

Fisica per applicazioni di realtà virtuale

Anno Accademico 2022-23

Prof. Matteo Brogi

Dipartimento di Fisica, stanza B3, nuovo edificio

Lezione 22
Ottica ondulatoria

La luce come onda elettromagnetica

Una perturbazione del campo elettrico / magnetico nello spazio

Campo elettrico = forza a distanza (come la gravità)

⇒ **la luce non ha bisogno di un mezzo per propagarsi**

La natura della luce può essere capita in dettaglio studiando l'elettrodinamica e la meccanica quantistica: noi passiamo in rassegna gli effetti misurabili

Se la luce è un'onda, vuol dire che trasporta **energia**?

Sì. L'energia è trasportata in “pacchetti” (fotoni), ciascuno ha energia

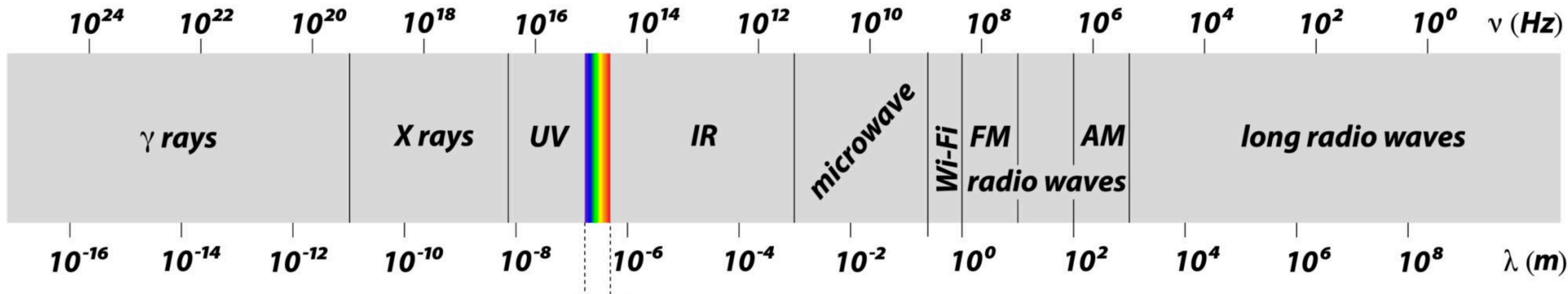
$$E_\gamma = h \frac{c}{\lambda} = hf$$

La costante h : costante di Planck

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

Lo spettro elettromagnetico oltre la luce visibile

Spazia ordini di grandezza in frequenza / lunghezza d'onda

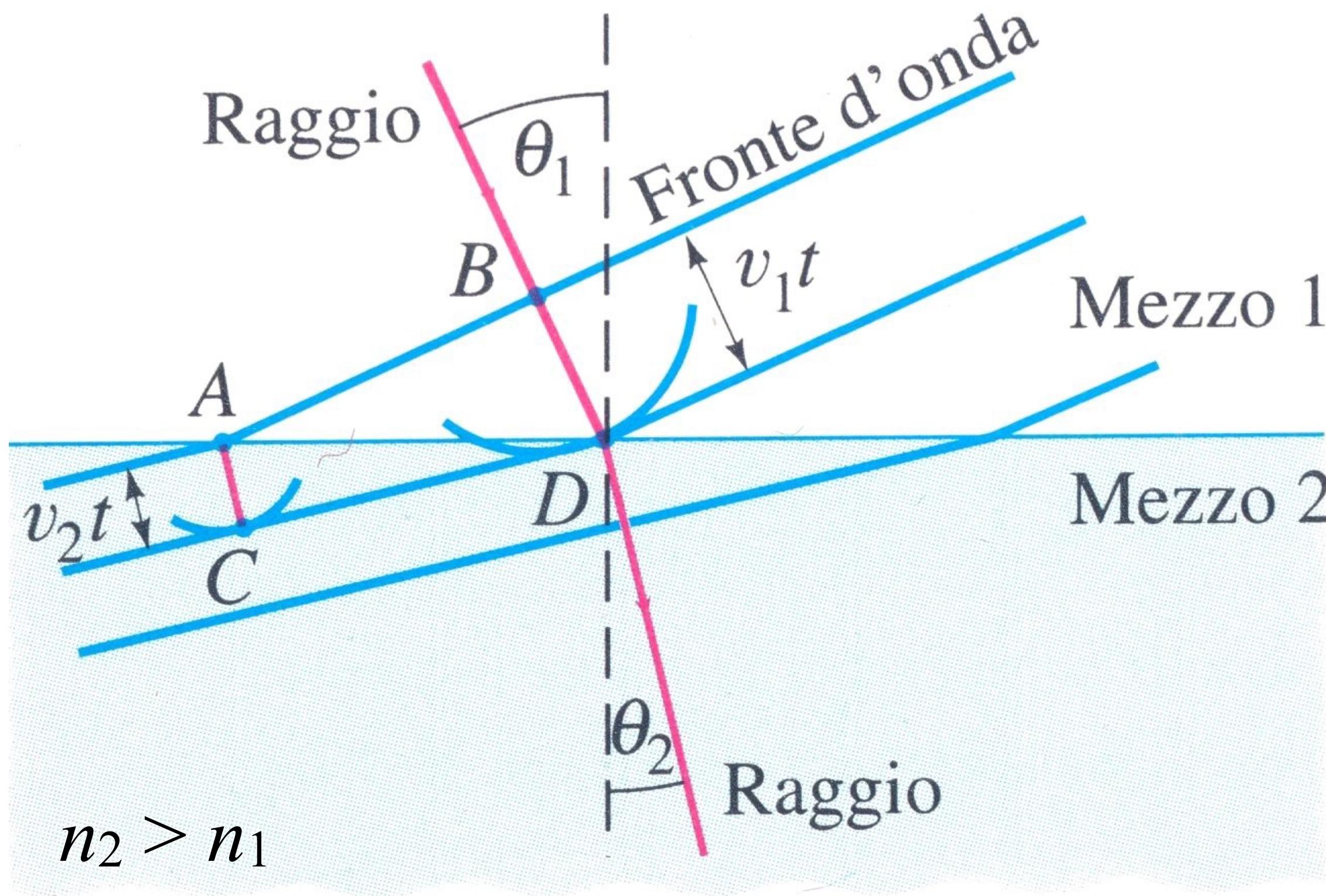


*La luce è un flusso di fotoni con energia proporzionale alla frequenza
⇒ raggi X/gamma sono molto più energetici delle onde radio*

*L'ottica si occupa della parte **visibile** dello spettro
(approx. 400-700 nm, 1 nm = 10^{-9} m)*

*Nella nostra trattazione useremo il modello a fronti d'onda
scordandoci per lo più della natura “discreta” (fotoni) della luce*

Rifrazione e principio di Huygens



$$\sin \theta_1 = \frac{BD}{AD} = \frac{v_1 t}{AD}$$

$$\sin \theta_2 = \frac{AC}{AD} = \frac{v_2 t}{AD}$$

Cambio di mezzo

n aumenta $\Rightarrow v$ scende

Fronte d'onda AB:

punto B percorre $BD = v_1 t$
punto A percorre $AC = v_2 t$

Nuovo fronte d'onda CD

Deve essere tangente ai fronti generati in A e B

Raggi perpendicolari al fronte

\Rightarrow i **raggi** devono “piegarsi”

Identifico $\theta_1 = \angle BAD$ e $\theta_2 = \angle ADC$

e li scrivo come rapporti tra lati di triangoli rettangoli

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{c/n_1}{n_2/c} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{Legge di Snell}$$

La rifrazione cambia λ , non f

La frequenza di oscillazione è determinata dalla sorgente dell'onda

Distanza tra fronti d'onda = λ : si può legare alla velocità come

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1 T}{v_2 T} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Se il mezzo 1 è il vuoto: $\lambda = n\lambda_n$

La frequenza: numero di fronti d'onda contati nell'unità di tempo

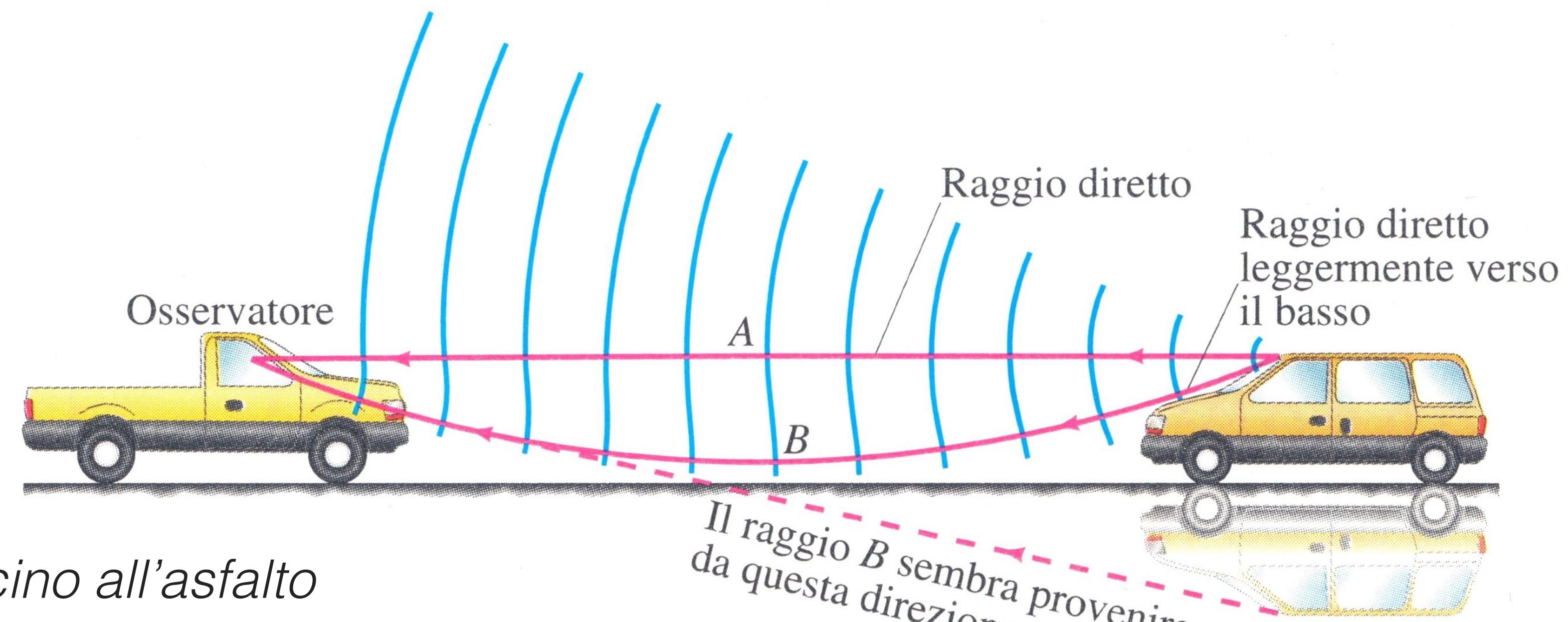
$$f_n = \frac{v_n}{\lambda_n} = \frac{c}{n} \frac{n}{\lambda} = \frac{c}{\lambda} = f$$

**Nel passaggio fra mezzi a indice di rifrazione diverso
la frequenza dell'onda resta invariata, la lunghezza d'onda cambia**

Conseguenza della rifrazione: i miraggi

Miraggio come variazione della v del fronte in strati d'aria a n diversi
(causato dalla diversa temperatura)

Miraggio inferiore (il più comune)

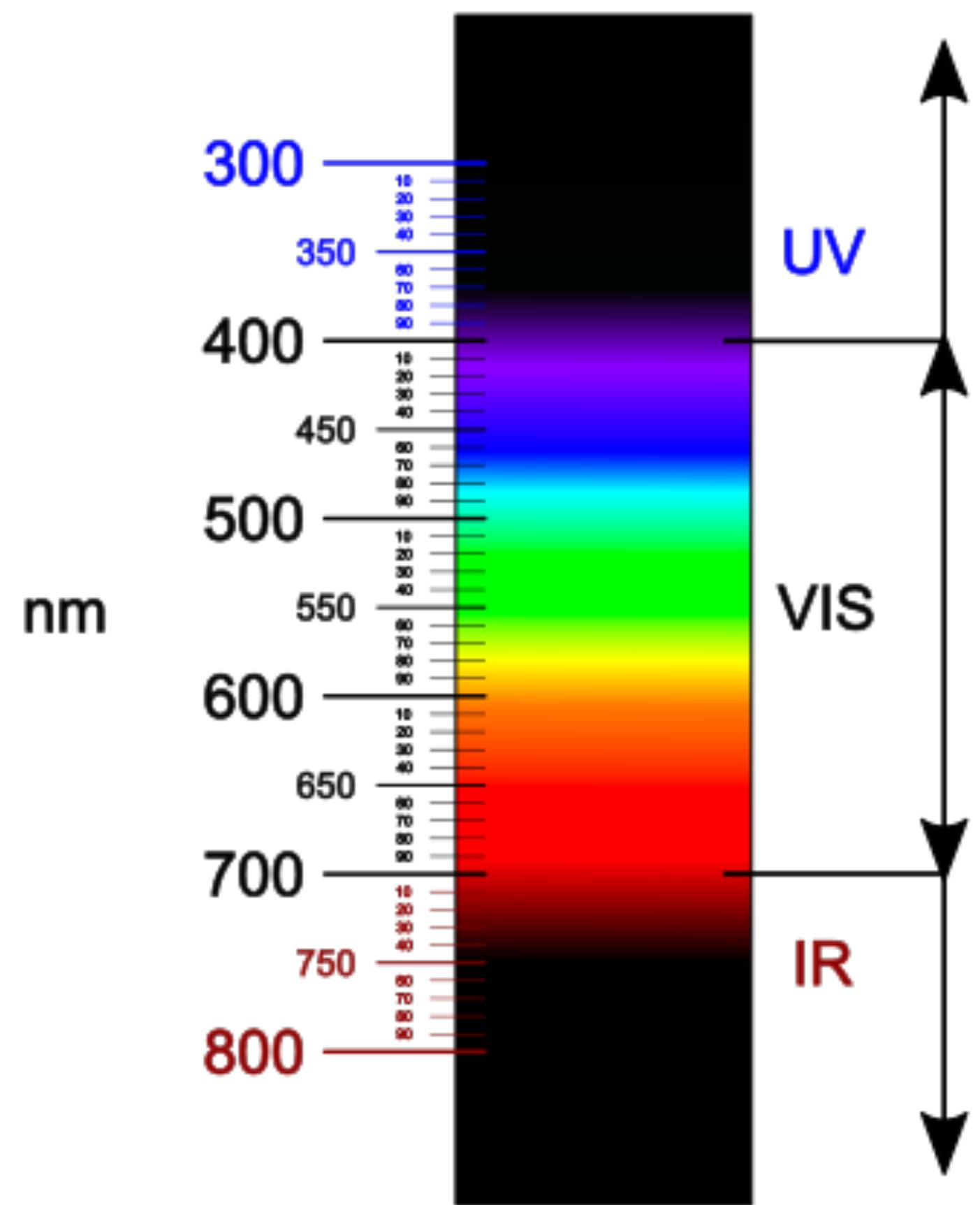


Temperatura: sale vicino all'asfalto
⇒ ***n* scende** ⇒ ***v* sale**

I fronti d'onda sono più spaziati vicino all'asfalto

Per il meccanismo della percezione visiva, un raggio curvo B viene prolungato in linea retta dal cervello ⇒ sembra provenire da sotto la strada

Spettro visibile e nomenclatura



Intensità: energia trasportata per unità di superficie e tempo
(legata al quadrato dell'ampiezza)

Colore: legato alla “percezione” delle λ visibili
violetto: 380-435 nm, verde: 520-565 nm, rosso: 625-740 nm

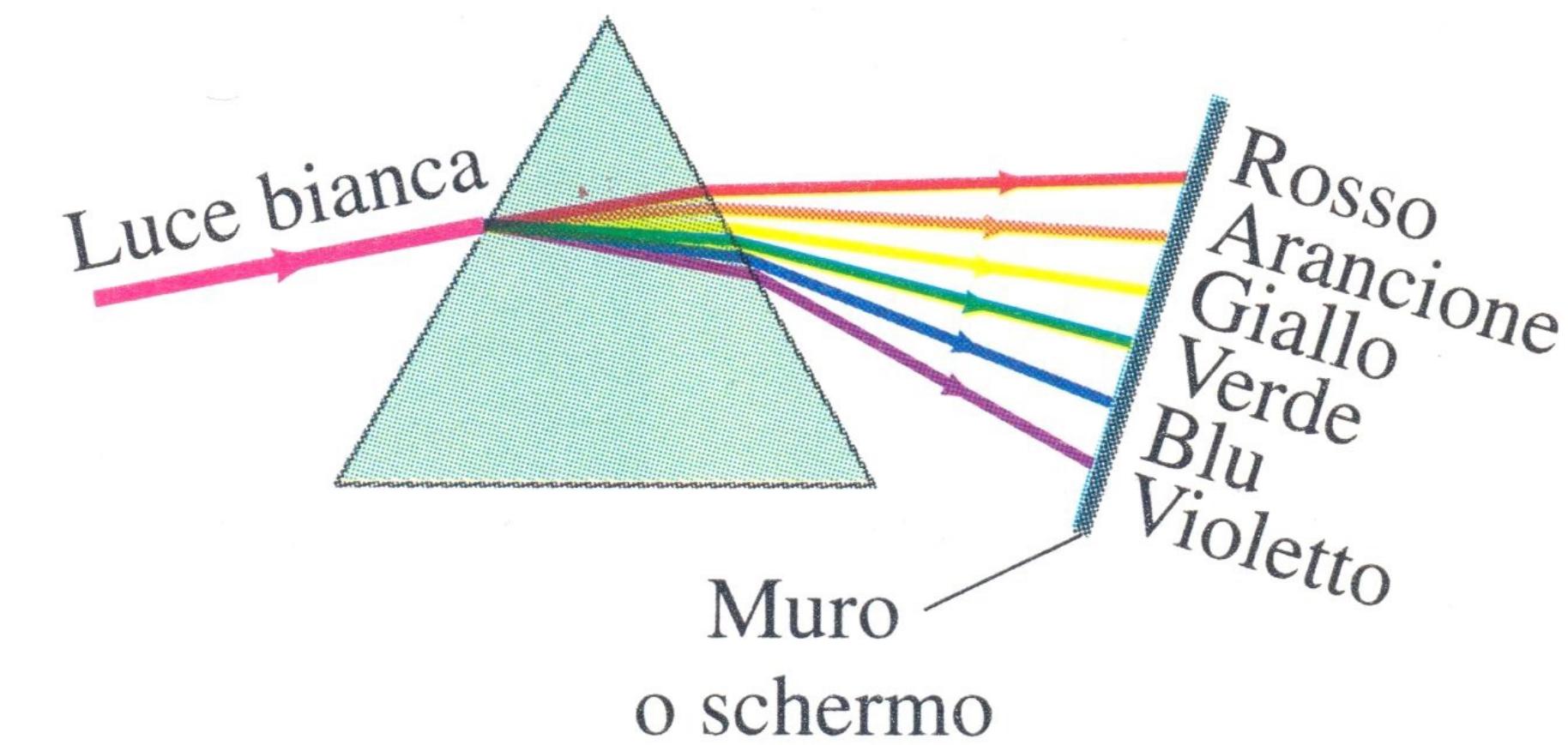
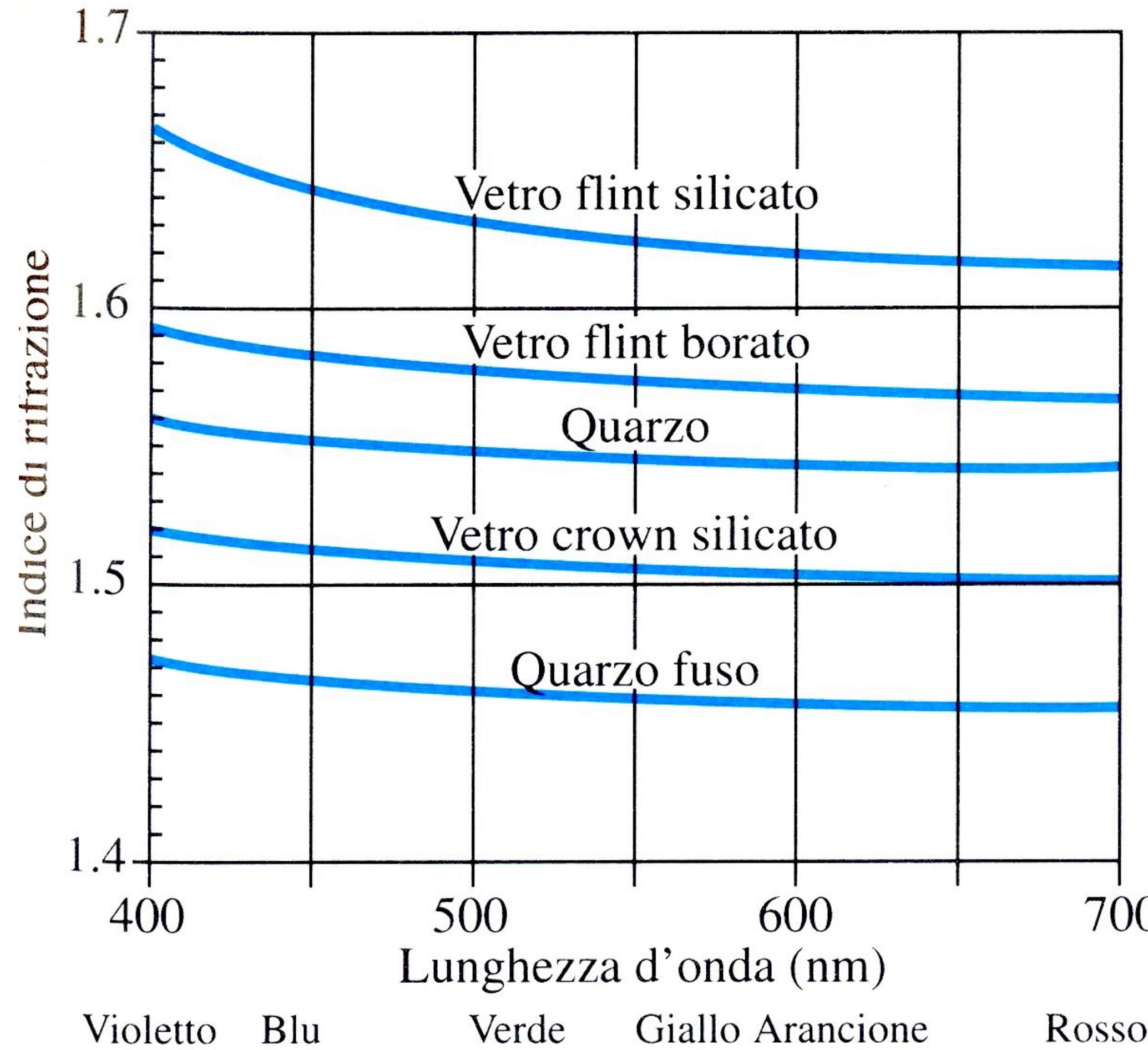
Spettro visibile: legato alla sensibilità dell’occhio umano, ma
generalmente compreso tra 380-750 nm.
Sensori CCD funzionano fino a 1000-1100 \Rightarrow filtro IR

I confini tra VIS e IR (λ maggiori) o UV (λ minori) dipendono dal contesto scientifico

Indice di rifrazione del mezzo: dipende dalla λ !

Dispersione dello spettro visibile

La dipendenza dell'indice di rifrazione dalla lunghezza d'onda cambia l'angolo di rifrazione in un mezzo



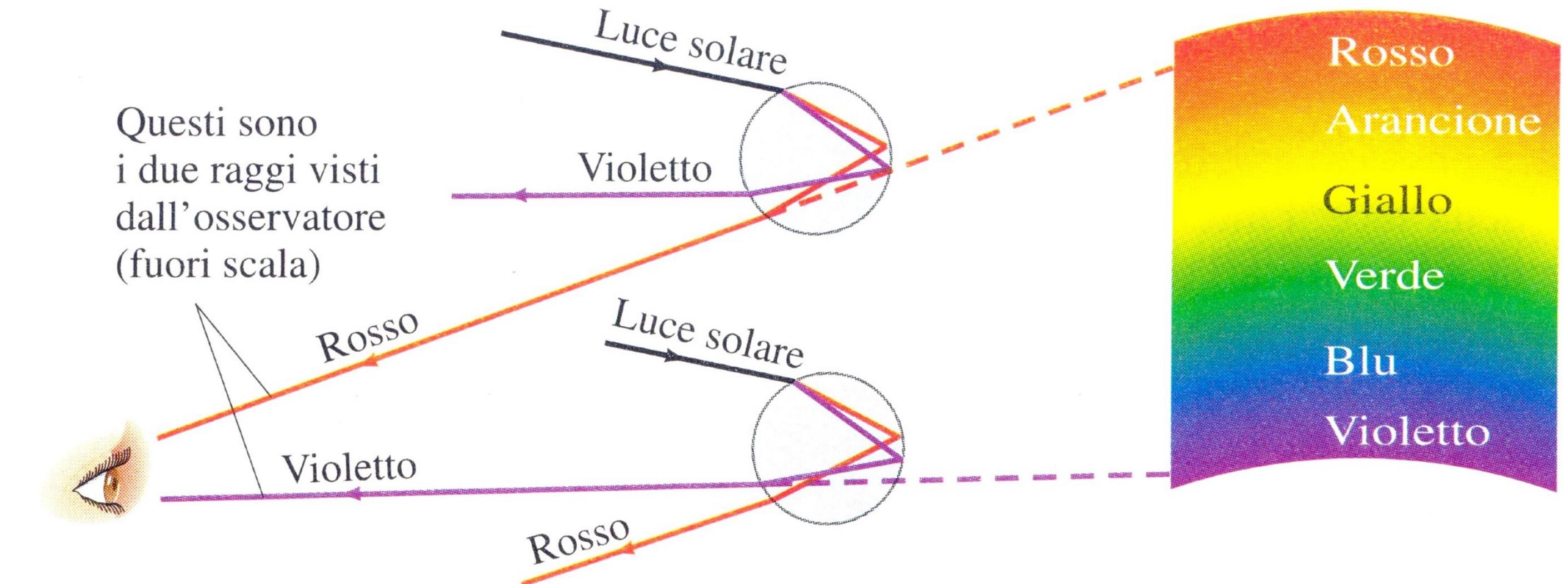
Raggi con λ diversa emergono con direzioni diverse da un prisma: la loro immagine su uno schermo è risolta spazialmente

Il **rosso** subisce la deviazione minore, il **violetto** quella maggiore

Formazione dell'arcobaleno



National Geographic | D. Armstrong

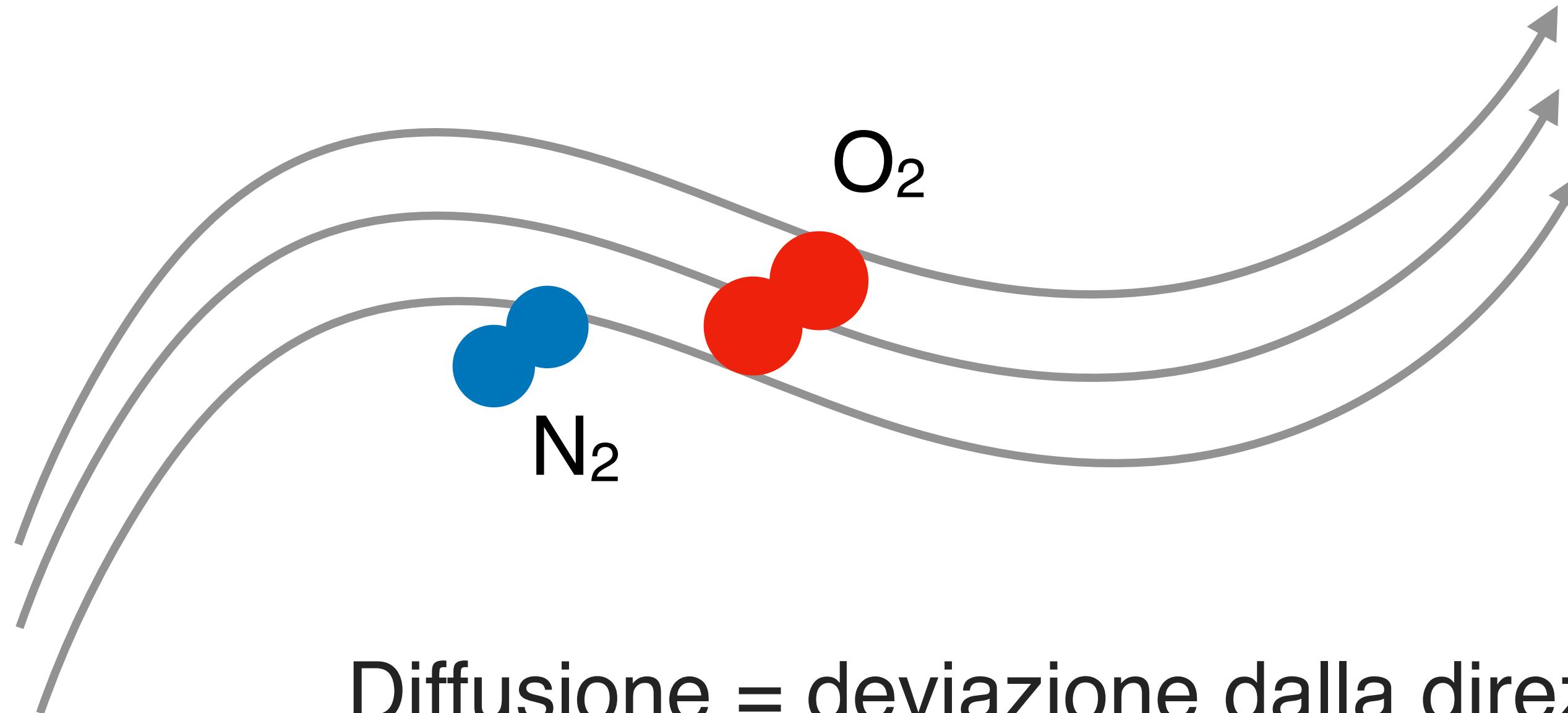


Raggi luminosi provenienti dalle spalle dell'osservatore subiscono una **doppia rifrazione + riflessione** sulla superficie interna della goccia

La diversa **deviazione** dei raggi di colore diverso fa sì che il **rosso** arrivi dalla porzione superiore, il **violetto** da quella inferiore

Rayleigh scattering e colore del cielo sereno

I processi diffusivi (= scattering) dipendono dalla dimensione della particella relativa alla lunghezza d'onda della luce



Rayleigh scattering:

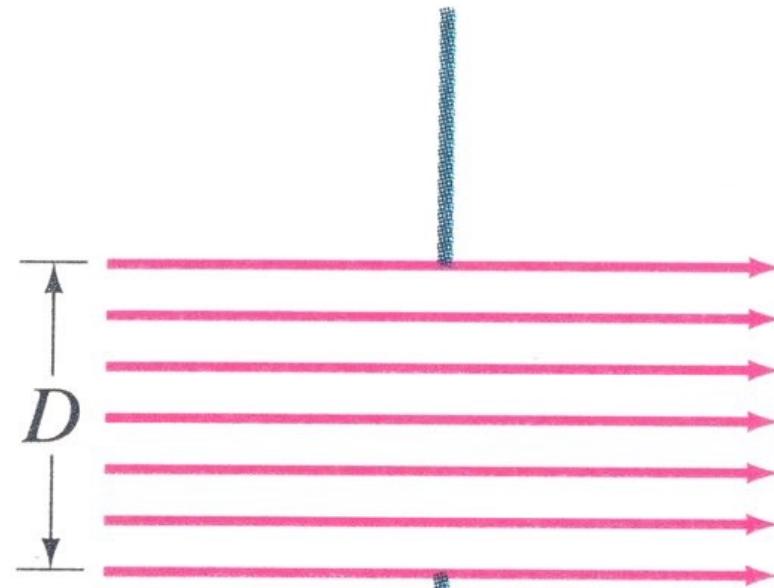
λ luce \gg dimensione molecole
(100s nm vs 0.1-1 nm)
⇒ diffusione proporzionale a $1/\lambda^4$

Diffusione = deviazione dalla direzione originaria: i fotoni blu-violetti subiscono molta più deviazione di quelli rossi, quindi arrivano da tutte le direzioni ⇒ il cielo appare **blu**

Nubi: un cristallo di ghiaccio ha dimensioni $\sim \mu\text{m} \gg$ della lunghezza d'onda
⇒ riflessione speculare classica (indipendente dal colore) ⇒ nubi **bianche**

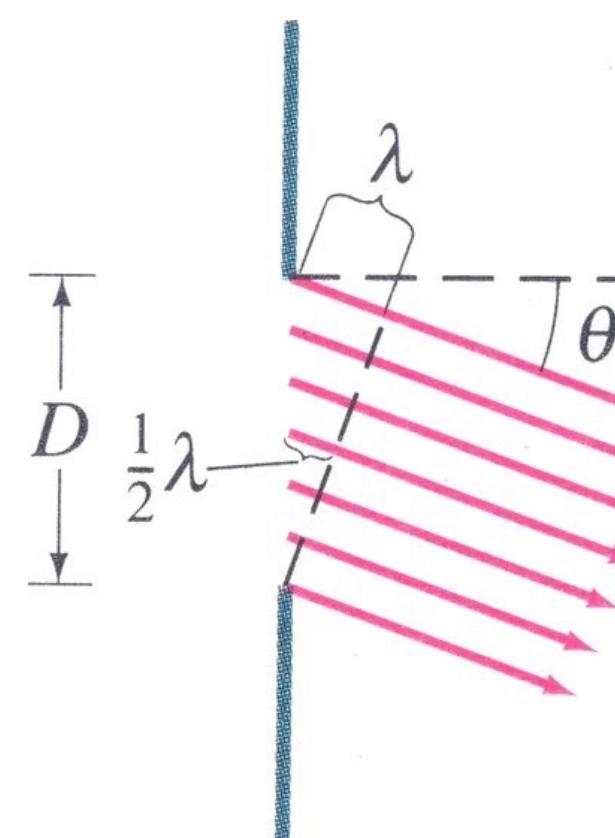
Diffrazione e interferenza da fenditura larga

Larghezza $d \sim$ qualche λ : ogni punto (principio Huygens) produce nuove onde
Onde provenienti da varie parti della fenditura **interferiscono tra loro**



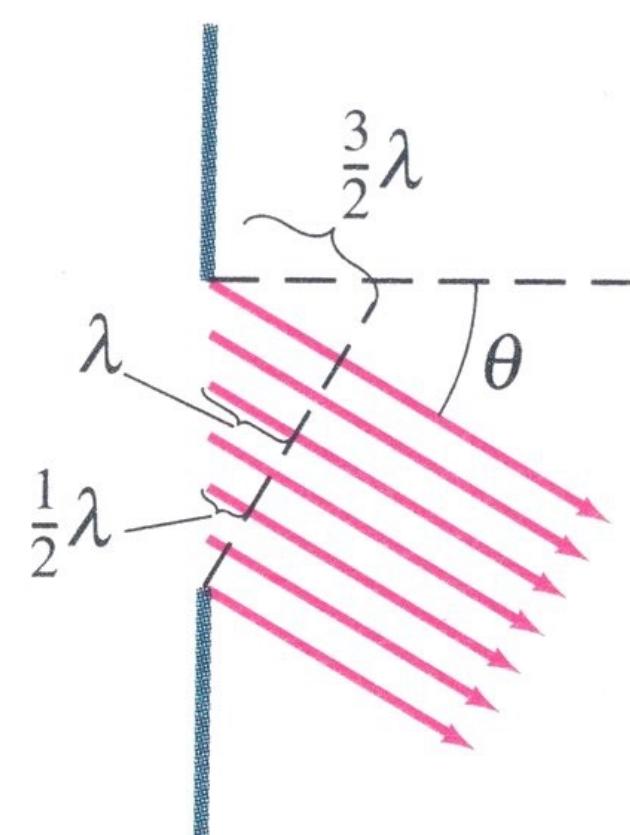
Raggi diritti

Arrivano in fase, producono interferenza costruttiva massima



Raggi inclinati di $\sin\theta = \lambda / D$

Primo e ultimo raggio hanno differenza di cammino = λ
Interferenza distruttiva a coppie di raggi
⇒ minimo di intensità luminosa



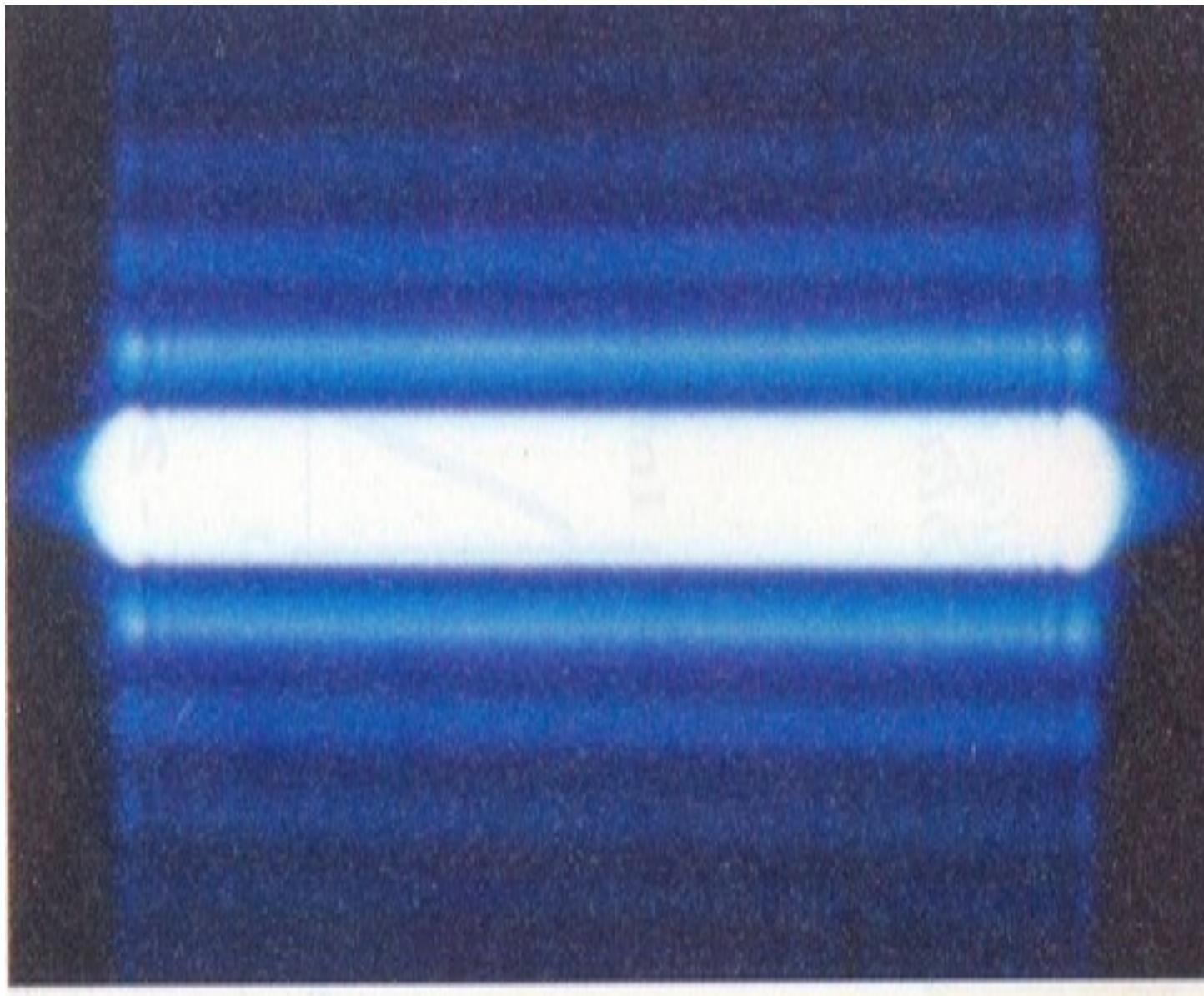
Raggi inclinati di $\sin\theta = 3\lambda / 2D$

Primo e secondo terzo della fenditura fanno interferenza distruttiva
Primo e ultimo terzo fanno interferenza costruttiva
⇒ massimo, ma meno intenso del massimo centrale

Diffrazione e interferenza da fenditura larga

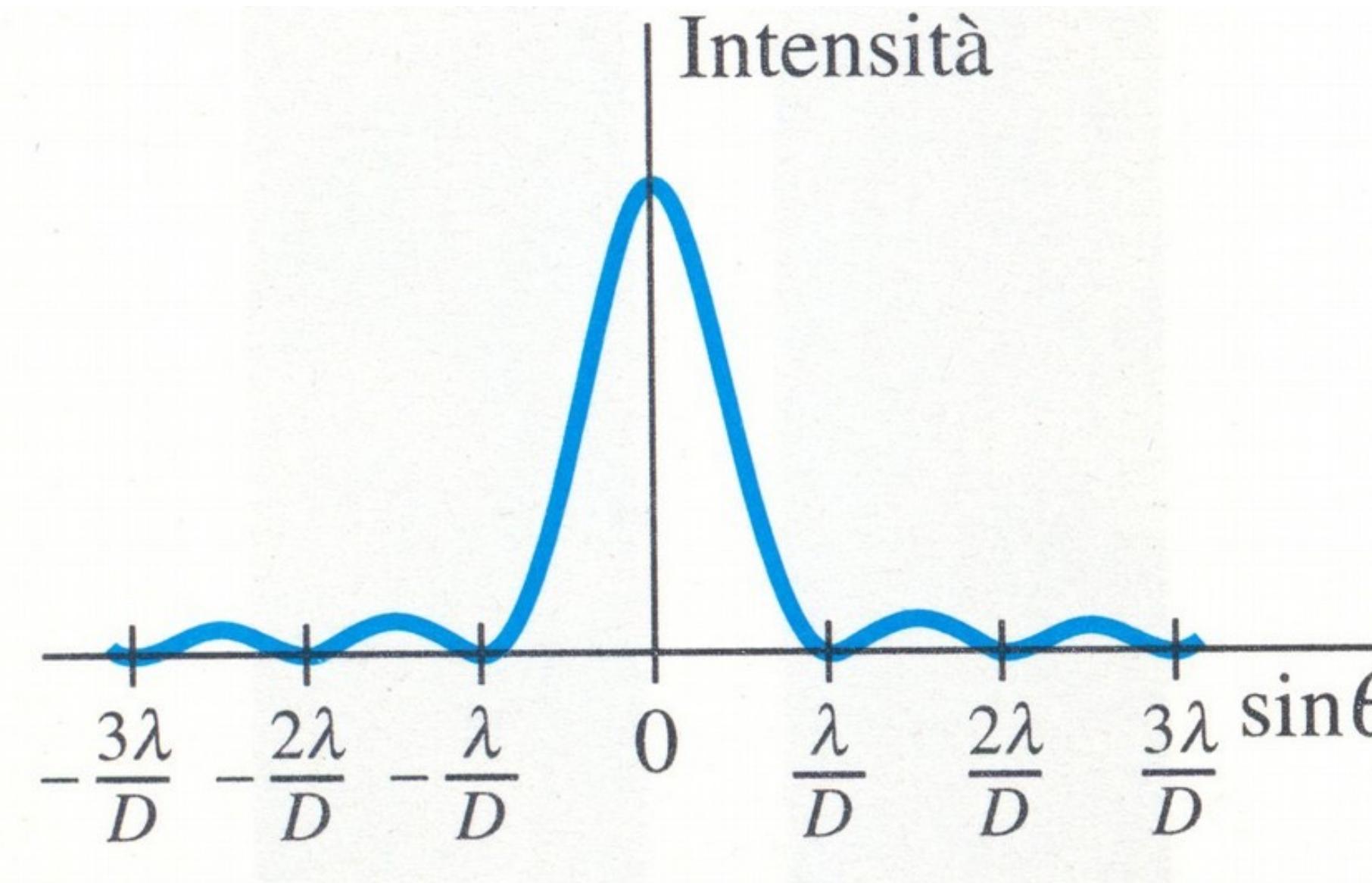
Posizione dei massimi

$$\left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda = D \sin \theta$$



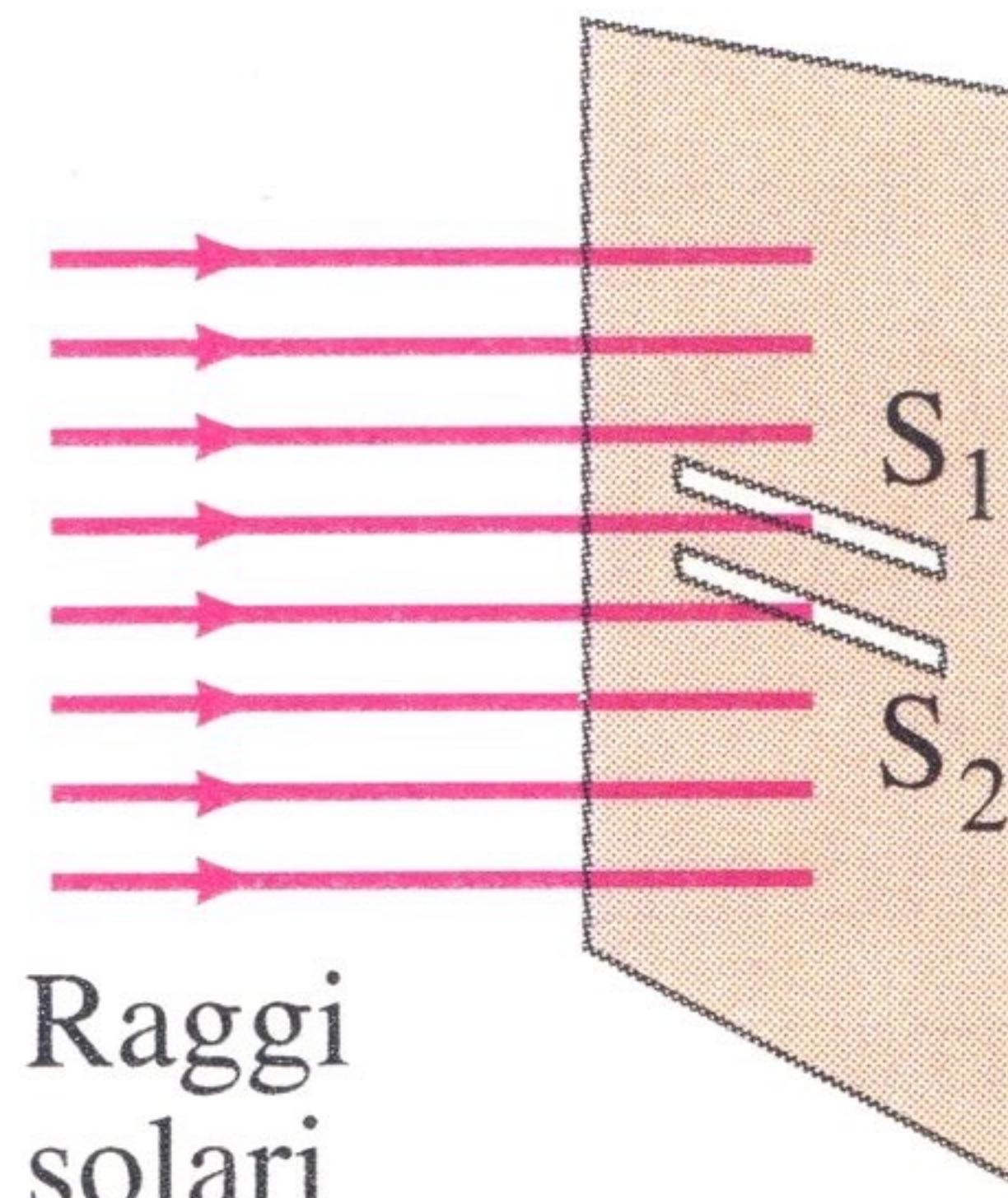
Posizione dei minimi

$$m\lambda = D \sin \theta \quad (m = 1,2,3)$$

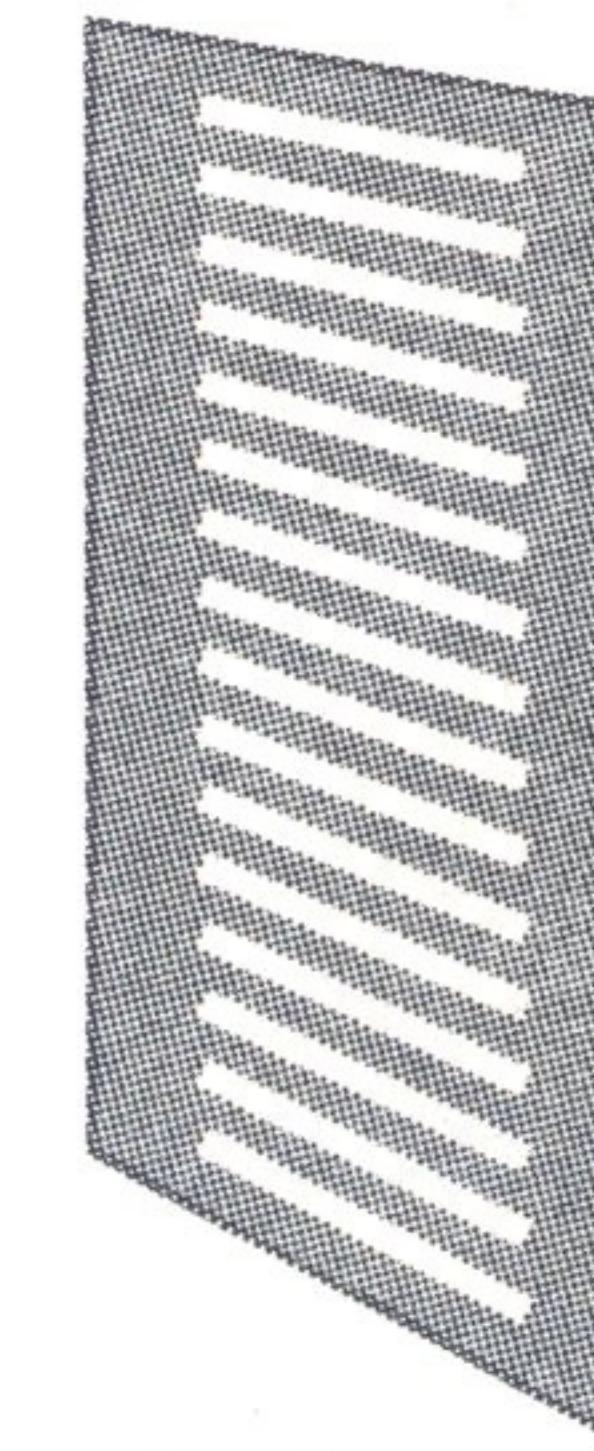


Su uno schermo posto a distanza dalla fenditura si genera una **figura di diffrazione** avente un massimo centrale e massimi secondari laterali separati da bande scure di interferenza distruttiva

Diffrazione e interferenza: la doppia fenditura di Young



Una sorgente di **raggi paralleli** che incide sulla doppia fenditura



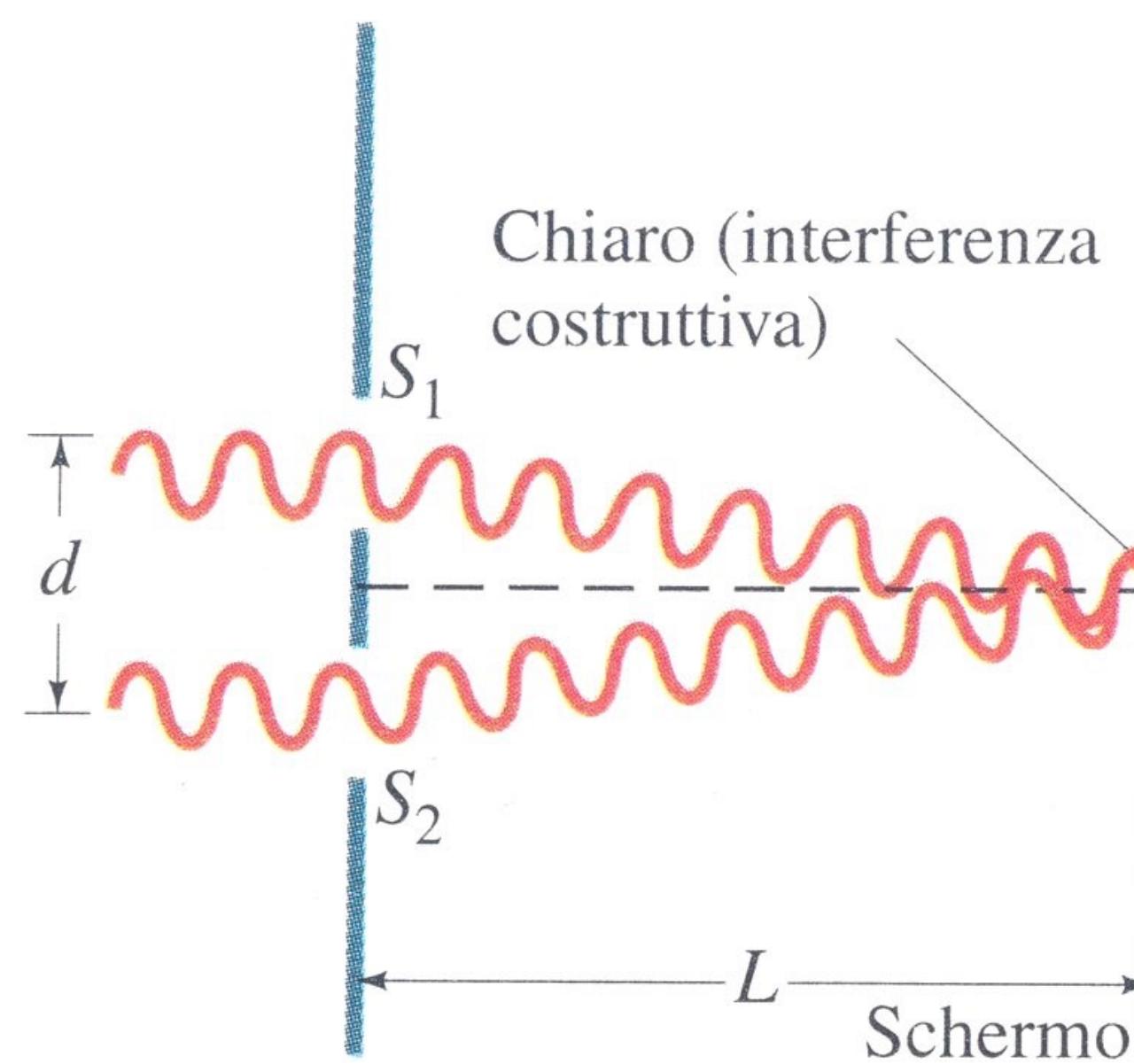
**Schermo
d'osservazione**

Non si osservano solo due strisce ma un pattern di righe luminose parallele dette **frange d'interferenza** (fringes)

Young capì che il fenomeno era dovuto alla natura ondulatoria della luce.

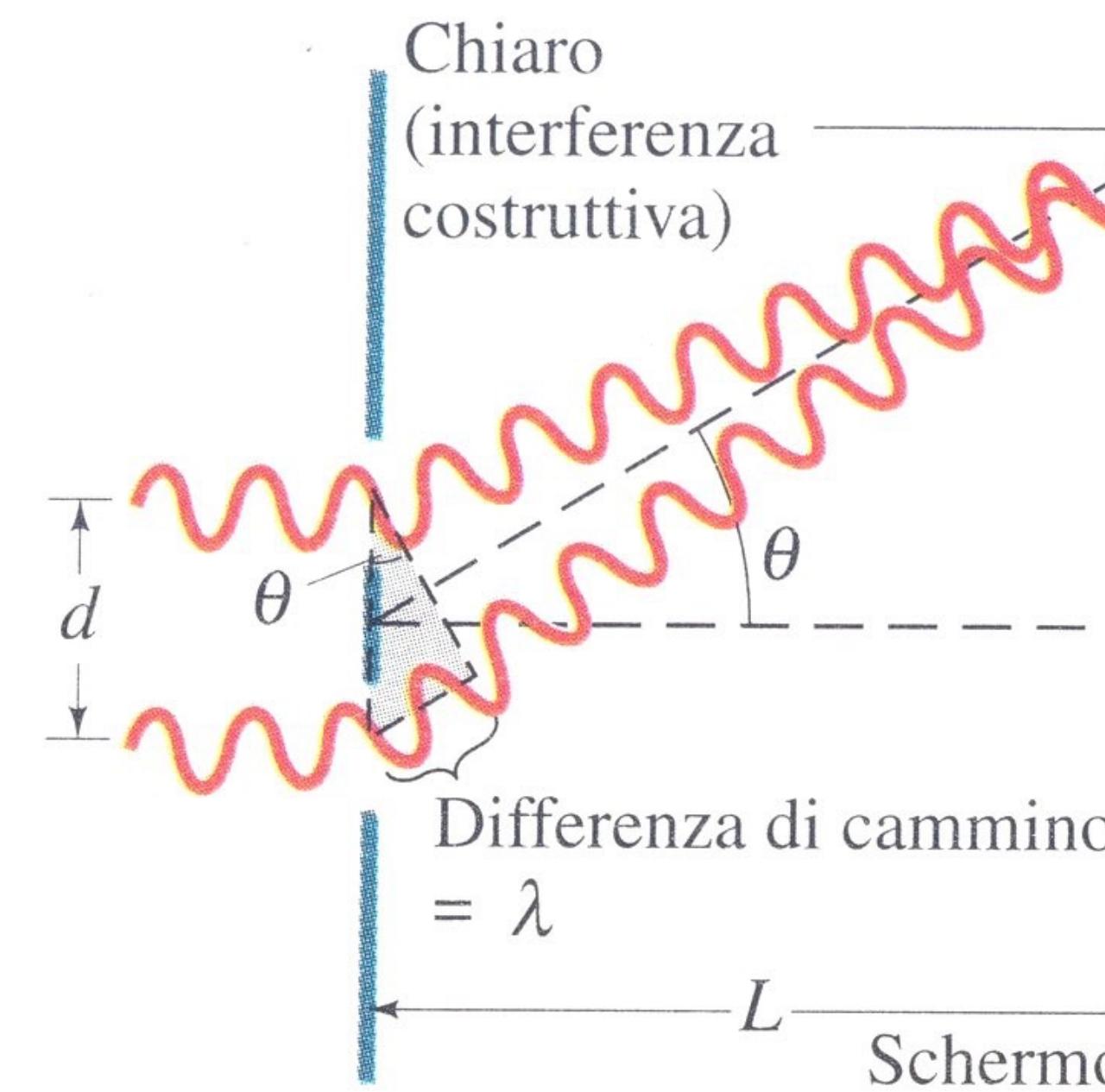
Noi lo analizziamo prima con la luce **monocromatica** (una sola frequenza)

Diffrazione e interferenza: la doppia fenditura di Young

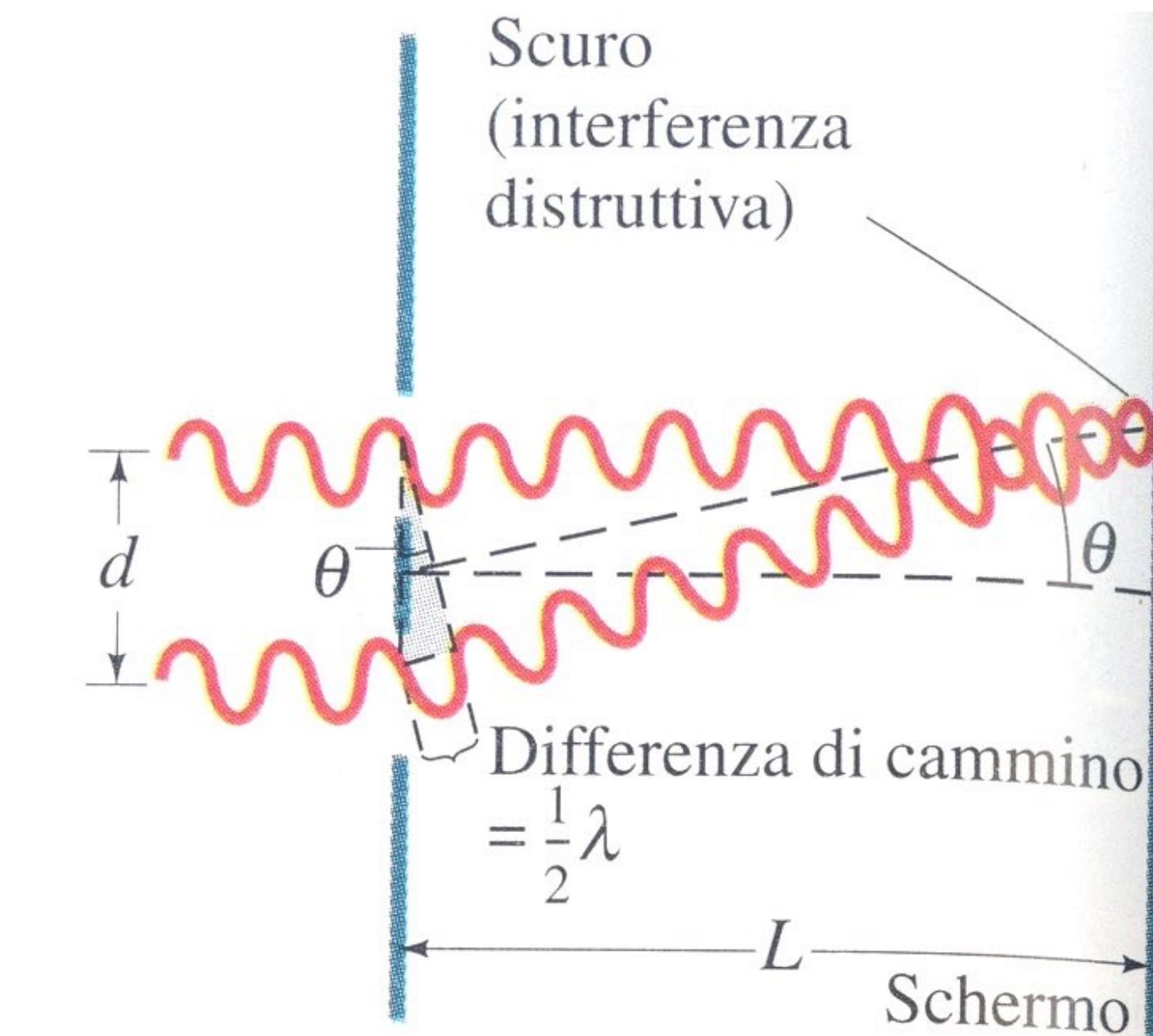


Interferenza costruttiva

Le onde provenienti da S_1 ed S_2 percorrono la stessa distanza per $\theta=0$ e quindi arrivano in fase allo schermo



Per determinati valori di θ , le onde provenienti da S_1 ed S_2 percorrono una differenza di cammino multiplo di λ e quindi arrivano in fase

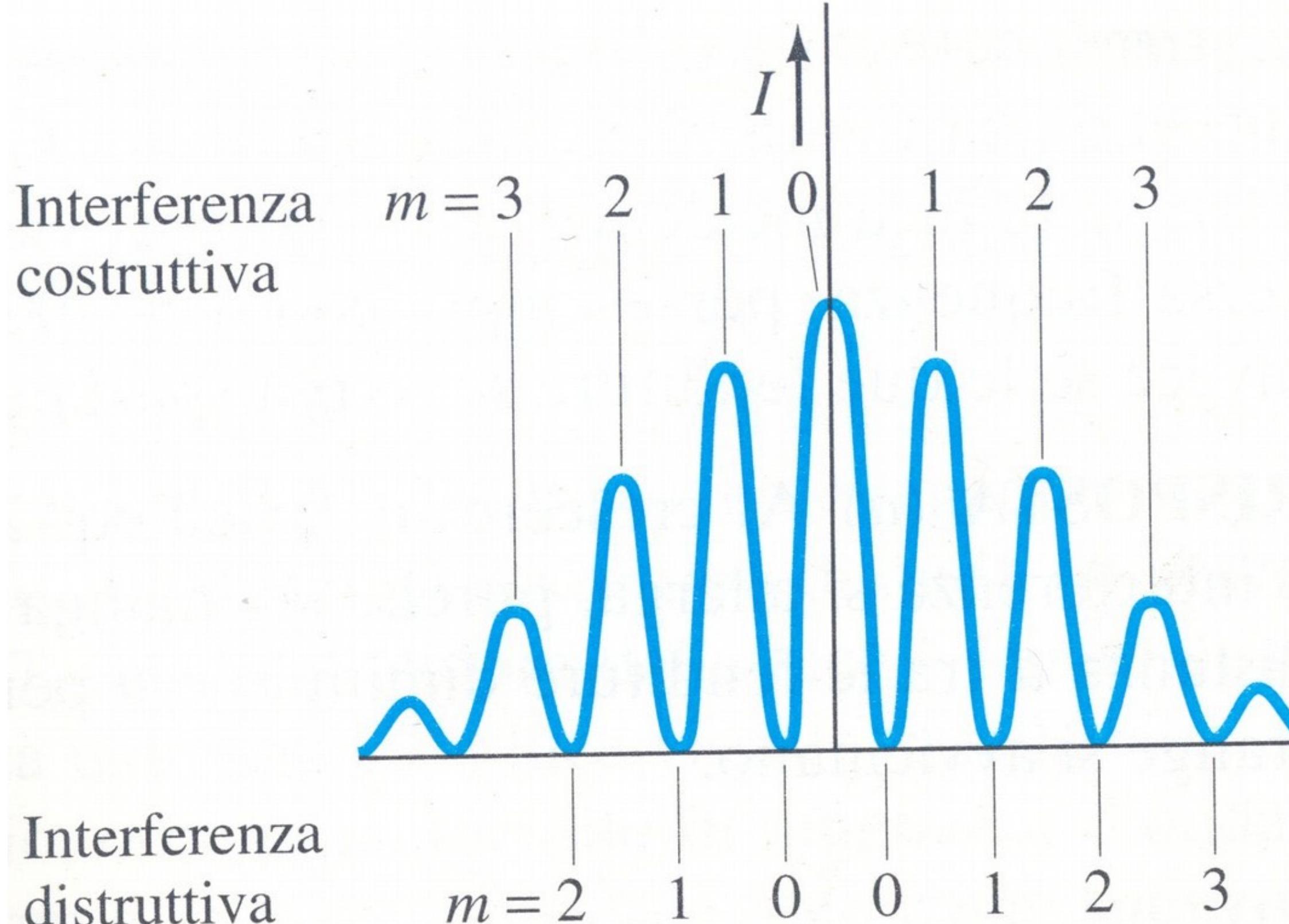


Interferenza distruttiva

Per determinati valori di θ , le onde provenienti da S_1 arrivano con differenza di cammino di $\lambda/2$ e sono sfasate, annullandosi

Diffrazione e interferenza: la doppia fenditura di Young

Risolto con trigonometria assumendo $d \ll L$: differenza di percorso $d \sin\theta$



$$m\lambda = D \sin \theta \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

Il coefficiente **m** è detto **ordine** della frangia d'interferenza

$$\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = D \sin \theta \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

Intensità diminuisce soltanto per l'aumento della distanza fra sorgente e schermo per percorsi laterali (cfr. diffrazione da fenditura)

Esercizi sulla diffrazione

Esercizio 13.01: Luce con $\lambda = 750 \text{ nm}$ passa attraverso una fenditura larga $1 \mu\text{m}$. Quanto è largo il massimo centrale a) in gradi, e b) in cm se lo schermo è posto a 20 cm di distanza?

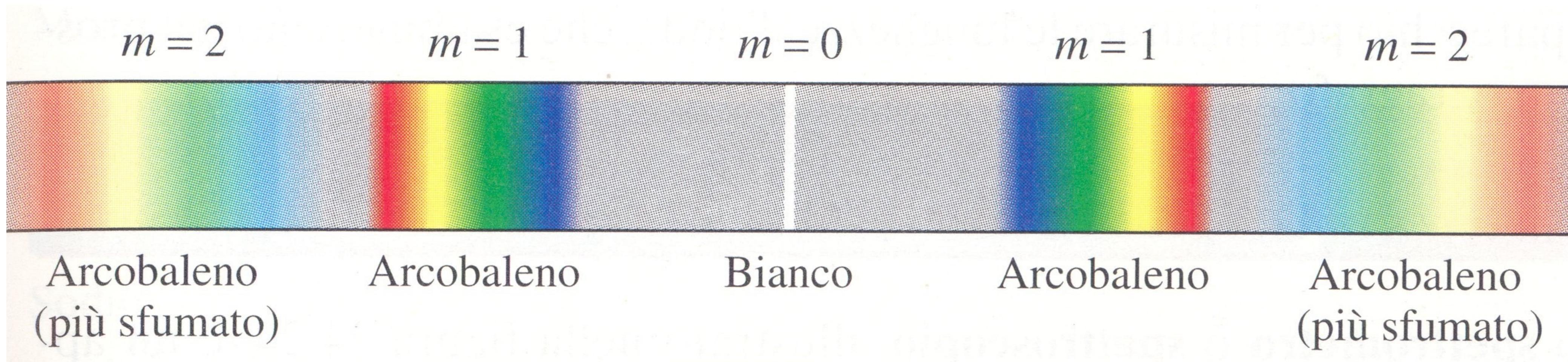
Esercizio 13.02: Un fascio di luce attraversa una fenditura rettangolare con dimensione maggiore orizzontale. In quale direzione si osserverà la diffrazione maggiore? Si applichi il risultato al design di un altoparlante da stadio rettangolare.

Esercizio 13.03: Un supporto opaco con due fessure distanti 0.1 mm tra loro è posto a distanza 1.2 m da uno schermo. Sulle fessure incide la luce proveniente da una sorgente lontana a lunghezza d'onda monocromatica $\lambda = 500 \text{ nm}$. Quale sarà la distanza tra le frange proiettate sullo schermo?

Esercizio 13.04: Una figura d'interferenza è formata da due fessure separate da 0.5 mm e distanti 2.5 cm dallo schermo, attraversata da luce bianca. Le frange d'interferenza mostrano colori separati, con la luce violetta e rossa a 2.0 e 3.5 mm dalla frangia centrale, rispettivamente. Si stimi la λ corrispondente ai due colori.

Diffrazione da doppia apertura e formazione dello spettro

Estensione alla luce bianca: ciascuna frequenza subisce un massimo d'interferenza per un angolo leggermente diverso

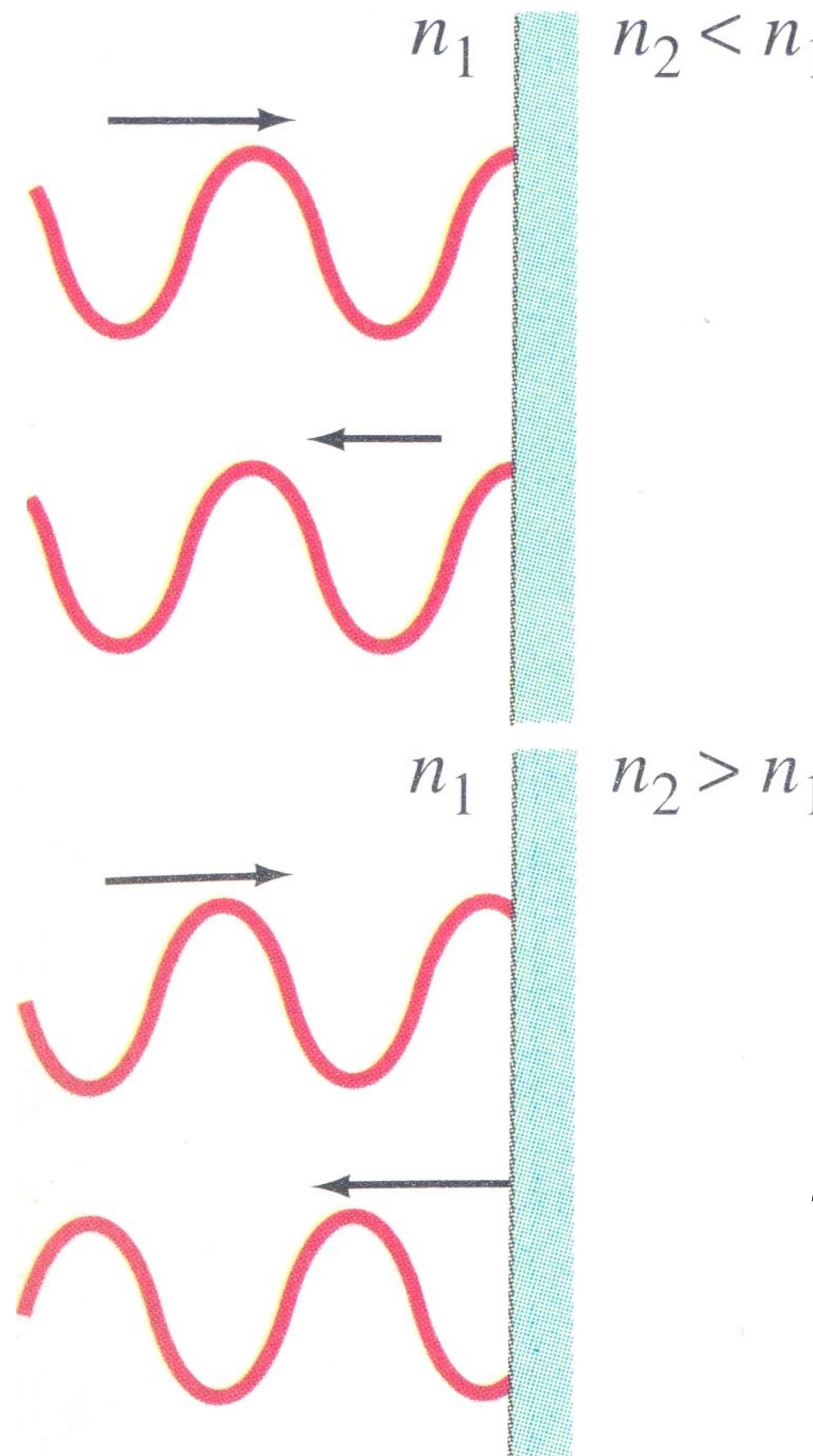


Le λ maggiori (rosso) subiscono la deviazione maggiore, mentre quelle minori (blu/violetto) subiscono la deviazione minore

Inoltre la dispersione aumenta con l'ordine: i colori sono più separati (maggiore risoluzione spettrale) al crescere dell'ordine

Un vero spettrografo usa il reticolo di diffrazione
(molte fenditure parallele) - diffraction grating

Riflessione della luce sull'interfaccia fra due mezzi



Come per le onde meccaniche
parte della luce viene riflessa e parte trasmessa

La fase dell'onda riflessa
dipende dagli indici di rifrazione dei due mezzi

Se l'indice di rifrazione diminuisce
l'onda riflessa è in fase

Se l'indice di rifrazione aumenta
l'onda riflessa è sfasata di π

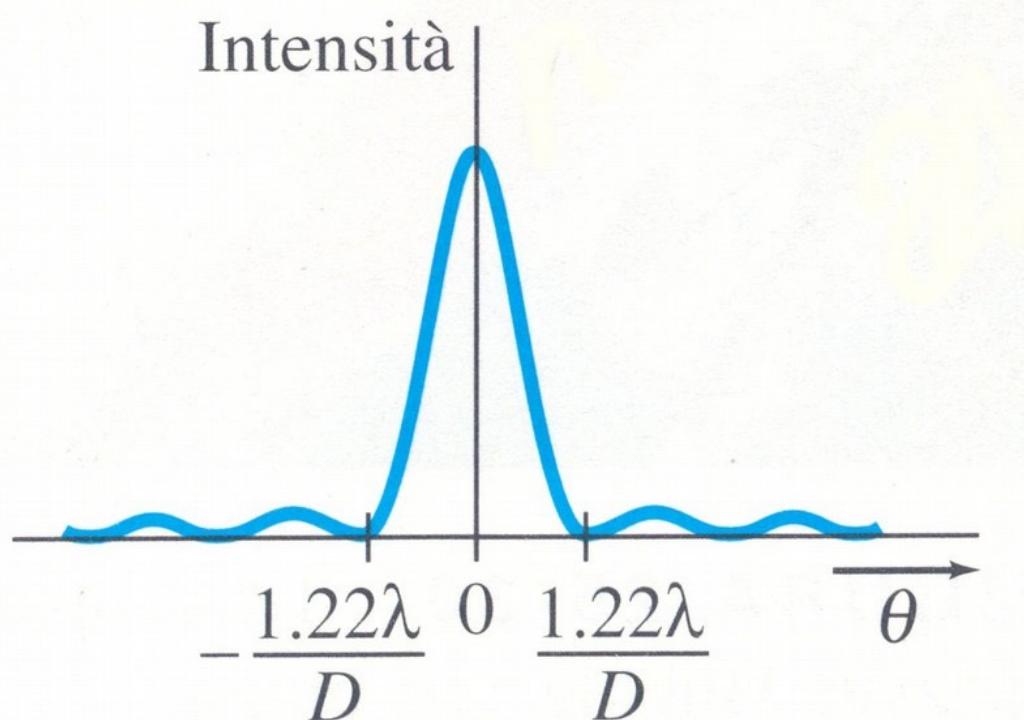
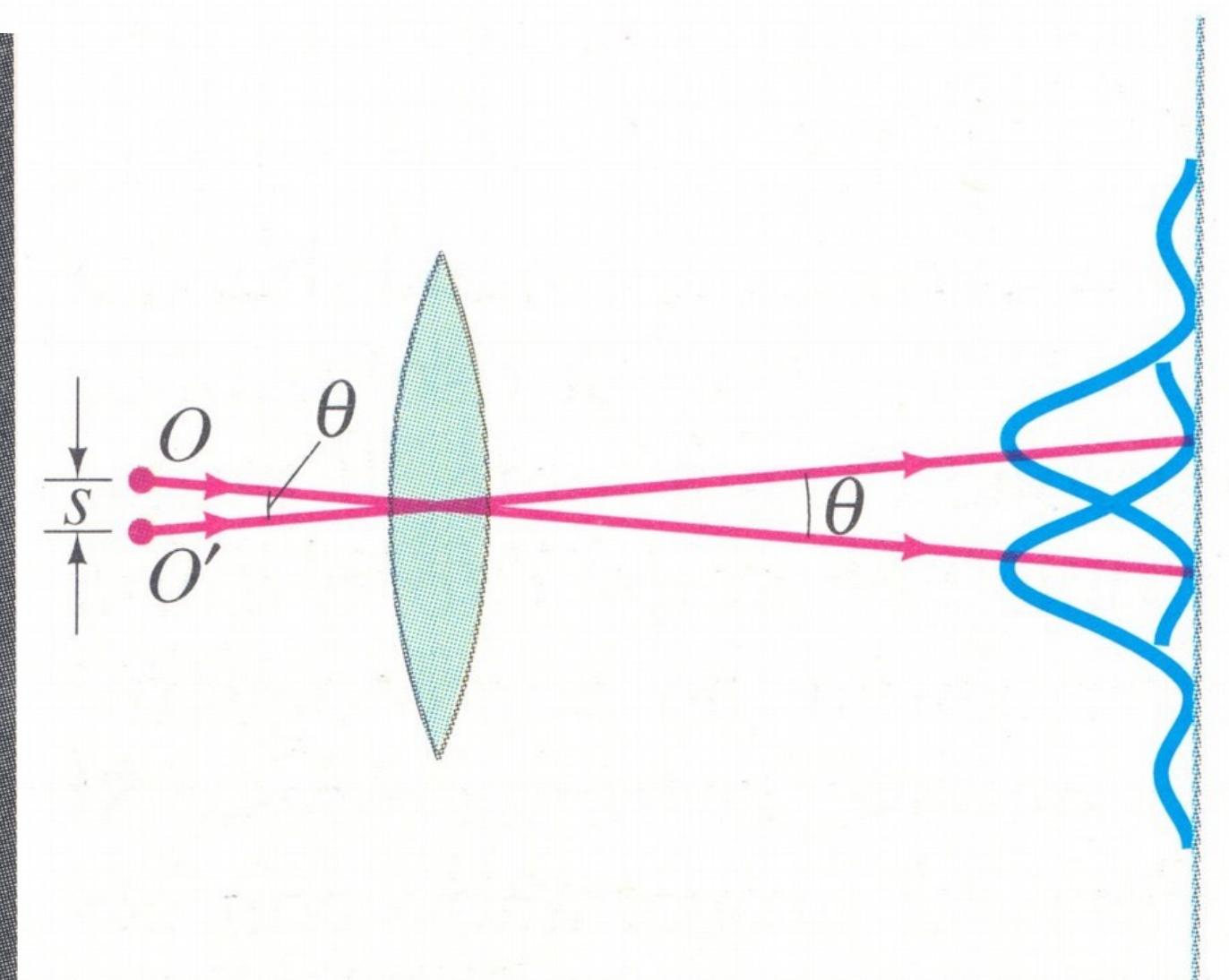
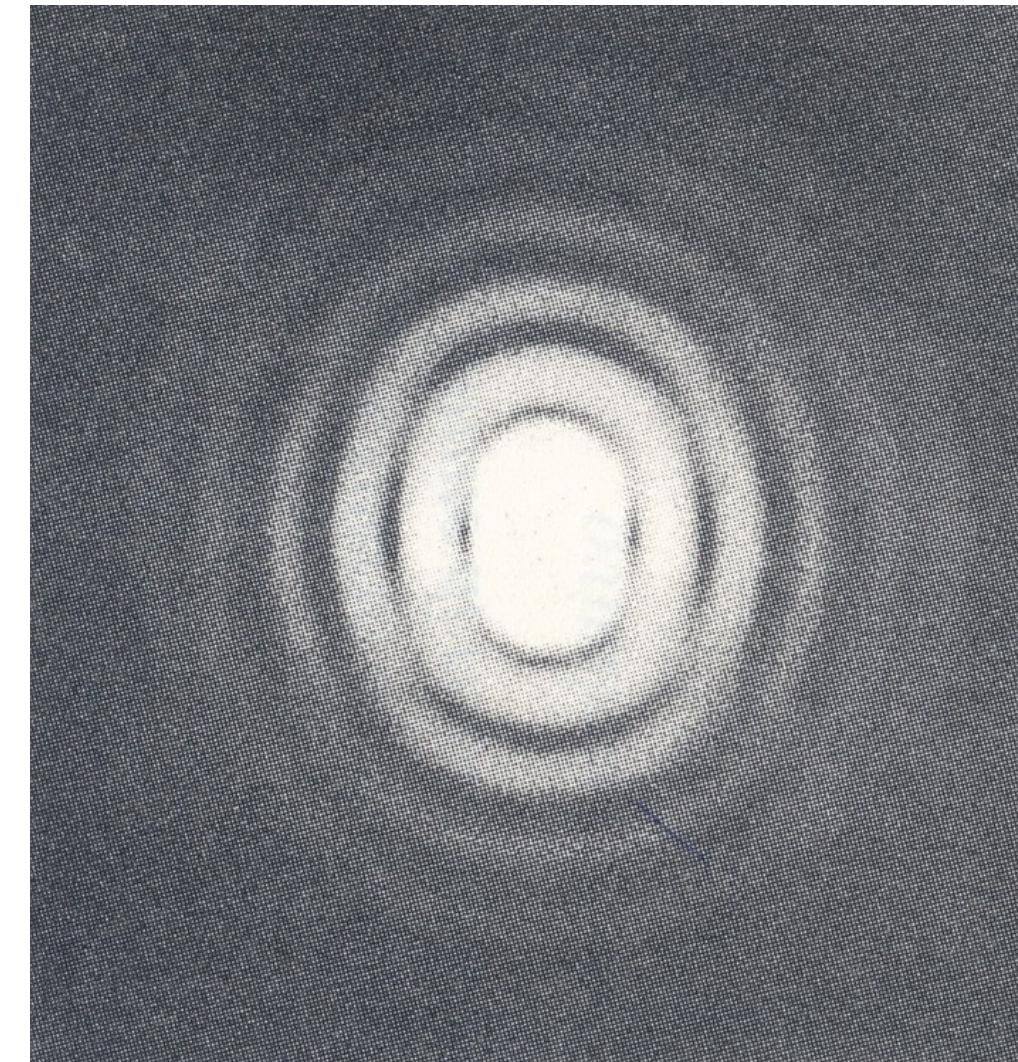
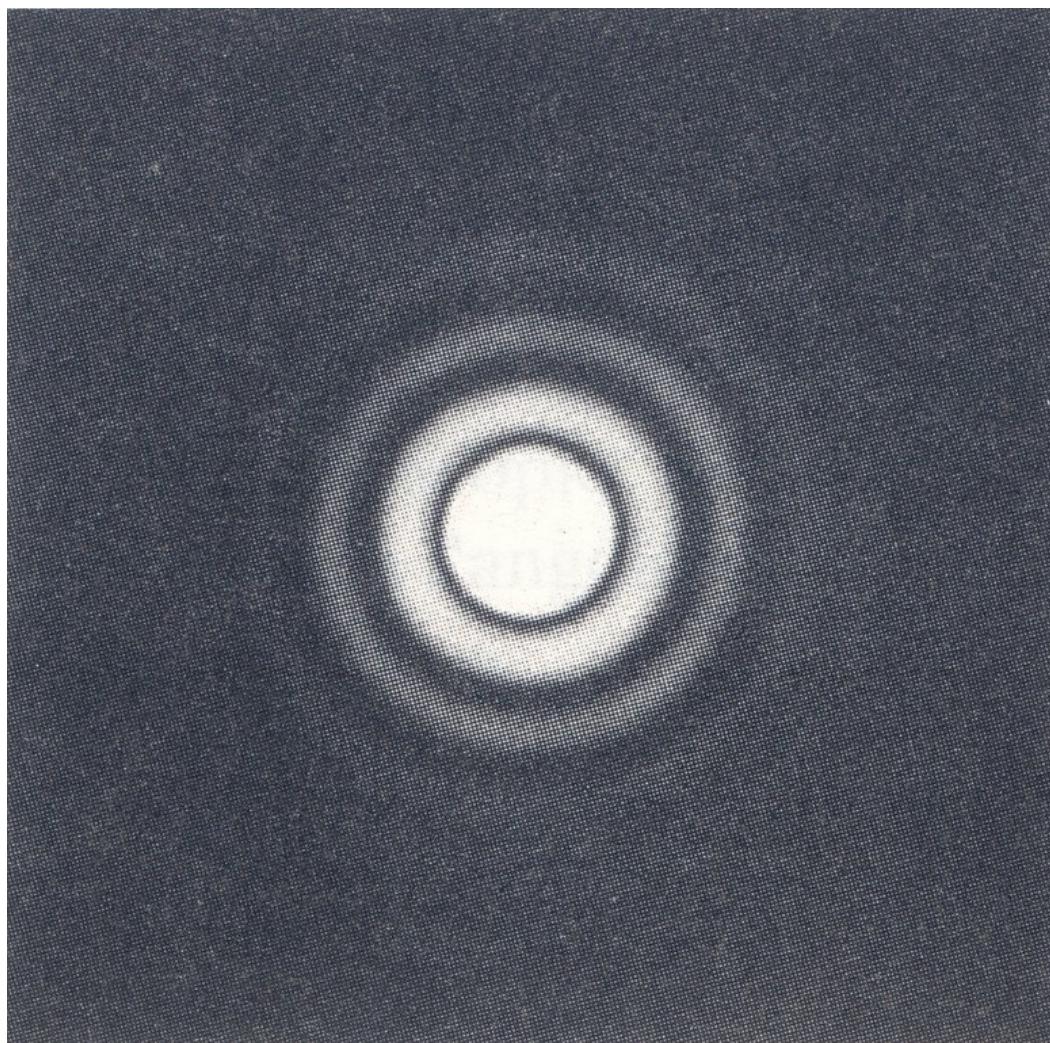
**Per studiare l'interferenza tra onda incidente e onda riflessa
occorre conoscere le proprietà rifrangenti dei due mezzi**

Diffrazione e limiti di risoluzione ottica

Sorgente luminosa attraverso un'apertura circolare: il **disco di Airy**

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

Diametro angolare del primo massimo,
con D il diametro della fenditura



Due sorgenti

Ciascuna genera un disco di Airy; quando si sovrappongono le due sorgenti diventano indistinguibili

Criterio di Rayleigh

Perché le sorgenti siano risolte, il massimo di una deve coincidere almeno con il primo minimo dell'altra, ovvero quando la loro distanza angolare è almeno $1.22 \lambda/D$