



# Appunti dal corso Ottica con laboratorio A.A. 2012-13

# Programma

- Il corso si articolerà in : **esperienze di gruppo in laboratorio**, con relazione scritta; **lezioni ed esercitazioni numeriche sull'Ottica Ondulatoria..**
- **L'esame sarà orale** e nella valutazione si terrà conto delle prove di laboratorio .e delle prove di esonero.
- **Richiami di ottica geometrica:** principio di Fermat, leggi della riflessione e della rifrazione della luce, indice di rifrazione, dispersione cromatica, prisma ottico ed angolo di deviazione minima.
- **Richiami di ottica fisica:** onde luminose, moto ondulatorio, velocità, ampiezza ed intensità dell'onda, fronti d'onda, sovrapposizione delle onde, rappresentazione vettoriale , principio di Huygens ed esperimento di Young, interferenza della luce, sorgenti coerenti, diffrazione della luce alla Fraunhofer ed alla Fresnel, diffrazione da singola fenditura, potere risolutivo con apertura rettangolare, fenditura circolare, sistema a più fenditure, reticolo di diffrazione, dispersione angolare e potere risolutivo di un reticolo,polarizzazione della luce,filtri polarizzatori, legge di Malus, legge di Biot e attività ottica di cristalli e di soluzioni, potere rotatorio di sostanze otticamente attive,legge di Brewster.

**Testi consigliati:** W.E.GETTYSET,F.J.KELLER,M.J.SKOVE: FISICA2 ED.MCGRAW-HILL.

G. CANNELLI: METODOLOGIE SPERIMENTALI IN FISICA, ED. EDISES.

D.HALLIDAY,R. RESNICK,J.WALKER: FONDAMENTI DI FISICA VOL.2- VI EDIZIONE, ED.AMBROSIANA .

F.BOCCI:MANUALE PER IL LABORATORIO DI FISICA, ED. ZANICHELLI.

F.Somma :APPUNTI E SCHEDE PER L'ATTIVITA' IN LABORATORIO. .

- A.A. 2012-13: Optics with laboratory
- Teacher: prof.ssa Fabrizia Somma
- Tutor: dott.ssa Daniela Simeone
- Course year: II year
- Period of academic year: I
- Program:
- The course is divided in: group experiences in the laboratory with report; lectures and calculating exercises with regard to optics.
- There will be an oral exam and for grading the laboratory results will be taken into consideration as well.
- References to geometrical optics: Fermat's principle, laws of light reflection and refraction; refractive index; chromatic dispersion; optical prism and minimum deviation.
- References to physical optics: light waves; wave motion; velocity, amplitude and intensity of the wave; wave-fronts, superposition of waves, vector representation, Huygens-Fresnel principle; interference of light; coherent light sources; Fraunhofer and Fresnel diffraction; single-slit diffraction; resolution with rectangular aperture, circular aperture; system multi-apertures, diffraction grating, angular dispersion and resolution of a grating; polarization of light, polarization filters, Malus law, Biot-Savart law and optical activity of crystals and solutions, rotating power of optically active of materials, Brewster law.
-

# Calendario esercitazioni A.A.2012-13

Argomento	Esperienza
Rifrazione della luce 10-11 ottobre 2012	Misura dell'indice di Rifrazione di un prisma ottico utilizzando una sorgente monocromatica
Spettroscopio a prisma 17-18 ottobre 2012 24-25 ottobre 2012	Uso dello spettroscopio a prisma ed a reticolo. Studio dell'andamento dell'indice di Rifrazione di un prisma ottico vs delle lunghezze d'onda di una lampada spettrale
Laboratorio libero 31 ottobre 2012	
Spettroscopio a reticolo Curva di taratura 6-8 novembre 2012	Determinazione del passo di un reticolo utilizzando una lampada spettrale e lo spettroscopio
Diffrazione da reticolli 14-15 novembre novembre	Potere risolutivo e Dispersione Ottica dei Reticoli
1°test 22 novembre 2012	
Diffrazione da reticolli con Laser 28-29 novembre 2012	Studio dei massimi di diffrazione al variare del passo dei reticolli;:determinazione della $\lambda$ della sorgente laser
Interferenza e Diffrazione 5-6 dicembre 2012	Diffrazione da singola fenditura rettangolare: determinazione della dimensione della fenditura e/o della $\lambda$ della sorgente
Laboratorio libero 12-13 dicembre 2012	
Polarizzazione della luce 19-20 dicembre 2012	Verifica della Legge di Malus
Sostanze otticamente attive 9-10 gennaio 2013	Verifica della Legge di Biot.Savart
2°test 17 gennaio 2013	

# Cenni storici sull'interpretazione della luce e dei fenomeni ottici

- **Teoria corpuscolare**
- V sec A. C. **Pitagora** :Trasporto di materia
- Scuola atomistica, **Democrito**:  
La luce intesa come l'insieme di bastoncelli che uscivano dall'occhio, raggiungevano i corpi e li esploravano; corpi luminosi "scorze", si staccavano dagli oggetti e dopo essersi contratti, penetravano nell'occhio per portare nell'anima la forma ed il colore dei corpi stessi.
- 300 A. C.: **Euclide**: studio sulla Propagazione rettilinea della luce e
- sulla Riflessione dagli specchi
- 120 D. C.: **Tolomeo**: Rifrazione atmosferica.
- 1000 D.C.: **Alhazen**: 1° testo di ottica.
- 1600 – 1700: **Snellius**: formulazione corretta della Rifrazione.
- A **Newton** si deve lo studio sulla luce bianca come composizione dei colori e la descrizione dei fenomeni luminosi in termini di modelli meccanici (urto tra sferette).
- **Teoria ondulatoria**
- 1690: **Huygens**: natura ondulatoria della luce
- **Aspetto duale della luce**:
- **Natura ondulatoria**- Esperienza di **Young** sulla propagazione della luce come onda
- **Natura corpuscolare** - Effetto **Compton** : teoria quantistica( foton) nello studio dell'interazione della luce con la materia

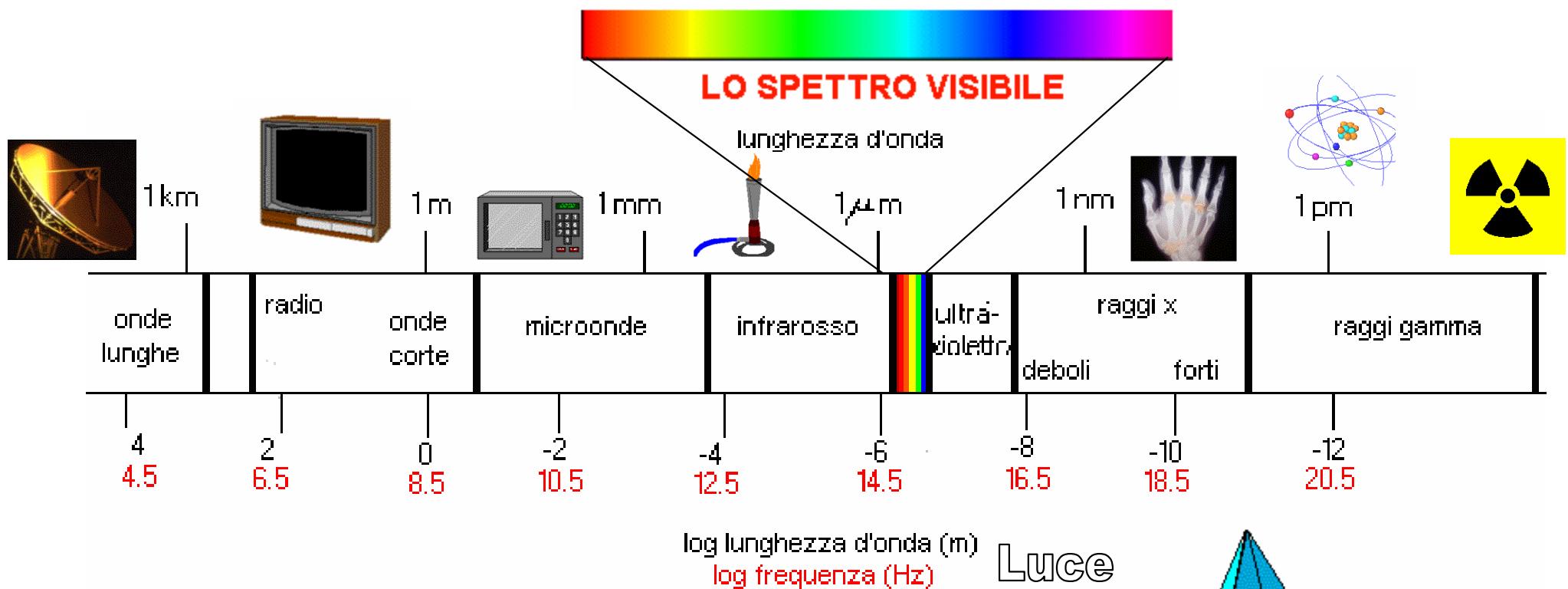
## La storia dell' Ottica ha origini recenti

- Dagli antichi Greci, Empedocle ed Euclide fino all'800 il termine ottica era riferito alle sole funzioni visive.
- 1870 -J.C. Maxwell : l'Ottica come scienza che studia fenomeni in una determinata regione dello spettro elettromagnetico.
- 1891- G.J.Stoney:Elettronica= unità di carica in un lavoro sul legame chimico.
- 1916-**Fotone**: unità di riferimento per lo stimolo luminoso per l'occhio umano.
- 1925-L'Ottica elettronica nasce quando l'Ottica ondulatoria spiegò i fenomeni di focalizzazione di fasci di elettroni mediante campi elettromagnetici.
- ( Tubi a raggi catodici, TV,microscopio elettronico etc.).
- 1955- Optoelettronica: indica processi caratterizzati dalla presenza correlata in un solido di fenomeni ottici ed elettronici (fotocondutibilità, eletroluminosità etc.). Il termine sta oggi ad indicare un modo nuovo di realizzare, a livello ottico, funzioni e strutture che prima venivano pensate e realizzate solo a livello elettronico.
- Oggi il termine **Fotonica** indica tutte le applicazioni dei Foton per la trasmissione e l'elaborazione delle informazioni (formazione del fascio luminoso,modulazione, accoppiamento e strutture guidenti, propagazione guidata, amplificazione, memorizzazione e rivelazione).

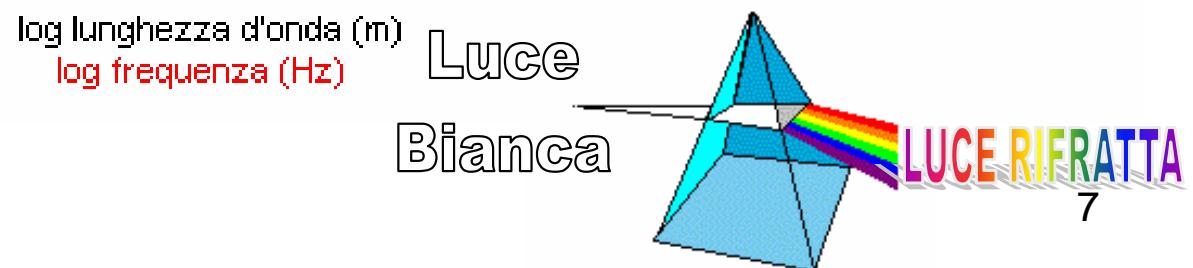
# La radiazione elettromagnetica

Quello che comunemente chiamiamo **Luce Visibile** è la manifestazione di ciò che gli scienziati chiamano **Radiazione Elettromagnetica**.

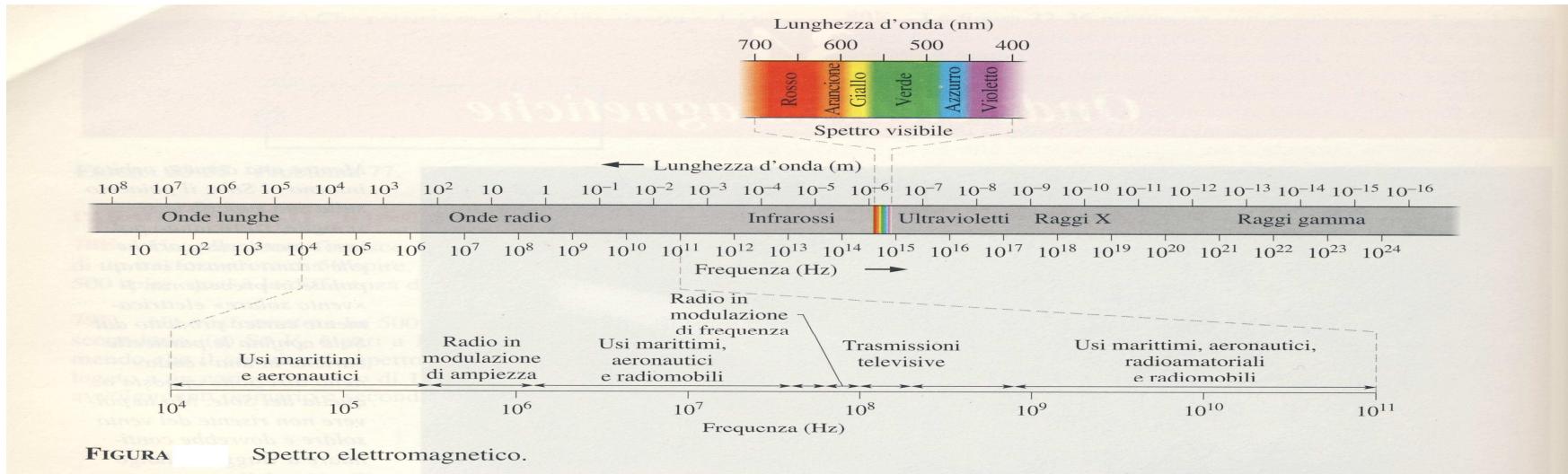
La luce visibile è infatti la piccola parte di tutta la radiazione elettromagnetica che i nostri occhi riescono a percepire.



Il colore della luce è  
associato alla sua energia



# Spettro delle radiazioni in lunghezza d'onda ed in frequenza

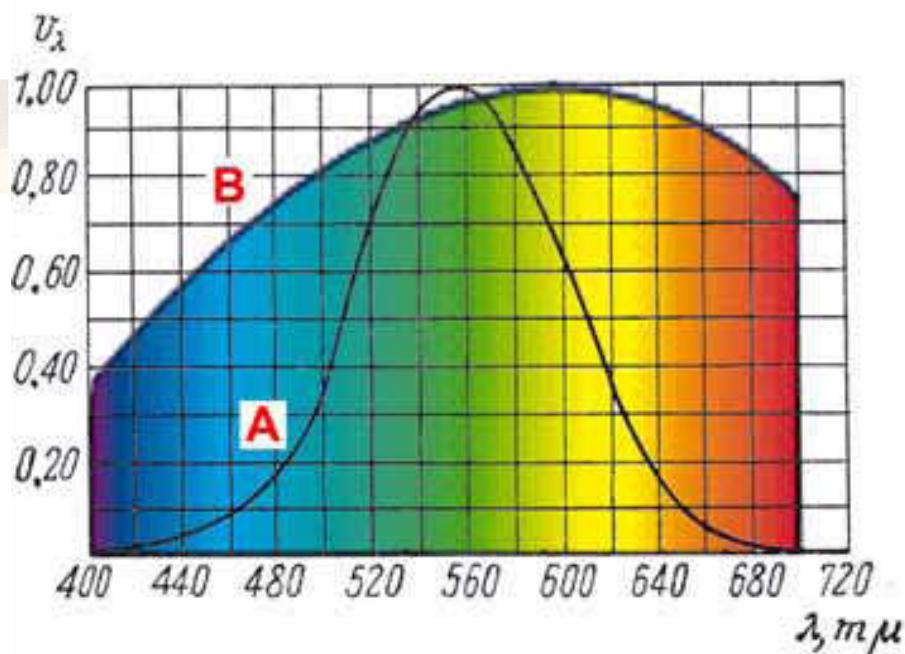


**FIGURA** Spettro elettromagnetico.

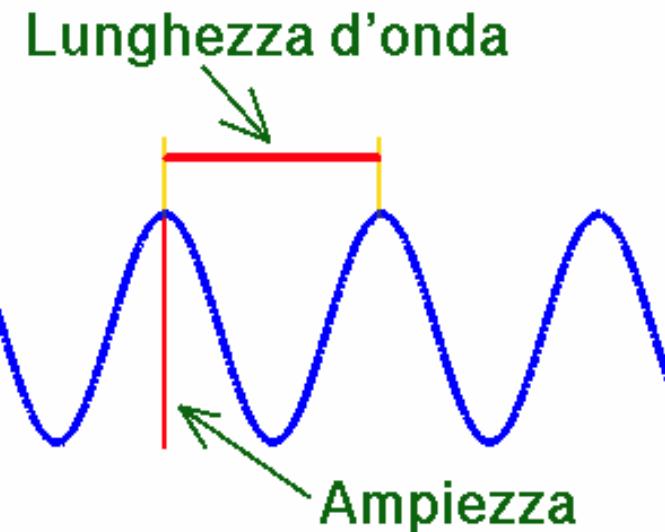
; come quella indicata con "televisione e radio in modulazione di ampiezza", rappresentano bande di lunghezza d'onda specifiche, assegnate per legge a scopo commerciale o altro. Non ci sono discontinuità nello spettro elettromagnetico. E tutte le onde elettromagnetiche, non importa dove siano situate nello spettro, viaggiano nello spazio libero (vuoto) con la stessa velocità  $c$ .

La regione visibile dello spettro risulta naturalmente di particolare interesse. La figura 34-2 mostra la sensibilità relativa dell'occhio di un ipotetico osservatore standard rispetto alle diverse lunghezze d'onda. Il centro della regione visibile corrisponde a circa 555 nm; la luce di questa lunghezza d'onda produce la sensazione colorata che chiamiamo giallo-verde.

I limiti dello spettro visibile non sono ben definiti poiché la curva di sensibilità dell'occhio è asintotica sia per le lunghezze d'onda corte, sia per quelle lunghe. Se vengono stabiliti dei limiti arbitrari, scegliendo le lunghezze d'onda a cui la sensibilità visiva cade all'1% del suo valore massimo, si delimita la zona tra circa 430 e 690 nm; tuttavia, l'occhio può intercettare radiazioni con lunghezze d'onda oltre questi limiti, purché siano sufficientemente intense.

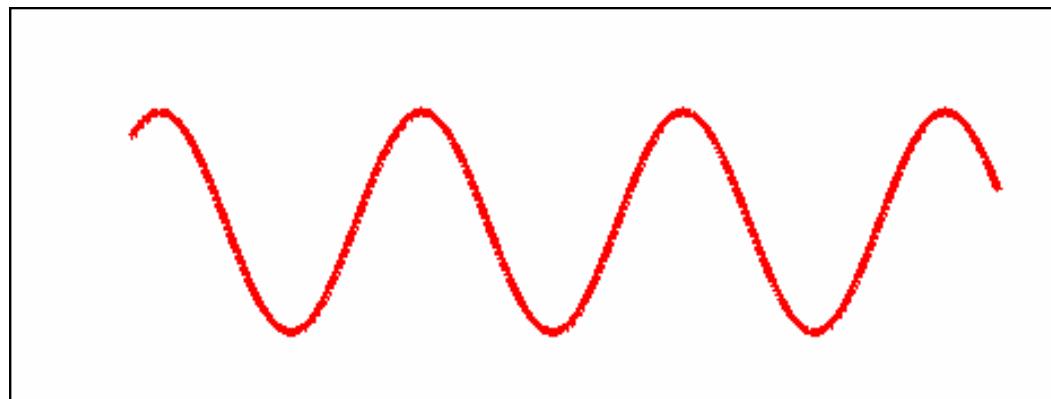


La luce è quindi un'onda elettromagnetica, a cui è associata una **lunghezza d'onda**, cioè la distanza tra due picchi successivi della onda ed una **ampiezza**, ossia l'altezza dei picchi.

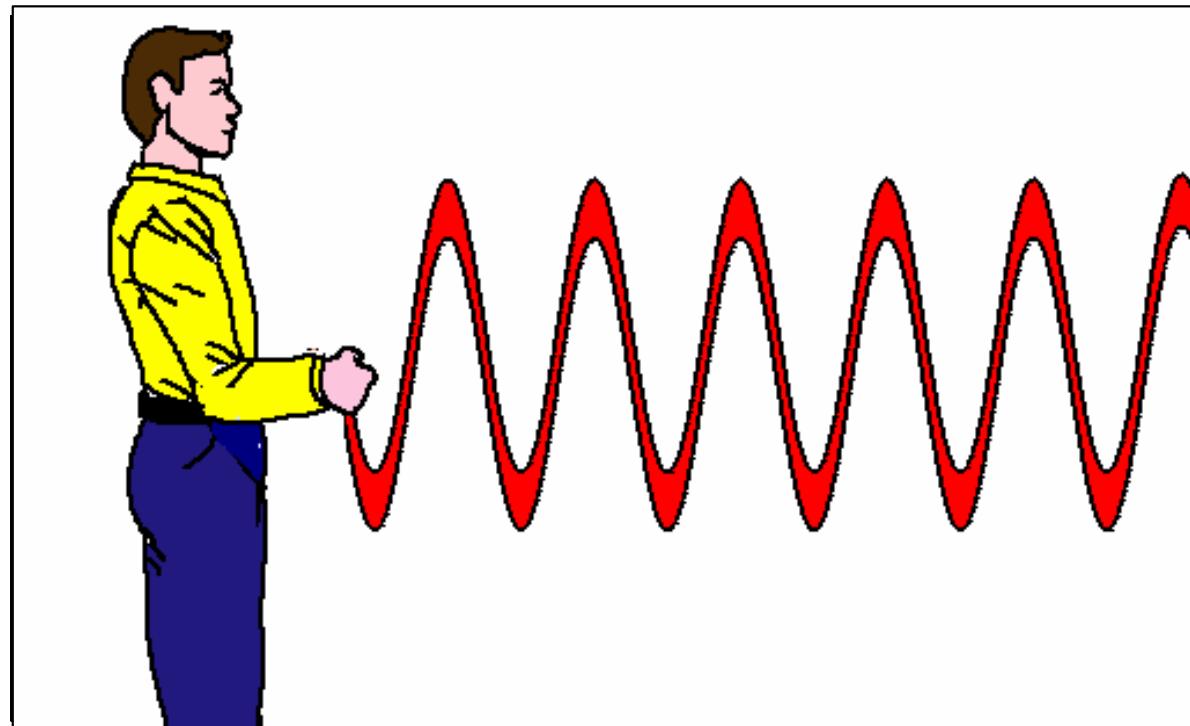


**La luce trasporta energia**... ad energia più grande corrisponde ampiezza più grande e  $\lambda$  più piccola.

Energia proporzionale ad ampiezza



Meno intuitivo è che ad energia maggiore corrisponda lunghezza  $\lambda$  più piccola: consideriamo un uomo che faccia oscillare rapidamente i capi di una corda, con questo movimento egli sta trasferendo energia alla corda, che a sua volta la trasporterà al capo opposto. **Quanto più rapidamente muove la corda tanta più energia impiegherà**, cioè verrà trasferita alla corda.

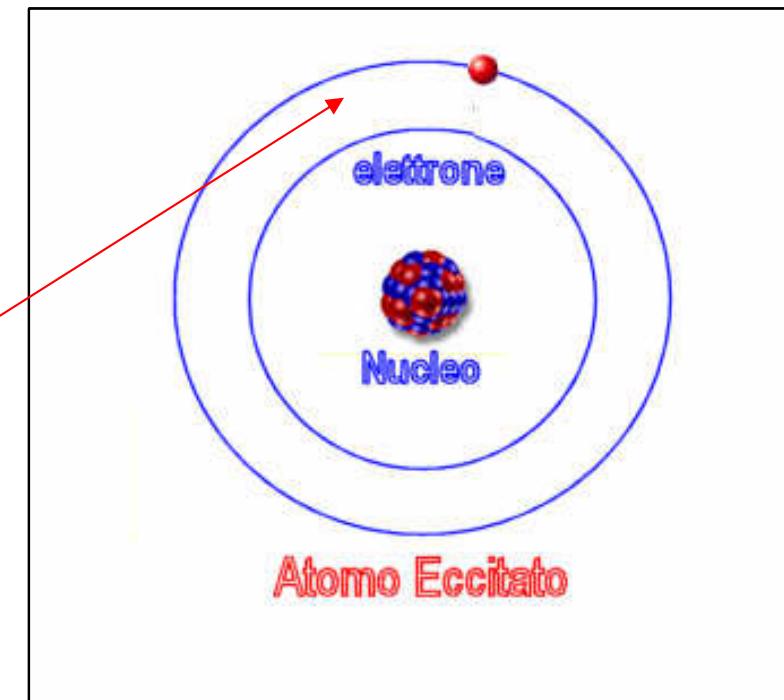
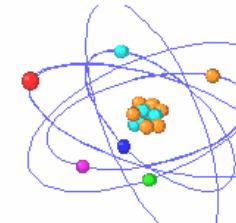


# Sorgenti di luce

La produzione della luce avviene all'interno dei singoli atomi:

Un atomo è composto da un nucleo e da elettroni che “orbitano” attorno ad esso. Questi elettroni scelgono naturalmente l'orbita più bassa, cioè quella a minore energia. Si dice allora che l'atomo è nello **stato fondamentale**. Cosa succede se **si fornisce energia ad un atomo?**

**L'elettrone assorbe l'energia e salta all'orbita superiore.**



Quando l'elettrone si trova sull'orbita superiore si dice che l'atomo è “eccitato”.

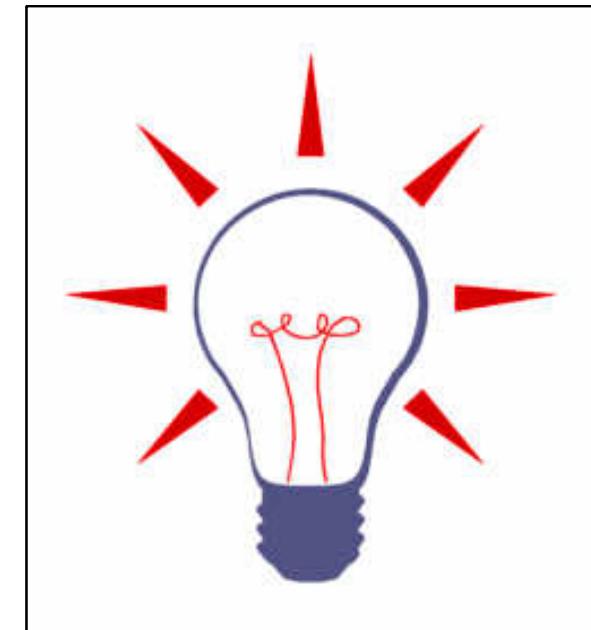
# Emissione

Tuttavia l'elettrone tende naturalmente, dopo un tempo caratteristico del materiale in esame, a tornare nell'orbita più bassa, rilasciando l'energia che aveva acquisito sotto forma di luce.

Questo è il fenomeno che si osserva, ad esempio in una comune lampadina ad incandescenza:

- la corrente che passa nel filamento lo scalda, portando gli atomi nello stato eccitato.
- questi disecctandosi emettono luce.

Questo meccanismo si chiama  
**EMISSIONE SPONTANEA** di luce



Dato che il processo di diseccitazione è di tipo casuale i “foton”, vale a dire le “particelle” di luce, vengono emessi in tutte le direzioni e le onde associate alla luce sono sfasate tra di loro.

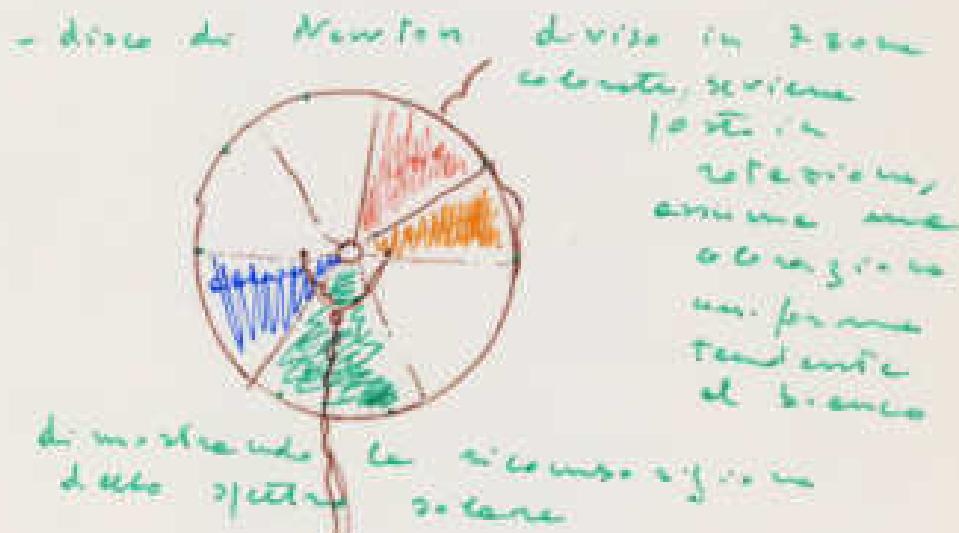
## La luce, i colori, l'interferenza, la diffrazione

La luce del sole, come dimostra un arcobaleno o un vetro lavorato, è una composizione di tutti i colori che si osservano nello spettro visibile, perché le onde con diversa  $\lambda$  sono inclinate ad angoli diversi passando dall'aria ( $n=1$ ) in un corpo con indice di **rifrazione**  $n \neq 1$  (es. gocce di pioggia, vetro). Diversamente, i colori delle bolle di sapone o dell'olio, sono prodotti per **interferenza costruttiva e distruttiva** della luce riflessa con la luce incidente.

L'interferenza delle onde luminose è un fenomeno di sovrapposizione ed è la dimostrazione della **natura ondulatoria** della luce (**esperimento di Young**), come anche il fenomeno della **diffrazione** che si manifesta quando il fascio di luce incide su di una **stretta fenditura** o su un **ostacolo** di **dimensioni** confrontabili con la  $\lambda$  dell'onda.



- la scomposizione delle luce solare con il prisma  
- osservata da Newton per la volta  
nel 1666



Le sottili incisioni (0,5 µm) su un disco ottico formano un reticolo di diffrazione. Quando il disco è illuminato da una piccola sorgente di luce il fascio diffuso forma «strascici» colorati che derivano dalla composizione delle figure di diffrazione prodotte dalle incisioni.



Foto di diffrazione prodotta da una lametta di erba, vista in luce monochromatica. Si notino le frange alternate corrispondenti a massimi e minimi d'intensità.

# Esperimento di Young

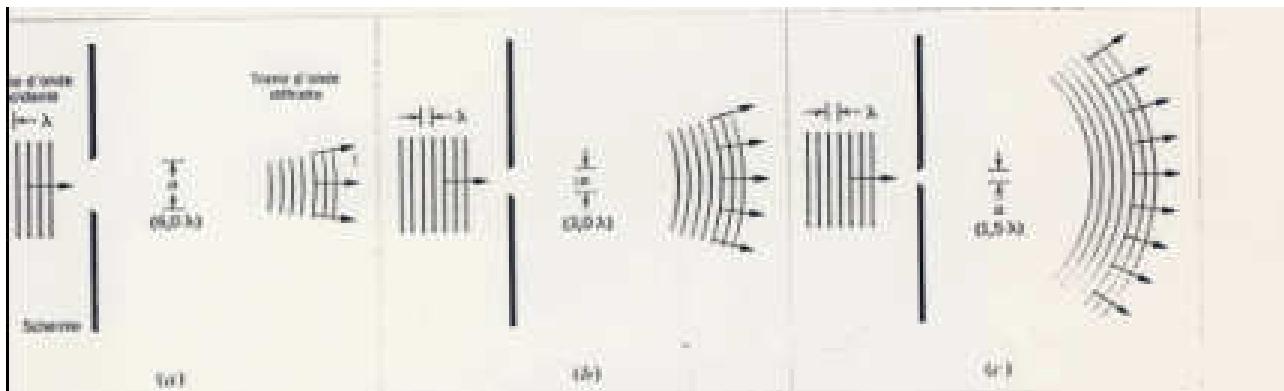


Figura 40-1. Si vede come viene diffuso un'onda piana incidente quando attraversa una fenditura in una superficie opaca. Tanto più piccolo è il rapporto  $a/\lambda$ , e tanto più le onde si allargano rispetto alla regione di controllo geometrica della fenditura.



Fig. 40-2. Diffrazione da una linea delle onde di superficie in una fetta d'acqua. Da notare che la base delle fenditure è circa uguale lunghezza d'onda. (Concessione Educational Services Incorporated).



perimento di Young di interferenza da due fenditure

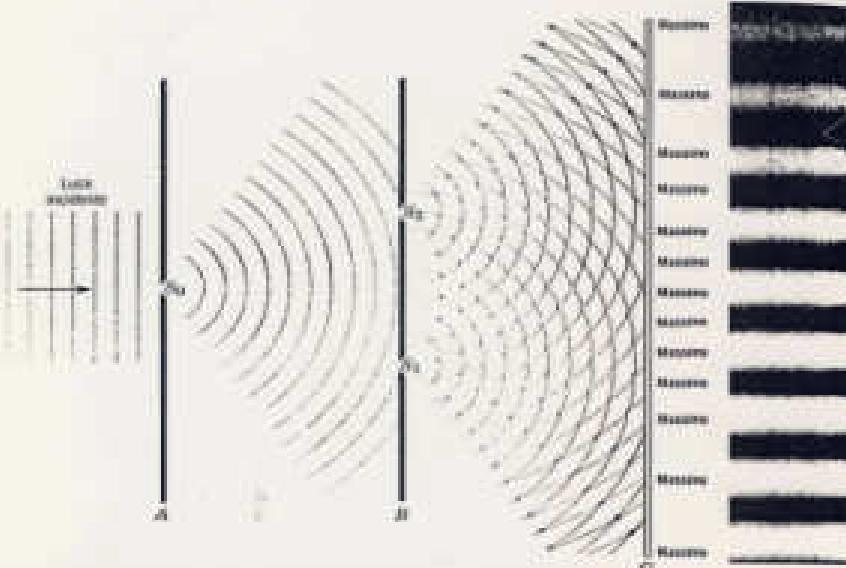


Figura 40-3. Thomas Young produce una figura d'interferenza sullo schermo C, facendo in modo che le onde diffuse dai fori B e C si sovrappongano nella regione tra gli schermi B e C.

Figura 40-4. La figura d'interferenza proiettata sullo schermo C di Fig. 40-3. (Da *Atlas of Optical Phenomena*, c. M. Cagni, M. Frasconi e J. C. Thaler, Springer-Verlag, 1962).

## **Unità di misura:**

### **Sistema Internazionale : SI**

**Candela (cd)** è l'intensità luminosa, in una determinata direzione, di una sorgente che emette radiazione monocromatica di frequenza **v = 540, 1012 Hz** e la cui intensità energetica in tale direzione è **watt allo steradiante (sr)**

### **Sono unità derivate:**

**Lumen ( lm )= (cd . sr)** è il flusso luminoso emesso, sotto l'angolo solido di **1 sr**, da una sorgente luminosa d'intensità **1 cd**, che sia puntiforme, uniforme e posta nel vertice dell'angolo solido'.

**Lux ( lux) = ( m<sup>-2</sup> . cd .sr )** è l'illuminamento di una superficie che riceve perpendicolarmente ed uniformemente ripartito un flusso luminoso di **1 lm** su ogni m<sup>2</sup>.

**Radiante ( rad )** è l'angolo piano compreso fra due raggi che, alla circonferenza di un cerchio, intercettano un arco di lunghezza pari a quella del raggio.

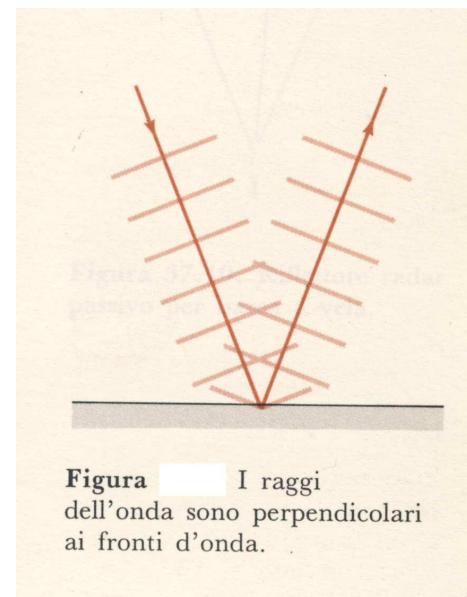
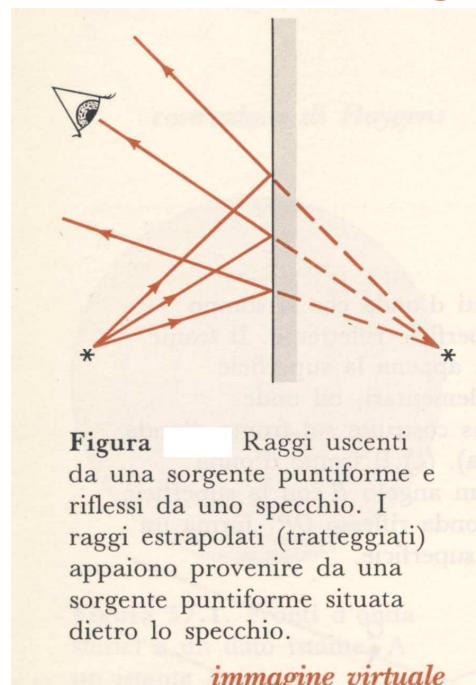
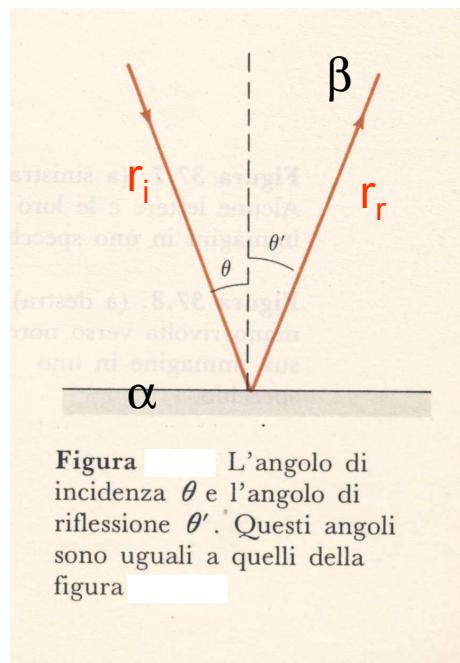
## APROSSIMAZIONE "SHORT WAVES"

- Un **d'onda piana** è un 'onda **infinitamente estesa** per dimensioni trasversali e perpendicolari alla **direzione di propagazione**.
- La superficie di separazione tra due mezzi di diverso indice di rifrazione su cui l'onda piana incide( es: specchio, lente, prisma) risulta essere infinitamente più estesa delle dimensioni della **lunghezza d'onda luminosa**. In questa condizione, ben verificata per la **regione visibile** dello spettro delle  $\lambda$ , si può schematizzare l'onda luminosa con **dei raggi paralleli alla direzione di propagazione dell'onda stessa**.
- Nella **teoria corpuscolare della luce** il raggio luminoso può essere definito in termini del percorso di un corpuscolo luminoso,cioè del **Fotone**.
- **Nell'ottica geometrica le leggi della riflessione e della rifrazione si dimostrano con semplici soluzioni geometriche.**

- **Principio di Fermat:**
- La traiettoria percorsa da un raggio di luce è quella che richiede minor tempo per percorrerla e, se il mezzo è omogeneo, la traiettoria coincide con la minor distanza percorsa.
- Si assume quindi lineare la direzione di propagazione della luce
- **Leggi della Riflessione della luce su superficie piana**

- 1° Legge :** il raggio incidente  $r_i$  su una superficie piana  $\alpha$ , il raggio riflesso  $r_r$  da  $\alpha$  e la normale  $h$  ad  $\alpha$  giacciono su di uno stesso piano  $\beta$ , cioè le tre direzioni sono complanari.
- 2° Legge :** L'angolo di riflessione e l'angolo d'incidenza su di una superficie piana sono uguali.

### Riflessione della luce proveniente da sorgente puntiforme:



## Sorgente estesa

Nel caso la sorgente sia costituita da più punti luminosi, l'immagine sarà anch'essa estesa e speculare( ribaltata).

Nel caso di due specchi posti perpendicolarmente a formare uno specchio ad angolo retto, il raggio di luce viene rinviato lungo la stessa direzione di provenienza.

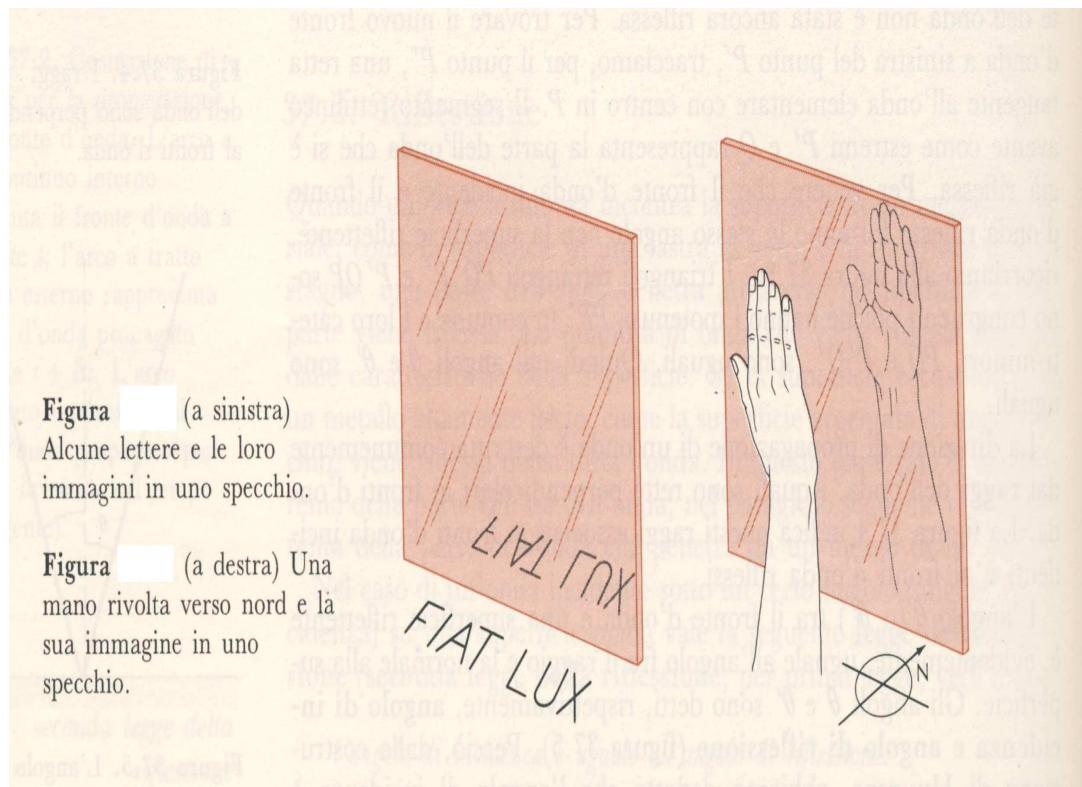


Figura (a sinistra)  
Alcune lettere e le loro  
immagini in uno specchio.

Figura (a destra) Una  
mano rivolta verso nord e la  
sua immagine in uno  
specchio.

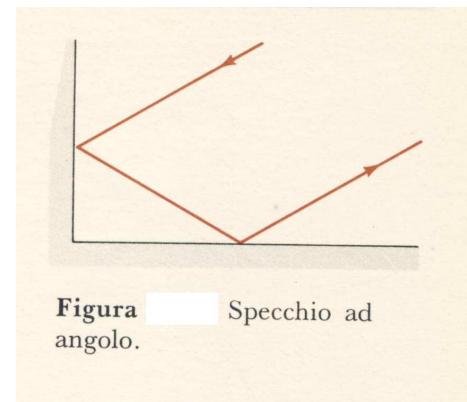
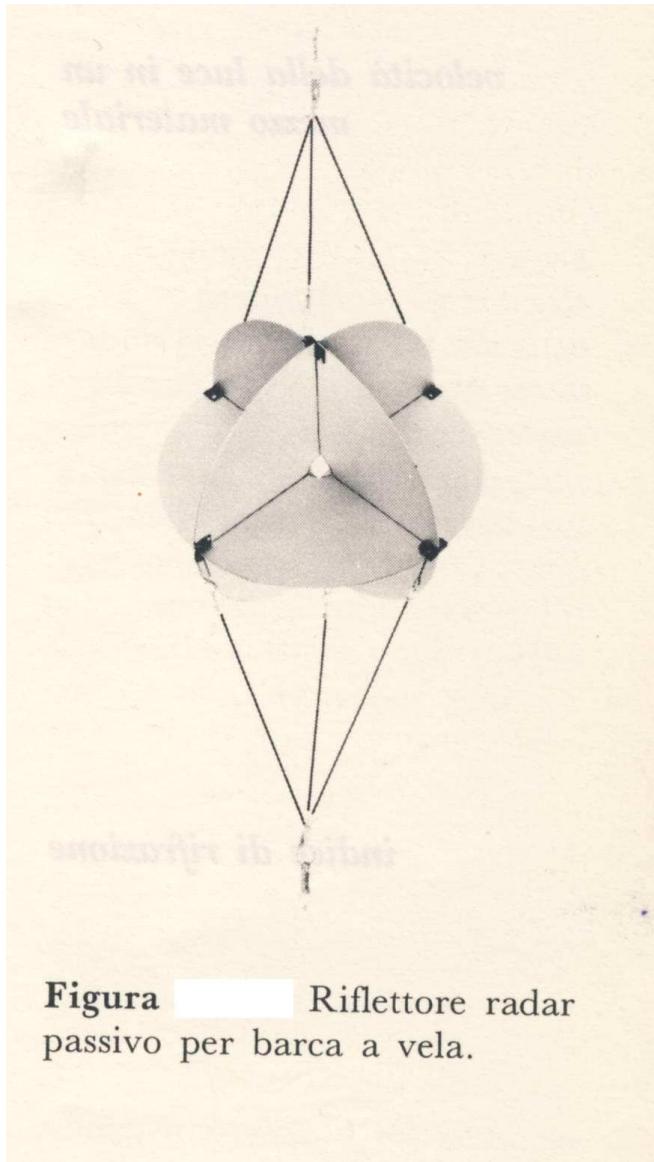
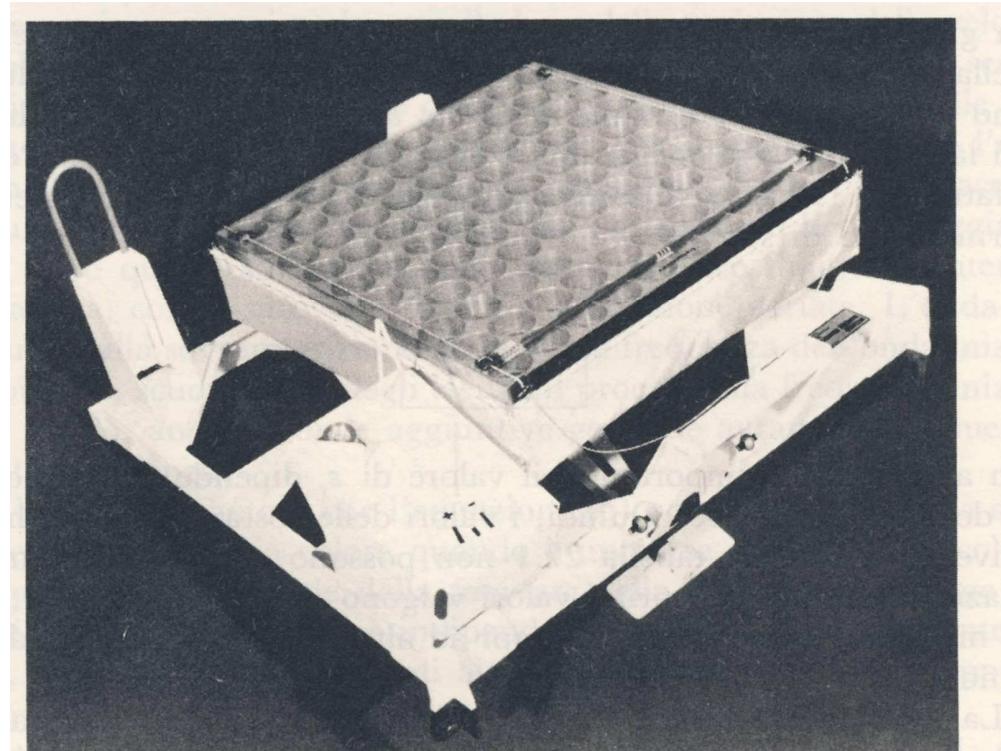


Figura Specchio ad  
angolo.

- Il principio di ribaltamento del fascio di luce nella direzione di provenienza vale anche in tre dimensioni, cioè tre specchi mutuamente ortogonali rinviano il raggio dopo tre riflessioni successive nella direzione di provenienza. Molti dispositivi a specchio si basano su questo principio (es: i catarifrangenti delle auto e delle biciclette sono costituiti da una serie di piccoli specchi disposti a piccoli angoli).

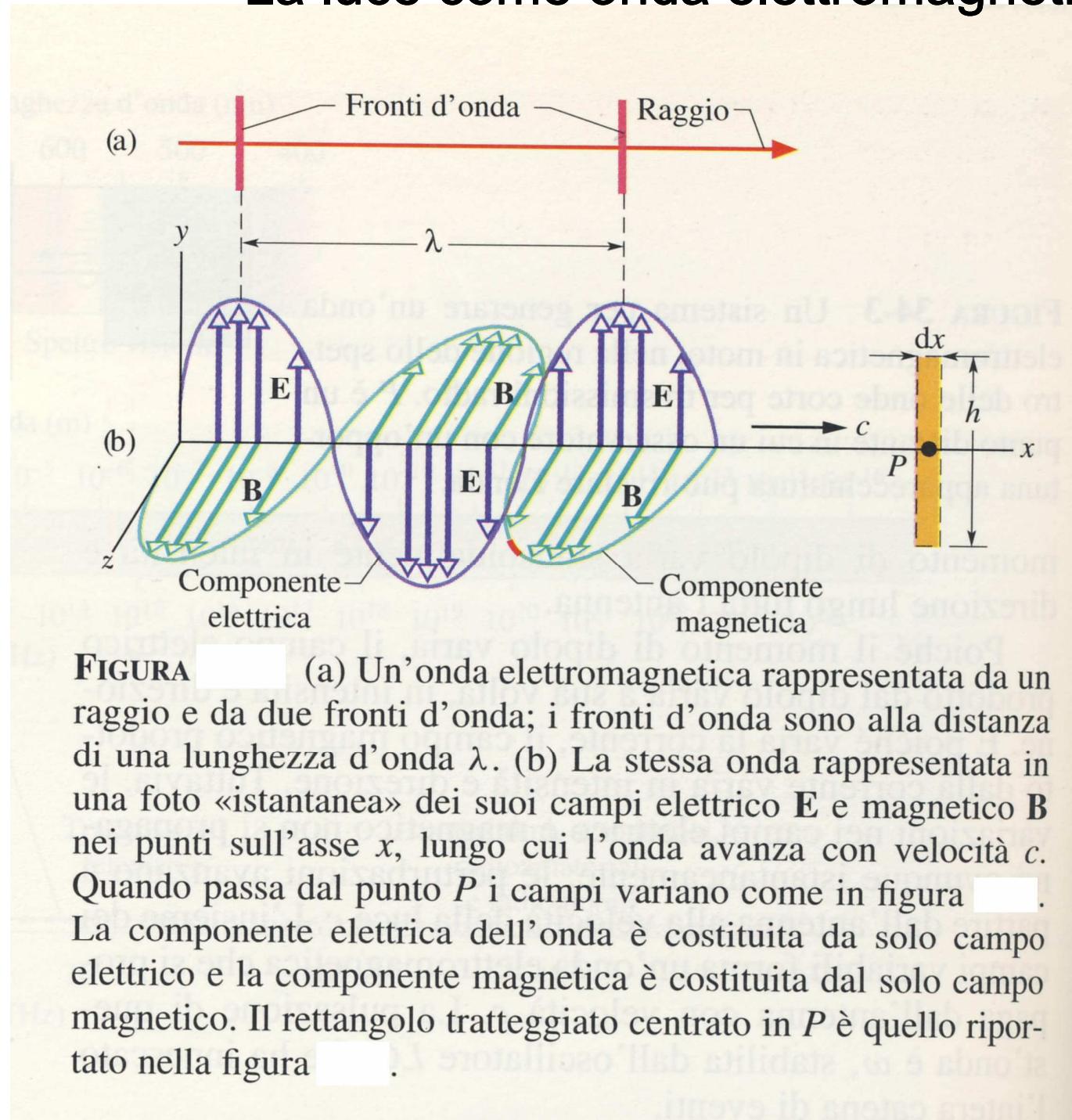


**Figura** Riflettore radar passivo per barca a vela.



**Figura** Specchi ad angolo da installare sulla superficie della Luna.

# La luce come onda elettromagnetica



**FIGURA** (a) Un'onda elettromagnetica rappresentata da un raggio e da due fronti d'onda; i fronti d'onda sono alla distanza di una lunghezza d'onda  $\lambda$ . (b) La stessa onda rappresentata in una foto «istantanea» dei suoi campi elettrico  $\mathbf{E}$  e magnetico  $\mathbf{B}$  nei punti sull'asse  $x$ , lungo cui l'onda avanza con velocità  $c$ . Quando passa dal punto  $P$  i campi variano come in figura [REDACTED]. La componente elettrica dell'onda è costituita da solo campo elettrico e la componente magnetica è costituita dal solo campo magnetico. Il rettangolo tratteggiato centrato in  $P$  è quello riportato nella figura [REDACTED].

## Diapositiva 21

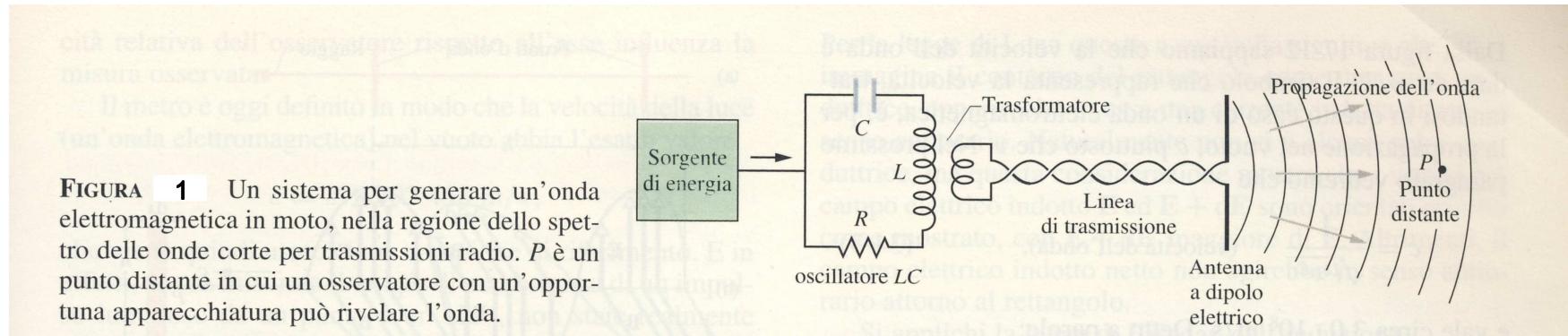
---

**d1**

dipfis; 22/09/2011

# Propagazione di un'onda e sua interazione con la materia. Fronti d'onda. Costruzione di Huygens del fronte d'onda.

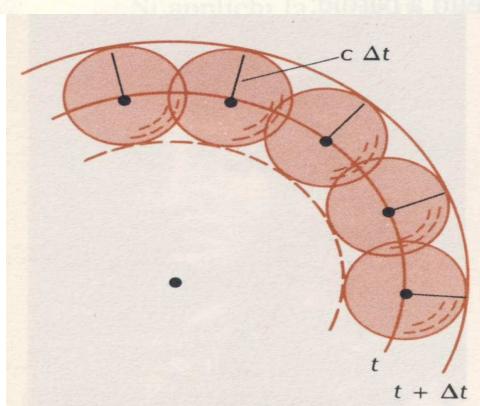
Con la costruzione dei fronti d'onda si dimostrano le proprietà dell'onda nel vuoto e nei mezzi trasparenti senza ricorrere alla soluzione delle equazioni di Maxwell,  
La figura 3 mostra il fronte d'onda al tempo  $t$ , costruito come superficie d'inviluppo,



**FIGURA 1** Un sistema per generare un'onda elettromagnetica in moto, nella regione dello spettro delle onde corte per trasmissioni radio.  $P$  è un punto distante in cui un osservatore con un'opportuna apparecchiatura può rivelare l'onda.



**Figura 2** Fronti d'onda sferici a un dato istante. A un istante successivo, ciascuno di questi fronti d'onda si sarà spostato verso l'esterno di una certa distanza.



**Figura 3** Costruzione di Huygens per la propagazione di un fronte d'onda. L'arco a tratto continuo interno rappresenta il fronte d'onda a un istante  $t$ ; l'arco a tratto continuo esterno rappresenta il fronte d'onda propagato all'istante  $t + \Delta t$ . L'arco tratteggiato rappresenta il fronte d'onda propagato per un'onda invertita nel tempo (convergente).

# La riflessione della luce utilizzando i fronti d'onda

Quando un'onda incontra la superficie di un mezzo (lastra di vetro, superficie di uno stagno etc.) una parte di essa penetra ed una parte viene riflessa in dipendenza delle caratteristiche della superficie.

Nelle figure sotto riportate vediamo come si giunge alla formulazione delle leggi di Snell con considerazioni geometriche.

In fig.c i lati  $PQ$  e  $P'Q'$  sono uguali, i triangoli sono rettangoli in  $Q$  e in  $Q'$  e congruenti, quindi gli angoli  $\theta$  e  $\theta'$  sono uguali .

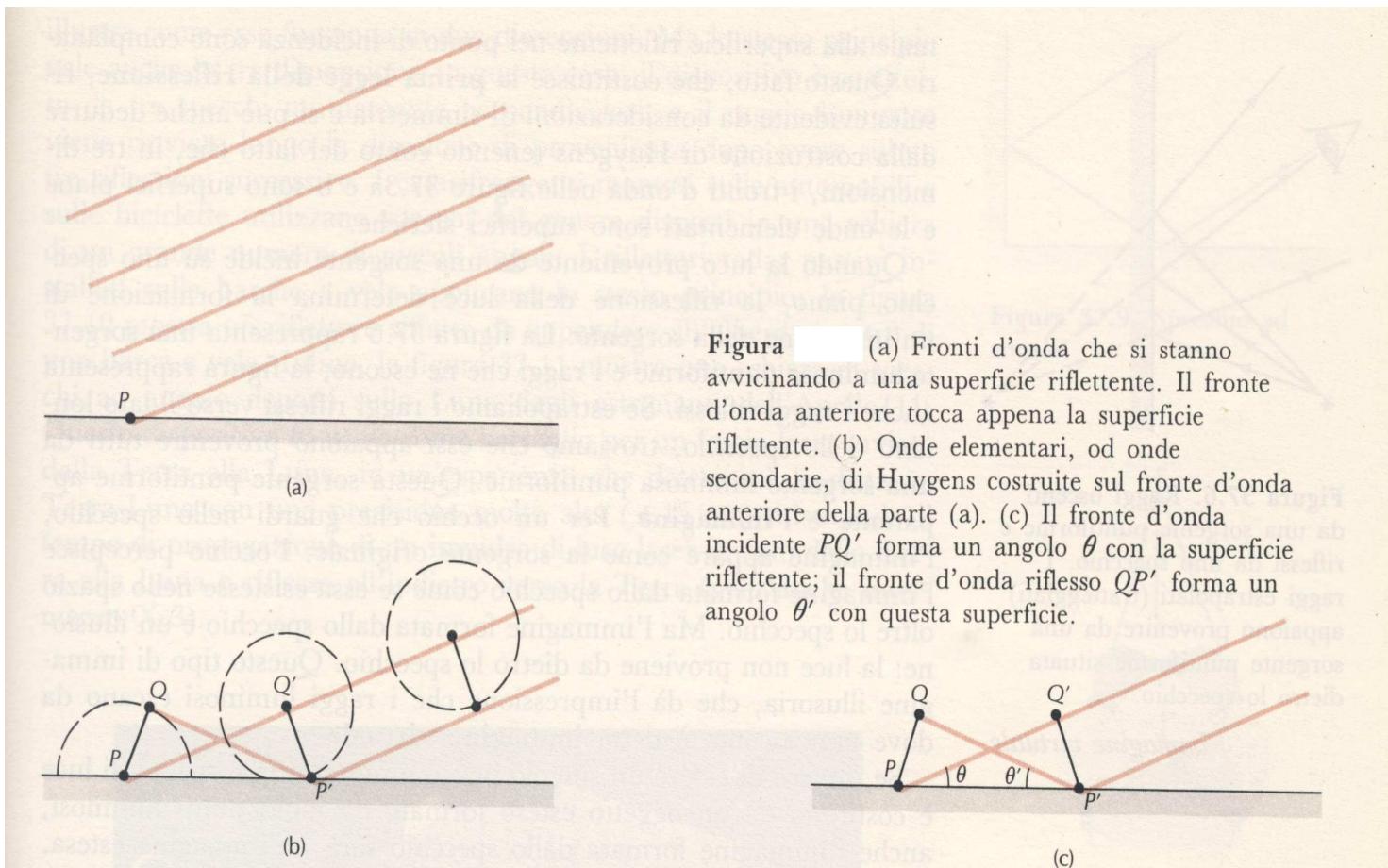


Figura (a) Fronti d'onda che si stanno avvicinando a una superficie riflettente. Il fronte d'onda anteriore tocca appena la superficie riflettente. (b) Onde elementari, od onde secondarie, di Huygens costruite sul fronte d'onda anteriore della parte (a). (c) Il fronte d'onda incidente  $PQ'$  forma un angolo  $\theta$  con la superficie riflettente; il fronte d'onda riflesso  $QP'$  forma un angolo  $\theta'$  con questa superficie.

# Riflessione di un onda sferica su una superficie piana: costruzione dell'immagine

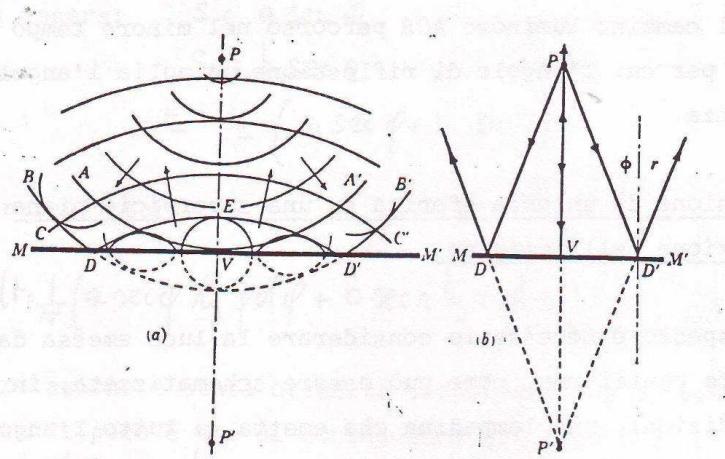


Fig 2.3

Se la luce è emessa in un angolo solido da una sorgente puntiforme, come schematizzata in figura, i fronti d'onda sono superfici sferiche concentriche con la sorgente.

Nella rappresentazione geometrica della figura le direzioni di propagazione dell'onda sferica corrispondono ai raggi incidenti e riflessi.

Il punto **P'**, che giace nell'incontro dei prolungamenti dei raggi riflessi, è detto **immagine virtuale** del **punto P**. L'immagine allo specchio piano di un oggetto di dimensioni finite è per analogia l'insieme dei punti immagine **A'B'** dei rispettivi punti costituenti l'oggetto **AB** e **simmetrica rispetto allo specchio**.

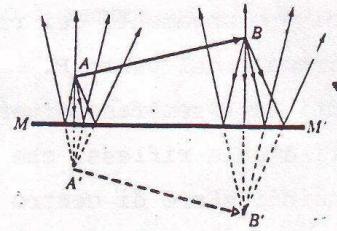


Fig 2.4

# La rifrazione della luce

velocità della luce nel vuoto :  $c=1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$

velocità della luce in un materiale di costante dielettrica  $\epsilon_r$  e permeabilità magnetica  $\mu_r$  :

$$v=1/\sqrt{(\epsilon_0\mu_0\epsilon_r\mu_r)}$$

ed essendo

$$v=c/n \quad >>> \quad n=\sqrt{(\epsilon_r\mu_r)}$$

Con  $\mu_r=1$  in tutti i mezzi tranne che nei ferromagnetici, possiamo definire

**l'indice di rifrazione di un materiale è definito :**

$$n=\sqrt{\epsilon_r}$$

e poiché  $\epsilon_r$  dipende dalla frequenza  $v$  del campo elettrico  $E_0$ , si ha:

$$n=n(v)$$

da cui:

$$\lambda v=v=c/n >>>$$

**Il fatto che  $n=c/v$  vari col colore mostra che la velocità  $v$  nei materiali è diversa da colore a colore . Dalla meccanica quantistica si ricava che l'energia di un fotone è proporzionale alla frequenza :  $E=h\nu$  .**

Questo significa che se l'onda passa dall'aria all'acqua la velocità  $v$  si riduce di 1,33 ma la frequenza rimane costante, infatti una sorgente di luce non cambia colore se emette in aria o in acqua.

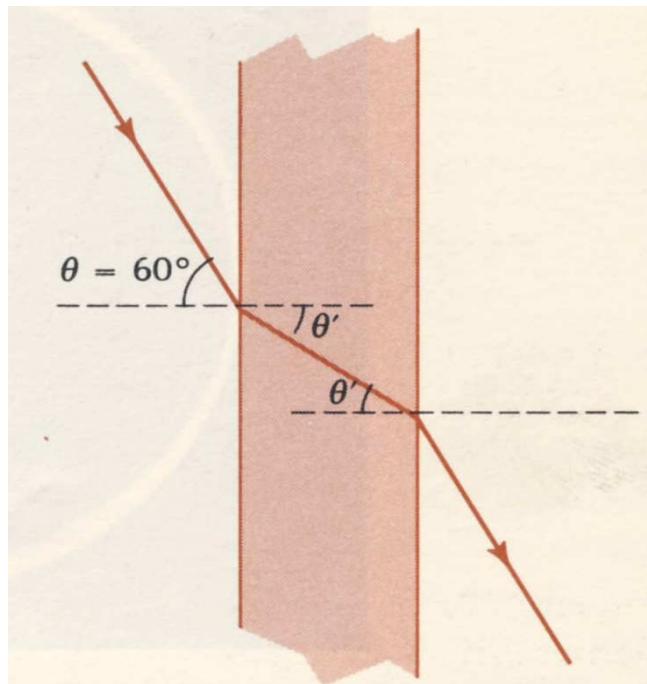
**n diminuisce per  $\lambda>500nm$  , n aumenta per  $\lambda<500nm$ .**

**Nel vuoto si definisce :  $\lambda_0=c/v$ ,**  
**nel materiale di indice n si definisce  $\lambda_n=\lambda_0/n$**

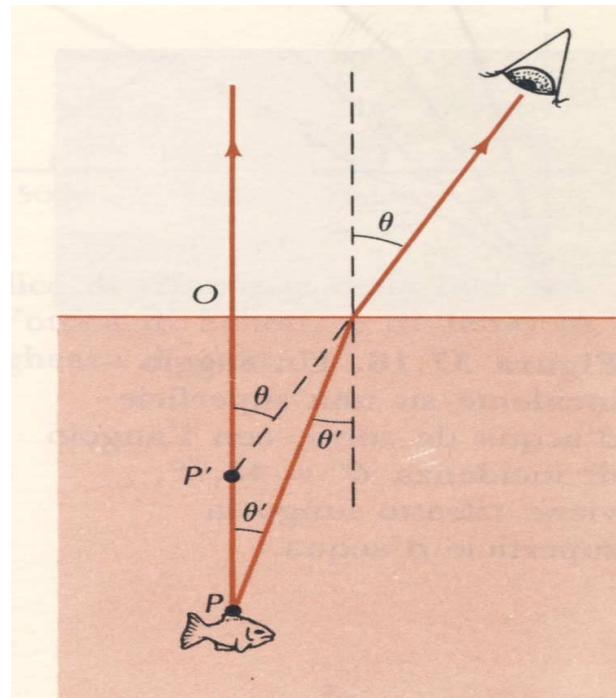
**La lunghezza d'onda serve per la definizione in piccola scala e decidere quando passare dalla descrizione corpuscolare a quella ondulatoria della luce . I fenomeni di diffrazione infatti diventano importanti solo quando il rapporto fra le dimensioni caratteristiche degli oggetti illuminati e la lunghezza d'onda della luce che l'illumina è  $\sim 1$ , o  $< 1$  .**

# La rifrazione della luce

Alcuni esempi di propagazione del raggio di luce in materiali trasparenti



**Figura** Un raggio luminoso entra in una lamina di vetro ed esce dall'altra parte. Gli angoli  $\theta'$  che il raggio interno forma con le normali alla faccia destra e alla faccia sinistra della lamina sono uguali.



**Figura** Un pesciolino lucente agisce come una sorgente di luce. È da notare che il verso della direzione di propagazione del raggio è opposto a quello indicato ; ma ciò non influenza la validità dell'equazione . Il raggio extrapolato (tratteggiato) appare provenire dal punto  $P'$ .

# La rifrazione della luce

La rifrazione interpretata con i fronti d'onda

Nel vuoto il raggio delle sfere elementari è :  $r = c\Delta t$

Nel materiale è :  $r' = c\Delta t/n$

In fig.a la riduzione della velocità del lato (sinistro) del fronte d'onda fa sì che esso si giri variando la direzione di propagazione.

In fig. b i triangoli  $PP'Q$  e  $P P'Q'$  hanno in comune il lato  $PP'$

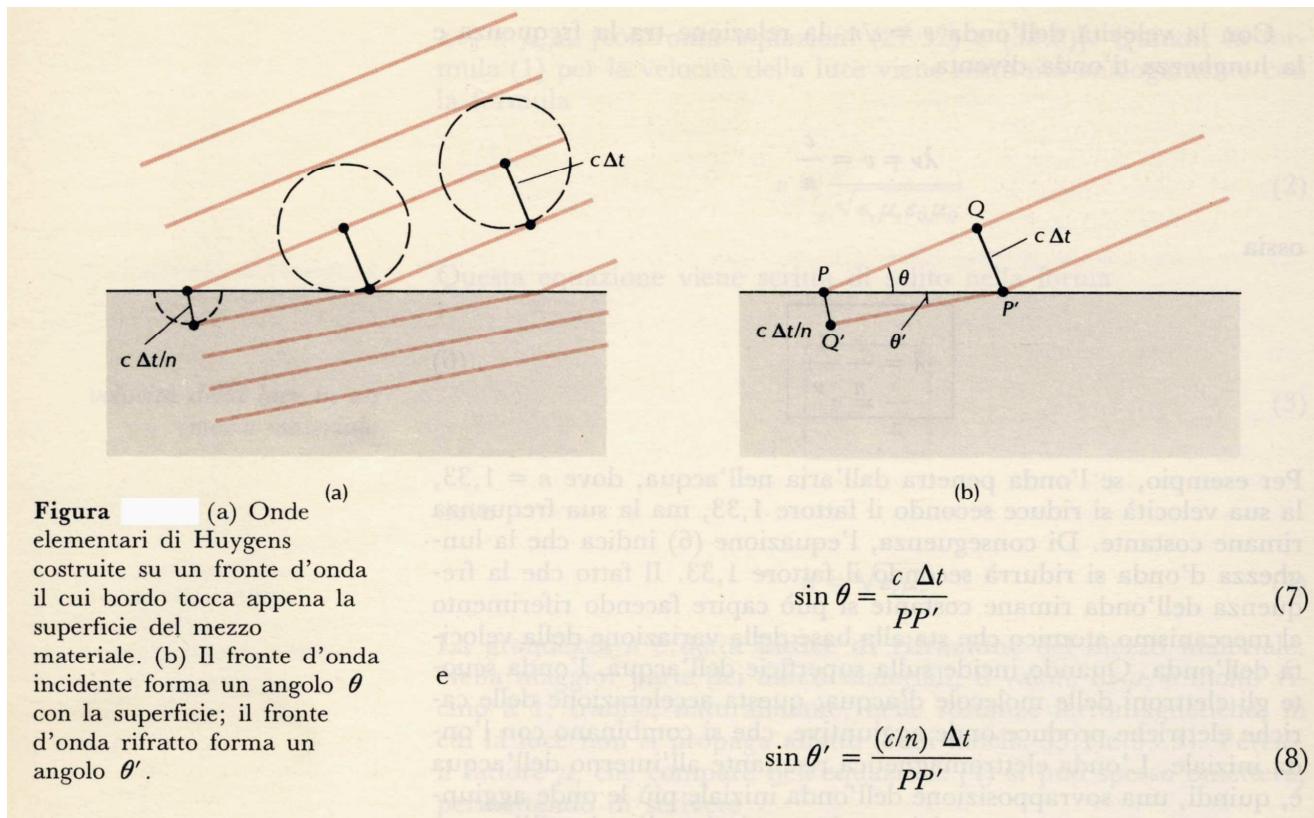


Figura (a) Onde elementari di Huygens costruite su un fronte d'onda il cui bordo tocca appena la superficie del mezzo materiale. (b) Il fronte d'onda incidente forma un angolo  $\theta$  con la superficie; il fronte d'onda rifratto forma un angolo  $\theta'$ .

## I° legge di Snellius-Descartes

Il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale al piano d'incidenza sono complanari

## II° Legge di Snellius-Descartes

Nel passaggio da un mezzo ad un altro di indice di rifrazione diverso si ha :

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

$$\sin \theta' = \frac{(c/n) \Delta t}{PP'} \quad (8)$$

# Riflessione totale

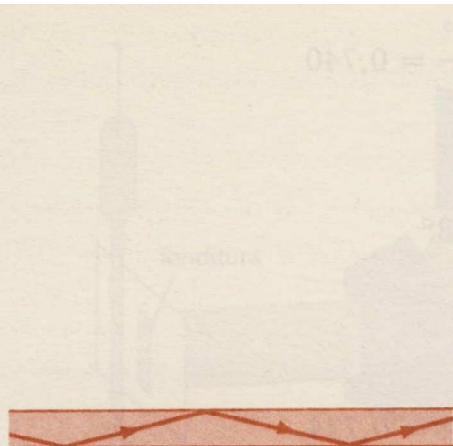
Nel caso  $n' < n$  si può avere riflessione totale:

$$n \sin q' = \sin 90^\circ = 1$$

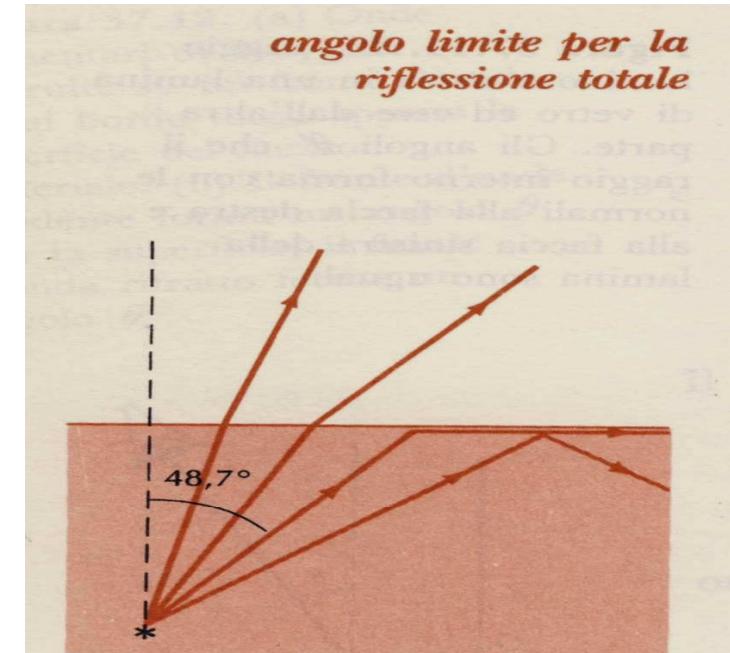
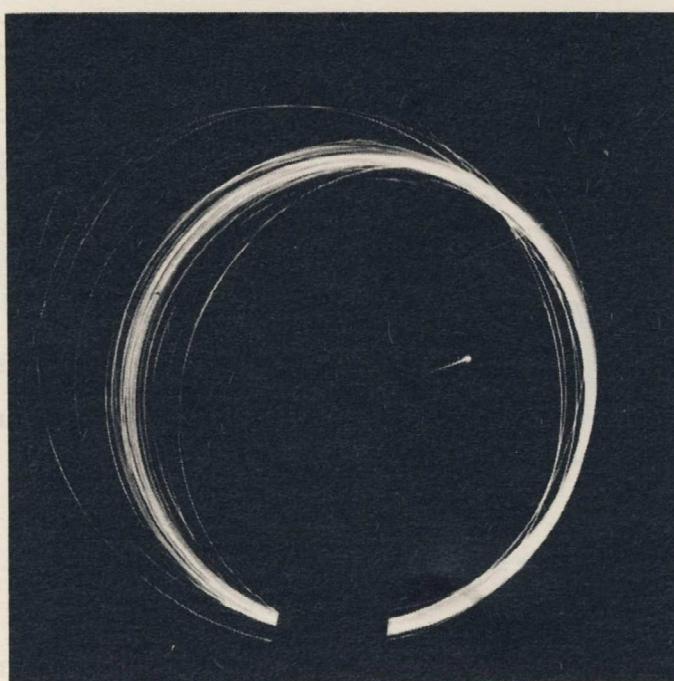
$$q_{\text{limite}} = \arcsin(1/n)$$

per l'acqua  $n=1,33 \gg q_{\text{lim}} = 48,75^\circ$

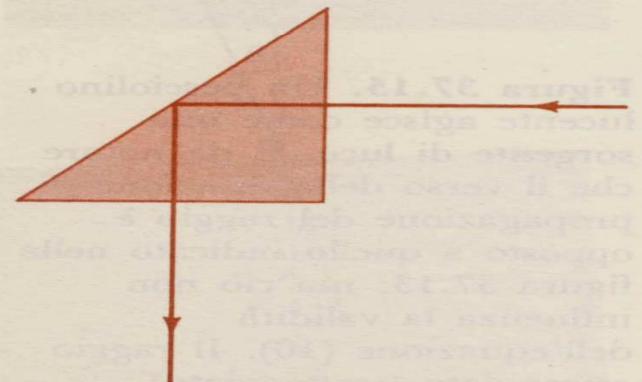
per il vetro  $n=1,5 \gg q_{\text{lim}} = 42^\circ$



**Figura** (sopra)  
Riflessione totale in una fibra ottica. (a destra) La luce entra nella fibra ottica in alto a destra ed esce nel centro.



**Figura** Un raggio incidente su una superficie d'acqua da sotto, con l'angolo di incidenza  $\theta' = 48,7^\circ$ , viene rifratto lungo la superficie d'acqua.



**Figura** Riflessione totale in un prisma.

# Prismi a riflessione totale

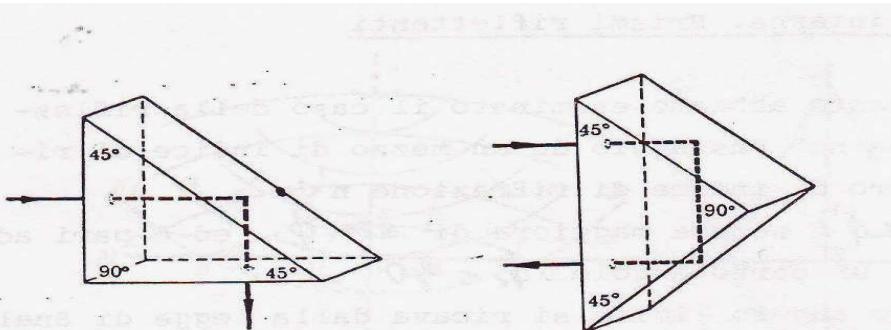


Fig 2-5

- Il valore **dell'angolo limite del vetro** permette la costruzione di molti strumenti ottici con prismi a riflessione totale.
- In fig. sono riportati vari tipi di prismi retti e con altre configurazioni che sfruttano sempre la rifrazione totale.

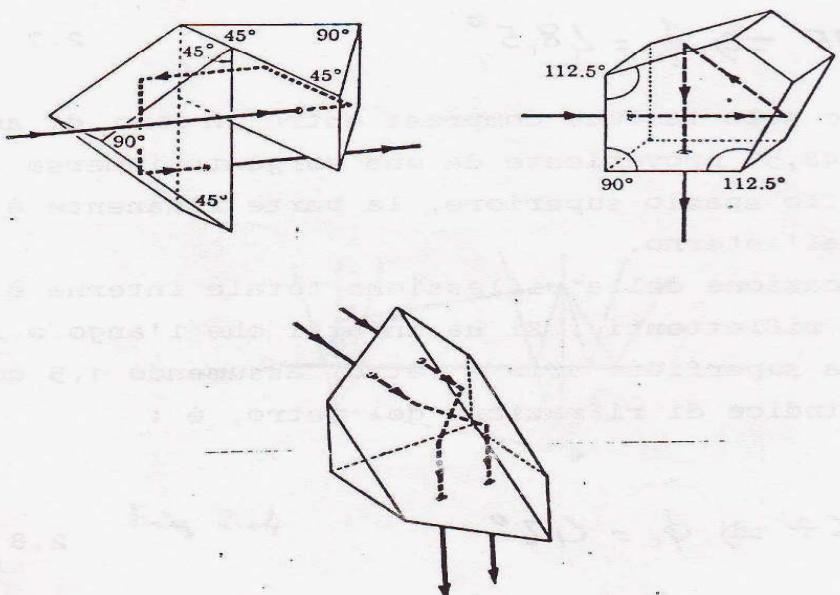
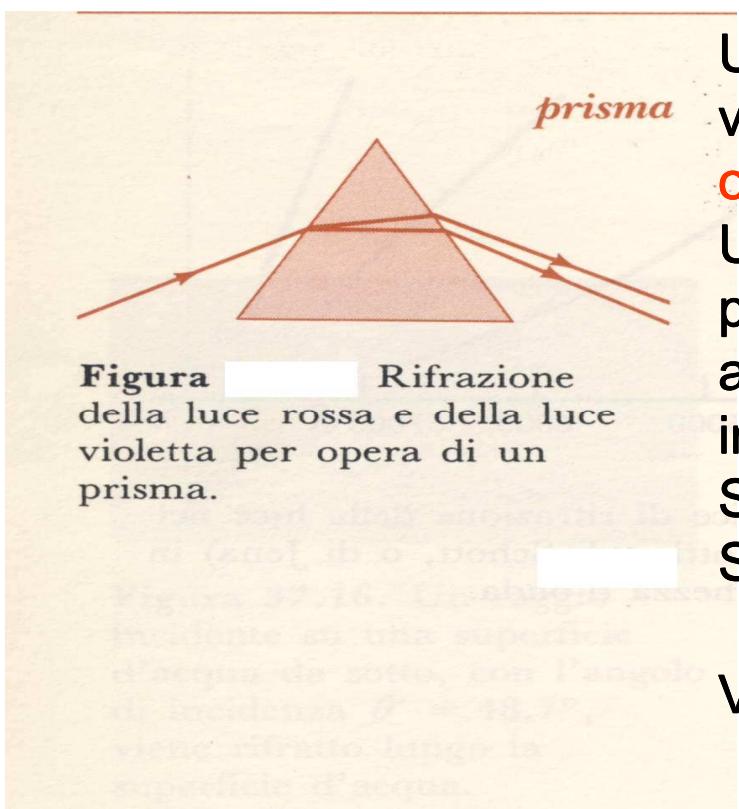


Fig 2-6

# Rifrazione da prisma ottico con sorgente policromatica



**Figura** Rifrazione della luce rossa e della luce violetta per opera di un prisma.

Un materiale otticamente lavorato, avendo un  $n$  che varia con  $\lambda$ , dà luogo al fenomeno della **dispersione ottica**.

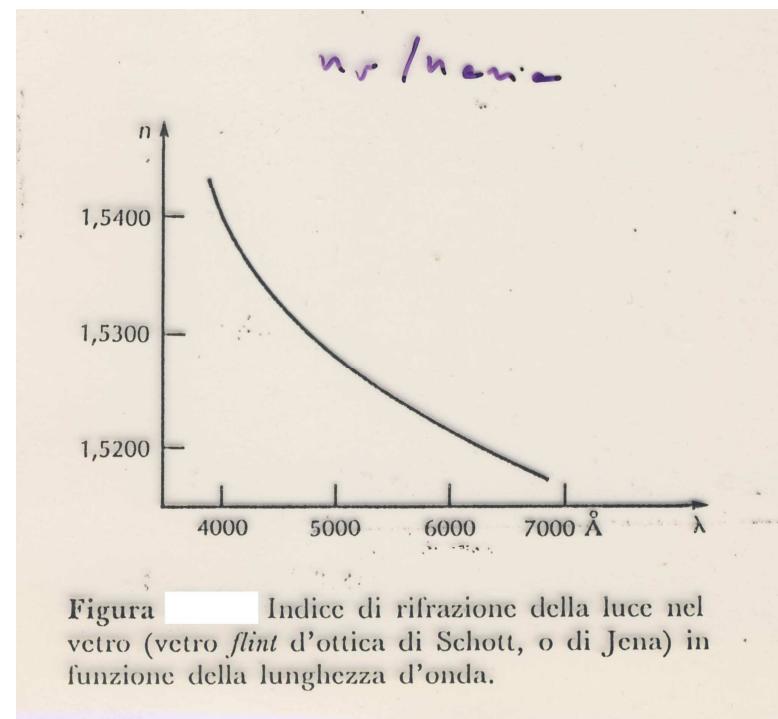
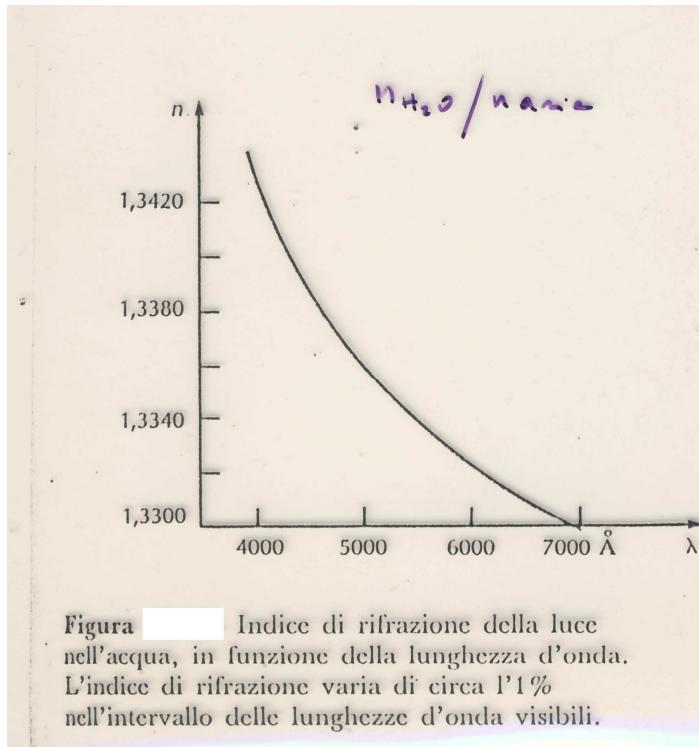
Un prisma ottico infatti, colpito da un fascio di luce policromatica, è in grado di separare, cioè deviare ad angoli diversi le diverse componenti del fascio di luce incidente.

Si ha bassa rifrangenza se il vetro è comune(crown)  
Si ha alta rifrangenza se il vetro è al piombo( flint)

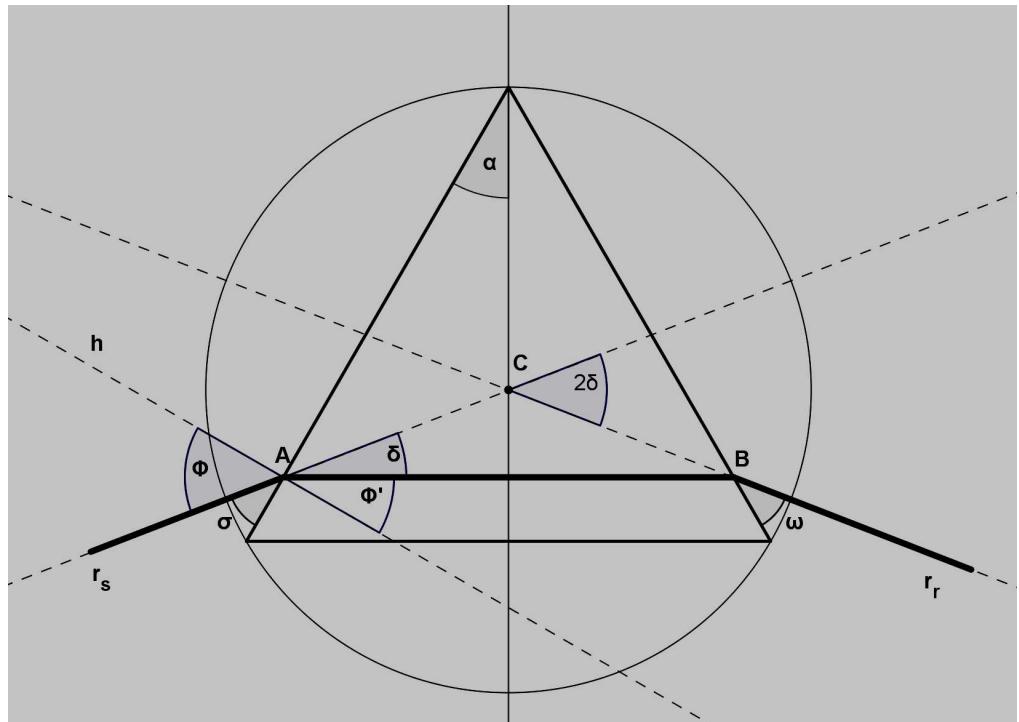
Vetri ottici:  $1,52 < n < 1,66$

Per tutte le sostanze  $n$  è sempre maggiore per le lunghezze d'onda  $\lambda$  più corte.

# Andamenti dell'indice di rifrazione vs della lunghezza d'onda



# Prisma ottico equilatero in configurazione di angolo minimo



Il prisma ha le superfici inclinate a  $60^\circ$  ed il raggio incidente sulla prima superficie di rifrazione esce dalla seconda faccia in direzione diversa da quella di entrata, tale differenza è definita **dall'angolo di deviazione  $\delta$**  ricavabile dalla legge di Snell e dalla geometria del sistema. Si avrà deviazione minima quando il raggio all'interno viaggia parallelo alla base e riemerge con angolo di  $30^\circ$ . Il valore dell'angolo d'incidenza dipenderà dall' indice  $n$  del materiale.

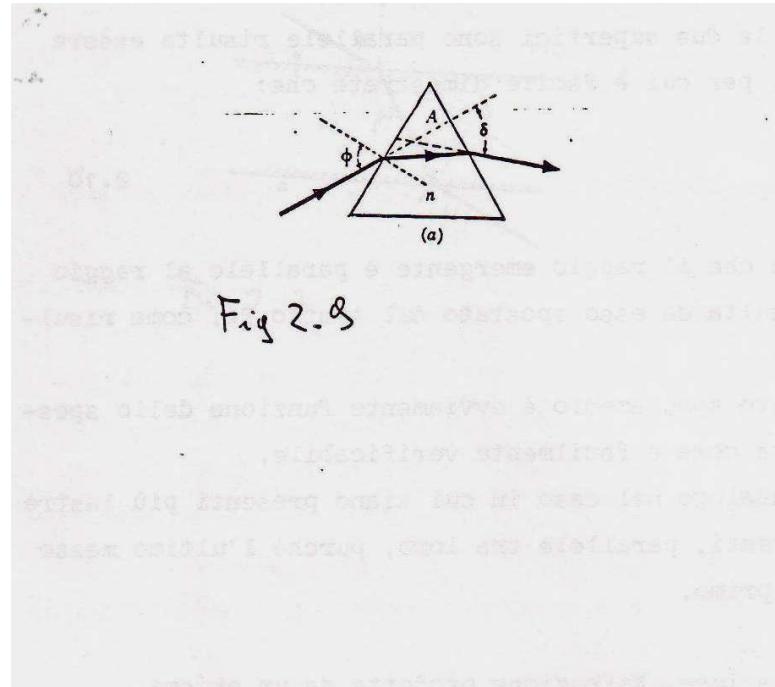


Fig 2.8

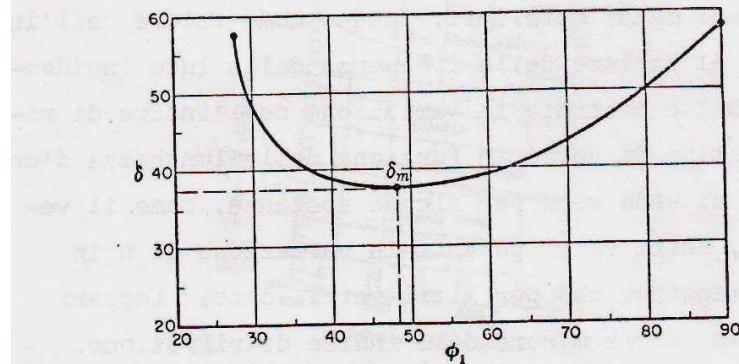


Fig 2.10

- Si consideri il prisma equilatero nella configurazione sperimentale rappresentata in figura (si noti che il prolungamento del raggio incidente  $r_s$  passa per il centro della circonferenza circoscritta). Il prisma è orientato in modo che il raggio che prosegue al suo interno viaggi in direzione parallela alla base. In questa particolare configurazione defininiamo:  
 $\phi$  : angolo d'incidenza.
- $r_s$  : raggio incidente proveniente dalla sorgente laser.
- $r_r$ : raggio rifratto.  
 $\phi' = \alpha$  [ lati a due a due ortogonali, si ricordi che la retta  $h$  è normale alla faccia del prisma].  
 $\delta = 1/2 \delta_{\min}$ , metà della deviazione minima (cioè dell' angolo esterno somma dei due non adiacenti per la proprietà degli angoli esterni del triangolo ABC).  
 $\phi = \phi' + \delta = \alpha + \delta >>> \sin(\alpha + \delta) = n \sin \alpha >>> n = \sin(\alpha + \delta) / \sin \alpha$
- La Legge di Snellius :  $\sin \phi = n \cdot \sin \phi$  viene applicata al prisma di vetro con indice di rifrazione  $n$  , nel passaggio aria – vetro in A .
- Dalle formule precedenti segue che la misura del solo angolo  $\delta$  consente di stimare il valore  $n \pm \Delta n$  dell'indice di rifrazione del materiale di cui è costituito il prisma. L'errore di misura, stimato nell'ipotesi della propagazione del massimo errore, è legato esclusivamente alla stima del valore dell'angolo  $\delta \pm \Delta \delta$  .

- Nel caso in cui il raggio incidente sia di luce policromatica la deviazione prodotta dal prisma sarà differente per i vari colori e la deviazione dalla normale sarà maggiore per le  $\lambda$  più corte (raggio violetto più deviato del raggio rosso)



Se si hanno tre raggi di  $\lambda$  diverse, si definisce **Potere Dispersivo** del prisma di vetro la grandezza:

$$D = n_B - n_R / n_g - 1$$

Nel caso in cui l'angolo di apertura del prisma è piccolo si semplifica la formula dell'angolo minimo:

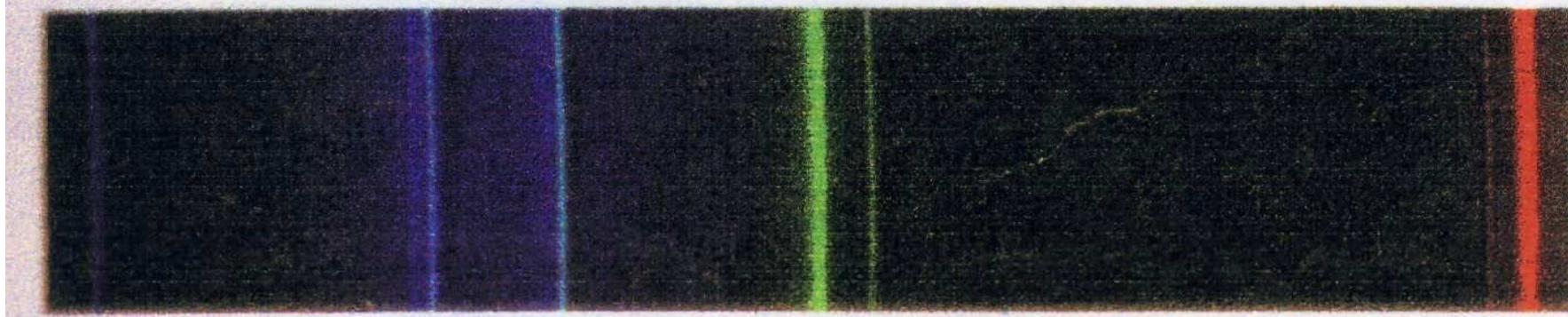
$$\delta = (n-1)\alpha$$

ed applicandola alle varie  $\lambda$  si hanno tre valori per l'angolo minimo  $\delta$ .

L'angolo ( $\delta_B - \delta_R$ ) misura la dispersione dello spettro, mentre  $\delta_g$  rappresenta la deviazione media dell'intero spettro.

Dal rapporto delle due grandezze si ricava il **Potere dispersivo** :  $D = (\delta_B - \delta_R) / \delta_g$

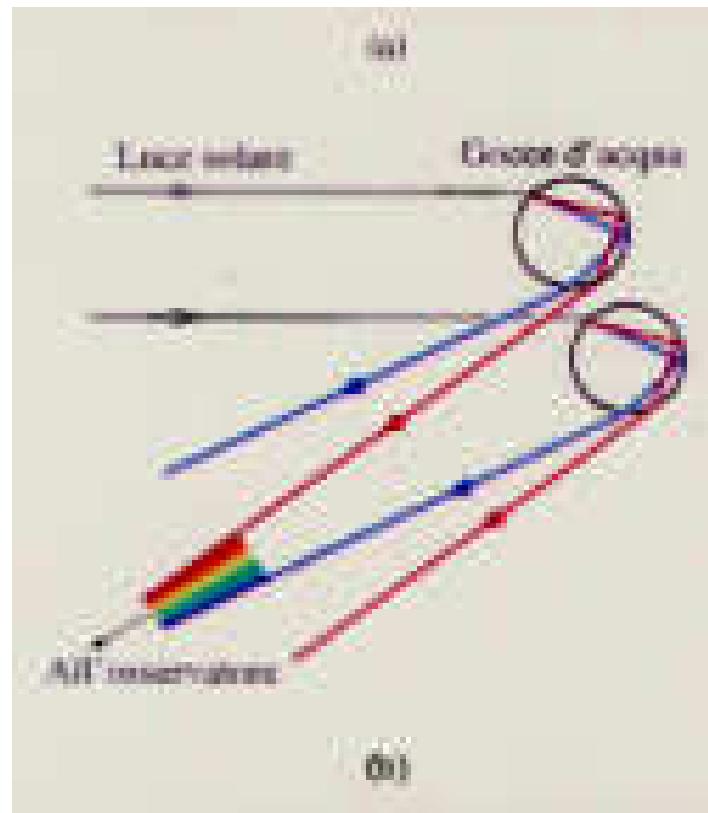
Diversamente da ciò che avviene nel prisma, ricordiamo che in un reticolo di diffrazione la luce rossa ( $\lambda$  grande) subisce deviazione maggiore rispetto alla luce violetta ( $\lambda$  minore)



Righe di emissione del cadmio nello spettro visibile, viste attraverso uno spettroscopio a reticolo.

# Arcobaleno

Il fenomeno della dispersione della luce è alla base del fenomeno **dell'arcobaleno**. Le particelle d'acqua sospese in aria si comportano come prismi e disperdono la luce del sole nelle sue varie componenti cromatiche.

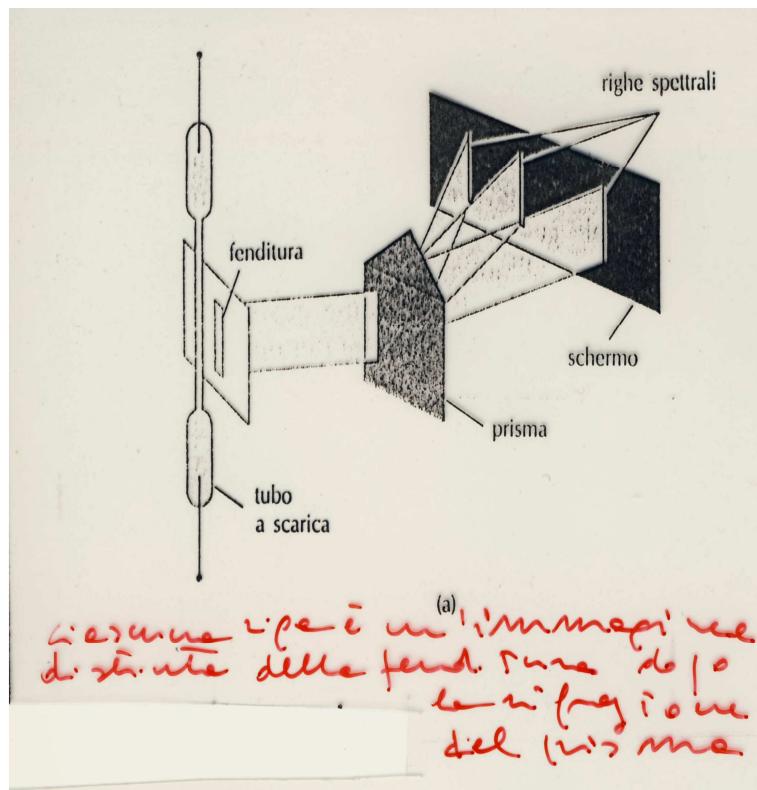
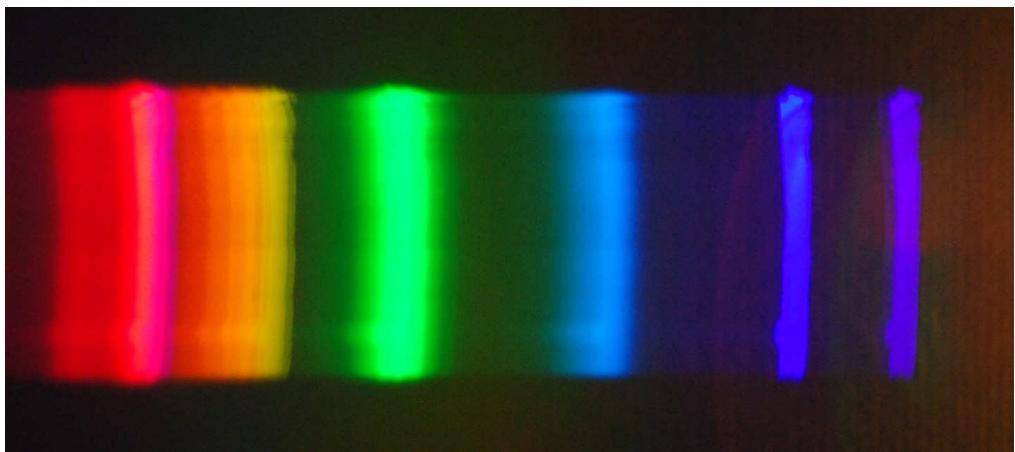


(ii)

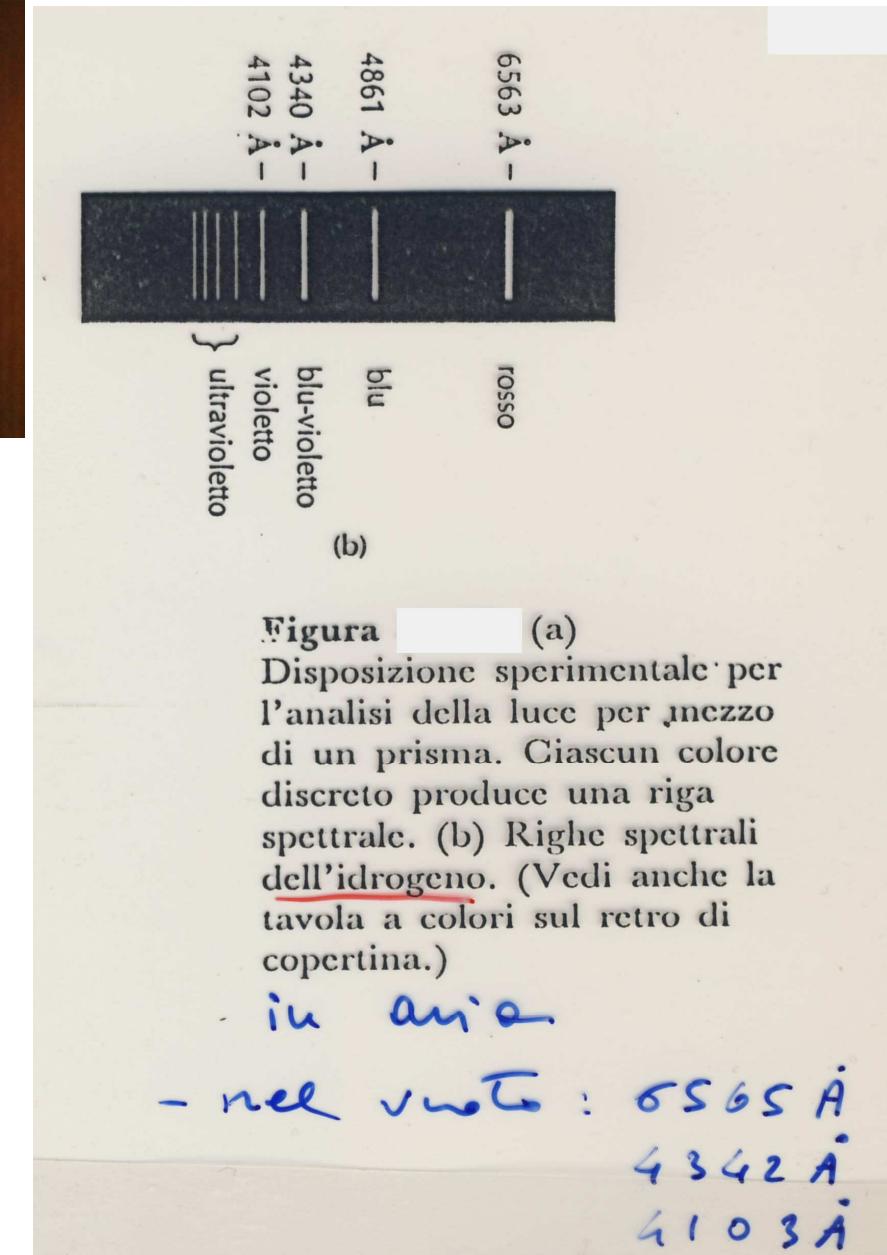
(i) L'arcobaleno è sempre un arco curvilineo intorno a un angolo direttamente opposto al sole. In condizioni normali si vede di modo il tutto arco, ma se lo si osserva da una posizione elevata, è possibile vedere perfino un cerchio completo. (ii) La separazione dei colori, quando il sole viene rifratto entrando e uscendo dalle gocce di pioggia, produce l'arcobaleno. Nello schizzo sono illustrati i percorsi dei raggi blu e rosso provenienti da due gocce. Molti altre gocce contribuiscono a evidenziare il blu e il rosso così come tutti i colori intermedi dello spettro visibile.

# Sorgente spettrale

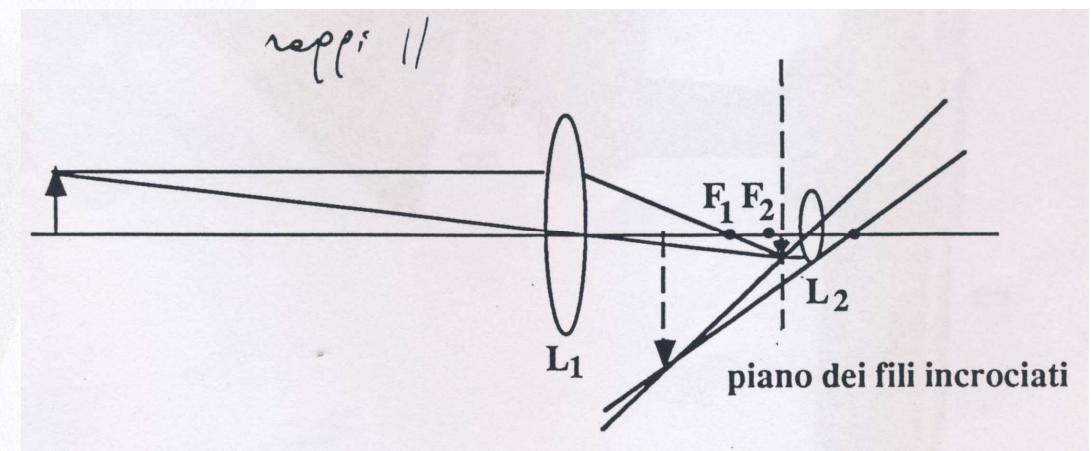
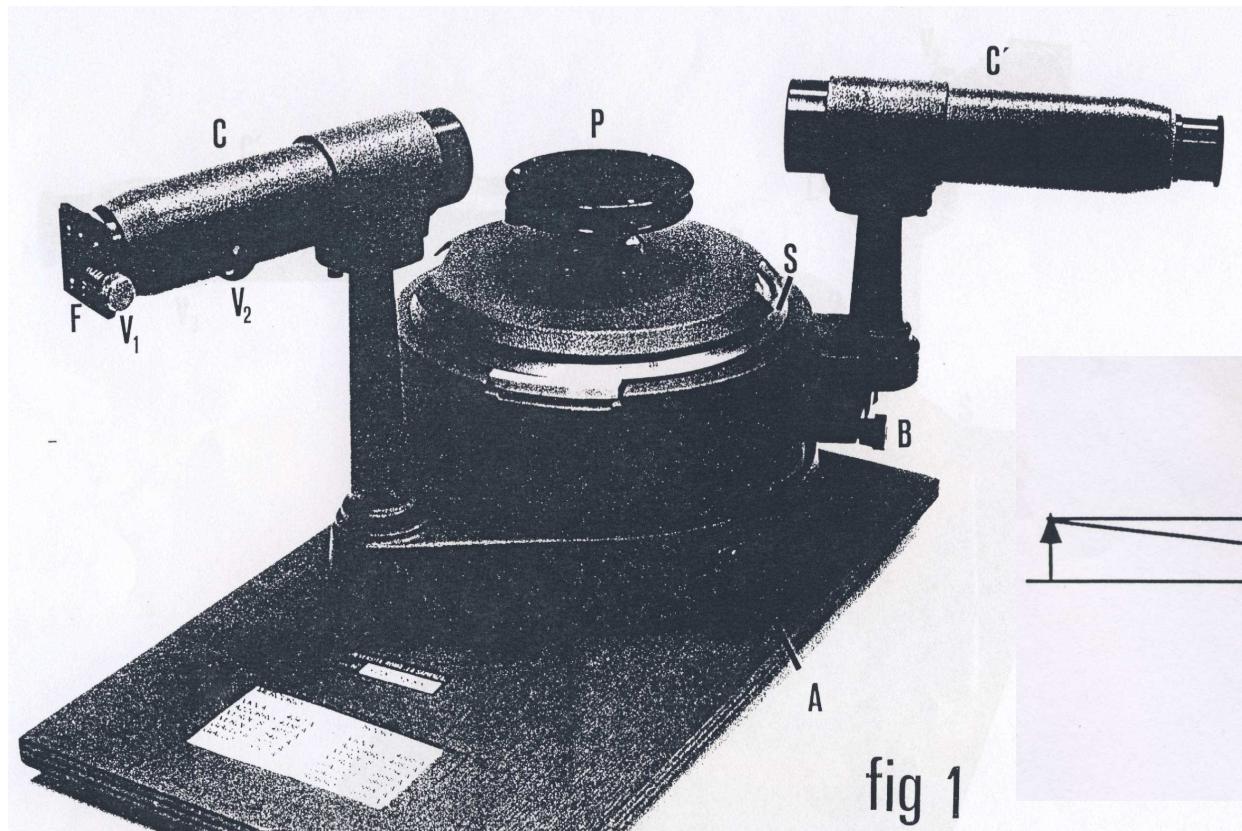
Spettro di una lampada a basso consumo visto con uno spettroscopio a prisma ottico



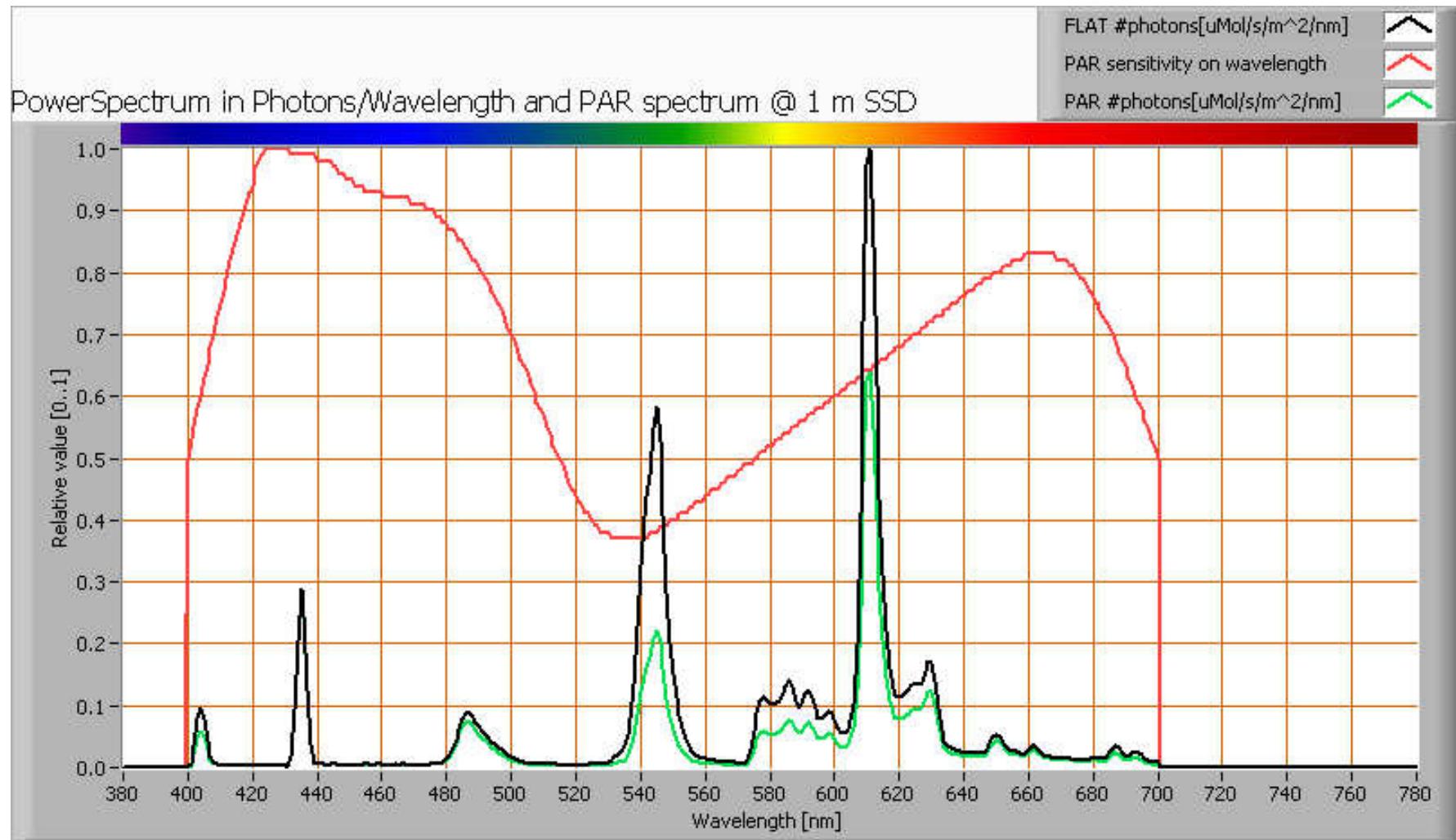
*Le varie righe sono separate da distanze diverse della fenditura dopo la rifrazione del prisma*



# Spettroscopio a prisma/ reticolo



# Spettro di una lampada spettrale a basso consumo



# Onde coerenti

Onde provenienti dalla stessa sorgente, la cui differenza di fase rimane costante, colpiscono simultaneamente un punto dello spazio

$$y_1(x,t) = A_1 \sin(\Phi_1 - \omega t)$$

$$y_2(x,t) = A_2 \sin(\Phi_2 - \omega t)$$

e indichiamo con

$$\Delta\Phi = (\Phi_2 - \omega t) - (\Phi_1 - \omega t) = \Phi_2 - \Phi_1$$

Onde in fase o in opposizione di fase.

la differenza di fase. La Figura 13.18 illustra due situazioni particolari in cui la differenza di fase è nulla (onde *in fase*) o è pari a  $\pi$  rad (onde *in opposizione di fase*). Per determinare l'onda risultante  $y = y_1 + y_2$  assumiamo, per semplicità, che le ampiezze siano uguali ( $A_1 = A_2 = A$ )

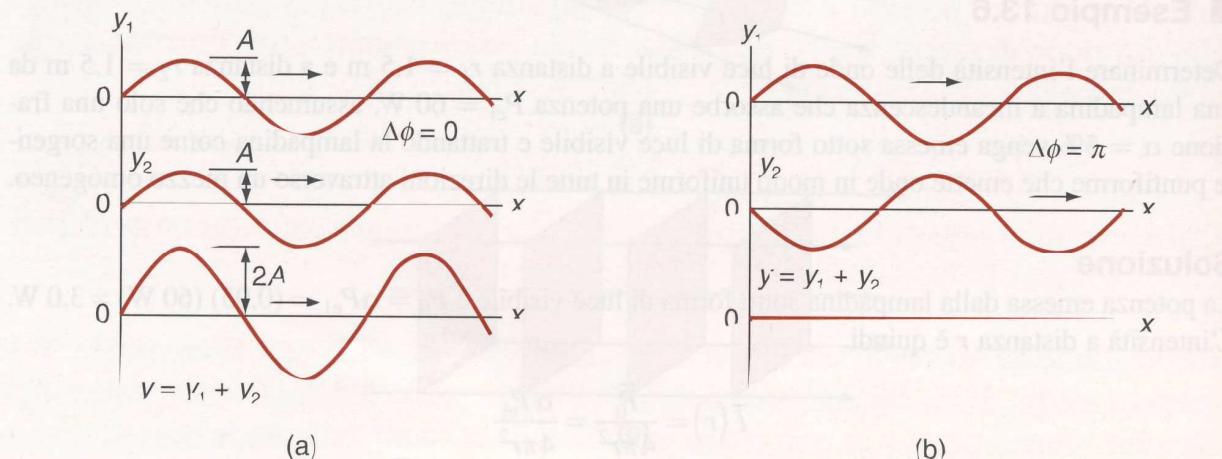
$$y = A [\sin(\Phi_1 - \omega t) + \sin(\Phi_2 - \omega t)]$$

Ricorrendo quindi all'identità trigonometrica

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right) \quad (13.18)$$

Figura

Interferenza di due onde armoniche. Le due onde hanno uguali ampiezze, pulsazioni e direzione di propagazione. (a) Interferenza costruttiva ( $\Delta\Phi = 0$ ). (b) Interferenza distruttiva ( $\Delta\Phi = \pi$ ).

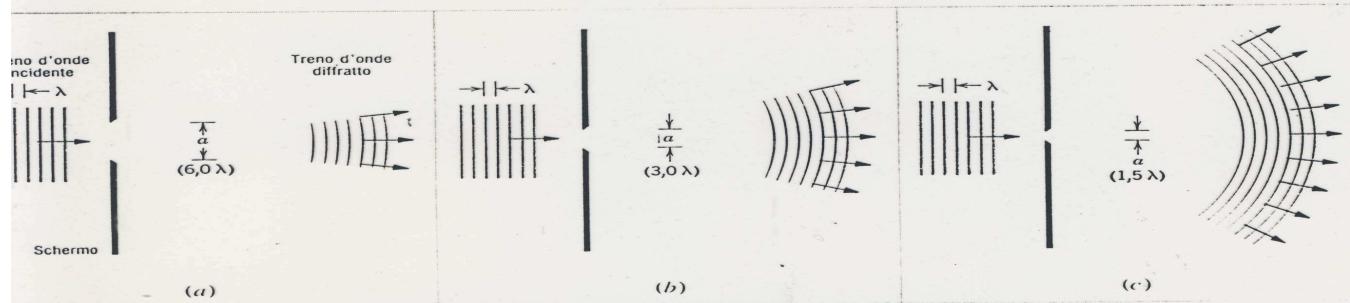


## Interferenza di due onde armoniche coerenti

in cui poniamo  $\alpha = \Phi_1 - \omega t$  e  $\beta = \Phi_2 - \omega t$ , ricaviamo

$$y(x,t) = 2A \cos(\Delta\Phi/2) \sin(\Phi_1 - \omega t + \Delta\Phi/2) \quad (13.19)$$

da cui risulta evidente che l'interferenza dà luogo a un'onda armonica che ha (i) la stessa pulsazione (e quindi la stessa frequenza, lo stesso periodo ecc.) delle due onde che interferiscono, (ii) ampiezza (il termine  $2A \cos(\Delta\Phi/2)$ ) che, a seconda dalla differenza di fase, può assumere valori compresi tra 0 ( $\Delta\Phi = \pm\pi$ , onde in opposizione di fase, *interferenza distruttiva*) e  $2A$  ( $\Delta\Phi = 0$ , onde in fase, *interferenza costruttiva*).



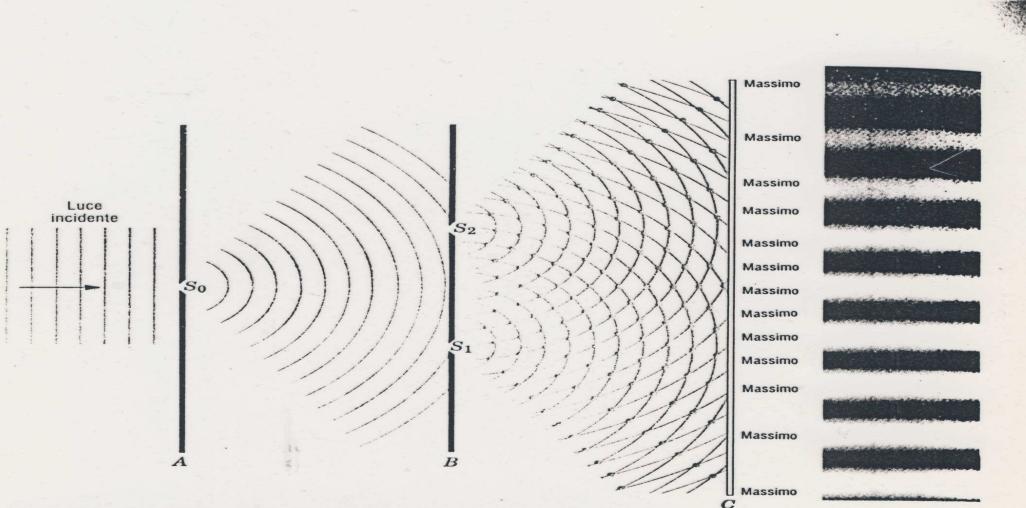
**Figura 40-1** Mostra come viene diffratto un treno d'onde piane incidente quando attraversa una fenditura in uno schermo opaco. Tanto più piccolo è il rapporto  $a/\lambda$  e tanto più le onde si allargano rispetto alla regione di ombra geometrica della fenditura.



**Figura 40-2** Difrazione da una fenditura delle onde di superficie in una spugna d'acqua. Da notare che la larghezza della fenditura è circa uguale alla lunghezza d'onda. (Concessione di Educational Services Incorporated).

$$\alpha \approx \lambda$$

Eperimento di Young di interferenza da due fenditure



**Figura 40-3** Thomas Young produsse una figura d'interferenza sullo schermo  $C$ , facendo in modo che le onde difratte dai forellini  $S_1$  e  $S_2$  si sovrapponessero nella regione tra gli schermi  $B$  e  $C$ .

**Figura 40-4** La figura d'interferenza prodotta sullo schermo  $C$  di Fig. 40-3. (Da *Atlas of Optical Phenomena*, c. M. Cagnet, M. Francon e J. C. Thrierr, Springer-Verlag, 1962).

# Interferenza di onde coerenti provenienti da due fenditure

Le onde che emergono dalle due fenditure siano :

$$Y_1 = A_1 \sin(\Phi_1 - \omega t)$$

$$Y_2 = A_2 \sin(\Phi_2 - \omega t)$$

con  $\Delta\Phi$  di fase

Se  $\Delta\Phi = \pm 2n\pi$  le onde sono in fase e si ha interferenza costruttiva con differenze di percorso dei raggi:

$$\Delta r = \pm m\lambda \quad (m=0,1,2,\dots)$$

e con angoli  $\vartheta_m$  che individuano i centri delle frangie pari a:

$$d \sin \vartheta_m = \pm m\lambda \quad (m=0,1,2,\dots)$$

Cioè il massimo principale  $m=0$  ed i max secondari  $m=1,2,\dots$

Se  $\Delta\Phi = \pm(2n+1)\pi$  le onde sono in opposizione di fase e si ha interferenza distruttiva con

$$\Delta r = \pm(m'+1/2)\lambda \quad (m'=0,1,2,\dots)$$

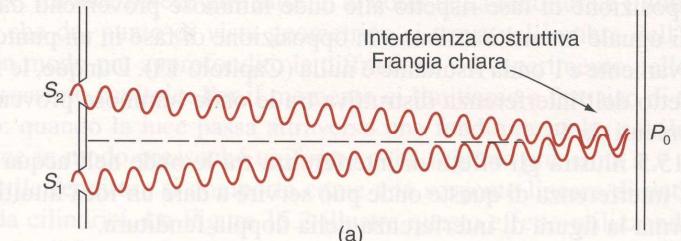
e con angoli  $\vartheta_{m'}$ , + che individuano i centri delle frangie pari a:

$$d \sin \vartheta_{m'} = \pm(m'+1/2)\lambda \quad (m'=0,1,2,\dots)$$

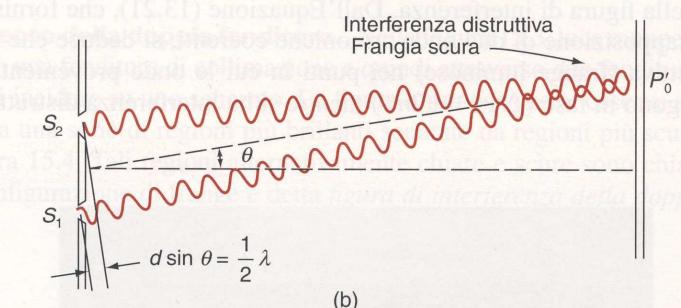
**Figura**

Le onde luminose emergono da  $S_1$  e  $S_2$  in fase.

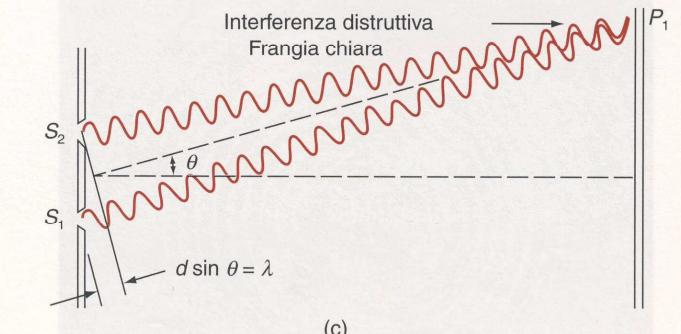
(a) Le onde provenienti da ciascuna fenditura arrivano in  $P_0$  in fase (cresta su cresta e ventre su ventre) e quindi interferiscono costruttivamente sullo schermo producendo la frangia chiara centrale. (b) Le onde arrivano sfasate (cresta su ventre e viceversa) nel punto  $P'_0$  e quindi interferiscono distruttivamente producendo la frangia scura  $m'=0$ . (c) Le onde arrivano in fase in  $P_1$  e perciò interferiscono costruttivamente dando luogo alla frangia chiara  $m=1$ .



(a)



(b)



(c)

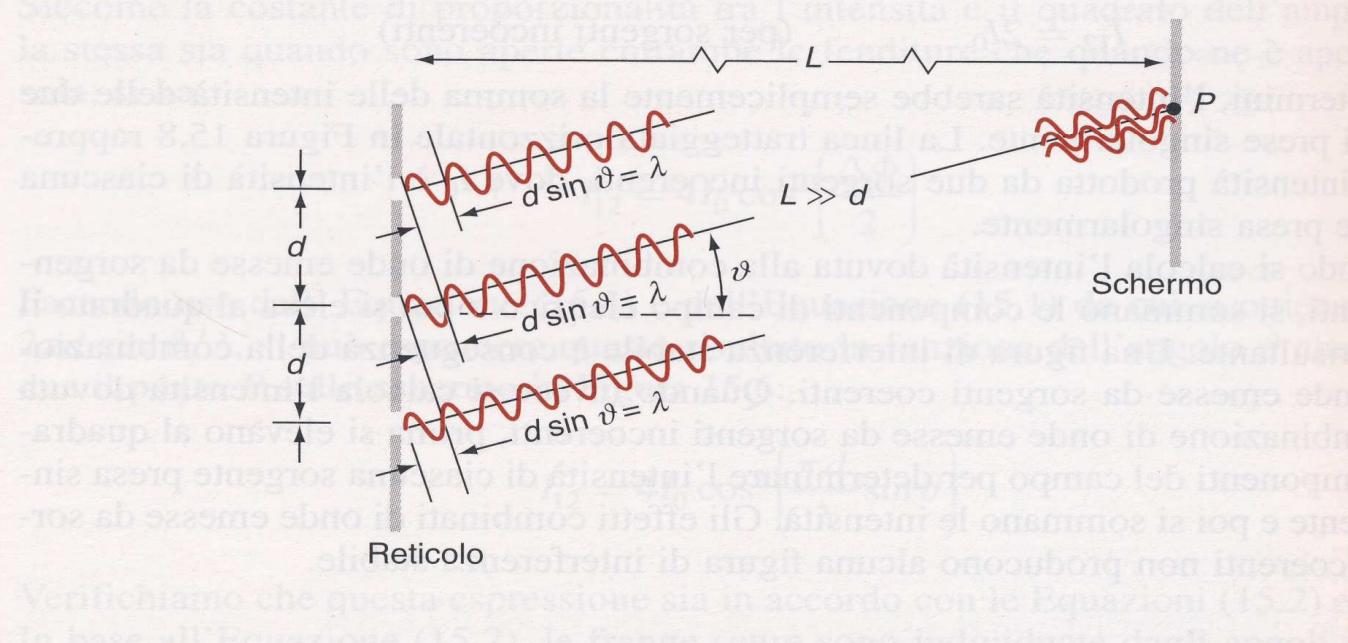
# Interferenza da reticolo

## Capitolo 15 – Interferenza

Figura 1b.10

Onde provenienti da fenditure adiacenti percorrono distanze che differiscono di  $d \sin \vartheta$  per raggiungere il punto  $P$  sullo schermo. In questo particolare caso,  $d \sin \vartheta = \lambda$ , di modo che in  $P$  si forma un massimo di interferenza.

Distribuzione di intensità della doppia fenditura in funzione di  $\vartheta$ .



L'angolo  $\vartheta_m$  di un max per una data  $\lambda$  dipende solo dal passo **d** del reticolo. Infatti con un reticolo di passo **d= 2.0 μm** all'ordine **m=1** si ha, utilizzando la formula dei massimi, per  $\lambda_v = 400\text{nm}$ ,  
 $\vartheta_m = \pm 12^\circ$  e, per  $\lambda_r = 750\text{ nm}$ ,  $\vartheta_m = \pm 22^\circ$  cioè una maggiore deviazione come già ricordato a pag.36

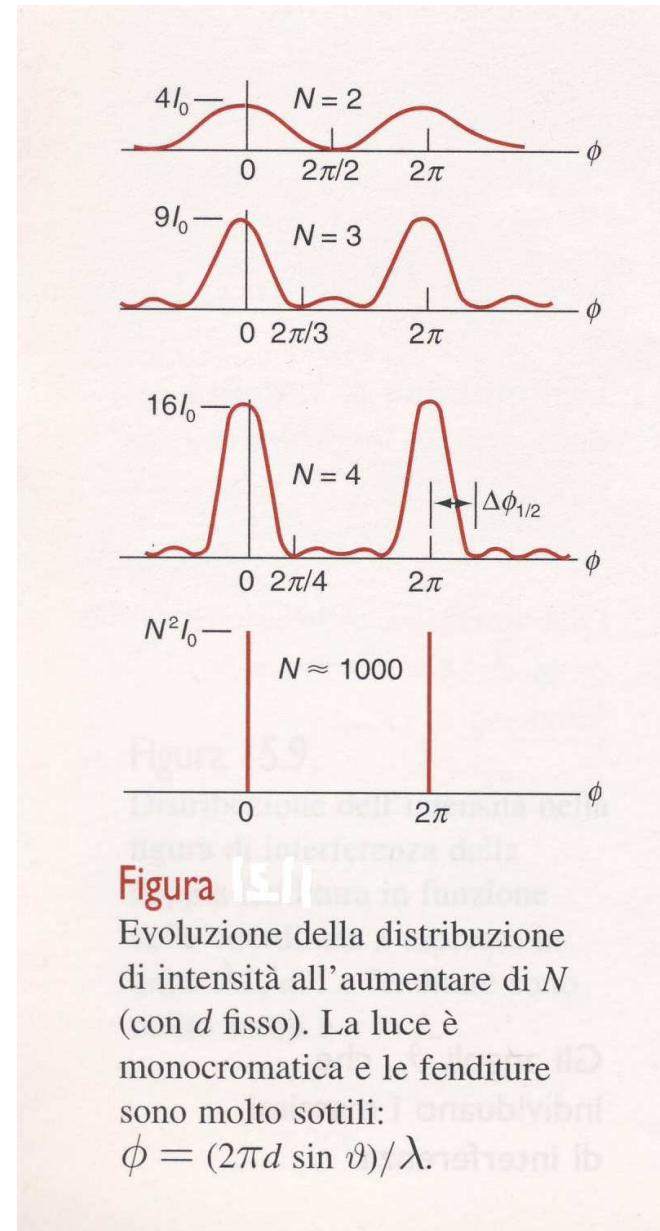
La relazione generale per la distribuzione d'intensità prodotta da un reticolo con **N fenditure** illuminate da luce monocromatica è:  
 $I = I_0 \sin^2|N(1/2\Delta\phi)|$  con  $I_0$  intensità della luce prodotta con una sola fenditura e  $\Delta\phi$  differenza di fase per raggi provenienti da fenditure adiacenti.

Osservando la figura si comprende che con un reticolo ad **N grande la luce è molto intensa** in corrispondenza degli angoli per cui

$$d \sin \vartheta_m = \pm m \lambda \quad (m=0,1,2,\dots)$$

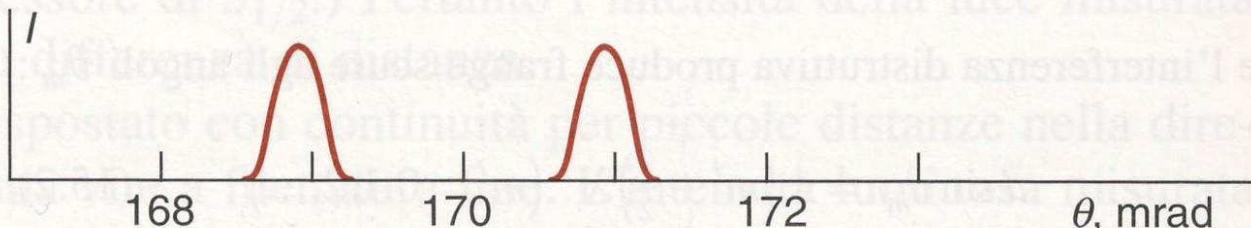
e ciò è dovuto al fatto che solo in corrispondenza dei max principali le onde provenienti dalle N fenditure sono in fase. Dalla formula si vede che l'intensità di ciascun massimo  $I$  va con **N**, e che la larghezza di riga è

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \beta}{\beta^2} \frac{\sin^2 \left[ N \left( \frac{1}{2} \phi \right) \right]}{\sin^2 \left( \frac{1}{2} \phi \right)}$$

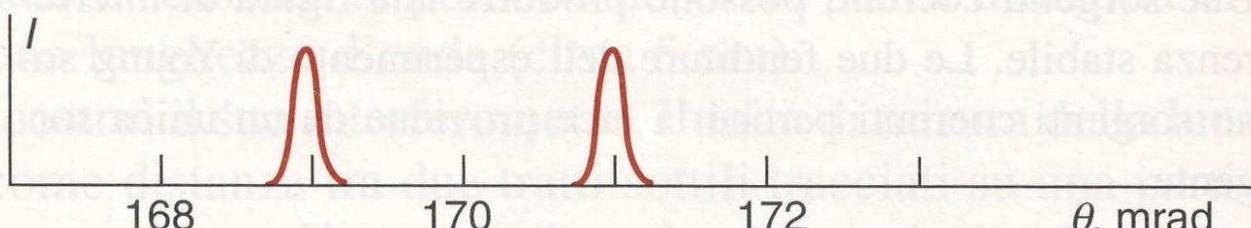


**Figura 15.1**

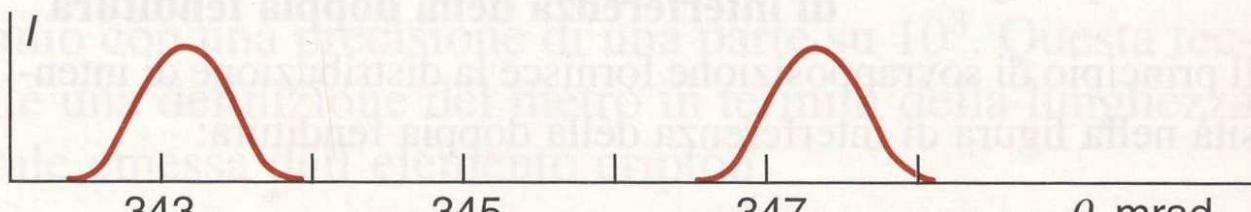
Evoluzione della distribuzione di intensità all'aumentare di  $N$  (con  $d$  fisso). La luce è monocromatica e le fenditure sono molto sottili:  $\phi = (2\pi d \sin \vartheta)/\lambda$ .



(a)



(b)



(c)

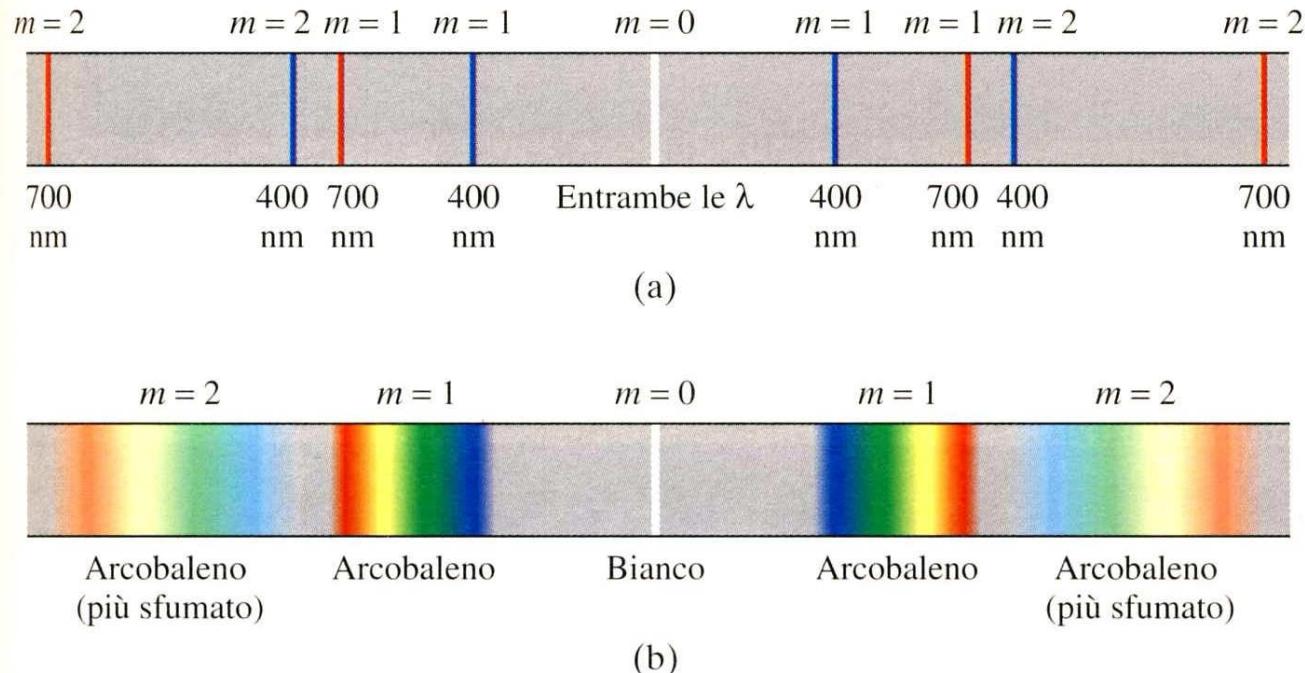
In fig. sono riportati solo i massimi principali.

Quale reticolo ha il più alto valore di  $N$  ?

Quale reticolo ha la massima Dispersione ?

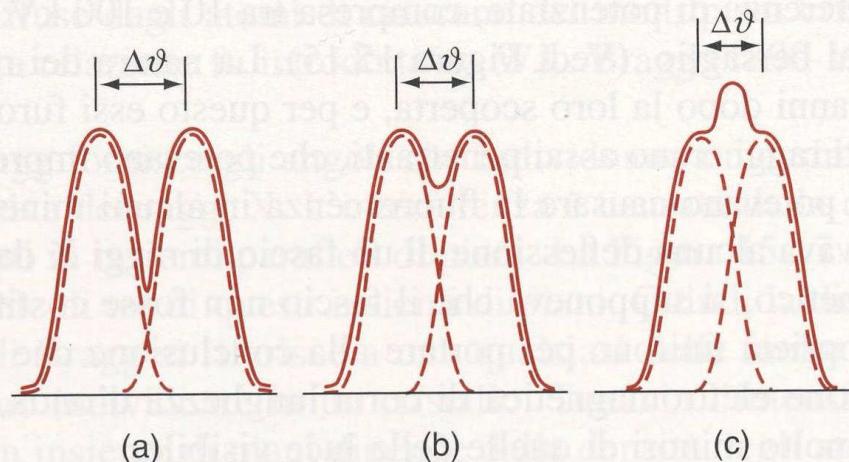
### Figura

Quesito 15.16 ed Esercizio 15.26: massimi di interferenza del primo ordine delle stesse due righe spettrali prodotti (a) dal reticolo A, (b) dal reticolo B, e (c) dal reticolo C.



**FIGURA** Spettro generato da un reticolo: (a) due lunghezze d'onda, 400 nm e 700 nm; (b) luce bianca. Il secondo ordine normalmente è più tenue del primo ordine. (Gli ordini superiori non sono qui illustrati.) Se la distanza tra le fenditure nel reticolo è abbastanza piccola, il secondo ordine e gli ordini superiori vengono a mancare.

## Criterio di Rayleigh per la separazione di righe spettrali



Figura

Esempio 15.6: Due righe spettrali di uguale intensità (rappresentate dalle curve tratteggiate) separate da un angolo  $\Delta\vartheta$ . (a)  $\Delta\vartheta > \Delta\vartheta_{1/2}$ . (b)  $\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{1/2}$ . (c)  $\Delta\vartheta < \Delta\vartheta_{1/2}$ . Il criterio di Rayleigh per la risoluzione è  $\Delta\vartheta > \Delta\vartheta_{1/2}$ .

Ricordando la definizione di Dispersione ,la separazione angolare  $\Delta\vartheta_m$  di due righe spettrali che differiscono di  $\Delta\lambda$ :

$$\Delta\vartheta_m = (m/d\cos\vartheta_m)\Delta\lambda$$

e la semilarghezza angolare :

$\Delta\vartheta_{1/2} = \lambda/Nd\cos\theta_m$  ed il Criterio di Rayleigh per decidere se due righe sono risolte in angolo:

$$\Delta\vartheta > \Delta\vartheta_{1/2}$$

Possiamo scrivere:

$$(m/d\cos\vartheta_m)\Delta\lambda > \lambda/Nd\cos\theta_m$$

E semplificando :  $\Delta\lambda > \lambda/Nm$

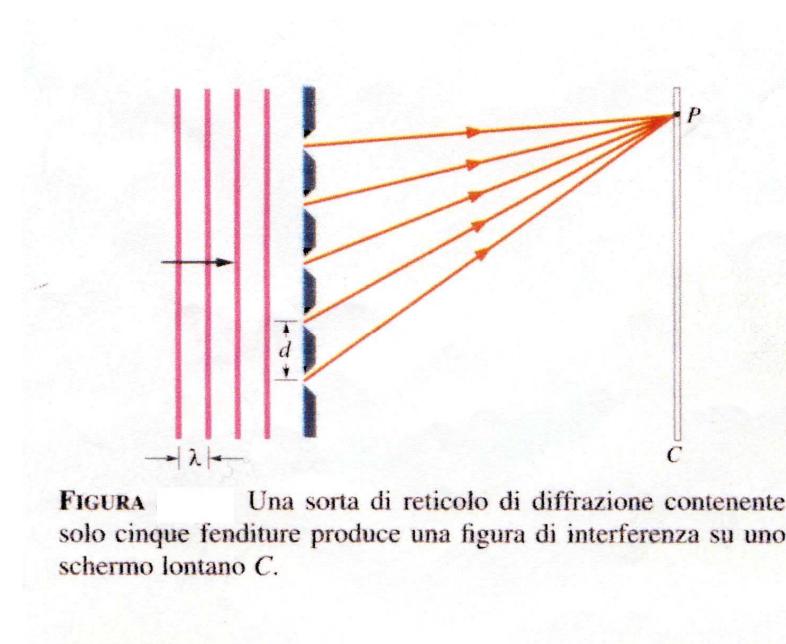
quindi le righe si risolvono se le  $\lambda$  differiscono per più di  $\lambda/Nm$

# Reticoli di Diffrazione

Il Reticolo di Diffrazione è un dispositivo dotato di **N fenditure** (operante in **trasmissione**) o di **N solchi** su di una superficie opaca (operante in **riflessione**).

E'un utile strumento per la studio della luce e degli oggetti che la emettono e l'assorbono.

La luce che viene trasmessa o riflessa dalle N incisioni forma **frange di Interferenza**



**FIGURA** Una sorta di reticolo di diffrazione contenente solo cinque fenditure produce una figura di interferenza su uno schermo lontano  $C$ .

## Spettro a righe prodotto da un reticolo con N fenditure illuminato da luce monocromatica

I massimi di Diffrazione, prodotti da un reticolo ad N fenditure, ai vari ordini  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$  sono riportati in figura.

Si ha una frangia chiara molto luminosa quando la differenza di cammino ottico  $d \sin \theta$ , tra raggi provenienti da coppie di fenditure adiacenti, è

**$d \sin \theta = m\lambda$  con  $m = 0, 1, 2, \dots$**   
**si osservano così i massimi ai vari ordini**

Le frange chiare si riducono a linee dette righe di ordine  $m$ .

Dalla formula è possibile ricavare con l'uso di uno spettroscopio, la lunghezza d'onda di una riga incognita noto il passo del reticolo e la posizione angolare  $\theta$  del massimo di ordine  $m$ .

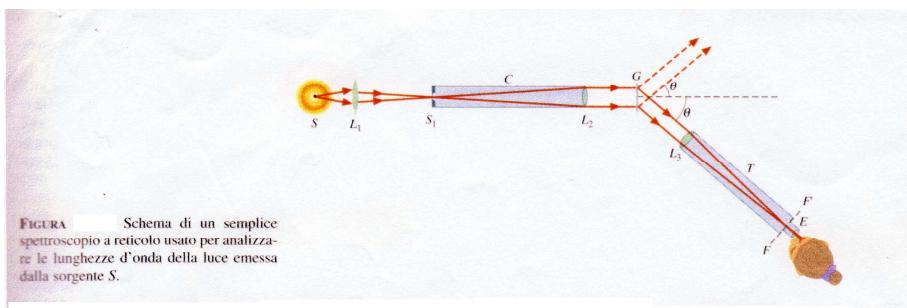
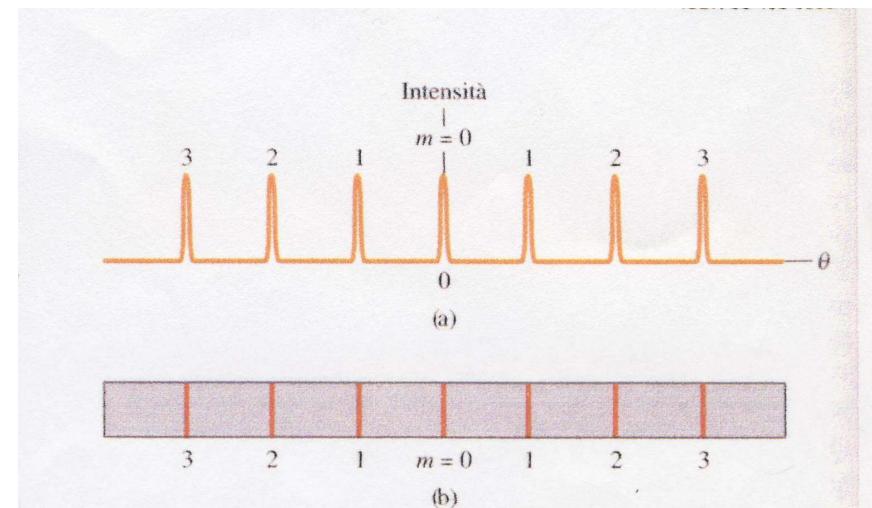


FIGURA Schema di un semplice spettroscopio a reticolo usato per analizzare le lunghezze d'onda della luce emessa dalla sorgente  $S$ .



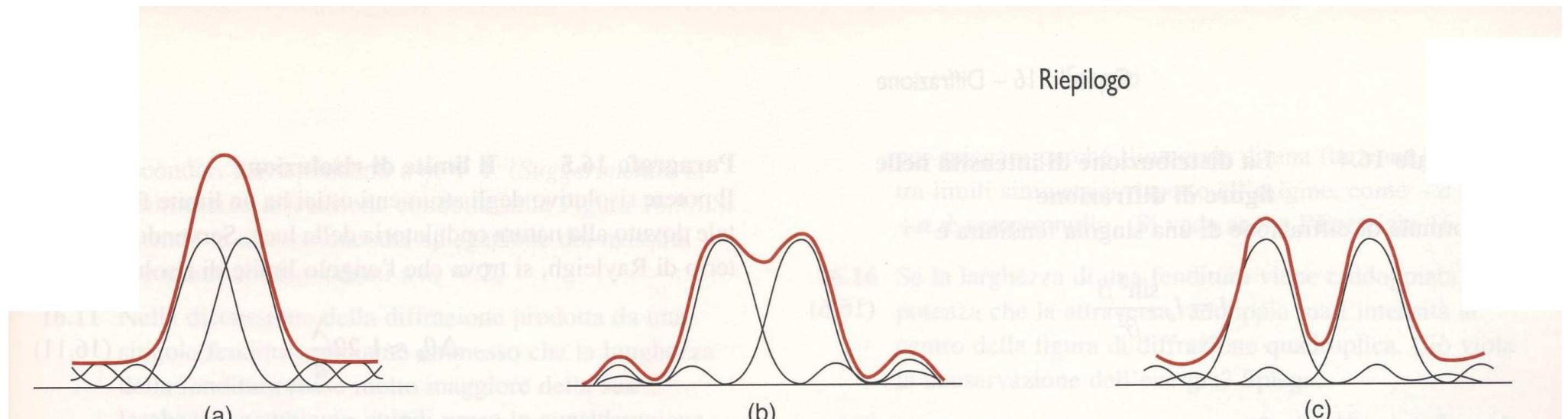
**FIGURA** L'andamento dell'intensità prodotta da un reticolo di diffrazione con numerose fenditure consiste di stretti picchi contrassegnati dal numero d'ordine  $m$ . (b) Le corrispondenti frange chiare viste su uno schermo si chiamano *righe* e sono pure numerate secondo il valore di  $m$ . Sono comprese le righe fino al terz'ordine.

centrale e la direzione del punto  $P$ , è uguale a un numero intero di lunghezze d'onda, ossia

$$d \sin \theta = m\lambda, \text{ con } m = 0, 1, 2, \dots \text{ (massimi).} \quad (37-25)$$

# Criterio di Rayleigh

## Limite di risoluzione assoluto per il potere risolutivo di tutti gli strumenti ottici



**Figura**

Illustrazione del criterio di Rayleigh. Le figure di diffrazione di due sorgenti puntiformi prodotte da una apertura circolare sono (a) non risolte, (b) al limite di risoluzione, con il massimo di una figura coincidente con il minimo dell'altra, e (c) nettamente risolte.

# Appendice

1. Calcolo per ottenere la condizione necessaria affinchè il raggio rifratto emerga dal prisma ottico.
2. Laser e sue Applicazioni.

## Condizione affinchè il raggio rifratto emerga dal prisma

Con riferimento alla fig. 5 si ha, come si è visto,

$$\alpha = \varphi_1 + \varphi_2 \quad \text{e} \quad \delta = \varphi_1 + \varphi_2 - \alpha$$

La condizione affinchè esista un raggio emergente è espressa dalla diseguaglianza

$$\varphi_2 < \varphi_l$$

essendo  $\varphi_l$  l'angolo limite relativo al passaggio del raggio luminoso considerato dalla sostanza di cui è costituito il prisma alla sostanza che circonda quest'ultimo (aria). La precedente diseguaglianza equivale alla

$$\alpha - \varphi_l < \varphi_l, \quad \text{da cui}$$

$$\varphi_l > \alpha - \varphi_l \quad \text{e quindi,}$$

poichè il seno è funzione crescente dell'angolo tra 0 e  $\pi/2$

$$\operatorname{sen} \varphi_l > \operatorname{sen}(\alpha - \varphi_l)$$

Essendo inoltre, per la legge della rifrazione,

$$n \operatorname{sen} \varphi_l = n' \operatorname{sen} \varphi_l',$$

l'ultima diseguaglianza diviene

$$\operatorname{sen} \varphi_l > \frac{n'}{n} \operatorname{sen}(\alpha - \varphi_l)$$

la quale, poichè  $\operatorname{sen} \varphi_l = \frac{n}{n'} \operatorname{sen} \varphi_l'$ ,

può anche essere scritta

$$\operatorname{sen} \varphi_l > \frac{\operatorname{sen}(\alpha - \varphi_l)}{\operatorname{sen} \varphi_l} \quad (*)$$

$$\varphi_l > \arcsin \left[ \frac{n'}{n} \operatorname{sen}(\alpha - \varphi_l) \right]$$

Supponendo che il prisma, di vetro, sia circondato dall'aria, si può assumere

$$\frac{n'}{n} \cong 1,5 \quad \text{e} \quad \varphi_l \cong 42^\circ \quad \text{Se } \alpha = 60^\circ, \text{ si ottiene}$$

$$\varphi_l > 27^\circ$$

Inoltre, poichè dalla (\*) segue  $\frac{\operatorname{sen}(\alpha - \varphi_l)}{\operatorname{sen} \varphi_l} < 1$ , si ottiene la condizione

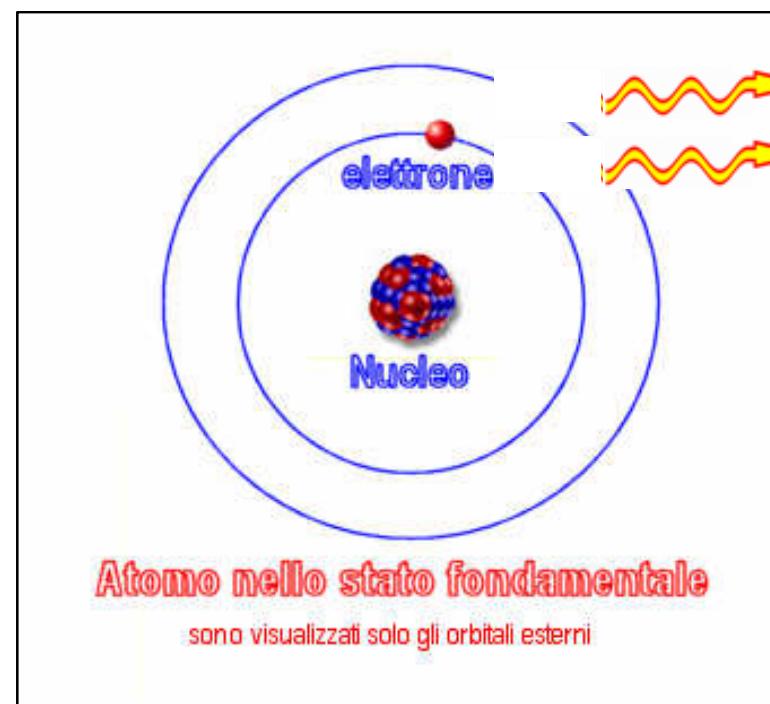
$$\alpha < 2\varphi_l$$

per l'ampiezza dell'angolo di apertura del prisma.

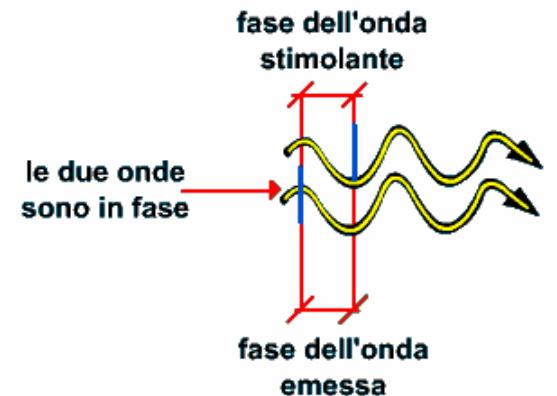
# IL LASER

Il laser sfrutta un fenomeno scoperto da **Einstein** nel 1917, la cosiddetta **EMISSIONE STIMOLATA** di radiazione.

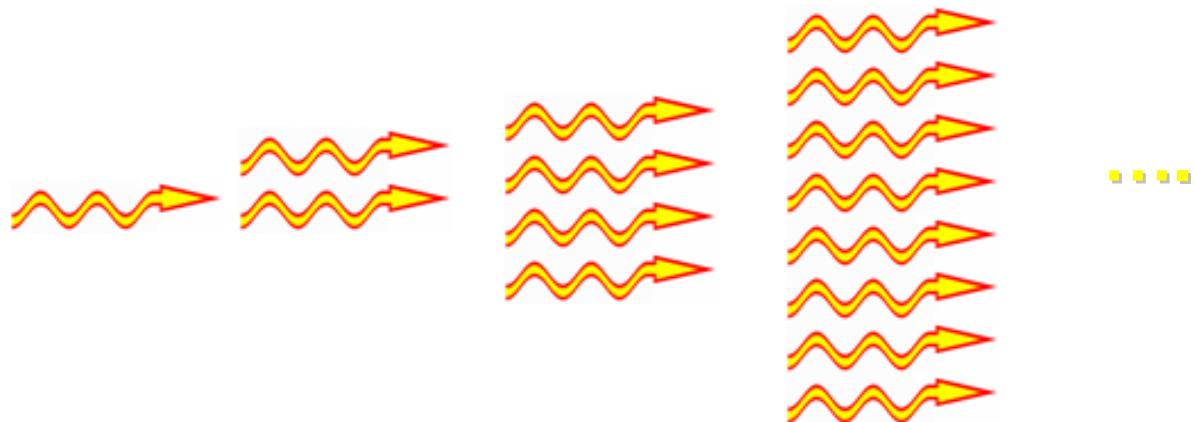
Quando un atomo, che si trova nello stato eccitato, viene colpito da un fotone della giusta energia, l'elettrone ricade immediatamente nell'orbita a più bassa energia e l'atomo emette un secondo fotone **IDENTICO** al primo e ad esso “**sincronizzato**”.



Questo permette di avere “**fotoni**” tutti uguali, quindi con la stessa lunghezza l(**monocromaticità**, emessi tutti nella stessa direzione (**direzionalità**) e con la stessa fase(**coerenza**.)



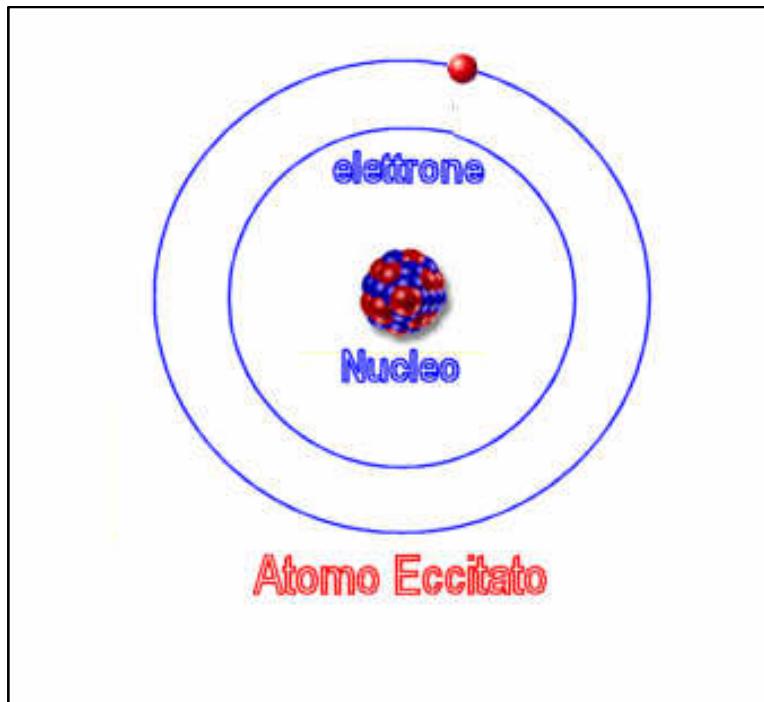
Inoltre questo permette, in un mezzo con molti atomi eccitati, di avere un processo di **moltiplicazione a valanga**: da un fotone se ne ricavano 2, poi 4, 8, 16 e così via! Il numero di fotoni cresce molto rapidamente generando **AMPLIFICAZIONE** della luce.



Tanto per dare un’idea, in un grammo di idrogeno ci sono più di  $10^{23}$  atomi, vale a dire  $100.000.000.000.000.000.000$  atomi.

Se raddoppiamo un fotone 100.000 miliardi di miliardi di volte si ottiene un numero di fotoni enorme!!!

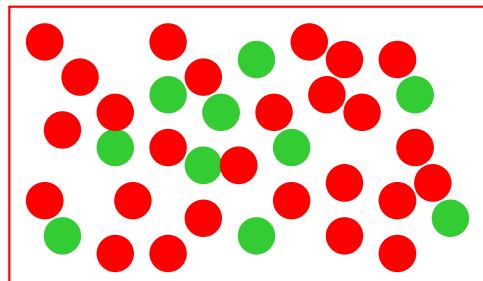
In realtà esiste un meccanismo che opera in competizione con questa **EMISSIONE**: il cosiddetto **ASSORBIMENTO OTTICO**, nel quale un elettrone di un atomo nello stato fondamentale assorbe l'energia di un fotone e si porta nello stato eccitato.



● ATOMO ECCITATO

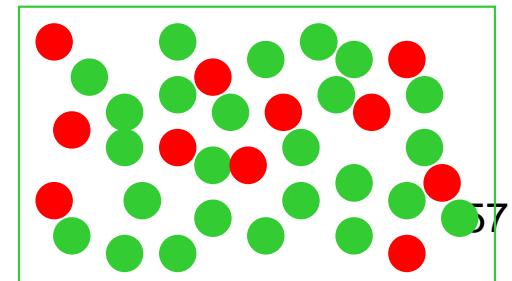
● ATOMO NELLO STATO FONDAMENTALE

MEZZO  
LASER ATTIVO



Dato che i due meccanismi di emissione e di assorbimento sono ugualmente probabili, si ha emissione di luce se gli atomi eccitati sono **più** di quelli nello stato fondamentale, si ha invece assorbimento se gli atomi eccitati sono di **meno**. Nel primo caso si ha la cosiddetta **INVERSIONE DI POPOLAZIONE** e il mezzo di dice **LASER ATTIVO**. Nel secondo il mezzo si dice **ASSORBENTE**.

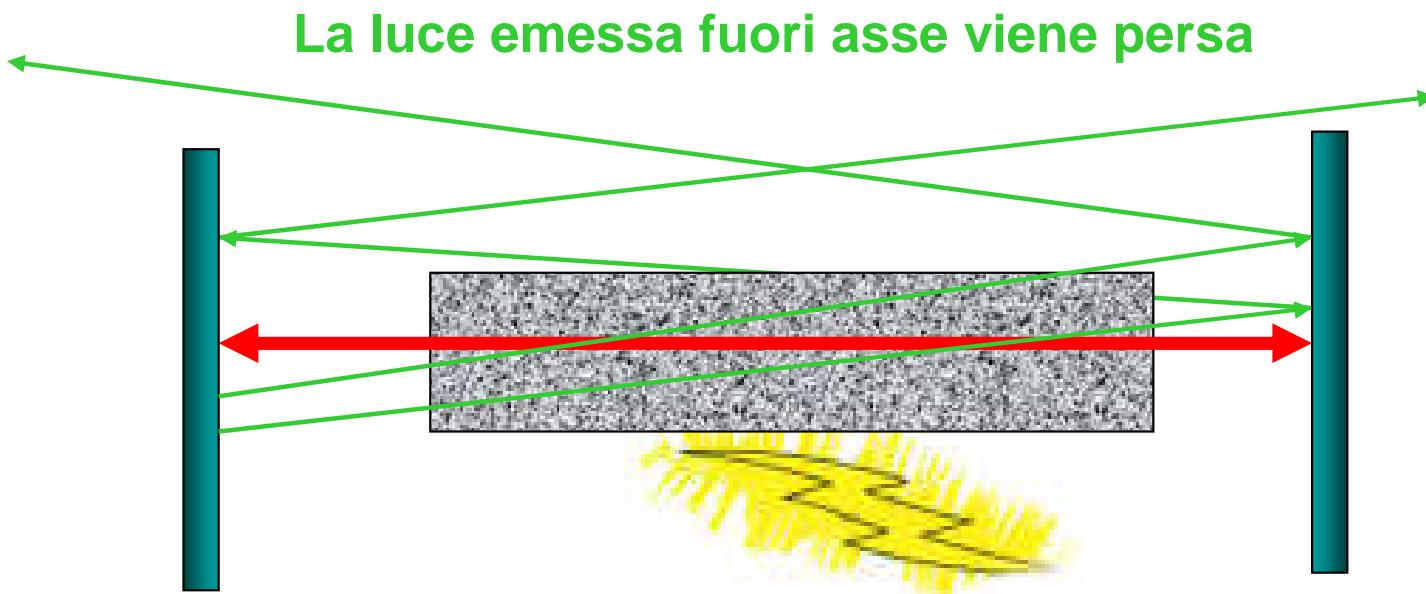
MEZZO  
ASSORBENTE



# Realizzazione di un laser

Per realizzare un laser è sufficiente quindi avere alcuni elementi:

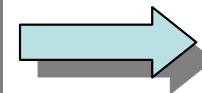
- Un **MEZZO LASER ATTIVO**, cioè un materiale ove avviene la moltiplicazione dei fotoni
- Un sistema di **POMPAGGIO** che fornisce **energia** per portare gli atomi del mezzo attivo nello **stato eccitato**
- Una **CAVITA' RISONANTE**, composta da specchi che trattengono la luce al suo interno e la fanno passare molte volte nel mezzo



# Caratteristiche del LASER

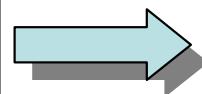
Possiamo quindi ora riepilogare le caratteristiche del laser legate alla fisica dell'interazione tra luce e materia.

- I fotoni emessi per emissione stimolata sono **identici** a quelli che hanno causato l'emissione stessa

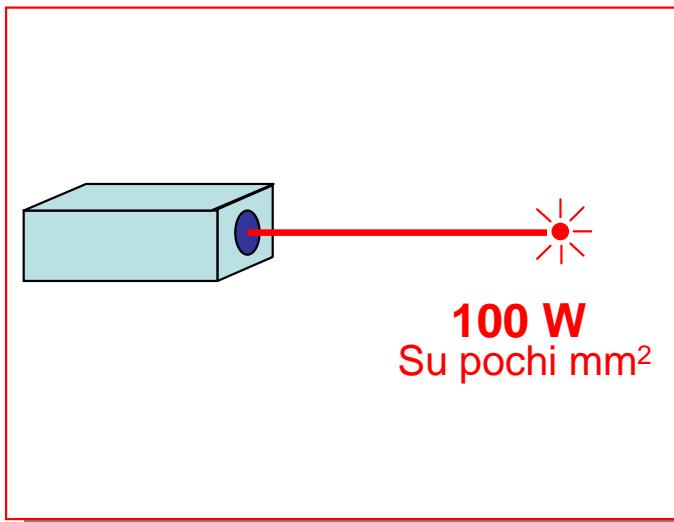


- Stesso colore (**monocromaticità**)
- Stessa fase (**coerenza**)

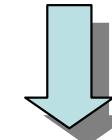
- I fotoni si accumulano nella cavità ottica



- Selezione della direzione di emissione (**direzionalità**)



- Elevata potenza per unità di superficie



# Applicazioni del LASER

In questa tabella sono indicate le principali applicazioni dei laser e le caratteristiche che li rendono utili in ognuna delle applicazioni

	Monocromaticità	Direzionalità	Potenza	Coerenza	Impulsi ultracorti
Ricerca scientifica	✓	✓	✓	✓	✓
Medicina	✓	✓	✓		
Telecomunicazioni	✓	✓	✓	✓	
Metrologia	✓	✓		✓	
Telerilevamento	✓	✓	✓	✓	✓
Olografia	✓	✓		✓	
Applicazioni industriali	✓	✓	✓		
Applicazioni belliche	✓	✓	✓		
Interferometria	✓	✓		✓	

- Laser a stato solido
- Microdispositivi optoelettronici
- Laser ad Elettroni Liberi
- Laser ad Eccimeri
- Microscopia a raggi X
- Acceleratori di particelle per usi industriali e medicali

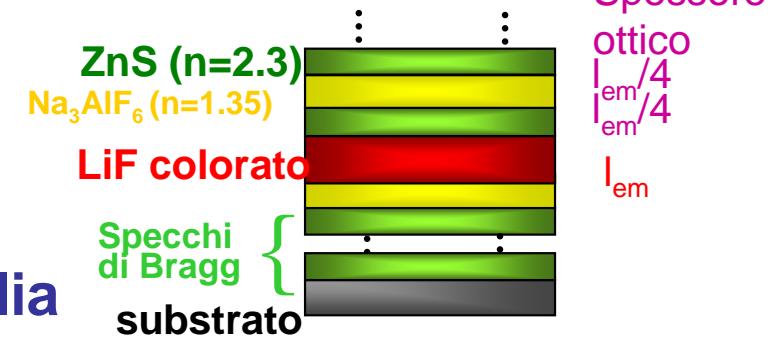
- Sistemi per Metrologia Laser
- Sistemi per Diagnostiche Laser
- Sistemi per Fotochimica Laser

# LASER A STATO SOLIDO E MICRODISPOSITIVI OPTOELETTRONICI

## • Sviluppo di microcavità

### Applicazioni:

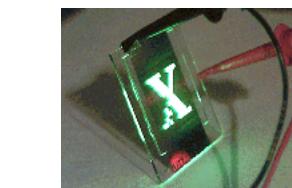
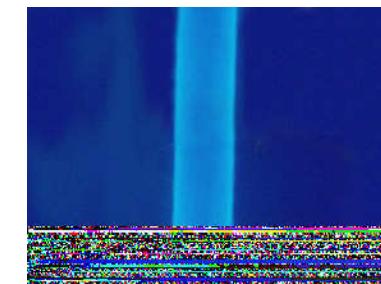
Microdispositivi laser, optoelettronica integrata, LED direzionali, laser a bassa soglia



## • Guide d'onda otticamente attive

### Applicazioni:

Telecomunicazioni e fibre ottiche, amplificatori distribuiti, ottica integrata



## • LED organici

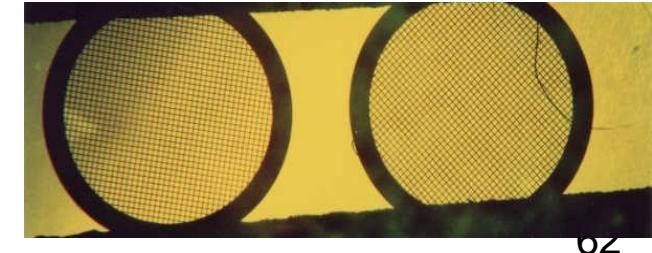
### Applicazioni:

• Display LCD organici

## • Tecniche di microscopia a raggi X su LiF

### Applicazioni:

Nuove tecnologie radiografiche, microlitografia



# ESEMPIO: MICROSCOPIA A RAGGI X SU LiF

Immagini di micro-radiografie ottenute con i raggi-X molli su "lastre" di LiF o di plastica fotosensibile (PMMA).

a):  $\mu$ -radiografia di ala di zanzara ottenuta su LiF

b,c): ingrandimenti di a)

d) ala vista direttamente al microscopio ottico

I raggi X sono generati tramite il plasma prodotto facendo incidere il fascio di un laser ad eccimeri su un opportuno bersaglio

