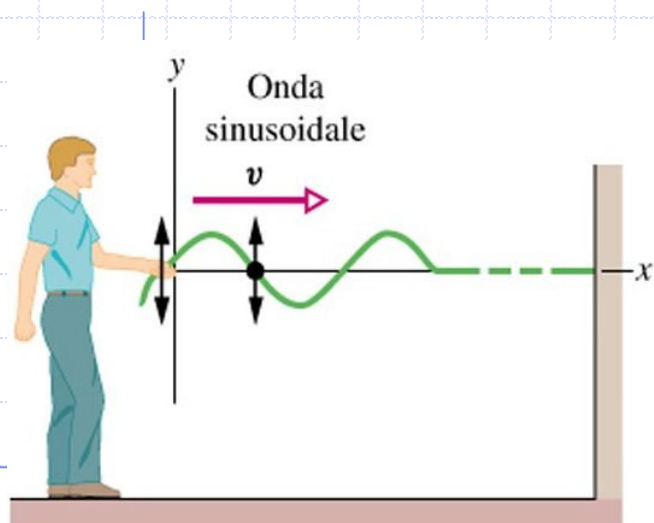
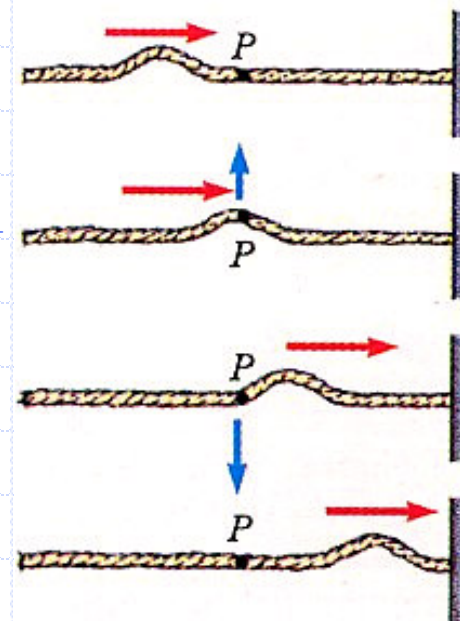


Onde



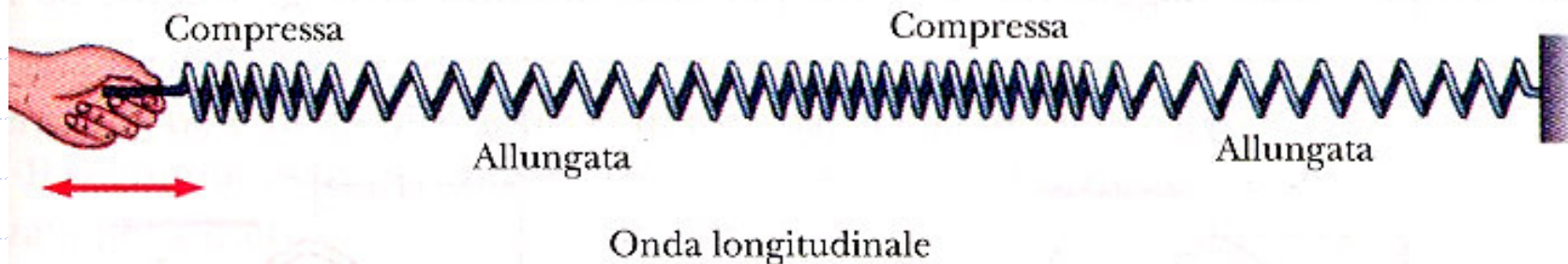
si definisce onda una perturbazione che si propaga
non si ha propagazione di materia ma solo di energia

onde meccaniche (mezzo)
onde elettromagnetiche
(vuoto, $c = 299792458$ m/s)



onde trasversali: la perturbazione è perpendicolare alla direzione di propagazione

onde longitudinali: la perturbazione è parallela alla direzione di propagazione

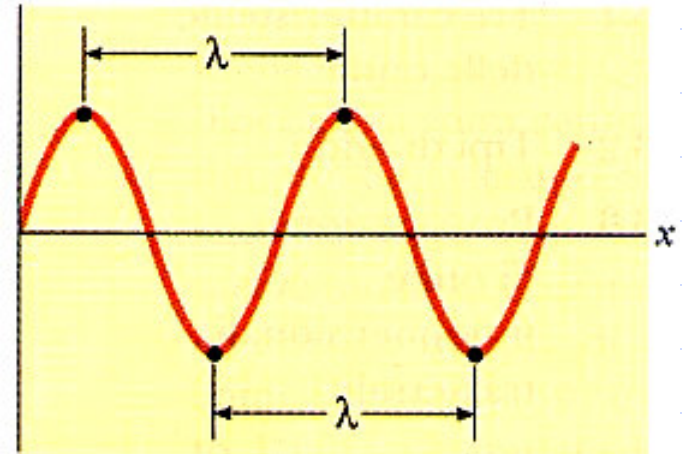


caratteristiche della onde: λ , T , v
 $y = f(x,t)$ onda unidimensionale

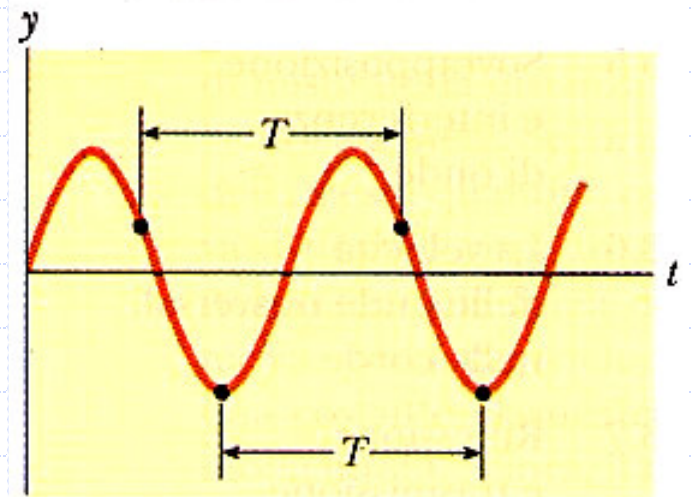
λ : la minima distanza tra 2 punti che oscillano concordemente rispetto alla posizione di equilibrio

T : il tempo minimo necessario perché la perturbazione si ripeta

$$T = 1/v$$



(a)



(b)

frequenza (ν), ampiezza (A) e fase (ϕ) dell'onda dipendono dalla sorgente
lunghezza d'onda (λ) e velocità di propagazione (v) dipendono anche dal mezzo

$$y = f(x)$$

profilo dell'onda

$$y = f(x - vt)$$

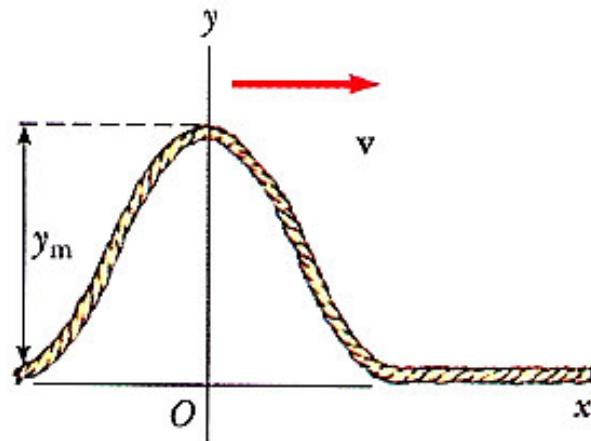
onda progressiva

$$y = f(x + vt)$$

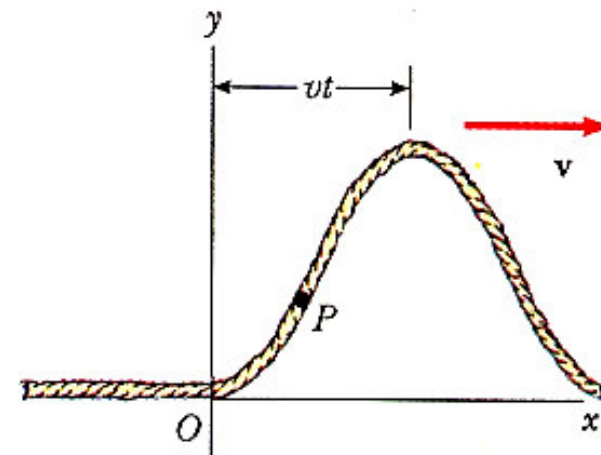
onda regressiva

$$v = \frac{dx}{dt}$$

velocità dell'onda
o velocità di fase



(a) Impulso per $t = 0$



(b) Impulso al tempo t

Fronti d'onda e raggi

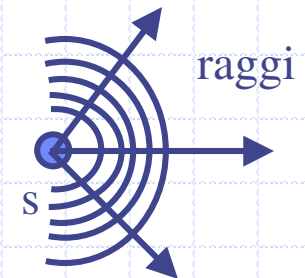
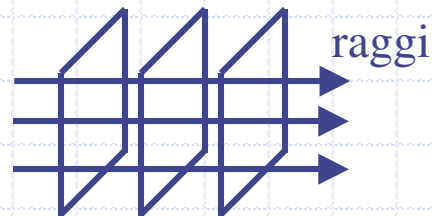
fronte d'onda: luogo geometrico dei punti che vibrano in fase

in un mezzo omogeneo e isotropo la direzione di propagazione è sempre perpendicolare al fronte d'onda

superficie d'onda

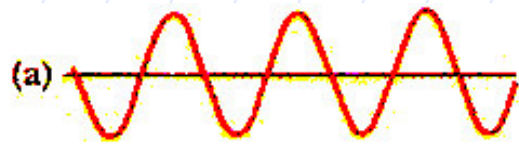


- ✓ onde circolari
- ✓ onde rettilinee
- ✓ onde sferiche
- ✓ onde piane



Principio di sovrapposizione

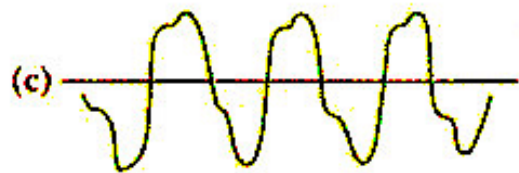
la perturbazione in un punto in cui si sovrappongono due o più onde dello stesso tipo è, istante per istante, uguale alla somma delle perturbazioni che le singole onde produrrebbero in quel punto separatamente



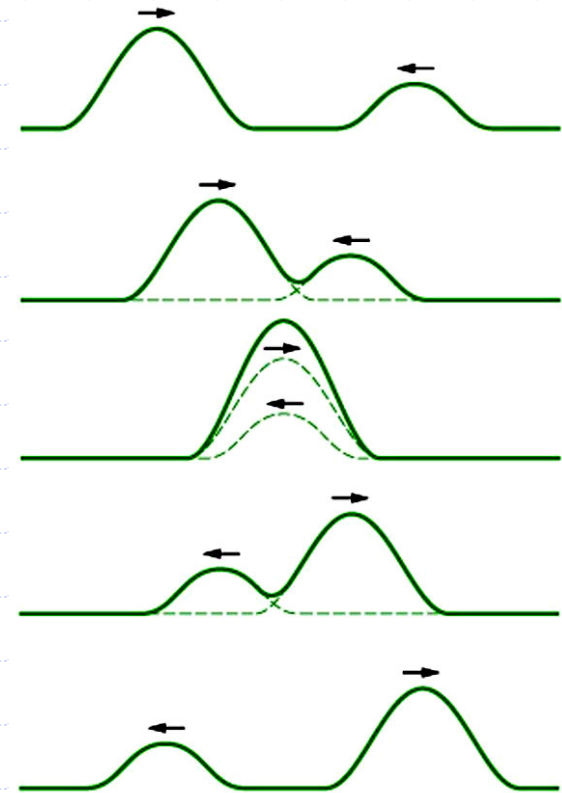
Diapason



Flauto



Clarinetto



oltre la regione di sovrapposizione
le onde proseguono indisturbate

teorema di Fourier

una qualsiasi funzione periodica può essere espressa come la somma di più funzioni sinusoidali (espansione in serie di Fourier)

onde sinusoidali armoniche unidimensionali

$$y(x,0) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right)$$

$$y(x,t) = A \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda} (x - vt)\right]$$

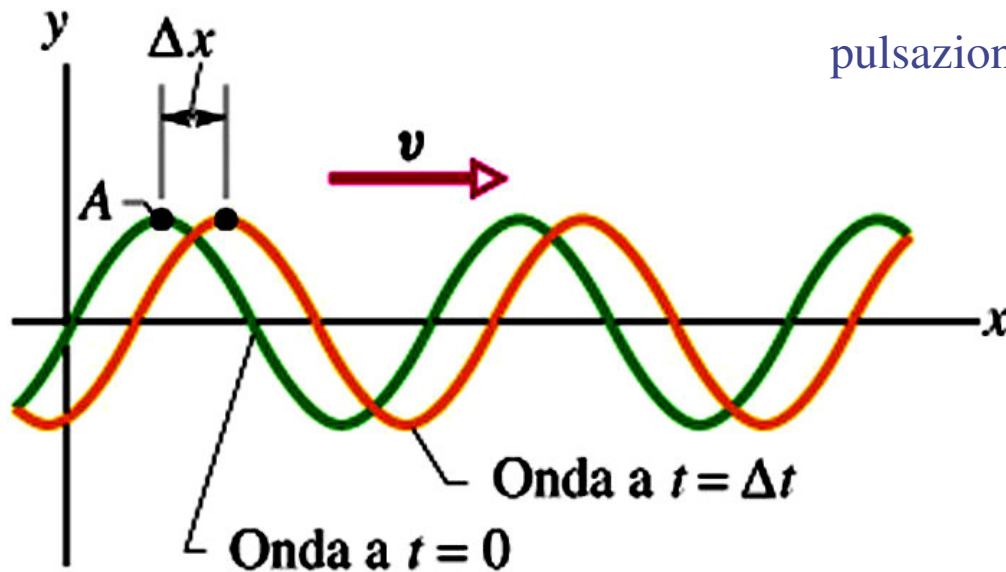
$$y(x,t) = A \sin\left(2\pi \frac{x}{\lambda} - 2\pi \frac{t}{T}\right)$$

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

$$y(x,t) = A \sin(kx - \omega t)$$

numero
d'onda

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$



pulsazione

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi v$$

frequenza

equazione d'onda

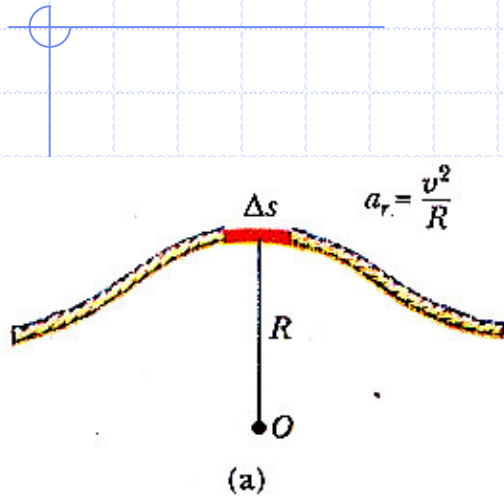
$$y(x,t) = A \sin(kx - \omega t - \varphi)$$

fase

velocità delle onde trasversali in una corda

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

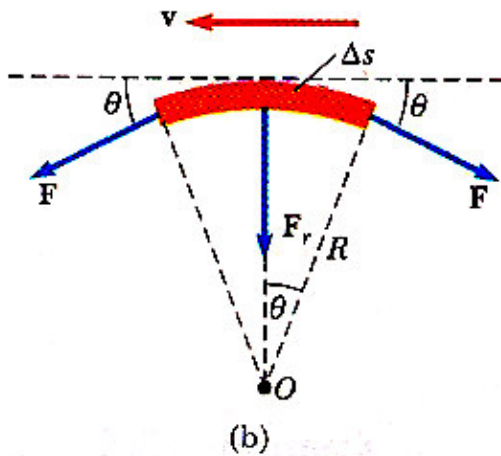
μ = massa
per unità di L



$$F_R = 2F \sin \vartheta = 2F \vartheta$$

$$m = \mu \Delta s$$

$$\Delta s = 2\vartheta R \Rightarrow m = 2\mu R \vartheta$$



$$F_R = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow 2F \vartheta = \frac{2\mu R \vartheta v^2}{R}$$

$$[v] = \frac{[F]^{1/2}}{[\mu]^{1/2}} = \frac{[MLT^{-2}]^{1/2}}{[ML^{-1}]^{1/2}} = [LT^{-1}]$$

energia trasmessa

$$dm = \mu dx$$

$$y(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$$

moto armonico dell'elemento dx nella posizione x

$$F = -k_{el} y = ma = -m\omega^2 y$$

$$a = \frac{d^2 y}{dt^2} = -\omega^2 y$$

$$dU = \frac{1}{2} k_{el} y^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 y^2 = \frac{1}{2} \mu dx \omega^2 A^2 \sin^2(kx - \omega t)$$

$$dU = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \mu dx \omega^2 y^2 = \frac{1}{2} \mu dx \omega^2 A^2 \cos^2(kx - \omega t)$$

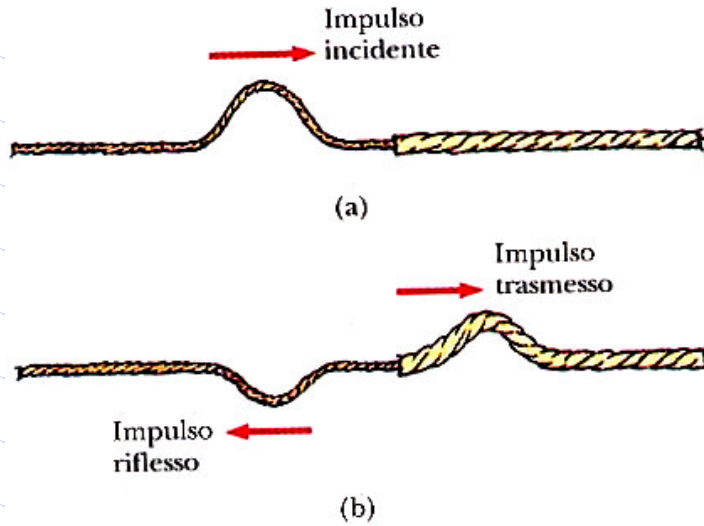
$$dE = dU + dK = \frac{1}{2} \mu dx \omega^2 A^2$$

$$\frac{dE}{dx} = u = \frac{1}{2} \mu \omega^2 A^2$$

$$\frac{dE}{dt} = P = \frac{1}{2} \mu \omega^2 A^2 v$$

onde riflesse e onde trasmesse in una corda

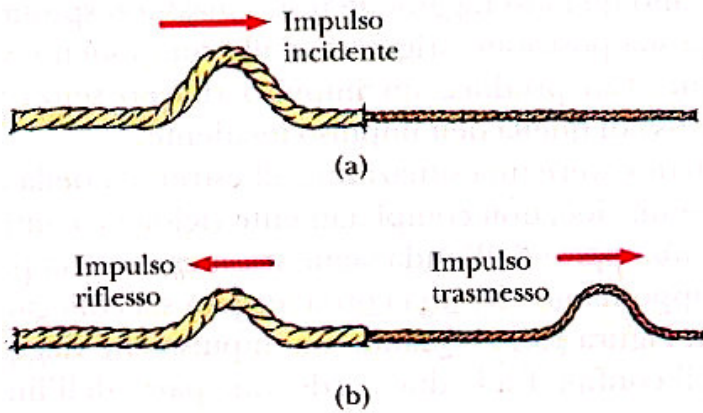
$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$



$$A_R + A_T = A_I$$

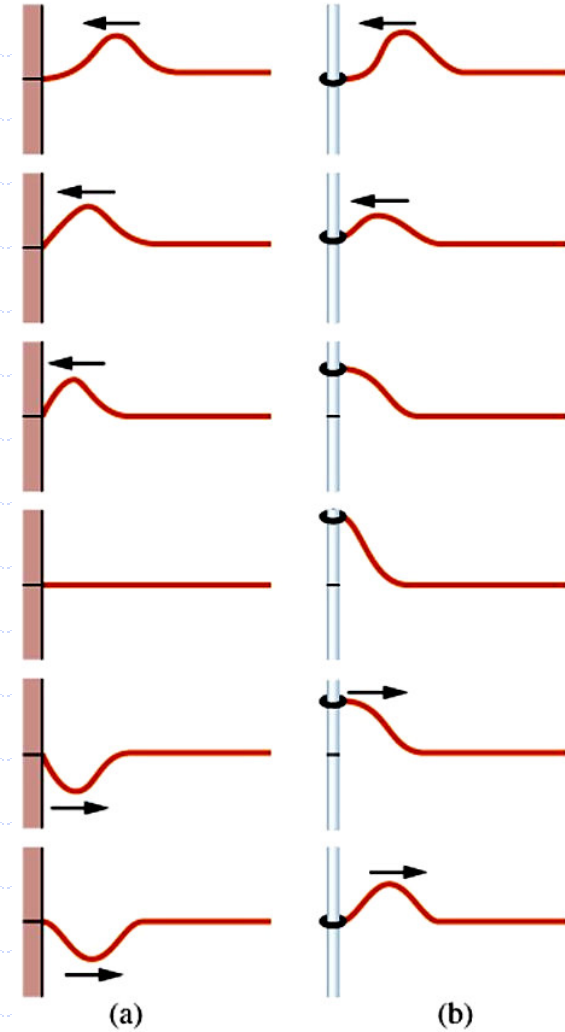
$$\rho_B > \rho_A \Rightarrow v_B < v_A$$

salto di fase di 180°



$$\rho_B < \rho_A \Rightarrow v_B > v_A$$

senza variazione di fase



onde sonore

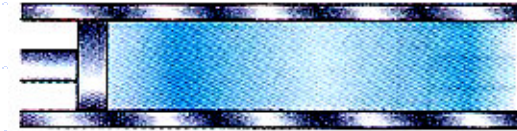
$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

$$B = -\frac{\Delta P}{\Delta V/V}$$

$v = 343 \text{ m/s}$
nell'aria (20°C)

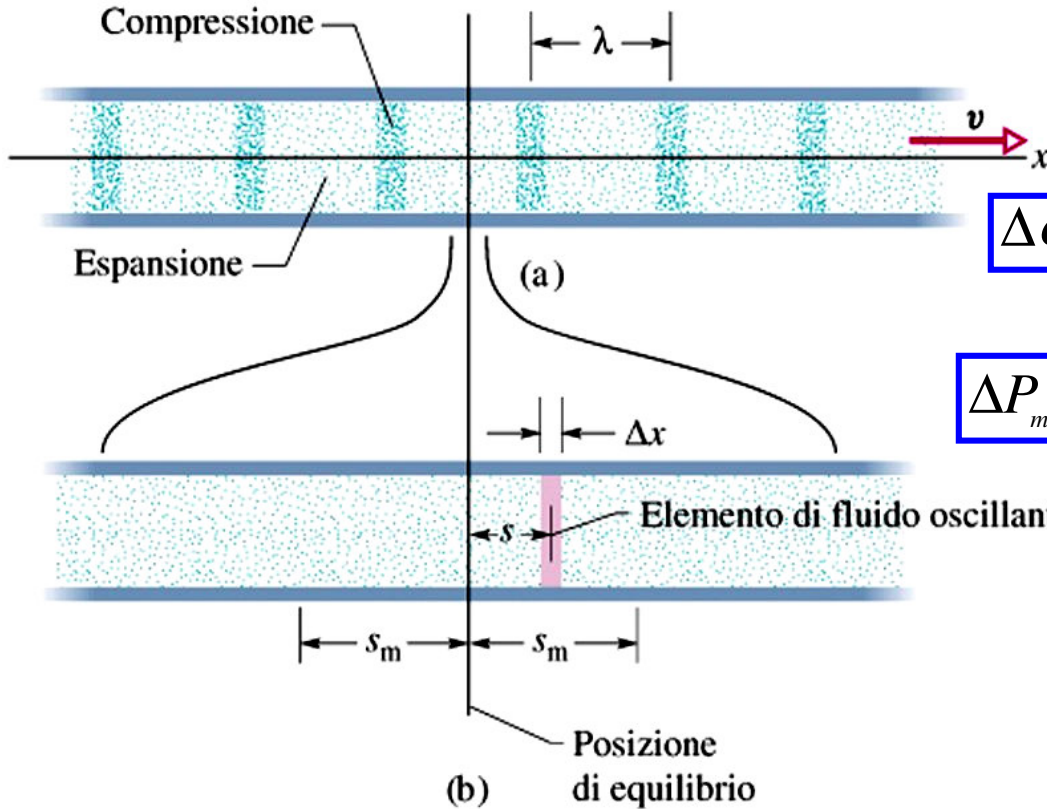
onde di
pressione

onde di
spostamento



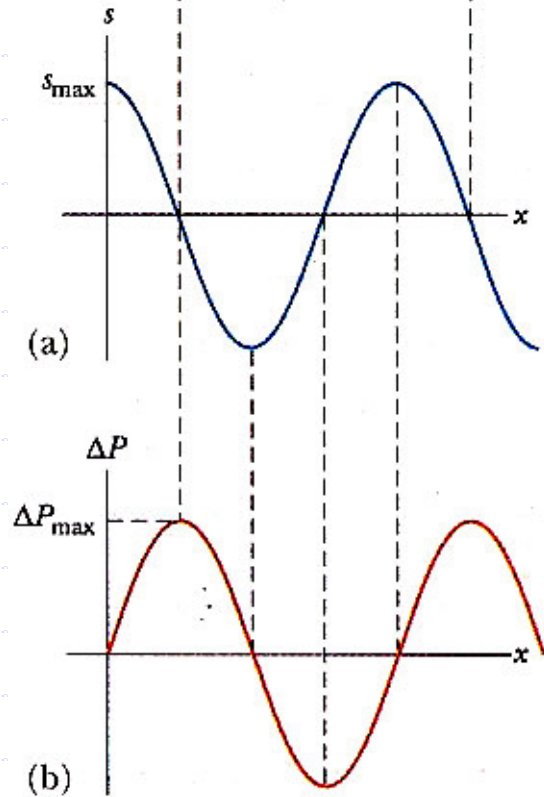
$$\Delta P = \Delta P_m \sin(kx - \omega t)$$

$$s = s_m \cos(kx - \omega t)$$



$$\Delta\phi = 90^\circ$$

$$\Delta P_m = \rho v \omega s_m$$



Effetto Doppler

moto relativo fra
sorgente e rivelatore

se S e R si allontanano $f' < f$
se S e R si avvicinano $f' > f$

$$v_S = 0 \rightarrow \lambda, f, v$$

$$f' = f + v_R / \lambda = v / \lambda + v_R / \lambda$$

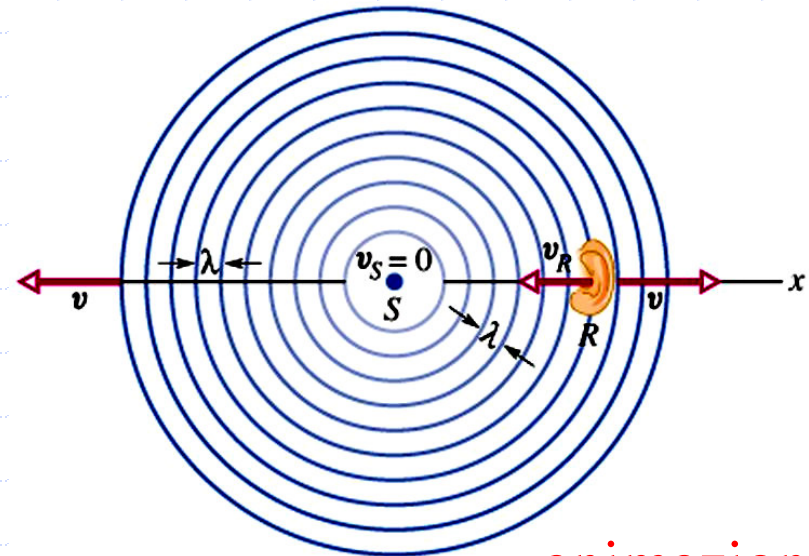
$$f' = f \left(\frac{v + v_R}{v} \right)$$

$$v_R = 0 \rightarrow \lambda, f, v$$

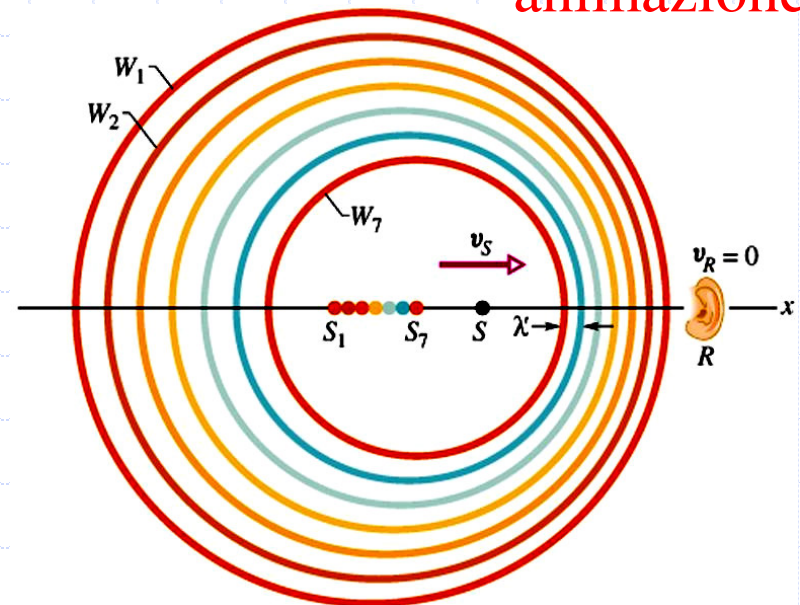
$$\lambda' = vT - v_S T$$

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{vT - v_S T} = f \left(\frac{v}{v - v_S} \right)$$

$$f' = f \left(\frac{v \pm v_R}{v \mp v_S} \right)$$



animazione



interferenza

consideriamo la sovrapposizione di 2 onde tali che:

- vibrano nella stessa direzione,
- hanno la stessa frequenza (sincrone)
- hanno differenza di fase costante (coerenti)

$$y_1 = A \sin(kx - \omega t)$$

$$y_2 = A \sin(kx - \omega t - \varphi)$$

principio di sovrapposizione

$$y = y_1 + y_2 = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx - \omega t - \varphi)$$

$$\sin a + \sin b = 2 \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) \sin\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

$$y = 2A \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t - \frac{\varphi}{2}\right)$$

ampiezza

termine oscillatorio

interferenza costruttiva $\varphi = 2n\pi \leftarrow n = 0,1,2,\dots$

$$y(x,t) = 2A \sin(kx - \omega t)$$

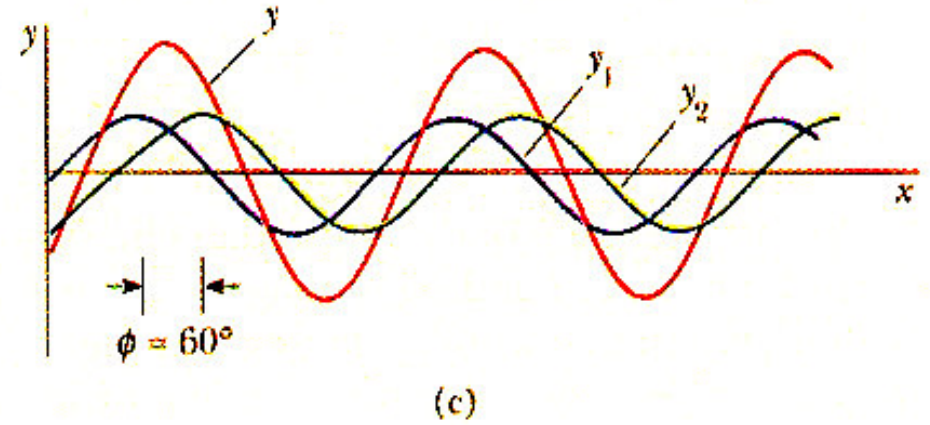
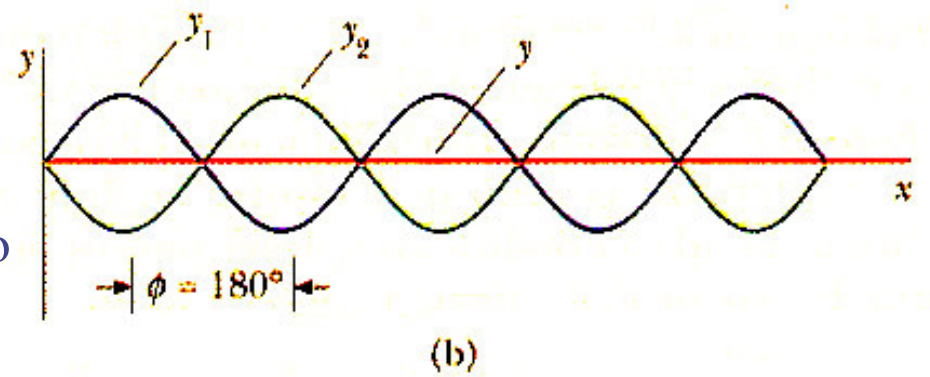
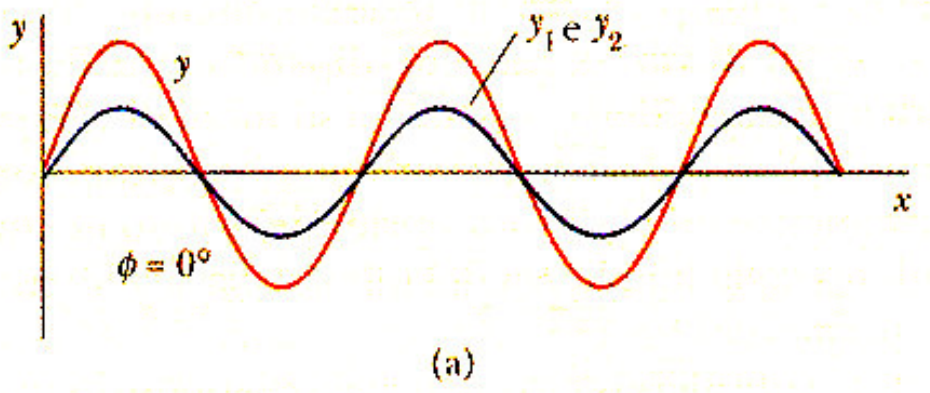
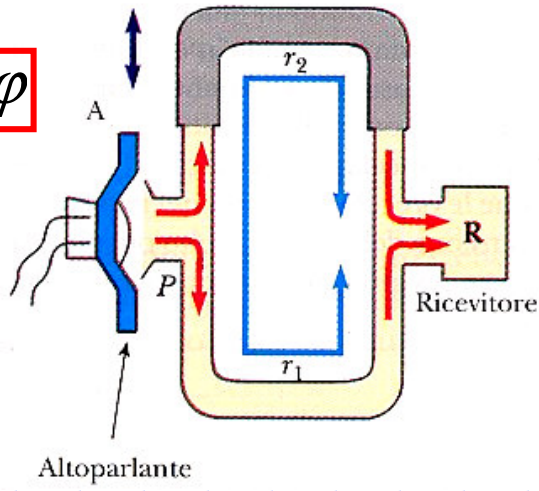
interferenza distruttiva $y(x,t) = 0$

$$\varphi = (2n + 1)\pi \leftarrow n = 0,1,2,\dots$$

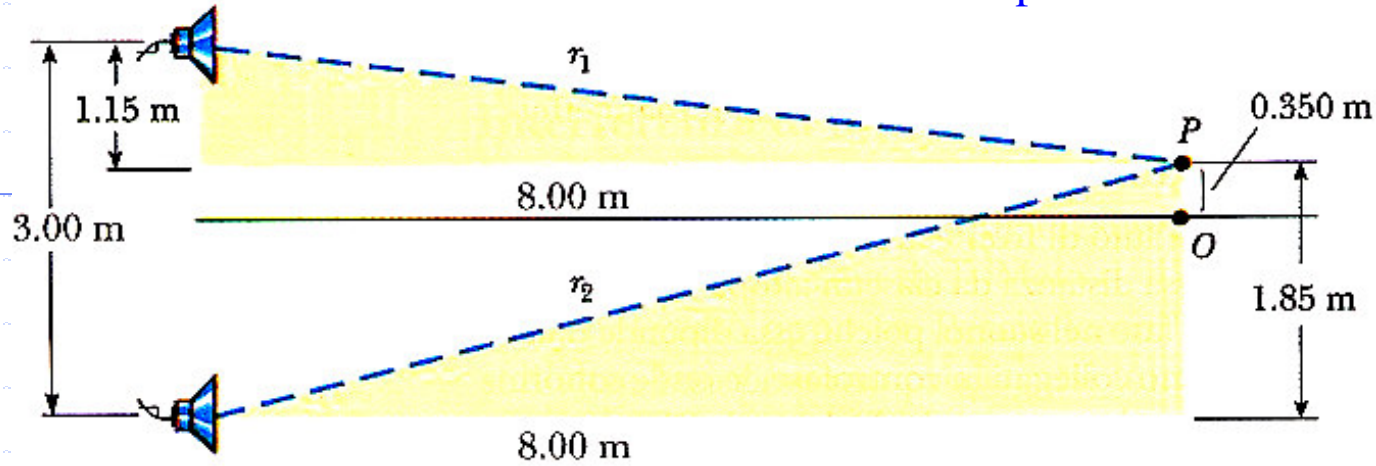
differenza di fase e differenza di cammino

$$\lambda : 2\pi = \Delta r : \varphi$$

$$\Delta r = \frac{\lambda}{2\pi} \varphi$$



esempio:



in P primo minimo di interferenza

$$r_2 - r_1 = \Delta r = 0.13m$$

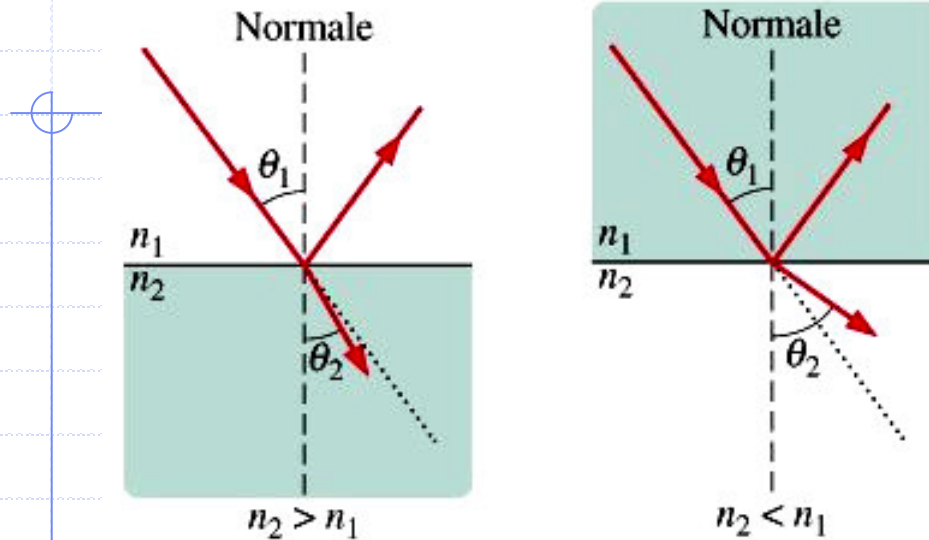
$$r_1 = 8.08m$$

$$r_2 = 8.21m$$

$$\varphi = \pi \Rightarrow \Delta r = \lambda/2 \rightarrow \lambda = 0.26m$$

$$f = v/\lambda = 343/0.26 = 1.43kHz$$

Riflessione e rifrazione della luce (ottica geometrica)



animazione

- ottica geometrica
- angolo di incidenza θ_1
- angolo di riflessione θ_1'
- angolo di rifrazione θ_2

legge della rifrazione

$$n_1 \sin \vartheta_1 = n_2 \sin \vartheta_2$$

legge di Snell

legge della riflessione

$$\vartheta_1 = \vartheta_1'$$

raggio incidente, raggio rifratto e normale giacciono sullo stesso piano

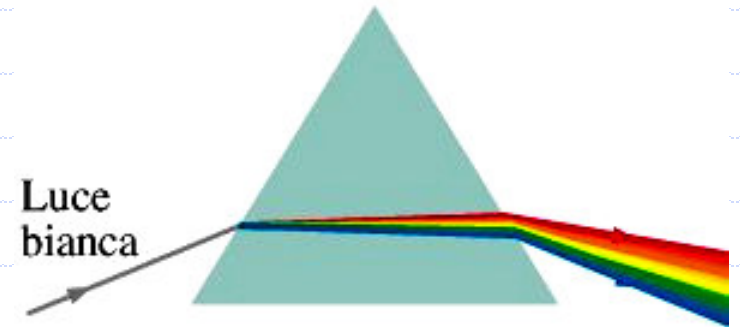
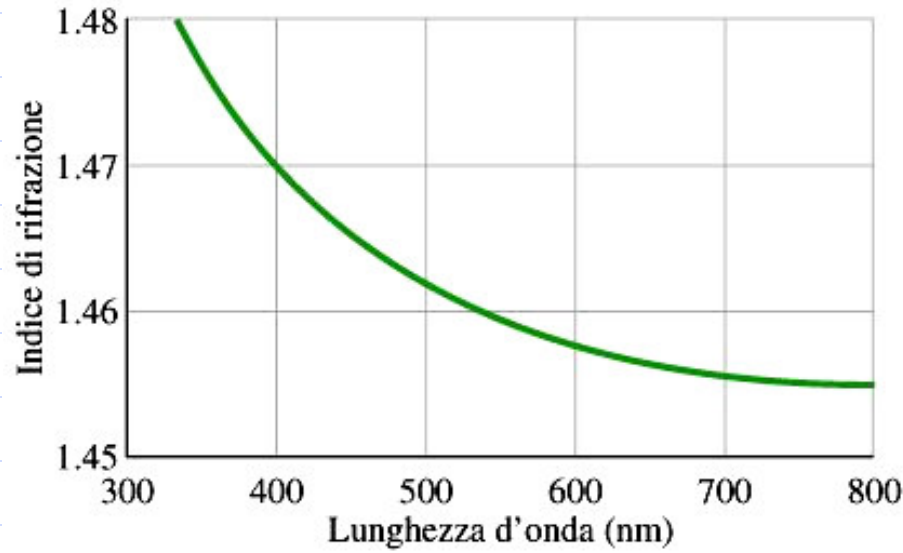
raggio incidente, raggio riflesso e normale giacciono sullo stesso piano

n_1 e n_2 indici di rifrazione

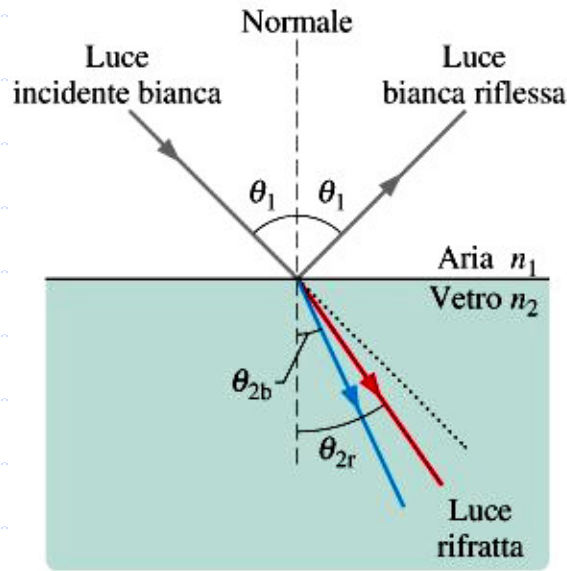
$$\begin{aligned} n_2 > n_1 &\Rightarrow \vartheta_2 < \vartheta_1 \\ n_2 < n_1 &\Rightarrow \vartheta_2 > \vartheta_1 \end{aligned}$$

dispersione cromatica

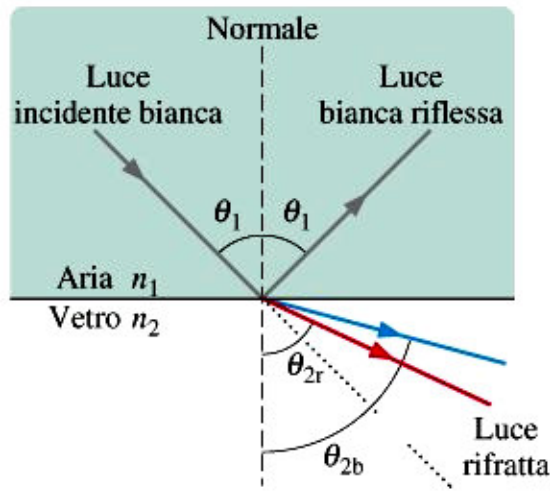
prisma



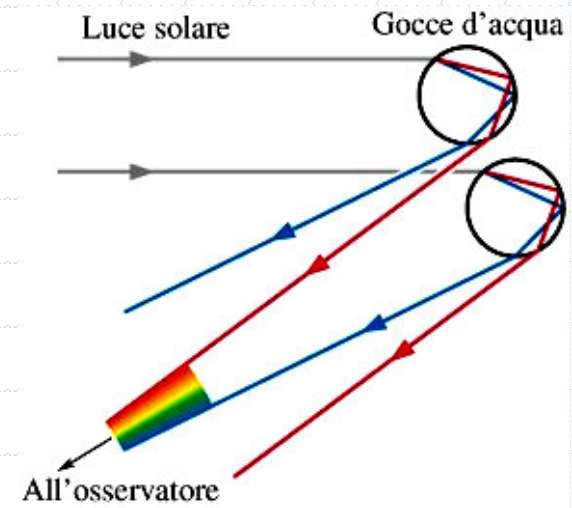
esempio: l'arcobaleno



(a)



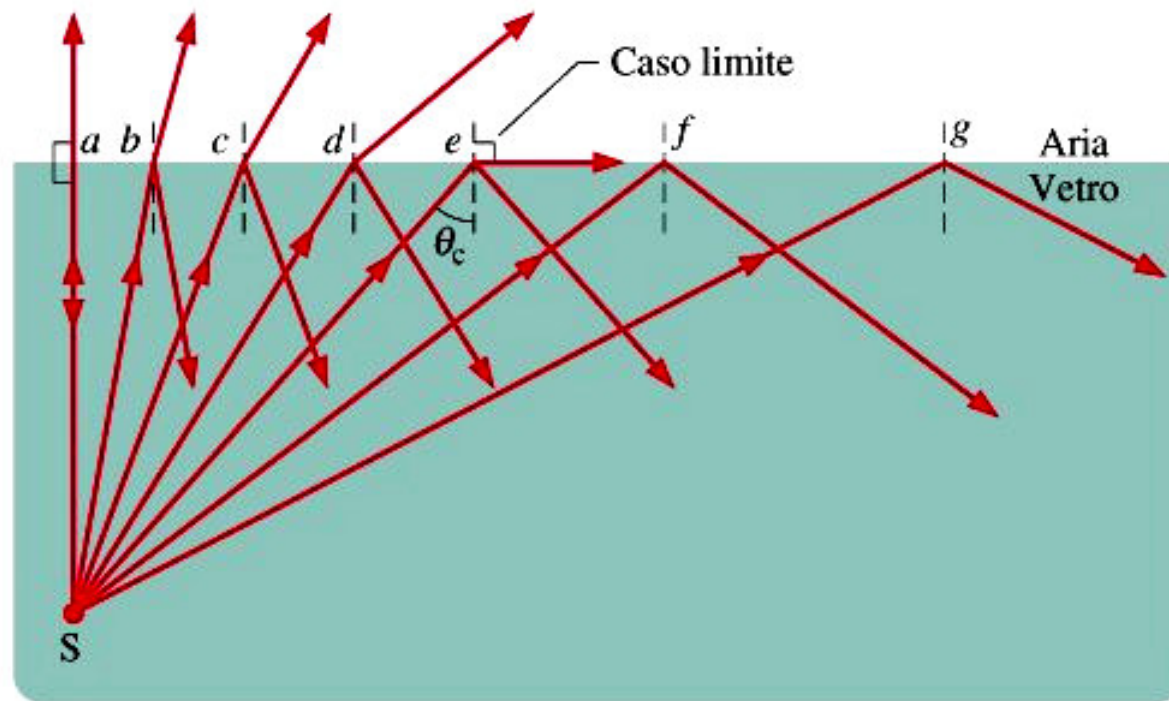
(b)



riflessione totale

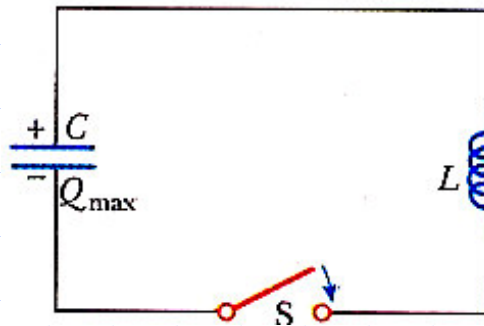
$$n_1 \sin \vartheta_c = n_2 \sin(90^\circ)$$

θ_c angolo critico

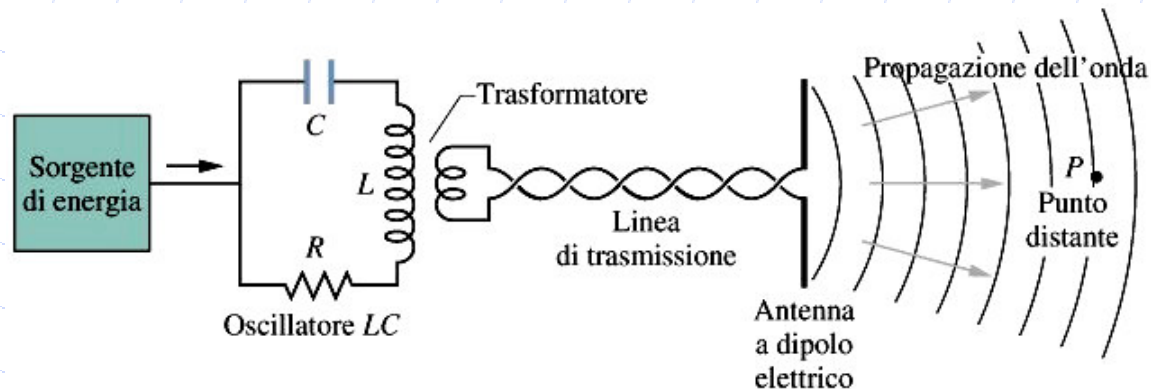


Es.: fibre ottiche

Le onde elettromagnetiche



produzione e
trasmissione di onde
elettromagnetiche
(esperienza di Hertz)



- ✓ E e B sono perpendicolari alla direzione di propagazione
- ✓ E è sempre perpendicolare a B

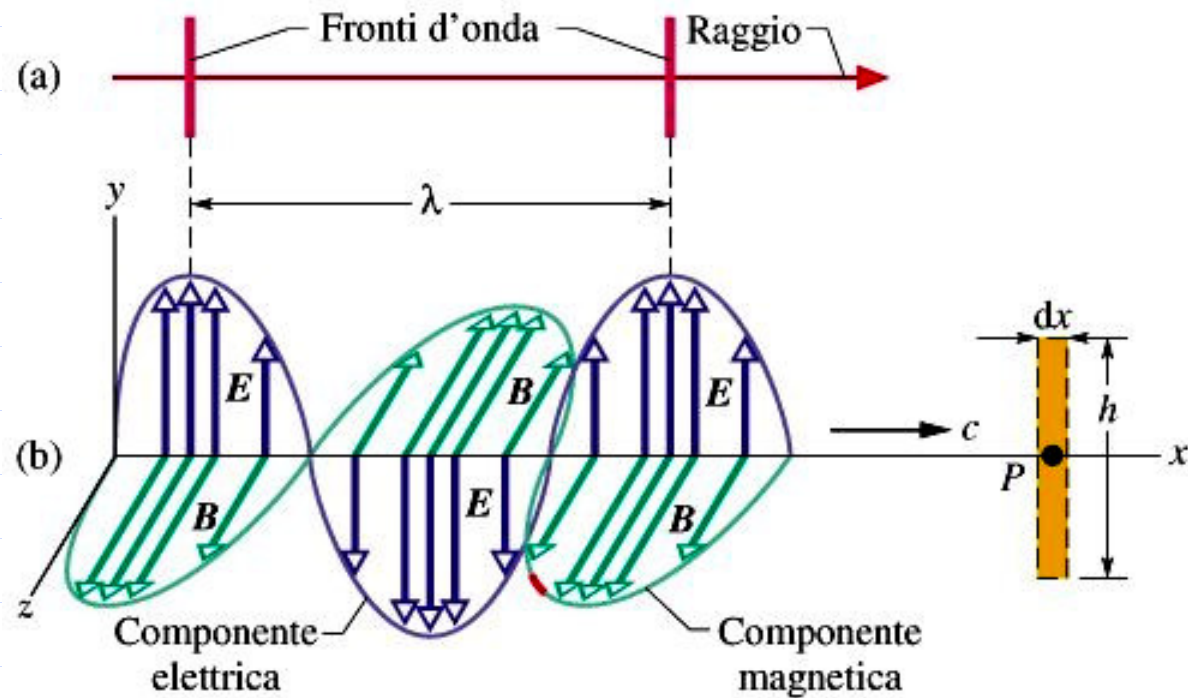
onde trasversali

animazione

soluzioni delle
equazioni di Maxwell

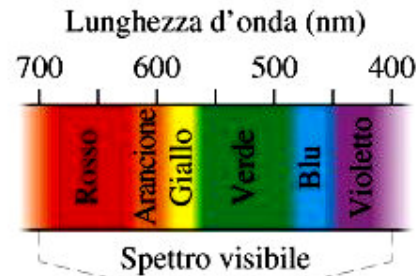
$$E = E_m \sin(kx - \omega t)$$
$$B = B_m \sin(kx - \omega t)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$
$$\frac{E}{B} = c$$

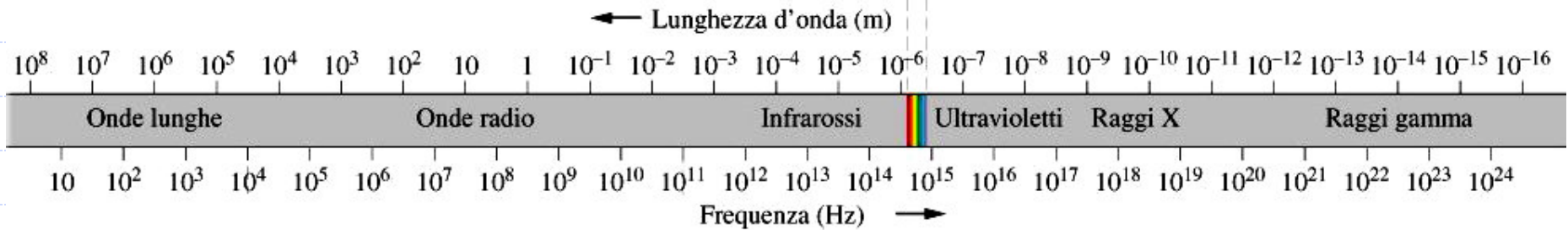


la luce è un'onda elettromagnetica

lo spettro delle onde elettromagnetiche



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



le onde elettromagnetiche trasportano energia

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \wedge \vec{B}$$

flusso di energia (energia per unità di tempo e per unità di superficie)

vettore di Poynting

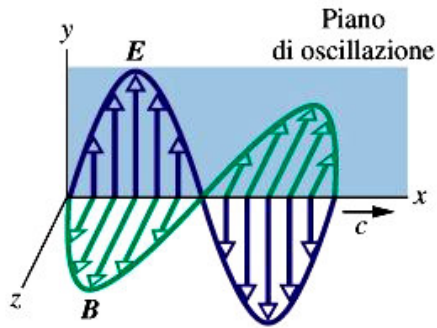
$$S = \frac{1}{\mu_0} EB = \frac{1}{c\mu_0} E^2 = \frac{c}{\mu_0} B^2$$

$$\frac{E}{B} = c$$

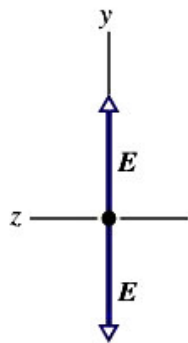
$$u = u_E + u_B = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}$$

densità di energia

$$u = \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0}$$



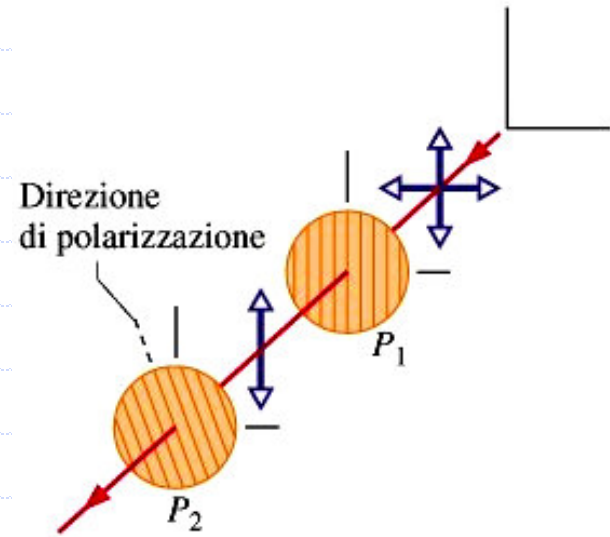
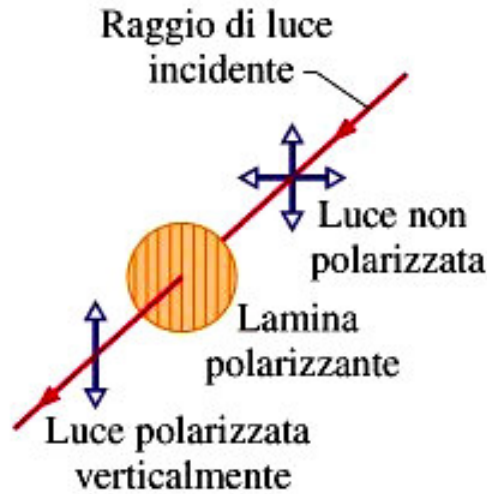
(a)



(b)

Polarizzazione

la luce naturale non è polarizzata



polarizzatori ed analizzatori:
i polaroid e l'assorbimento selettivo

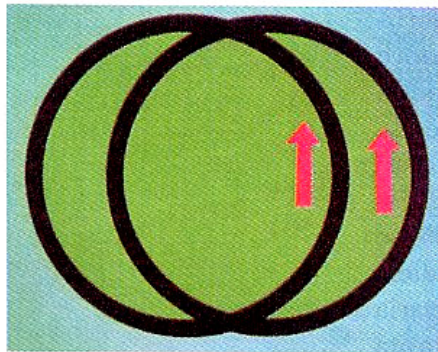
$$E_y = E \cos \vartheta \Rightarrow I = I_0 \cos^2 \vartheta$$

legge di Malus

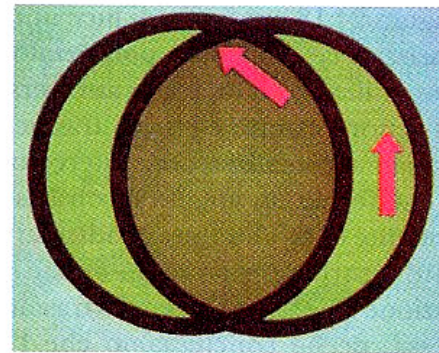
$$\alpha = ksc$$

$k = k(\lambda)$ potere rotatorio specifico

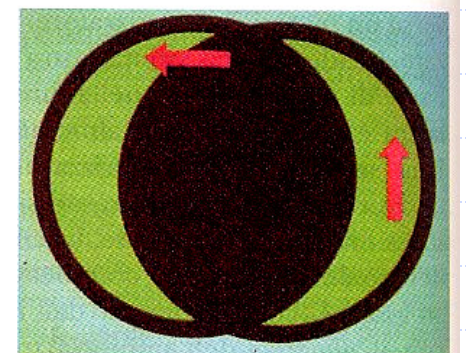
attività ottica
ad es. lo zucchero



(a)



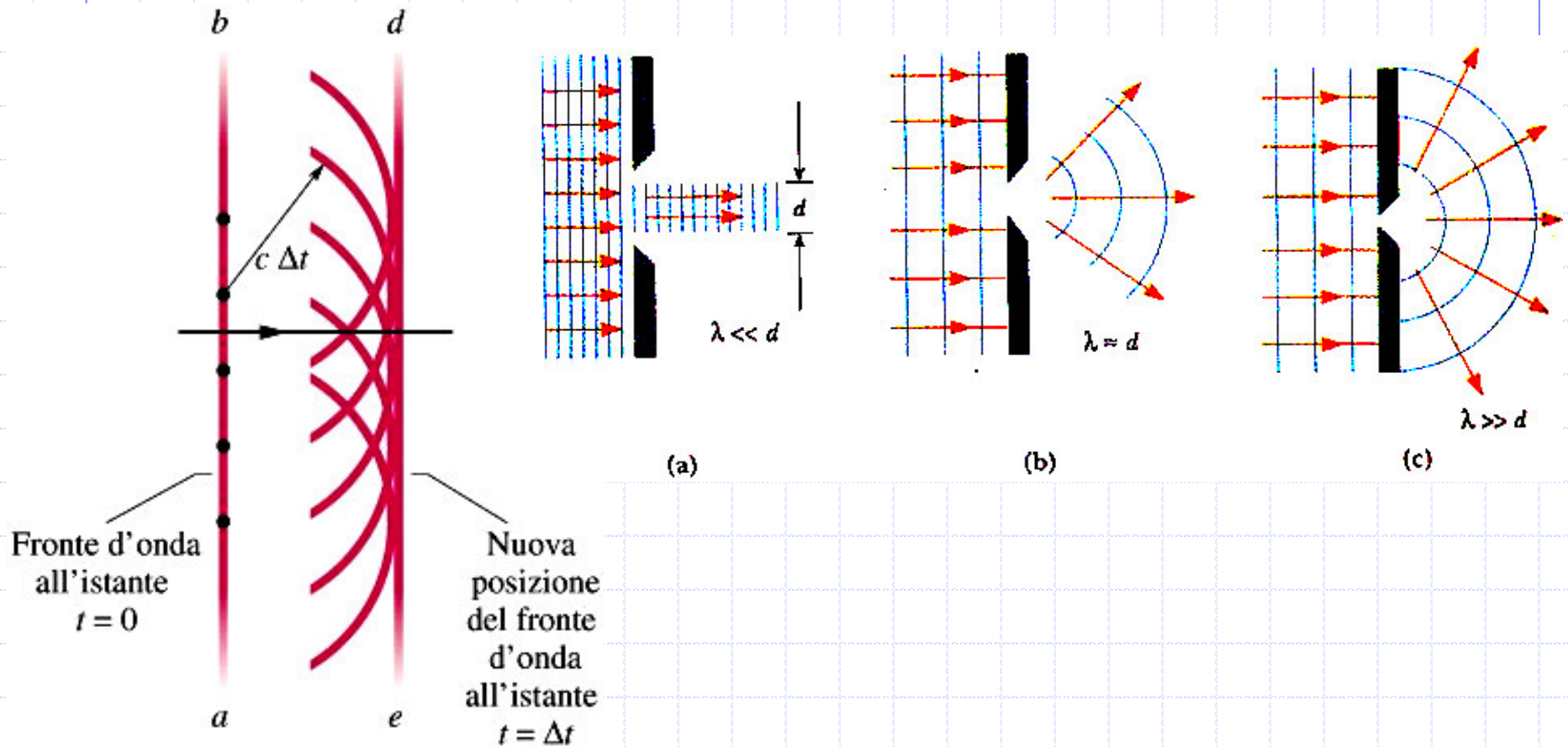
(b)



(c)

Interferenza e diffrazione

Principio di Huygens: tutti i punti di un fronte d'onda possono considerarsi come sorgenti elementari di onde sferiche secondarie il cui inviluppo determina il nuovo fronte d'onda



esperimento di Young

onde sincrone e coerenti

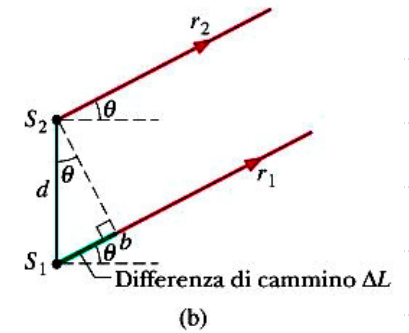
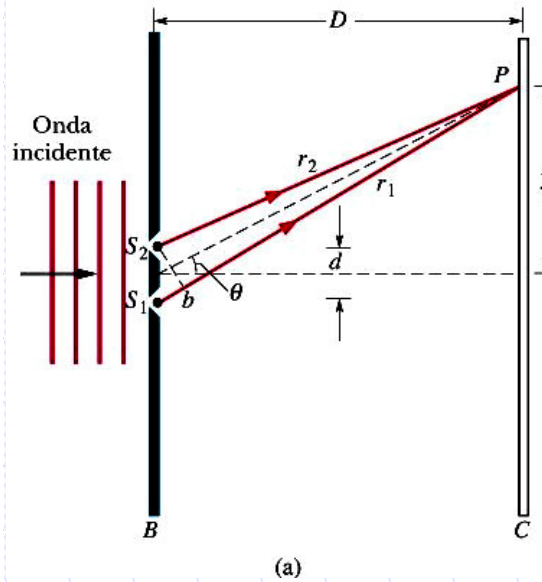
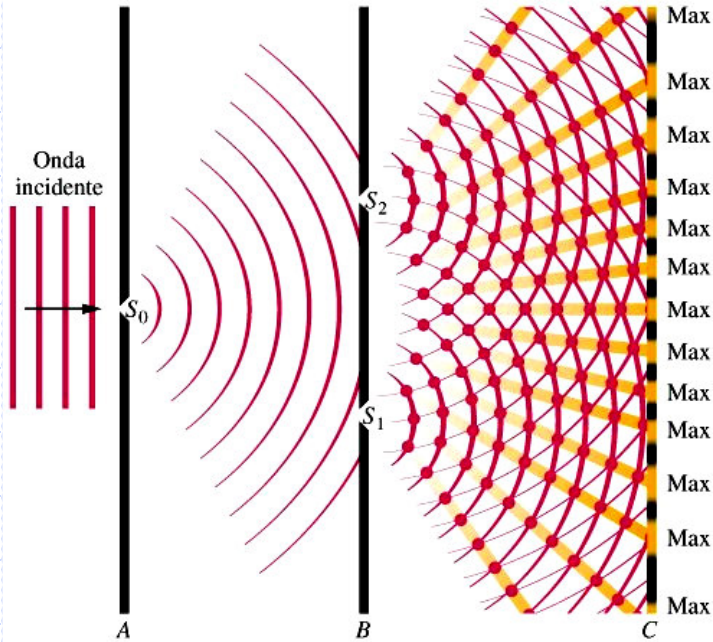
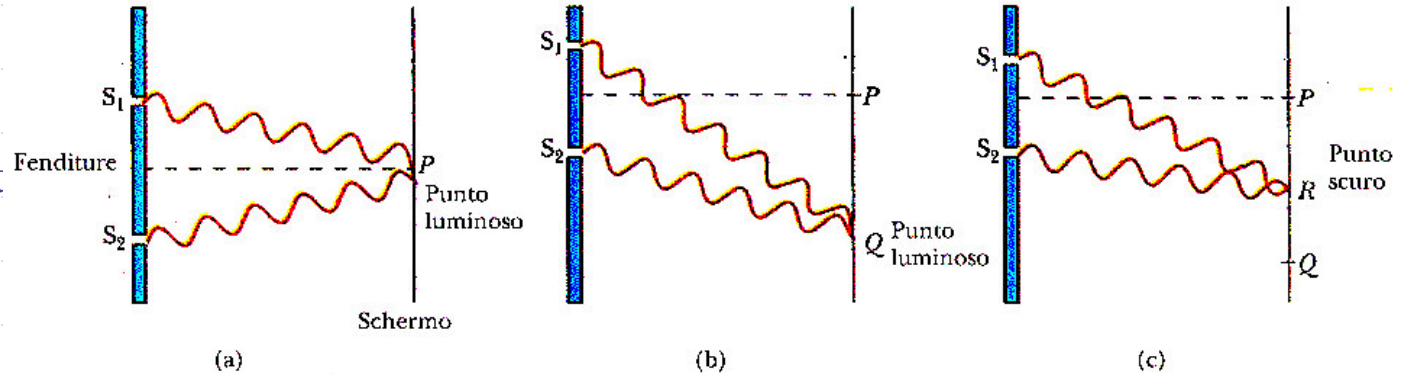
$$\delta = r_2 - r_1 = d \sin \vartheta$$

$$d \sin \vartheta = m\lambda$$

interferenza costruttiva
 $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

$$d \sin \vartheta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

interferenza distruttiva
 $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$



$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

figure di diffrazione

interferenza da lamine sottili e
reticoli di diffrazione

