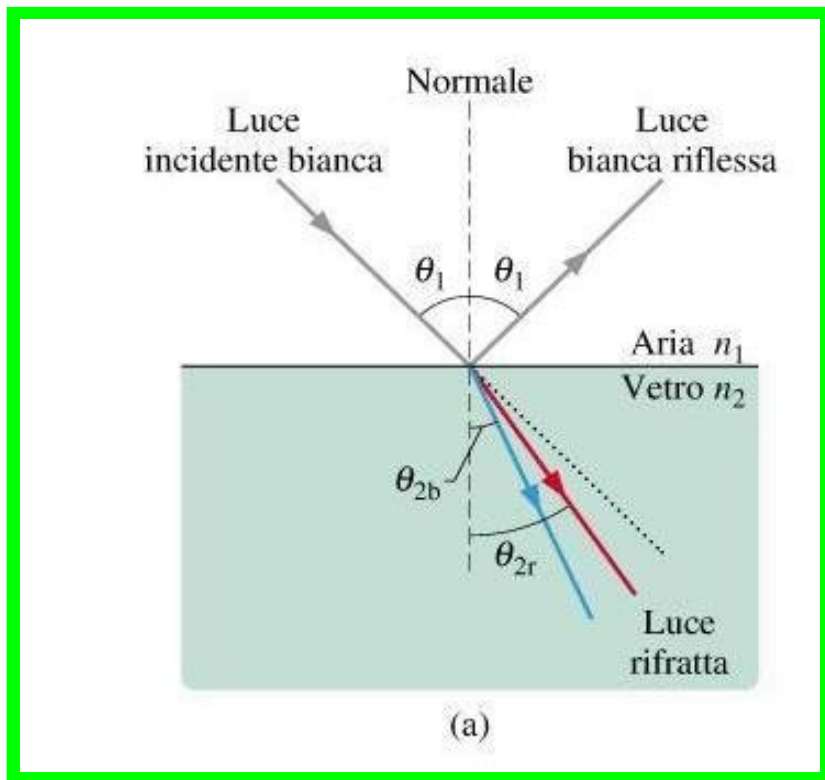


Conseguenza: **DISPERSIONE** della luce che colpisce obliquamente ($\theta_1 > 0$) un'interfaccia tra due mezzi con diverso n

Dispersione luce

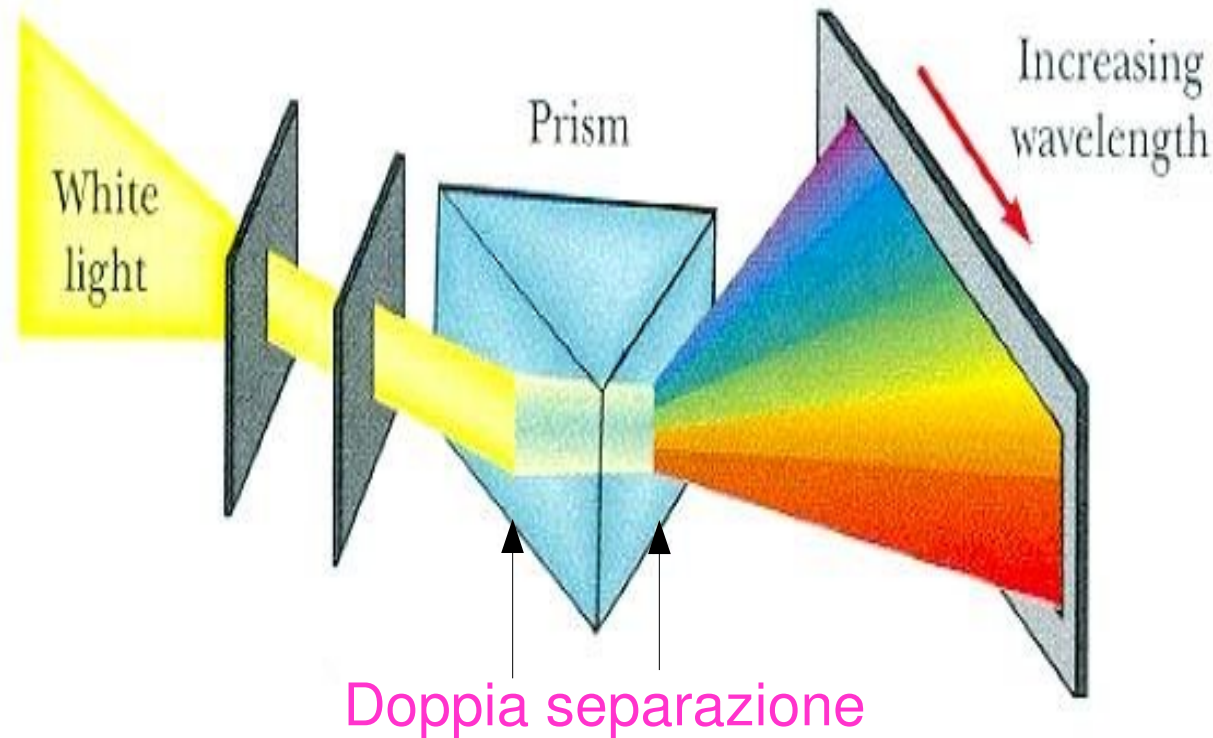
Radiazioni di λ diverso \Leftrightarrow angoli di rifrazioni diversi

Il **violetto/blu** è rifratto maggiormente del **rosso**



La dispersione è un effetto divertente, ma perlopiù nocivo (**aberrazione cromatica** delle lenti...)

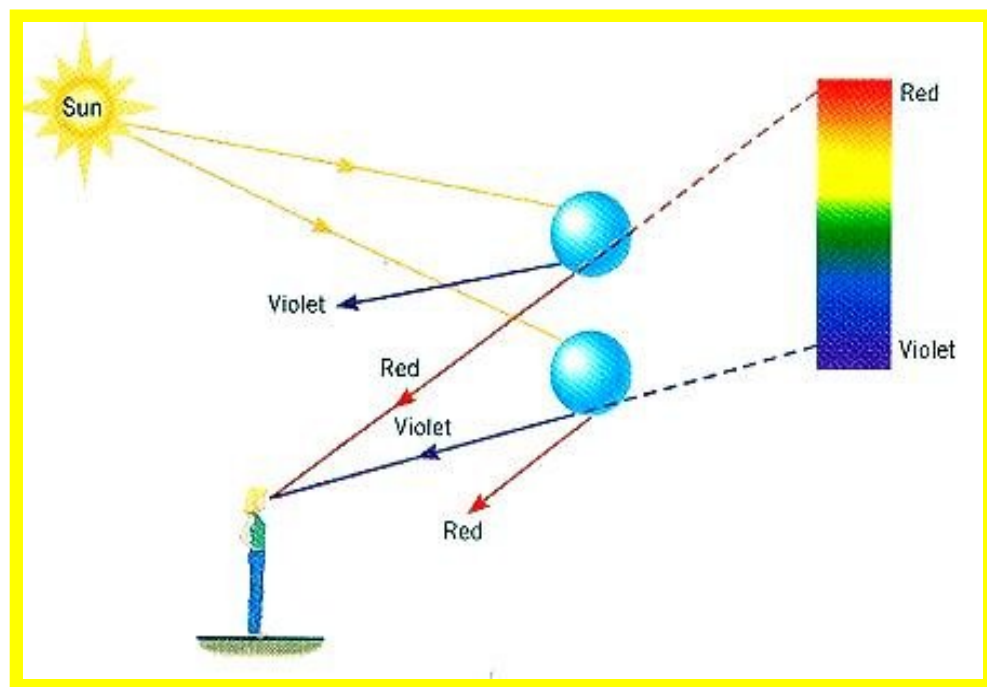
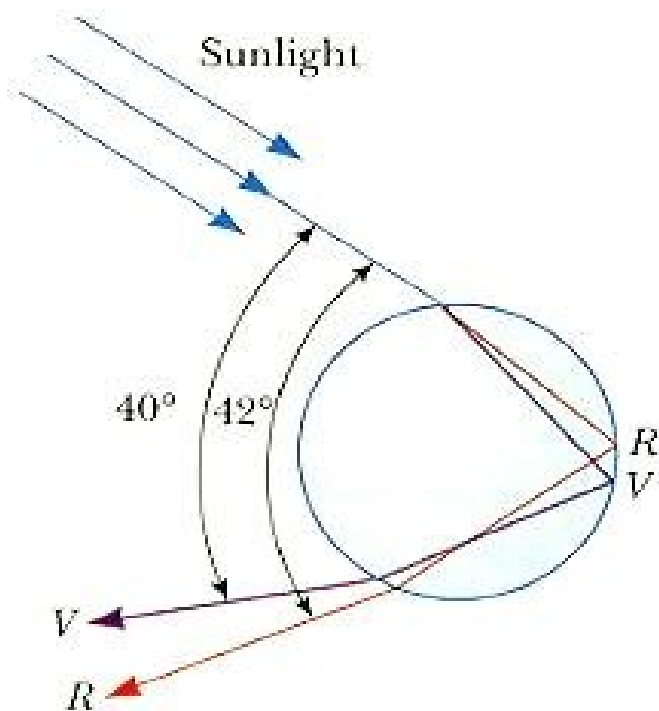
Dispersione in un prisma



Strumento per ottenere la separazione dei colori dovuta alla variazione dell'indice di rifrazione in funzione della lunghezza d'onda della radiazione. Oggi pochissimo utilizzato.

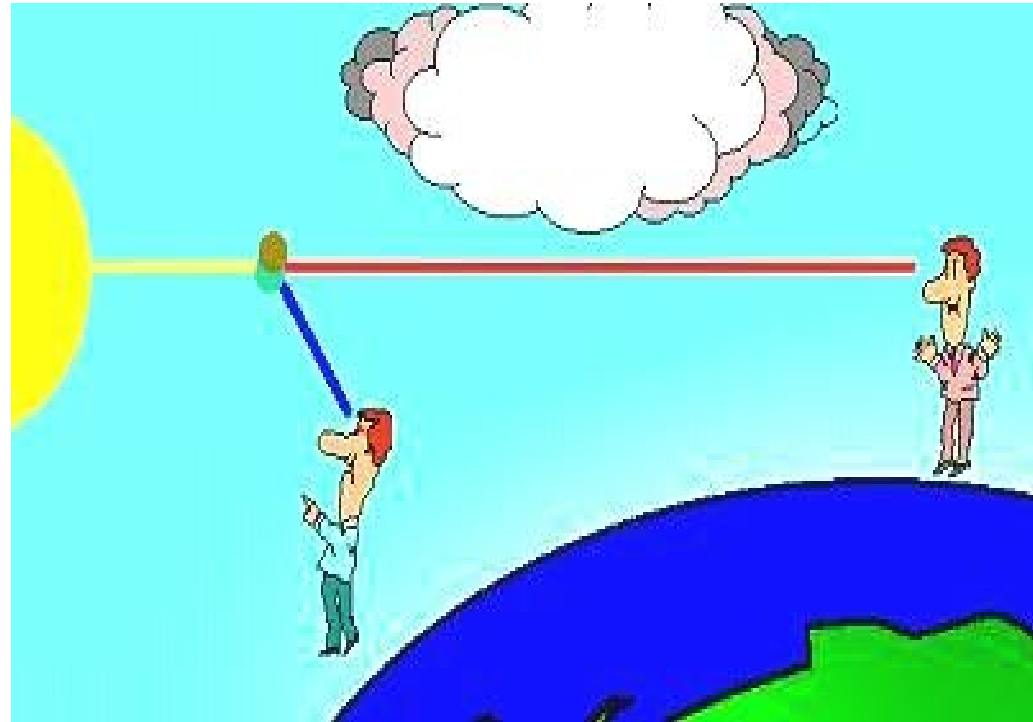
Arcobaleno

Fenomeno naturale dovuto a dispersione + riflessione della luce all'interno delle gocce d'acqua



Diffusione

- Diffusione differenziale (detta **Rayleigh scattering**) da molecole del gas e da microparticelle di dimensioni minori della lunghezza d'onda λ della luce
- Probabilità di diffusione $\sim 1/\lambda^4$
- Radiazione di maggior λ (rosso) prosegue più facilmente la sua traiettoria rettilinea
- Radiazione di minor λ (violetto, blu) diffonde in tutte le direzioni
- Nuvole e nebbia sono bianche perché formate da particelle più grandi della λ della luce: tutte le λ diffondono circa allo stesso modo



Ottica ondulatoria: Diffrazione

- i “raggi” luminosi sono una descrizione semplificata delle onde elettromagnetiche
- se l'onda luminosa incontra un ostacolo di dimensioni paragonabili alla sua λ ...
- ... non vale più l'approssimazione dell'ottica geometrica (la luce segue traiettorie rettilinee - raggi - deviati da cambiamenti di n)
- fenomeno della diffrazione (l'onda si *diffrange* oltre l'ostacolo, cioè emerge in molte direzioni diverse da quella originale)

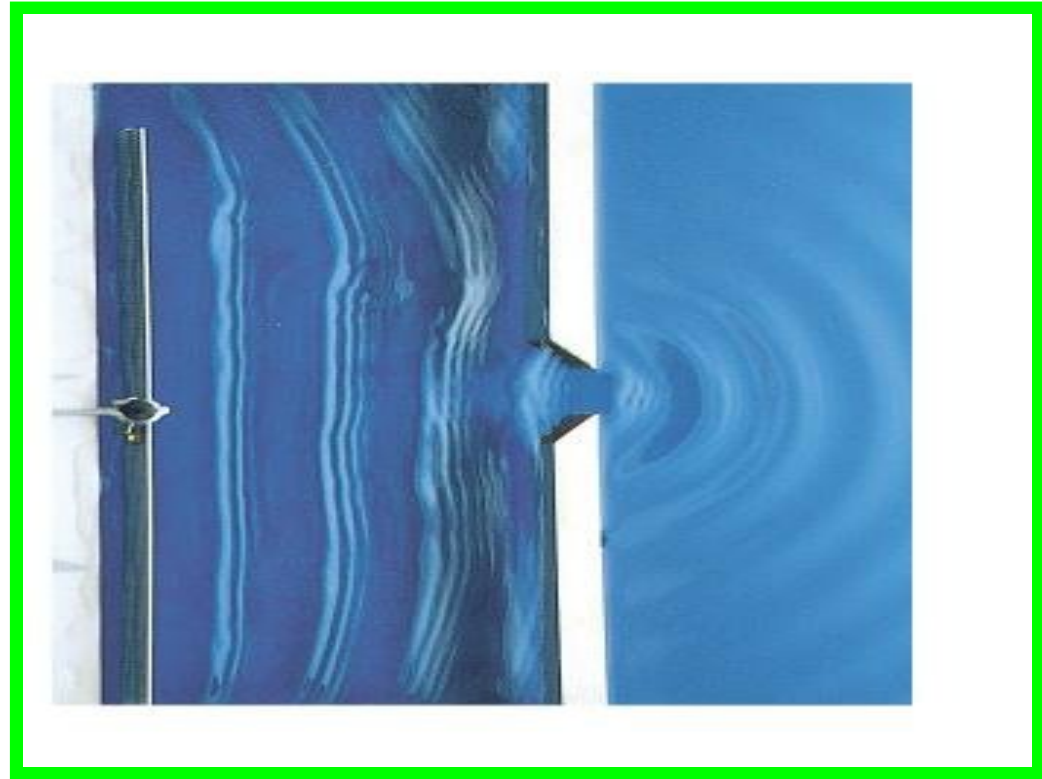
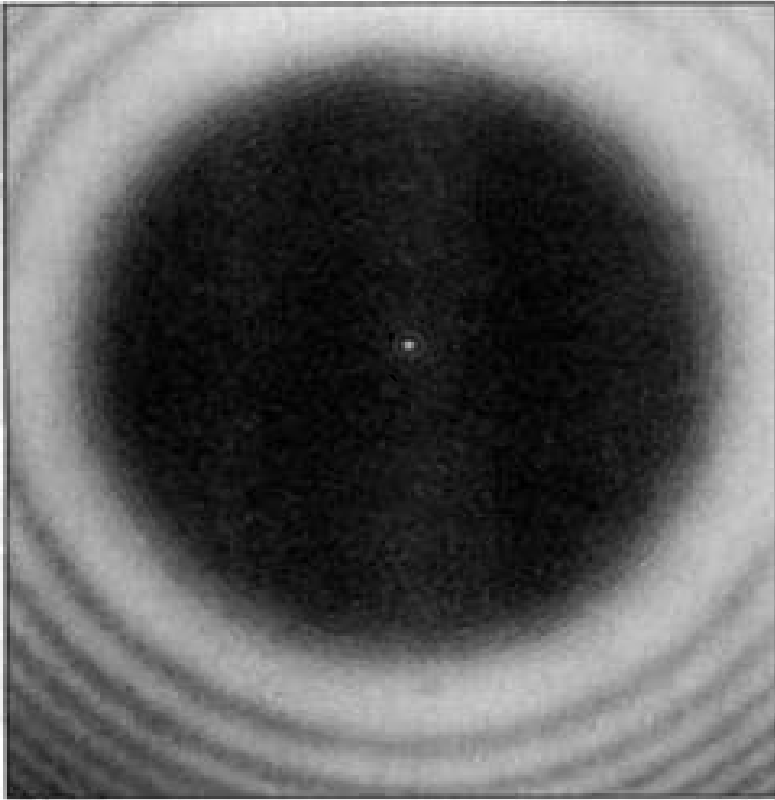
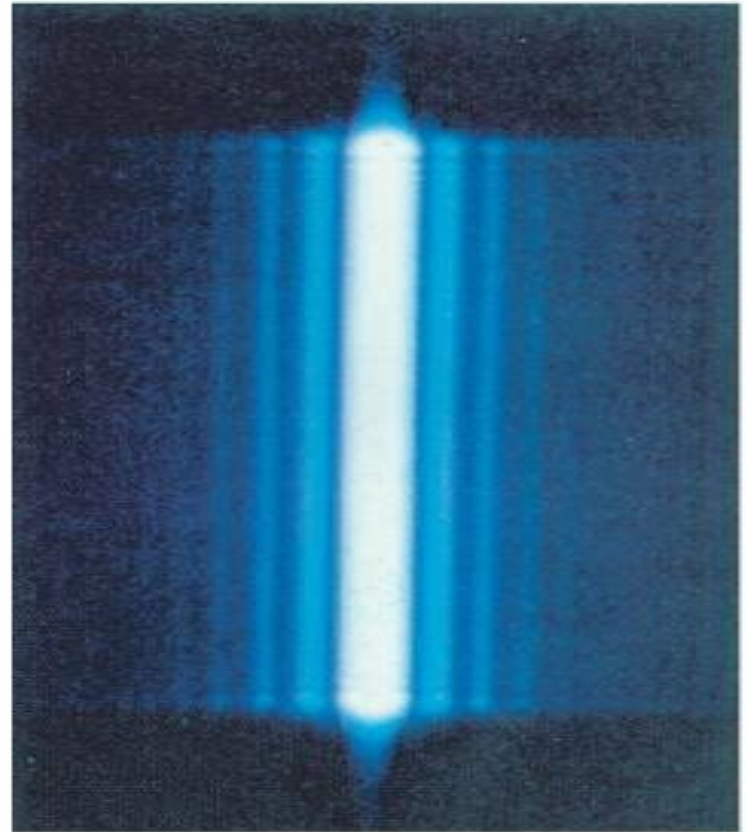


Figure di diffrazione

Disco opaco

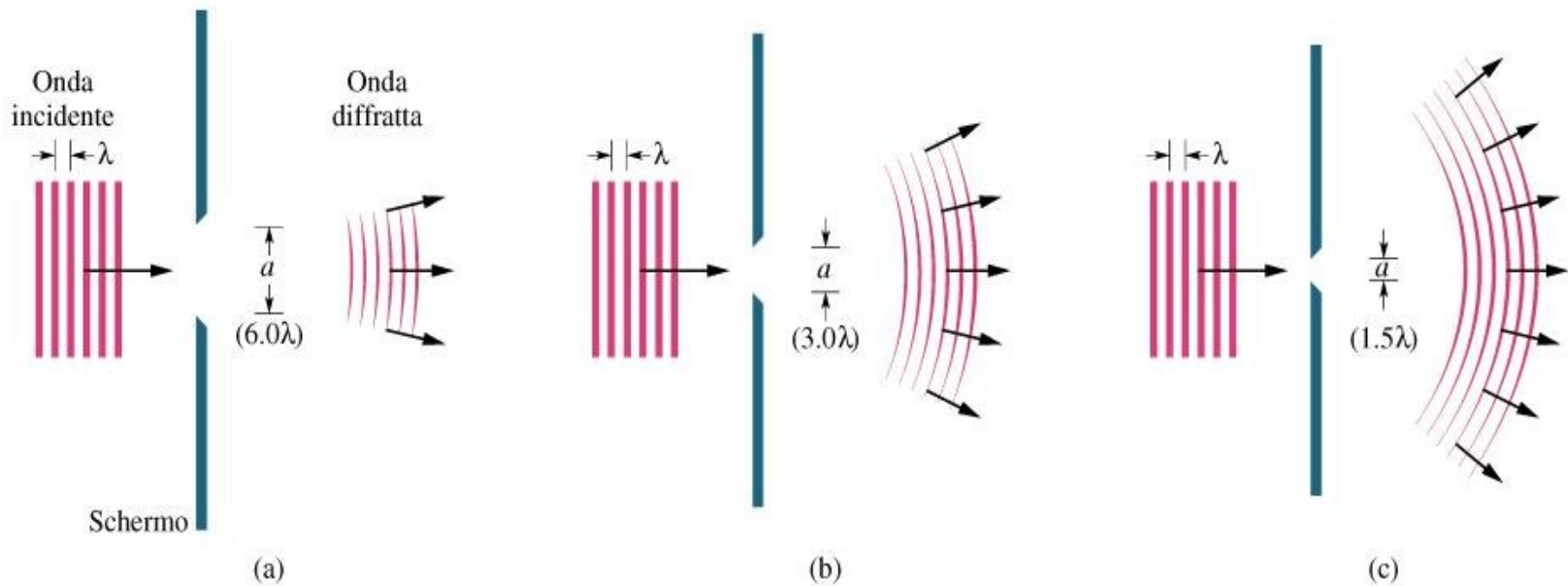


Fenditura



Diffrazione e larghezza fenditura

Per una data lunghezza d'onda, la **diffrazione è più pronunciata** quanto più **piccola è la fenditura**.

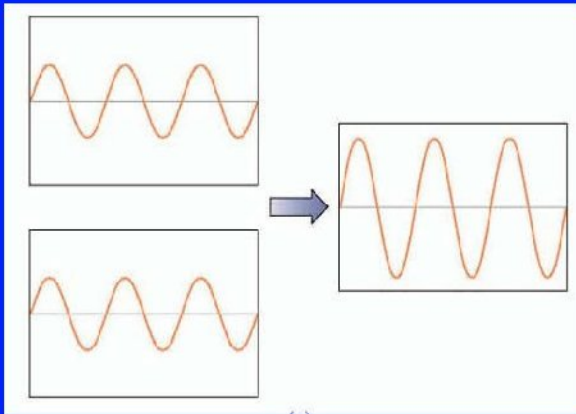


La diffrazione è significativa quando le dimensioni dell'ostacolo (qui: la larghezza a della fenditura) sono dello **stesso ordine o minori della lunghezza d'onda λ** della luce

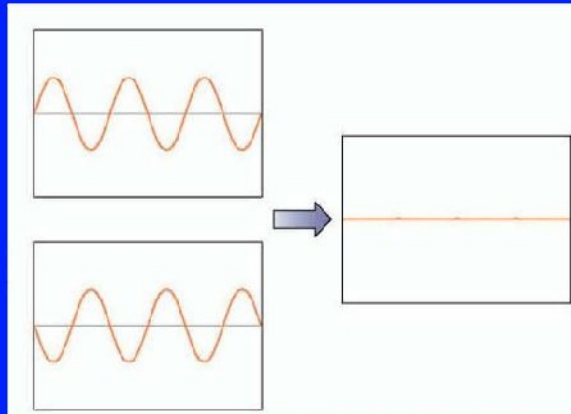
Ottica ondulatoria: interferenza

Massimi e minimi sono conseguenza di interferenza
costruttiva e **distruttiva** tra onde

Due onde possono combinarsi in modo costruttivo e distruttivo



Onde in fase



Onde fuori fase



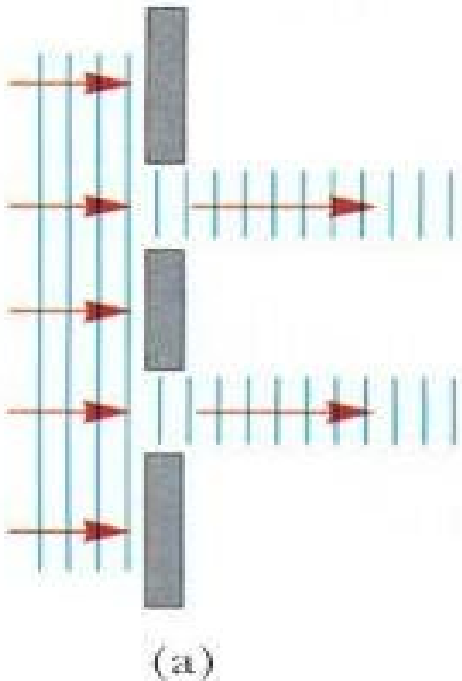
Onde in un liquido

Anche i pattern di **diffrazione** sono in realtà dei fenomeni di **interferenza** tra tante (infinite) sorgenti di onde secondarie

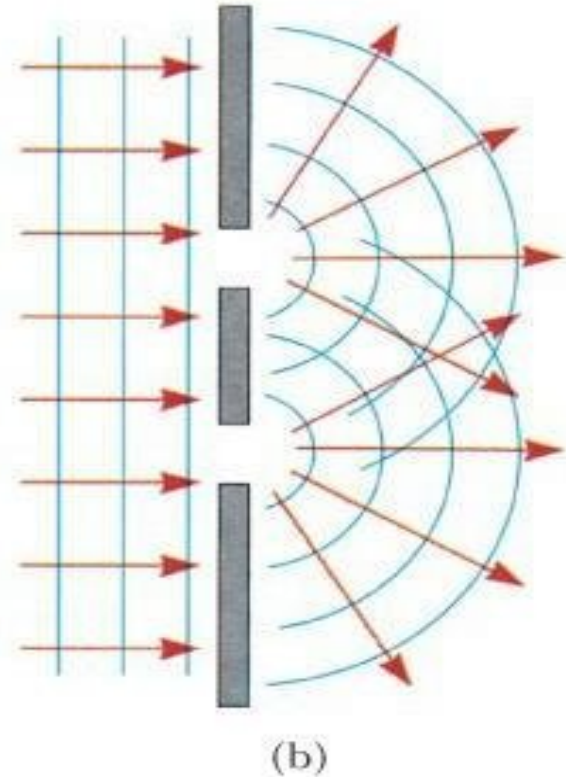
Confronto geometrica / ondulatoria

nell'esperimento delle 2 fenditure

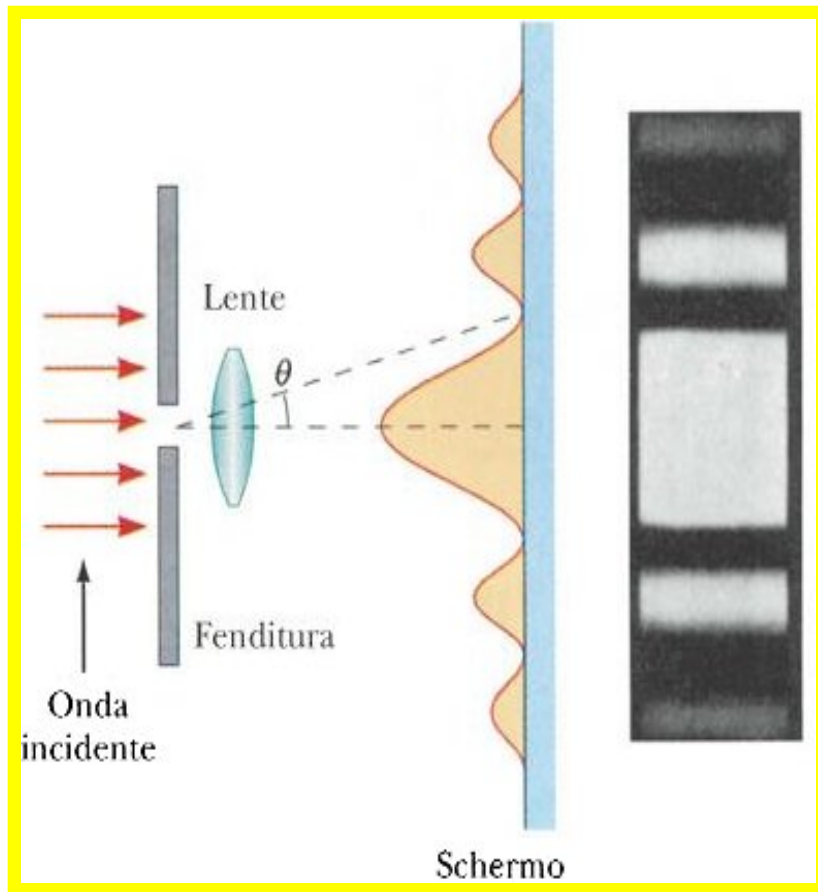
Ottica **geometrica**: raggi che si propagano in maniera rettilinea (approssimazione valida per oggetti/fenditure di dimensioni $\gg \lambda$)



Ottica **ondulatoria**: onde e.m. che si diffondono diffrangendo al di là dell'ostacolo e poi sovrapponendosi con interferenza



Diffrazione da una singola fenditura



- massimo centrale ampio e intensamente luminoso
- massimi secondari più stretti e meno luminosi
- minimi: sono le zone oscure

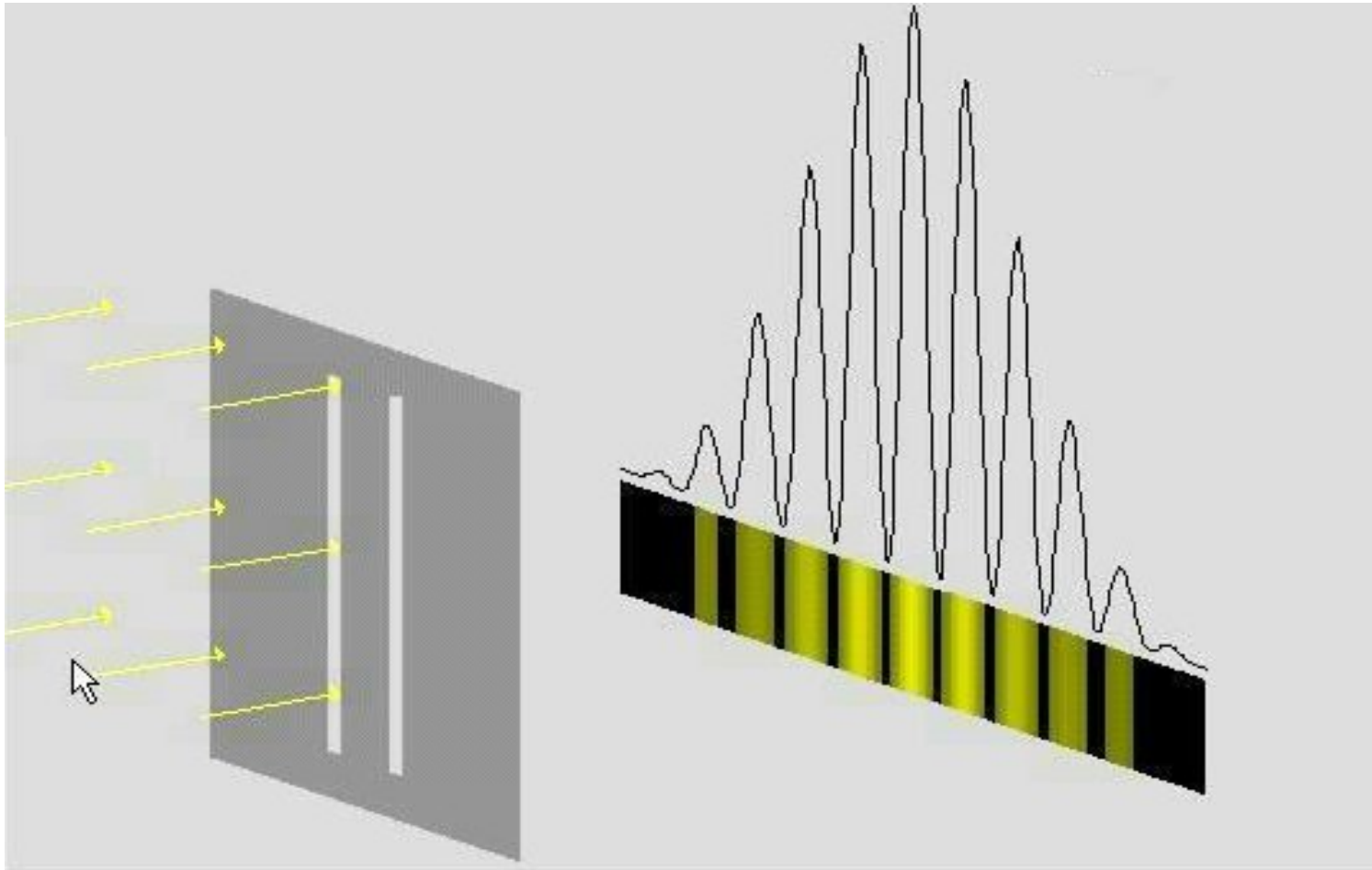
direzioni dei minimi:

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

a = larghezza fenditura

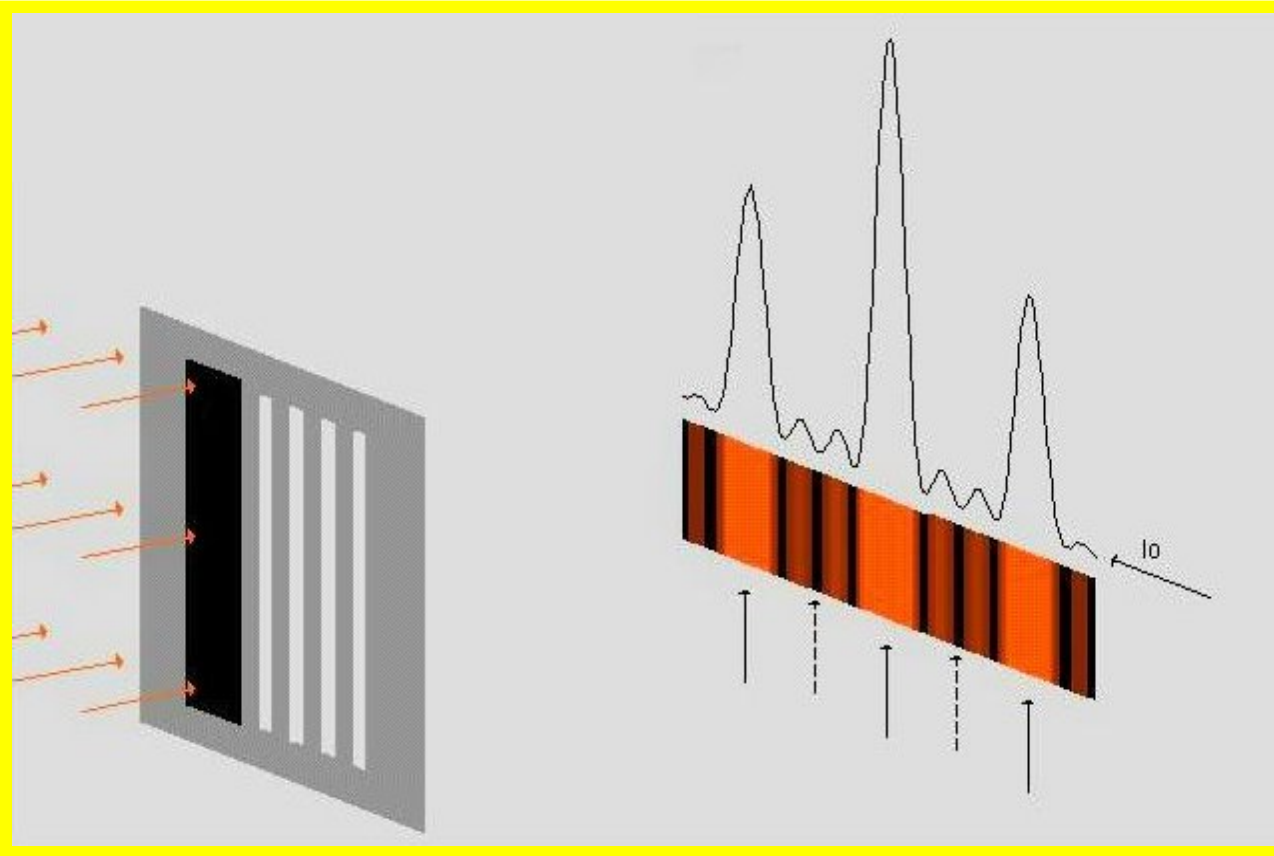
m = ordine dei minimi

Interferenza da doppia fenditura



direzioni dei massimi:
 $d \sin \theta = m \lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Reticolo di diffrazione = N fenditure



Rispetto alle due fenditure:

- le frange luminose diventano **molto** più strette e **moltissimo** più intense
- massimi secondari **molto** più sfumati
- **molto** = N volte, con $N = \#$ fenditure
- **moltissimo** = N^2 volte

direzioni dei massimi:

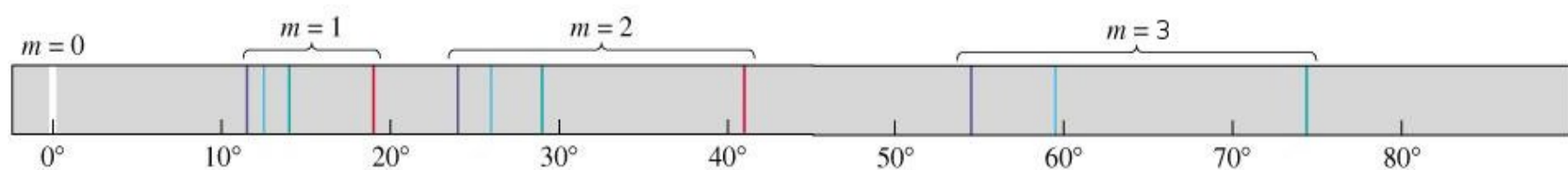
$$d \sin \theta = m \lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

d = distanza tra fenditure successive

m = ordine di diffrazione

Il reticolo di diffrazione si utilizza per separare diverse λ (monocromatore)

$$d \sin \theta = m \lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$



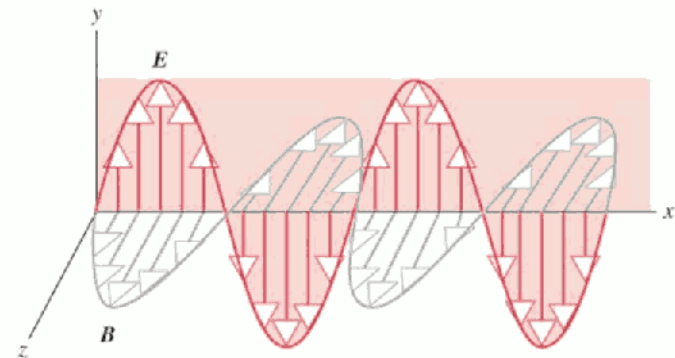
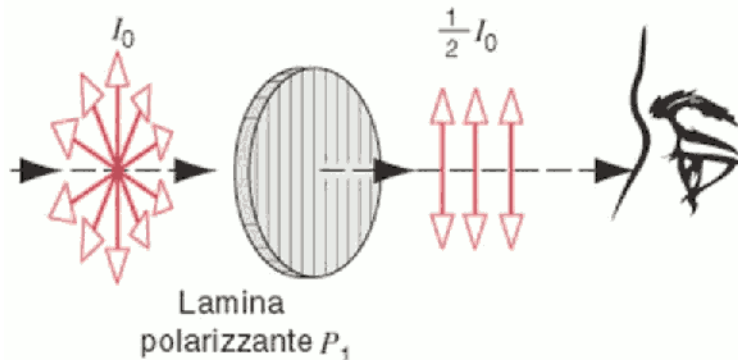
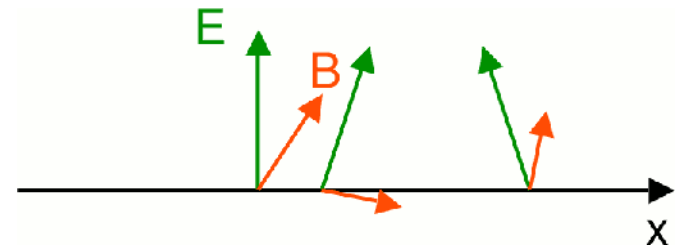
per $m = 0$ banda
bianca a $\theta = 0$

per $m > 0$ diverse λ
sono inviate a θ diversi

Funziona come e molto **meglio di un prisma** per **disperdere** la luce di diversi colori in diverse direzioni

Ottica geometrica & ondulatoria: **polarizzazione**

Il campo **E** (anche **B**) è normale alla direzione di propagazione, ma, di solito non ha una direzione specifica.

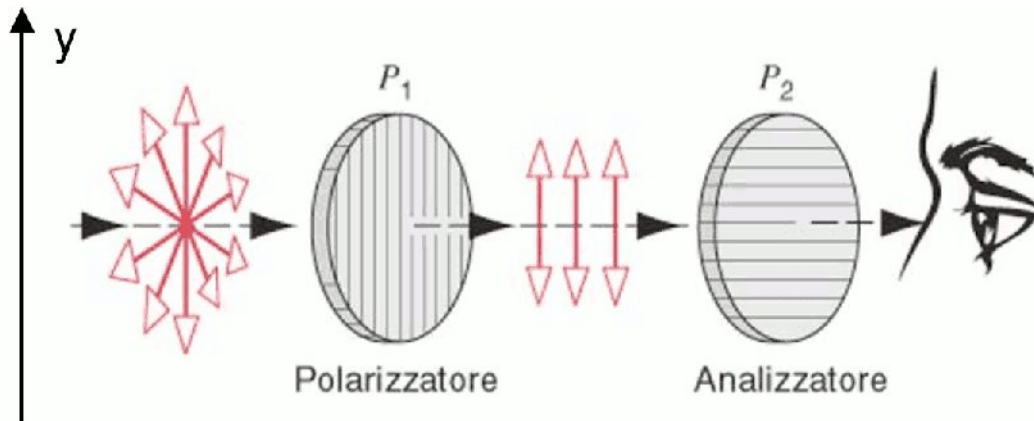
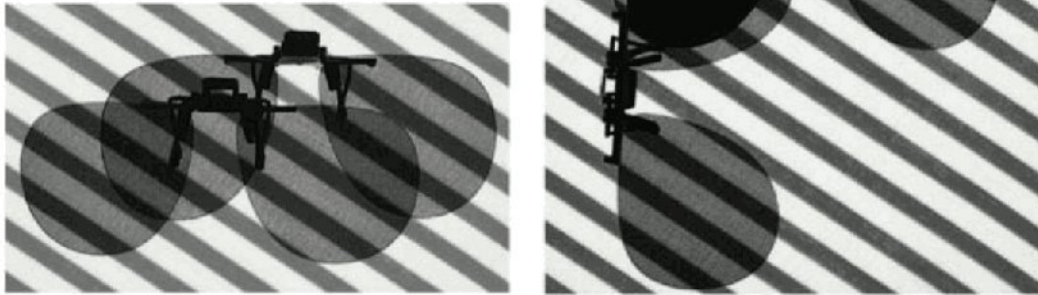


polarizzazione rettilinea

Esistono opportuni congegni (lenti Polaroid) in grado di polarizzare la luce, cioè di filtrare la sola componente del campo elettrico diretta in una data direzione, sopprimendo la componente perpendicolare

Polarizzatori (polariod)

Lenti polarizzanti:



Gli occhiali da sole con lente polarizzante attenuano i riflessi (spesso la luce riflessa è polarizzata)

Legge di Malus:

il campo \mathbf{E} che filtra tra 2 polaroid con asse ad angolo reciproco θ :

$$\mathbf{E}_y = \mathbf{E}_0 \cos(\theta)$$

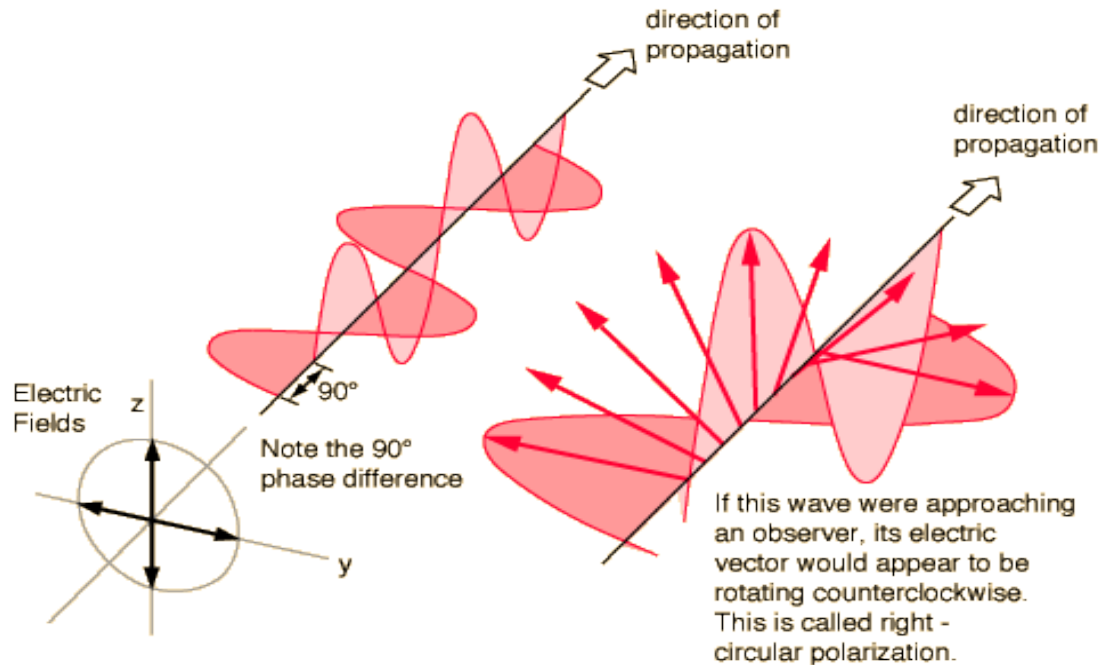
quindi l'intensità:

$$I = I_0 \cos^2(\theta)$$



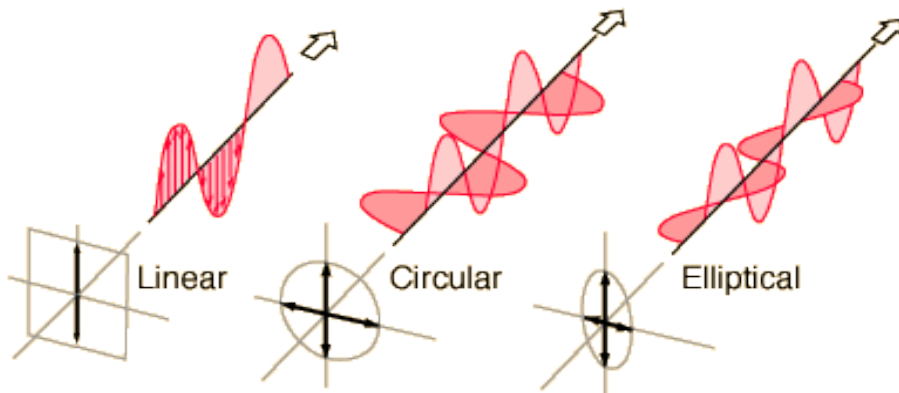
antenna per la ricezione di onde radio polarizzate

Polarizzazione circolare



Due onde uguali polarizzate linearmente in direzioni perpendicolari e sfasate di 90° danno luogo a polarizzazione **circolare**.

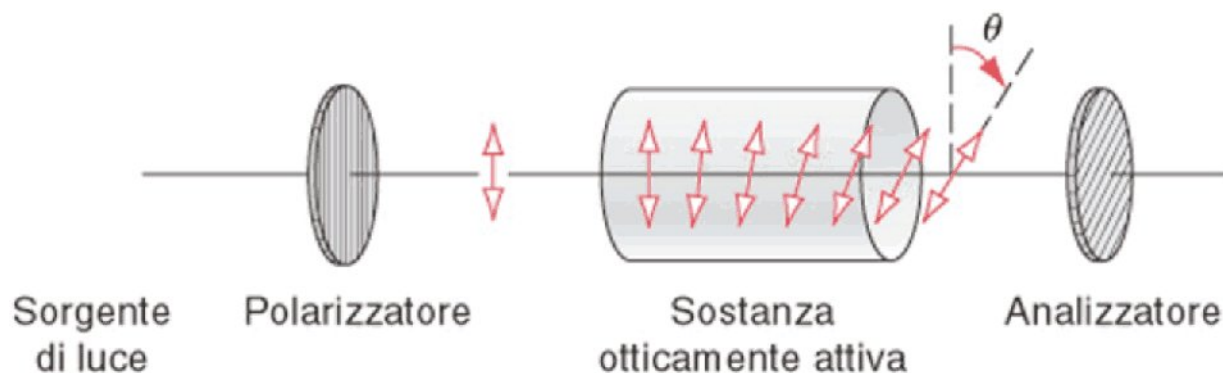
Il vettore che traccia il massimo di **E** ruota nel piano (yz) perpendicolare all'asse di propagazione (x).



Quando le due onde non sono uguali o non sono sfasate di 90° , danno luogo a polarizzazione **ellittica**.

“Attività ottica”

Alcune **sostanze (otticamente attive)** sono in grado di **ruotare il piano di polarizzazione** un fascio di luce polarizzato rettilineamente.



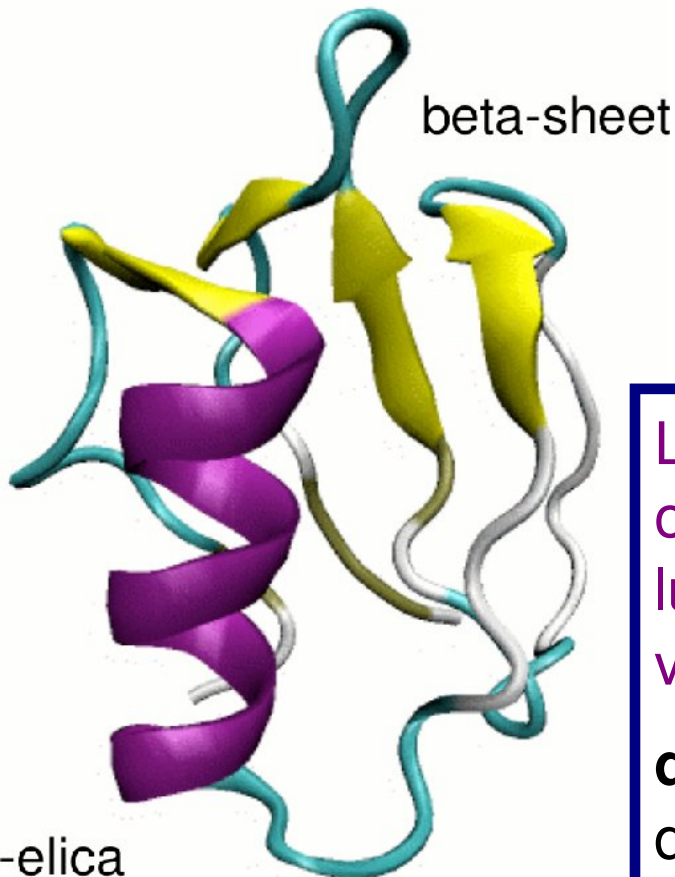
Si può interpretare un fascio con polarizzazione rettilinea come la sovrapposizione di due fasci con polarizzazioni circolari opposte.

In una sostanza otticamente attiva, i due fasci viaggiano con velocità diverse, quindi si sfasano, ruotando il piano di polarizzazione lineare.

L'angolo di rotazione cresce proporzionalmente allo spessore del campione, e dipende anche dalla λ o ν della luce: spettroscopia di "dispersione rotatoria ottica" (o "ORD")

Spettroscopia di dicroismo circolare

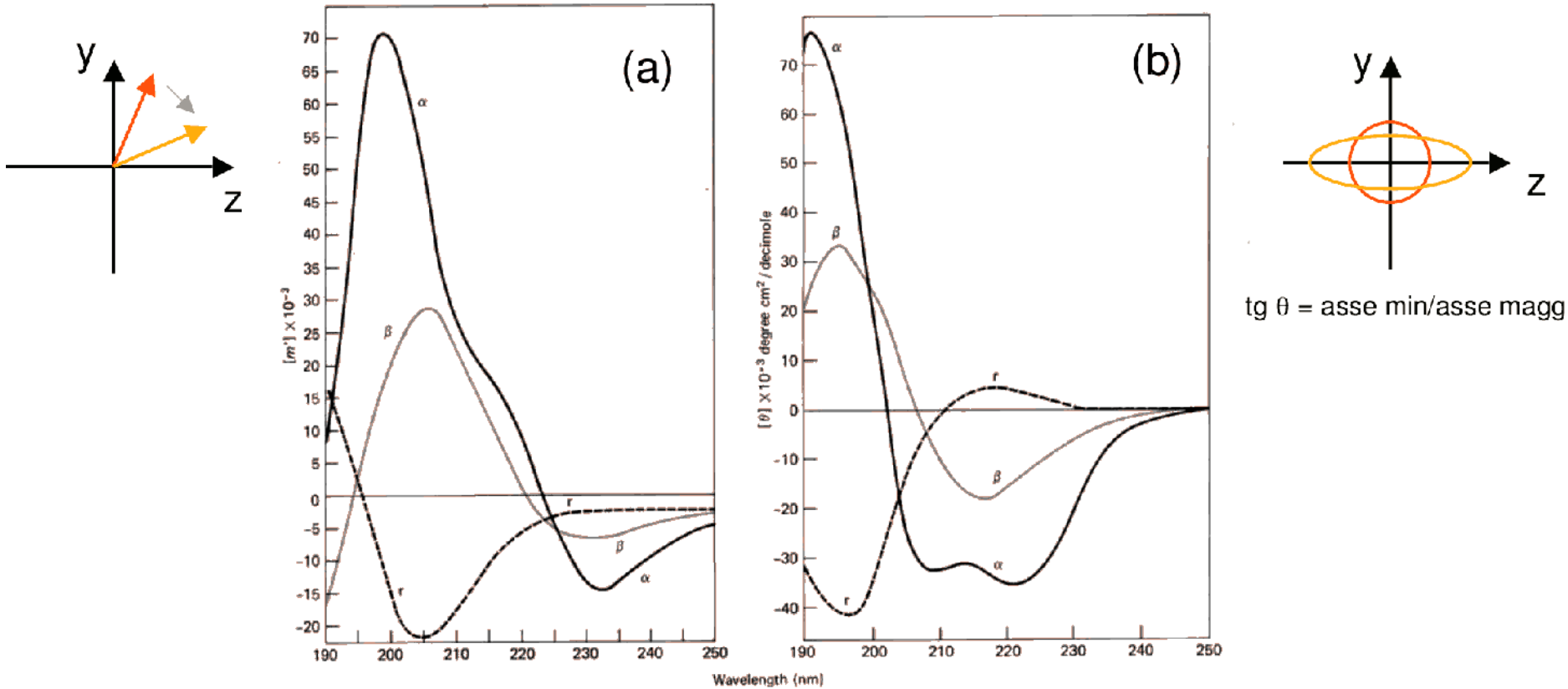
È una tecnica standard per misurare la quantità di **strutture secondarie** in una soluzione di proteine.



Le strutture secondarie delle proteine sono otticamente attive. Se mando un fascio di luce con polarizzazione rettilinea, questa viene ruotata dalle strutture “**avvitate**”.

dicroismo = la luce polarizzata in diverse direzioni viene assorbita in modo diverso

Spettroscopie di dicroismo circolare



(a) ORD: la rotazione della luce polarizzata linearmente da un' α -elica (α), un β -sheet (β) e un random coil (r)

(b) per lo stesso principio, un fascio di luce polarizzata circolarmente viene modificato dalla proteina: la polarizzazione diventa ellittica.