

Fenomeni ondulatori

La fonte di qualsiasi onda e' una **vibrazione, una perturbazione**.

Se esse sono di tipo meccanico (onde sonore ad es.) si propagano in un mezzo, se sono onde elettromagnetiche si propagano anche nel vuoto (oltre che in un mezzo). Vi sono poi onde di materia.

Le onde possono essere **longitudinali** se l'oscillazione avviene lungo la direzione di propagazione, oppure **trasversali** se avviene in direzione perpendicolare alla loro propagazione.

Le onde provocano oscillazioni, ma non trasportano materia.

A "viaggiare" e' l'onda non la materia.

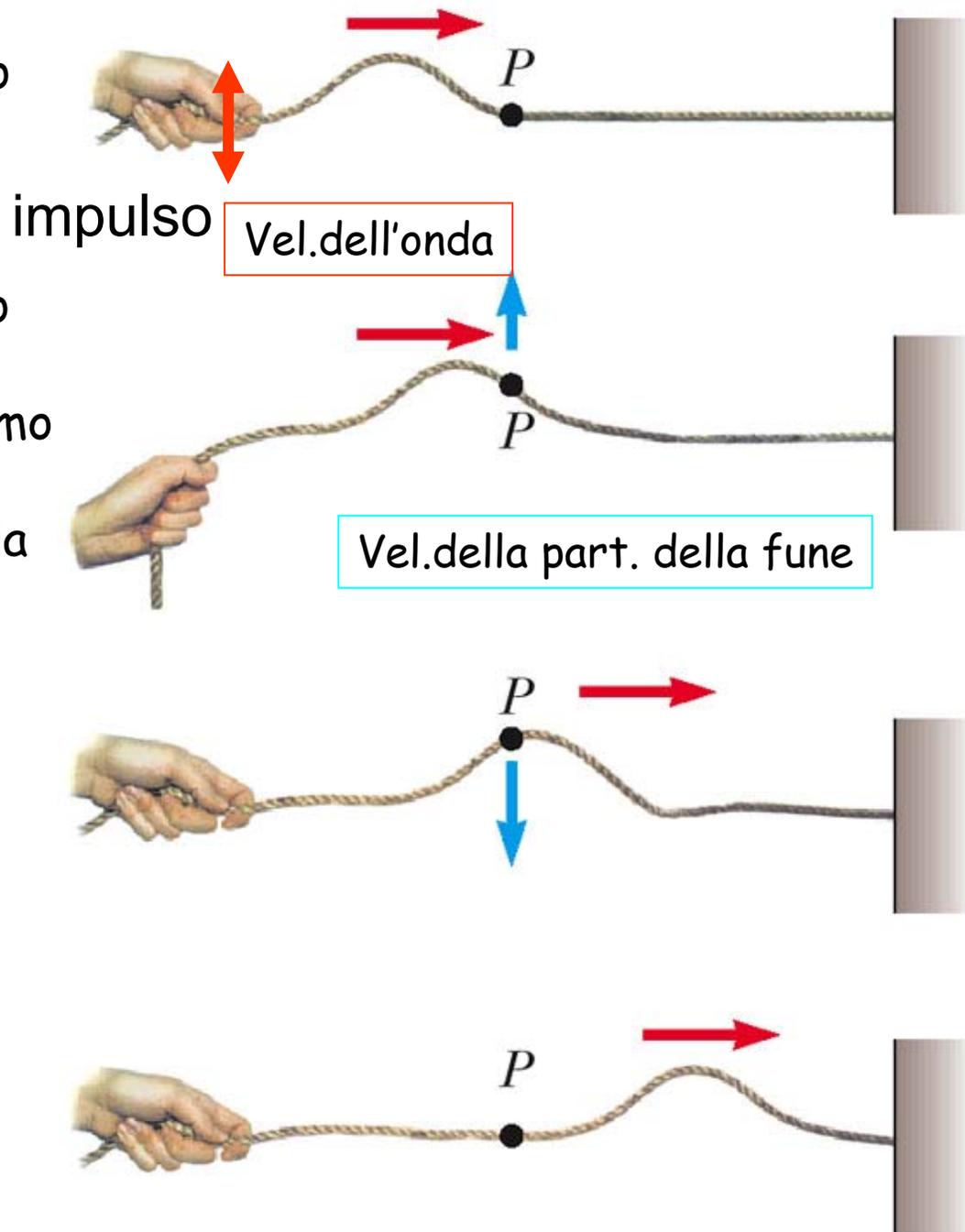
onde meccaniche trasferiscono energia propagando una perturbazione in un mezzo.

Le particelle del mezzo comunicano la pert. interagendo tra di loro \rightarrow oscillano.

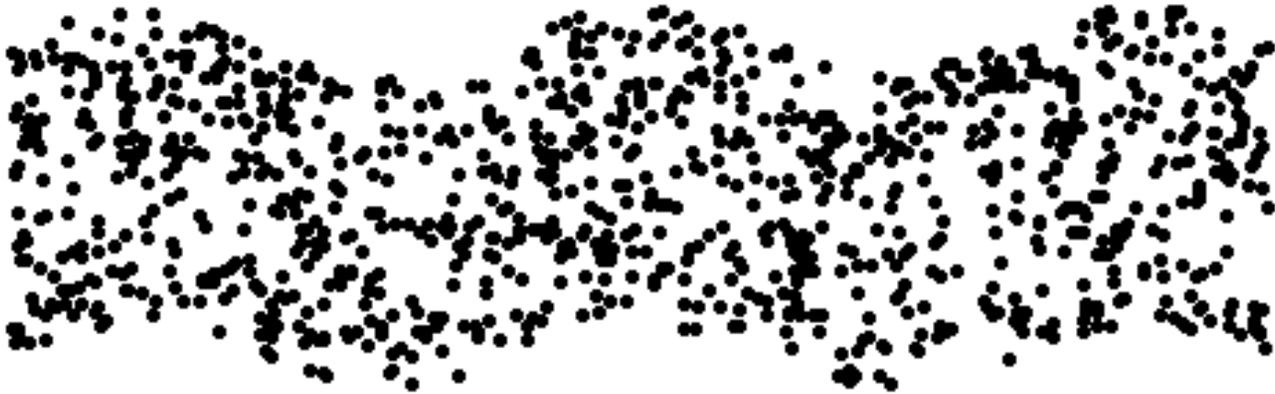
Necessaria una forza di richiamo gravitazionale o elastica.

Non c'è spostamento di materia

Es di Onde trasversali:
ogni punto sulla corda si muove perpendicolarmente alla corda (direzione di propagazione dell'onda)

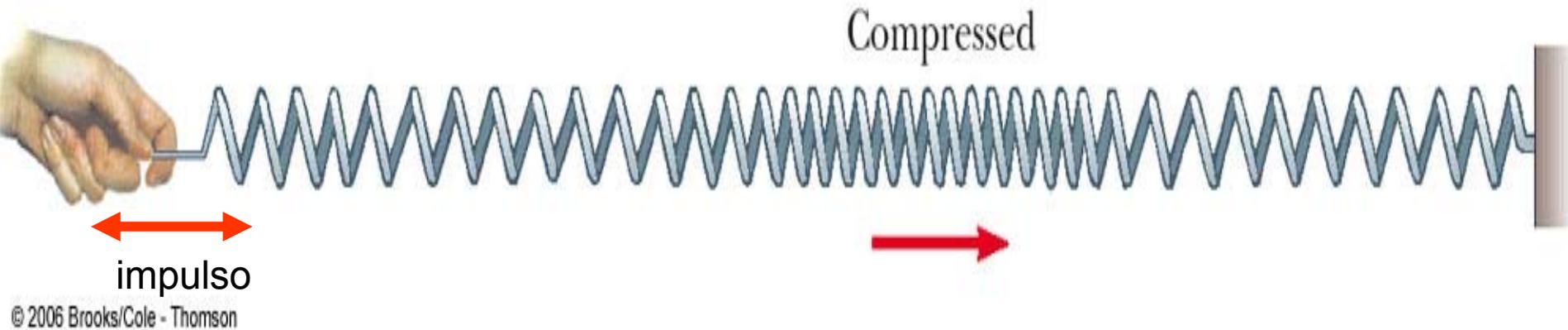


onde trasversali



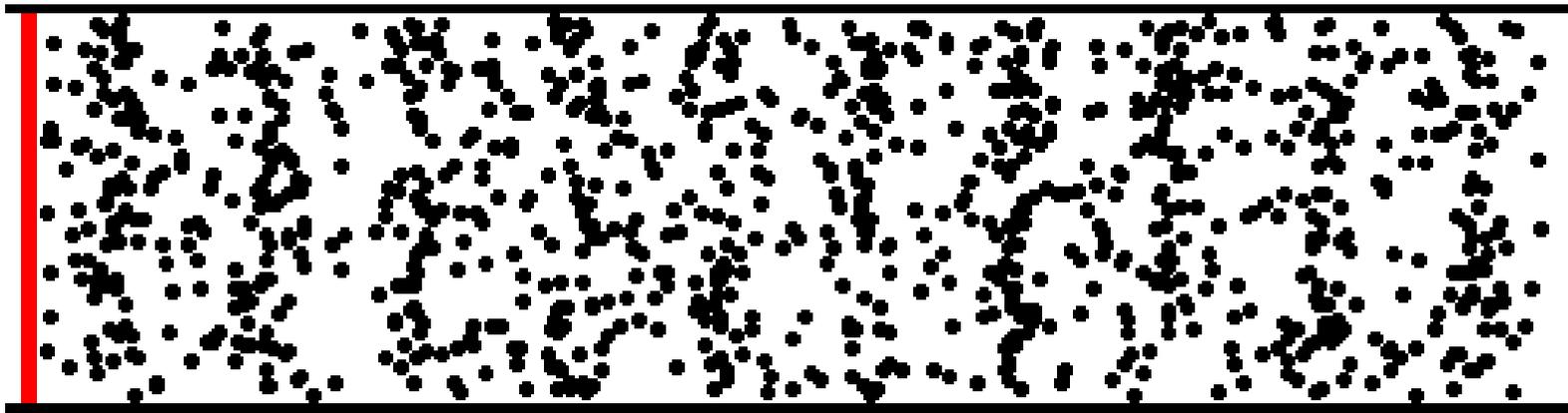
Animation courtesy of Dr. Dan Russell, Kettering University

Onde meccaniche longitudinali: le particelle del mezzo oscillano attorno alla loro posizione di equilibrio parallelamente alla direzione di propagazione dell'onda



Molla in tensione → un'insieme di spire all'estremità libera e' spinto avanti e indietro

onde longitudinali acustiche



Compressione ed espansione si propagano! Possono essere rappresentate come onde di pressione (piu' facile da misurare dello spostamento)

Animation courtesy of Dr. Dan Russell, Kettering University

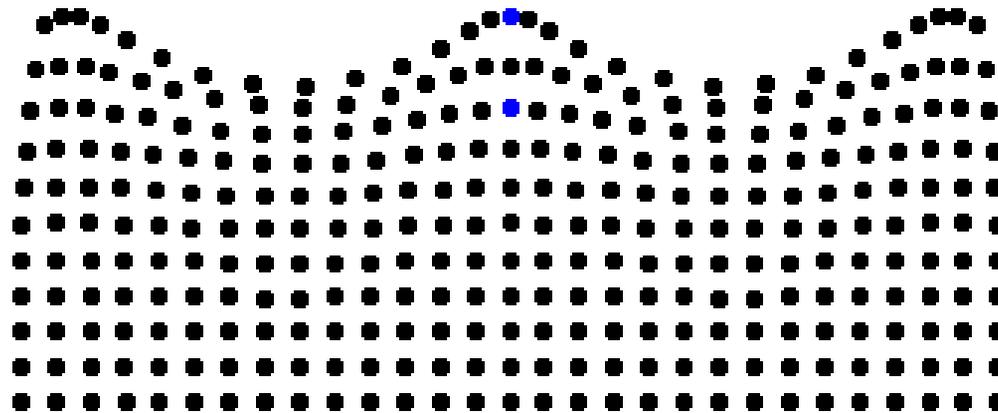
Altri tipi d'onde:

Nei solidi si possono propagare sia onde trasversali che onde longitudinali meccaniche. Atomi e molecole oscillano attorno alle loro posizioni d'equilibrio in qualunque direzione. Nei fluidi solo le onde longitudinali possono propagarsi → non c'è forza di richiamo da sfruttare per la propagazione delle onde trasversali per la deformabilità del fluido. È necessario che il mezzo eserciti forza parallela al piano di oscillazione. Nel liquido non è possibile.

-onde sismiche: nei terremoti vengono prodotte sia onde trasversali che onde longitudinali o di compressione

Vi sono poi le onde di superficie che si propagano all'interfaccia tra due materiali.

Onda superficiale nell'acqua



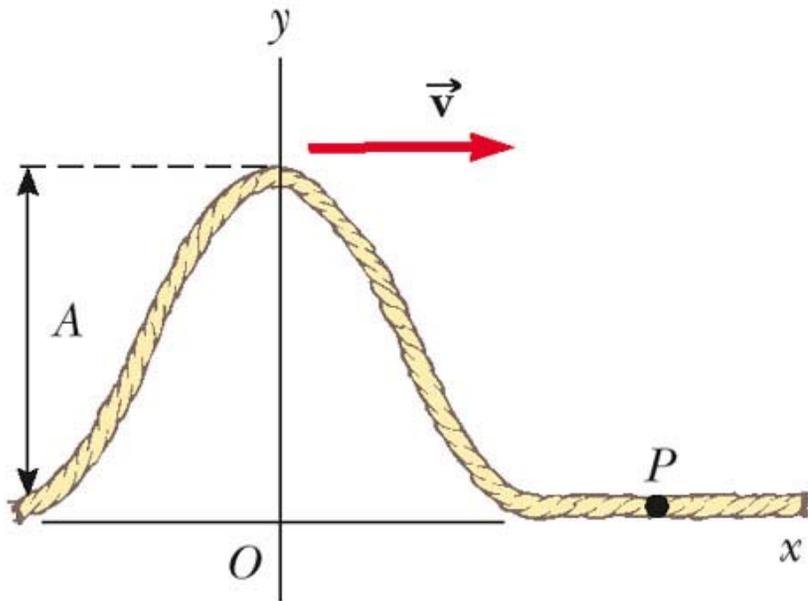
©1999, Daniel A. Russell

Il moto di ciascuna particella d'acqua alla superficie e' circolare o ellittico, combinazione di moto ondoso trasversale e longitudinale.

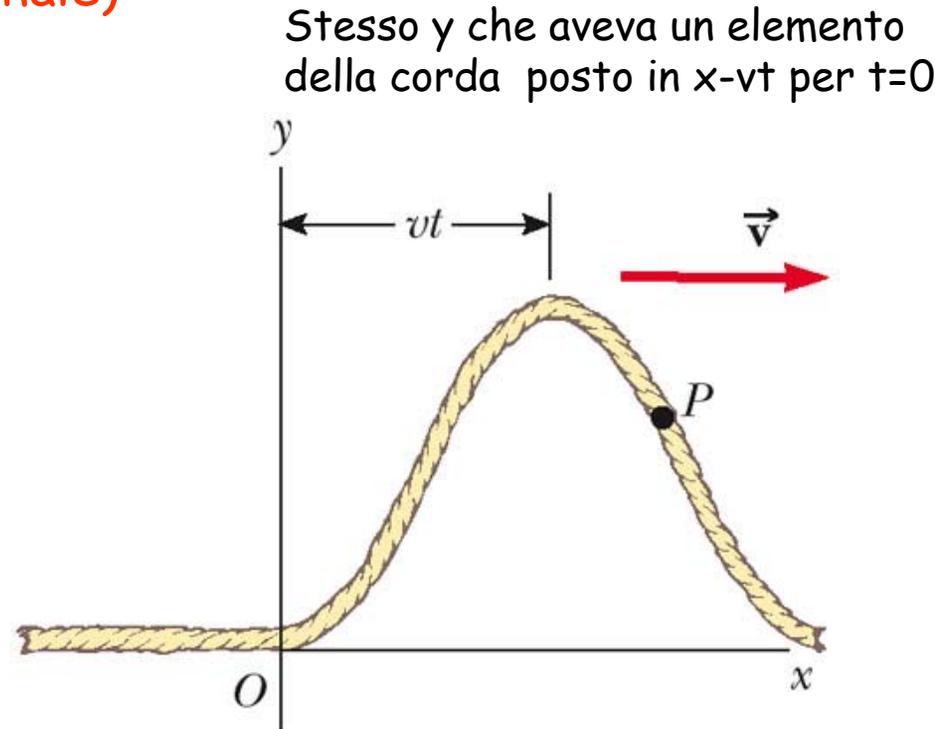
Animation courtesy of Dr. Dan Russell, Kettering University

A meno di effetti di *distorsione* l'impulso si propaga parallelo a sè stesso: la forma resta invariata $y = f(x)$ a $t=0$. Dopo t lo spostamento verticale del punto P è $y = f(x - vt)$

$f(x, t)$ **funzione d'onda (unidimensionale)**



(a) Pulse at $t=0$



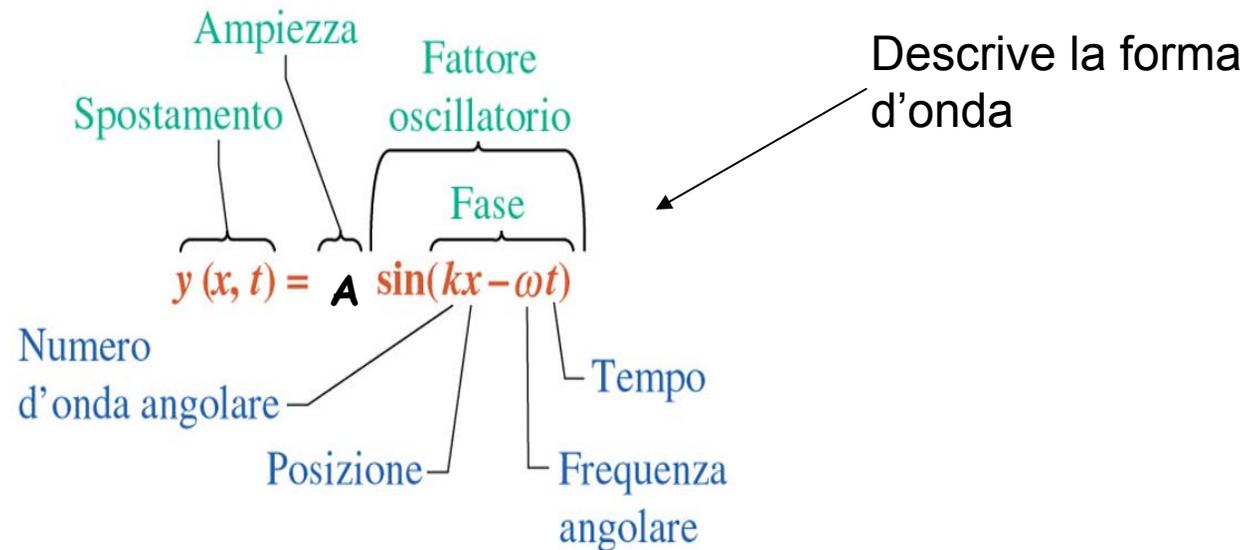
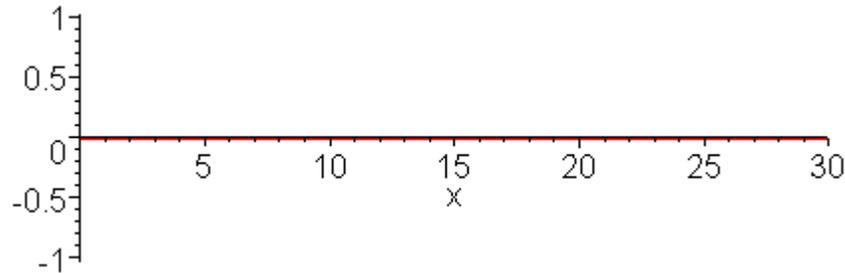
(b) Pulse at time t

Stesso y che aveva un elemento della corda posto in $x-vt$ per $t=0$

Per un sistema di riferimento fermo con l'origine in O :

$$y(x, t) = f(x - vt) \quad \text{oppure} \quad y(x, t) = f(x + vt) \quad (\text{onda retrograda})$$

Onde sinusoidali



Sono generate da una perturbazione periodica continua , la forma e' sinusoidale sia nello spazio che nel tempo

PARAMETRI CARATTERISTICI DI UN'ONDA

cresta

Periodo T = minimo intervallo di tempo dopo il quale il fenomeno ritorna alla stessa configurazione = durata di una oscillazione (UDM SI s).

Frequenza ν = numero di cicli completi al sec
Se 1 oscillazione dura n secondi, in 1 secondo ci sono $1/n$ oscillazioni (UDM SI Hz) $\nu = 1/T$

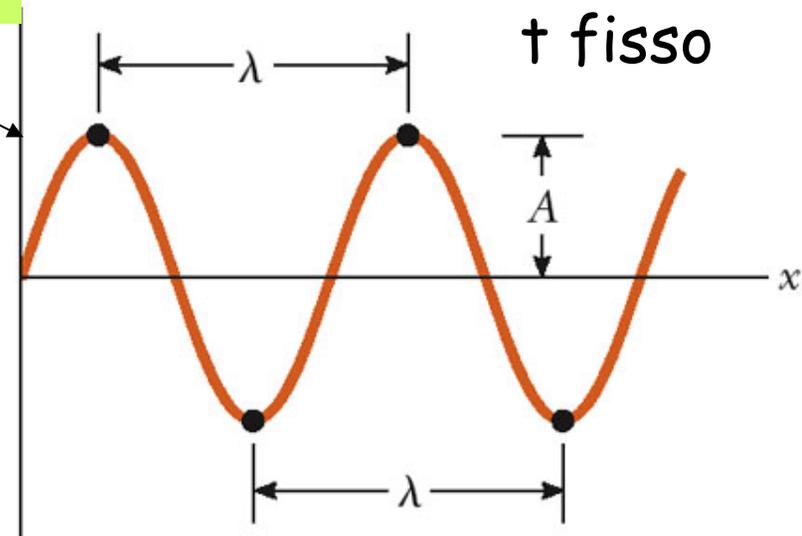
Lunghezza d'onda λ : distanza tra due creste o tra due valli successive (o tra due punti qualsiasi identici successivi) (UDM SI m)

Ampiezza: Massima altezza di una cresta

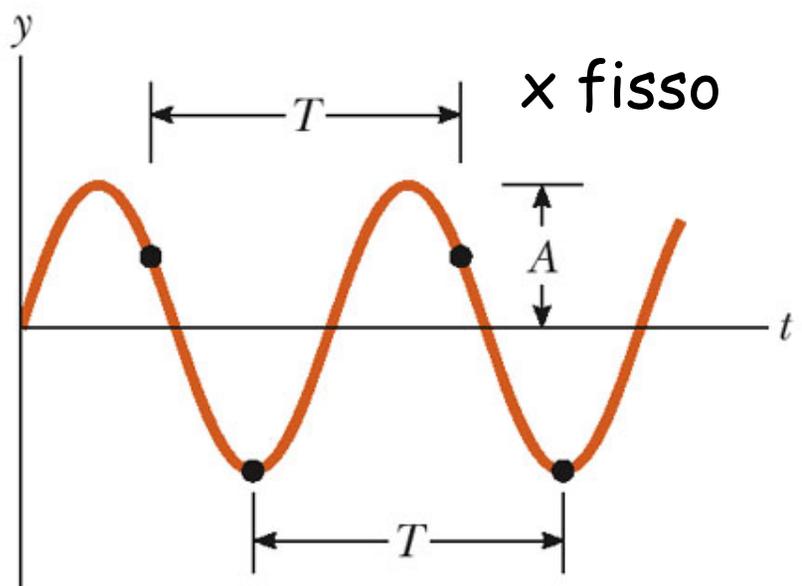
Numero d'onda: $k = 2\pi/\lambda$ (UDM SI rad m⁻¹)

Vel dell'onda $v = \lambda / T = \omega / k = \lambda \nu$

Pulsazione $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$ (UDM SI rad s⁻¹)



(a)



Qual'è la velocità di un'onda che ha lunghezza d'onda 5m e frequenza 5 Hz?

onda sinusoidale: singoli punti oscillano come oscillatori armonici semplici

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

Piu' in generale
(se per $t=0$ e $x=0$, y non e' nullo)

$$y = A \sin(kx - \omega t + \phi)$$

Cost. di fase

Equazione lineare delle onde:

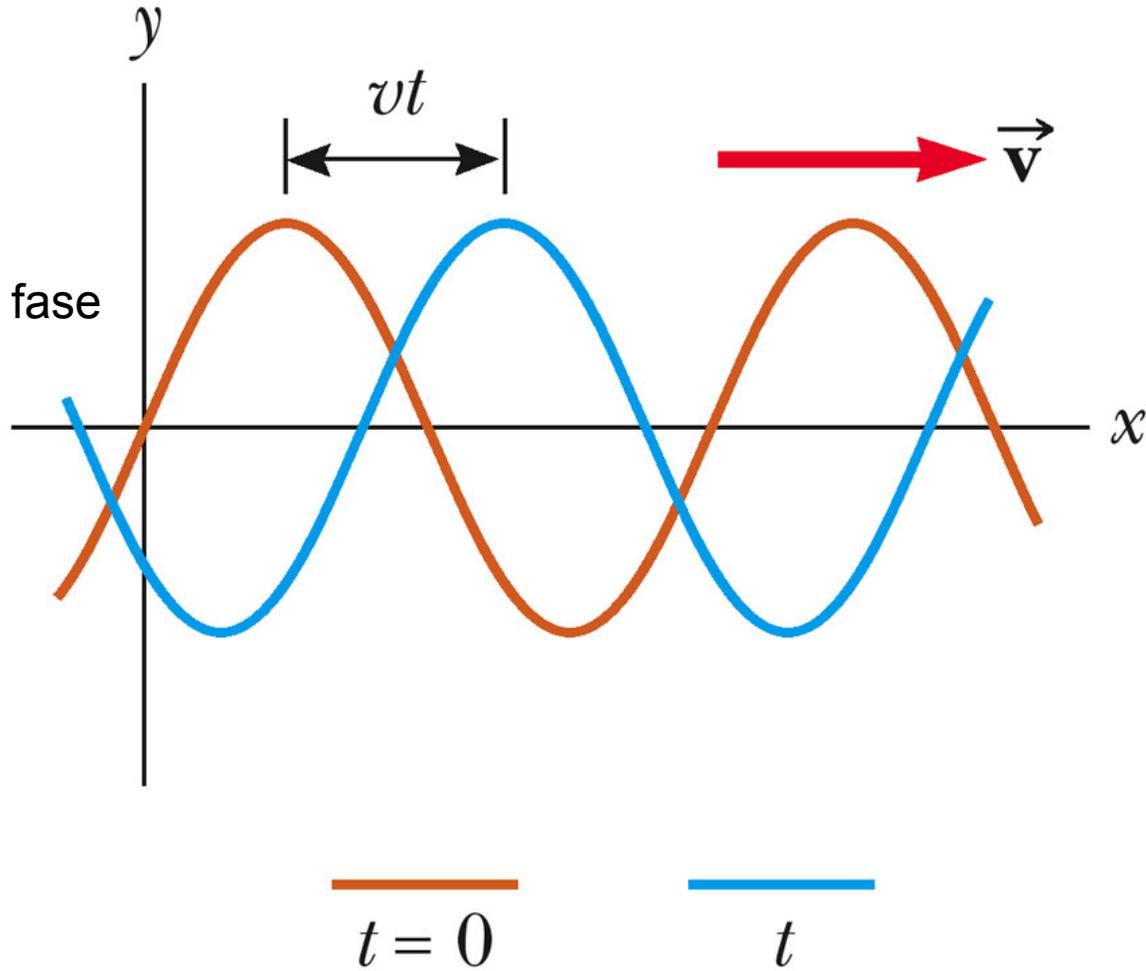
$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

soluzioni

$$y(x, t) = f(x \pm vt)$$

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

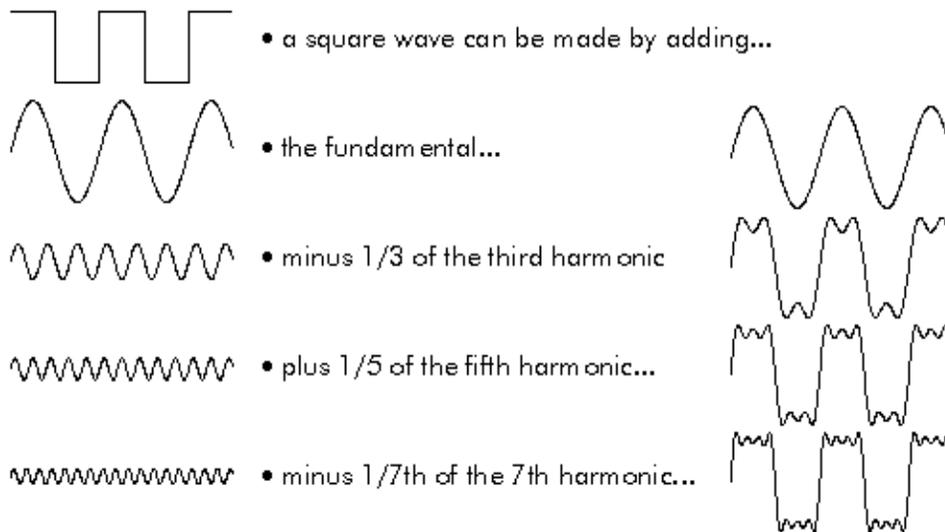
$$y(x, t) = A \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \right]$$



© 2006 Brooks/Cole - Thomson

onda progressiva

Qualsiasi forma d'onda complessa puo' essere univocamente espressa dalla sovrapposizione di onde sinusoidali di lunghezza d'onda, frequenza e ampiezza definite: le sue componenti di Fourier.



Un'onda sinusoidale che si propaga nel verso positivo delle x ha ampiezza 15.0 cm, lunghezza d'onda 40.0 cm e frequenza 8.00 Hz. Lo spostamento verticale del mezzo a $t=0$ e $x=0$ e' 15.0 cm.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = 0.157 \text{ rad / cm}$$

$$T = \frac{1}{\nu} = 0.125 \text{ s}$$

$$\omega = 2\pi\nu = 50.3 \text{ rad / s}$$

$$v = \lambda\nu = 320 \text{ cm / s}$$

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

$$y(0, 0) = A \sin(\phi) = (15.0 \text{ cm}) \sin \phi = 15.0 \text{ cm}$$

$$\sin \phi = 1 \Rightarrow \phi = \pi / 2 \text{ rad}$$

$$y(x, t) = A \sin\left(kx - \omega t + \frac{\pi}{2}\right) = A \cos(kx - \omega t)$$

Energia trasportata dalle onde

Le onde trasportano energia.

Consideriamo per ora quelle meccaniche. Se si propagano in un mezzo l'energia e' trasferita sotto forma di energia vibrazionale da una particella all'altra del mezzo.

Per onda sinusoidale \rightarrow le particelle si muovono di moto armonico semplice.

L'energia per ogni particella:

$$E \propto A^2 \leftarrow \text{Ampiezza del suo moto}$$

L'ENERGIA TRASPORTATA E' PROPORZIONALE AL QUADRATO DELL'AMPIEZZA

Intensita' di un'onda: energia per unita' di tempo(potenza) trasportata attraverso l'unita' di superficie perpendicolare alla direzione del flusso di energia:

$I = \text{potenza/area}$

S.I. W/m^2

$I \propto A^2$

Se un'onda si propaga in tutte le direzioni e' 3D: es. Onde dei terremoti, onde luminose. Se il mezzo e' isotropo (stesse proprieta' in tutte le direzioni) ho onde sferiche.

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

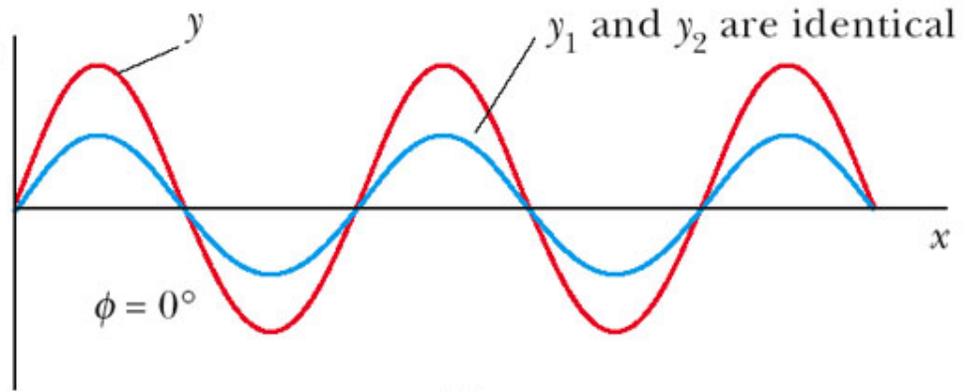
Se $P = \text{cost}$ decresce come l'inverso del quadrato della distanza dalla sorgente

Per un'onda 1D non c'e' diminuzione dell'intensita'

Considerate due punti a distanza r_1 ed r_2 dalla sorgente. Qual'è il rapporto tra le intensità? Se r_2 è il doppio di r_1 a quanto equivale? Qual'è il rapporto tra le ampiezze?

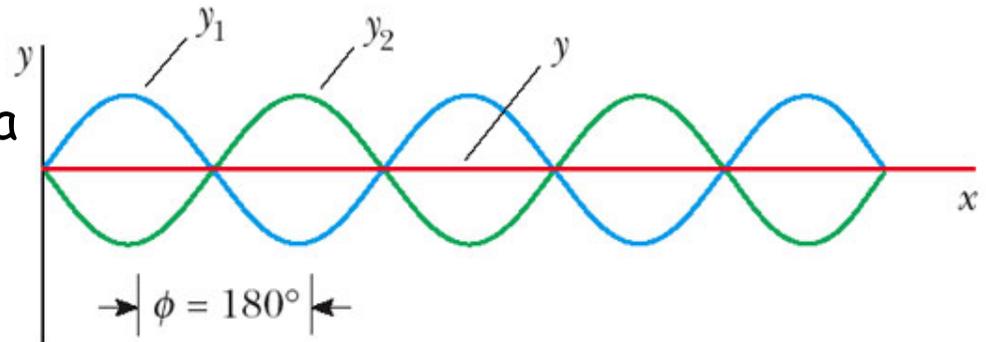
Sovrapposizione di onde

Onde identiche in fase **interferenza costruttiva**



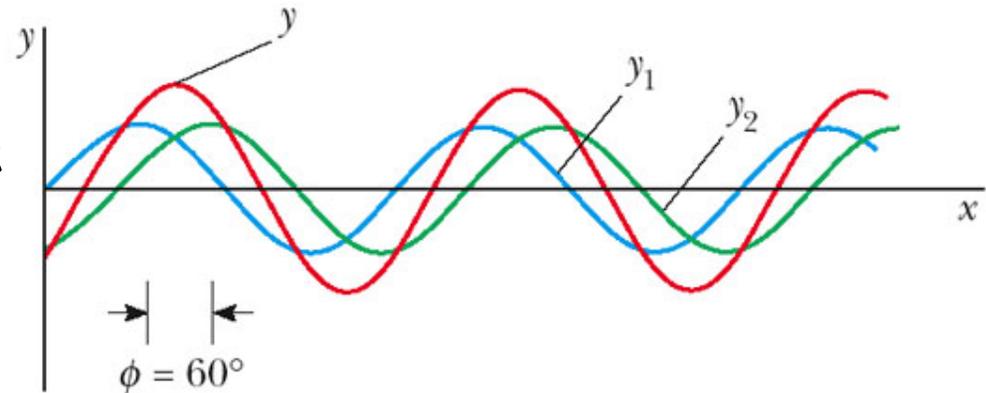
(a)

Onde identiche in Opposizione di fase **interferenza distruttiva**



(b)

interferenza normale



Principio di sovrapposizione

Se due o più onde che si propagano in un mezzo si combinano in un punto, l'ampiezza risultante è la somma algebrica delle ampiezze delle singole onde

Onde stazionarie

Non si propagano. Sovrapposizione di due onde identiche che viaggiano in direzioni opposte:

$$y_1 = A \sin(kx - \omega t); \quad y_2 = A \sin(kx + \omega t)$$

$$y_1 + y_2 = 2A \sin kx \cos \omega t$$

Es in una corda: I nodi sono i punti dove la corda rimane ferma (interferenza distruttiva) mentre i ventri sono i punti di interferenza costruttiva, dove la corda oscilla con la massima ampiezza. Nodi e ventri sono fissi per una data frequenza. Le frequenze a cui vengono prodotte onde stazionarie sono dette frequenze naturali o risonanti

$$x = n \frac{\lambda}{2}, n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad \text{nodi}$$

$$x = n \frac{\lambda}{4}, n = 1, 3, \dots \quad \text{ventri}$$

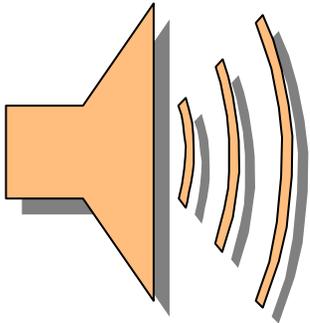


Imp: queste onde possono essere localizzate in uno spazio limitato

FENOMENI SONORI

I suoni sono onde longitudinali, **di pressione**, che si propagano in un mezzo, ma non nel vuoto. La sorgente e' oggetto viv=brante, ma lo e- anche il rivelatore(es timpano dell'orecchio)

L'intensita` di un suono (che si misura in SI in W/m^2), di ampiezza A e frequenza ν , che si propaga alla velocita` v in un mezzo di densita` ρ , e` definita da:



$$I = 2\pi^2\nu\rho A^2\nu^2$$

Proporzionale ai quadrati della frequenza e dell'ampiezza dell'onda in ciascun punto e alla velocita' dell'onda

La velocita' del suono cambia a seconda delle proprieta' del mezzo (nell'aria a $0^\circ C$ e 1 atm 331 m/s, a $20^\circ C$ 343 m/s)

Intensita' della sensazione sonora- correlata all'energia trasportata dall'onda sonora

Il tono- determinato dalla frequenza, minore e' la frequenza piu' basso e' il suono.

L'orecchio umano e' sensibile a frequenze tra 20 Hz e 20k Hz → intervallo di udibilita'. (con l'invecchiamento diminuisce limite superiore fino a 1/2)

Sopra 20000Hz raggiungono l'orecchio, ma non sono udibili → ULTRASUONI

Molti animali possono udirli(I cani fino a 50 kHz e i pipistrelli fino a 100 kHz)

Hanno numerose appliczioni ad es in medicina. Per frequenze <20 Hz sono dette infrasoniche e sono pericolose anche se non udibili perche' possono danneggiare il corpo umano

I suoni udibili dall'uomo hanno $20 \text{ Hz} < \nu < 20 \text{ kHz}$, se il suono si propaga nell'aria a temp. ambiente quali sono le lunghezze d'onda?

$$17.2 \text{ m} < \lambda < 1.72 \text{ cm}$$

E in acqua ($v_{\text{acqua}} = 1450 \text{ m/s}$)?

$$72.5 \text{ m} < \lambda < 7.25 \text{ cm}$$

L'orecchio umano puo' udire suoni di bassa intensita' a partire dal pW/m^2 sino a intensita' elevate pari a 1 W/m^2 . E' un intervallo molto ampio.

I sensi dell'uomo (udito e vista) hanno risposta logaritmica allo stimolo a cui sono sottoposti.

Per produrre un suono che percepiamo di intensita' doppia, l'onda sonora deve avere 10 v l'intensita' della prima.

Si utilizza una scala logaritmica \rightarrow UDM e' il **bel** (da A.G. Bell l'inventore del telefono) o piu' comunemente il decibel dB (1/10 di bel)

L'intensita` del suono si misura in decibel [dB] dalla **soglia di udibilita`** $I_0 = 10^{-12}$ W/m².

La relazione tra l'intensita` di un suono I e il suo livello β in decibel e` :
(per es. se $I = 10^{-4}$ W/m², $\beta = 80$ dB).

$$\beta = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

La **soglia del dolore** e` data da ~ 1 W/m². \rightarrow 120dB

In Corso Vittorio Emanuele nelle ore di punta il livello del suono e' 70 dB.
Qual'e' l'intensita' del suono?

$$\beta = 70dB = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

$$\frac{I}{I_0} = 10^7 \Rightarrow I = (10^{-12} \text{ W / m}^2) 10^7 = 1.0 \cdot 10^{-5} \text{ W / m}^2$$

Il livello sonoro del rombo di un aereo a 30 m di distanza e' 140 dB. Calcolare l'intensita' del Suono. Che livello d'intensita' si ha a 300 m (ignorando riflessioni del terreno)?

$$\beta = 140dB = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

$$\frac{I}{I_0} = 10^{14} \Rightarrow I = (10^{-12} \text{ W / m}^2) 10^{14} =$$

$$1.0 \cdot 10^2 \text{ W / m}^2$$

A 300 m (1/10 della distanza iniziale)
 $I' = 1/100 I$ che corrisponde a 20 dB
di variazione \rightarrow 120 dB

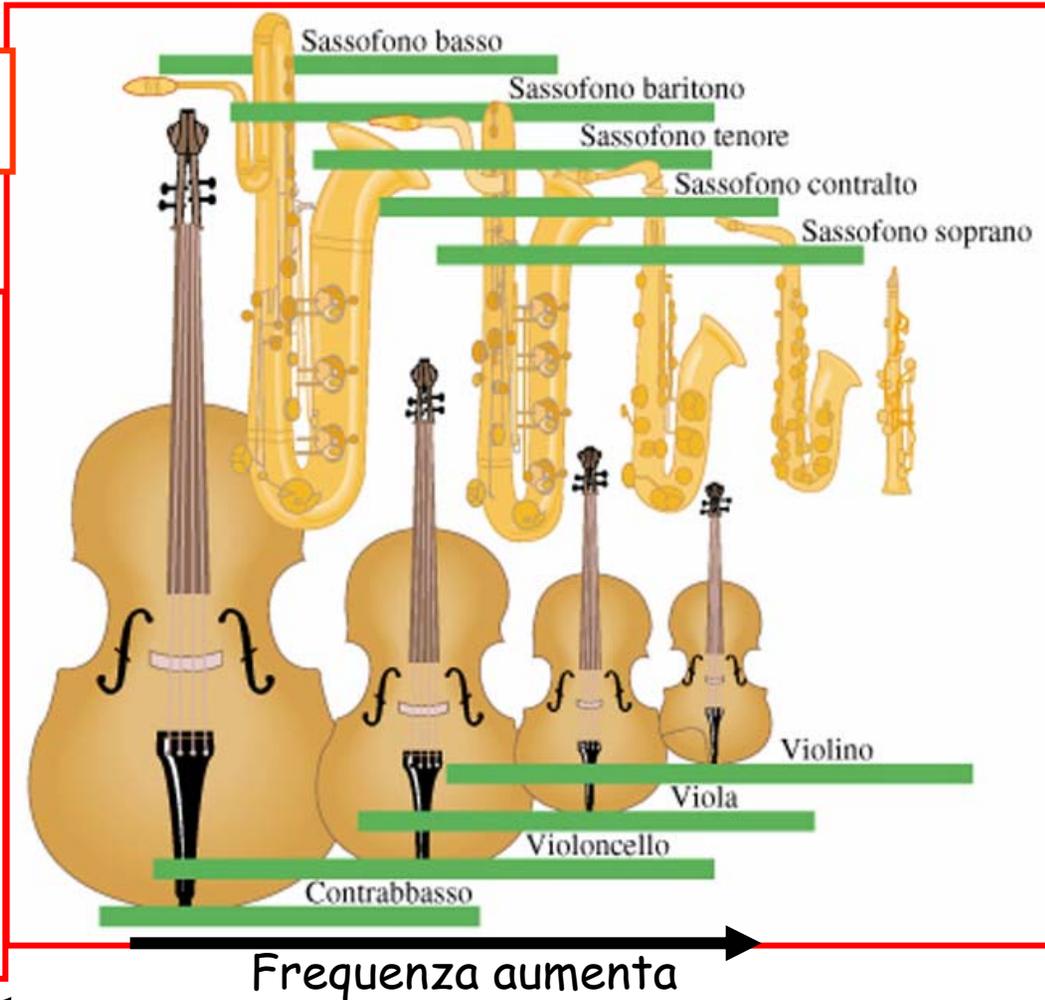
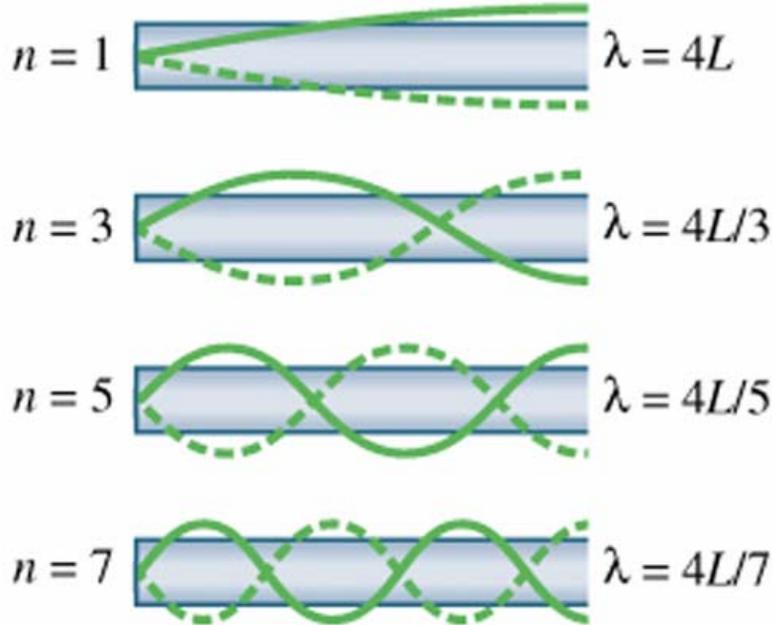
Per casa

Un la₃ ha una frequenza di 440 Hz .Qual'e' la sua lunghezza d'onda in aria ($v_{\text{suono}}=340 \text{ m/s}$) e in acqua($v_{\text{suono}}=1450 \text{ m/s}$) ? E la sua pulsazione?

Sorgenti sonore

Aria in una cavita': tubo chiuso (canna d'organo)

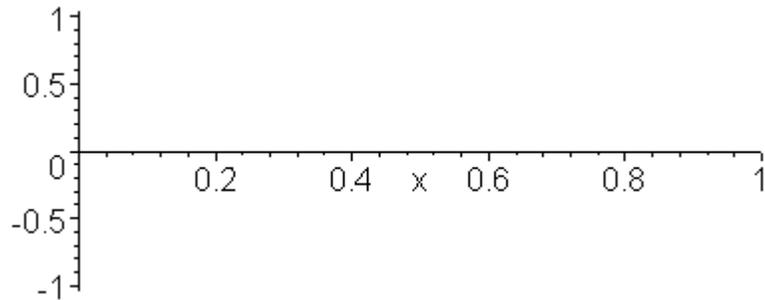
$$L = n \frac{\lambda_n}{4} \quad n - \text{dispari}$$



Sono sempre oggetti che vibrano. → Per gli strumenti musicali si producono onde stazionarie → le sorgenti vibrano alle loro frequenze di risonanza naturali. La corda oscillando mette in vibrazione l'aria che produce un'onda sonora della stessa frequenza

Onde stazionarie nelle corde

In una corda ci sono condizioni al contorno: solo le onde in cui alle estremità corrispondono due nodi sono permesse



$n=1$

$$L = n \frac{\lambda_n}{2}; n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$

Solo onde con queste lunghezze d'onda sono permesse

$$v_n = \frac{v}{\lambda_n} = n \frac{v}{2L} = n v_1$$

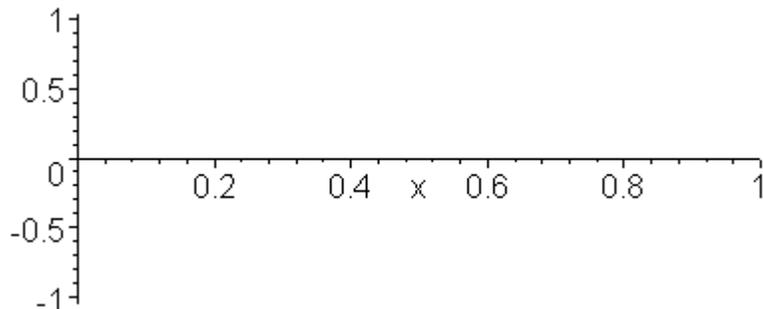
$n=2$

FUORI PROGRAMMA

Formano una sequenza armonica

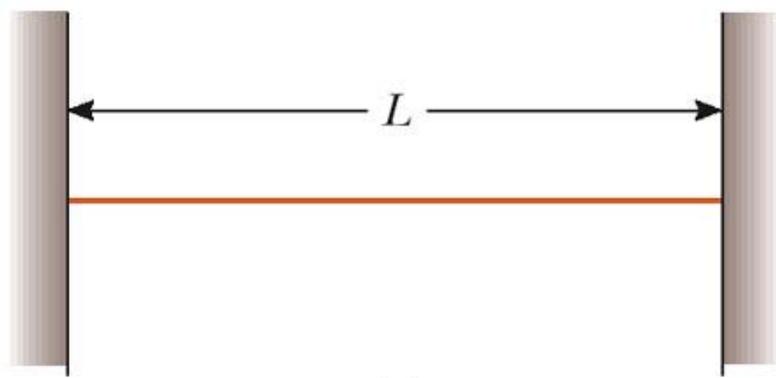
$n=3$

n indica il numero dell'armonica ciascuna delle frequenze risonanti e' multiplo intero della frequenza fondamentale

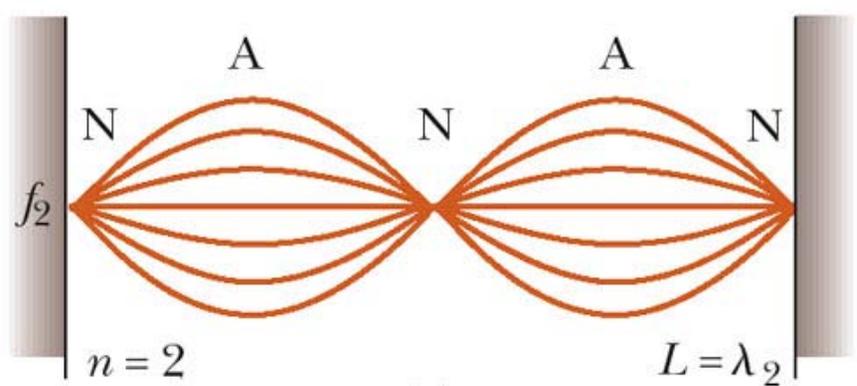


$$v = \sqrt{\frac{F_T}{m/L}}$$

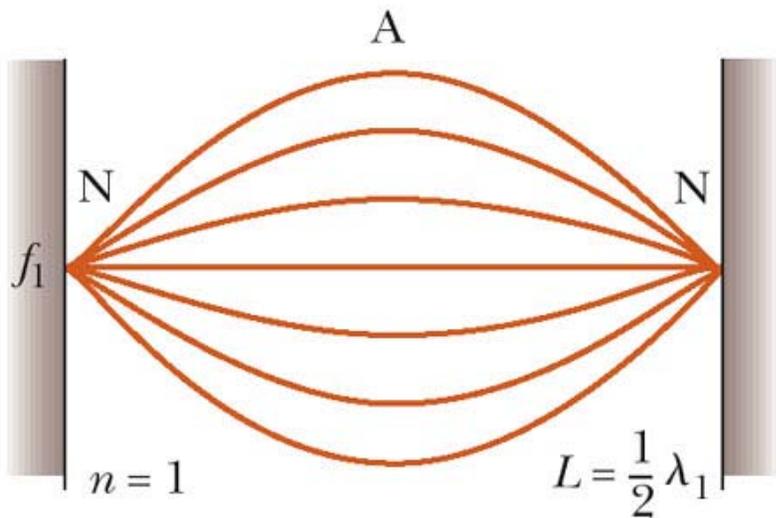
L'orecchio sente v_1 mentre le armoniche superiori formano timbro e qualita' del suono



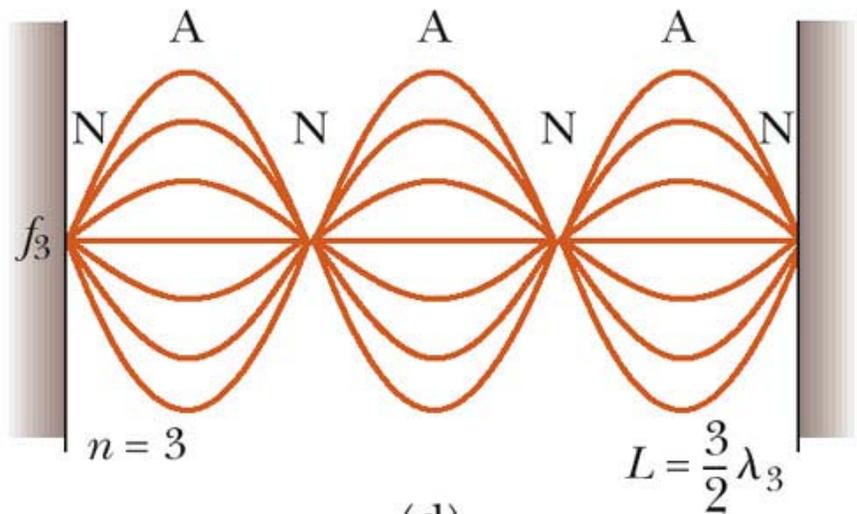
(a)



(c)



(b)



(d)

Il tono dello strumento viene determinato dalla frequenza fondamentale. Velocita' e lung. d'onda dell'onda sono diverse nella corda e in aria. Sono uguali le frequenze

Le onde stazionarie sono prodotte non solo nelle corde(es. Tamburo). Le frequenze risonanti dipendono dalla dimensione dell'oggetto. Gli oggetti grandi hanno frequenze risonanti piu' basse degli oggetti piu' piccoli. Negli strumenti a corda, la cassa armonica permette amplificazione dei suoni perche' c'e' piu' estesa superficie in contatto con l'aria.

Perche' si dice che la distanza cui e' caduto un fulmine si puo' stimare considerando un km ogni 3 s trascorsi prima di udire il tuono?

Effetto Doppler

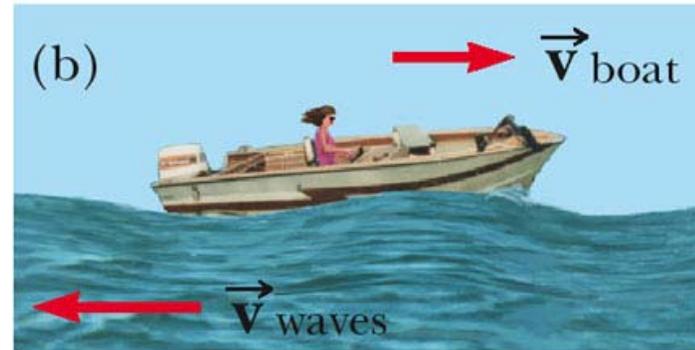
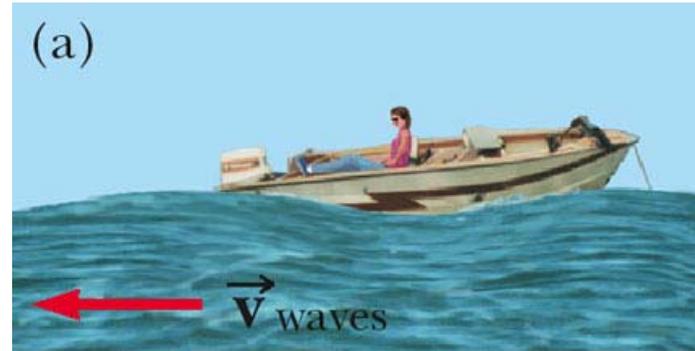
si verifica quando c'è **moto relativo** tra l'osservatore e la sorgente delle onde:
la frequenza registrata dall'osservatore (frequenza **apparente**) è differente da quella alla sorgente.

Se sorgente e osservatore si avvicinano la frequenza sembra maggiore e viceversa

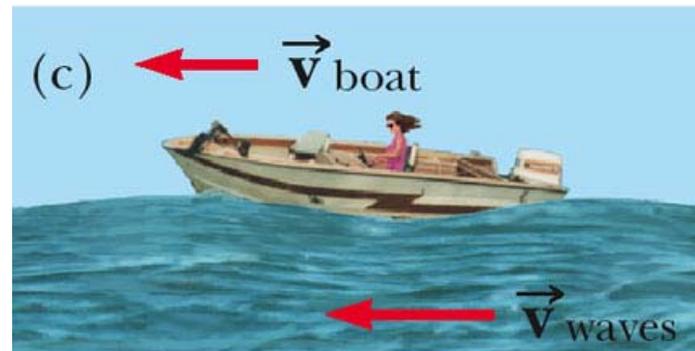
Avviene per ogni tipo d'onde

La frequenza dipende solo dalla velocità relativa tra sorgente e osservatore e non dalla loro mutua distanza

Considereremo come sistema di riferimento
Il volume d'aria attraverso cui si muovono le onde

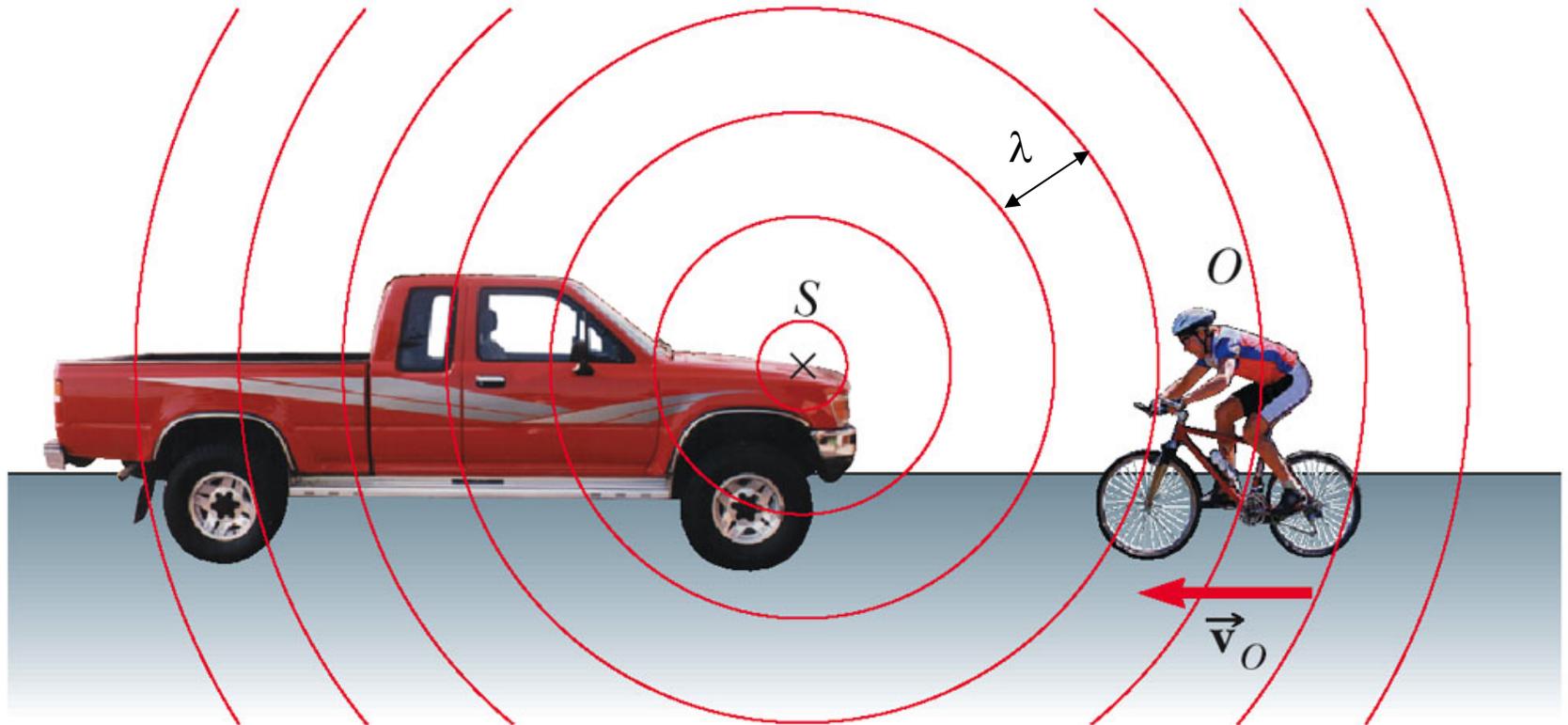


Freq.
maggiore



Freq.
minore

fronti d'onda



© 2006 Brooks/Cole - Thomson

La sorgente è ferma rispetto all'aria

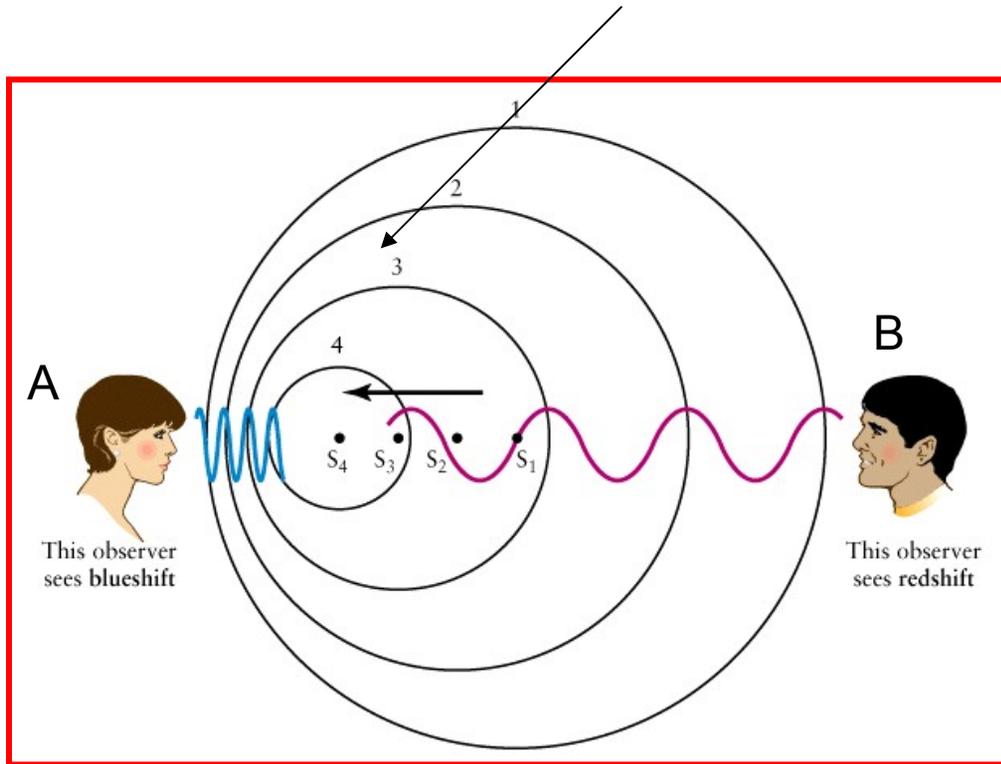
$v_{rel} = v + v_0$ ma la lunghezza d'onda non cambia

$$v' = \frac{v_{rel}}{\lambda} = \frac{v + v_0}{\lambda} = v \left(\frac{v + v_0}{v} \right)$$

Frequenza apparente per l'osservatore che si muove verso la sorgente

Per semplicità il moto di sorgente e/o ricevitore è sulla stessa coordinata

Oppure si muove la sorgente: A percepisce una frequenza più alta (la sorgente si muove verso di lui), B più bassa



$$v' = v_0 \frac{v}{v \pm v_s}$$

$$\Delta v = \frac{2v_s / v}{1 - v_s^2 / v^2} v$$

In modo generale se l'osservatore si muove con vel v_0 e la sorgente con v_s lungo la stessa linea:

$$v' = v_0 \frac{v + v_0}{v - v_s}$$

Si usa segno positivo per le velocità
Per l'avvicinamento e negativo per
l'allontanamento →

Avvicinamento = aumento della frequenza
percepita

Allontanamento = diminuz. Freq. percepita

Vale se $v > v_s$ e $v > v_0$

Oltre la velocità
del suono $v=v_s$
il denominatore
tende a infinito

si genera un'onda
d'urto
(boom sonico)
qui visibile perchè
causa la conden-
sazione del vapore
acqueo



Due treni si avvicinano ognuno con velocità 30 m/s rispetto al terreno.

Se uno dei due treni emette un fischio di frequenza 500 Hz.

che frequenza si rileva sull'altro treno?

Se soffia un vento a 30 m/s in direzione opposta alla velocità del treno che ha fischiato che frequenza si misura? Invertendo la direzione del vento?

a)
$$v' = v_0 \frac{v + v_0}{v - v_s} = 500 \text{ Hz} \frac{(343 \text{ m/s} + 30 \text{ m/s})}{(343 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s})} = 595.8 \text{ Hz}$$

Vel del vento opposta
Alla propagazione dell'onda

b)
$$v' = v_0 \frac{v + v_0}{v - v_s} = 500 \text{ Hz} \frac{(343 \text{ m/s} + 30 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s})}{(343 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s})} = 606 \text{ Hz}$$

c)
$$v' = v_0 \frac{v + v_0}{v - v_s} = 500 \text{ Hz} \frac{(343 \text{ m/s} + 30 \text{ m/s} + 30 \text{ m/s})}{(343 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s} + 30 \text{ m/s})} = 587.5 \text{ Hz}$$

Una locomotiva, che si muove a 64 km/h emette un fischio a 500Hz.
Determinare la frequenza:

- a) Del suono udito da un passeggero del treno
- b) Del suono udito da una persona ferma sui binari dietro il treno
- c) Del suono udito da una persona ferma sui binari davanti al treno

Durante un concerto all'aperto spira una leggera brezza ($v_m = 25 \text{ km/h}$) nella direzione che va dalla platea verso il palco dove si trovano i musicisti.

Se la vel del suono se l'aria e' in quiete e' 348 m/s con che frequenza viene udito da uno spettatore in platea il Do medio ($\nu = 261.6 \text{ Hz}$)?

Che differenza percentuale di frequenza sente un ritardatario che cammina lungo la corsia centrale della platea con una velocita' di 2.7 km/h ?

Applicazioni varie:

- sonar(usa generalmente ultrasuoni)→si rivela impulso riflesso(o eco)
- immagini mediche con ultrasuoni (ecografia) 1-10 MHz→si rivela onda riflessa

Applicazioni del doppler:

Un corpo che riflette un'onda si comporta esso stesso come una sorgente di tali onde. Se esso e' in movimento posso misurare Doppler shift e inferirne la velocita'.Es:

- rivelatore velocita' auto: inviate microonde
- ecodoppler(medicina) per misurare velocita' del sangue e inferire anomalie. si usano ultrasuoni. Dallo shift rispetto alla frequenza incidente si puo' ricavare la velocita'. La cute del paziente viene trattata con un gel che consente la corretta trasmissione degli ultrasuoni emessi da una sonda

Si supponga che un cacciasommergibili dotato di sonar si muova verso ovest a 9.5 m/s rispetto al fondo del mare. Una corrente marina si muove verso est a 1.3 m/s . Se un sottomarino si sta dirigendo ad est verso il cacciasommergibili a 14 m/s qual'è il valore dello spostamento Doppler osservato con il sonar?
Il suono nel mare ha velocità 1480 m/s e la frequenza del suono è 8 kHz

SULLA NATURA DELLA LUCE

Ippocrate e **Aristotele** pensavano che l'occhio emettesse raggi per mezzo dei quali potesse "sentire" gli oggetti

Secondo **Galeno** (II secolo d.c.), l'occhio proietta uno "spirito visuale" per mezzo del quale il mondo esterno viene percepito

Keplero e **Cartesio** agli inizi del '600 svilupparono la conoscenza della rifrazione della luce

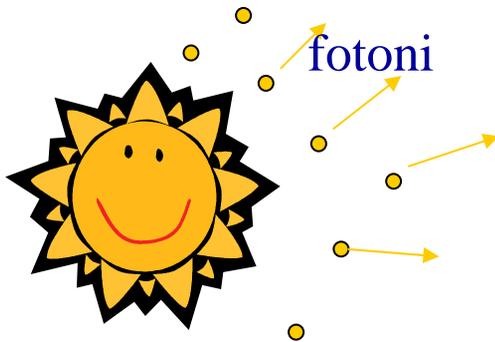
Newton sviluppò una teoria corpuscolare della radiazione, considerando cioè la luce come formata di particelle

Nello stesso periodo **Huygens** compì una serie di esperimenti che dimostrarono che la luce ha caratteristiche di onda (diffrazione e interferenza)

Che cos'è la luce?

**UN FLUSSO DI
PARTICELLE
MICROSCOPICHE**

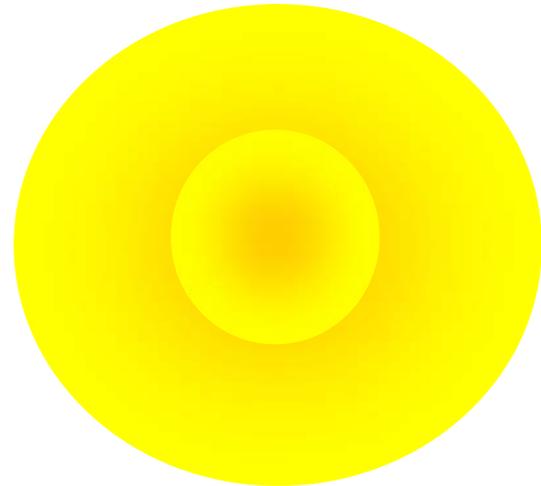
emesse a ritmo continuo dalle
sorgenti luminose



TEORIA CORPUSCOLARE

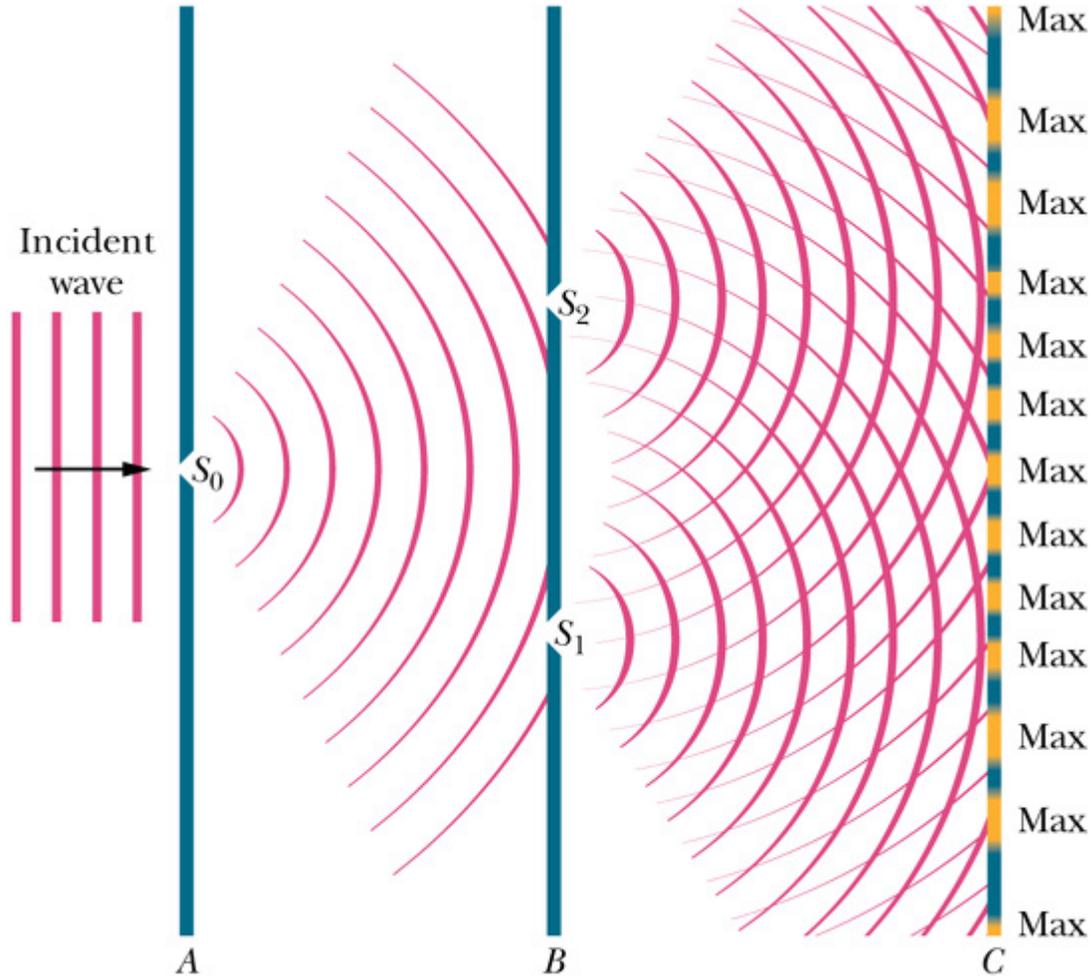
UN' ONDA

cioè energia
che si
propaga

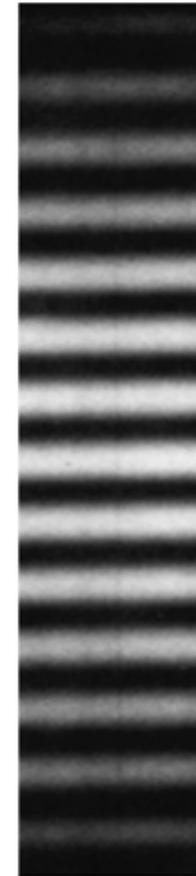


TEORIA ONDULATORIA

Esperimento di Young (1801)



Franghe di interferenza



Le 2 onde giungono in fase

frange chiare

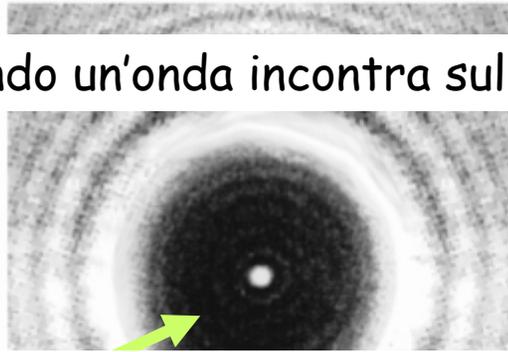
frange scure

Le 2 onde giungono in opposizione di fase

Interferenza tra due onde "coerenti": alimentate dallo stesso fronte d'onda elem.

Diffrazione(..la rivediamo piu' avanti)

Si verifica quando un'onda incontra sul suo percorso un'ostacolo o un'apertura



Gli effetti sono tanto piu' vistosi quanto piu' le dimensioni dell'apertura o dell'ostacolo sono vicine al valore della lunghezza d'onda delle onde incidenti

**INTERFERENZA
COSTRUTTIVA**
-non e' spiegabile
senza teo. ondulatoria



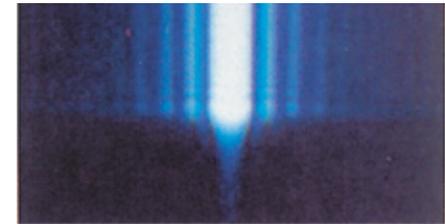
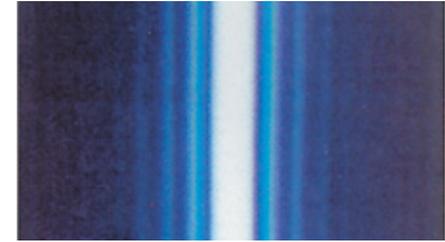
Figura 14.2

Punto luminoso di Poisson che si forma al centro della figura di diffrazione prodotta da un disco opaco.



Mazzoldi - Nigro - Voci
Elementi di Fisica - Onde
EdiSES

DIFFRAZIONE DA DISCO OPACO



Serway - Jewett
Principi di Fisica Vol.I
EdiSES

**DIFFRAZIONE DA
SOTTILE FENDITURA**

La figura di diffrazione da fenditura consiste di una banda centrale larga (max centrale) e bande secondarie piu' strette e meno intense (max. secondari) e da una serie di bande oscure(minimi)

1852 → Focault misura la velocità della luce in acqua e in aria

Per spiegare "rifrazione"

--per la teoria ondulatoria la velocità in aria doveva essere maggiore che in acqua

--per la teoria corpuscolare doveva essere vero il contrario

L'esperimento dimostrò che in acqua la velocità della luce è inferiore.

Vedremo che altre esperienze invece mettono in evidenza la natura corpuscolare

Si propagano nel vuoto con **velocità** :

$$v = 1 / \sqrt{\epsilon\mu}$$

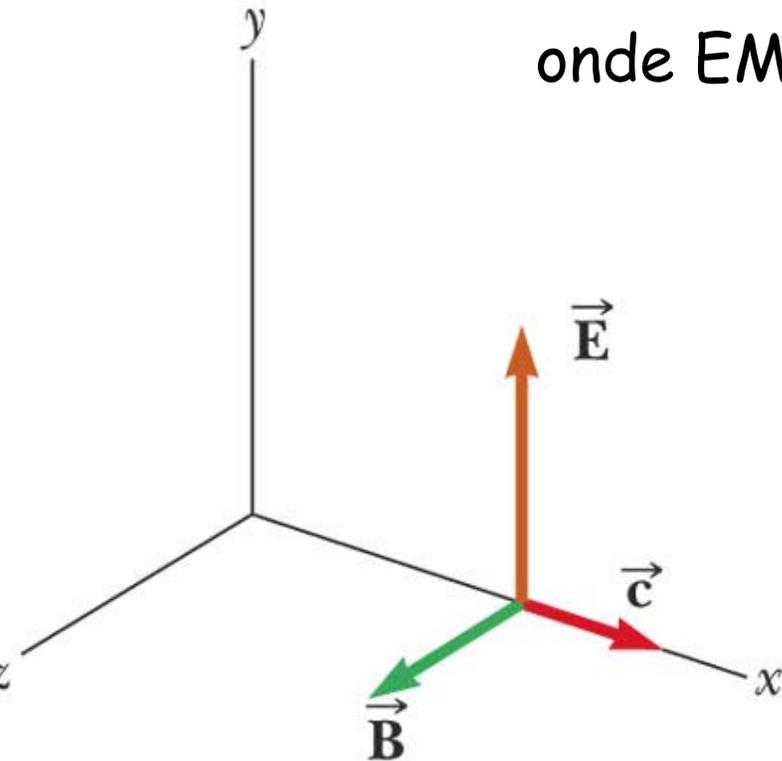
indipendente dalla frequenza e nel vuoto uguale alla vel della luce .

In ogni istante:

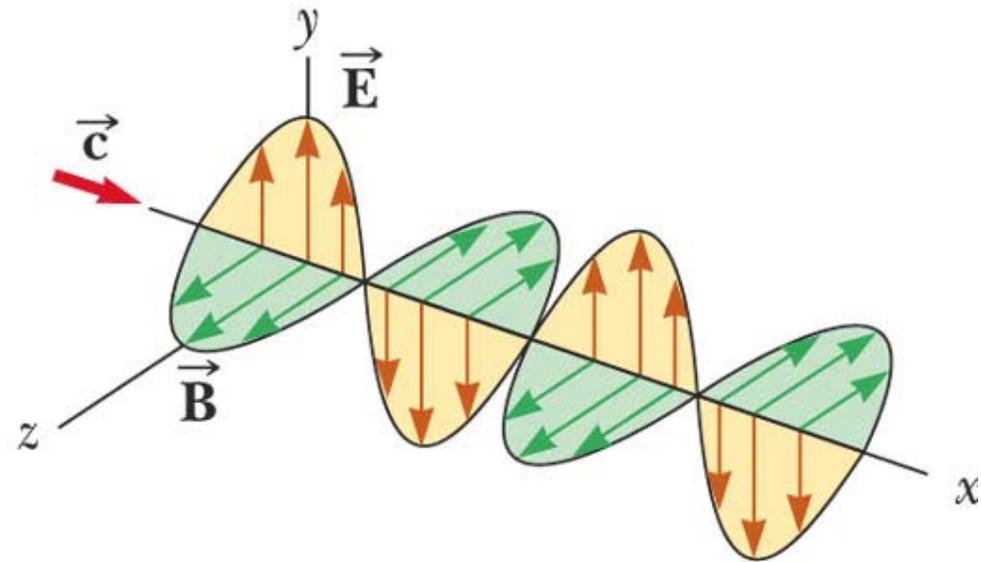
🐸 $E = c B$

🐸 E perpendicolare a B e perp alla velocità: sono onde trasversali!

onde EM piane



(a)



(b)

$$C = 2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Onde piane sinusoidali

- La soluzione più semplice dell'eq delle onde EM sono onde sinusoidali (E e B sono sempre in fase)

$$E = E_{\max} \sin (kx - \omega t)$$

$$B = B_{\max} \sin (kx - \omega t)$$

- Il numero d'onda è $k = 2\pi / \lambda$, λ è la lunghezza d'onda
- La frequenza angolare o pulsazione è $\omega = 2\pi\nu$
- onde EM sono onde lineari: vale il principio di **sovrapposizione**

$$\frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{2\pi/\lambda} = \lambda f = c$$

Sono *monocromatiche* (ossia descritte da una sola frequenza di oscillazione)

La lunghezza d'onda dipende dall'*indice di rifrazione* n del mezzo attraversato: $\lambda = \lambda_0/n$. Nel vuoto si ha $n = 1$, e quindi $\lambda = \lambda_0$; in ogni altro mezzo si ha $n > 1$ (per esempio in acqua $n = 1,33$) per cui $\lambda < \lambda_0$.

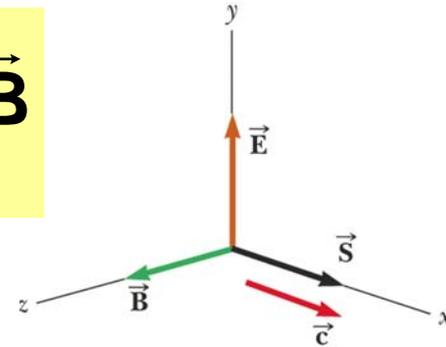
Anche la velocità di propagazione di un'onda elettromagnetica dipende dal mezzo attraversato. Le onde elettromagnetiche si propagano nel vuoto alla velocità costante $c = 3 \cdot 10^8$ m/s mentre, in un mezzo con indice di rifrazione n , la velocità di propagazione è $v = c/n = \lambda_0 \nu / n = \lambda \nu$ (per es. in acqua $v \sim 2 \cdot 10^8$ m/s)

Ricordiamo: La relazione $v = \lambda \nu$ vale per tutti i fenomeni ondosi, anche per il suono. Per esempio, il la_3 (di frequenza $\nu = 435$ Hz) in aria (dove $n \sim 1$ e $v = 340$ m/s) ha $\lambda = v/\nu = 340/435 = 0,78$ m, in acqua (dove $n = 1.33$ e quindi $v = 1450$ m/s) si ha $\lambda = v/\nu = 1450/435 = 3,33$ m.

Energia delle onde EM

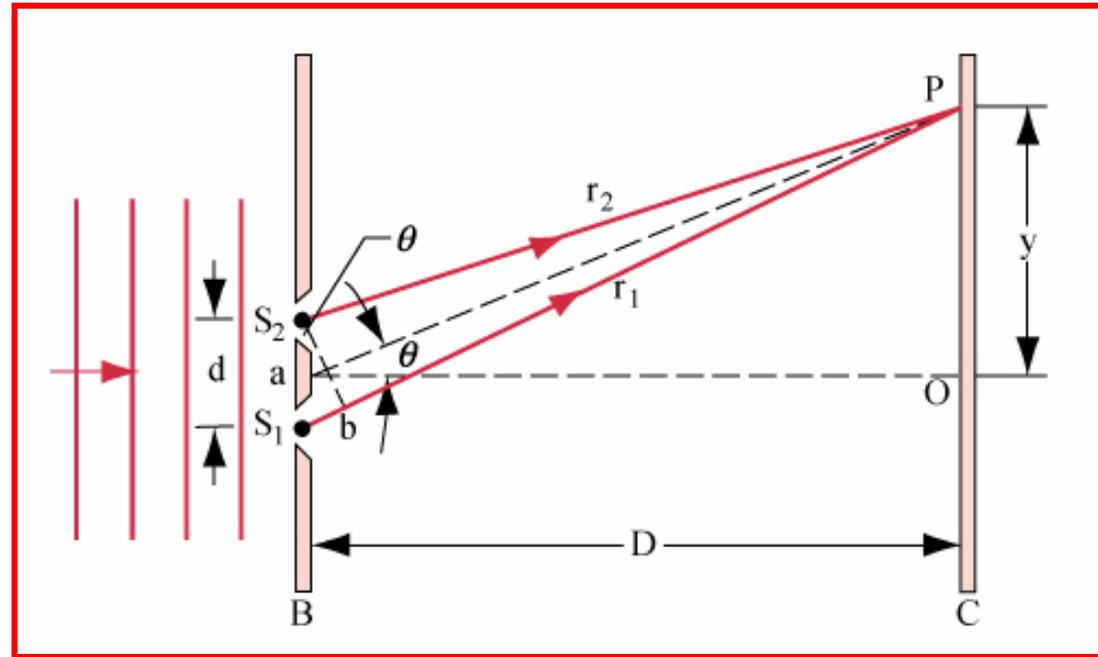
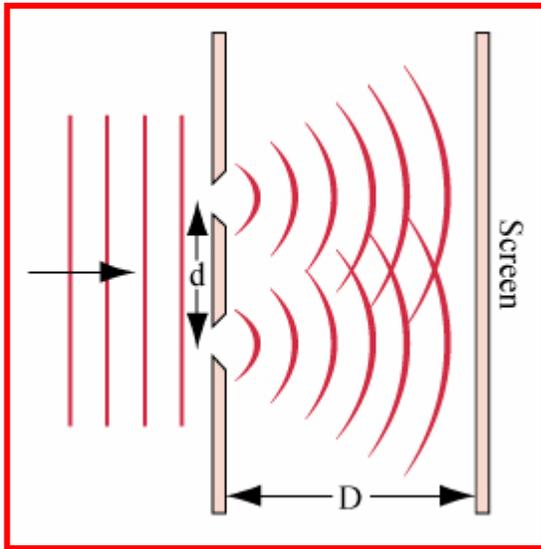
- come tutte le onde, trasportano energia
- flusso di energia è descritto dal vettore di **Poynting** che dà la potenza trasferita per unità d'area e si misura in W/m^2

$$\vec{S} \equiv \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$



- Intensità dell'onda è $I = \langle S \rangle = S_{avg}$ media temporale. Per onde sinusoidali $\cos^2(kx - \omega t) = \frac{1}{2}$ e quindi

$$I = S_{avg} = \frac{E_{max} B_{max}}{2\mu_0} = \frac{E_{max}^2}{2\mu_0 c} = \frac{c B_{max}^2}{2\mu_0}$$



$$y(x,t) = A \sin[2\pi(x/\lambda - t/T)]$$

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

La luce deve avere natura ondulatoria

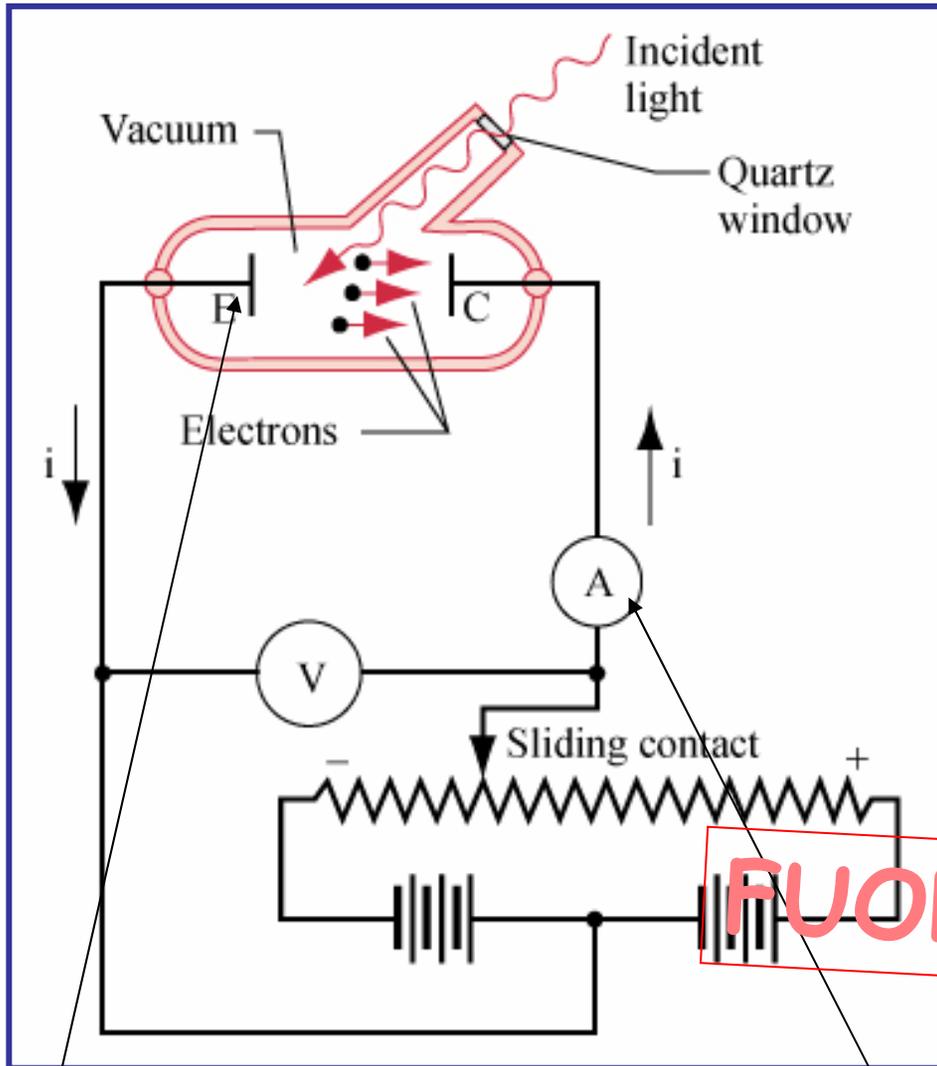
Nel 1900 Planck propose che la radiazione fosse quantizzata, ossia composta di **quanti di energia, multipli di un valore minimo ε_0** (ossia $n\varepsilon_0$, con $n \geq 1$). La teoria di Plank sulla radiazione permise di spiegare **l'effetto fotoelettrico** e **l'effetto Compton**.

Dunque la luce (o generalmente la radiazione) deve avere **anche natura corpuscolare**, come proposto da Einstein nel 1905, che introdusse il quanto elementare di luce, il **fotone**. Al fotone di frequenza ν viene associata l'energia **$E = h\nu$** , dove la **costante di Plank h** vale:

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}.$$

Effetto fotoelettrico

P. Lenard 1900



Aumentando l'intensita' della luce
Incidente:

- L'ene. max dei fotoelettroni non cambia
- Aumenta il loro numero(la fotocorrente)
(se il potenziale e' positivo)

Aumentando la frequenza della rad.
incidente:

- vengono emessi fotoelettroni sopra una
certa frequenza, detta di taglio
- l'energia max dei fotoelettroni aumenta

Il potenziale d'arresto e la
frequenza di taglio non dipendono
dall'intensita` della luce.

FUORI PROGRAMMA

catodo

Misuro la corrente

Cosa è spiegabile dalla fisica classica:

Quando la luce colpisce una sostanza vengono emessi elettroni (effetto fotoelettrico) perché il campo elettrico associato alla radiazione elettromagnetica accelera gli elettroni facendo loro acquistare l'energia sufficiente ad abbandonare la superficie del metallo.

Il numero degli elettroni emessi aumenta con l'intensità della luce incidente.

FUORI PROGRAMMA

Cosa NON spiega:

L'energia cinetica con cui vengono emessi gli elettroni non dipende dall'intensità della radiazione ma dipende linearmente dalla frequenza.

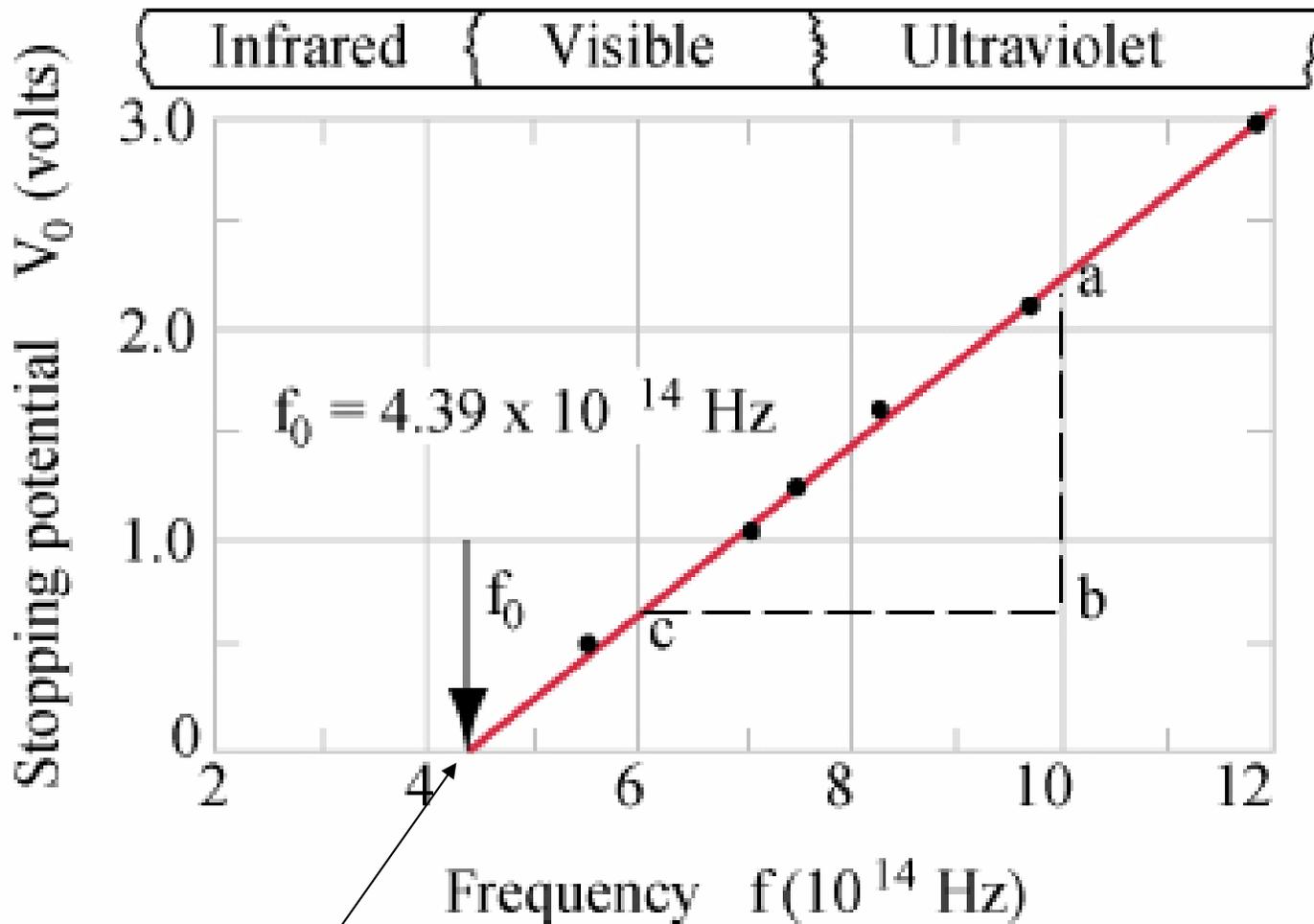
Aumentando l'intensità della luce si aumenta il numero di elettroni emessi ma non la loro energia cinetica.

Esiste una frequenza di soglia ν_0 che può andare dall'infrarosso, per certi sali di cesio, all'ultravioletto, per il platino, al di sotto della quale non si osserva emissione di elettroni; per i metalli alcalini ν_0 è centrato nel visibile.

Il ritardo osservabile tra l'arrivo dell'onda elettromagnetica e l'emissione dell'elettrone è inferiore a 10^{-9} s (non dipende da intensità né frequenza).

IPOSTESI DI EINSTEIN: ogni fotoelettrone ha ricevuto la sua energia da un singolo fotone (di Planck)

http://www.lucevirtuale.net/percorsi/b2/effetto_fotoelettrico.html



$$K_{\max} = \frac{1}{2} mv^2 = eV_{\text{stop}}$$

FUORI PROGRAMMA

Frequenza di taglio

Per il quale non ho passaggio di corrente

Dunque **la luce non ha solo natura ondulatoria**, perché sotto la frequenza di taglio non vengono emessi elettroni anche se l'intensità della luce incidente è grande.

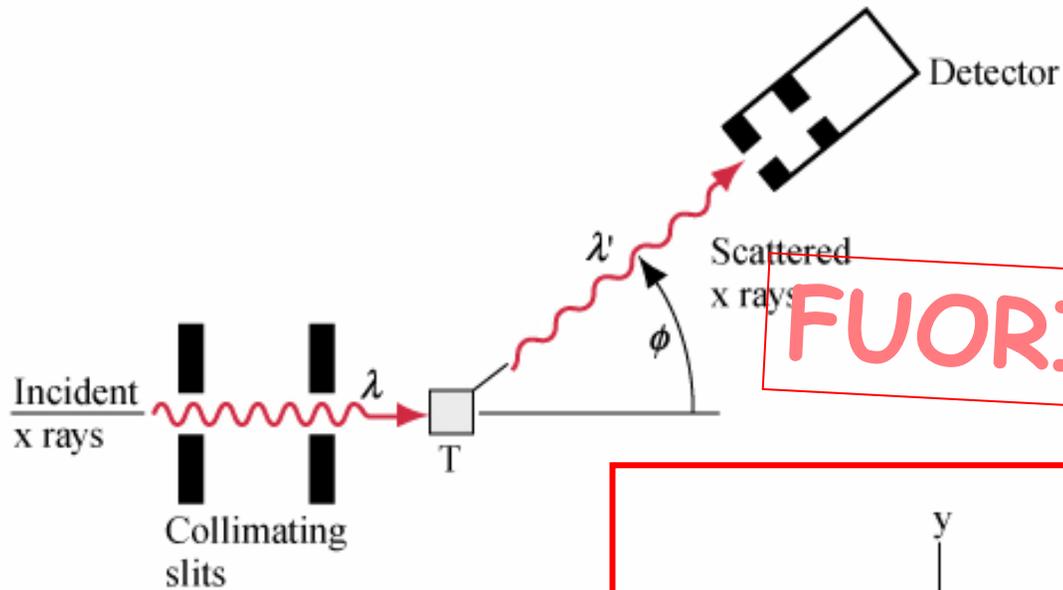
Dato il potenziale di estrazione Φ , l'effetto fotoelettrico si spiega con la legge di conservazione dell'energia.

Caratteristico del metallo

$$h\nu = \Phi + K_{\max} = \Phi + \frac{1}{2}mv^2$$
$$V_{\text{stop}} = \frac{K_{\max}}{e} = \frac{h}{e}\nu - \frac{\Phi}{e}$$

Inoltre, dalla seconda relazione si vede che V_{stop} cresce linearmente con la frequenza ν , da essa, si può misurare il valore di h .

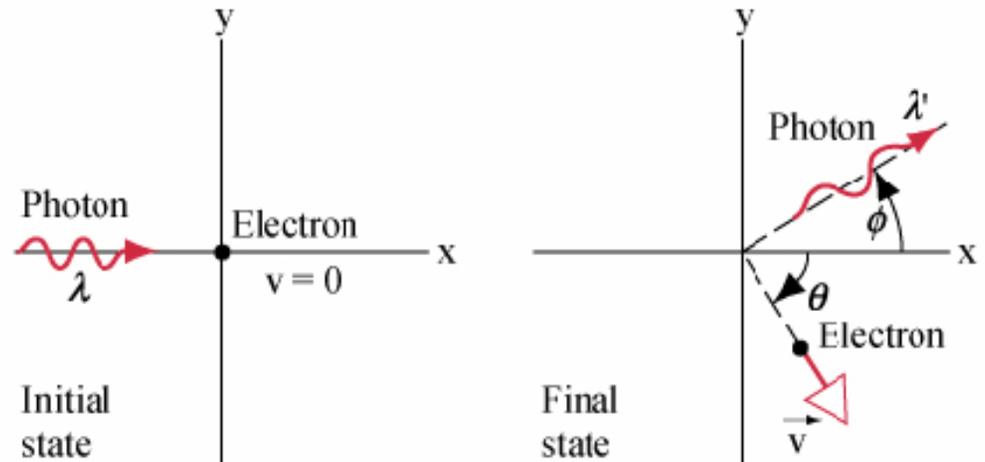
Effetto Compton

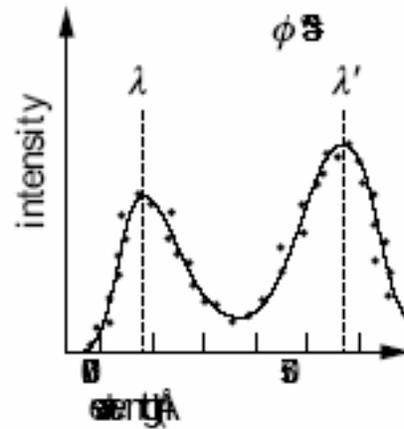
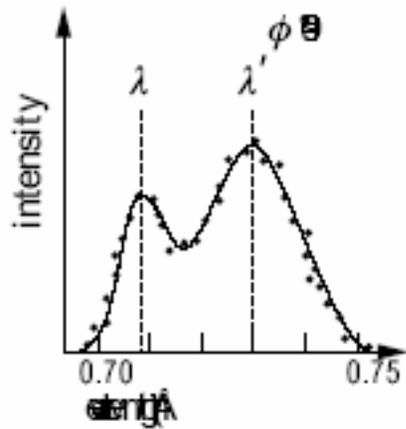
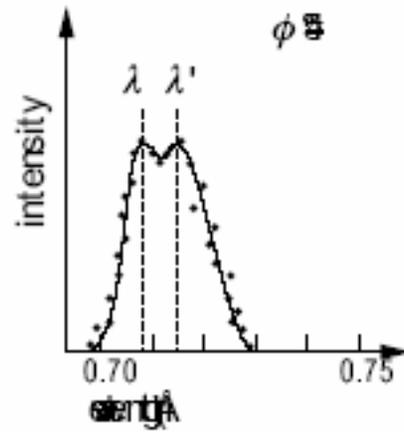
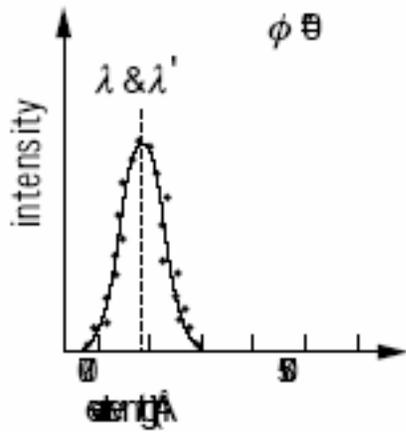


La radiaz diffusa da un bersaglio
Presenta una componente a
lunghezza d'onda maggiore

FUORI PROGRAMMA

Urto elastico tra fotone
ed elettrone: conservazione
dell'energia e della quantita'
di moto





Per raggi X
 ($\lambda = 0.71 \text{ \AA} = 0.71 \cdot 10^{-10} \text{ m}$)

La radiazione diffusa ha
 Lunghezza d'onda maggiore

FUORI PROGRAMMA

Per spiegare l'effetto Compton, nel 1916 Einstein propose di associare al fotone non solo un'energia ma anche l'impulso:

L'elettrone inizialmente e' in quiete

$$h\nu = h\nu' + K = h\nu' + mc^2(\gamma - 1)$$
$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} + mc(\gamma - 1)$$

essendo $\lambda\nu = c$

L'effetto si spiega con la conservazione dell'energia e della quantita' di moto

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

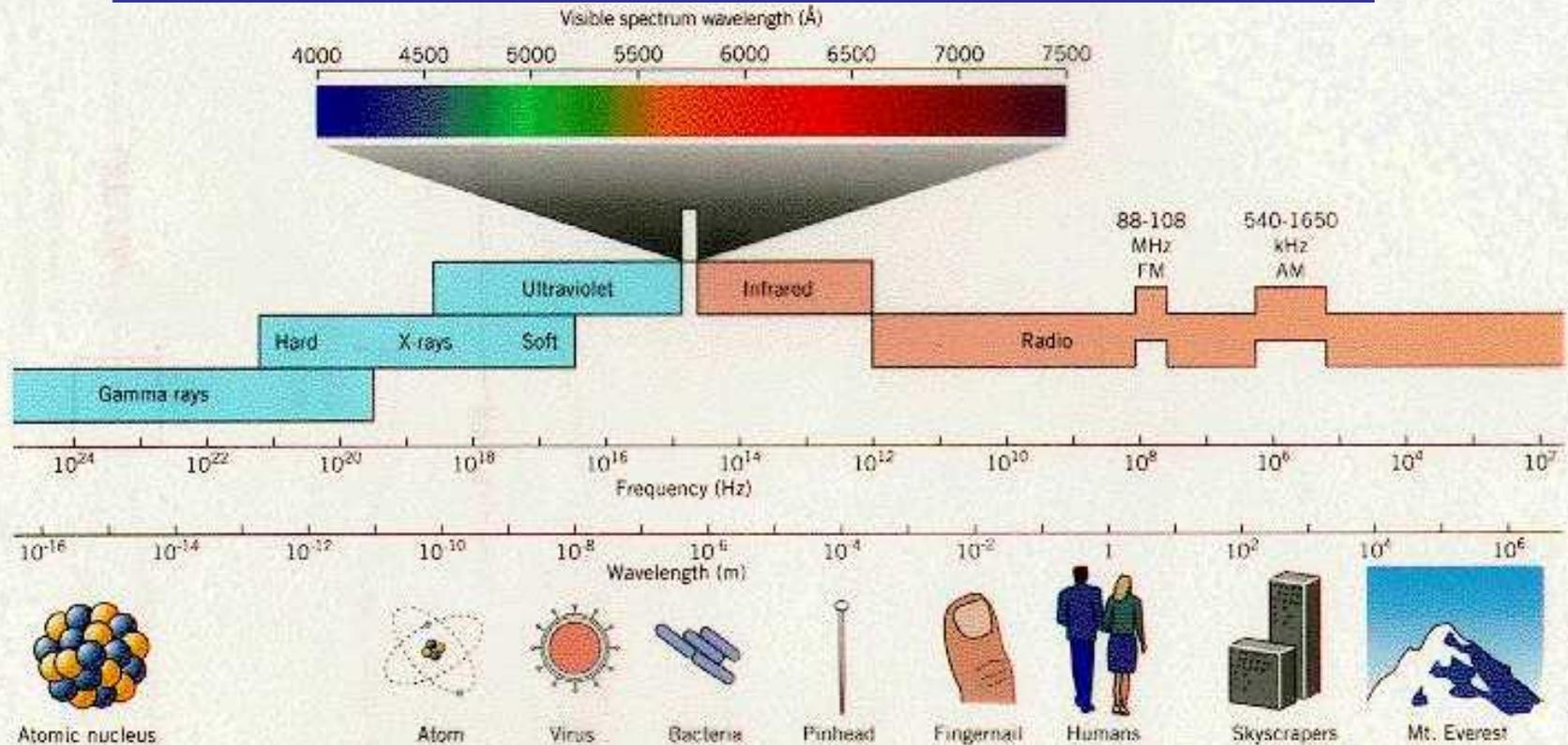
Quantita' di moto del fotone

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\phi)$$

dove $\frac{h}{mc}$ e' una costante detta lunghezza d'onda Compton

FUORI PROGRAMMA

LO SPETTRO ELETTROMAGNETICO



← Cresce λ

← Cresce ν

Lo spettro visibile varia da circa 400 a circa 700 nm, ossia di un fattore 2. L'intero spettro elettromagnetico varia invece di 20 ordini di grandezza, dalle dimensioni di un nucleo(fm) a ~1000 km

Onde elettromagnetiche



ONDE RADIO $\lambda = 1\text{km} - 10\text{cm}$
trasmissioni radio-televisive

Prodotti da apparati elettronici



MICROONDE $\lambda = 10\text{cm} - 1\text{mm}$
radar, telefono, forni



IR - VISIBILE - UV $\lambda = 1\text{mm} - 10^{-9}\text{m}$
calore, luce, reazioni chimiche

Prodotti da atomi e molecole opportunam eccitati



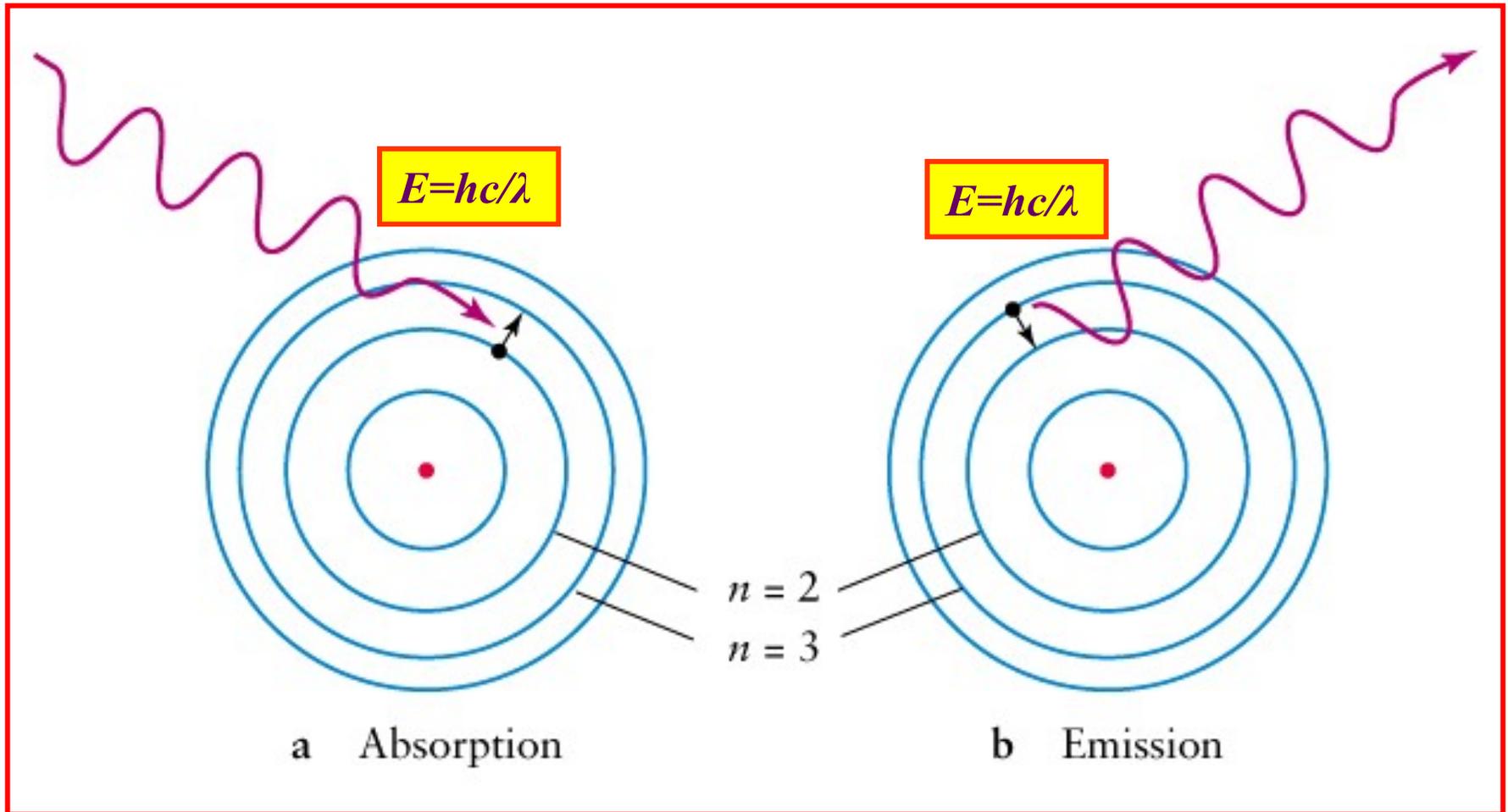
RAGGI X - RAGGI GAMMA $\lambda = 10^{-8} - 10^{-12}\text{m}$
radiografie

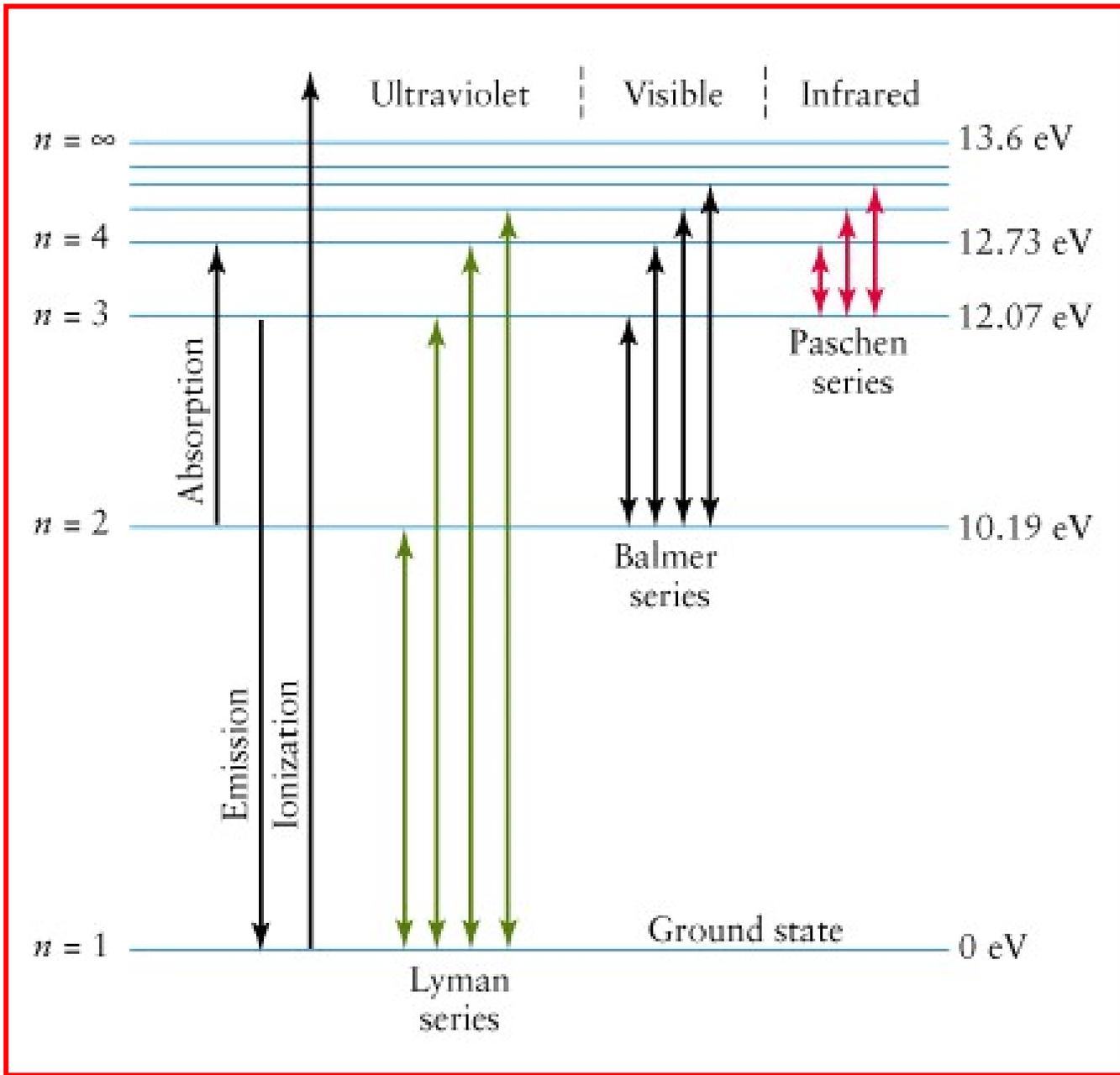
Decadim radioattivi, rad cosmica

Frenamento elettroni su bersaglio

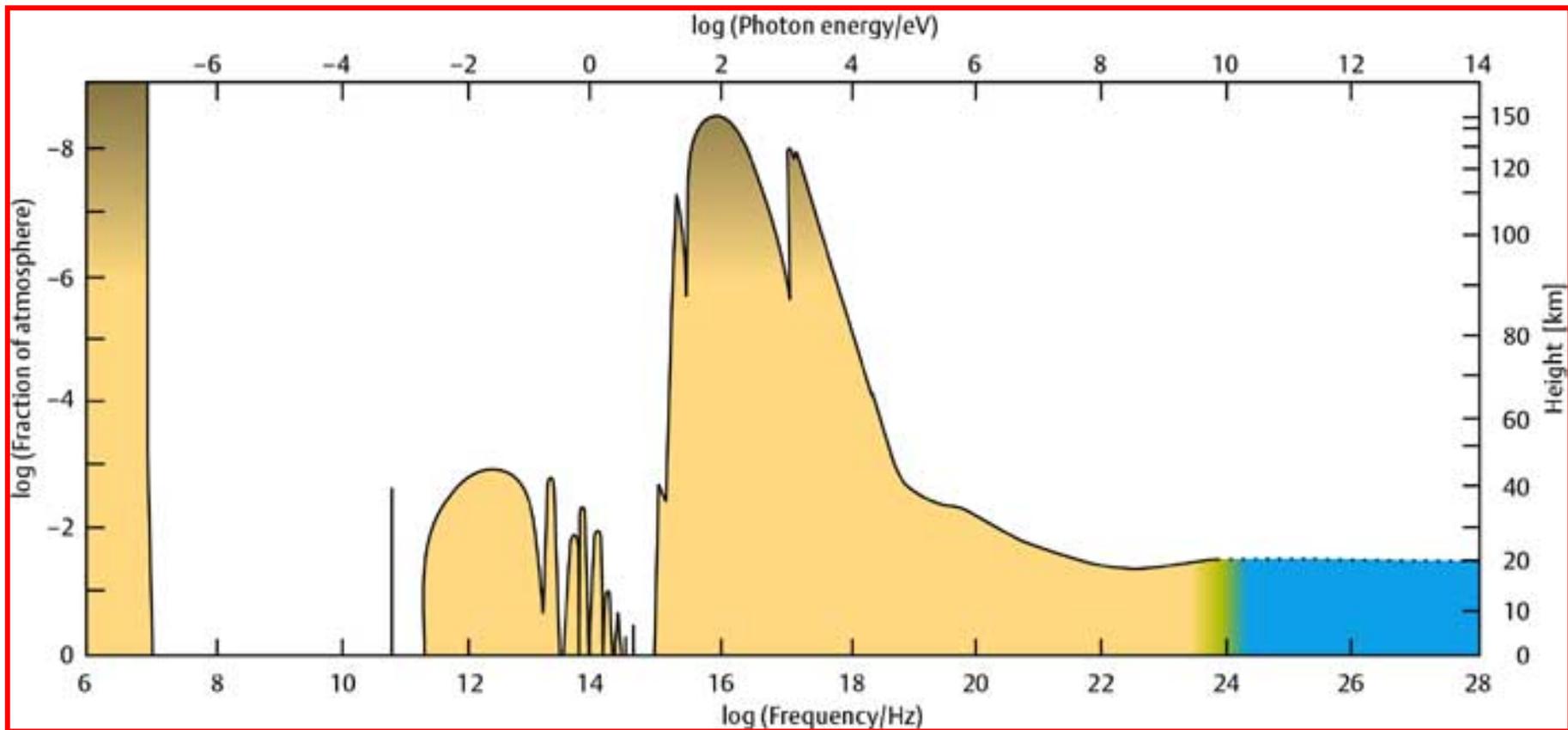
- **Luce visibile:** $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$, parte dello spettro cui l'occhio umano è sensibile. Prodotte da oggetti incandescenti ma anche da transizioni atomiche.
- Onde EM di frequenza (e lunghezza d'onda) differenti interagiscono diversamente con materiali e sostanze: uso e origine diversissimi
- Solo una frazione minima consiste di onde visibili all'occhio umano

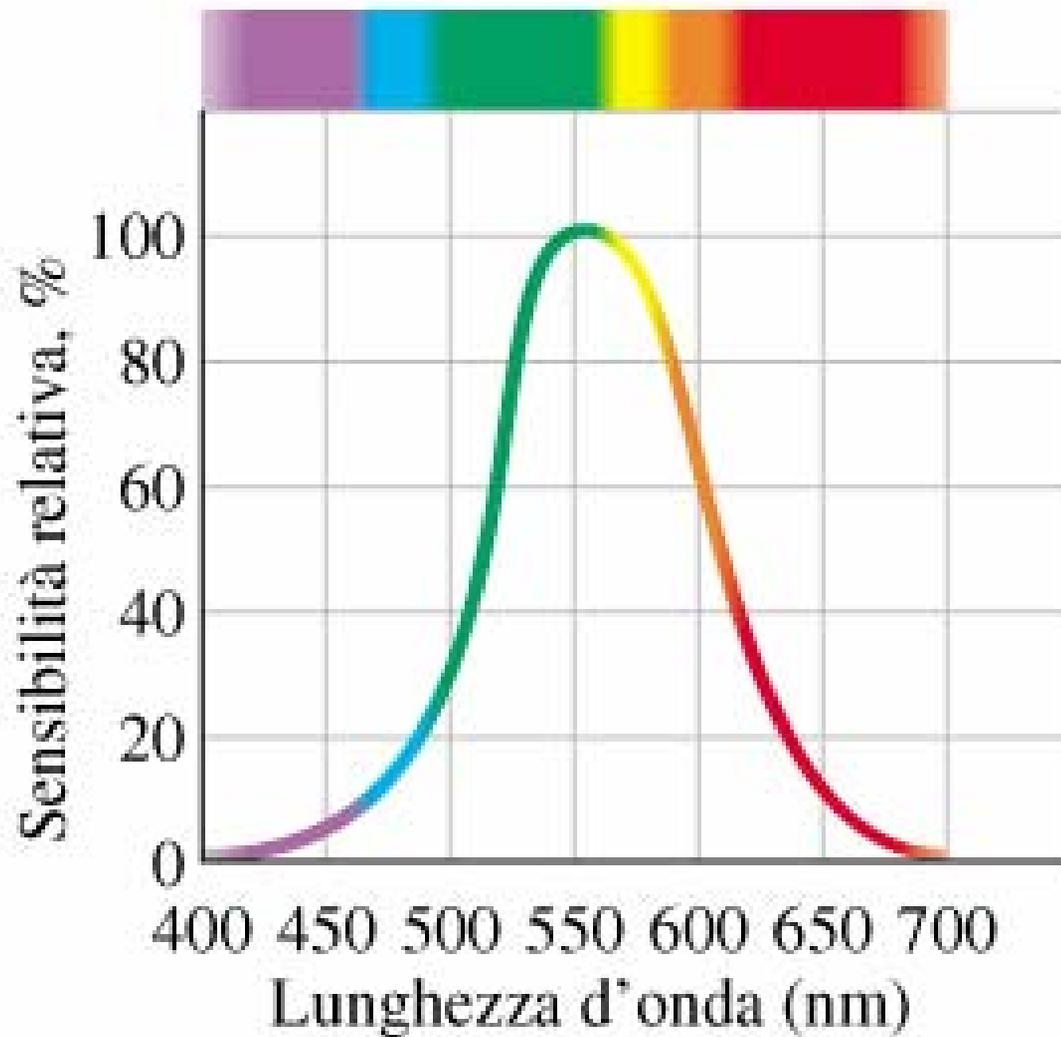
I fotoni sono emessi da salti di elettroni tra livelli energetici





Trasparenza dell'atmosfera alla radiazione elettromagnetica

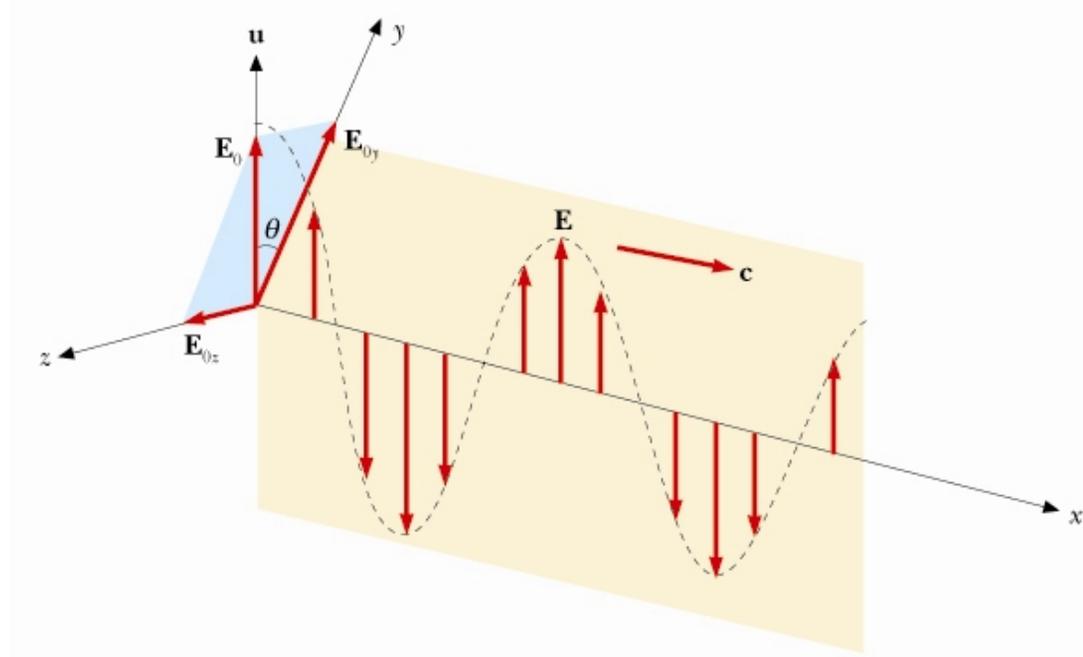




Sensibilità
dell'occhio umano

Polarizzazione della luce

Se un'onda trasversale vibra solo in un determinato piano si dice che e' polarizzata. Il campo elettrico (e quello magnetico ad esso perpendicolare) oscillando mantiene la stessa direzione. Il piano individuato dalla direzione di \mathbf{E} e dalla direzione di propagazione dell'onda si definisce piano di polarizzazione di \mathbf{E} .

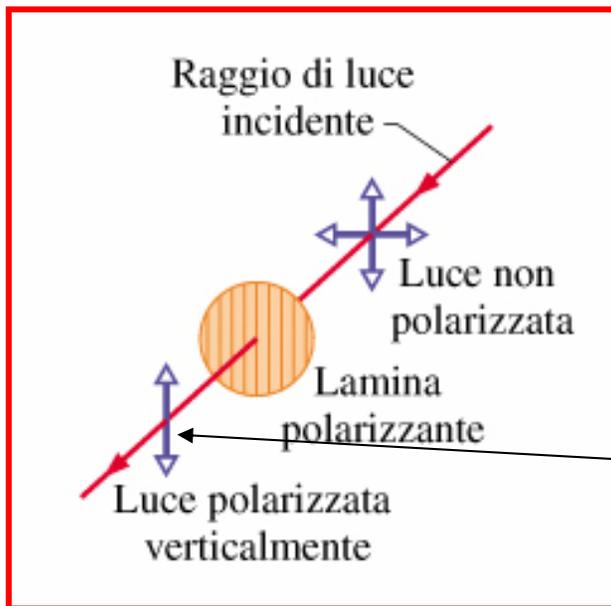


<http://www.lucevirtuale.net/percorsi/a5/polarizzazione.html>

Polarizzazione della luce

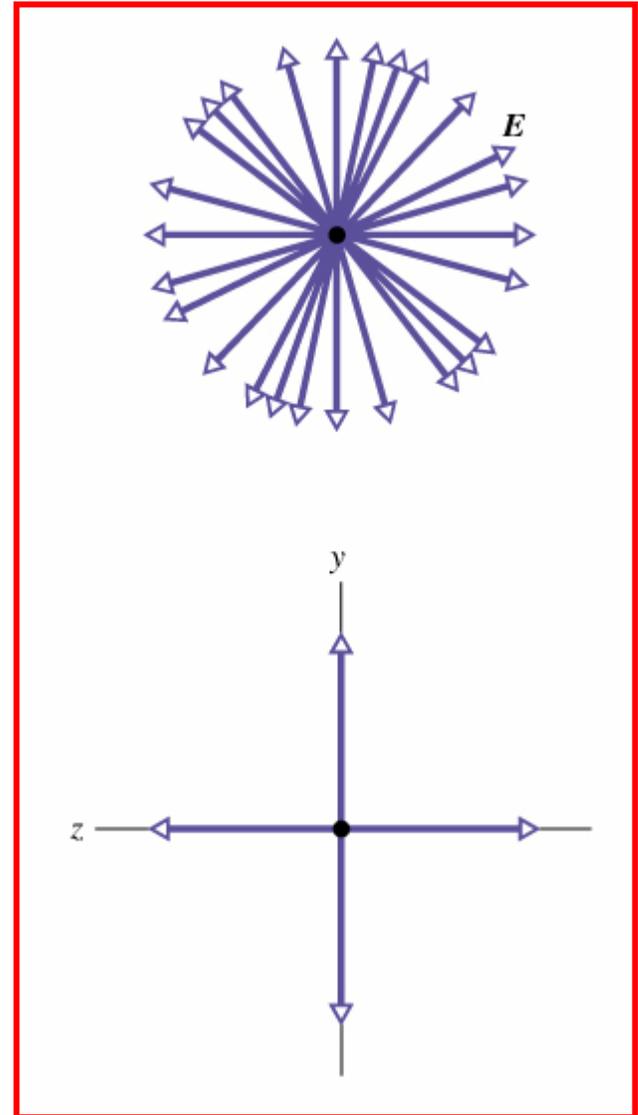
La luce naturale non è in generale polarizzata: I generatori della radiazione luminosa sono infatti gli atomi (o molecole).

Ciascun radiatore elementare, opportunamente eccitato emette gruppi d'onde (treni d'onde) che vibrano in un piano indipendente dagli altri. (E e B sono sempre perpendicolari)



L'intensità diventa

$$I = \frac{1}{2} I_0$$



Se la luce e' gia' polarizzata esce da una lamina polarizzatrice con intensita'

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

Legge di Malus

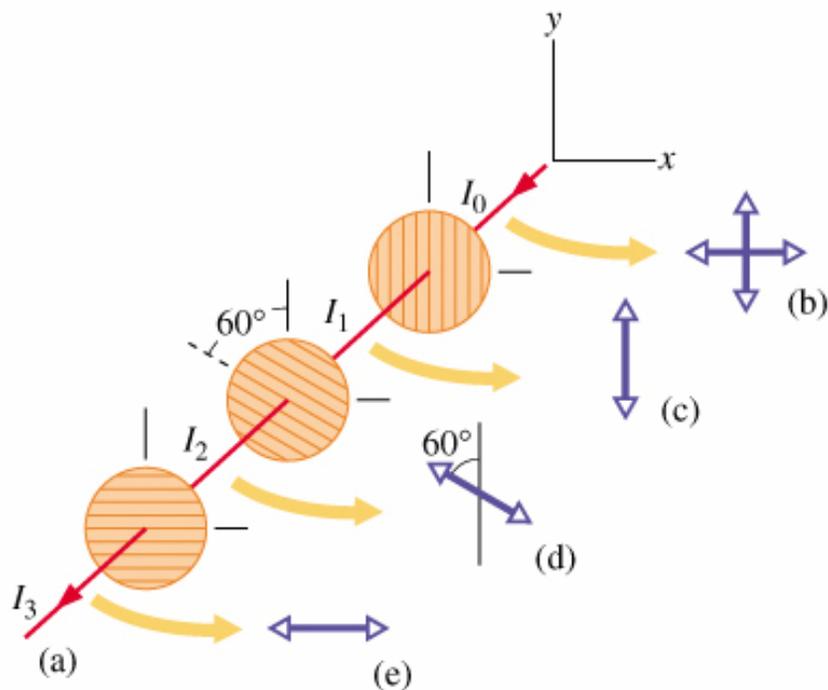
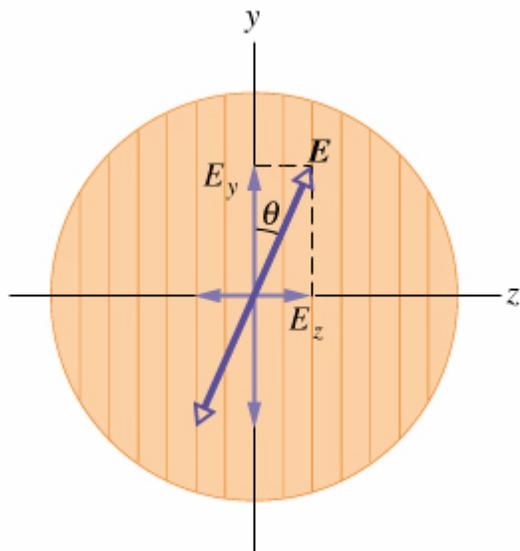
Angolo
Rispetto all'asse
di trasmissione
Della lamina
polarizzatrice

per esempio:

$$\begin{aligned} I_3 &= I_2 \cos^2 30^\circ = \\ &= (I_1 \cos^2 60^\circ) \cos^2 30^\circ = \\ &= \frac{1}{2} I_0 \cos^2 60^\circ \cos^2 30^\circ = \\ &= 0.094 I_0. \end{aligned}$$

Solo il 9,4% della luce esce dalle 3 lamine

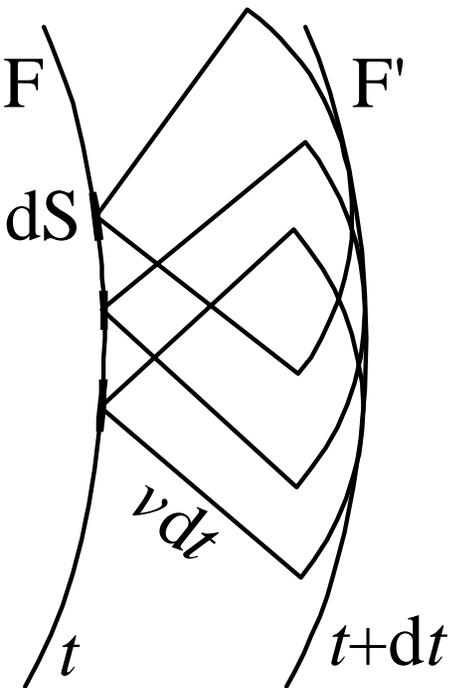
Come facciamo ad accorgerci della polarizzazione della luce?



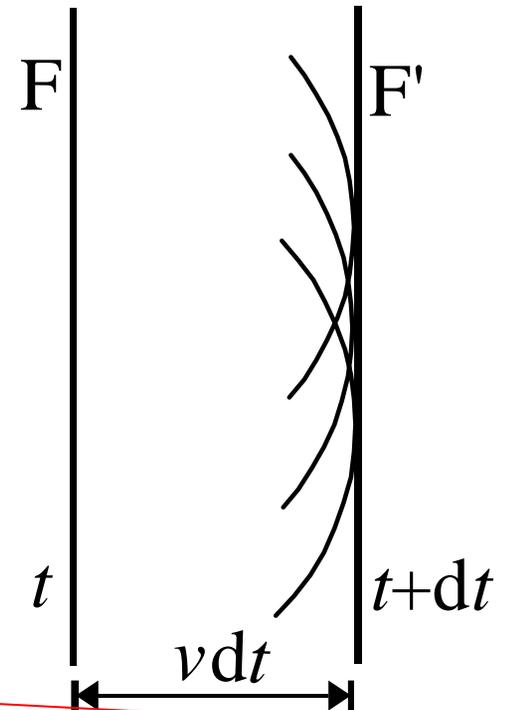
Principio di Huygens(1678)

È possibile determinare la perturbazione EM in un punto, anche senza conoscere le sorgenti.

Nota un fronte d'onda al tempo t , si costruisce quello a $t+dt$.



TUTTI i punti del fronte d'onda possono essere considerati nuove sorgenti di onde sferiche elementari, che si propagano verso l'esterno, con le stesse v e ω dell'onda iniziale e con la velocità caratteristica dell'onda in quel mezzo. Dopo un tempo dt Il nuovo fronte d'onda è la superficie tangente alle onde elementari.

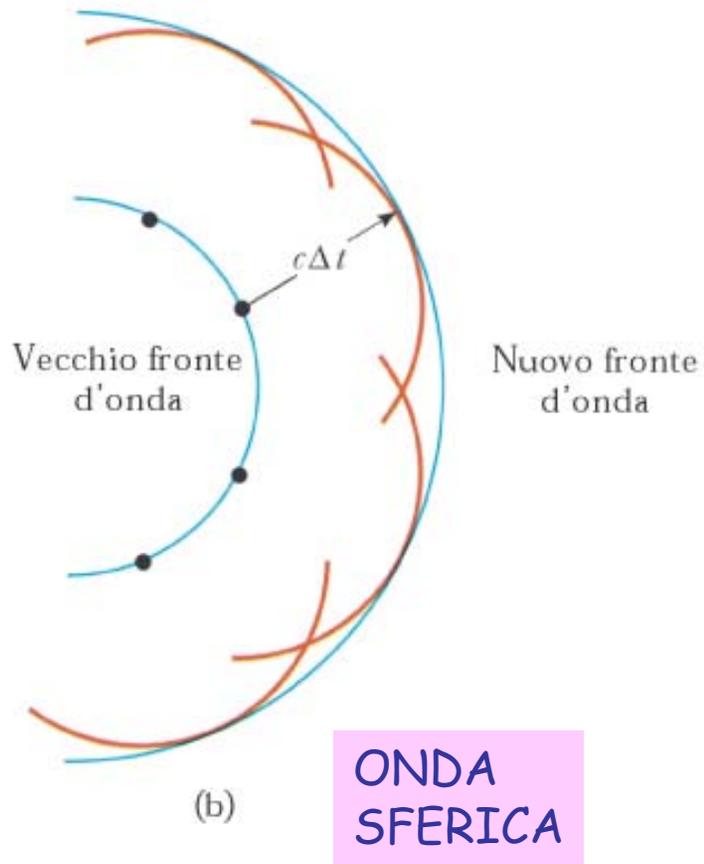
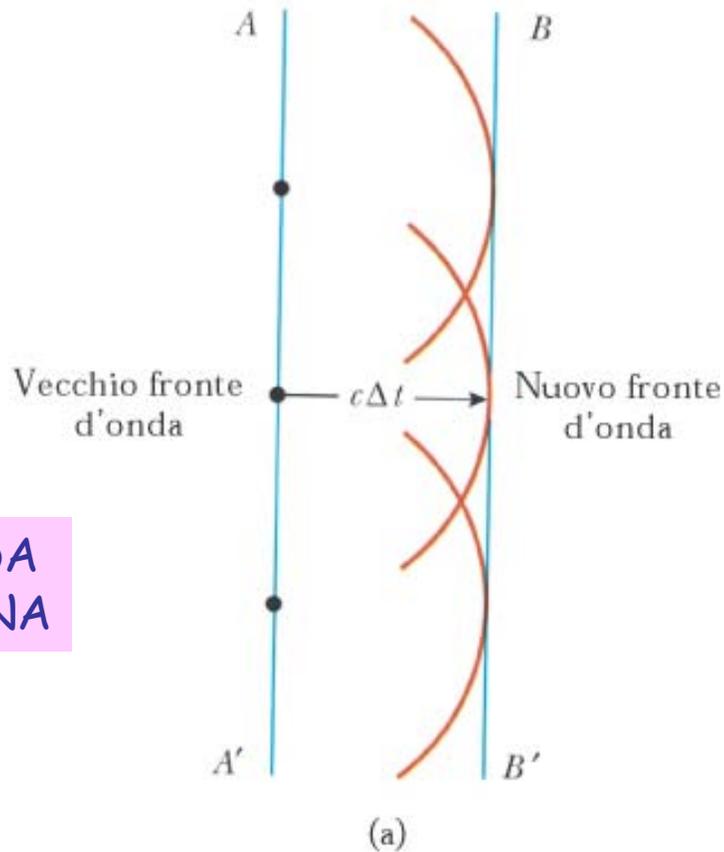


~~L'onda si propaga in un determinato verso; all'indietro si ha interferenza distruttiva.~~

FUORI PROGRAMMA

ESEMPI

ONDA
PIANA



ONDA
SFERICA

Figura 25.19

Costruzione di Huygens per (a) un'onda piana che si propaga verso destra e (b) un'onda sferica.

FUORI PROGRAMMA



OTTICA GEOMETRICA

L'ottica geometrica studia le leggi dei raggi luminosi (percorso fatto dall'onda luminosa), schematizzandoli in rette geometriche.

Tutti i fenomeni luminosi trovano rigorosa spiegazione nella **teoria elettromagnetica della luce**, ma lo studio della propagazione puo' andare incontro a difficoltà analitiche.

Fra i metodi approssimati capaci di prevedere l'andamento di quasi tutti i fenomeni che si presentano nella pratica con sufficiente precisione rientra l'**ottica geometrica**, la quale studia il comportamento di fenomeni semplici descritti mediante leggi di carattere geometrico.

La luce si propaga rettilineamente in un mezzo omogeneo e isotropo

La validità dell'ottica geometrica ha per limite i *fenomeni di diffrazione*: le esperienze di fasci di luce che attraversano fenditure molto piccole si possono spiegare solo supponendo che la luce abbia natura ondulatoria.

Ipotesi:mezzi isotropi e omogenei quando non diversamente specificato

L'ottica geometrica richiede **propagazione rettilinea della luce**, **indipendenza** dei raggi luminosi. Si ha **riflessione** della luce su una superficie speculare, **rifrazione** della luce sulla superficie di separazione fra due mezzi trasparenti.



Propagazione rettilinea della luce in un mezzo omogeneo
(raggi luminosi = rette). Si tratta di un'astrazione matematica.



Indipendenza dei raggi luminosi

Quando due o più raggi vengono a contatto non si verifica alcuna alterazione di traiettoria o intensità.



Riflessione della luce su una superficie speculare

Le leggi della riflessione nel linguaggio geometrico sono descritte come segue:

a) Il raggio incidente, il raggio riflesso e la perpendicolare (normale) alla superficie riflettente nel punto d'incidenza, giacciono sul medesimo piano.

b) L'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza: $i = r$.

Se il raggio incidente coincide con la normale allo specchio, anche il raggio riflesso forma un angolo di riflessione nullo: coincide con il raggio incidente (incidenza normale).



Figura 1

Leggi della riflessione



Invertibilità del cammino ottico: il cammino di un raggio di luce è reversibile

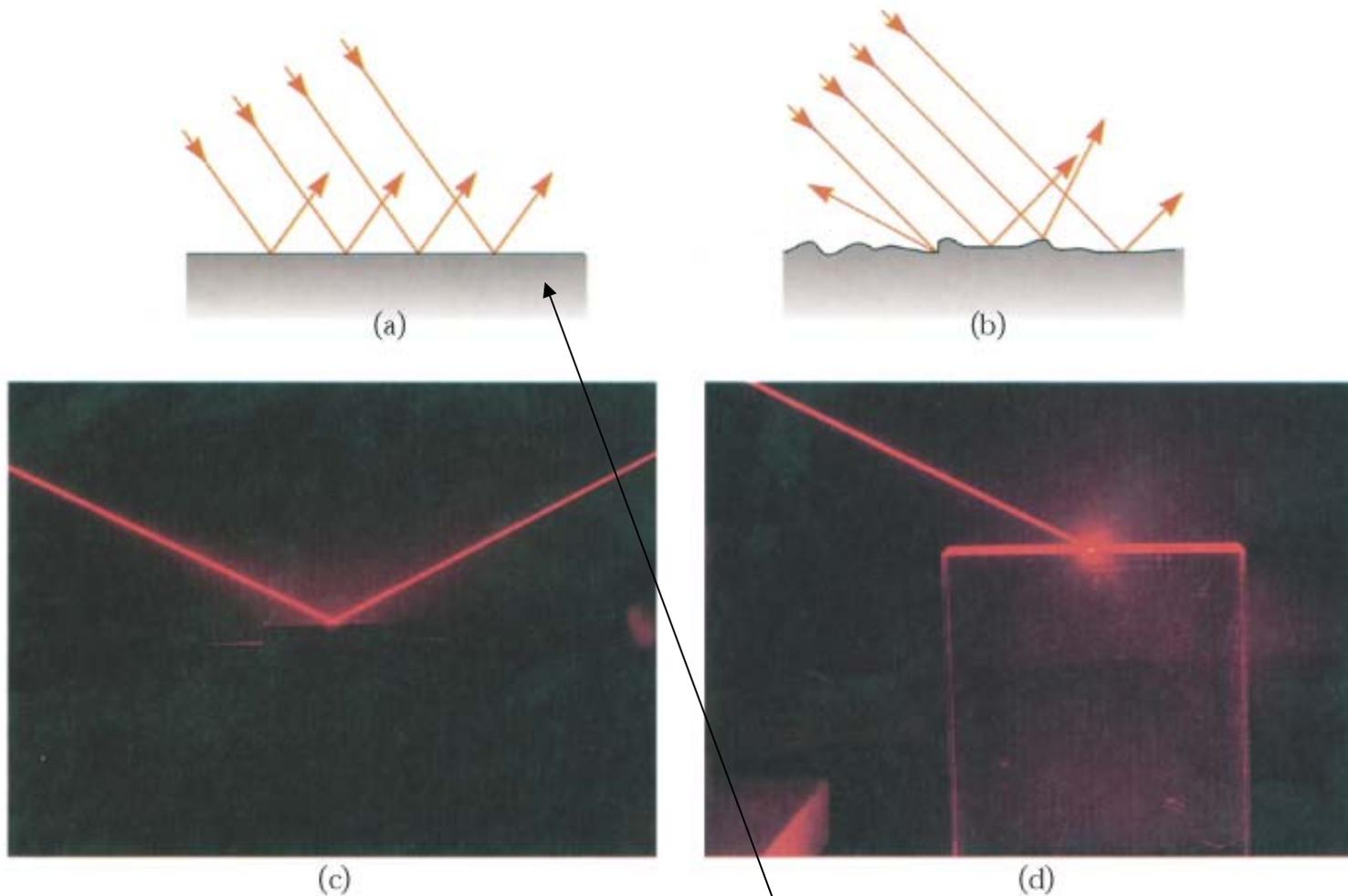


Figura 25.3

Rappresentazione schematica di (a) riflessione speculare, dove i raggi riflessi sono paralleli tra loro, e (b) riflessione diffusa, dove i raggi riflessi viaggiano in direzioni casuali. (c) e (d) Fotografie di riflessioni speculari e diffuse usando luce laser. (Foto di Henry Leap e Jim Lehman, per gent. conc.)

Rugosità piccola rispetto alla λ della luce incidente

Il muro di una casa non è speculare per la luce, ma lo è per le onde radio

la rifrazione.

Alla superficie di separazione tra due mezzi trasparenti un raggio luminoso parzialmente si riflette (raggio riflesso) e in parte prosegue nel nuovo mezzo (raggio trasmesso o rifratto).

La direzione del raggio rifratto segue la legge di Snell-Cartesio:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_i}{v_r} \quad \text{definiamo} \quad n = \frac{c}{v} \Rightarrow$$

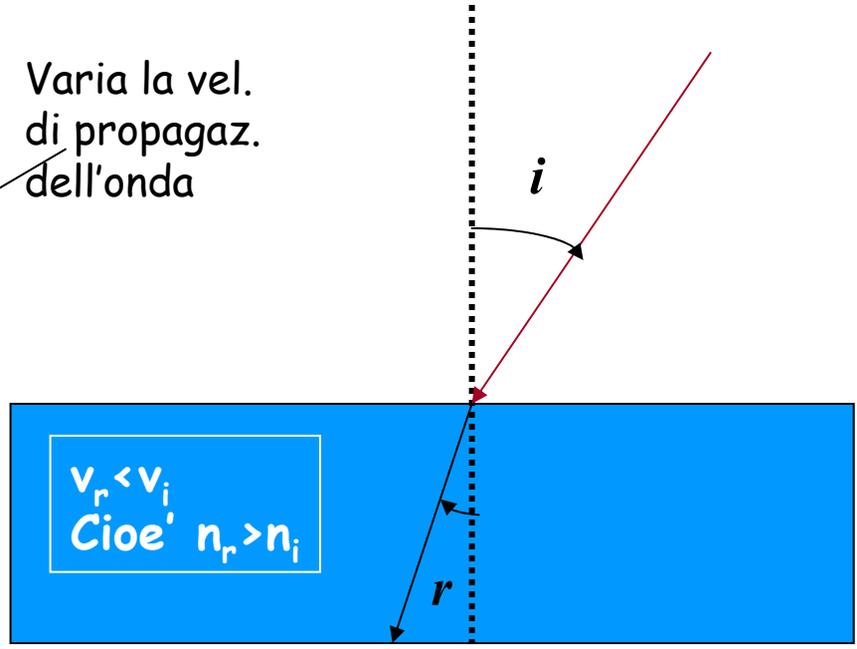
$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_r}{n_i}$$

n_i = indice di rifrazione del mezzo in cui viaggia il raggio incidente

n_r = indice di rifrazione del mezzo in cui viaggia il raggio rifratto

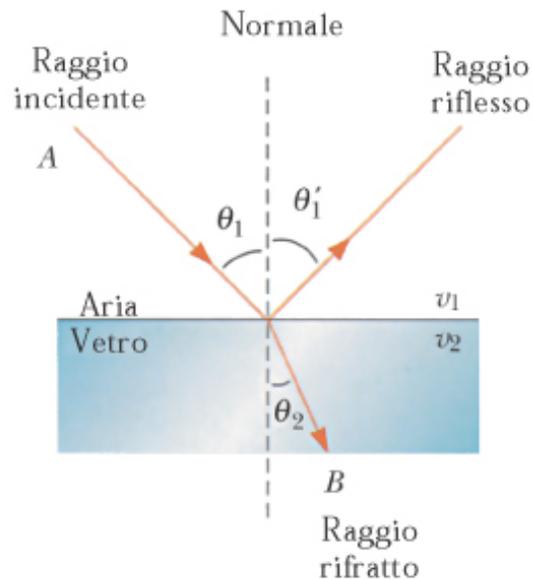
l'indice di rifrazione n :
 - dipende dalla lunghezza d'onda della luce (trascureremo quest'aspetto)

Varia la vel. di propagaz. dell'onda

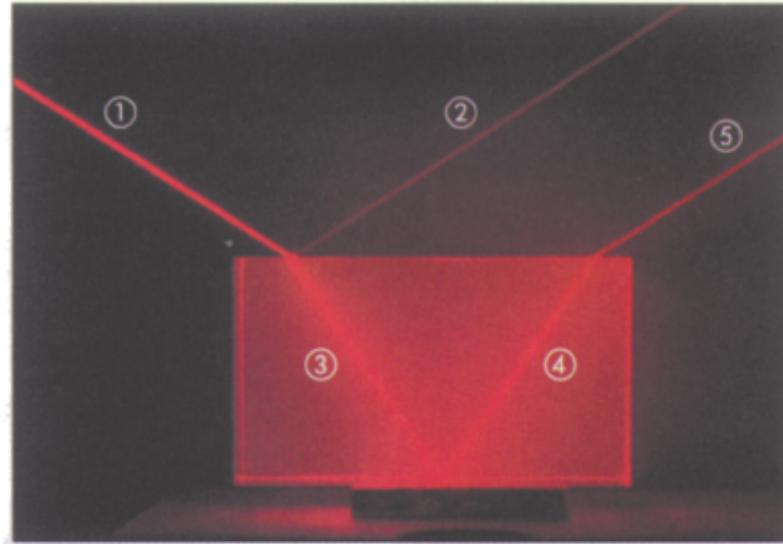


mezzo	indice
aria	1,0003
acqua	1,33
vetro crown	1,52
polistirene	1,55
quarzo	1,46

--La normale alla sup. di separazione dei due mezzi nel punto d'incidenza e il raggio rifratto giacciono nello stesso piano



(a)



(b)

Figura 25.8

(a) Un raggio incide obliquamente su una superficie di separazione aria-vetro. Il raggio rifratto è deviato verso la normale perché $v_2 < v_1$. Tutti i raggi e la normale giacciono nello stesso piano. (b) (Quiz Rapido 25.2) Dal raggio di luce 2 fino a 5, quali sono riflessi e quali sono rifratti? (*Henry Leap e Jim Lehman*)



Un raggio monocromatico, proveniente dal vuoto entra in una lastra di vetro con un angolo di incidenza di 27° . L'angolo del raggio rifratto risulta essere di 17° . Calcolare l'indice di rifrazione assoluto del vetro e la velocità dell'onda nel vetro. Se la sua lunghezza d'onda era 600 nm quant'è nel mezzo? E la sua frequenza? E il suo numero d'onda k ?

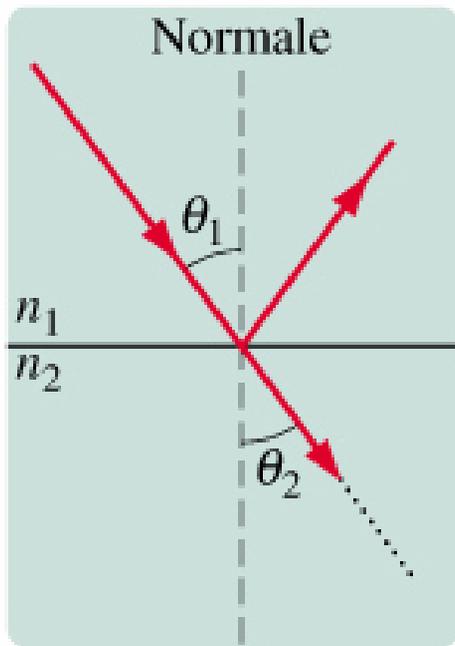
$$n = \frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} = \frac{\text{sen}(27^\circ)}{\text{sen}(17^\circ)} = \frac{0.454}{0.292} = 1.55$$

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3.00 \cdot 10^8}{1.55} = 1.93 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{600 \text{ nm}}{1.55} = 387.1 \text{ nm}$$

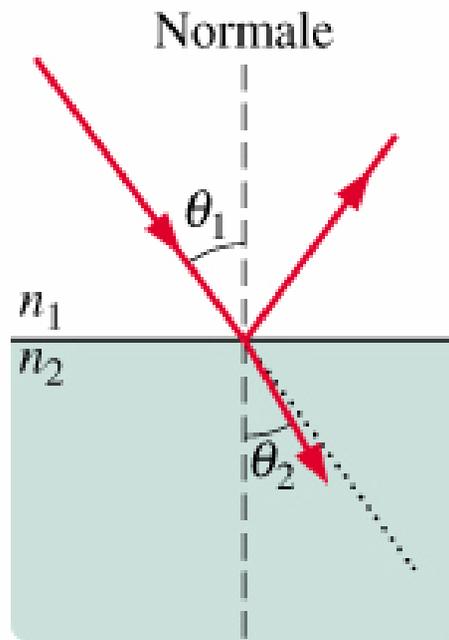
$$\nu = \nu_0 = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{3.00 \cdot 10^8}{600 \cdot 10^{-9}} = 0.5 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

$$k = nk_0 = n \frac{\omega}{c} = n \frac{2\pi\nu}{c} = n \frac{2\pi}{\lambda_0} = 1.55 \frac{2\pi}{600 \text{ nm}} = 1.62 \cdot 10^7 \text{ radm}^{-1}$$



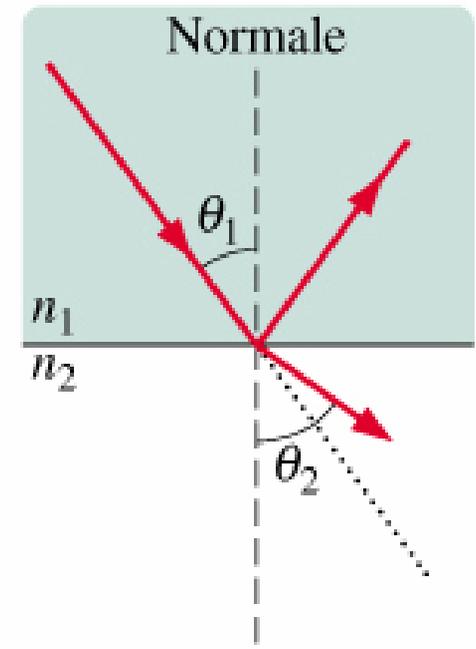
$$n_2 = n_1$$

(a)



$$n_2 > n_1$$

(b)



$$n_2 < n_1$$

(c)

Da un mezzo meno rifrangente a uno piu' rifrangente si avvicina alla normale

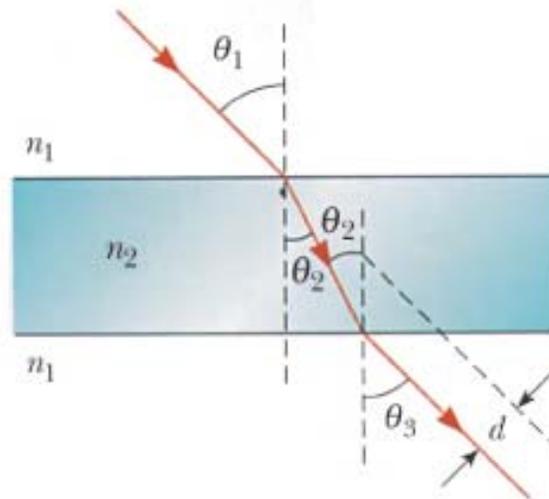


Figura 25.12

(Esempio 25.4) Quando la luce passa attraverso una lastra piana di materiale trasparente, il fascio emergente è parallelo al fascio incidente, e perciò $\theta_1 = \theta_3$. La linea tratteggiata rappresenta il percorso che la luce seguirebbe se non ci fosse la lastra.



Serway - Jewett
Principi di Fisica Vol. I
Edises

Un raggio di luce emesso da un riflettore subacqueo esce dall'acqua con un angolo di 30° . Con quale angolo di incidenza e' arrivato all'interfaccia acqua aria?

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_r}{n_i} \Rightarrow \sin i = \frac{n_r}{n_i} \sin r = \frac{1}{1.333} \sin 30^\circ = 0.37$$

$$\arcsin 0.37 = 22.03^\circ$$

Un sommozzatore si trova sott'acqua e vede il sole ad un angolo di 42° . Qual'è la posizione reale del sole? Ripetere per il caso in cui a causa dell'inquinamento sulla superficie del mare vi sia uno strato di olio con $n=2.1$. Determinare la velocità della luce nell'acqua e nell'olio.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_r}{n_i} \Rightarrow \vartheta_i = \arcsin\left(\frac{n_r}{n_i} \sin r\right) = \arcsin\left(\frac{1.333}{1} \sin 42^\circ\right) = 63.1^\circ$$

Nel secondo caso ho una doppia rifrazione dall'aria (mezzo 1), all'olio (mezzo 2), all'acqua (mezzo 3):

$$\vartheta_2 = \arcsin\left(\frac{n_3}{n_2} \sin \vartheta_3\right) = \arcsin\left(\frac{1.33}{2.1} \sin 42^\circ\right) = \arcsin(0.425) = 25.13^\circ$$

$$\vartheta_1 = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1} \sin \vartheta_2\right) = \arcsin\left(\frac{2.1}{1} \sin \vartheta_2\right) = \arcsin(2.1 \cdot 0.425) = \arcsin(0.892) = 63.19^\circ$$

$$v = \frac{c}{n} \Rightarrow v_{acqua} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.333} = 2.25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$v_{olio} = 1.43 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

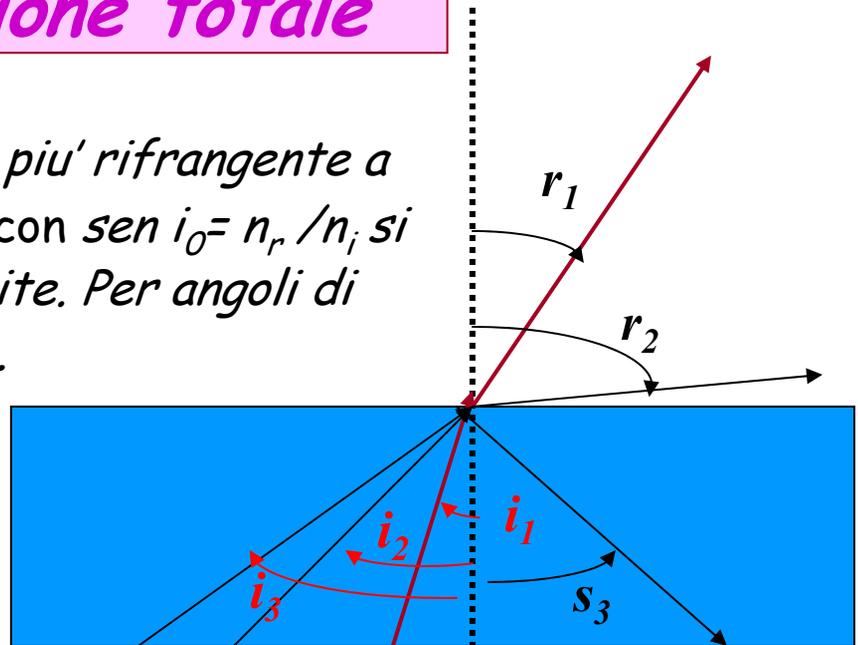
Lo strato d'olio non dev'essere sottile altrimenti si ha interferenza da film sottili

La riflessione totale

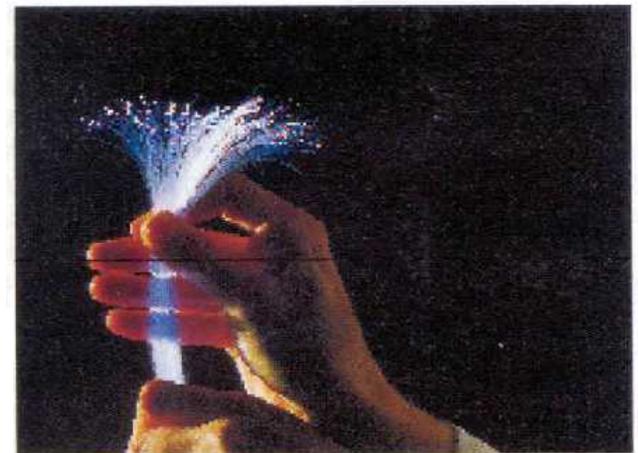
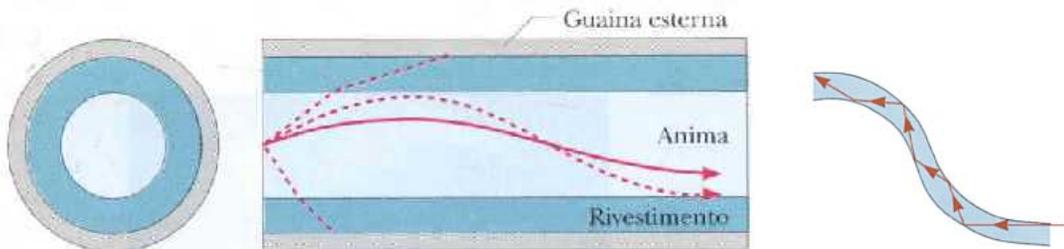
se $n_i > n_r$, cioè se la luce passa da un mezzo più rifrangente a uno meno rifrangente per raggi incidenti con $\sin i_0 = n_r / n_i$ si ha riflessione totale, i_0 è detto angolo limite. Per angoli di incidenza maggiori si ha riflessione totale.

$$\sin i_0 = \sin r \frac{n_r}{n_i} = 1 \cdot \frac{n_r}{n_i}$$

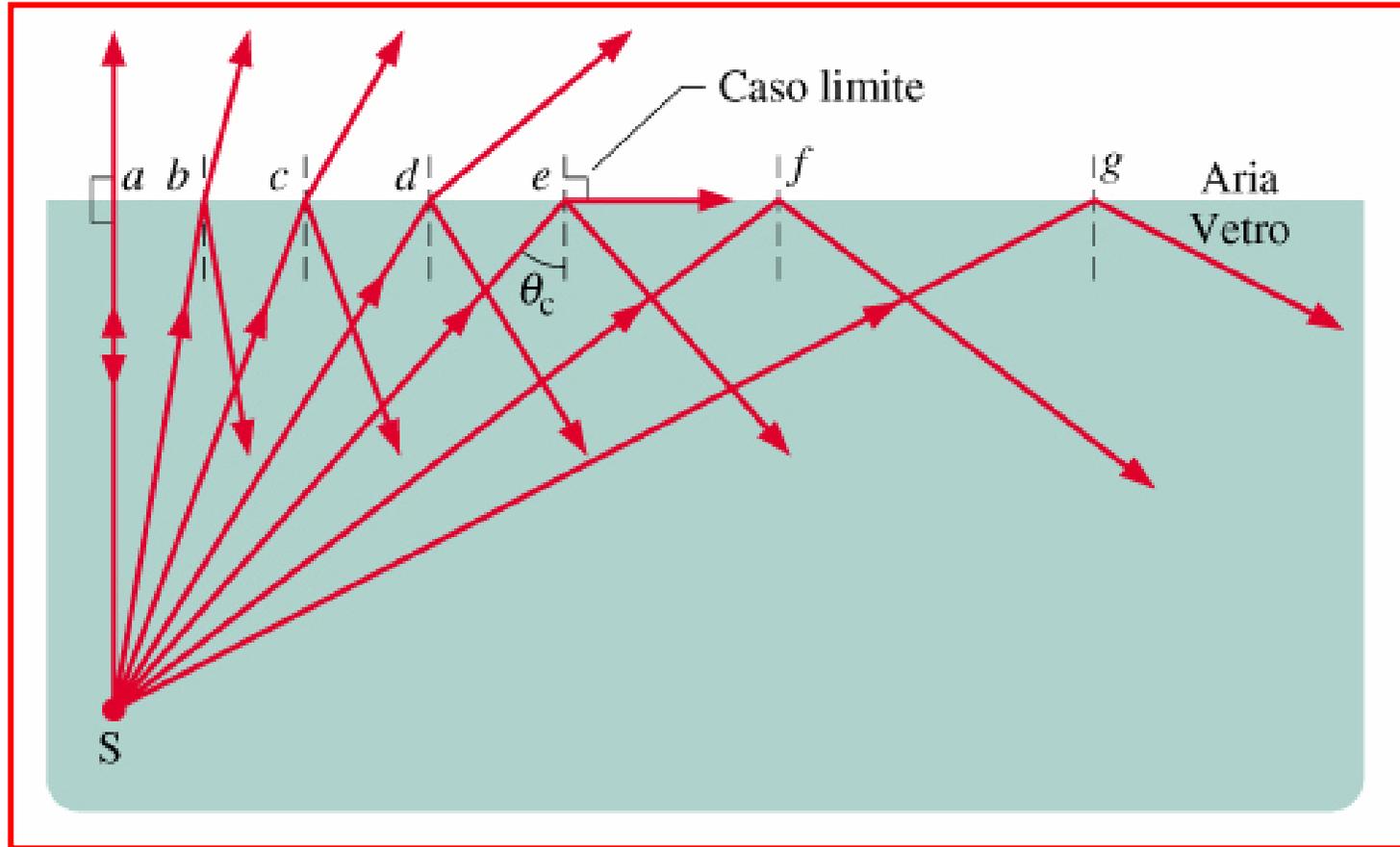
Per $r=90^\circ$
Non c'è raggio rifratto



fibra ottica- fibre di vetro o plastica di diametro di qualche micron



riflessione totale e angolo limite



La riflessione totale si verifica solo quando la luce si propaga da un mezzo di indice di rifrazione maggiore a uno di indice di rifrazione minore.

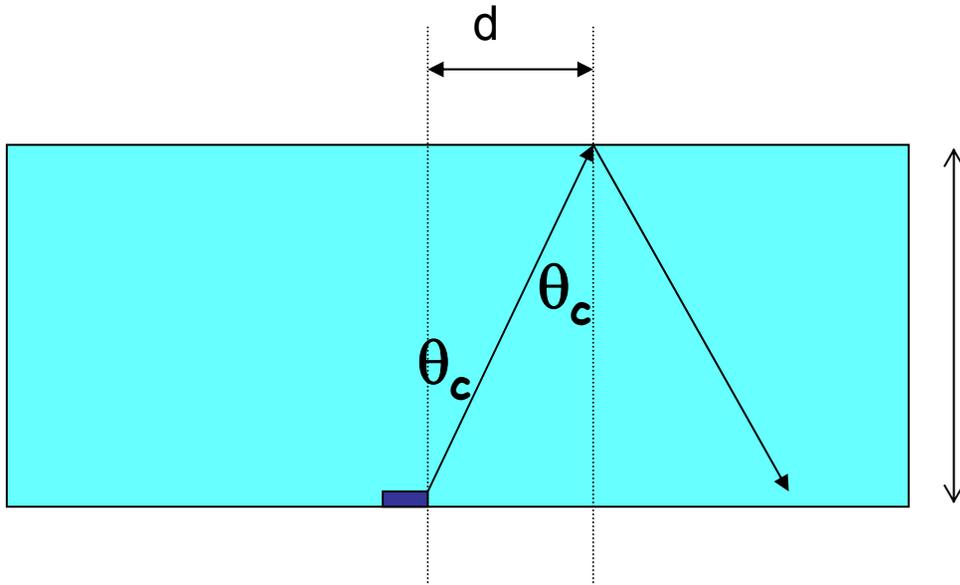
Trovare l'angolo limite per la superficie acqua-aria se l'indice di rifrazione dell'acqua e' 1.33

$$\sin \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{1.33} = 0.752$$

$$\arcsin(0.752) = 48.8^\circ$$

Una lampada che fornisce un fascetto luminoso e' posta sul fondo di un laghetto di profondita' 10 m. Con che angolo deve incidere sull'interfaccia acqua-aria perche' la luce non esca dall'acqua?

Sempre una lampada subacquea emette raggi di luce verso l'alto in tutte le direzioni ed e' posta in fondo ad una piscina di profondita' incognita ad una distanza di 5 m dalla verticale della lampada il fascio smette di attraversare la superficie dell'acqua. Determinare la profondita' della Piscina

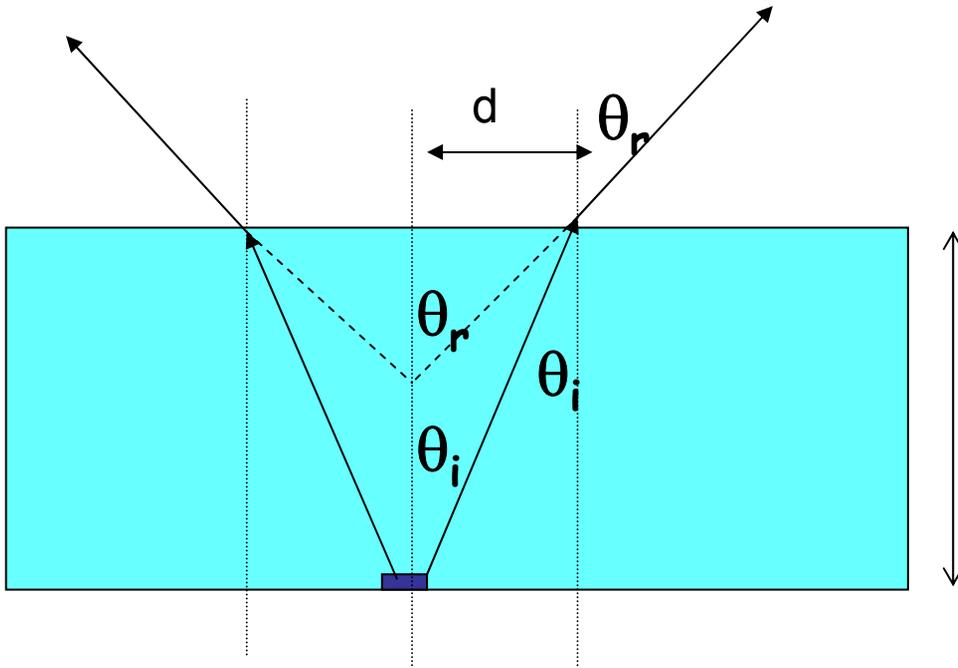


$$d = l \operatorname{tg} \vartheta_c$$

$$\vartheta_c = 48.8^\circ$$

$$l = \frac{d}{\operatorname{tg} \vartheta_c} = 4.37 \text{ m}$$

A che profondita' l'osservatore che si trovi sulla verticale sopra la sorgente luminosa fuori dalla piscina vede la lampada? A causa della rifrazione essa sembra essere ad una profondita' inferiore a quella reale.



$$d = h_a \operatorname{tg} \vartheta_r$$

$$d = h \operatorname{tg} \vartheta_i$$

$$h_a = h \frac{\operatorname{tg} \vartheta_i}{\operatorname{tg} \vartheta_r}$$

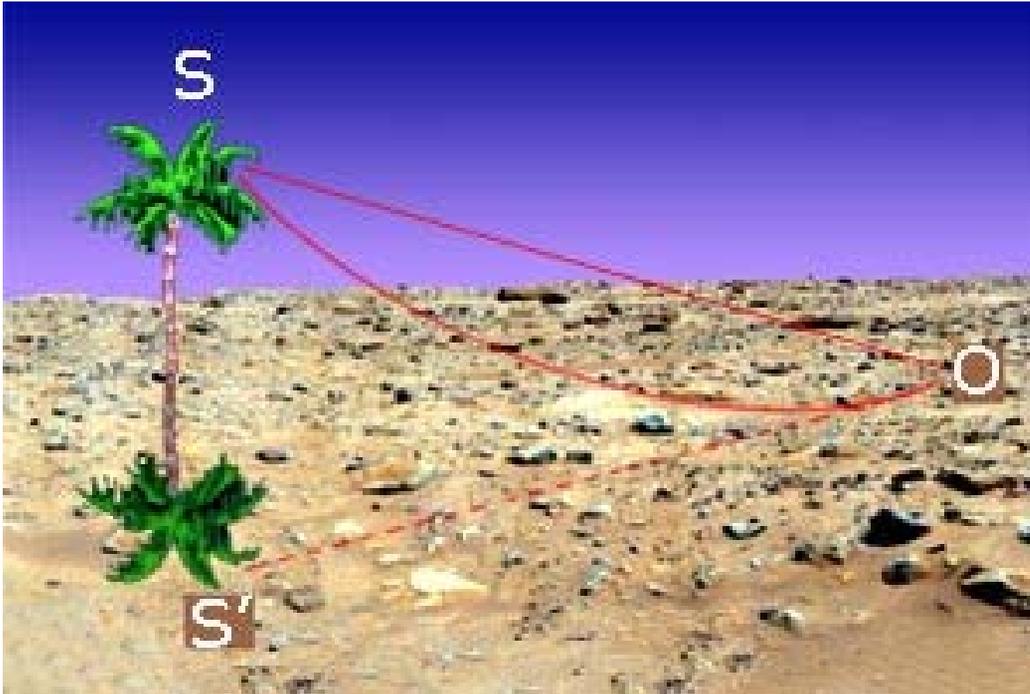
$$\frac{\sin \vartheta_i}{\sin \vartheta_r} = \frac{n_r}{n_i} = \frac{n_{aria}}{n_{acqua}}$$

e' piccolo L'immagine apparente(virtuale) dell'oggetto luminoso si deve trovare nel punto d'incontro dei prolungamenti in acqua(tratteggiati) dei due raggi uscenti.

Se l'angolo : $\sin \vartheta \approx \operatorname{tg} \vartheta \approx \vartheta$ con θ in radianti

$$h_a = h \frac{n_{aria}}{n_{acqua}} = 4.37 \frac{1}{1.333} = 3.28m$$

Il miraggio



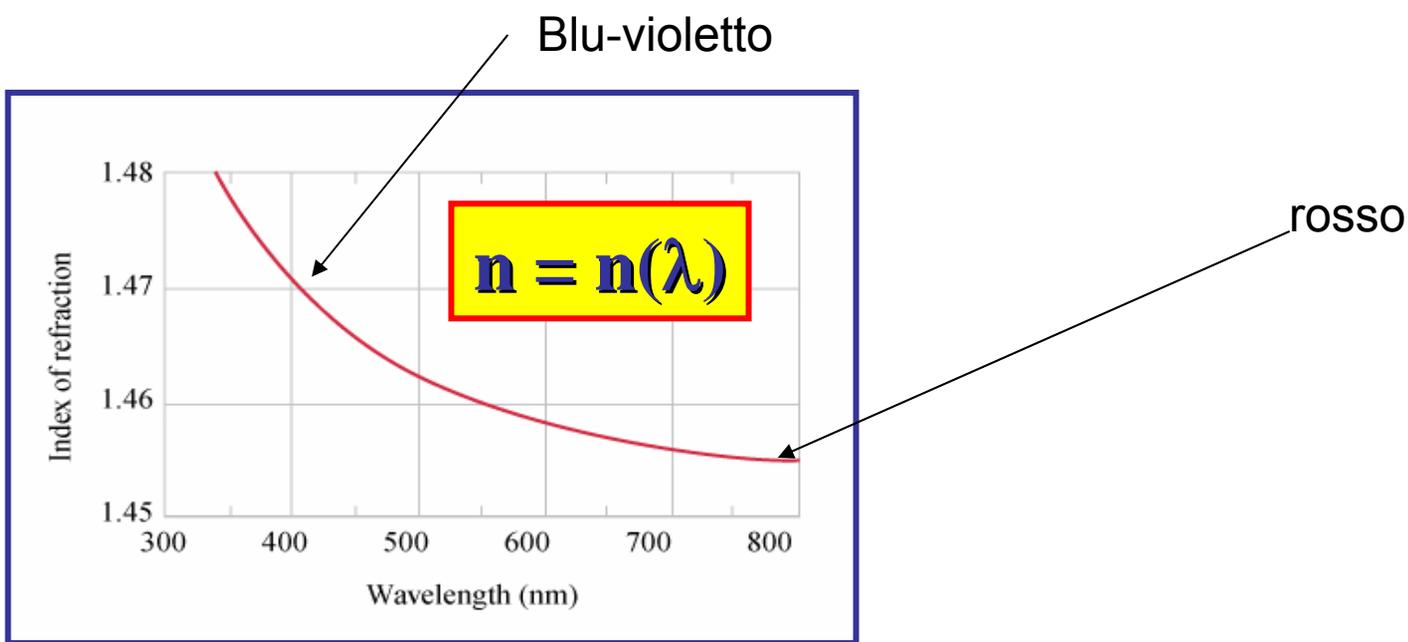
Nei deserti e per es d'estate
Sulle strade asfaltate

Gli strati d'aria a contatto della strada si riscaldano, mentre quelli soprastanti hanno temperature decrescenti con l'altezza.

L'aria a contatto del suolo sarà meno densa (indice di rifrazione minore) di quella agli strati superiori e i raggi che si immergono negli strati più bassi saranno costretti a incurvarsi verso l'alto.

All'osservatore posto O i raggi dell'oggetto sembreranno provenire da un'apparente riflessione dell'oggetto in S'

Se avviene l'opposto si ha la "fata morgana" o miraggio superiore



QUARZO FUSO

L'indice di rifrazione diminuisce al crescere della lunghezza d'onda nel campo del visibile:

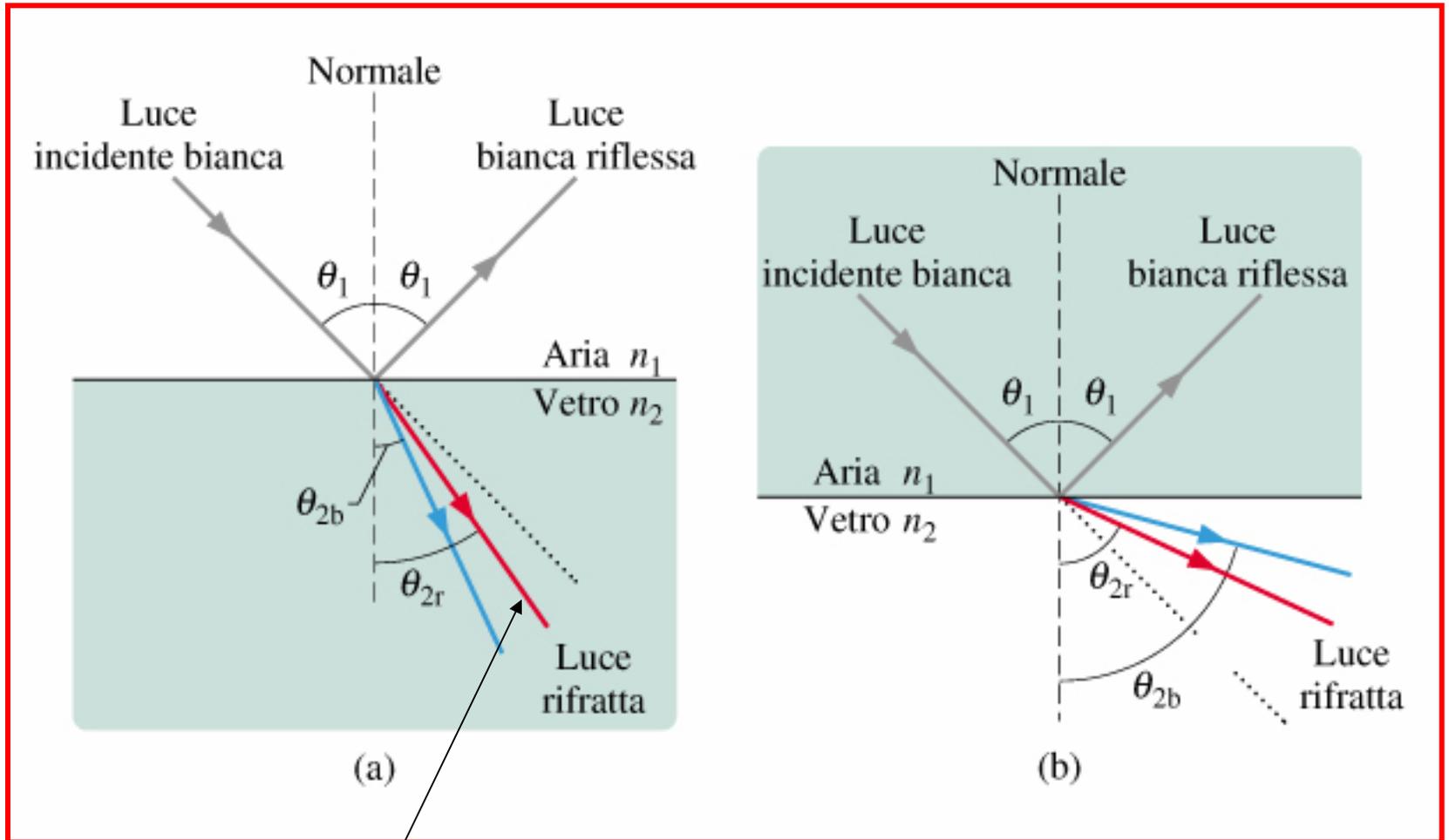
$$n = n(\lambda) \geq 1$$

e vale 1 nel vuoto;

la velocità della luce in un mezzo è:

$$v = c/n$$

La componente piu' deviata rispetto alla direzione originaria e' quella blu a lungh. d'onda minore



Lunghezza d'onda maggiore \rightarrow n minore \rightarrow angolo di rifrazione maggiore

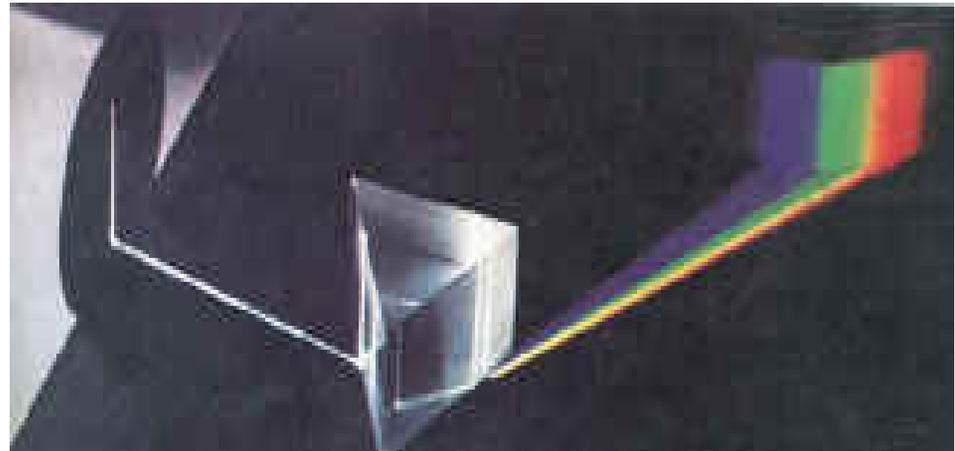
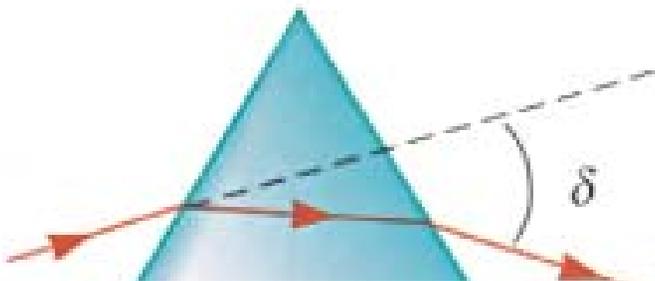
Dispersione della luce

La luce bianca e' composta di radiazioni di diversa lunghezza d'onda le quali, attraversando un mezzo dispersivo (prisma ottico, goccia d'acqua, ecc...) sono rifratte ad angoli diversi.

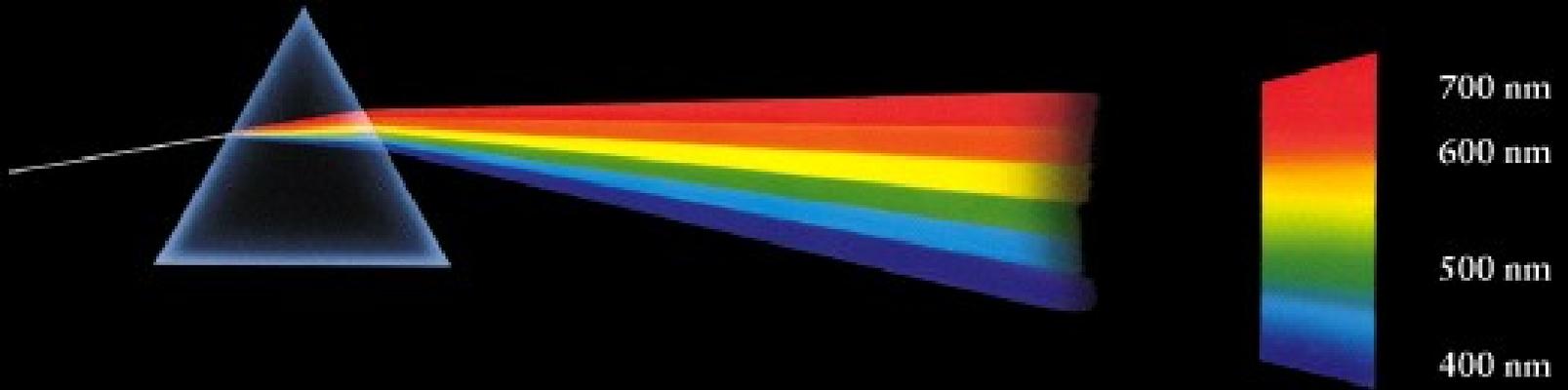
Il fenomeno e' noto come **dispersione della luce bianca**

→ separazione della luce nelle sue componenti monocromatiche
angoli di deviazione minimi per radiazioni di frequenza minore (maggiore lunghezza d'onda) e maggiore deviazione per radiazione di frequenza maggiore :
la luce viola (400nm) ha la max deviazione, la rossa (700nm) la minima.

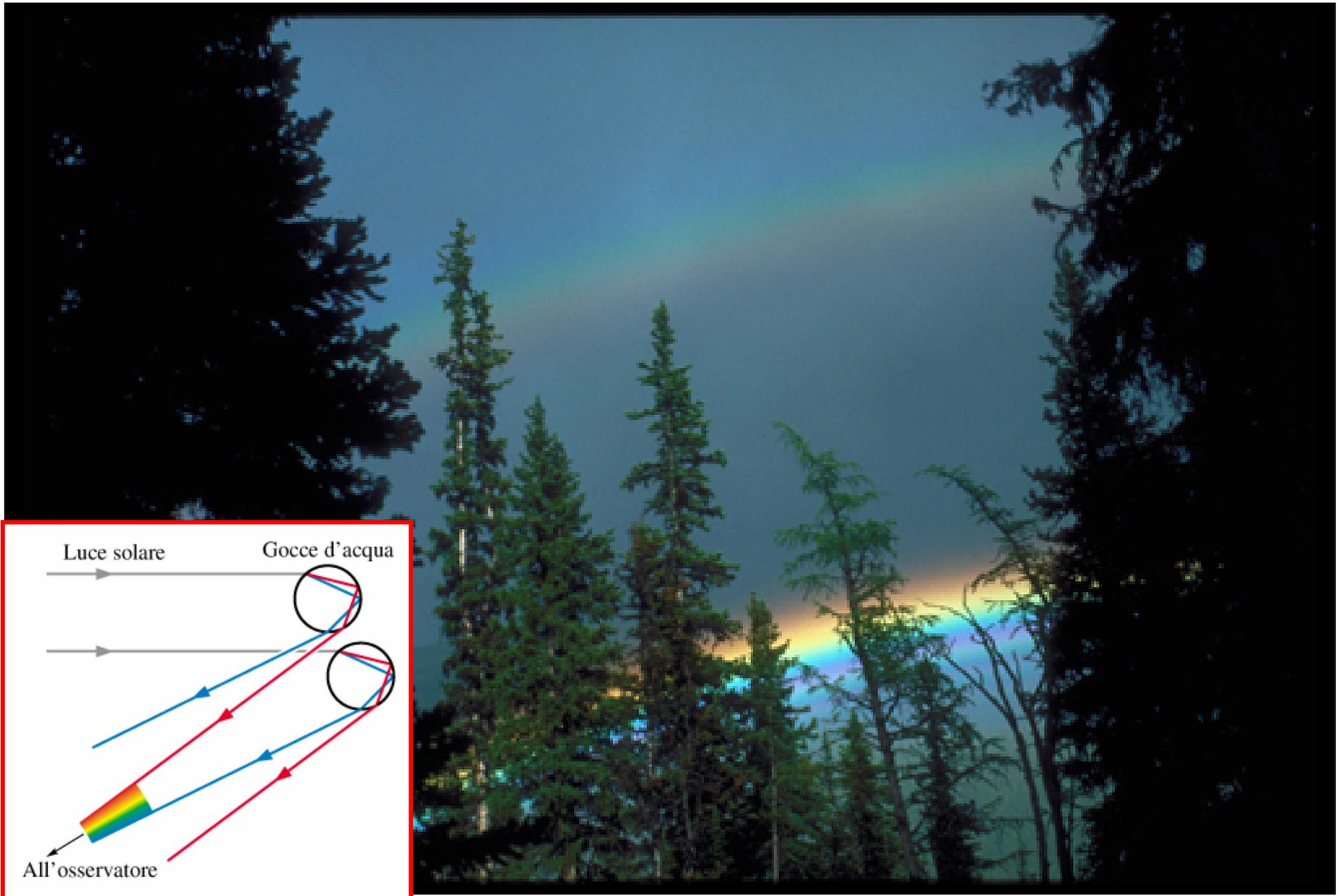
PRISMA OTTICO: mezzo trasparente e omogeneo, otticamente distinto dal mezzo circostante e da questo separato da due superfici piane non parallele.



La luce bianca che attraversa un prisma viene scomposta nei colori che la compongono



arcobaleno tipico esempio naturale di dispersione della luce.



Luce solare

Gocce d'acqua

All'osservatore

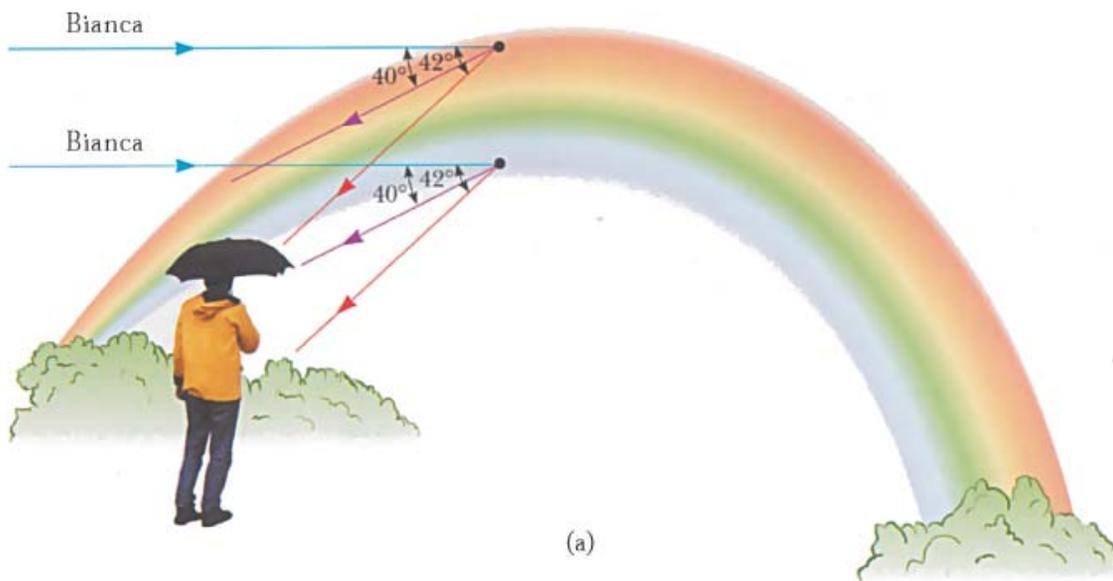
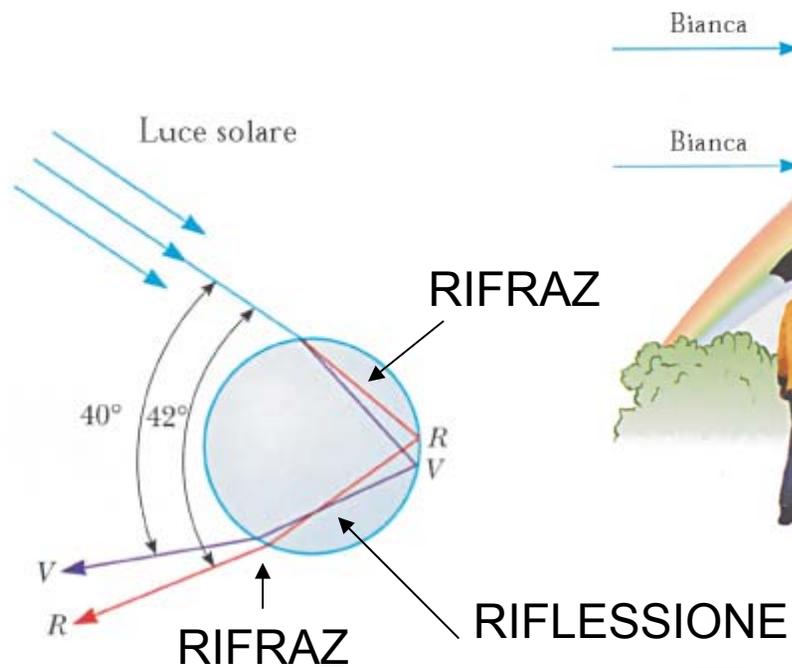


Figura 25.16

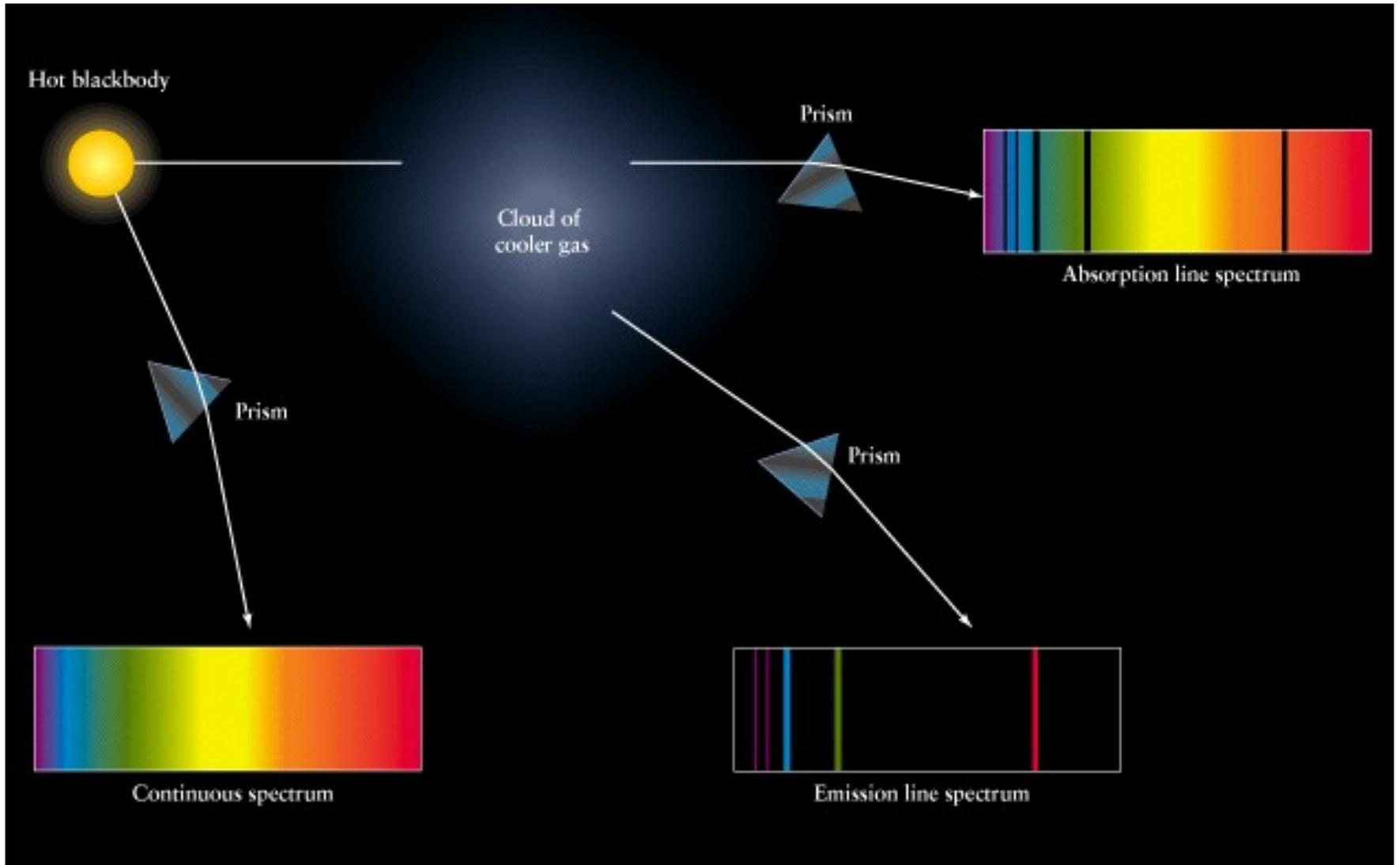
Rifrazione della luce solare da parte di una goccia di pioggia sferica.



Serway - Jewett
Principi di Fisica Vol. I
EdiSES

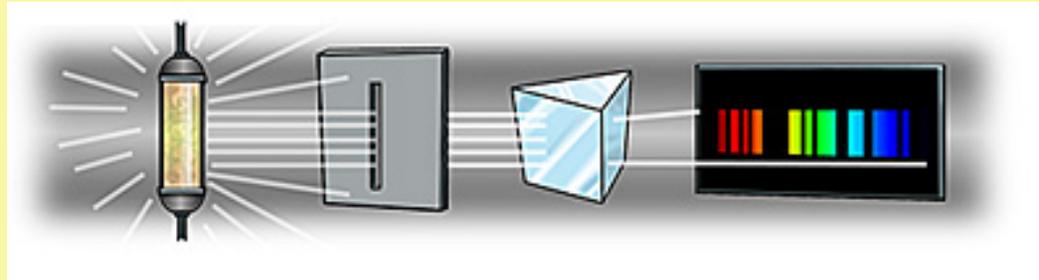


Dispersione della luce



Le righe spettrali

- La luce che si ottiene riscaldando un elemento chimico non contiene l'intero arcobaleno **ma solo determinate righe dette righe spettrali**
 - Ogni atomo quando viene sollecitato emette un insieme ben preciso di colori (**spettro di emissione**)



- Le righe spettrali sono una sorta di **firma dell'atomo**
- La **spettroscopia** è la scienza che utilizza le righe spettrali per individuare la composizione di un determinato oggetto (es. stelle lontane)

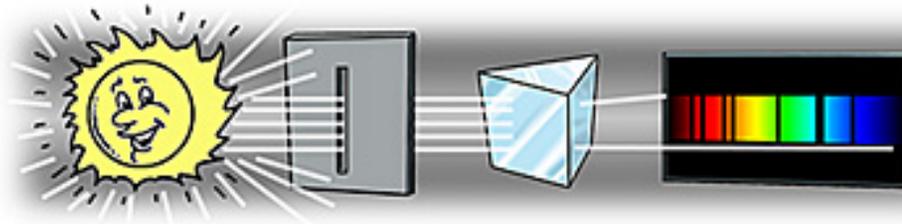
- Osservate per la prima volta nello spettro della luce solare da Wollaston (1802)
- Fraunhofer (1814) le studiò e le catalogò registrando la loro posizione senza capirne l'origine e il significato
- Kirchhoff e Bunsen (dopo il 1860) evidenziarono che ciascun elemento portato allo stato gassoso emette un suo spettro caratteristico, anche se legato ad altri elementi

- cesio e rubidio vennero scoperti perchè le loro righe spettrali non corrispondevano a quelle di nessun elemento conosciuto

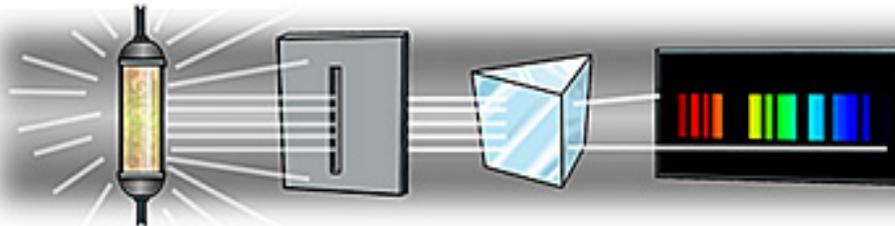
- Anche il gallio, l'elio, l'argon, il neon, il kripton e lo xenon vennero scoperti per mezzo della spettroscopia

Gli spettri di assorbimento

- Fraunhofer osservò fortuitamente che, quando la luce solare attraversa una fenditura e poi un prisma, questa crea, come ci si aspetta, uno spettro continuo con i colori dell'arcobaleno *ma lo spettro contiene anche una serie di righe scure*

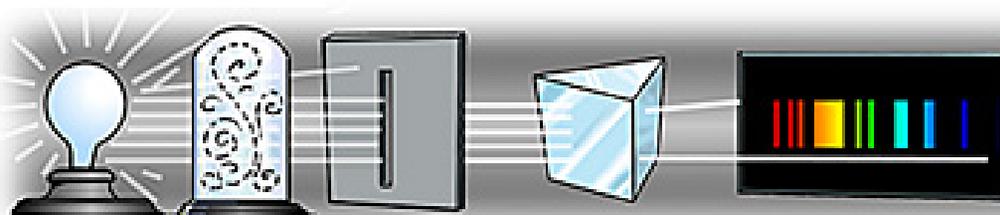


- lo spettro continuo della luce solare possiede circa 600 righe scure che Fraunhofer osservò (e che ora hanno il nome di *righe di Fraunhofer*)



- Quello che si sapeva era che gli elementi riscaldati emettono uno spettro discreto di righe colorate (**spettro di emissione**),

- Invece di un campione riscaldato, si consideri un gas freddo attraversato da un fascio di luce bianca (che contiene luce visibile di ogni lunghezza d'onda)
 - Qualunque gas attraversato da una radiazione a spettro continuo assorbe tutte e sole le frequenze che può emettere se eccitato



- lo spettro con queste frequenze mancanti è detto **spettro di assorbimento** (anch'esso caratteristico di una data sostanza)
- Confrontando spettro di emissione e spettro di assorbimento per uno stesso elemento si nota che
 - Le righe scure di uno spettro di assorbimento appaiono alle **stesse lunghezze d'onda** alle quali si trovano le righe luminose del corrispondente spettro di emissione

Idrogeno

Lo spettro della luce emessa da una lampada a vapori di idrogeno (atomico) è formato solo da poche righe separate (spettro discreto)

Idrogeno



Elio

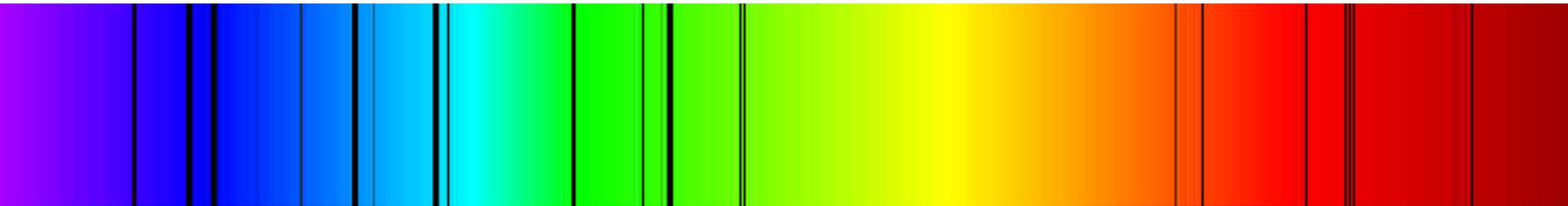
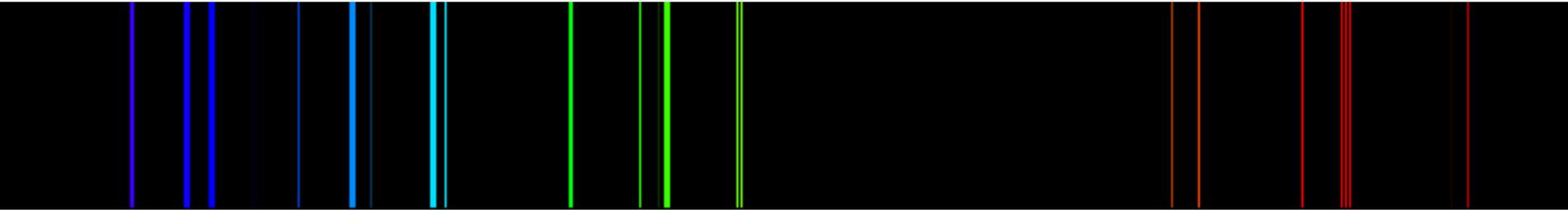


Litio



Berillio:

Spettro di emissione (spettro della luce emessa da una lampada al Berillio)



Berillio:

Spettro di assorbimento (spettro della luce bianca trasmessa attraverso un recipiente contenente Berillio)



Lampada



Neon



Idrogeno



Azoto



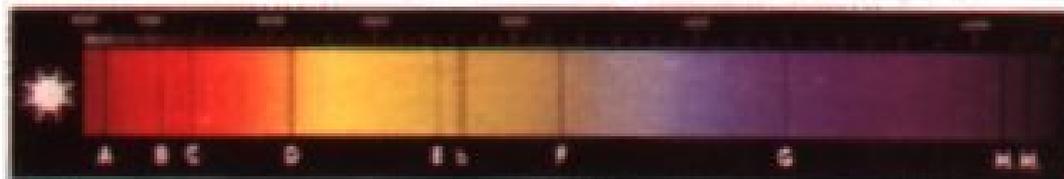
Mercurio



Ferro



Sodio



Sole

Specchi e lenti

Si definisce **diottro sferico** l'insieme di due mezzi trasparenti la cui superficie di separazione e' una superficie sferica; L'oggetto si trova in O e l'immagine in I , dove saranno rifratti i raggi luminosi. l'asse ottico principale e' la retta congiungente il centro della sfera con il suo vertice.

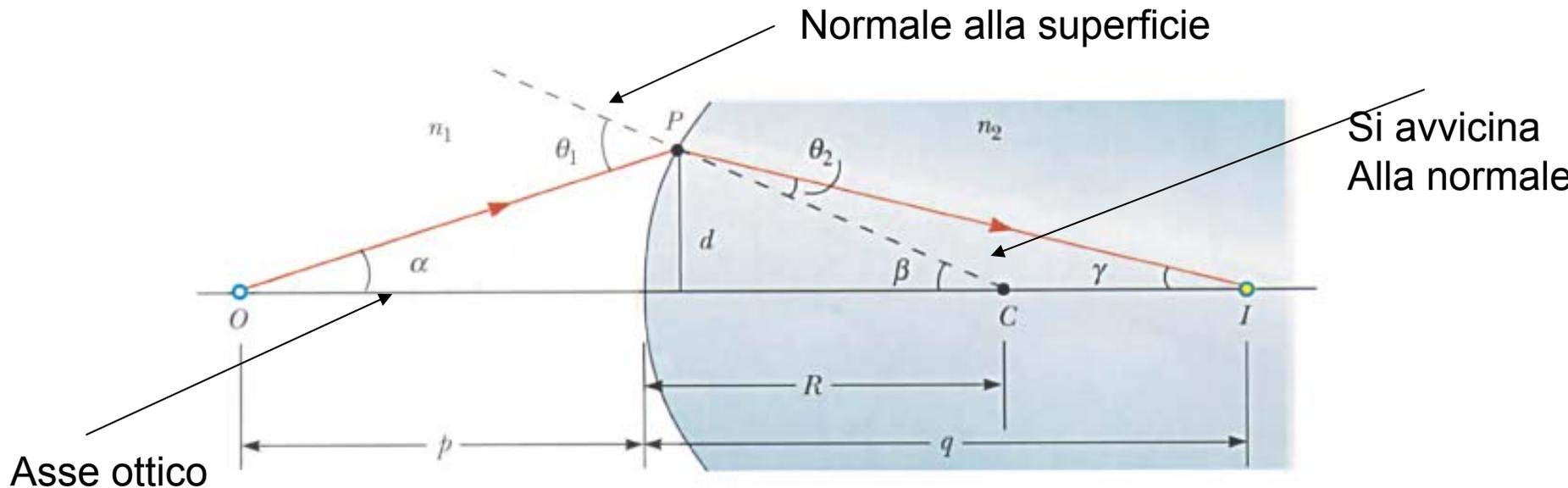


Figura 26.14

Geometria usata per derivare l'Equazione 26.8.

DIOTTRO CONCAVO

Convenzioni sui segni:

- p e' **positivo** se l'oggetto si trova davanti alla superficie (**oggetto reale**)
- p e' **negativo** se l'oggetto si trova dietro alla superficie (**oggetto virtuale**)
- q e' **positivo** se l'oggetto si trova dietro alla superficie (**immagine reale**)
- q e' **negativo** se l'oggetto si trova davanti alla superficie (**immagine virtuale**)
- R e' **positivo** se il centro di curvatura sta dietro la superficie
- R e' **negativo** se il centro di curvatura e' davanti alla superficie

Per i diottri (e poi per le lenti) rispetto alla superficie rifrangente le **immagini reali** si formano dalla parte opposta rispetto a quella dove si trova l'oggetto, mentre quelle **virtuali** dalla stessa parte.

Per radiazione monocromatica gli indici di rifrazione n_1 e n_2 di entrambi i mezzi sono costanti. Considerando piccoli angoli rispetto all'asse le leggi della rifrazione consentono di ottenere una relazione tra la distanza p in cui è posto l'oggetto (posto nel punto O) e quella a cui si forma la sua immagine nel punto I q :

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{(n_2 - n_1)}{R}$$

dove p e q sono le distanze dei punti sorgente e immagine dal vertice del diottro, e R è il suo raggio di curvatura.

Se la superficie e' un piano $R \rightarrow \infty$:

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = 0 \Rightarrow \frac{n_1}{p} = -\frac{n_2}{q} \Rightarrow q = -\frac{n_2}{n_1} p$$

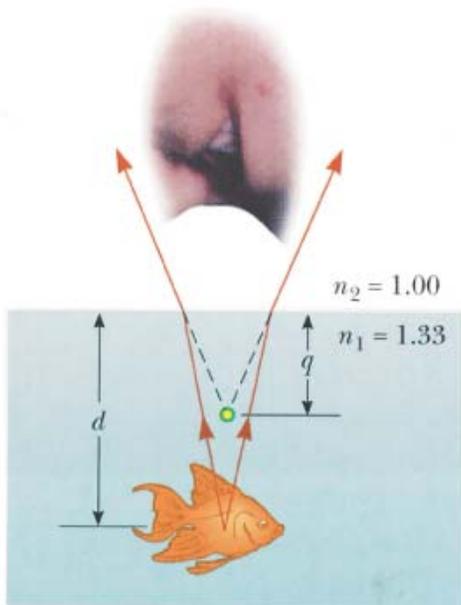


Figura 26.17

(Esempio 26.5) La profondità apparente, q , del pesce è minore della profondità reale, d . Tutti i raggi sono supposti parassiali.

$$q = -\frac{n_2}{n_1} p = -0.752d$$

Una **lente** e' un oggetto trasparente con due superfici rifrangenti i cui assi ottici coincidono, e' cioe' una combinazione di due diottri almeno uno dei quali sferico. L'asse ottico e' la retta che passa per i centri delle due superfici sferiche, o la retta normale alla superficie piana per il centro della superficie sferica. La lente e' detta **convergente** se i raggi di luce che sono inizialmente paralleli all'asse ottico vengono fatti convergere.

Se invece essi vengono fatti dalla lente divergere la lente viene chiamata **divergente**. Un tipo particolare di lente e' la **lente sottile**. Per tale lente lo spessore della stessa e' molto minore di entrambi i raggi di curvatura delle superfici rifrangenti

approx: considereremo solo raggi che formano angoli piccoli con l'asse centrale, detti **parassiali**

CONVERGENTI, distanza focale positiva
piu' spesse al centro

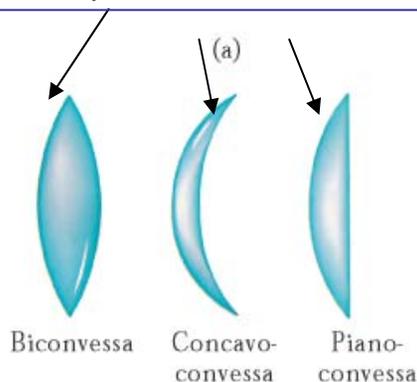
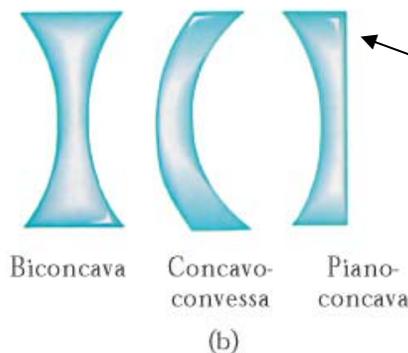


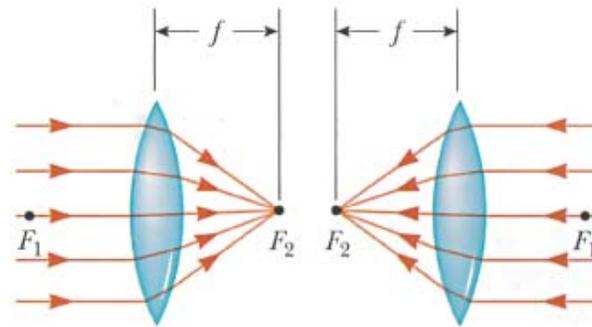
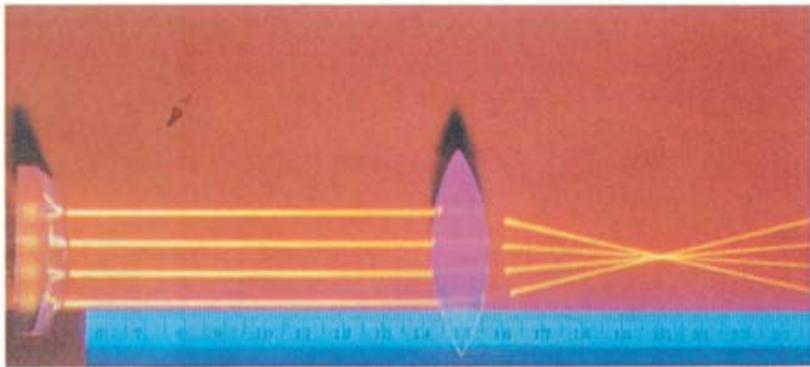
Figura 26.18

Varie forme di lenti: (a) Le lenti convergenti hanno una distanza focale positiva e sono spesse al centro. (b) Le lenti divergenti hanno una distanza focale negativa e sono più spesse ai bordi.

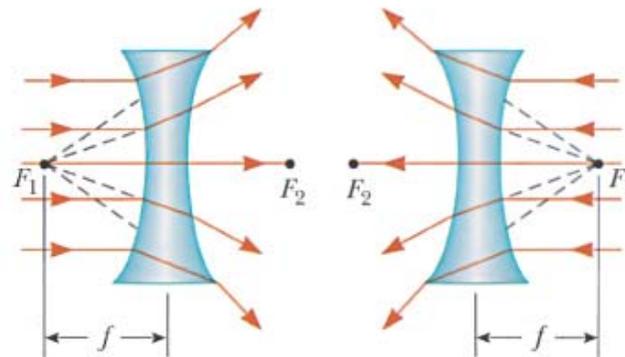
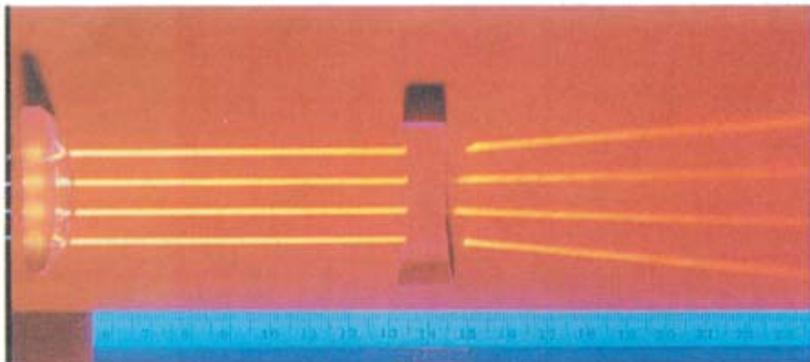


DIVERGENTI,
distanza focale negativa
Piu' spesse ai bordi





(a)



(b)

Figura 26.19

(Sinistra) Fotografie dell'effetto di una lente convergente e di una divergente su raggi paralleli. (Henry Leap e Jim Lehman). (Destra) I punti focali principali di (a) lenti convergenti e (b) lenti divergenti.



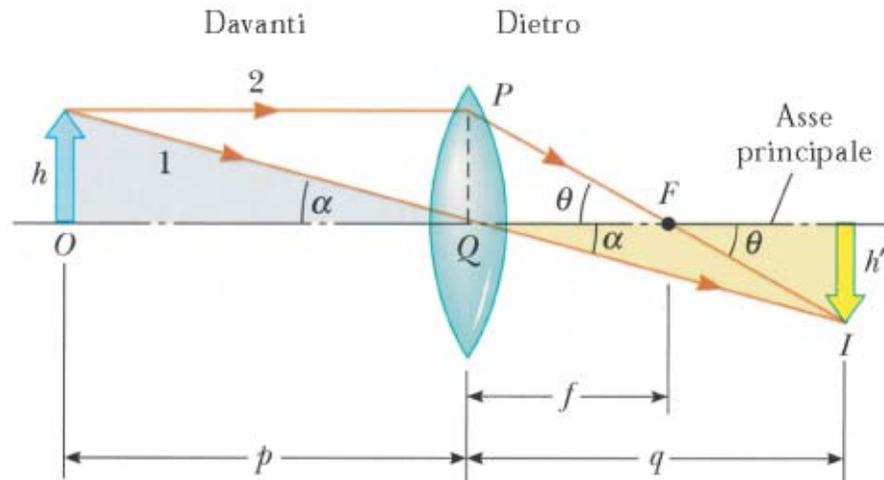
Serway - Jewett
Principi di Fisica Vol.I
EdiSES

Per una lente convergente i raggi paralleli all'asse focale convergono nel fuoco, per una lente divergente divergono e il fuoco e' il punto da cui i raggi divergenti sembrano essere originati.. Ogni lente ha due FUOCHI simmetrici rispetto all'asse centrale della lente

Per una lente sottile si dimostra la validita' della relazione:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{f}$$

Dove f e' la distanza o lunghezza focale che la caratterizza.
Essa fa due punti focali o FUOCHI posti a distanza f dal centro.
Questa equazione e' detta **equazione del costruttore di lenti**



Si usano comunemente negli strumenti ottici: macchine fotografiche, telescopi, microscopi.
Approx di lente sottile: spessore trascurabile rispetto ai raggi di curvatura.

La CONVENZIONE DEI SEGNI

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{f}$$

Convenzioni sui segni:

- p e' **positivo** se l'oggetto si trova **davanti** alla lente
- p e' **negativo** se l'oggetto si trova **dietro** alla lente
- q e' **positivo** se l'oggetto si trova **dietro** alla lente
- q e' **negativo** se l'oggetto si trova **davanti** alla lente
- R_1 ed R_2 sono **positivi** se la sup. corrispondente rivolge al mezzo circostante la convessita'
- R_1 ed R_2 sono **negativi** se la sup. corrispondente rivolge al mezzo circostante la concavita'
- f e' **positivo** se la lente e' **convergente**
- f e' **negativo** se la lente e' **divergente**

Si consideri una lente convergente di vetro crown in aria. Se f_1 e' la distanza focale di tale lente per luce violetta, calcolare di quanto aumenta percentualmente la distanza focale f_2 per la luce rossa rispetto a f_1 . (l'indice di rifrazione per il violetto e' 1.532, per il rosso e' 1.513)

Questa e' detta **aberrazione cromatica** della lente

COSTRUZIONE DELL'IMMAGINE PER LENTE CONV.

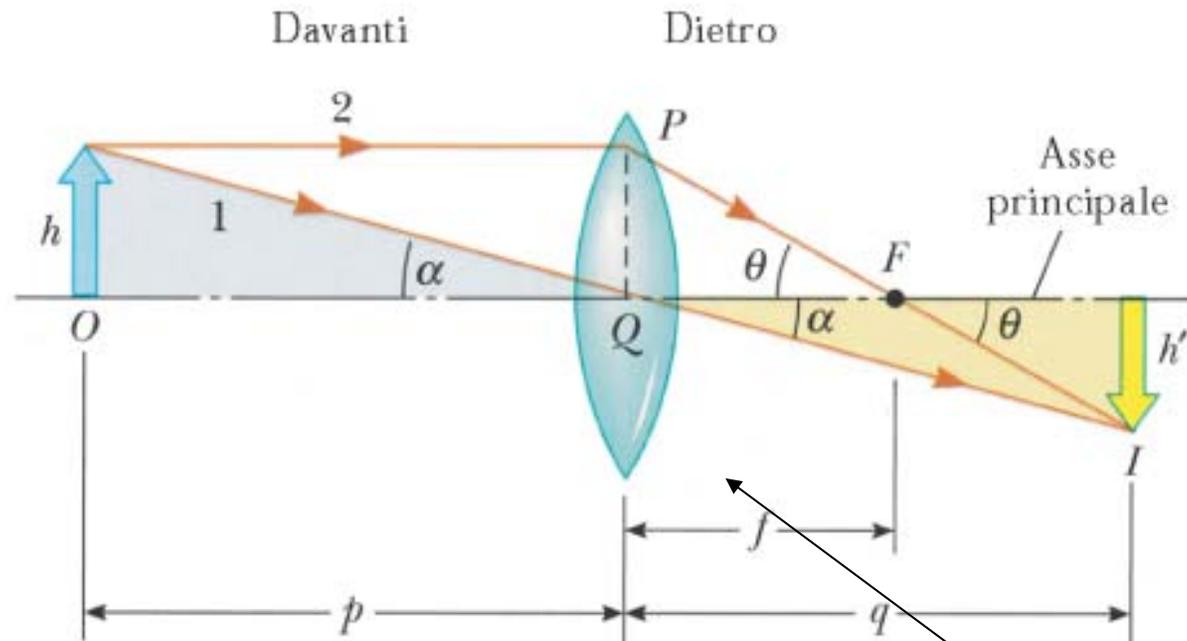


Figura 26.21

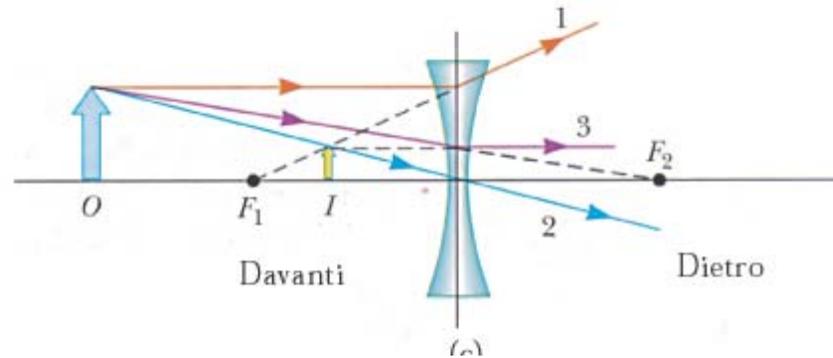
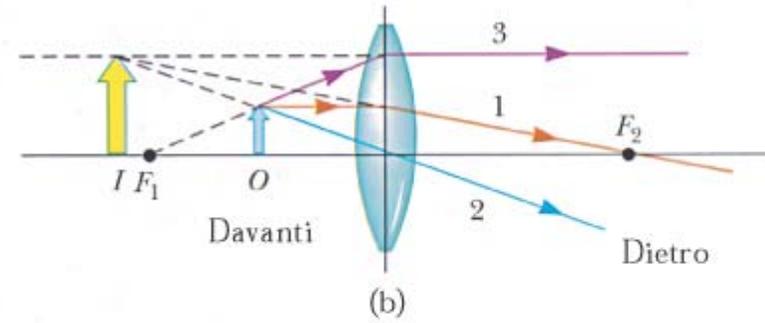
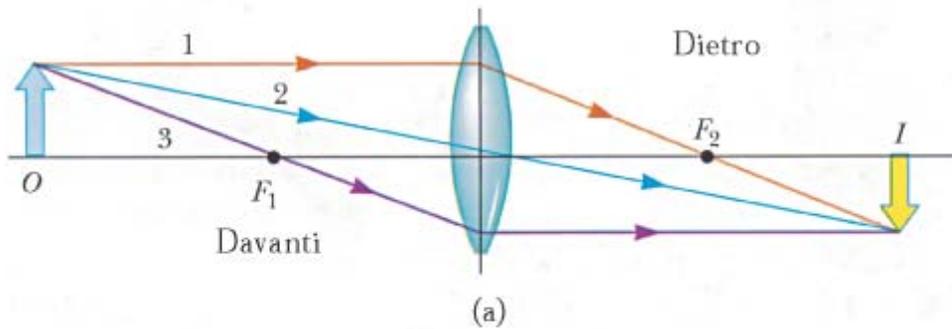
Costruzione geometrica per ricavare l'equazione delle lenti sottili.

BICONCAVA



Serway - Jewett
Principi di Fisica Vol.I
EdiSES

RAGGIO 1 PASSA PER IL CENTRO DELLA LENTE Q
RAGGIO 2 PARALLELO ALL'ASSE PRINCIPALE DELLA LENTE. DOPO LA RIFRAZ. PASSA PER IL FUOCO
IL PUNTO IN CUI SI INTERSECANO E' IL PUNTO IMMAGINE



LENTE CONVERGENTE:

Se l'oggetto si trova all'esterno del punto focale ($p > f$)

l'immagine e' **reale** e capovolta

Se l'oggetto si trova tra fuoco e lente ($p < f$)

l'immagine e' **virtuale**, dritta e piu' grande

LENTE DIVERGENTE:

L'immagine e' comunque **virtuale** dritta e piu' piccola dell'oggetto

Per localizzare l'immagine basta l'intersezione di 2 raggi, il terzo ci permette verifica della costruzione

$$M = \frac{-q}{p}$$

E' L'INGRANDIMENTO LINEARE TRASVERSALE,
il segno ci dice se l'immagine e' capovolta (negativo)
o no(positivo)

Si definisce **POTERE RISOLUTIVO** di un sistema ottico la minima separazione
Osservabile tra due oggetti

Il **potere diottrico** $1/f$ (misurato in diottrie se f e' misurato in
metri) dipende dal mezzo in cui la lente e' immersa. Esso ci da' la
misura della capacita' di convergenza o divergenza della lente

Per una sorgente all'infinito ($p = \infty$) **$q = f$** la distanza
dell'immagine coincide con la distanza focale della lente.

Caratteristica di una lente e' l'ingrandimento, che puo' essere
lineare (rapporto tra lunghezza dell'immagine e dell'oggetto) o
visuale (analogo rapporto tra gli angoli).

Usiamo in aria una lente sottile biconvessa con indice di rifrazione $n=1.45$ e $R=10\text{cm}$. Calcolare la lunghezza focale e il potere diottrico. Se pongo un oggetto a 40 cm dalla lente calcolare il punto di formazione dell'immagine e l'ingrandimento. Vedere cosa succede se $p=20\text{ cm}$ e $p=5\text{ cm}$.

$$R_1 = 10\text{cm} \quad R_2 = 10\text{cm}$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{f}$$

$$f^{-1} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = (1.45 - 1) \left(\frac{2}{R} \right) = \frac{0.45 \cdot 2}{10 \cdot 10^{-2}} = 9\text{m}^{-1}$$

$$f = 0.11\text{m} = 11\text{cm}$$

$$\text{Potere - diottrico} = f^{-1} = 9\text{diottrie}$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} = 9\text{m}^{-1}$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = \frac{p-f}{pf} = \frac{(40-11)\text{cm}}{440\text{cm}^2} = \frac{29}{440}\text{cm}^{-1} = 0.066\text{cm}^{-1}$$

$$q = 15.17\text{cm}$$

$$M = \frac{-q}{p} = \frac{-15.17}{40} = 0.38$$

q e' positivo l'immagine e' reale , capovolta e rimpicciolita

Considero una bolla sferica d'aria di raggio 3 cm posta in acqua ($n_{ac}=1.333$)
Calcolare la distanza focale nell'approssimazione di lente sottile.

$$R_1 = R \text{ \& } R_2 = R$$

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \left(\frac{1}{1.333} - 1 \right) \left(\frac{2}{R} \right) = -0.25 \left(\frac{2}{3cm} \right)$$

$$= -0.166cm^{-1}$$

$$f = -6.00cm$$

Combinazione di due lenti:

Ho due lenti sottili convergenti di focale $f_1=9$ cm e $f_2=15$ cm, distanti l'una dall'altra 20 cm e con l'asse in comune.

Un piccolo oggetto e' posto a 20 cm prima della prima lente.

Calcolare posizione dell'immagine e ingrandimento per il sistema di lenti

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f_1} \Rightarrow \frac{1}{q} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{p} = \left(\frac{1}{9} - \frac{1}{20}\right)cm^{-1}$$
$$q = \frac{180}{11} = 16.36cm$$

Cade tra le due lenti

$$p_2 = d - q_1 = 3.64cm$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f_2} \Rightarrow \frac{1}{q} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{p} = \left(\frac{1}{15} - \frac{1}{3.64}\right)cm^{-1}$$

$$q = -4.8cm$$

$$I_1 = -\frac{16.36}{20} = -0.8 \quad I_2 = \frac{4.8}{3.67} = 1.308$$

$$I = I_1 I_2 = -1.046$$

SPECCHI

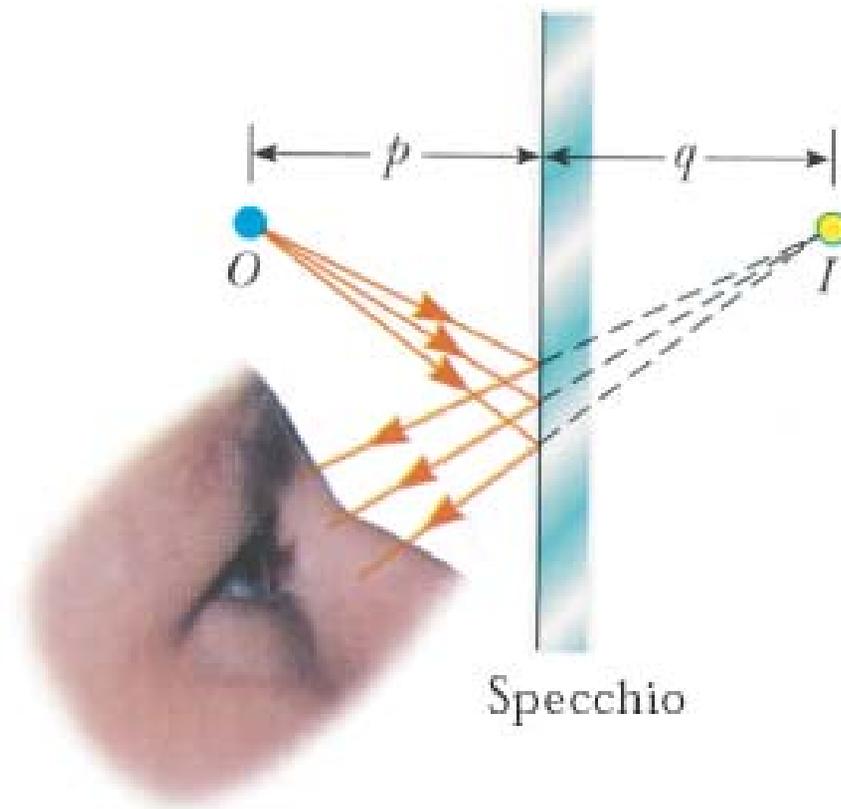
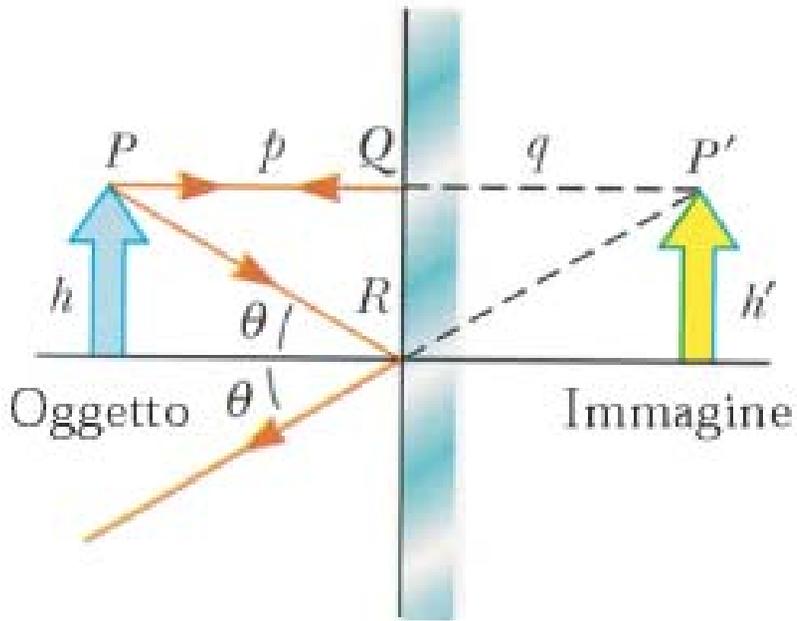


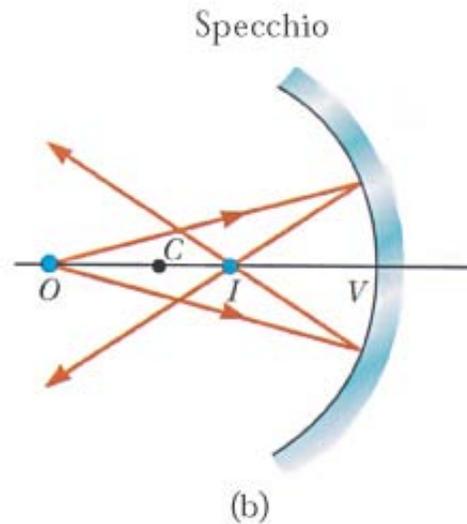
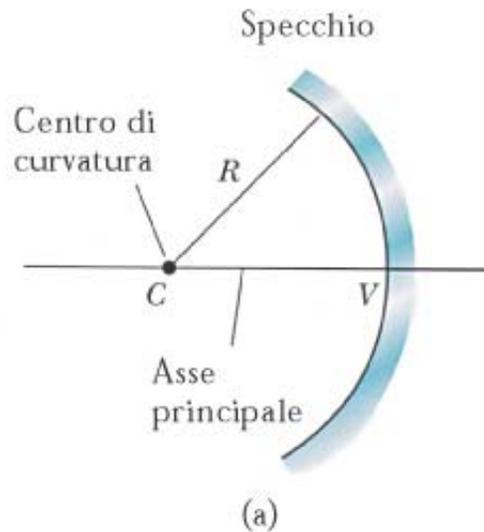
Figura 26.1

Un'immagine formata per riflessione da uno specchio piano. Il



GLI SPECCHI possono essere:

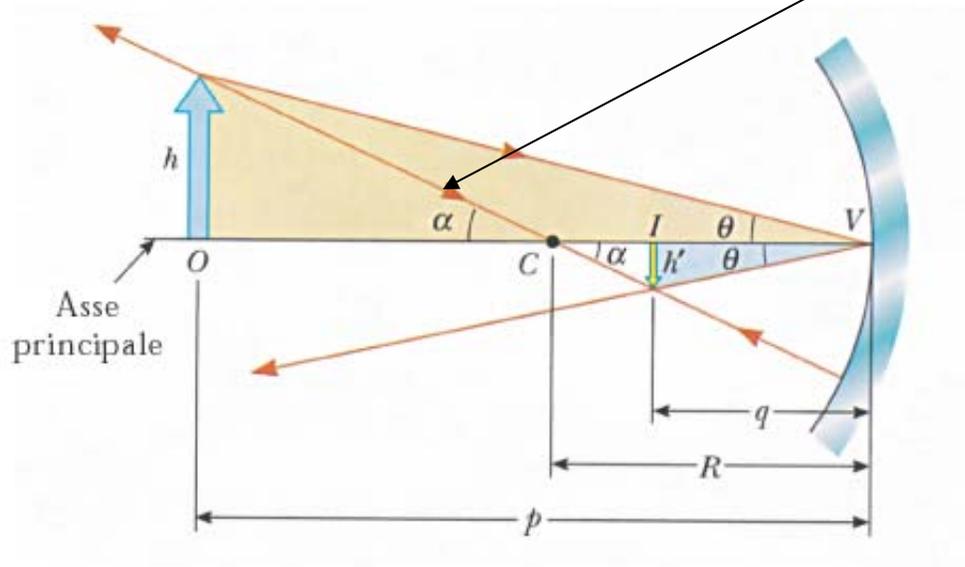
- 🐾 PIANI
- 🐾 SFERICI (CONCAVI o CONVESSI)



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

$$f = \frac{R}{2}$$

PASSA PER C
NON E' DEVIATO



SPECCHIO PIANO → RAGGIO INFINITO →
E' IL CASO LIMITE

Assumeremo che I raggi divergenti formino un piccolo angolo con l'asse principale (raggi parassiali)

Convenzioni sui segni:

• p e' **positivo** se l'oggetto si trova davanti allo specchio

• p e' **negativo** se l'oggetto si trova dietro allo specchio

• q e' **positivo** se l'immagine si trova davanti allo specchio

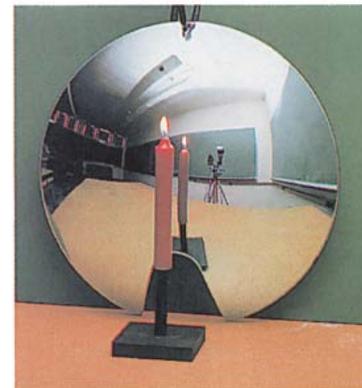
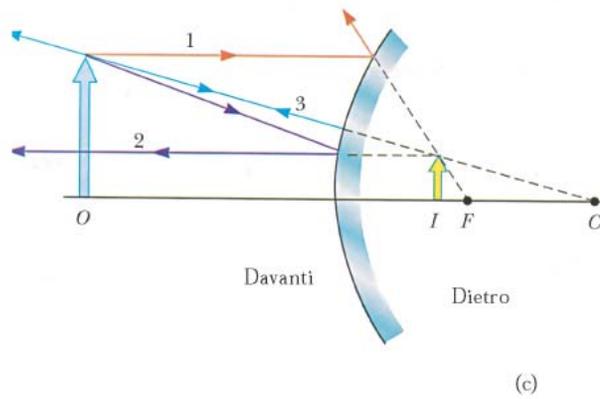
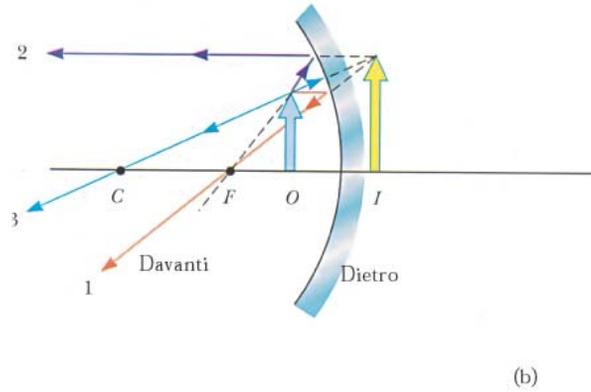
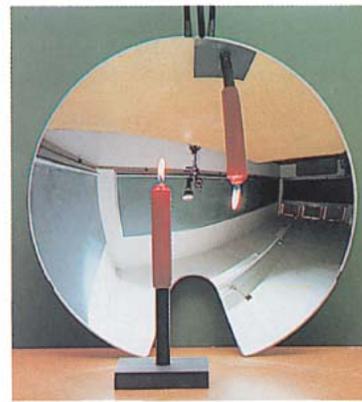
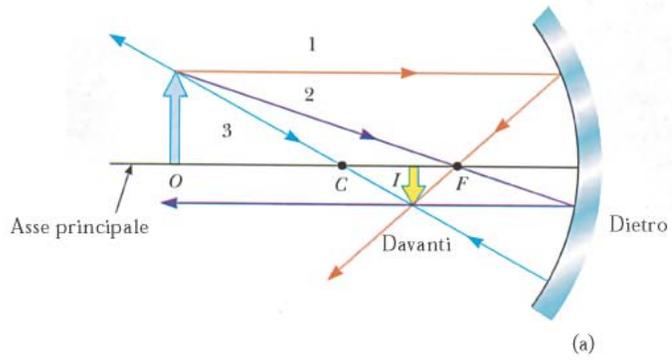
• q e' **negativo** se l'immagine si trova dietro allo specchio

• f e R sono **positivi** se il centro di curvatura e' davanti allo specchio
(specchio concavo)

• f e R sono **negativi** se il centro di curvatura e' dietro allo specchio
(specchio convesso)

• Se M e' positivo, l'immagine e' dritta

• Se M e' negativo, l'immagine e' capovolta



Se io, alta 167 cm, mi specchio in uno specchio piano verticale, vogliamo Calcolare qual'e' l'altezza minima dello specchio e la sua posizione rispetto a terra affinche' mi possa vedere completamente.

Assumiamo che la distanza tra gli occhi e il punto piu' alto della testa siano 10 cm

Tracciamo I raggi estremi a/b che partendo da testa e piedi raggiungono i miei occhi

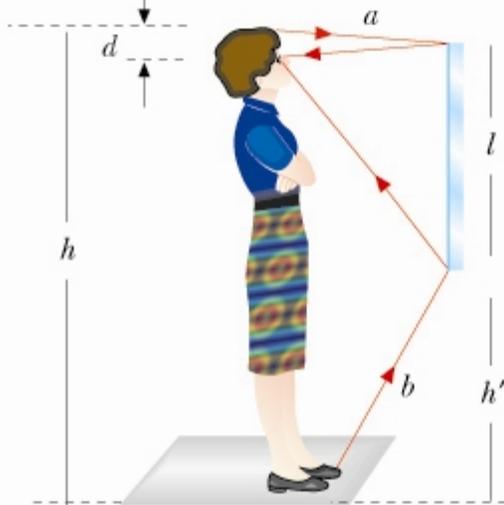


Figura 12.22



Mazzoldi - Nigro - Voci
Elementi di Fisica - Onde
EdiSES

$$h' = \frac{(h - 10\text{cm})}{2} = 78.5\text{cm}$$

$$l = h' + \frac{d}{2} = 83.5\text{cm}$$

OTTICA FISICA

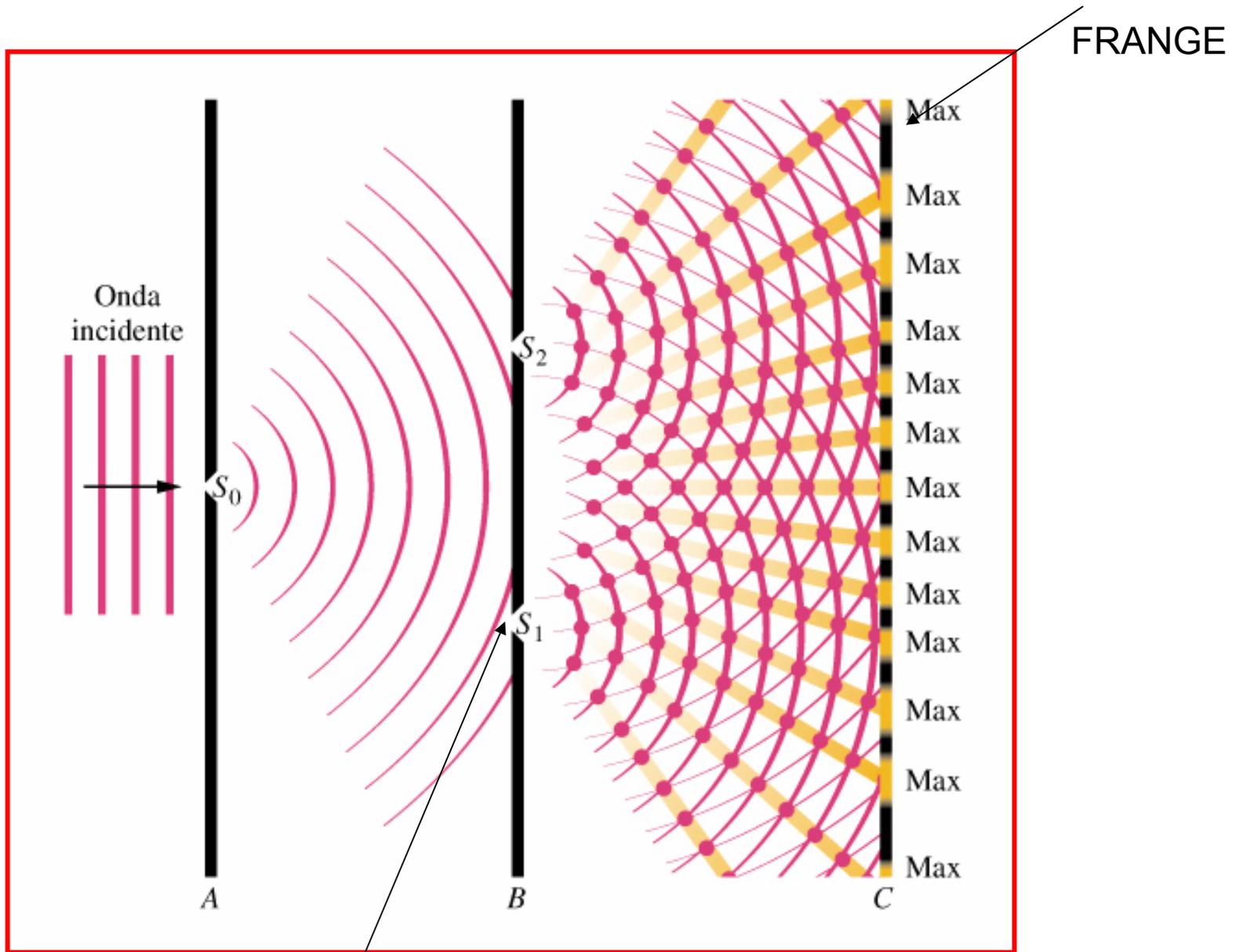
La natura della radiazione elettromagnetica e' sia *ondulatoria* che *corpuscolare*.

In certi casi la luce si comporta come un'onda (per es. nei fenomeni di interferenza e di diffrazione) in altri come una particella (per es. nell'effetto fotoelettrico o nell'effetto Compton).

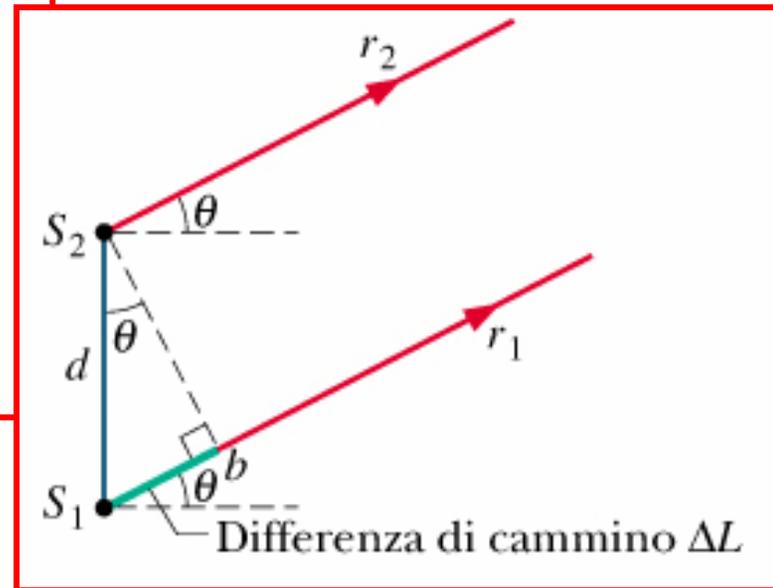
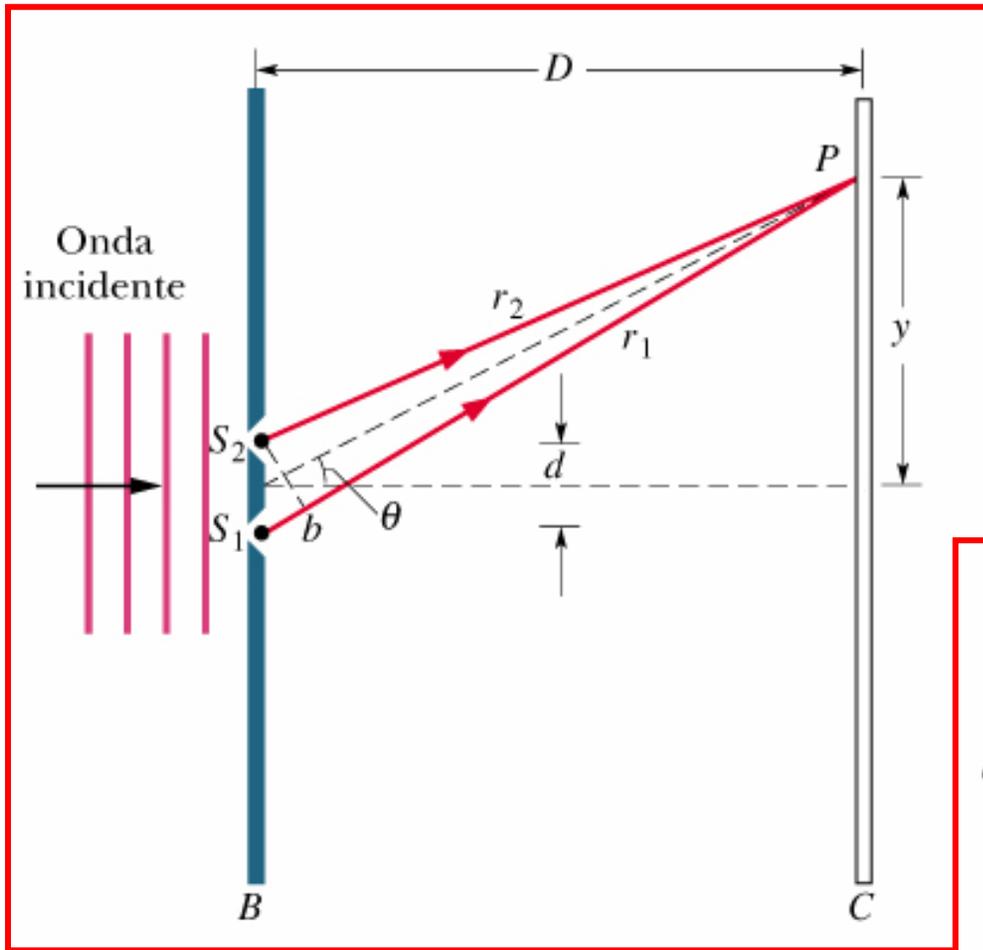
Se due onde e.m. percorrono due *cammini ottici* diversi, nel punto di arrivo (es. Schermo) si puo' avere *interferenza* costruttiva o distruttiva .

Per osservare questo fenomeno bisogna avere due sorgenti con medesima lunghezza d'onda e coerenti, cioe' in relazione di fase costante tra di loro.

Tipicamente un'ordinaria sorgente di luce ha variazioni casuali all'incirca ogni 10 ns: due sorgenti siffatte sono incoerenti.



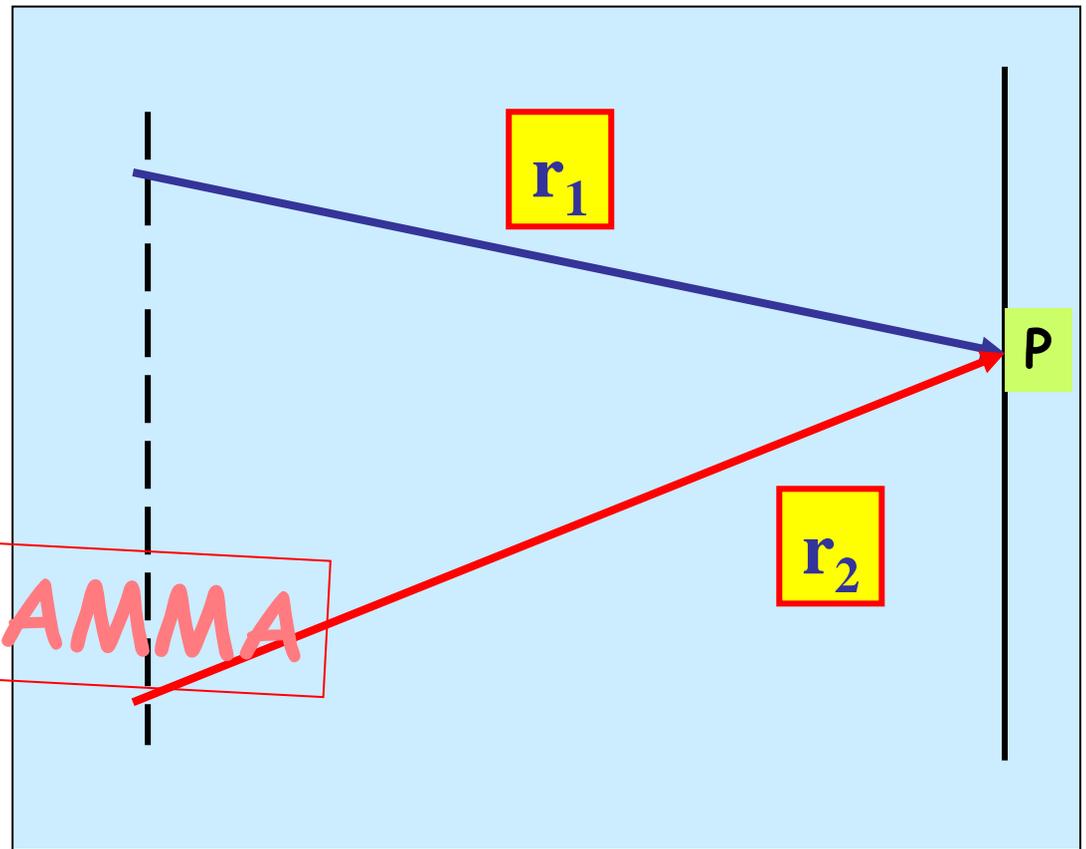
Fenditure sottili e parallele \rightarrow coppia di sorgenti coerenti



$$\Delta l = r_2 - r_1 = d \sin \theta$$

Se $D \gg d$ i due percorsi sono quasi paralleli

Una differenza di cammino ottico Δl comporta una differenza di fase sullo schermo



FUORI PROGRAMMA

$$I_p = 4I_1 \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

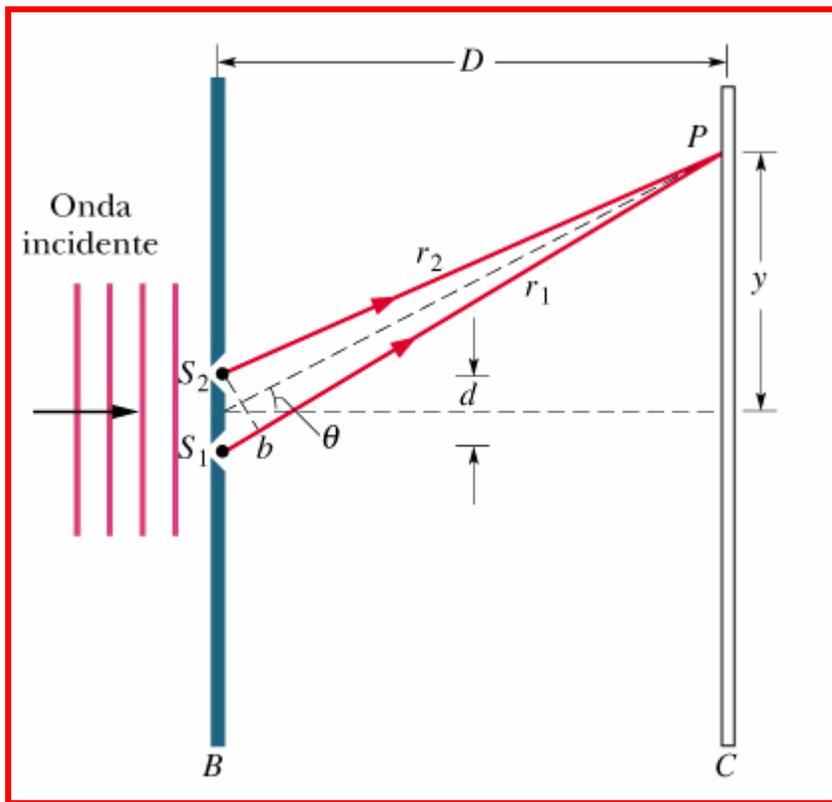
$$\delta = k\Delta l = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l = 2n\pi \Rightarrow d \sin \vartheta = n\lambda$$

Numero d'ordine

$$\Delta l = r_2 - r_1 = d \sin \vartheta = n\lambda = 2n \frac{\lambda}{2} \quad n = 0, \pm 1, \dots \text{ in fase}$$

$$\Delta l = d \sin \vartheta = (2n + 1) \frac{\lambda}{2} \quad n = 0, \pm 1, \dots \text{ in opposizione di fase}$$

Per ricavarsi la posizione sullo schermo:

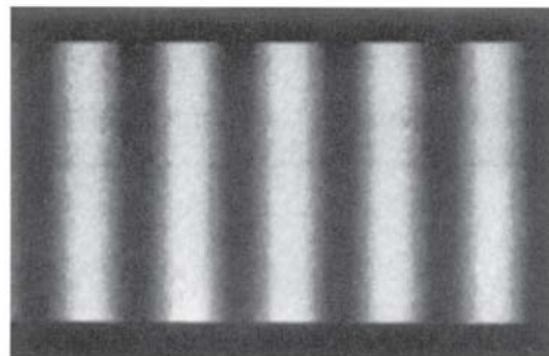


$$\sin \vartheta \approx \tan \vartheta = \frac{y}{D}$$

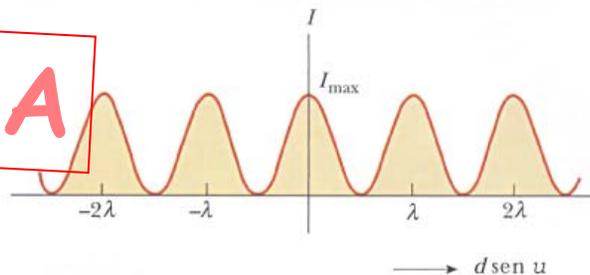
$$\text{ma } \sin \vartheta = n \frac{\lambda}{d}$$

$$\Rightarrow y_{\max} = n \frac{\lambda D}{d}$$

$$y_{\min} = (2n + 1) \frac{\lambda D}{2d}$$

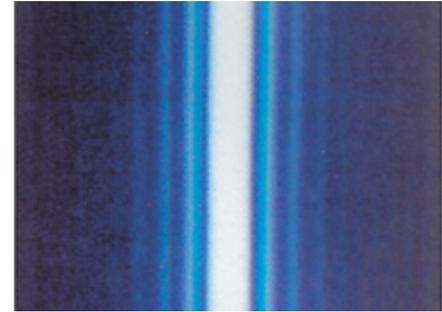
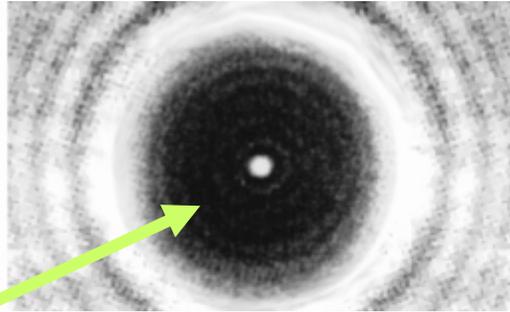


FUORI PROGRAMMA



Diffrazione

Si verifica quando un'onda incontra sul suo percorso un'ostacolo o un'apertura



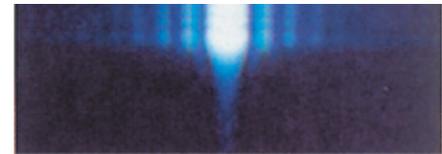
Gli effetti sono tanto piu' vistosi quanto piu' le dimensioni dell'apertura o dell'ostacolo sono vicine al valore della lunghezza d'onda delle onde incidenti

Figura 14.2

Punto luminoso di Poisson che si forma al centro della figura di diffrazione prodotta da un disco opaco.



Mazzoldi - Nigro - Voci
Elementi di Fisica - Onde
EdiSES



Serway - Jewett
Principi di Fisica Vol.I
EdiSES

INTERFERENZA
COSTRUTTIVA
-non e' spiegabile
senza teo. ondulatoria

DIFFRAZIONE DA DISCO OPACO

DIFFRAZIONE DA
SOTTILE FENDITURA

La figura di diffrazione da fenditura consiste di una banda centrale larga (max centrale) e bande secondarie piu' strette e meno intense (max. secondari) e da una serie di bande oscure (minimi)

Schermo lontano dalla fenditura

Fraunhofer

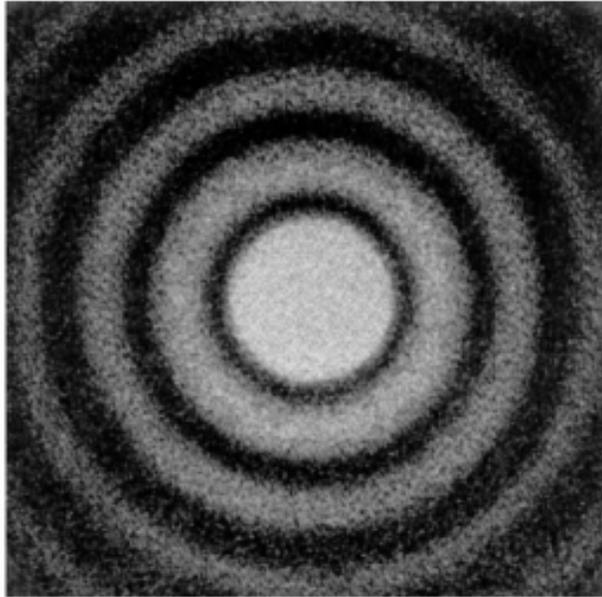


Figura 14.13

Immagine della luce emessa da un punto che attraversa un foro circolare nella condizione di Fraunhofer.



Mazzoldi - Nigro - Voci
Elementi di Fisica - Onde
EdiSES

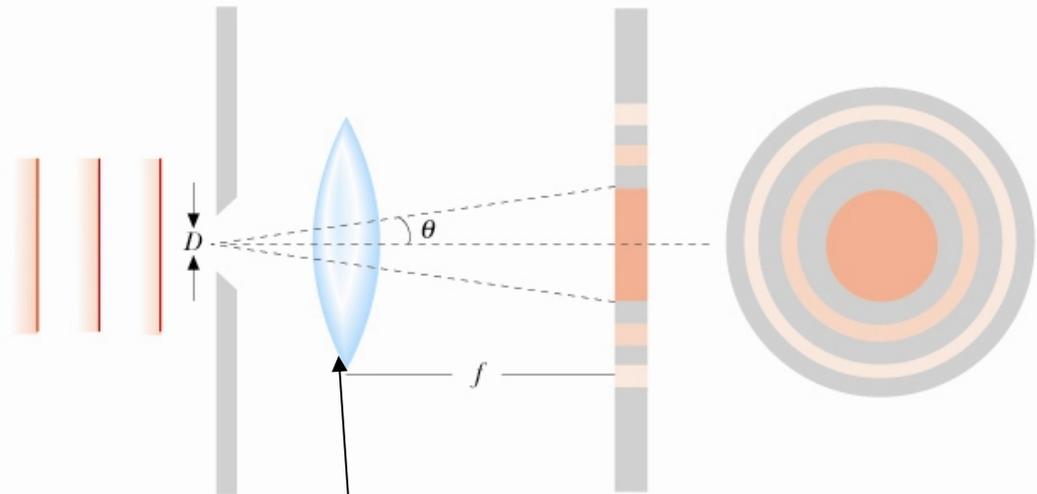


Figura 14.12

Figura di diffrazione di Fraunhofer della luce che attraversa un foro circolare.



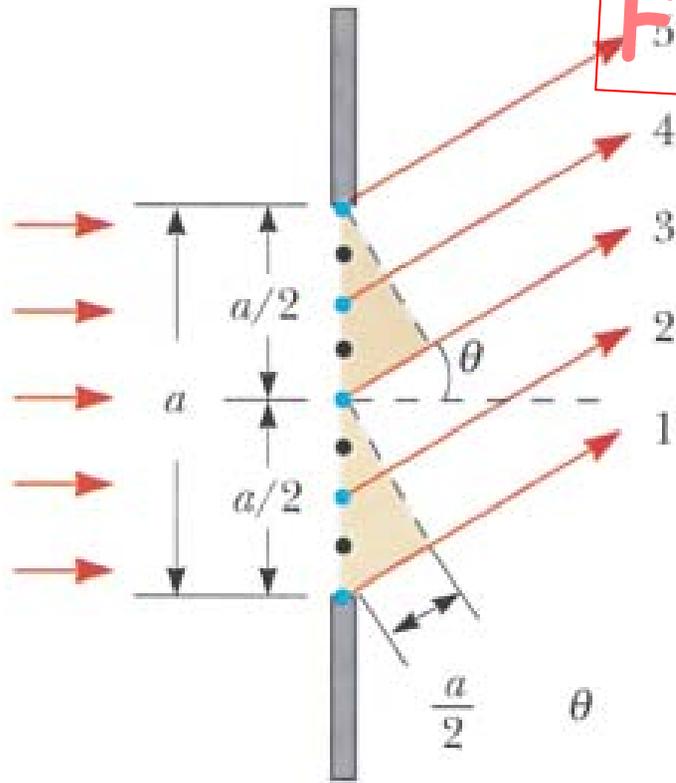
Mazzoldi - Nigro - Voci
Elementi di Fisica - Onde
EdiSES

per focalizzare i raggi paralleli

La larghezza finita della fenditura ci permette di comprendere la diffrazione di Fraunhofer (sorgente e schermo a grande distanza da apertura o ostacolo) → Per il principio di Huygens ogni porzione di fenditura si comporta come una sorgente di onde. La luce proveniente da una porzione di fenditura può interferire con quella proveniente da un'altra porzione.

FUORI PROGRAMMA

$$\lambda \ll a$$

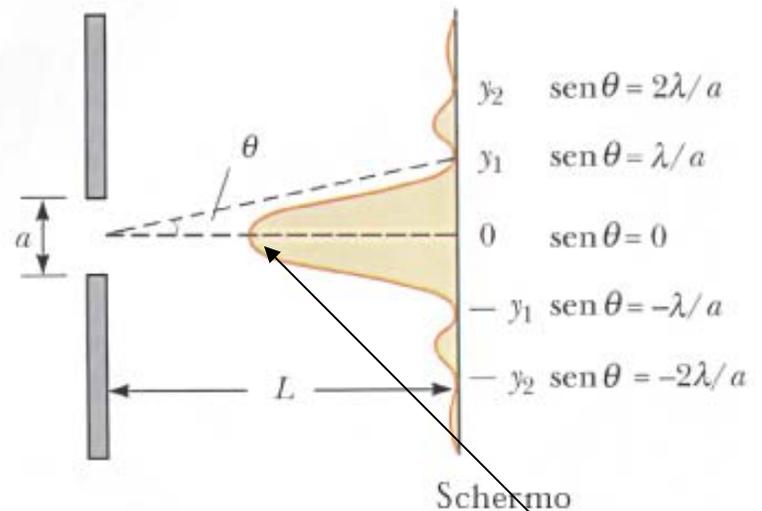


$$\Delta(\sin \vartheta) = \frac{2\lambda}{a}$$

Largh. del max centrale

$$\sin \vartheta = m \frac{\lambda}{a} \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$$

per i minimi



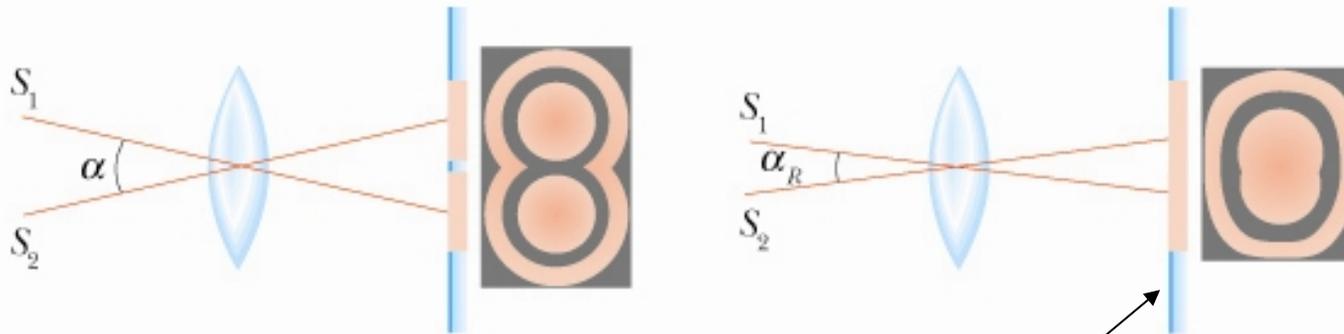
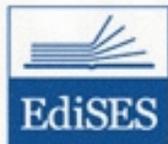


Figura 14.19

Definizione di angolo minimo di risoluzione di una lente.



Mazoldi - Nigro - Voci
Elementi di Fisica - Onde
EdiSES

La natura ondulatoria della luce limita la capacita' dei sistemi ottici di distinguere tra oggetti vicini

CRITERIO DI RAYLEIGH: due immagini sono **appena risolte** quando il massimo centrale della figura di diffrazione di una sorgente cade sul primo minimo della figura di diffrazione della seconda sorgente

Angolo limite di risoluzione per una fenditura:

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

Larghezza
fenditura

Per aperture circolari:

$$\theta_{\min} = 1.22 \frac{\lambda}{D} = 0.61 \frac{\lambda}{R}$$

Primo minimo di intensita'

Diametro
fenditura

Angoli in radianti

$$\rho = \mathcal{G}_{\min}^{-1} = \frac{D}{1.22\lambda}$$

E' il potere risolutivo o separatore della lente

Usato per gli strumenti ottici semplici o complessi (sono schematizzabili con una lente di apertura D e fuoco f)

→ Esempio la tecnica pittorica del puntinismo-divisionismo → da molto vicino Distinguiamo i punti

Una distanza lineare di 1 m separa due fari di automobile.

La luce utilizzata e' di lunghezza d'onda 460 nm, con una pupilla di 5 mm e un'indice di rifrazione dell'occhio di 1.36.

Troviamo la max distanza alla quale I due fari possono essere distinti come due Sorgenti luminose.

$$\vartheta_{\min} = 1.22 \frac{\lambda/n}{D} = \left(1.22 \frac{460.0 \cdot 10^{-9} m / 1.36}{5.0 \cdot 10^{-3} m}\right) = 8.3 \cdot 10^{-5} rad$$

$$L = \frac{y}{\tan \vartheta_{\min}} = \frac{1.0 m}{8.3 \cdot 10^{-5} rad} = 13 km$$

Bisogna nella realta' tener conto della grandezza dei fari e degli effetti dell'atmosfera

La pupilla di un gatto viene stretta fino a diventare una fessura verticale di 0.5 mm di larghezza durante il giorno. Che risoluzione angolare riesce ad avere?

$$\theta_{\min} = \frac{\lambda}{a} = \frac{500 \cdot 10^{-9}}{5 \cdot 10^{-4}} \approx 10^{-3} \text{ rad}$$

UN'antenna radar su una nave ha diametro 2.10 m e irradia a frequenza di 15 GHz. Due piccole navi si trovano a 9 km dalla nave . Quanto distanti dovrebbero essere Per essere distinte?

$$\theta_{\min} = 1.22 \frac{\lambda}{D} = 1.22 \frac{c}{\nu} \frac{1}{D} = 1.22 \frac{3 \cdot 10^8}{15 \cdot 10^9} \frac{1}{2.1} = 0.012 \text{ rad}$$
$$d = 9000 \text{ m} \cdot \theta_{\min}$$

George Seurat - La Grande Jatte (1884-1886)



Lo stesso vale per i pixel del televisore e del computer....

Strumenti Ottici

L'occhio

E' uno strumento ottico che forma e proietta le immagini su una superficie fotosensibile:
La *retina*

Cornea $\rightarrow n=1.38$

Umore acqueo $\rightarrow n=1.336$

Cristallino $\rightarrow n=1.40$

Umore vitreo $\rightarrow n=1.337$

Modificando l'aspetto del cristallino
(con i muscoli ciliari) possiamo variare
l'entita' della rifrazione prodotta
dal cristallino \rightarrow
modifichiamo la distanza
focale \rightarrow ACCOMODAMENTO

C'e' un limite per la messa a fuoco
degli oggetti \rightarrow
distanza di visione distinta \rightarrow
Per un giovane sono 25 cm circa
Il punto remoto e' a infinito

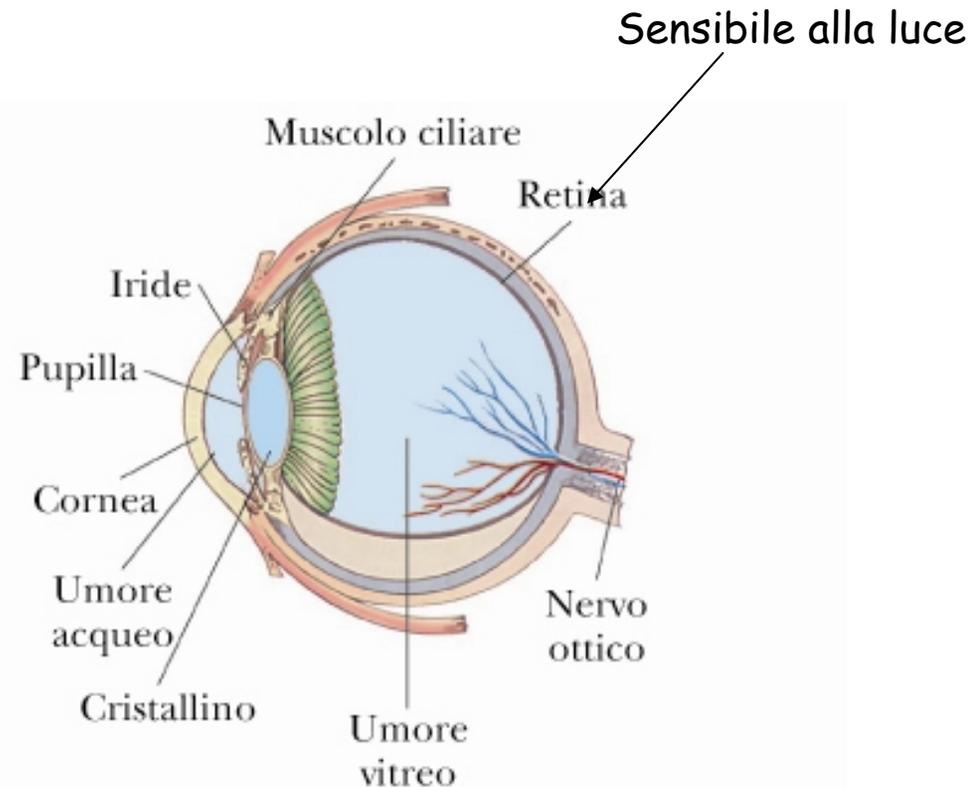
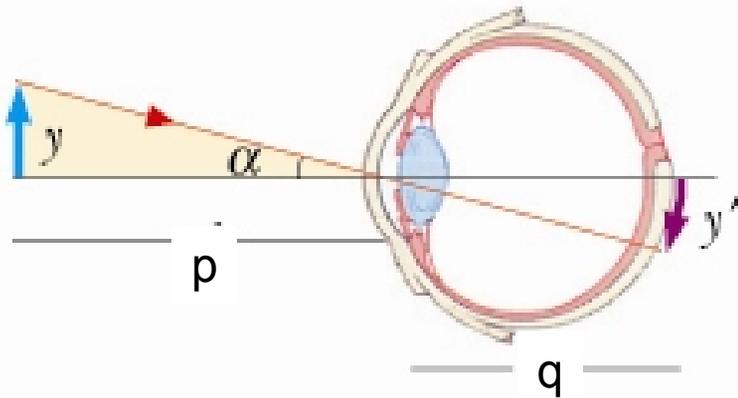


Figura 12.45

Rappresentazione schematica del-
l'occhio umano.

L'OCCHIO UMANO

- *cornea* → ricopre una protuberanza trasparente posta sulla superficie del bulbo oculare, max deviazione della luce
- *iride* → varia di dimensioni e determina la quantità di luce che entra nell'occhio attraverso la pupilla (come il diaframma di una macchina fotografica)
- *cristallino* → **lente** con lunghezza focale variabile regolata dai muscoli ciliari
 - raggio di curvatura grande → messa a fuoco di oggetti lontani
 - la lunghezza focale diminuisce per mettere a fuoco oggetti più vicini



$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{25\text{cm}} + \frac{1}{2.5\text{cm}} = 0.44\text{cm}^{-1}$$

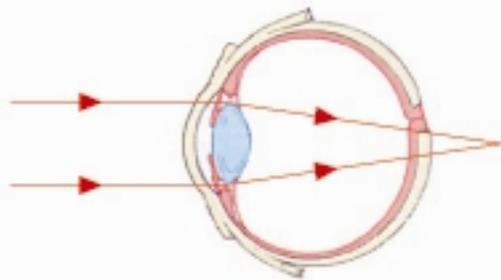
$$f = 2.3\text{cm}$$



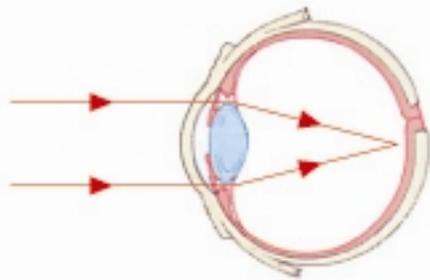
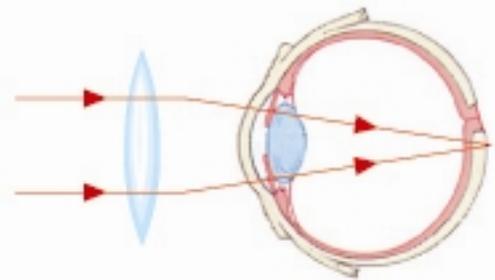
Mazzoldi - Nigro - Voci
Elementi di Fisica - Onde
EdiSES

Trattiamo l'occhio come una singola lente convergente sottile posta a 2.5 cm dalla retina, dove proietta le immagini rimpicciolite e capovolte.

Qual'è la sua distanza focale se viene messo a fuoco un oggetto all'infinito?
Di quanto cambia il potere diottrico?



(a)



(b)

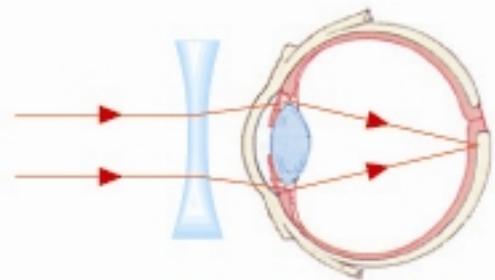


Figura 12.47

Occhio *ipermetrope* e correzione con l'uso di una lente convergente (a) e occhio *miope* e correzione con l'uso di una lente divergente (b).



Mazzoldi - Nigro - Voci
Elementi di Fisica - Onde
EdiSES

Un occhio miope mette a fuoco sulla retina solo oggetti vicini

Risoluzione per l'occhio umano

$$\alpha_r = 1.22 \frac{\lambda}{D} = 0.61 \frac{\lambda}{R} = 0.61 \frac{500nm}{1.5mm} \approx 2 \cdot 10^{-4} rad$$

$$d = 25cm \cdot 2 \cdot 10^{-4} rad = 50 \mu m$$

Es radiazione luminosa

Raggio pupilla

La risoluzione dipende dalla distanza a cui I due oggetti si trovano

IL MICROSCOPIO OTTICO

- Schema semplificato:
due lenti convergenti principali
(in realtà sistemi ottici) disposte sullo stesso
asse ottico:

👉 *obiiettivo*

👉 *oculare*

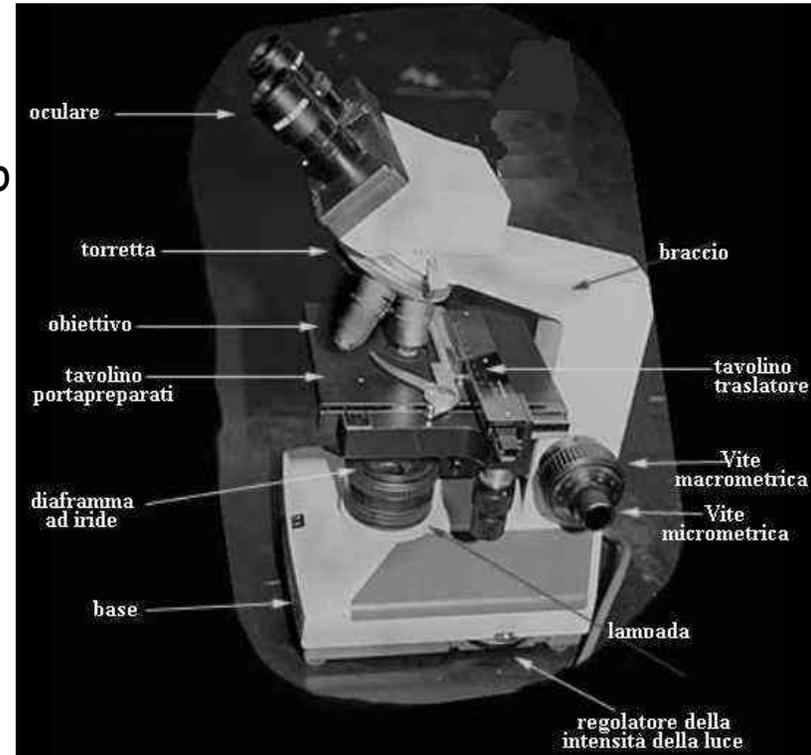
Con focali piccole rispetto alla
lunghezza del microscopio

In piu'

👉 *lente del condensatore*

→ focalizza la luce incidente
sul campione

👉 *diaframma* → regola
l'intensità luminosa



Il microscopio

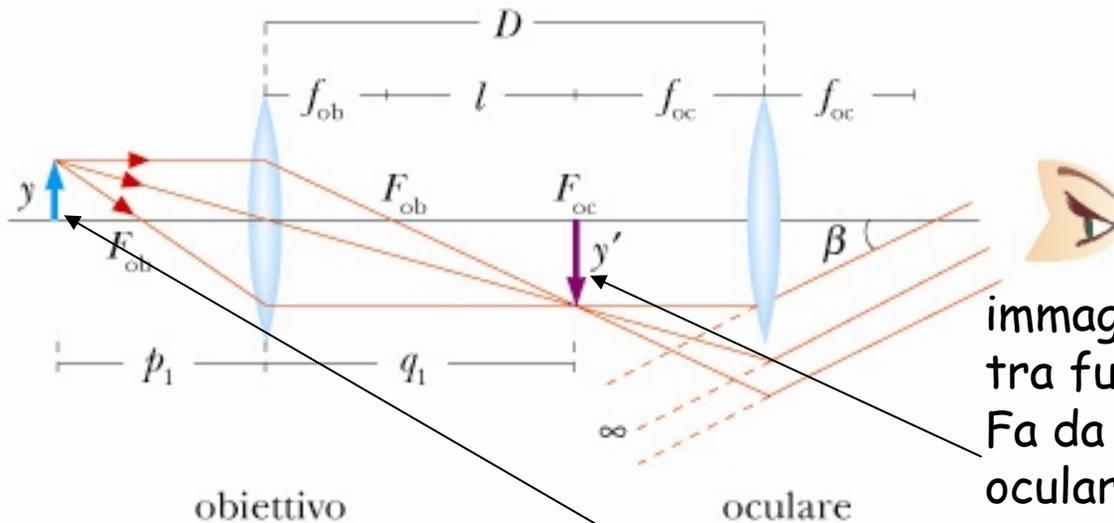


immagine reale
tra fuoco e lente
Fa da oggetto per l-
oculare →
Immagine virtuale
e fortemente
ingrandita

Distanza maggiore
Di quella focale

Figura 12.51

Schema del microscopio composto.



Mazzoldi - Nigro - Voci
Elementi di Fisica - Onde
EdiSES

L'oggetto si pone appena oltre il fuoco anteriore dell'obiettivo e la distanza D viene regolata in modo che l'immagine data dall'obiettivo cada nel piano focale dell'oculare, che funziona come una lente d'ingrandimento, mentre l'obiettivo ingrandisce trasversalmente l'oggetto. Lo strumento fa sì che l'immagine finale si trovi a distanza di visione distinta dell'occhio dell'osservatore posto vicino all'oculare

Ingrandimento lineare:

$$I = I_1 I_2 = \frac{q_{ob}}{p_{ob}} \frac{q_{oc}}{p_{oc}} \cong - \frac{L - f_{oc}}{f_{ob}} \left(\frac{25cm}{f_{oc}} \right) \approx - \frac{(25cm)L}{f_{ob} f_{oc}}$$

raggiunge facilmente il fattore 1000, ma è inutile oltre 400.

Se si trascurano effetti di diffrazione, qual è la minima distanza che può essere risolta usando un microscopio con $I=400$ o $I=1000$?

Occhio nudo $d=0.1\text{mm}$,

col microscopio $0.1\text{ mm}/400=250\text{ nm}$ o $0.1\text{ mm}/1000=100\text{ nm}$

Il potere risolutivo o separatore

Angolo sotto cui sono visti due punti posti nel piano focale davanti all'obiettivo

Distanza minima tra due punti distinguibili

$$\alpha = \frac{s}{f_{ob}}$$

$$PR = s = f_{ob} \alpha_r = 1.22 \lambda \frac{f_{ob}}{D_{ob}} = 0.61 \lambda \frac{f_{ob}}{R_{ob}}$$

$$s = \frac{0.61 \lambda}{\sin \phi} = \frac{0.61 \lambda_0}{n \sin \phi} = \frac{0.61 \lambda_0}{NA}$$

Apertura numerica

Indice di rifrazione, se oggetto immerso in un mezzo

Angolo di accettazione dell'obiettivo

$$\sin \phi = \frac{R}{f}$$

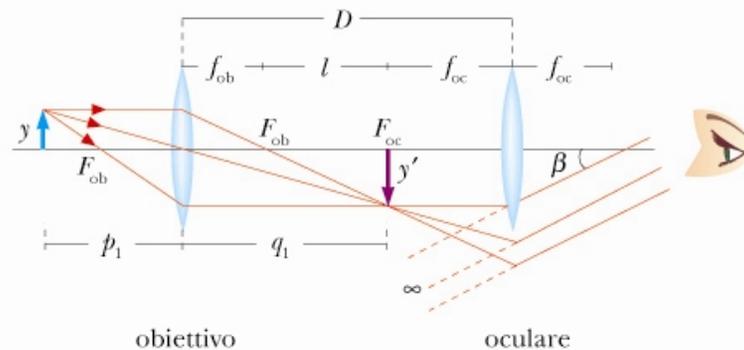


Figura 12.51

Schema del microscopio composto.



Mazzoldi - Nigro - Voci
Elementi di Fisica - Onde
EdiSES

Per aumentare potere risolutivo si puo' aumentare n riempiendo il volume tra oggetto e obiettivo con sostanza ad alto n o diminuire lunghezza d'onda della luce che illumina il campione

Per aumentare la risoluzione si puo':

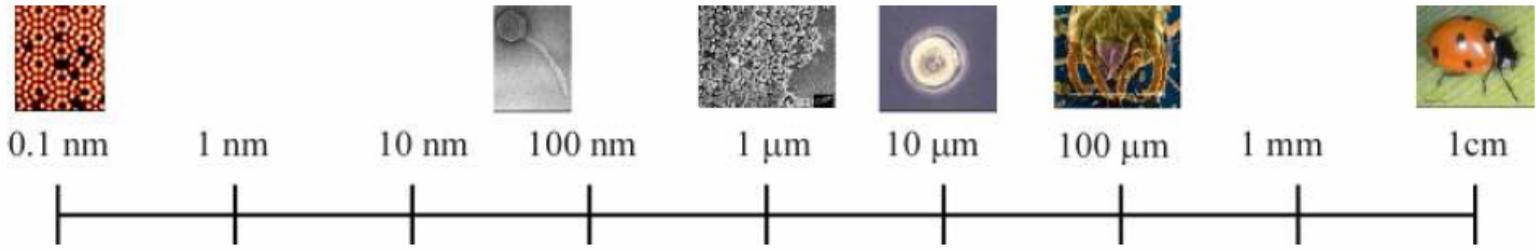
- ✘ Diminuire la lunghezza d'onda...si usano filtri blu o verdi(occhio piu' sensibile)
- ✘ Aumentare l'angolo d'accettanza...avvicinando il campione all'obiettivo(max pratico 72°)→ NA arriva a 0.95
- Aumentare n mettendo un liquido con alto indice di rifrazione tra campione ed Obiettivo (es acqua 1.33 o olio 1.52)→ NA arriva a 1.4

Se l'angolo sotteso dall'obiettivo è 90° , qual è la minima separazione risolvibile tra oggetti posti in aria e illuminati con luce verde ($\lambda=500\text{nm}$)? E se il microscopio e' ad immersione($NA=1.4$)?

$$\text{risoluzione} = \frac{0.61\lambda_0}{NA} = .305\mu\text{m}$$

$$\text{risol}_{\text{ immersione}} = .218\mu\text{m}$$

perche' indossando gli occhialini in acqua si vede bene, ma non ad occhio nudo?



Occhio umano →

Microscopia Ottica

(TEM) Microscopia Elettronica (SEM)

Microscopia a Forza Atomica (AFM)

Le lunghezze focali di obiettivo e oculare di un microscopio sono rispettivamente 0.5 cm e 3.0 cm e la distanza tra di loro e' $d=18\text{cm}$. Trovare posizione immagine reale e virtuale ed ingrandimento.

$$\frac{1}{p} = -\frac{1}{q} + \frac{1}{f} = \frac{1}{25\text{cm}} + \frac{1}{f} = \frac{f + 25\text{cm}}{f(25\text{cm})} = 0.37\text{cm}^{-1}$$

$$p = 2.7\text{cm}$$

$$M = -\frac{q}{p} = \frac{25\text{cm}}{f(25\text{cm})}(f + 25\text{cm}) = 1 + \frac{25\text{cm}}{f}$$

$$= 1 + \frac{25\text{cm}}{3\text{cm}} = 9.3$$

Quando il microscopio e' a fuoco deve formarsi l'immagine reale 2.68 cm sotto l'oculare.

$$q' = d - p = 18\text{cm} - 2.7\text{cm} = 15.3\text{cm}$$

$$\frac{1}{p'} = -\frac{1}{q'} + \frac{1}{f'} = -\frac{1}{15.3\text{cm}} + 2\text{cm}^{-1} = 1.93\text{cm}^{-1}$$

$$p' = 0.52\text{cm}$$

$$M' = -\frac{15.32}{0.5} = -30.7$$

$$M_{tot} = MM' = -283.6$$

Quale dev'essere la focale di una lente singola per avere lo stesso ingrandimento?

$$p \approx f$$

$$f \approx \frac{q}{M} = \frac{25cm}{284} = 0.09cm$$

Un proiettore per diapositive con una distanza focale di 15 cm proietta su uno schermo che dista dalla lente 4 m. A quale distanza dalla lente deve trovarsi la diapo? Qual'è l'ingrandimento?

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{f} - \frac{1}{q} = \frac{1}{15\text{cm}} - \frac{1}{400\text{cm}} = \frac{77}{1200} \text{cm}^{-1}$$

$$p = 15.6\text{cm}$$

$$M = -\frac{q}{p} = -\frac{400}{15.6} \approx 26$$

Quanto risulta grande l'immagine di una donna di 1.7 m posta a 30 m davanti ad una macchina fotografica con un obiettivo di distanza focale 50 mm ?

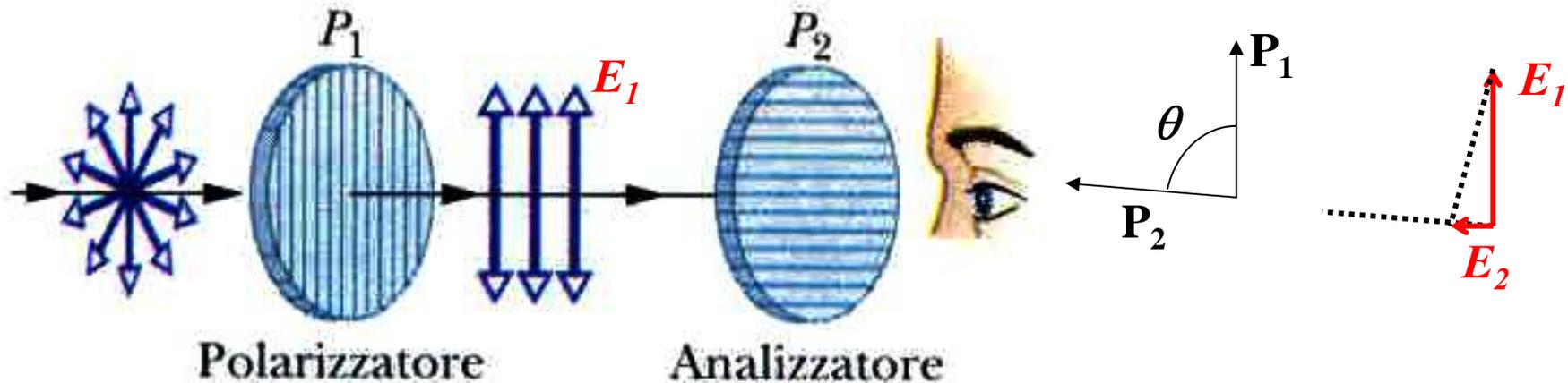
$$\frac{1}{q} = \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = \frac{1}{5\text{cm}} - \frac{1}{3000\text{cm}} = 0.1997\text{cm}^{-1}$$

$$q = 5.008\text{cm}$$

$$M = -\frac{5.008}{3000} = -1.669 \cdot 10^{-3}$$

$$h' = Mh = -0.28\text{cm}$$

Ricordiamo.....

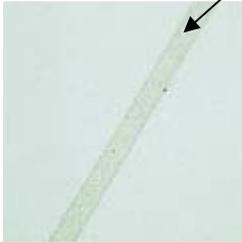


dopo avere attraversato la lamina *polarizzante* P_1 , il campo E_1 è diretto nella direzione di polarizzazione del filtro 1; dopo l'*analizzatore* P_2 emerge solo la componente $E_2 = E_1 \cos \theta$ e quindi l'intensità vale:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta$$

come previsto dalla *legge di Malus*

Fibra di polimero



In campo chiaro



In campo scuro (illuminazione laterale)
Con luce polarizz.,

ANALIZZATORE

OBIETTIVO

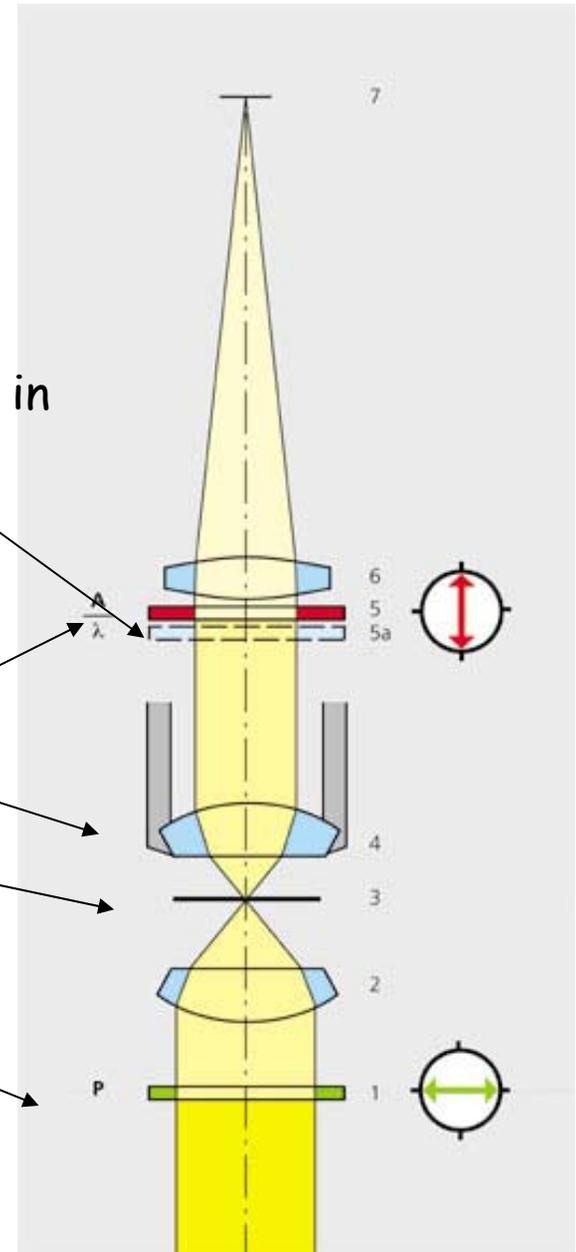
PREPARATO



Con lamina bir.

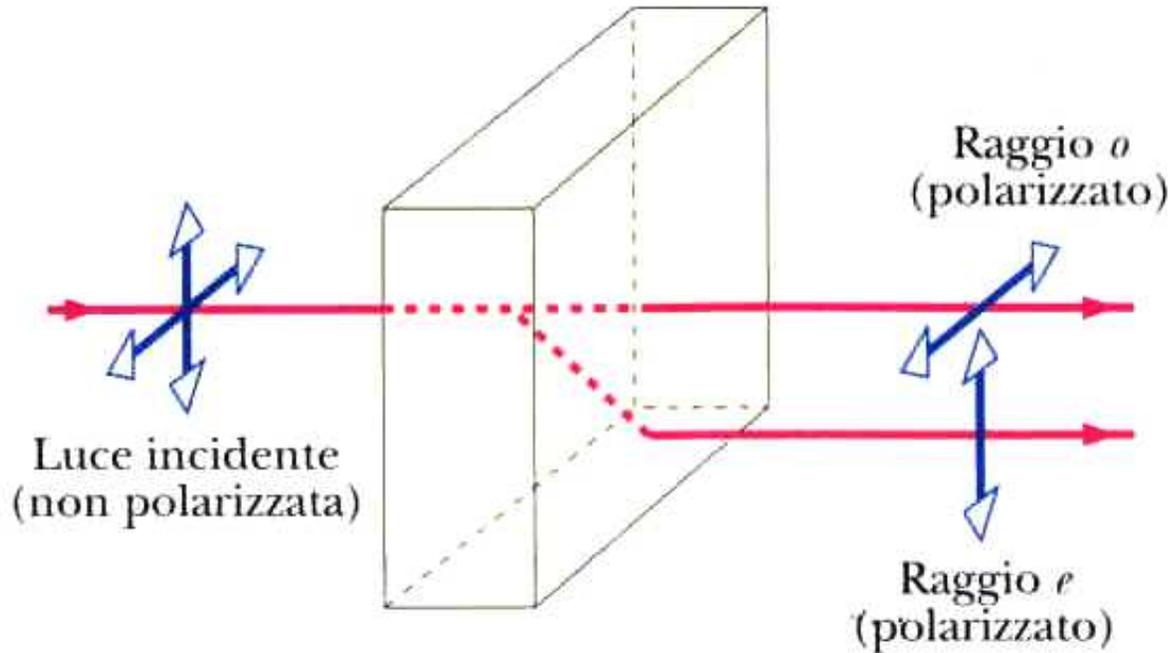
POLARIZZATORE

Lamina birifrangente
Converte il contrasto in
colori



Dal sito www.zeiss.it

..per sapere cos'è la birifrangenza.....



In un cristallo birifrangente viaggiano due raggi:

- il raggio *ordinario* che segue la legge di Snell ed è sempre polarizzato nella direzione perpendicolare al piano che contiene il raggio incidente e l'*asse ottico*
- il raggio *straordinario* che non segue la legge di Snell, è polarizzato in direzione perpendicolare al raggio ordinario ed ha indice di rifrazione n_s variabile a seconda della direzione; le variazioni di n_s vanno dal valore dell'indice n_o del raggio ordinario a un valore estremo n_e

**TABELLA 1 INDICI PRINCIPALI DI RIFRAZIONE
DI ALCUNI CRISTALLI BIRIFRANGENTI^a**

<i>Cristallo</i>	<i>Formula</i>	n_o	n_e	$n_e - n_o$
Ghiaccio	H ₂ O	1.309	1.313	+0.004
Quarzo	SiO ₂	1.544	1.553	+0.009
Wurtzite	ZnS	2.356	2.378	+0.022
Calcite	CaCO ₃	1.658	1.486	-0.172
Dolomite	CaO · MgO · 2CO ₂	1.681	1.500	-0.181
Siderite	FeO · CO ₂	1.875	1.635	-0.240

^a Per la luce del sodio, $\lambda = 589$ nm.

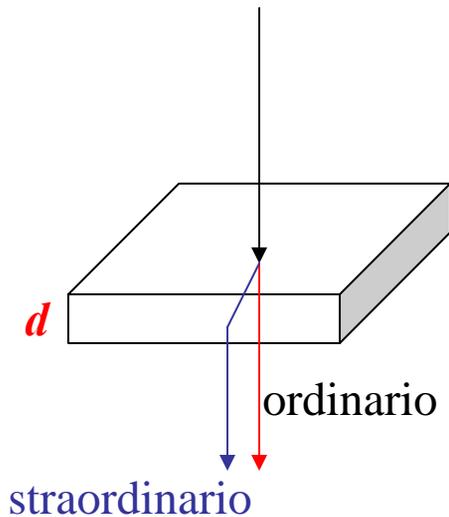
lamina a "quarto d'onda": è una lamina di spessore tale che un raggio ordinario e straordinario che si propagano nella lamina abbiano all'uscita uno sfasamento pari a 1/4 di lunghezza d'onda, cioè quando un'onda è massima, l'altra è nulla.

Es. per la calcite:

$$\lambda = 589 \text{ nm (nell'aria)}$$

$$\lambda_o = 589/1658 = 355 \text{ nm (raggio ordinario)}$$

$$\lambda_e = 589/1486 = 396 \text{ nm (raggio straordinario)}$$

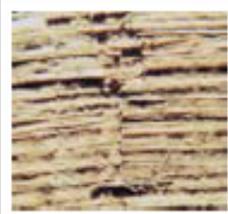


Microscopio ottico vs. microscopio SEM

MICROSCOPIA OTTICA (OM):
Risoluzione massima: $1\ \mu\text{m}$ (10^{-6} metri)



Particolare di un papiro egizio del sec. II d.C. Si nota la kollesis, zona di congiunzione di due fogli papiracei per formare il rotolo.



MICROSCOPIA ELETTRONICA A SCANSIONE (SEM):
Risoluzione massima: $1\ \text{nm}$ (10^{-9} metri)



Swider R. et al.,
"Characterization of Chinese ink in size and surface",
Journal of Cultural Heritage 4 (2003) 175-186

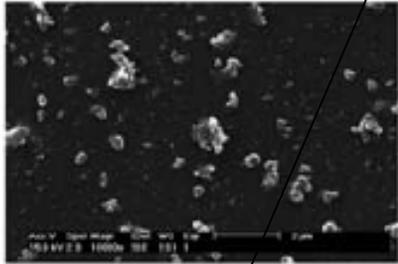


Fig. 4. SEM image of Chinese Shiqian paper ink.

Si possono avere lunghezze d'onda $0.05\ \text{nm}$

Esercizi di riepilogo

Un elettrone si muove parallelamente all'asse x e ha una velocità iniziale di 3.7×10^6 m/s nell'origine.

La velocità dell'elettrone si riduce a 1.40×10^5 m/s nel punto $x = 2.00$ cm.

Calcolare la ddp tra origine e punto. Quale punto si trova a potenziale maggiore?

Due fili di rame di sezione circolare sono lunghi 8 m e hanno diametro pari a 0.2 mm.

La resistività del rame è $\rho = 1.7 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$.

Si vuole conoscere:

- a) quali correnti li attraversino se si applica agli estremi di ogni filo la d.d.p. di 12 V.
- b) se si possano ipotizzare casi in cui le correnti, nella situazione sopra indicata, siano significativamente differenti.
- c) quale risulti l'intensità di corrente se i fili vengono affiancati, a parità di d.d.p.
- d) se si sostituisce il rame con l'alluminio (la conducibilità del secondo è circa due terzi di quella del primo), come si comportano le correnti nel primo caso.

[3° problema maturità scientifica sperimentale - 1986]

Una stufa è costituita da due resistenze uguali poste in serie.
Alimentata con una tensione di 220 V ha una potenza di 2000 W.

Se la resistività non dipende dalla temperatura e si alimenta con una tensione di 160 V, quale sarà la nuova potenza erogata? Quale intensità di corrente passa nella stufa?

Le due resistenze vengono poste in parallelo, quale sarà adesso la nuova potenza della stufa?

Si considerino una sorgente di onde e.m. e una sonora che emettono entrambe ad una freq. di 10^4 Hz.

Calcolare per entrambe il numero d'onda in aria e in un mezzo con indice di rifrazione $n=1.33$ e vel di propagazione del suono $v=1450$ m/s

Una sorgente luminosa emette onde con pulsazione 50 rad/s. Calcolare il numero d'onda e trovare l'indice di rifrazione del mezzo in cui tale numero d'onda risulta doppio rispetto al vuoto. Se volessi un'onda sonora con la lunghezza D'onda di questa(originaria) in aria?(340 m/s)

Un laser viene fatto incidere su un contenitore contenente olio di indice di rifrazione incognito con angolo 40 gradi. Si misura un angolo di rifrazione di 18 gradi, Determinare l'indice di rifrazione dell'olio. Quanto vale la velocità della luce in quest'olio ? E la frequenza?

Un sommozzatore di trova sott'acqua e vede il sole a 42 gradi. Determinare la posizione reale del sole.

Ripetere nel caso che vi sia uno strato di olio sul mare di $n=2.1$.

Determinare vel luce nell'acqua e nell'olio