

OTTICA

Ottica geometrica

Ignora il carattere ondulatorio della luce e parla di raggi luminosi che si propagano in linea retta.

Fenomeni descritti dall'ottica geometrica:
riflessione e rifrazione

Ottica fisica

Si occupa della natura ondulatoria della luce.

Fenomeni interpretabili solo in termini di ottica ondulatoria:

interferenza, diffrazione e polarizzazione

Esperienza n.1

- Determinazione dell'indice di rifrazione di solidi trasparenti mediante la misura dell'angolo limite

Esperienza n.2

- Verifica della legge dei punti coniugati e determinazione della lunghezza focale di una lente

Esperienza n.3

- Determinazione dell'angolo di accettazione e dell'apertura numerica di una fibra ottica

Esperienza n.4

- Dimostrazione di alcuni fenomeni ondulatori mediante onde generate in acqua

Esperienza n.5

- Analisi della figura di diffrazione della radiazione luminosa prodotta da una fenditura

Esperienza n.6

- Studio della polarizzazione mediante la verifica della legge di Malus

Misura di grandezze fisiche

Si definisce **grandezza fisica** di un sistema fisico una sua caratteristica (ad esempio lunghezza, massa, velocità ...) sulla quale possa essere eseguita un'**operazione di misura** mediante una **ben definita procedura sperimentale**

La **misura** è l'operazione che assegna in modo **oggettivo e riproducibile** un certo valore alla grandezza, mediante l'uso di strumenti e metodi pratici ed analitici.

Uno strumento di misura è un dispositivo mediante il quale si stabilisce una **corrispondenza tra una grandezza e la sua misura**.

Stima delle incertezze nelle misure fisiche

La parola "errore" non significa equivoco o sbaglio

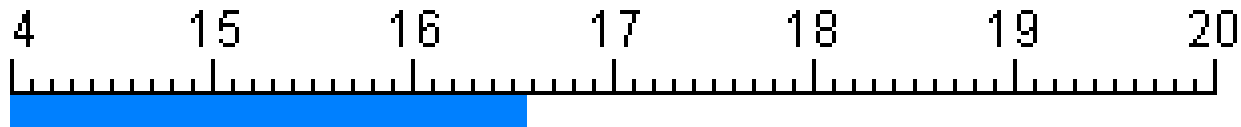
Essa assume il significato di **incertezza** da associare alla misura

**Nessuna quantità fisica può essere
misurata con completa certezza**

Il **valore vero** sarebbe il risultato di un'operazione di misura ideale, priva di errore: tale misura nella realtà è irrealizzabile

Nessuna grandezza fisica può essere determinata con precisione assoluta ma è sempre affetta da una incertezza

La bontà della misura dipende dal modo in cui la grandezza è misurata (*tipo di strumento, procedura,...*)



$$16.5 \text{ cm} < x < 16.6 \text{ cm}$$

$$x = (16.55 \pm 0.05) \text{ cm}$$

Incertezza assoluta e relativa



$$x = (16.55 \pm 0.05) \text{ cm}$$

L'incertezza assoluta della misura e' 0.05 cm (ovvero 0.5 mm)

A parità di incertezza assoluta una misura puo' essere piu' o meno precisa a seconda del valore della grandezza misurata.

L'incertezza relativa della misura e' data da $\frac{\Delta x}{x}$

$$x_1 = (4.55 \pm 0.05) \text{ cm}$$

$$x_2 = (53.20 \pm 0.05) \text{ cm}$$

$$\frac{\Delta x_1}{x_1} = \frac{0.05}{4.55} \approx 0.01 (1\%)$$

$$\frac{\Delta x_2}{x_2} = \frac{0.05}{53.20} \approx 0.001 (0.1\%)$$

Se ripetiamo la misura con la stessa riga millimetrata, otteniamo sempre lo stesso risultato



$$16.5 \text{ cm} < x < 16.6 \text{ cm}$$

$$x = (16.55 \pm 0.05) \text{ cm}$$



Le misure sono **ripetibili**

&

La precisione della misura e' data dall'**errore di sensibilita'** dello strumento (0.05 cm)

Tuttavia spesso si utilizza come incertezza la divisione più piccola della scala dello strumento

$$x = (16.5 \pm 0.1) \text{ cm}$$

Cifre significative

Ogni numero e' espresso con un determinato numero di cifre

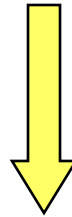
Per numero di **cifre significative** si intende il numero di tutte le cifre scritte, compreso lo 0, a partire da destra fino all'ultima $\neq 0$ a sinistra

Numero	cifre significative
123,4	4
123,42	5
123,420	6
0,04	1
0,042	2
0,0420	3

Il numero di cifre significative del risultato di una misura e' correlato alla bontà della misura e non può essere scelto arbitrariamente

Cifre significative per esprimere l'incertezza

Incertezza massima



1 cifra significativa

Valutato l'errore resta stabilito il numero di cifre significative per esprimere il valore di una misura

Cifre significative per esprimere la misura

Per esprimere una misura si riportano tante cifre in modo che l'ultima corrisponda alla cifra significativa dell'incertezza

ESEMPI

$$x = 26.7842s \quad \Delta x = 0.3472s \quad \Delta x = 0.3s \quad x = (26.8 \pm 0.3)s$$

$$x = 123.8432\text{m/s} \quad \Delta x = 0.0475\text{m/s} \quad \Delta x = 0.05\text{m/s} \quad x = (123.84 \pm 0.05)\text{m/s}$$

$$x = 233.72\text{cm} \quad \Delta x = 1.452\text{cm} \quad \Delta x = 1\text{cm} \quad x = (234 \pm 1)\text{cm}$$

La propagazione degli errori

La maggior parte delle grandezze fisiche non può essere misurata attraverso una singola misura diretta, ma occorre determinarla attraverso due passi distinti: la misura diretta delle singole grandezze e, attraverso queste, il calcolo della quantità cercata.

Per esempio, per misurare l'area della superficie di un tavolo rettangolare, occorre prima effettuare direttamente le misure dei due lati valutando le relative incertezze, poi si passa a calcolare la superficie attraverso il prodotto dei due lati.

Anche la determinazione dell'errore necessita di due fasi:

- valutare le incertezze delle grandezze misurate direttamente
- trovare come tali incertezze si propagano attraverso i calcoli

La propagazione delle incertezze nelle somme e differenze

$$Z_m = x_m + y_m$$

$$\Delta z = \Delta x + \Delta y$$

$$Z_m = x_m - y_m$$

Se diverse grandezze $x, y, \dots, w$ sono misurate con incertezze $\Delta x, \Delta y, \dots, \Delta w$ e tali valori vengono utilizzati per calcolare quantità del tipo

$$z = x + \dots + y - (u + \dots + w)$$

allora l'errore nel valore calcolato di z è pari alla somma di tutti gli errori assoluti originali

$$\Delta z = \Delta x + \Delta y + \dots + \Delta u + \Delta w$$

Incertezze nei prodotti e nei quozienti

$$Z_m = x_m \cdot y_m$$

$$Z_m = \frac{x_m}{y_m}$$

$$\frac{\Delta z}{|z_m|} \approx \frac{\Delta x}{|x_m|} + \frac{\Delta y}{|y_m|}$$

$$z = z_m \left(1 \pm \frac{\Delta z}{|z_m|} \right)$$

Se diverse grandezze $x, y, \dots, w$ sono misurate con incertezze $\Delta x, \Delta y, \dots, \Delta w$ e tali valori vengono utilizzati per calcolare quantità del tipo

$$z = \frac{x \dots y}{u \dots w}$$

allora l'errore relativo nel valore calcolato di z è pari alla somma di tutti gli **errori relativi originali**

$$\frac{\Delta z}{|z|} \approx \frac{\Delta x}{|x|} + \frac{\Delta y}{|y|} + \dots + \frac{\Delta u}{|u|} + \frac{\Delta w}{|w|}$$

	Relazione tra z e (x,y)	Relazione tra Δz e $(\Delta x, \Delta y)$
1	$z = x + y$	$\Delta z = \Delta x + \Delta y$
2	$z = x - y$	$\Delta z = \Delta x - \Delta y$
3	$z = x \cdot y$	$\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$
4	$z = x/y$	$\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta x}{x} - \frac{\Delta y}{y}$
5	$z = x^n$	$\frac{\Delta z}{z} = n \frac{\Delta x}{x}$
6	$z = \ln x$	$\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta x}{x}$
7	$z = e^x$	$\frac{\Delta z}{z} = \Delta x$

Confronto di due misure e discrepanza

In molte esperienze si determinano due risultati che dovrebbero essere compatibili.

Se due misure sono in disaccordo si dice che tra loro vi è una **discrepanza**.

Numericamente si definisce **discrepanza** la differenza tra due valori misurati della stessa grandezza.

NOTA: una discrepanza **può essere o non essere** significativa.

Esempio

Due studenti misurano la capacità di un condensatore e ottengono i risultati

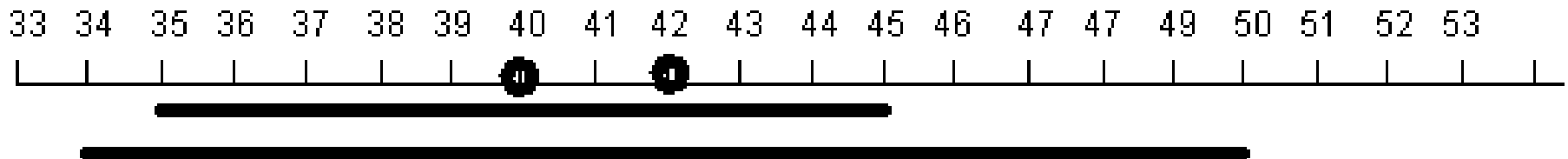
$$C_1 = (40 \pm 5) \text{ nF}$$

e

$$C_2 = (42 \pm 8) \text{ nF}$$

la discrepanza $(42 - 40)$ di 2 nF è minore dei loro errori:

le due misure sono consistenti



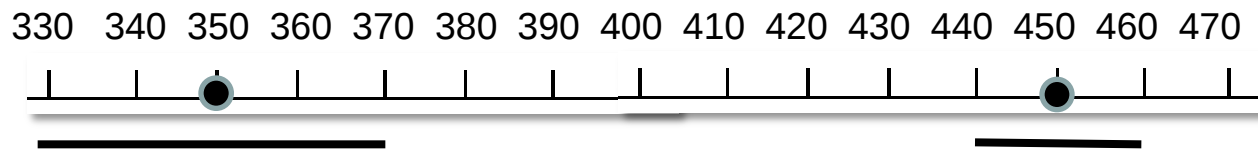
D'altra parte se i risultati fossero stati:

$$C_1 = (350 \pm 20) \text{ nF}$$

e

$$C_1 = (450 \pm 10) \text{ nF}$$

due misure sarebbero state chiaramente inconsistenti e la discrepanza di 100 nF sarebbe significativa.



Ovvero, in generale, se i due intervalli probabili non sono così vicini da sovrapporsi, le misure non sono consistenti.

Occorre verificare l'esistenza di errori, nelle misure o nei calcoli, che abbiano dato luogo a tale discrepanza.

ONDE E CORPUSCOLI

Che cos'è la luce? A partire dal 1600 sono state date due risposte diverse a questa domanda, da cui si sono sviluppati due modelli rivali: il **modello corpuscolare**, proposto da Isaac Newton, e il **modello ondulatorio**, sostenuto da Christiaan Huygens.

Secondo il **modello corpuscolare**, la luce è un flusso di particelle microscopiche (**corpuscoli**) emesse dalle sorgenti luminose.



Secondo il **modello ondulatorio**, la luce è un'onda, simile alle onde che si propagano nell'acqua e alle onde sonore.



Fino all'inizio del 1800 la comunità degli scienziati riteneva valido il modello corpuscolare, perché descriveva in modo efficace la formazione delle ombre nette (dove arrivano i corpuscoli c'è luce, dove non arrivano c'è ombra) e la riflessione della luce (i corpuscoli rimbalzano come palline sulle superfici riflettenti).

Invece, il modello ondulatorio era giudicato poco convincente, perché non era chiaro che tipo di perturbazione fosse la luce né in quale mezzo si propagasse.

Molti fenomeni luminosi possono essere interpretati mediante i semplici modelli dell'ottica geometrica, secondo la quale la luce è formata da raggi che si propagano in linea retta nei materiali omogenei.

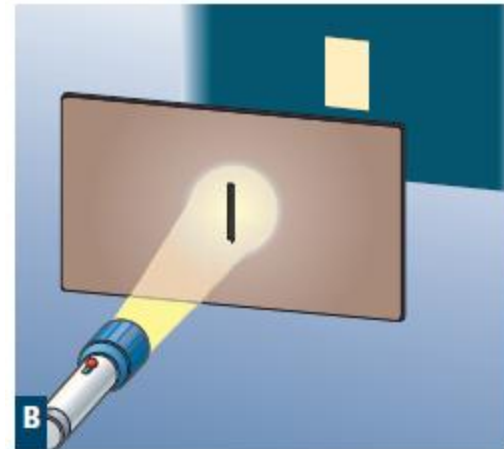
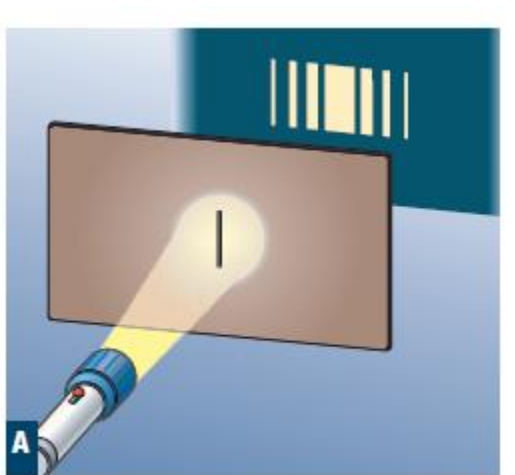
Esistono però fenomeni che non possono essere spiegati nell'ambito dell'ottica geometrica.

L'affermazione del modello ondulatorio

Nei primi decenni del 1800 alcuni esperimenti misero in evidenza che la luce non sempre disegna ombre nette. Questo modificò l'opinione di diversi scienziati a favore del modello ondulatorio.

La luce che attraversa una fenditura molto sottile crea su uno schermo una serie di frange luminose alternate a zone scure.

Il modello corpuscolare prevede invece che si formi una sola striscia di luce, circondata da due zone d'ombra.

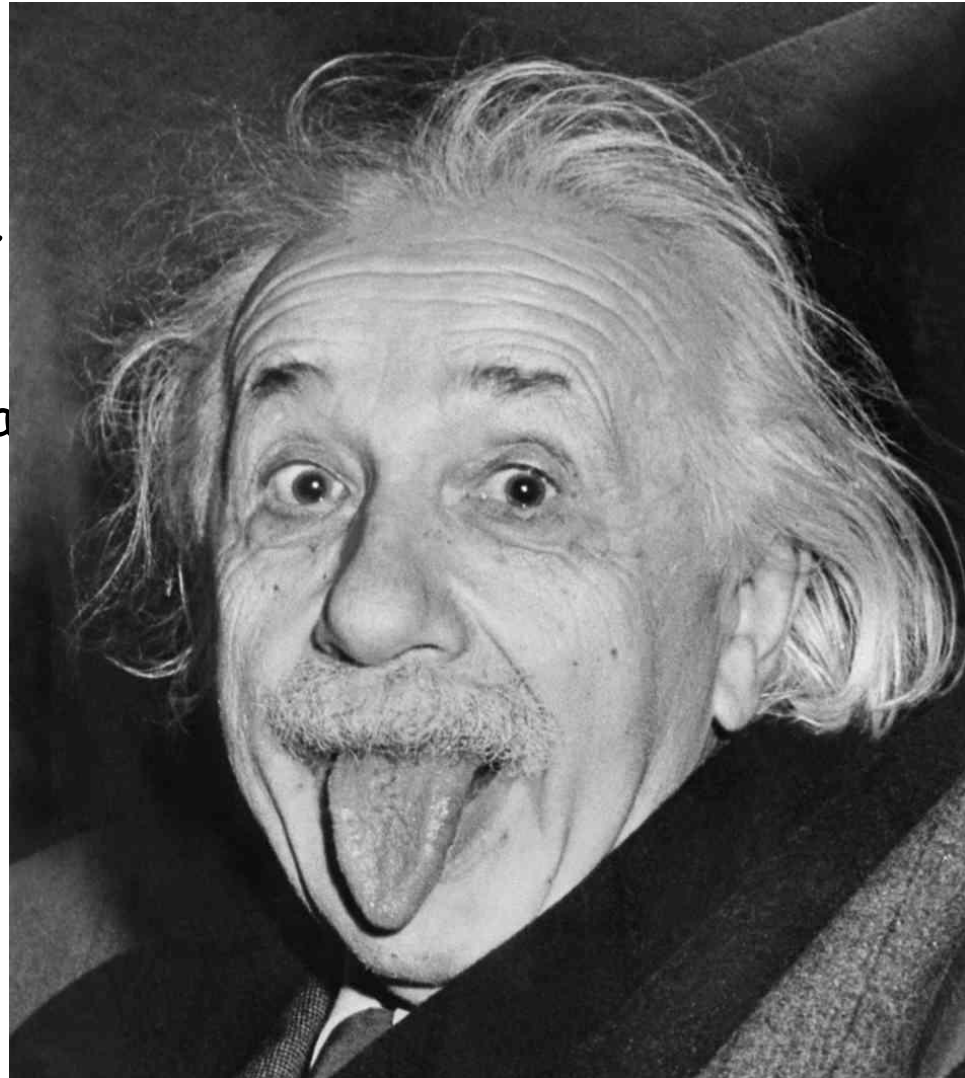


La luce è sia onda sia corpuscolo

La disputa sembrava finita con la vittoria del modello ondulatorio, quando nel 1905 il quadro si complicò di nuovo. Albert Einstein scoprì che la luce, quando incide su un metallo e provoca l'emissione di elettroni (*effetto fotoelettrico*), si comporta come se fosse costituita da una pioggia di particelle, i *fotoni*.

Oggi si ritiene che i modelli siano tutti e due validi, nel senso che descrivono caratteristiche diverse della luce.

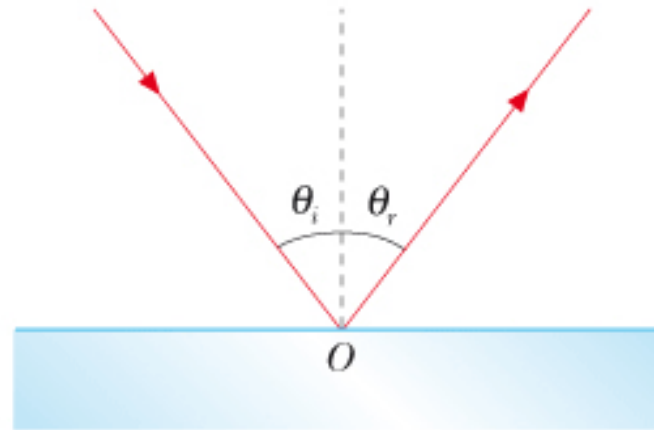
In certe situazioni la luce si comporta come un'onda, in altre come un corpuscolo.



La riflessione

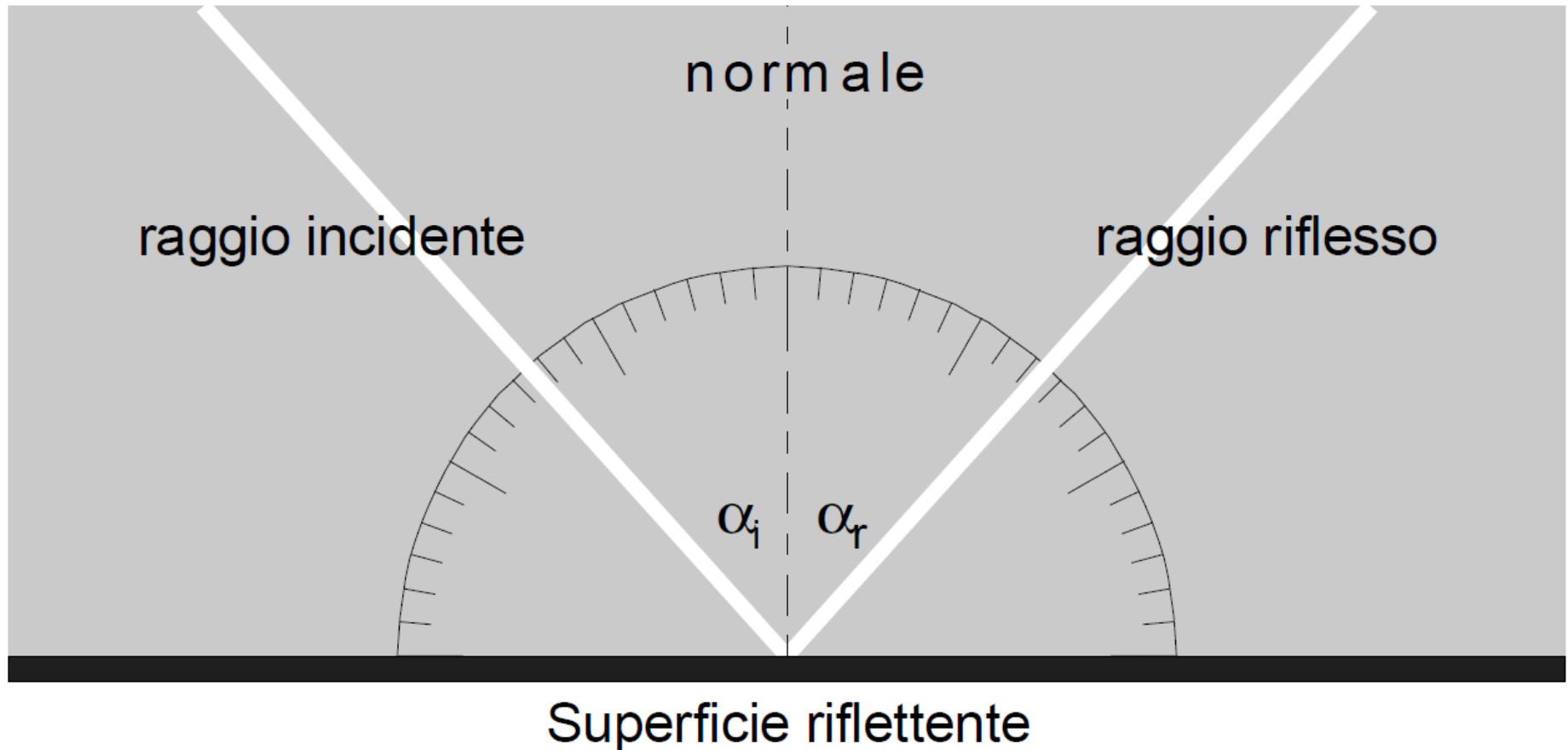
Si ha il fenomeno della riflessione ogni volta che un fascio di luce, dopo aver colpito un corpo non trasparente lucido e levigato, rimbalza sulla sua superficie e viene deviato in un'altra direzione.

Il raggio di luce che arriva sulla superficie lucida e levigata (raggio incidente) viene "rimandato indietro" (raggio riflesso) in una direzione diversa, secondo regole ben precise.



Leggi della riflessione

- Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale allo specchio giacciono sullo stesso piano
- L'angolo formato dal raggio incidente e dalla normale è uguale a quello formato dal raggio riflesso e dalla normale



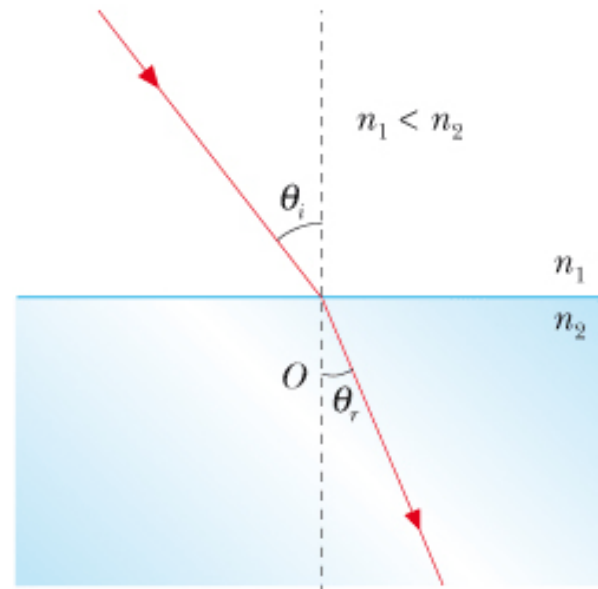
La rifrazione

Sappiamo che i raggi luminosi nell'aria si propagano in linea retta e che nell'acqua si propagano nello stesso modo.

Tuttavia la velocità della luce nei due mezzi trasparenti è diversa perché diversa è la loro densità.

I raggi luminosi, perciò, nel passaggio da un mezzo meno denso (l'aria) ad uno più denso (acqua) rallentano e vengono deviati: questo fenomeno è detto rifrazione della luce.

$$n = c/v$$

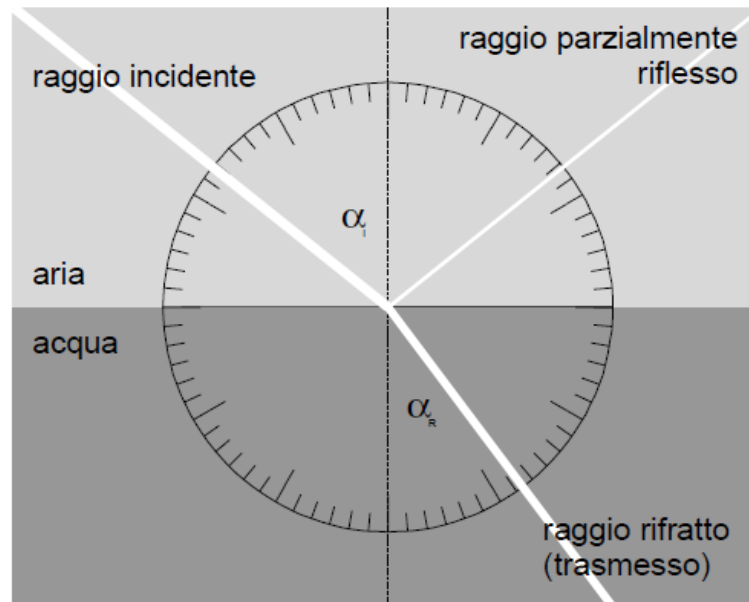


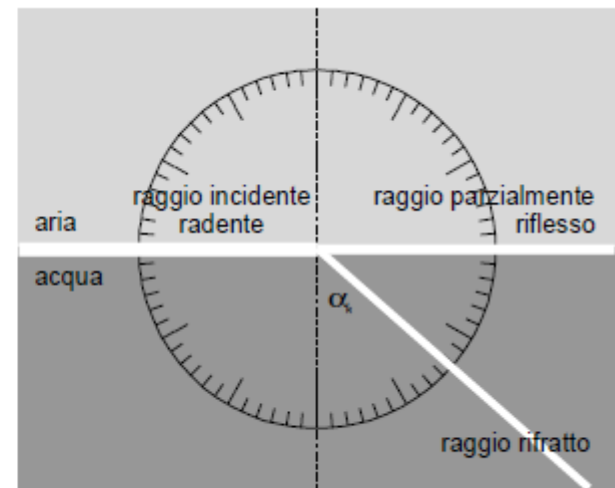
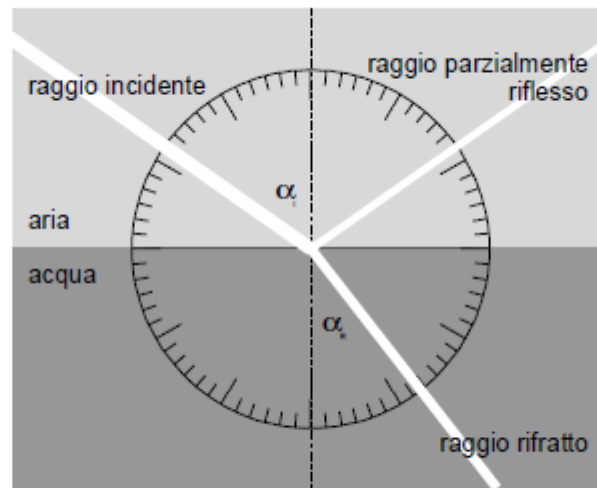
Leggi della rifrazione (Snell)

- Il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale allo specchio giacciono sullo stesso piano
- L'angolo formato dal raggio incidente e dalla normale (α_i) e quello formato dal raggio rifratto e dalla normale (α_r) sono legati dalla seguente relazione

$$n_1 \sin \alpha_i = n_2 \sin \alpha_r$$

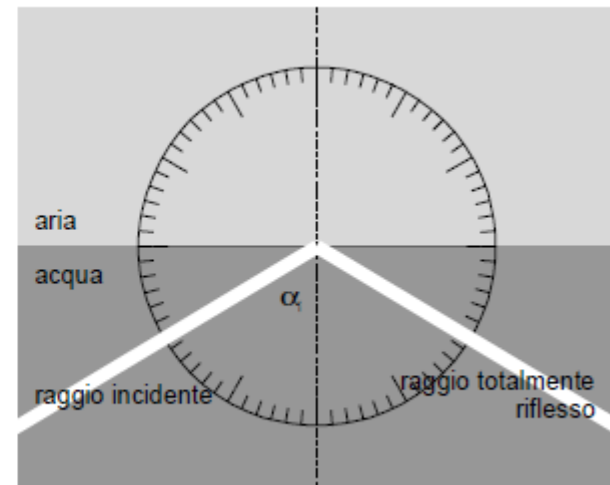
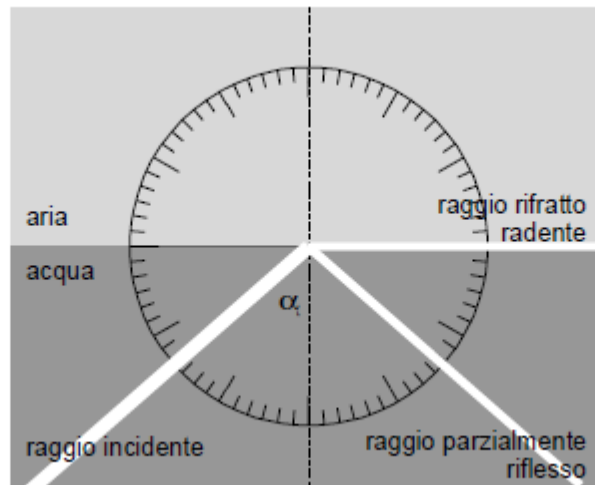
dove n_1 n_2 sono gli indici di rifrazione dei due mezzi
($n_{\text{aria}}=1$, $n_{\text{acqua}}=1.33$, $n_{\text{vetro}}=1.3-1.5$)





http://www.walter-fendt.de/ph14i/refraction_i.htm

Se la luce si propaga invece dall'acqua verso l'aria, ossia da un mezzo più denso a uno meno denso, l'angolo di rifrazione è maggiore dell'angolo di incidenza, per cui il raggio rifratto si allontana dalla perpendicolare alla superficie di separazione dei due mezzi trasparenti.



http://www.walter-fendt.de/ph14i/refraction_i.htm

Esperienza n.1

- Determinazione dell'indice di rifrazione di solidi trasparenti mediante la misura dell'angolo limite

Strumenti a disposizione:

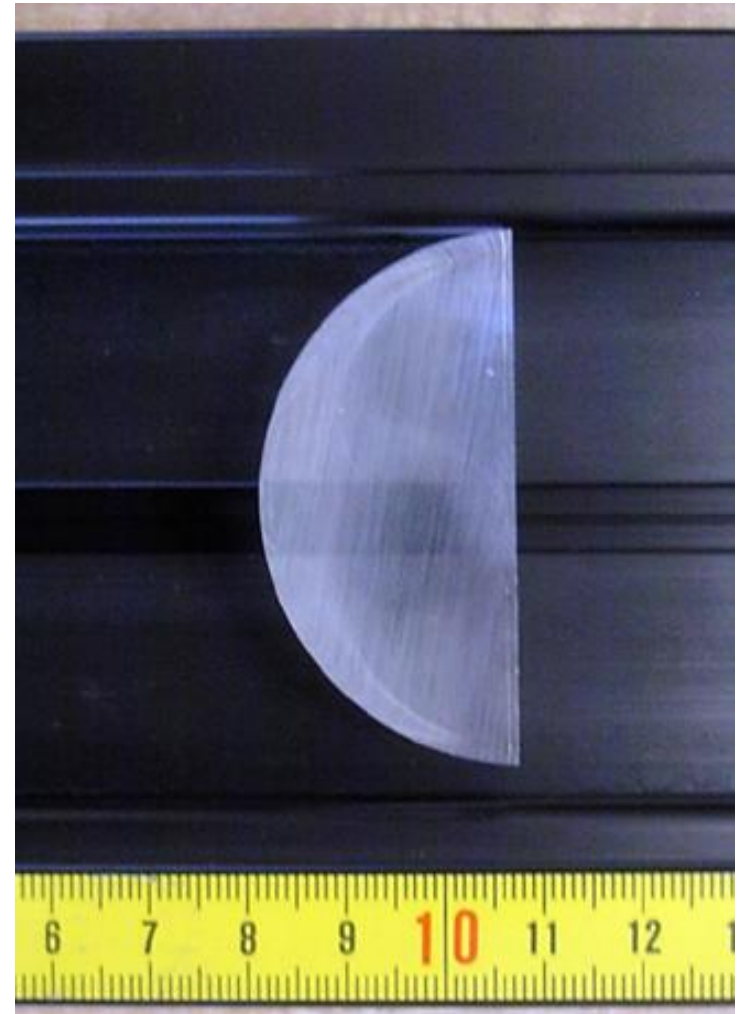
Banco ottico

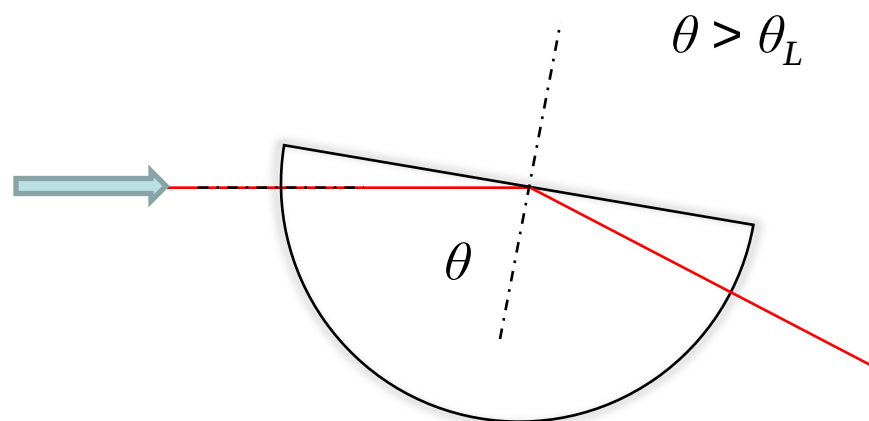
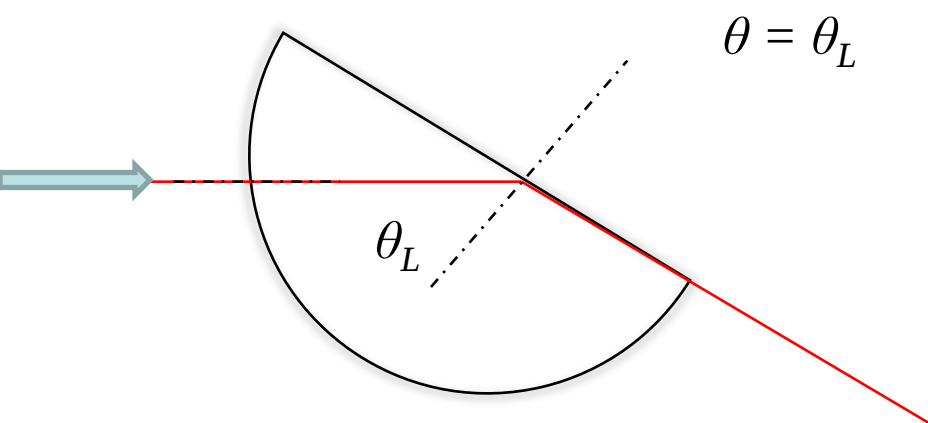
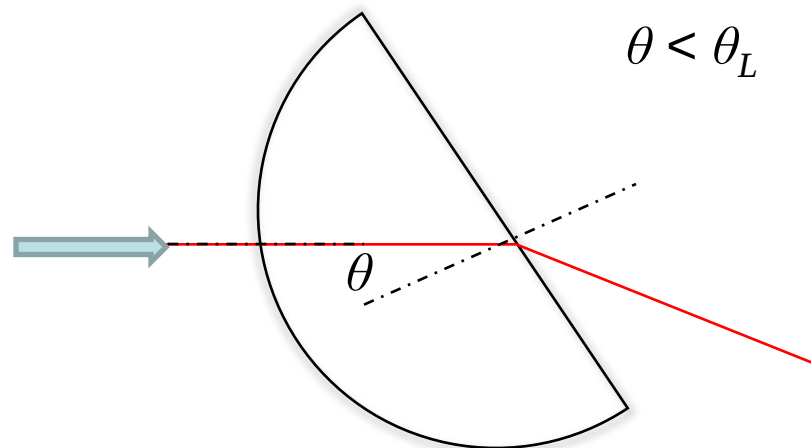
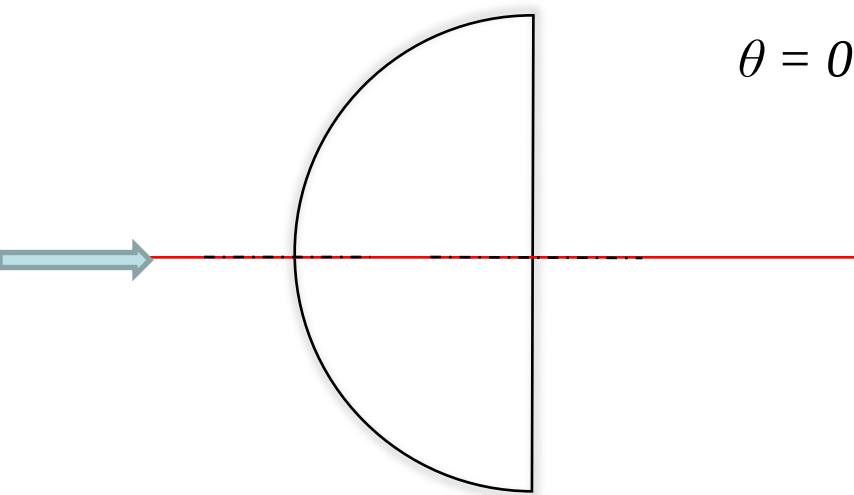
Diodo laser

Schermo

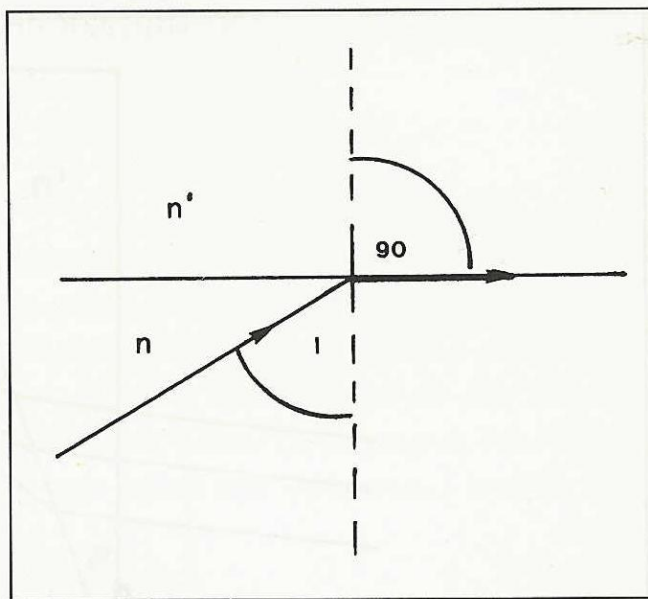
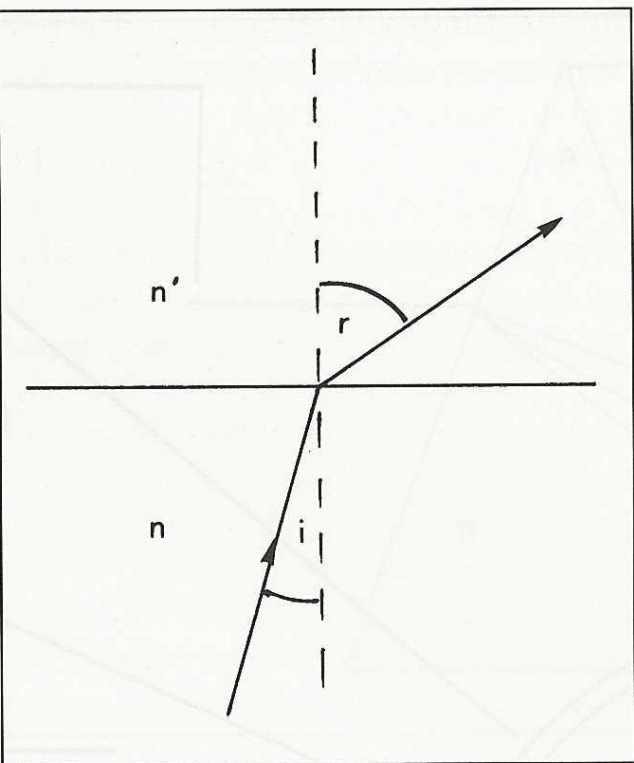
Goniometro con base

Semicilindro di materiale acrilico





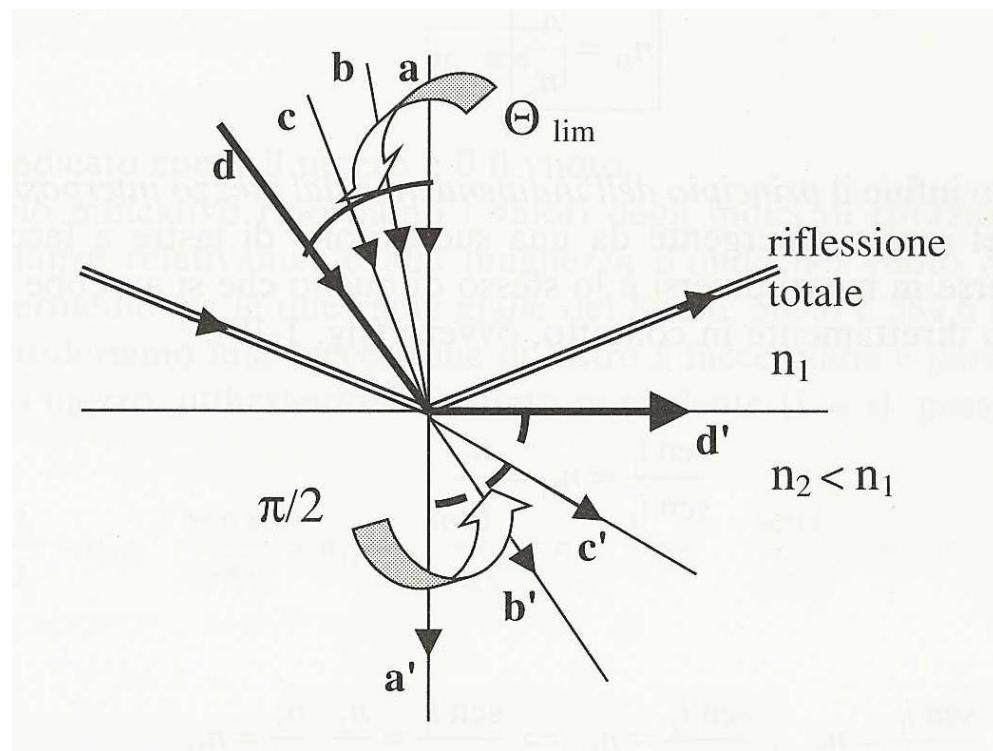
$$n = \frac{1}{\sin \theta_L}$$



$$\sin r = \frac{n}{n'} \sin i$$

$$\sin l = \frac{n'}{n} \sin 90^\circ = \frac{n'}{n}$$

$$(n' = 1) \rightarrow \sin l = \frac{1}{n}$$



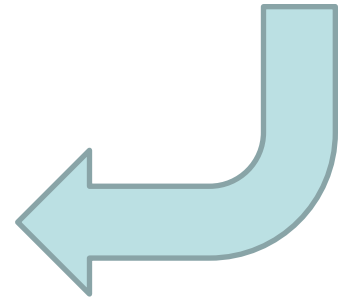
$$n = \frac{1}{\sin \theta_L}$$

... e Δn ?

$$\theta_{L_1} \leq \theta_L \leq \theta_{L_2} \Rightarrow \sin \theta_{L_1} \leq \sin \theta_L \leq \sin \theta_{L_2}$$

$$\frac{1}{\sin \theta_{L_2}} \leq \frac{1}{\sin \theta_L} \leq \frac{1}{\sin \theta_{L_1}} \Leftrightarrow \frac{1}{\sin \theta_{L_2}} \leq n \leq \frac{1}{\sin \theta_{L_1}}$$

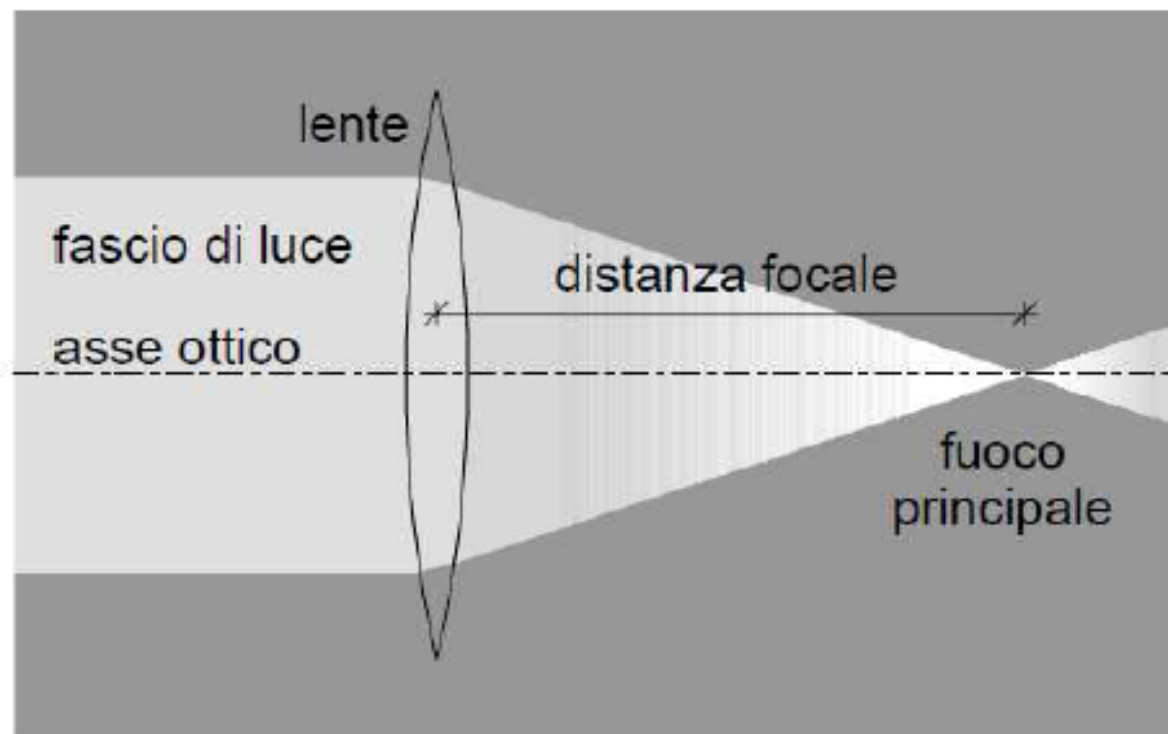
$$\Delta n = \frac{\frac{1}{\sin \theta_{L_1}} - \frac{1}{\sin \theta_{L_2}}}{2}$$



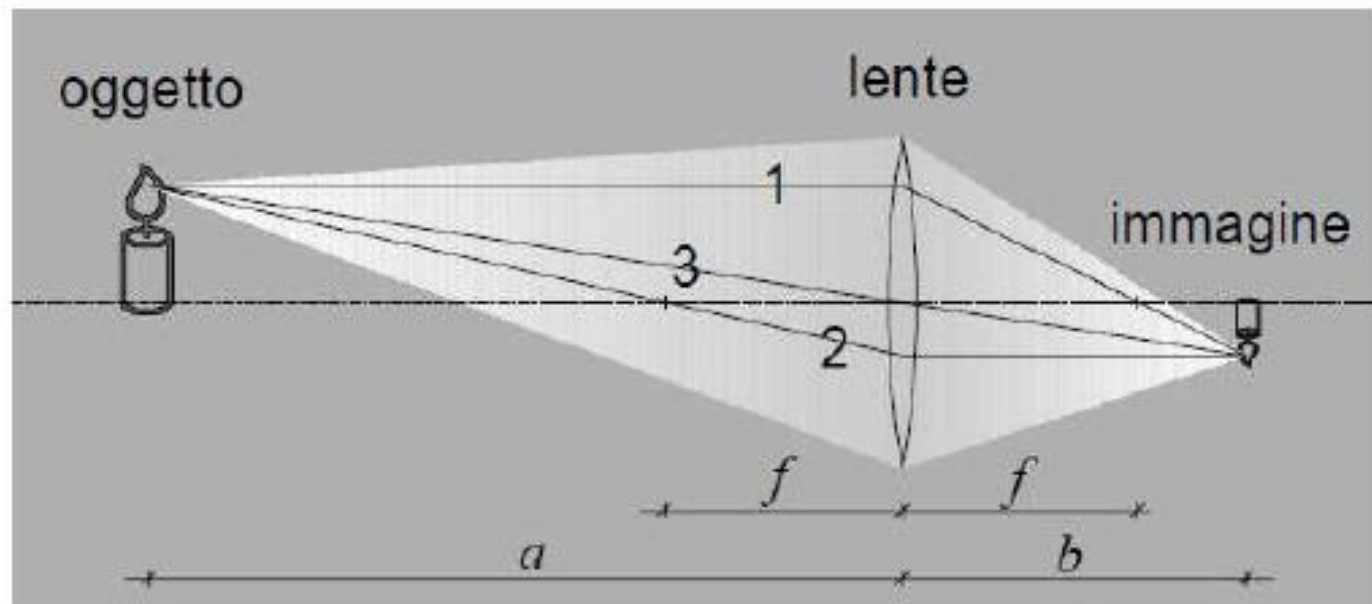
Le lenti

Se un fascio di luce incide su una **lente convergente** parallelamente all'asse ottico la luce convergerà in un punto chiamato **fuoco** della lente.

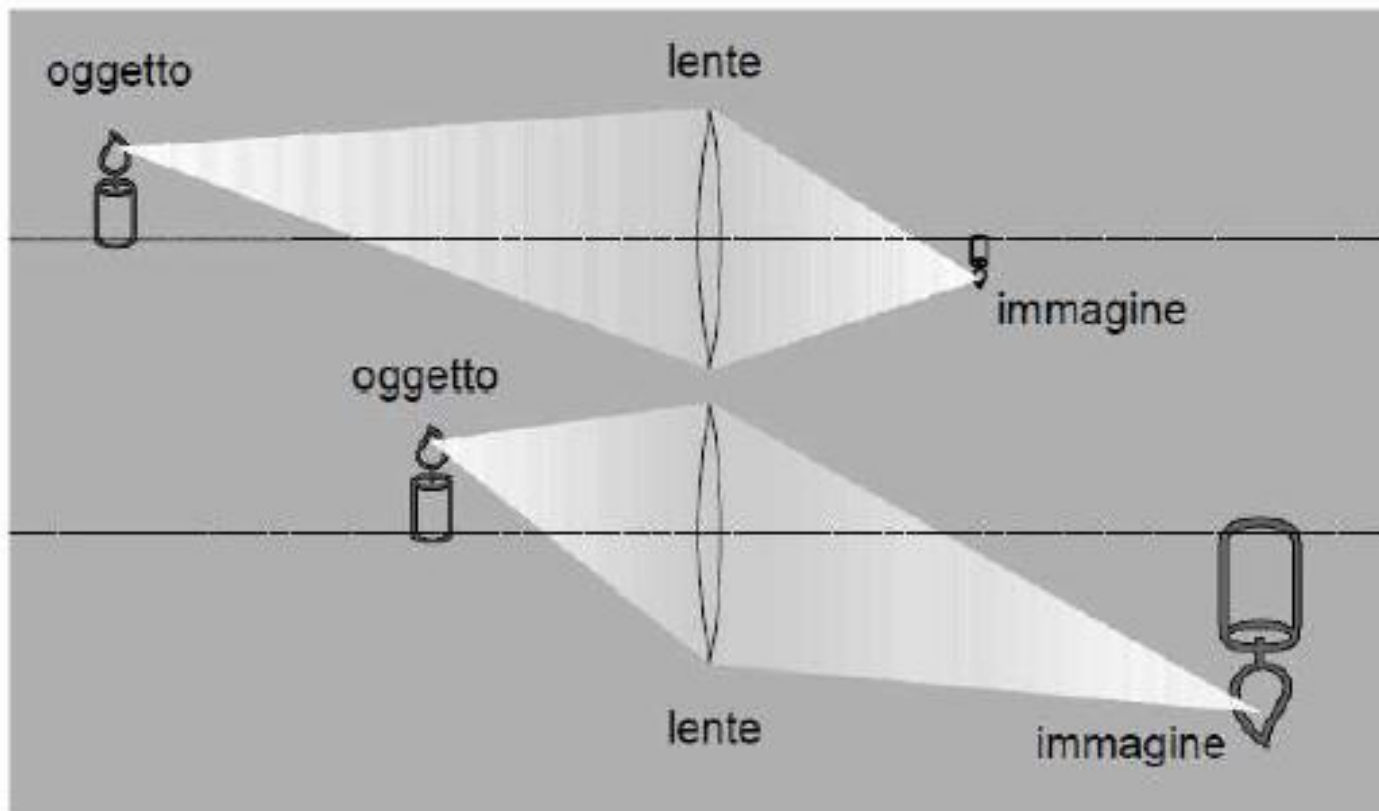
La distanza fra il fuoco e il centro della lente viene chiamata **distanza focale** ed è, assieme al diametro della lente, una delle caratteristiche principali della lente stessa.



L'immagine reale di una lente convergente

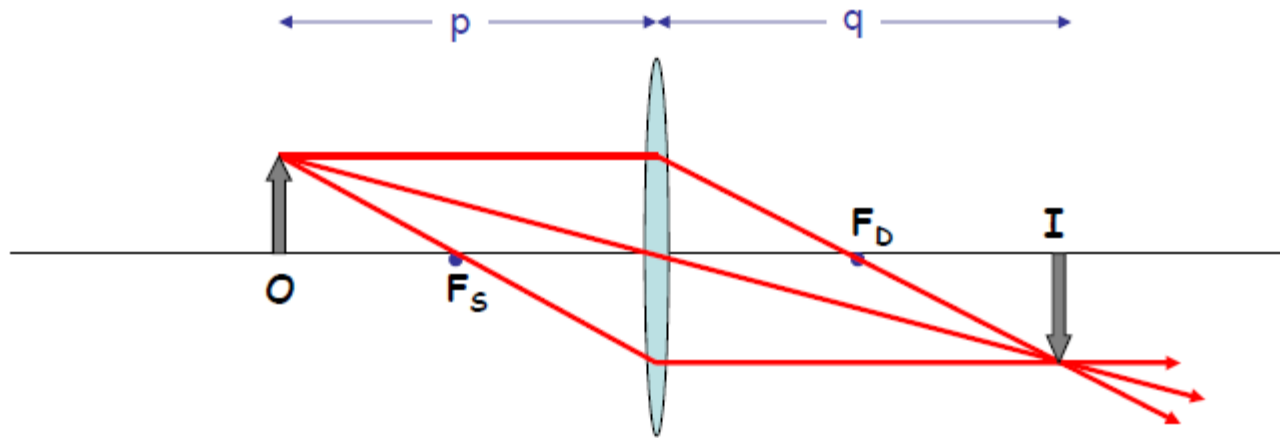


L'immagine reale di una lente convergente al variare della posizione dell'oggetto

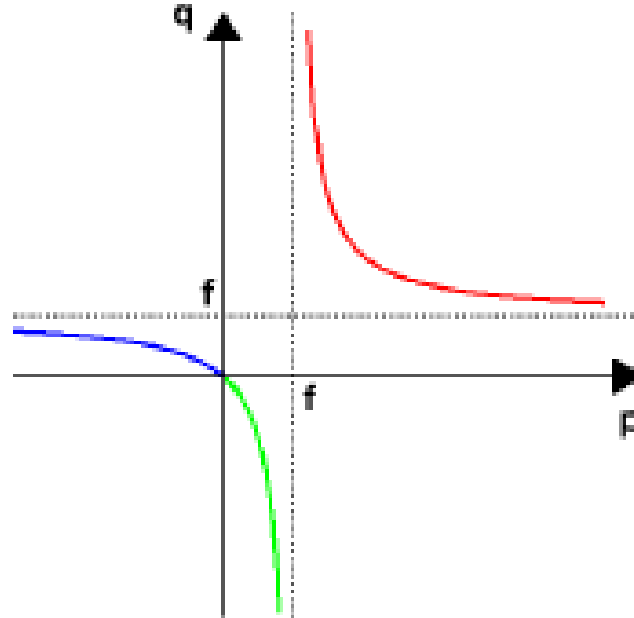


Legge dei punti coniugati

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



La legge dei punti coniugati corrisponde in un piano cartesiano (p,q) ad un'iperbole equilatera con asintoti orizzontale $q=f$ e verticale $p=f$.



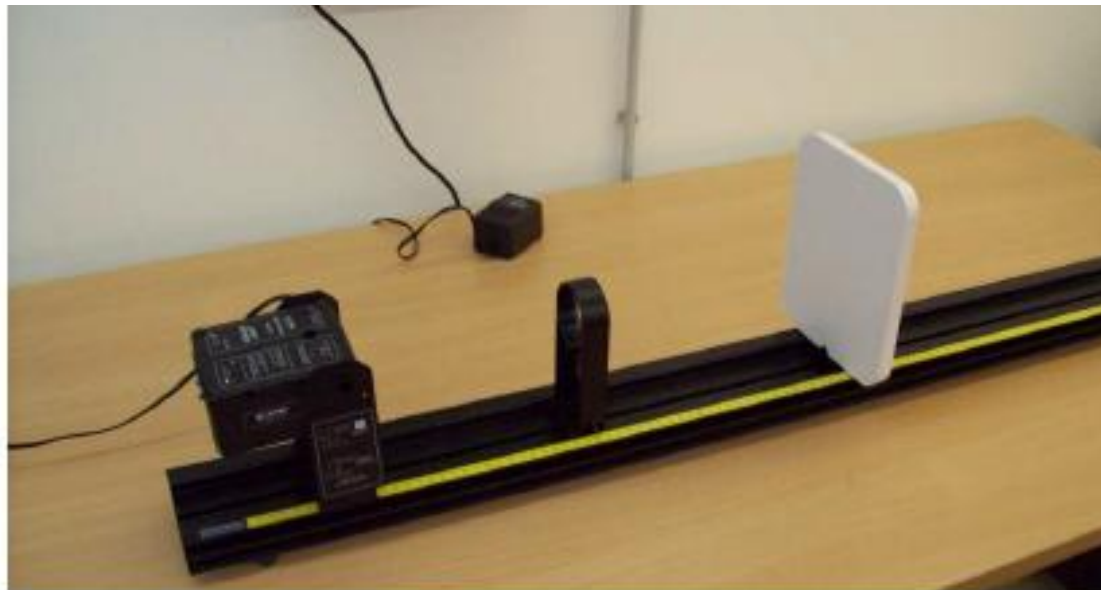
Il ramo rosso corrisponde a oggetti ed immagini reali, il ramo blu ad oggetto virtuale ed immagine reale, il ramo verde a oggetto reale e immagine virtuale.

Esperienza n.2

- Verifica della legge dei punti coniugati e determinazione della lunghezza focale di una lente

Strumentazione e materiale a disposizione

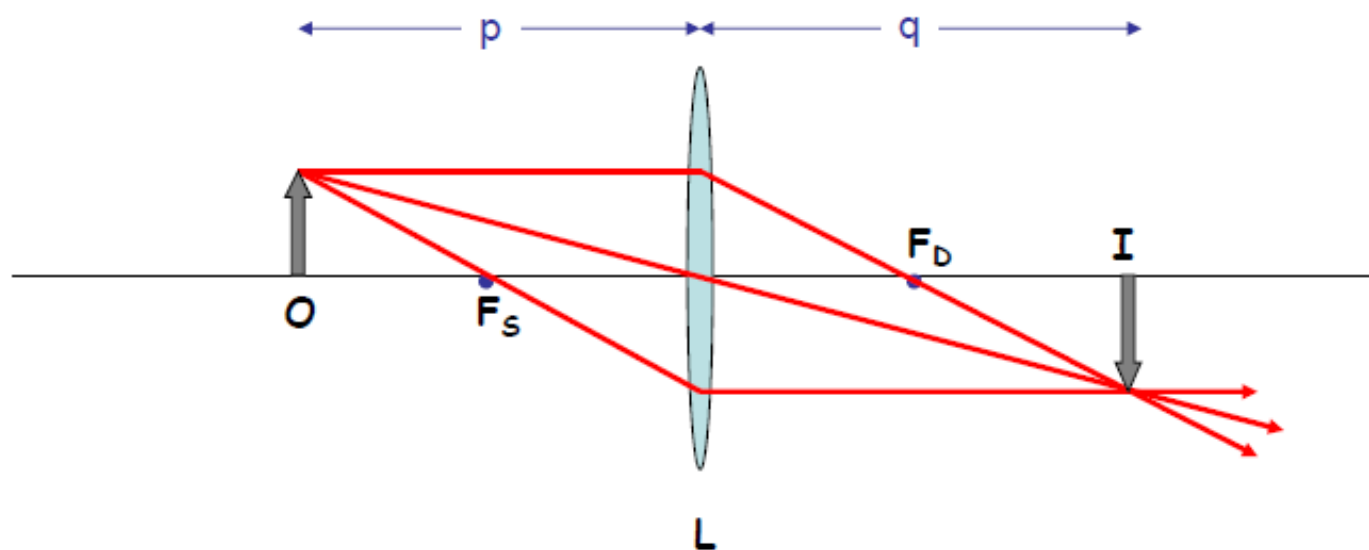
- Banco ottico munito di metro (sensibilità: 0.1 cm; portata: 110 cm)
- Lampada con mascherina sagomata come oggetto
- Lente sottile convergente con distanza focale incognita
- Schermo



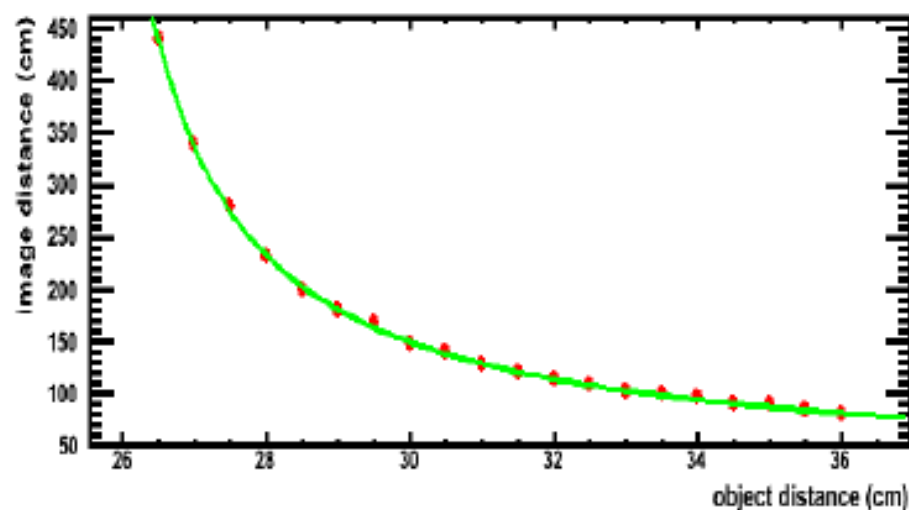
Procedura sperimentale

- 1) Posizionare l'oggetto illuminato
- 2) Posizionare la lente
- 3) Cercare la posizione dello schermo in cui l'immagine è ben a fuoco
- 4) Calcolare p come distanza OL
- 5) Calcolare q come distanza LI
- 6) Memorizzare i valori p, q con i rispettivi errori
- 7) Ripetere più volte, per diverse posizioni della lente

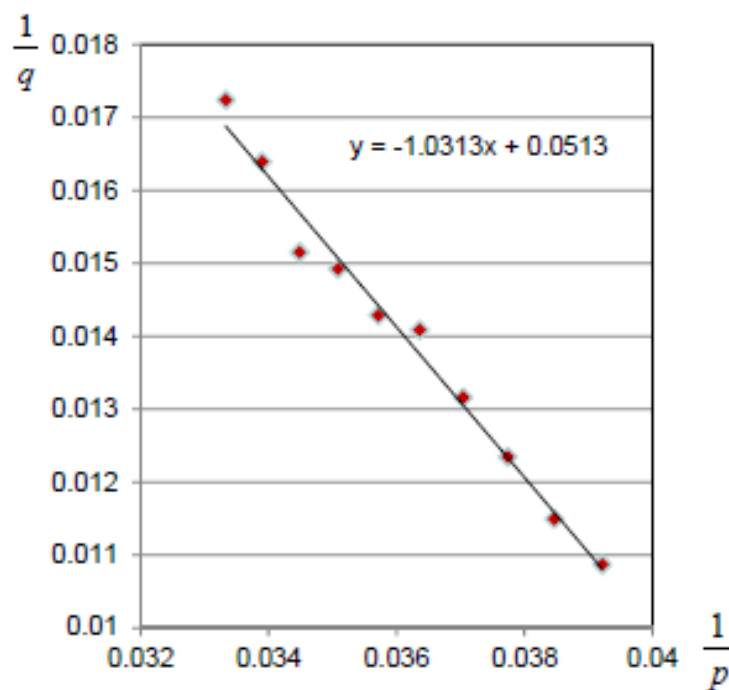
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$



- 1) Analizzare i dati, facendo un grafico dei valori p, q
- 2) Adattare i dati secondo la relazione dei punti coniugati

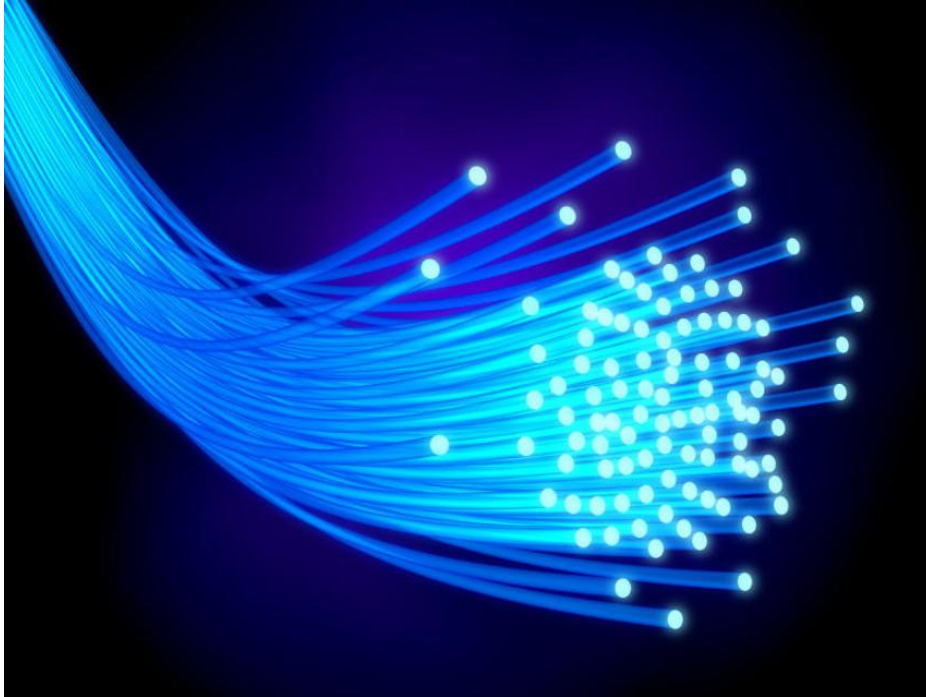


$$\frac{1}{q} = -\frac{1}{p} + \frac{1}{f}$$

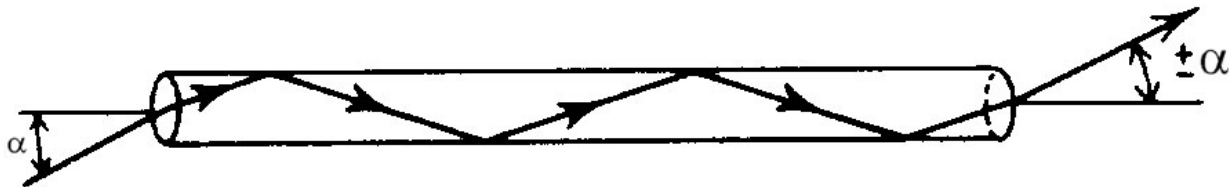


Fibre Ottiche

Le fibre ottiche sono utilizzate nei moderni sistemi di comunicazione



Sono sottili come capelli e sono costituite principalmente da vetro di silice, ma per alcuni impieghi vengono utilizzate anche le fibre plastiche (polistirene, nylon, PMMA,...)



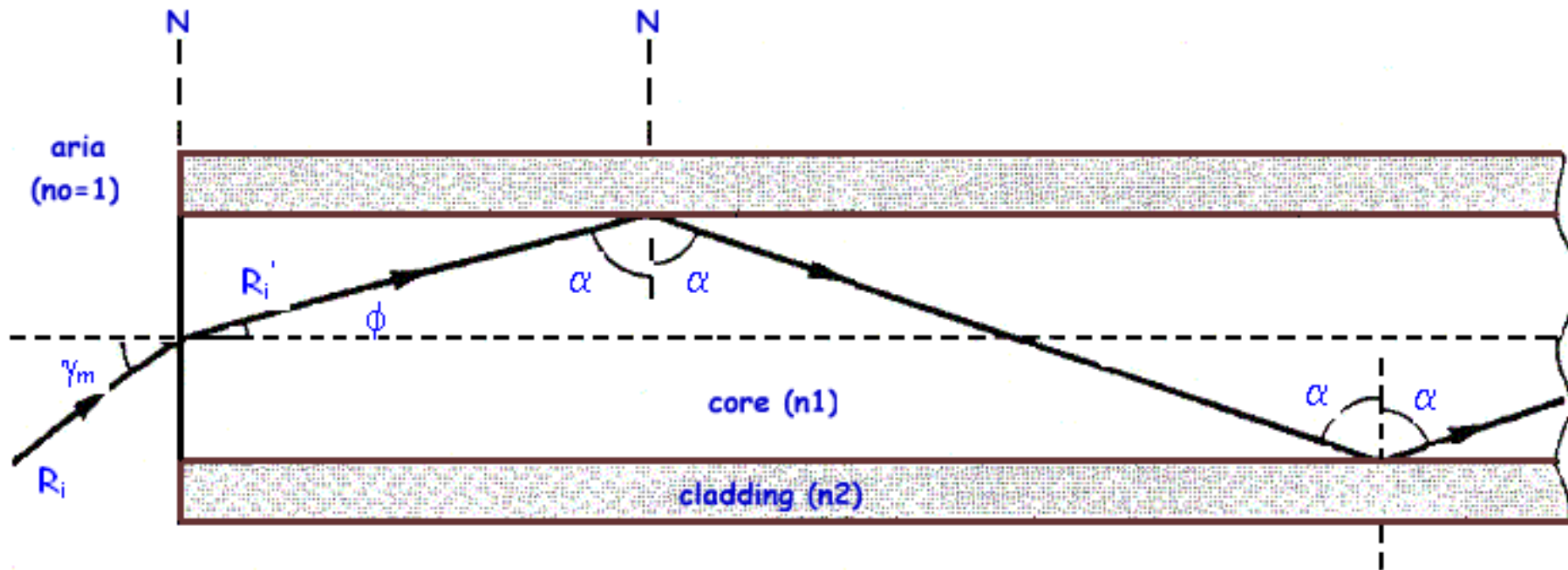
Applicazioni

Sono usate per il trasporto e/o amplificazione di radiazione in numerosi settori.

Alcuni esempi:

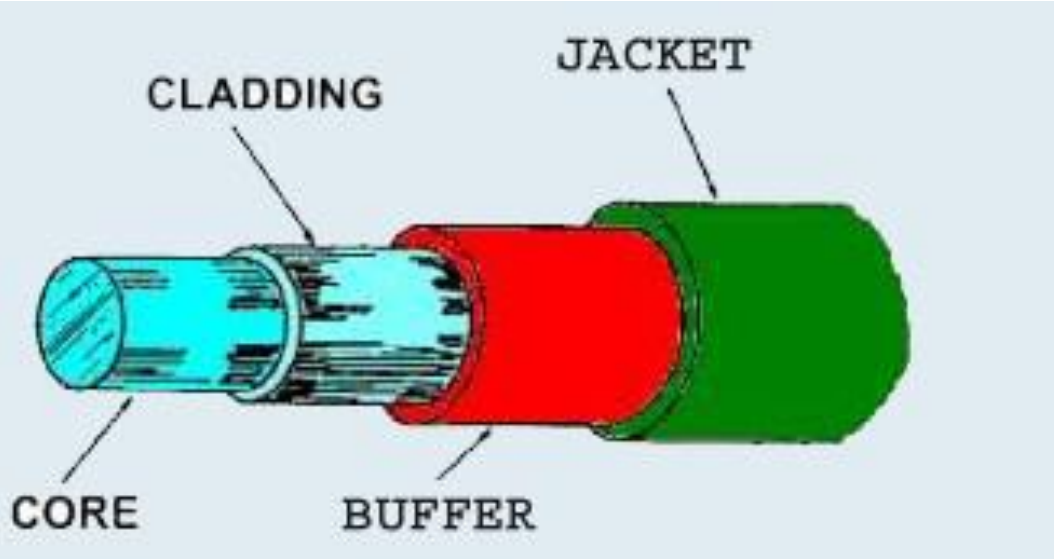
- ☐ Medicina (Endoscopie, Artroscopie, Interventi chirurgici)
- ☐ Industria (Taglio, Saldatura, Foratura)
- ☐ Ricerca (Astronomia)
- ☐ Comunicazioni

Funzionamento di una fibra



Le fibre ottiche si basano sul fenomeno di riflessione totale; la discontinuità dell'indice di rifrazione tra i materiali del nucleo e del mantello intrappola la radiazione luminosa finché questa mantiene un angolo abbastanza radente, in pratica finché la fibra non compie curve troppo brusche

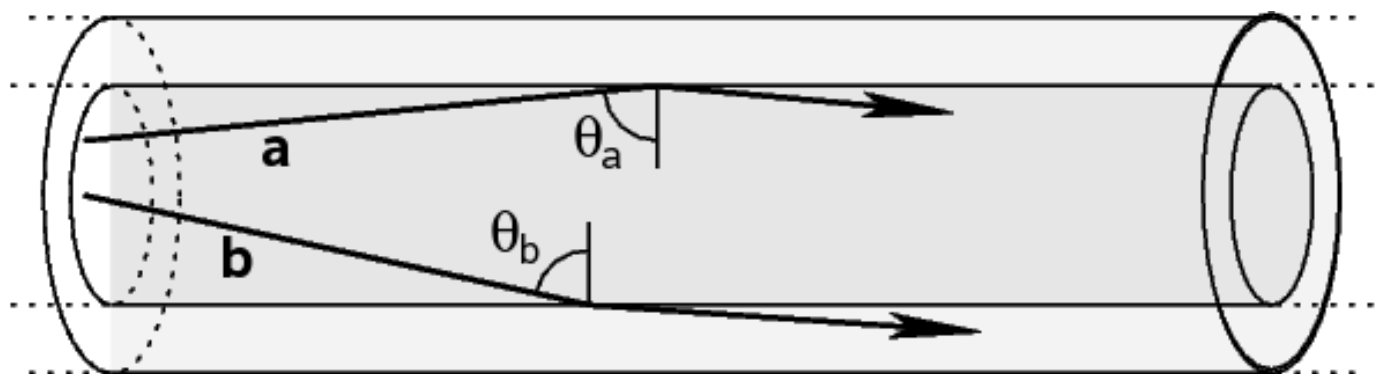
Struttura di una fibra



- Il **CORE** e il **CLADDING** sono i costituenti fondamentali di una fibra ed hanno indice di rifrazione differente:

$$n_1(\text{core}) > n_2(\text{cladding})$$

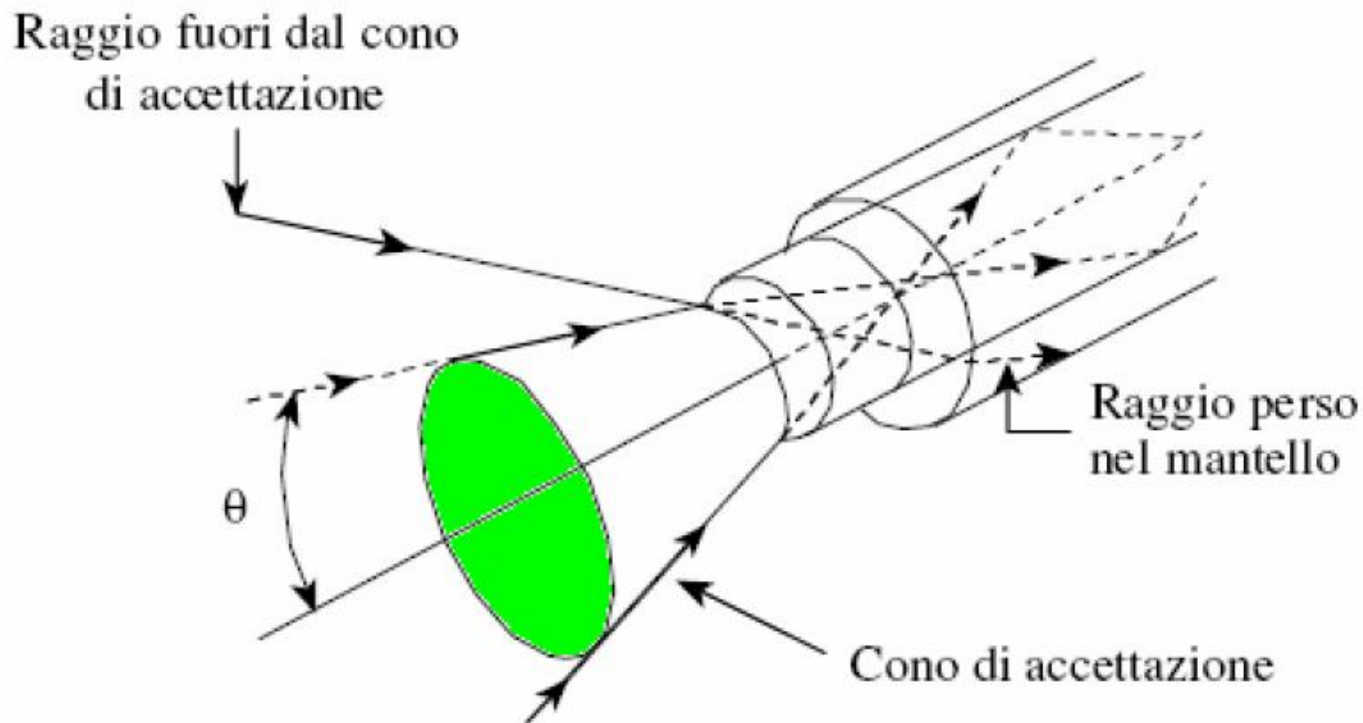
- Il **BUFFER** ha la funzione di proteggere la fibra da agenti esterni ed irrobustirla meccanicamente
- Il **JACKET** evita fenomeni di microbending



*Riflessione totale interna (a) e rifrazione esterna (b)
per due fasci luminosi in una fibra ottica.*

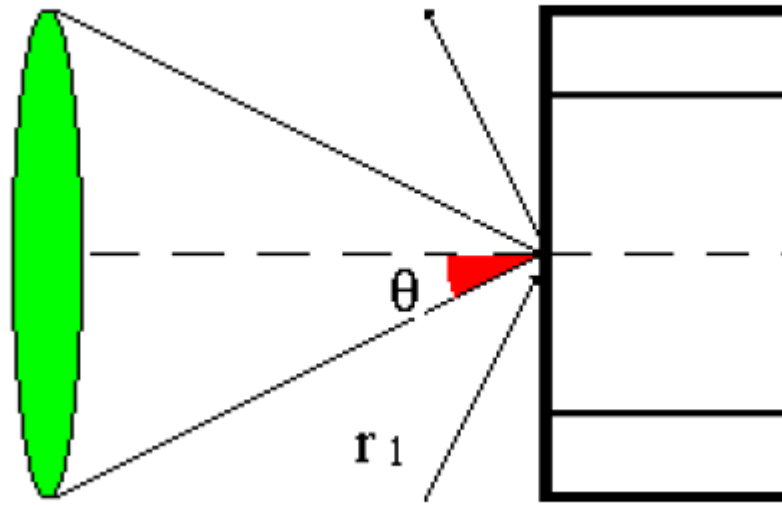
In figura è rappresentato come due raggi luminosi incidono sull'interfaccia tra nucleo e mantello all'interno della fibra ottica. Il fascio **a** incide con un angolo θ_a superiore all'angolo critico di riflessione totale e rimane intrappolato nel nucleo; il fascio **b** incide con un angolo θ_b inferiore all'angolo critico e viene rifratto nel mantello e quindi perso.

Definiamo apertura numerica NA di una fibra ottica il seno del suo angolo di accettazione moltiplicato per l'indice di rifrazione del mezzo esterno (solitamente in aria è $n \sim 1$).

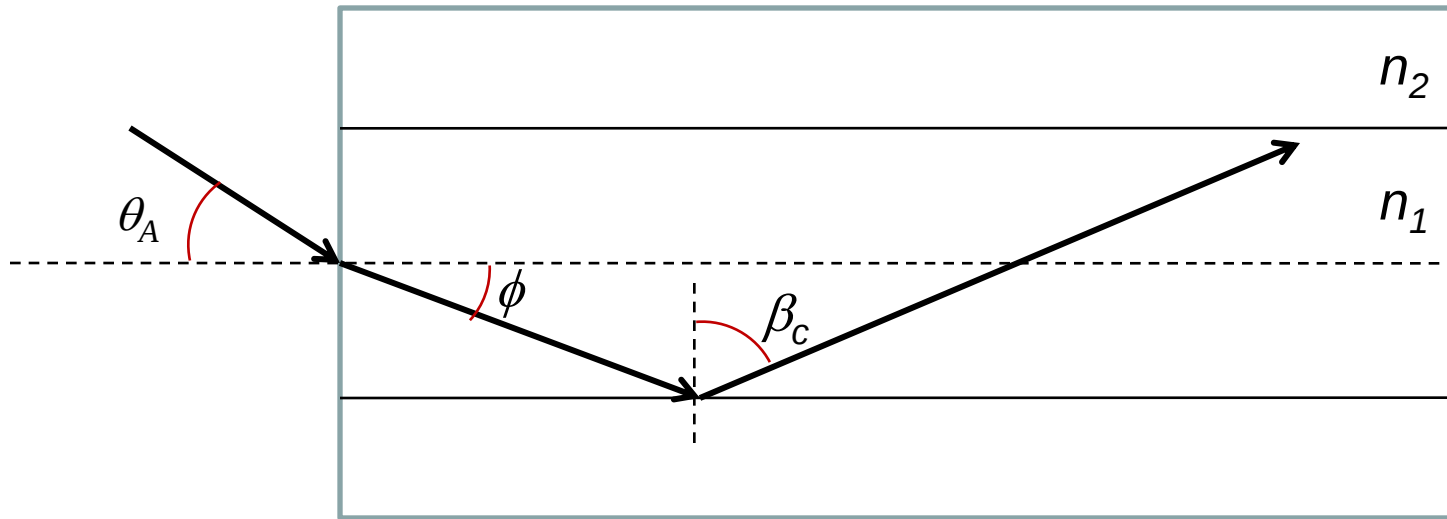


$$NA = \sin \theta$$

θ = massimo angolo di accettazione



$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$



$$\begin{aligned} NA &= n_{\text{ext}} \sin \theta_A = n_1 \sin \phi = \\ n_1 \sqrt{1 - \cos^2 \phi} &= n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \beta_c} = \\ n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2} &= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \end{aligned}$$

Esperienza n.3

- Determinazione dell'angolo di accettazione e dell'apertura numerica di una fibra ottica

L'esperienza ha come oggetto la misura sperimentale dell'angolo di accettazione di una fibra ottica e del calcolo del valore dell'apertura numerica NA

Strumenti a disposizione:

Banco ottico

Diodo laser

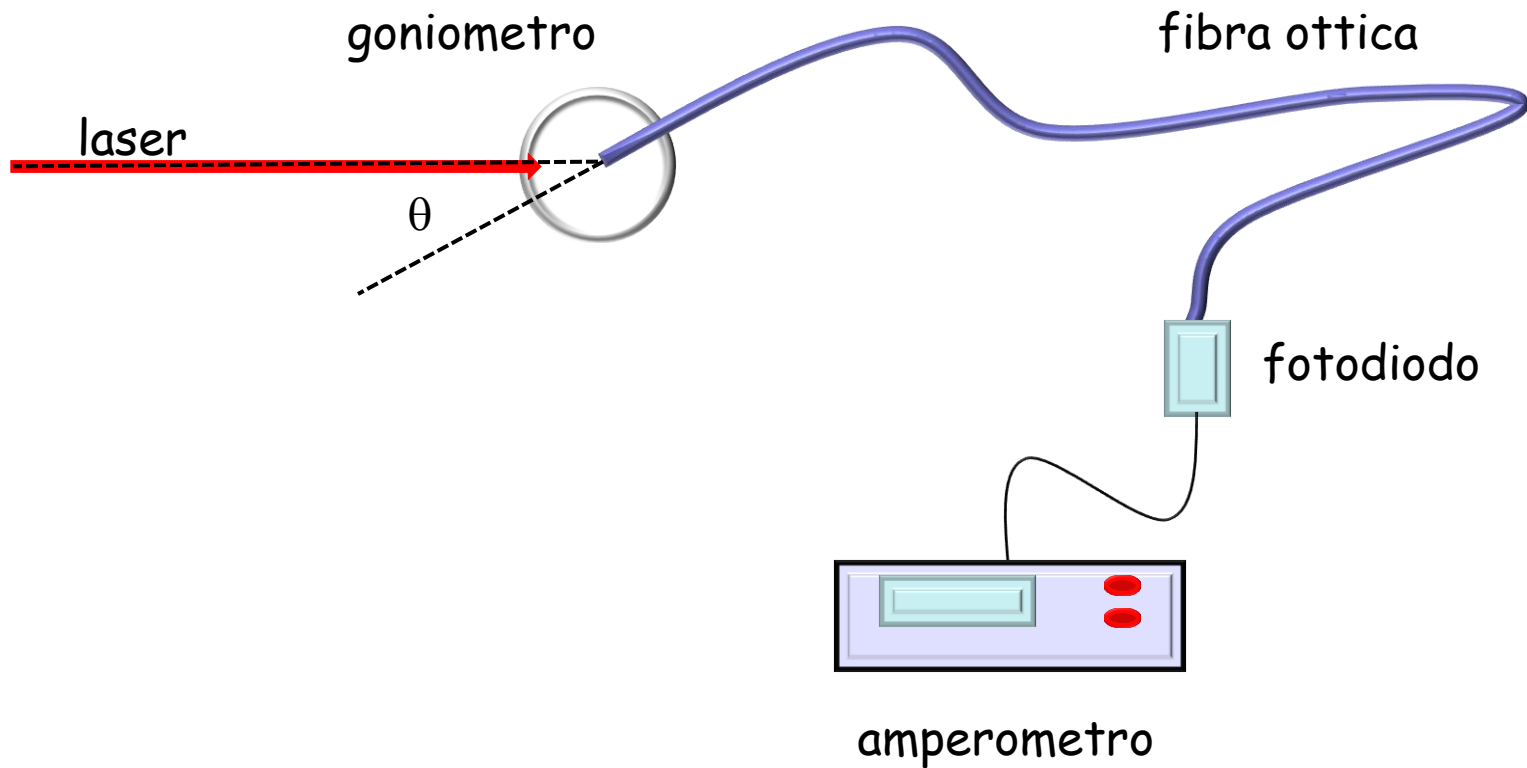
Fibra ottica

Goniometro con base

Fotodiodo

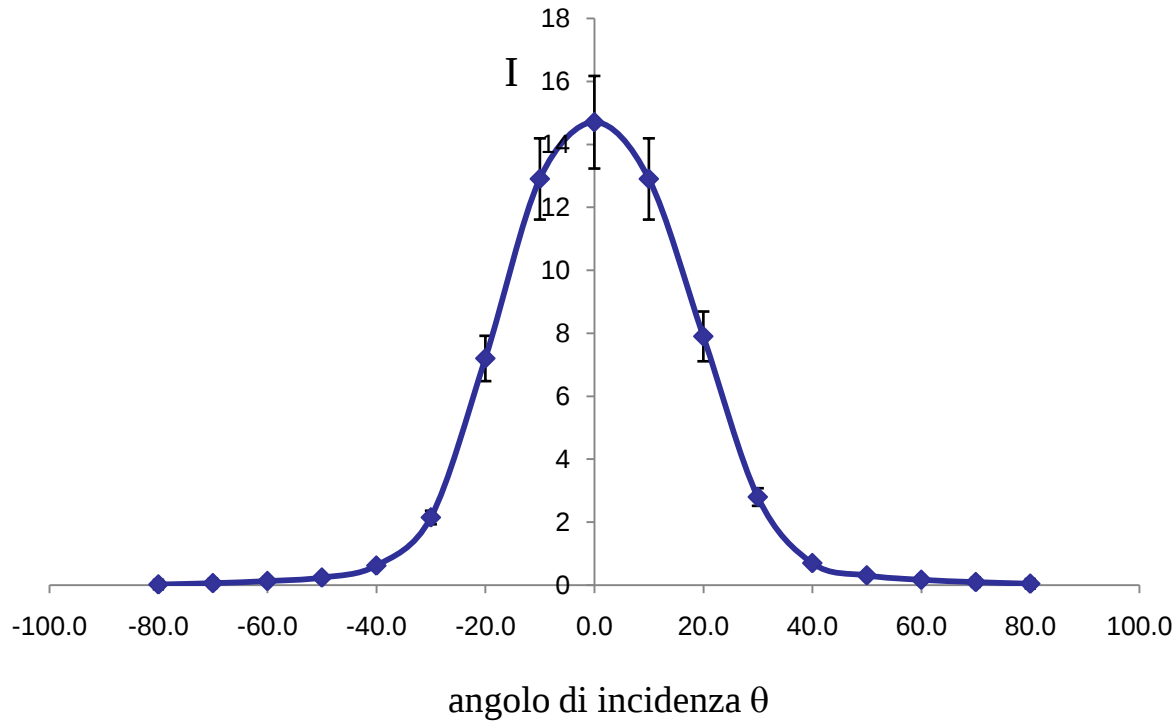
Amperometro

Lo svolgimento delle operazioni di misura si compie tramite l'apparato schematizzato in figura:

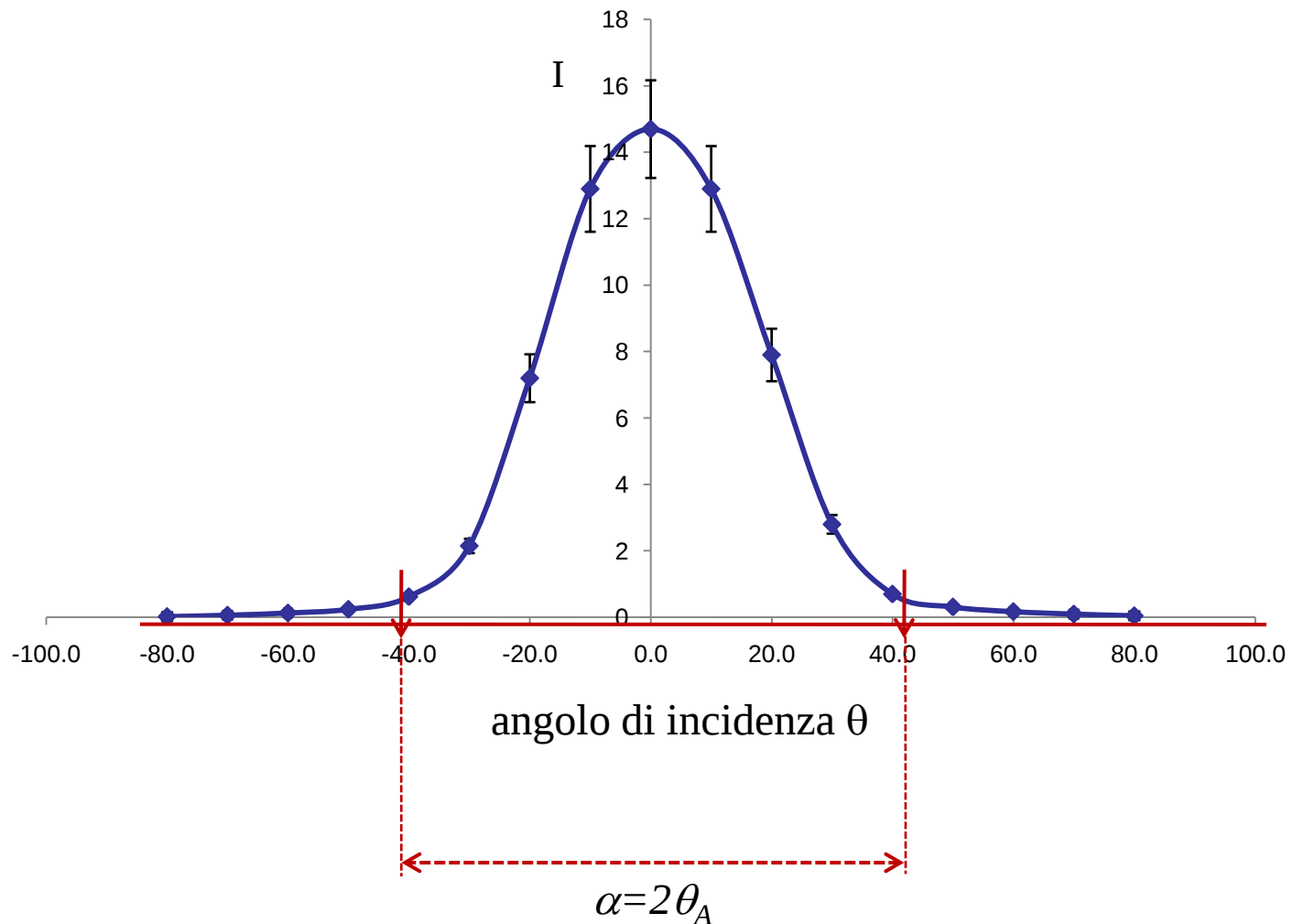


Dopo aver allineato il fascio laser con la fibra ottica ($\theta=0$) si annoti il valore di corrente.

Successivamente, muovendo il supporto, si misuri la corrente I in funzione dell'angolo di rotazione (= angolo di incidenza θ) e si riporti in un grafico I in funzione θ



L'angolo di accettazione viene determinato come l'angolo in corrispondenza del quale la corrente si riduce al 5% del suo valore massimo.



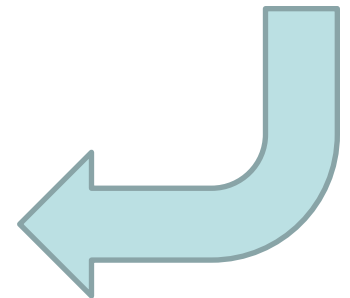
$$NA = \sin\theta_A$$

... **e** ΔNA ?

$$\alpha_{A_1} \leq \alpha_A \leq \alpha_{A_2} \xrightarrow{\alpha=2\theta_A} \frac{\alpha_{A_1}}{2} \leq \theta_A \leq \frac{\alpha_{A_2}}{2} \rightarrow$$

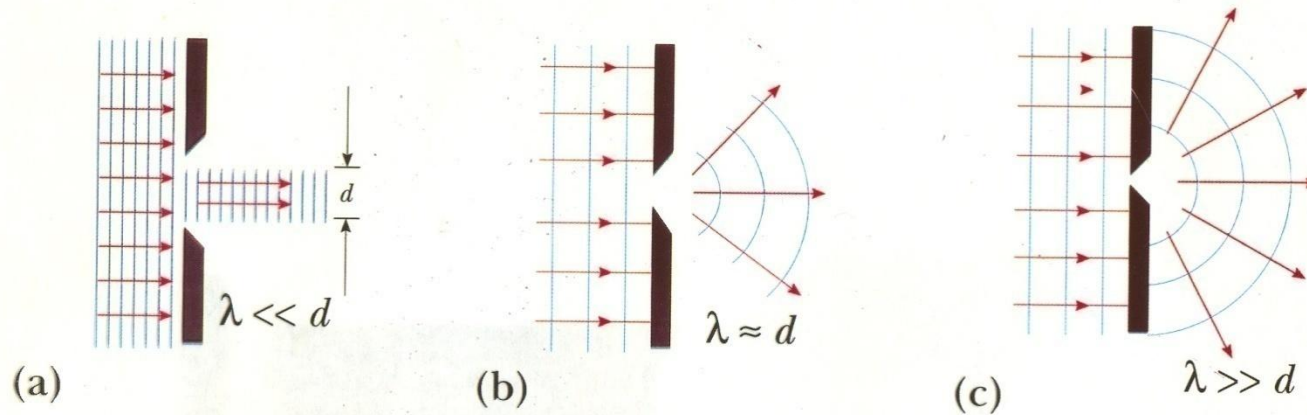
$$\sin\frac{\alpha_{A_1}}{2} \leq \sin\theta_A \leq \sin\frac{\alpha_{A_2}}{2} \longleftrightarrow \sin\frac{\alpha_{A_1}}{2} \leq NA \leq \sin\frac{\alpha_{A_2}}{2}$$

$$\Delta NA = \frac{\sin\frac{\alpha_{A_1}}{2} - \sin\frac{\alpha_{A_2}}{2}}{2}$$



Ottica ondulatoria

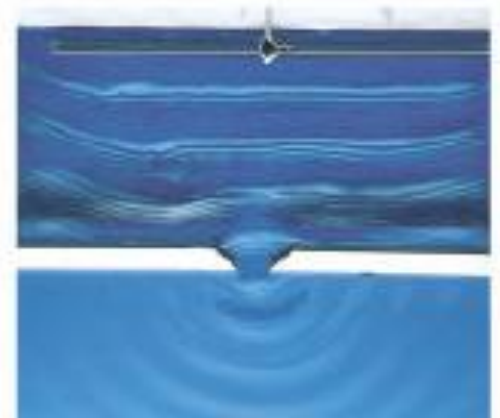
Quando lungo il percorso della luce vi sono fenditure ed ostacoli con dimensioni dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda incidente gli effetti non sono spiegabili con l'ottica geometrica ma solo con l'ottica ondulatoria di cui l'ottica geometrica è un caso particolare.



Limite dell'ottica
geometrica (raggi
luminosi)

Condizioni per l'ottica ondulatoria

In analogia con



L'ondoscopio

È uno strumento che permette di visualizzare la trasmissione delle onde nei liquidi (acqua) in una vaschetta rettangolare. Si tratta di onde periodiche emesse ad una frequenza variabile opportunamente.



Il fondo della vaschetta è di vetro e poggia su uno specchio inclinato a 45° che ha la funzione di proiettare le immagini dal fondo della vaschetta su uno schermo laterale.

Le immagini si formano grazie ad una sorgente luminosa posta sopra la vaschetta, in cui si producono onde periodiche grazie a battitori lineari (per onde piane) o puntiformi (per onde circolari).

Le creste delle onde funzionano da lente convergente per la luce della lampada e corrispondono sullo schermo ad una striscia luminosa; le gole agiscono come lenti divergenti e determinano sullo schermo una striscia scura.

L'ondoscopio è inoltre fornito di uno stroboscopio che, funzionando alla stessa frequenza del motore che attiva la membrana, rende stazionaria l'immagine.

Le immagini sullo schermo subiscono un ingrandimento di cui si deve tener conto se si vogliono effettuare delle misurazioni (ad esempio la lunghezza d'onda delle perturbazioni generate).

Se si pone nella vaschetta un oggetto di lunghezza d e la sua immagine ha lunghezza d' , il fattore di ingrandimento sarà dato dal rapporto

$$\beta = \frac{d'}{d}$$

Esperienza n.4

- Dimostrazione di alcuni fenomeni ondulatori mediante onde generate in acqua

Strumenti a disposizione:

Ondoscopio corredato di:

Stroboscopio

Generatore di onde

Dispositivo di comando per generatore di onde e stroboscopio

Inserti ed ostacoli con fessure

Generazione di onde lineari

- Selezionate la profondità di immersione del vibratore in modo che il bordo inferiore dell'eccitatore tocchi la superficie dell'acqua.
- Regolare la frequenza e l'ampiezza desiderata dell'eccitatore
- Regolare la frequenza dello stroboscopio in modo da avere un'immagine stazionaria.

Determinazione della lunghezza d'onda

- Calcolate il fattore di ingrandimento β posizionando la lente biconcava sulla vasca e confrontandone le dimensioni con le dimensioni della propria immagine sullo schermo
- Dalla lunghezza d'onda λ' misurata sullo schermo di osservazione valutate la lunghezza d'onda effettiva λ

$$\beta = \frac{d'}{d} \quad \dots \text{ e } \Delta\beta?$$

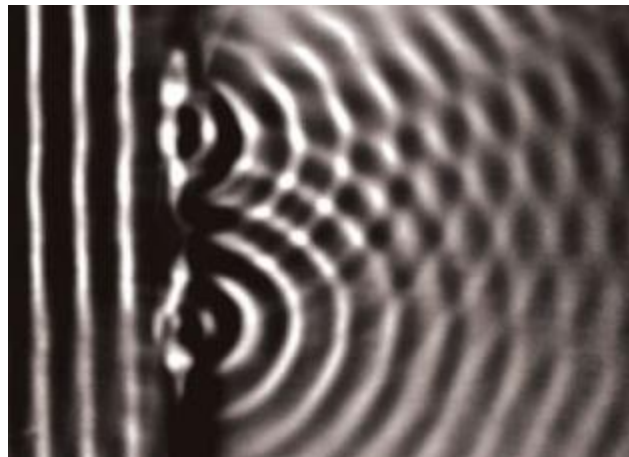
$$\frac{\Delta\beta}{\beta} = \frac{\Delta d'}{d'} + \frac{\Delta d}{d} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Delta\beta = \left(\frac{\Delta d'}{d'} + \frac{\Delta d}{d} \right) \beta}$$

$$\lambda = \frac{\lambda'}{\beta} \quad \dots \text{ e } \Delta\lambda?$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\lambda'}{\lambda'} + \frac{\Delta\beta}{\beta} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Delta\lambda = \left(\frac{\Delta\lambda'}{\lambda'} + \frac{\Delta\beta}{\beta} \right) \lambda}$$

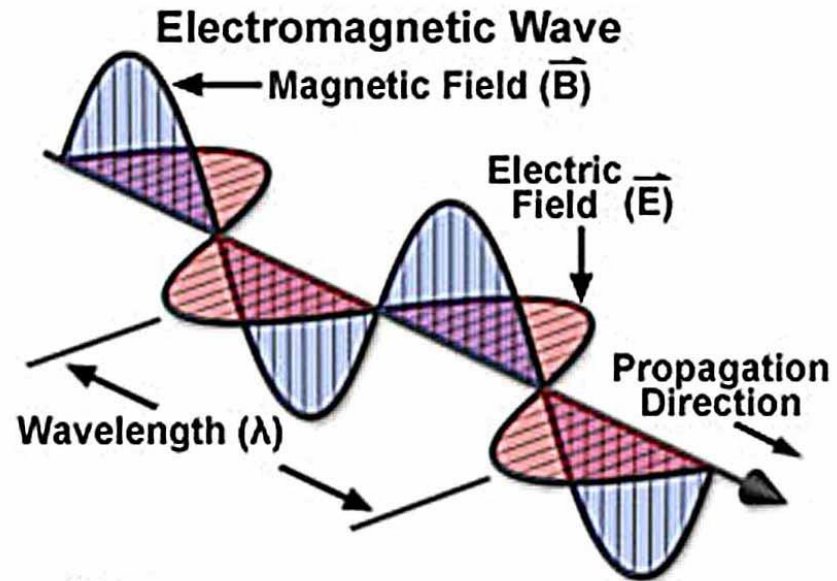
Osservazioni

- Variate la frequenza dell'eccitatore ed osservate se varia la lunghezza d'onda ed, in caso positivo, come cambia all'aumentare della frequenza
- Inserite nella vasca gli ostacoli in dotazione (prisma, lente biconcava, biconvessa, ostacolo con fessura grande e fessure singole) osservate e commentate come varia la forma delle onde.

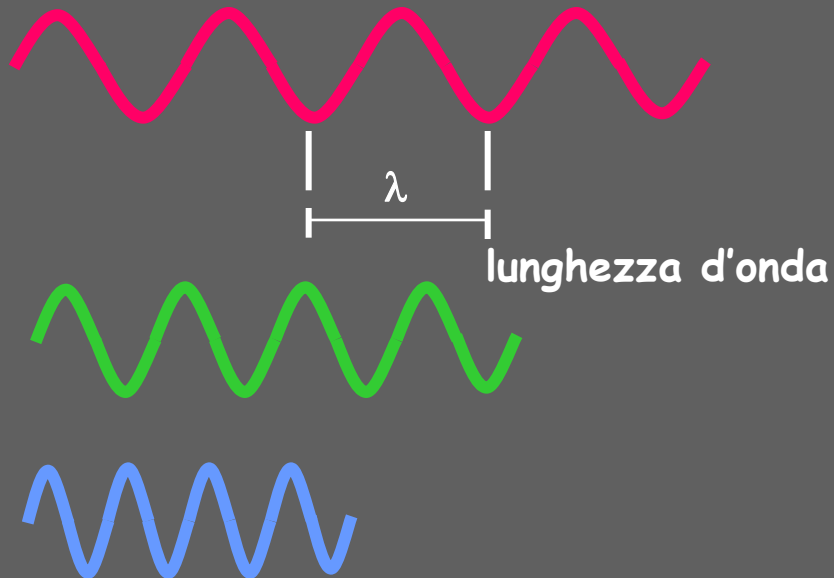


La teoria ondulatoria della luce interpreta il fenomeno della luce come **un'onda elettromagnetica**, ossia come una variazione periodica dei campi elettrico e magnetico nello spazio e nel tempo

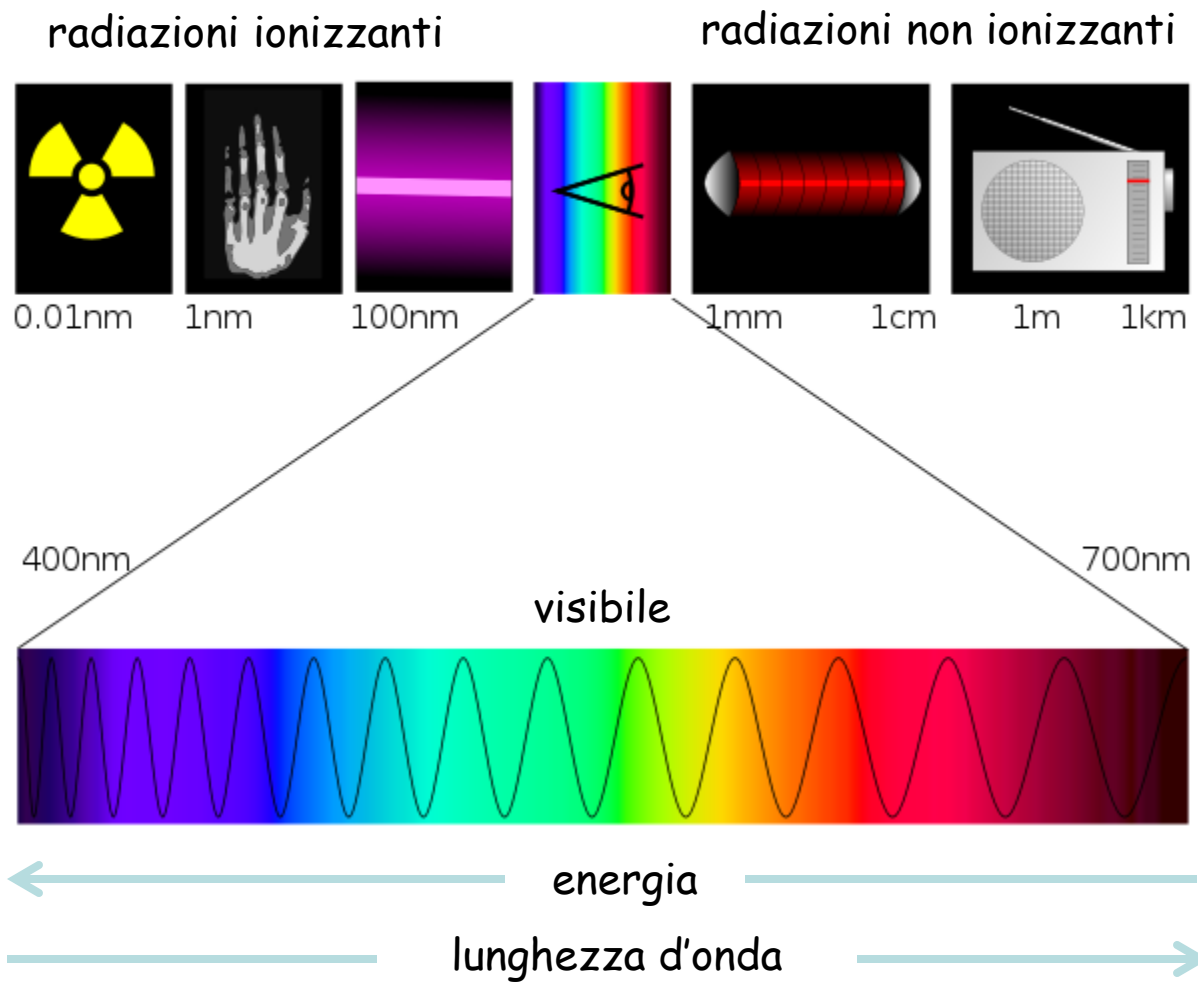
Luce come fenomeno ondulatorio



$$E = \cos (\omega t - k x + \phi) = \cos (\omega t - 2 \pi x / \lambda + \phi)$$



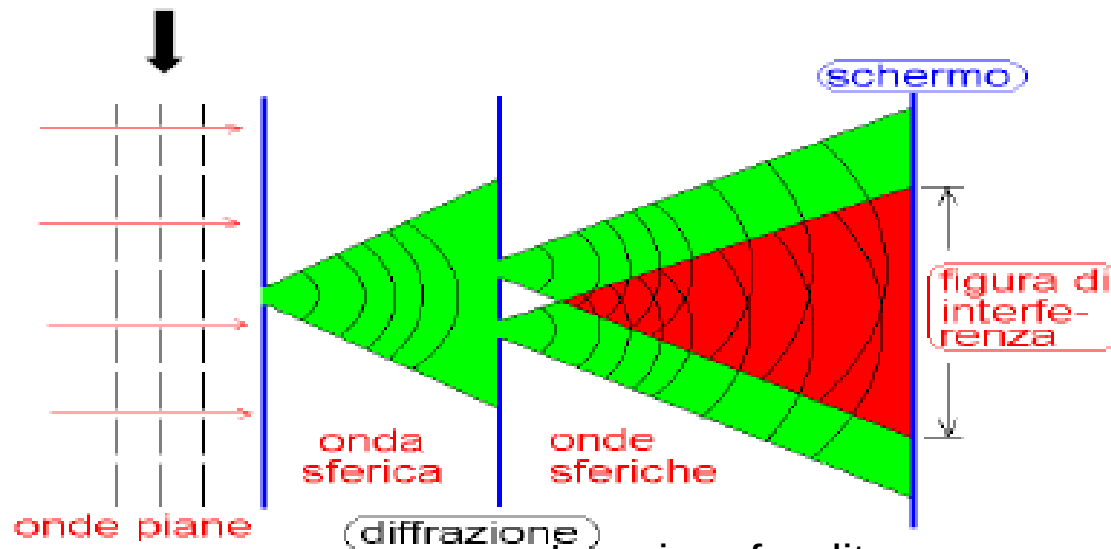
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$



Il primo a dimostrare sperimentalmente la teoria ondulatoria della luce fu Tomas Young nel 1801 e ne misurò la lunghezza d'onda

Esperimento di Young:

luce
monocromatica



Sullo
schermo si
osservano
massimi di
intensità
intervallati
da minimi di
intensità

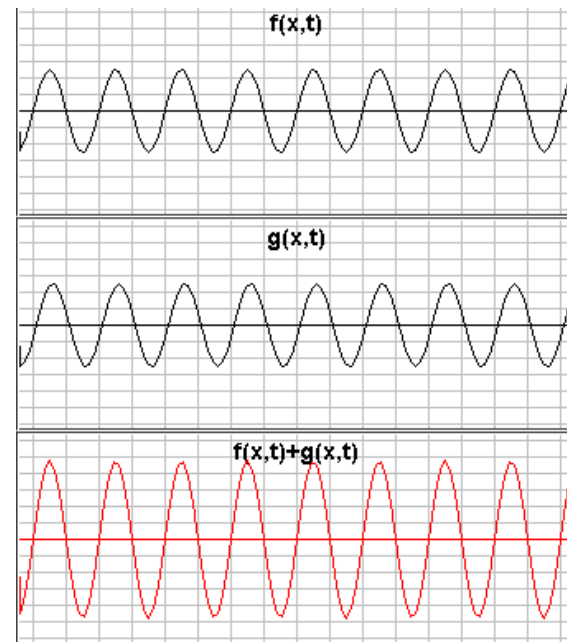
La prima fenditura serve per rendere le onde in S1 e S2 in fase tra loro.



Interferenza

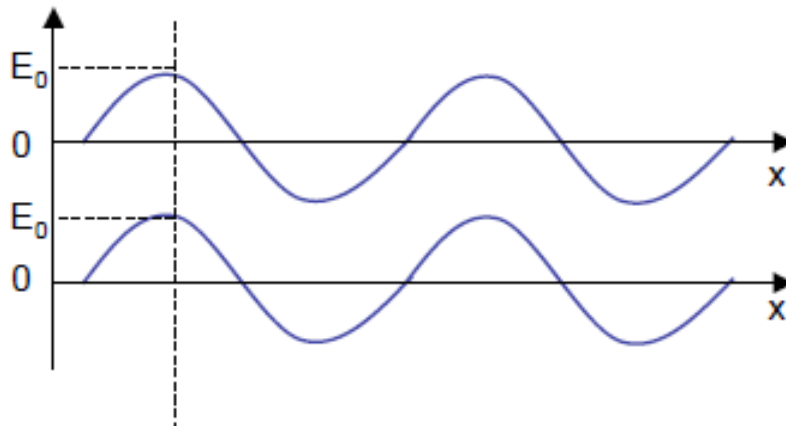
Il fenomeno dell'interferenza si osserva in vari campi della Fisica:
onde acustiche,
onde meccaniche sulla superficie di un liquido,
onde luminose etc.

Il fenomeno è conseguenza della sovrapposizione in un punto dello spazio di due o più onde.

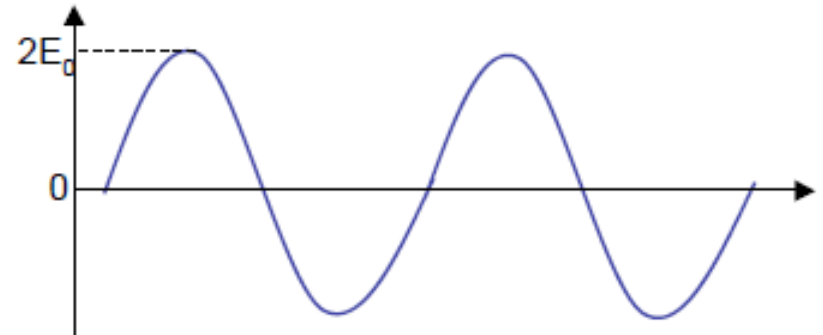


Due onde della stessa natura che si incontrano nello stesso punto dello spazio interagiscono e generano una perturbazione di ampiezza pari alla somma delle loro ampiezze

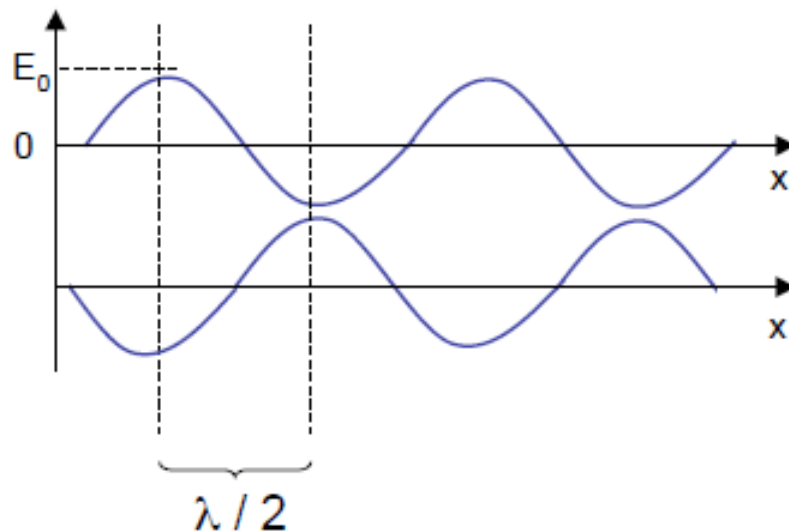
Onde in fase



interferenza costruttiva

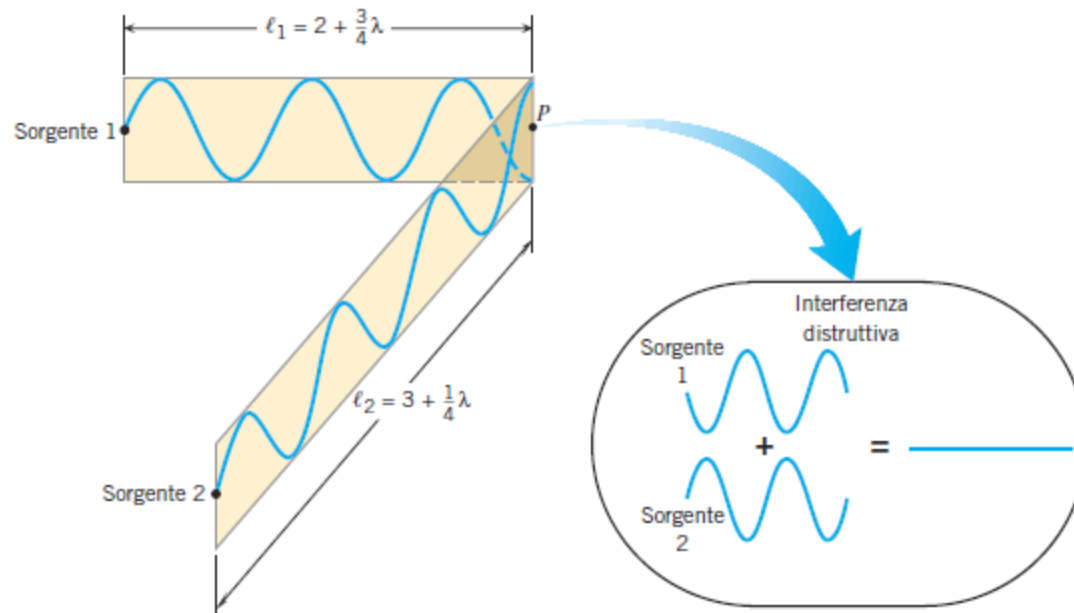
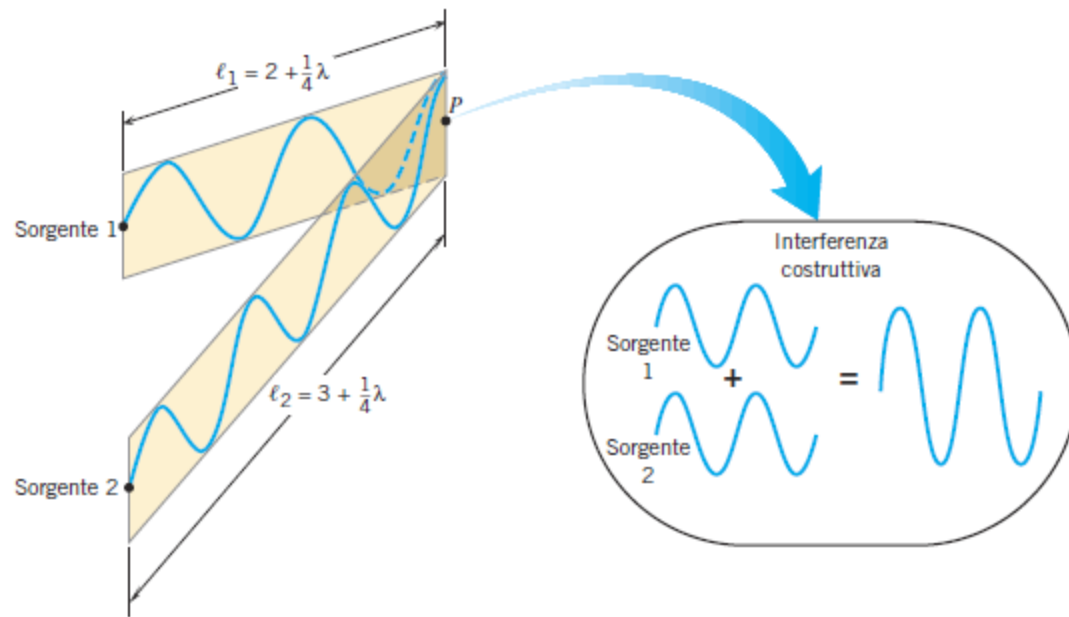


Onde sfasate di $\lambda / 2$



interferenza distruttiva

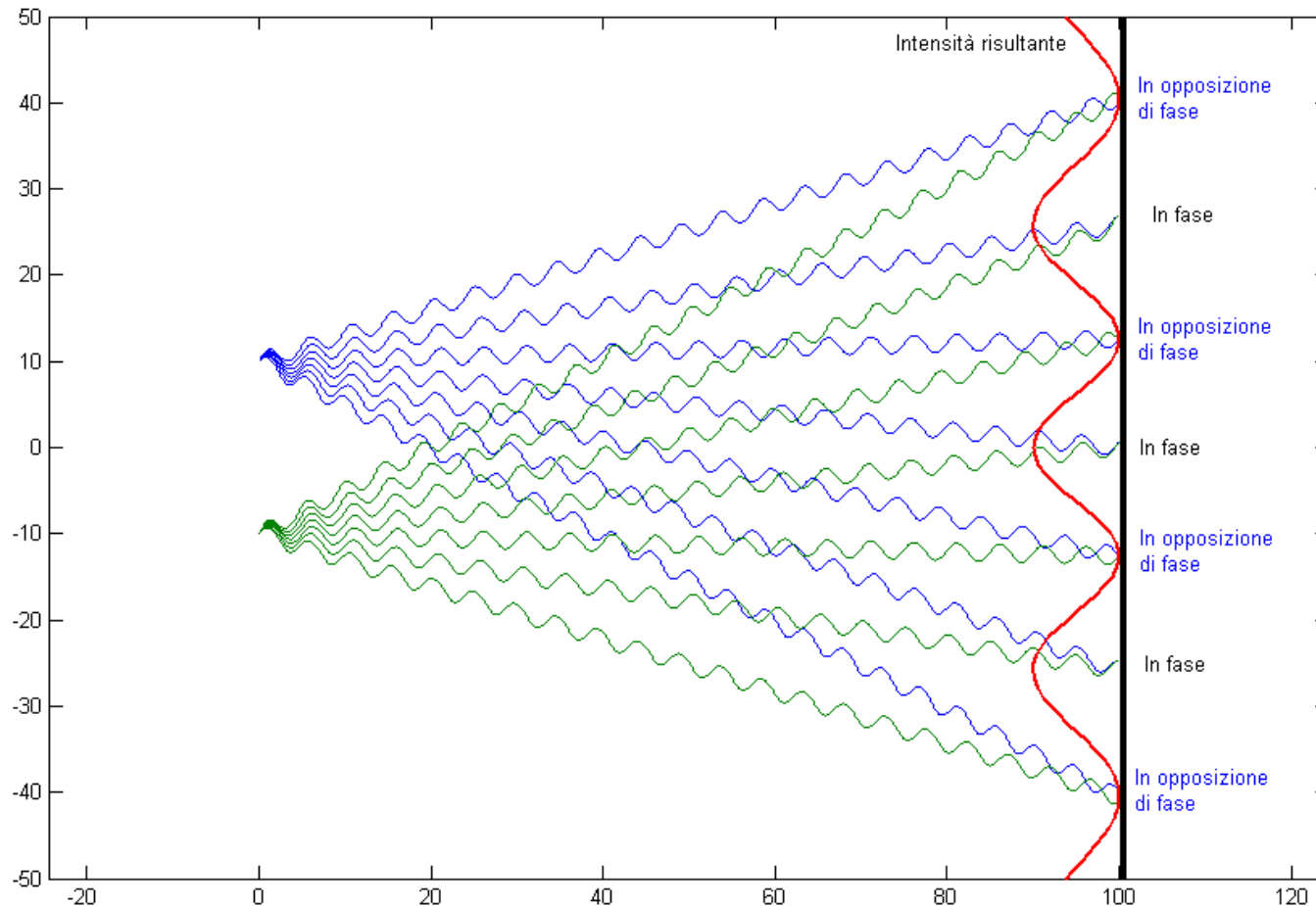


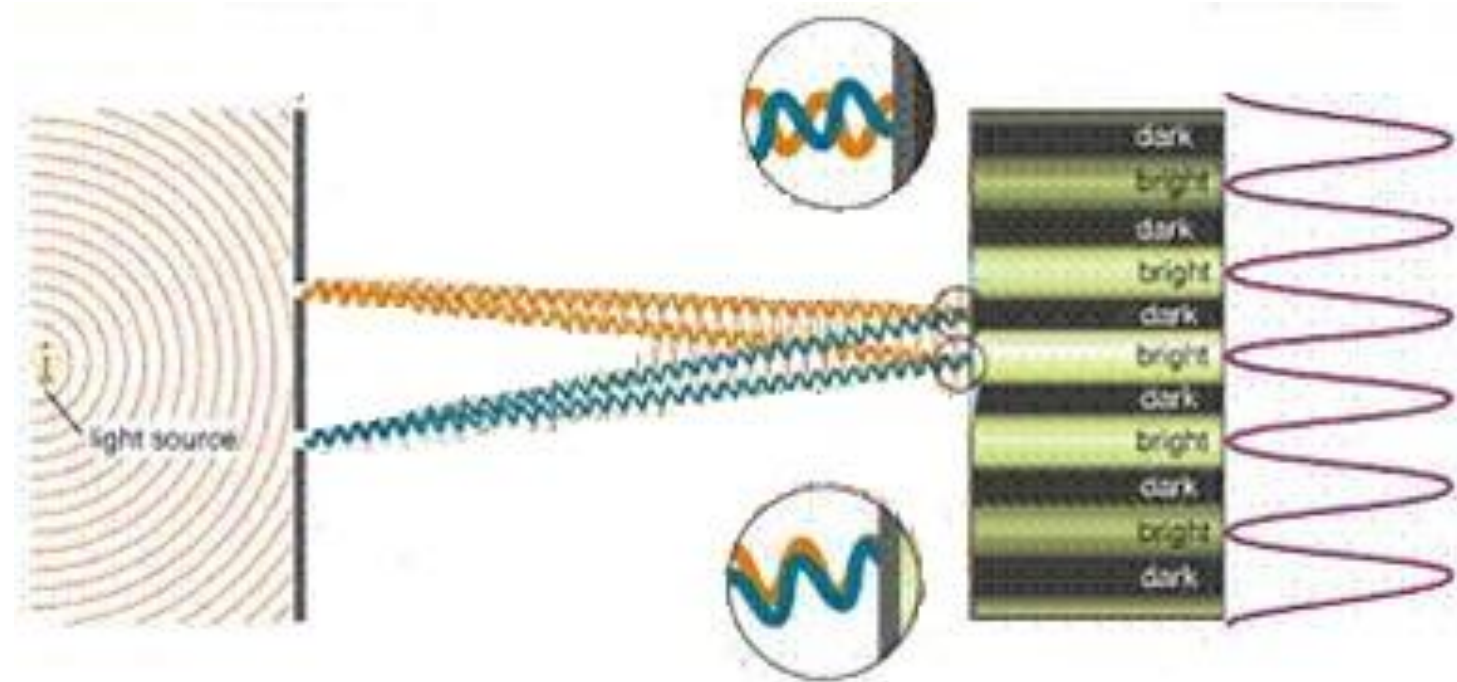


Interferenza tra due onde elettromagnetiche

Le due onde giungono schermo con una differenza di fase dovuta alla differenza di cammino percorso.

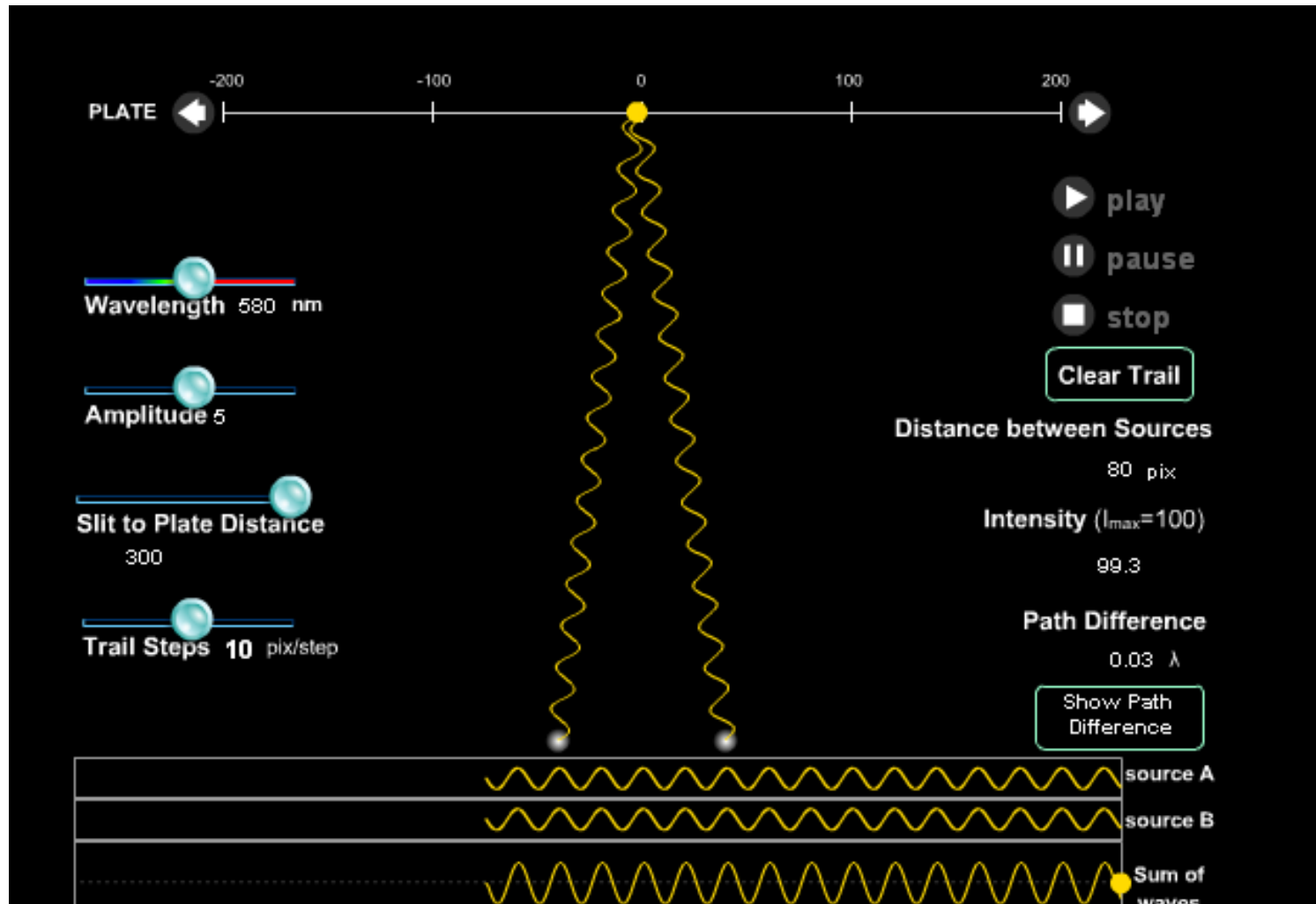
- Se la differenza di cammino ottico è pari a $m\lambda$, le onde si sommano (interferenza costruttiva).
- Se la differenza di cammino ottico è pari a $(m+1/2)\lambda$, le onde si sottraggono (interferenza distruttiva).





Esperienza di Young

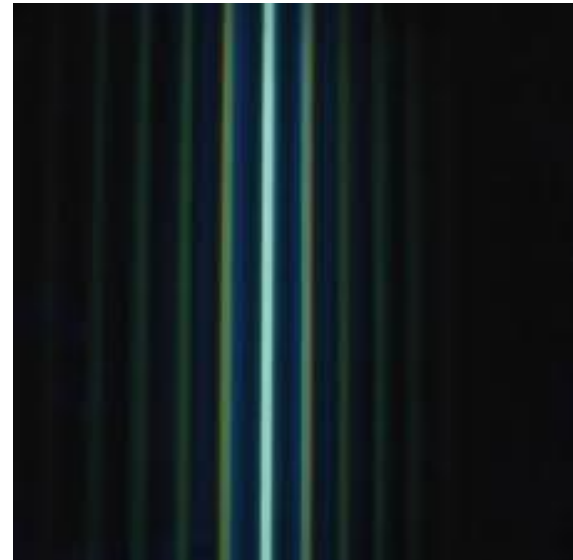
http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/flashlets/youngexpt4.htm



Diffrazione da una fenditura

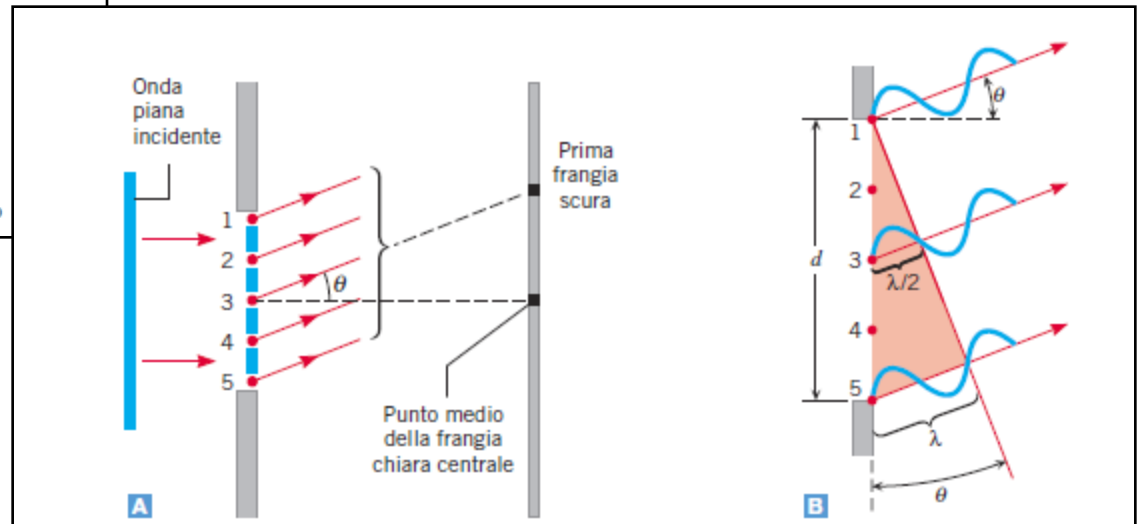
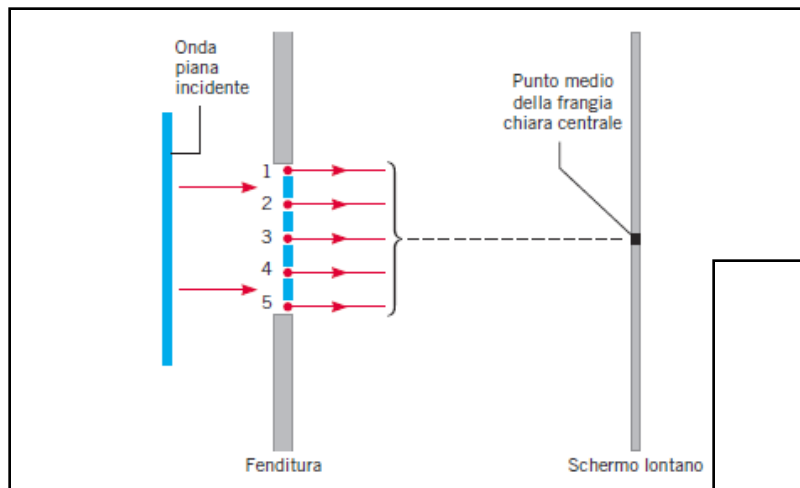
Quando un raggio di luce attraversa una piccola apertura, si osservano delle frange alternate di luce o buio, piuttosto che una macchia luminosa.

Questo comportamento indica che la luce, attraversata l'apertura, si diffonde in varie direzioni penetrando in zone in cui, se la luce si propagasse in linea retta, ci si aspetterebbe ombra.



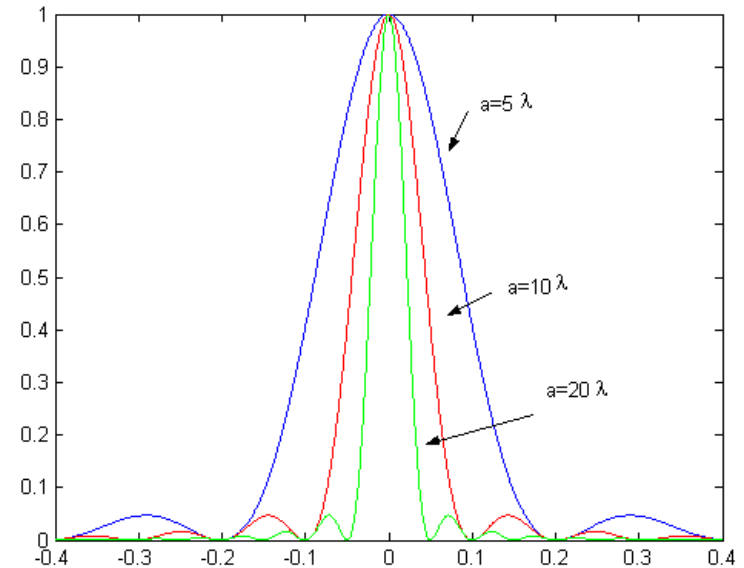
PRINCIPIO DI HUYGENS

Ogni punto di un fronte d'onda che esiste in un certo istante si comporta come sorgente di onde sferiche secondarie che si propagano verso l'esterno con la stessa velocità dell'onda.



La figura di diffrazione si allarga man mano che la fenditura si stringe mentre si verifica che se l'apertura è abbastanza grande, allora l'intensità luminosa è concentrata intorno al massimo centrale. Cio' vuol dire essenzialmente che la maggior parte della radiazione prosegue con la stessa direzione che aveva prima di incontrare la fenditura: in pratica, viene giustificata l'ottica geometrica!

Man mano che la fenditura si rimpicciolisce, la diffrazione acquista importanza e sempre più radiazione viene deviata ad angoli diversi.



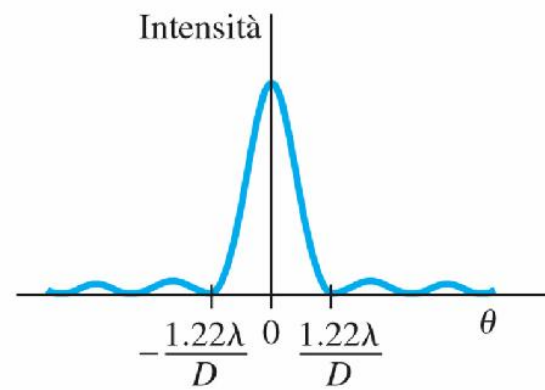
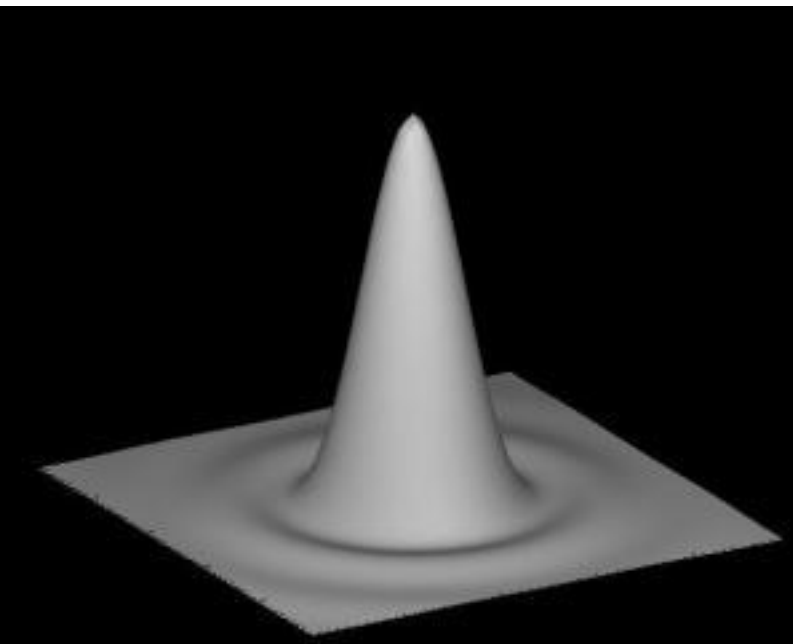
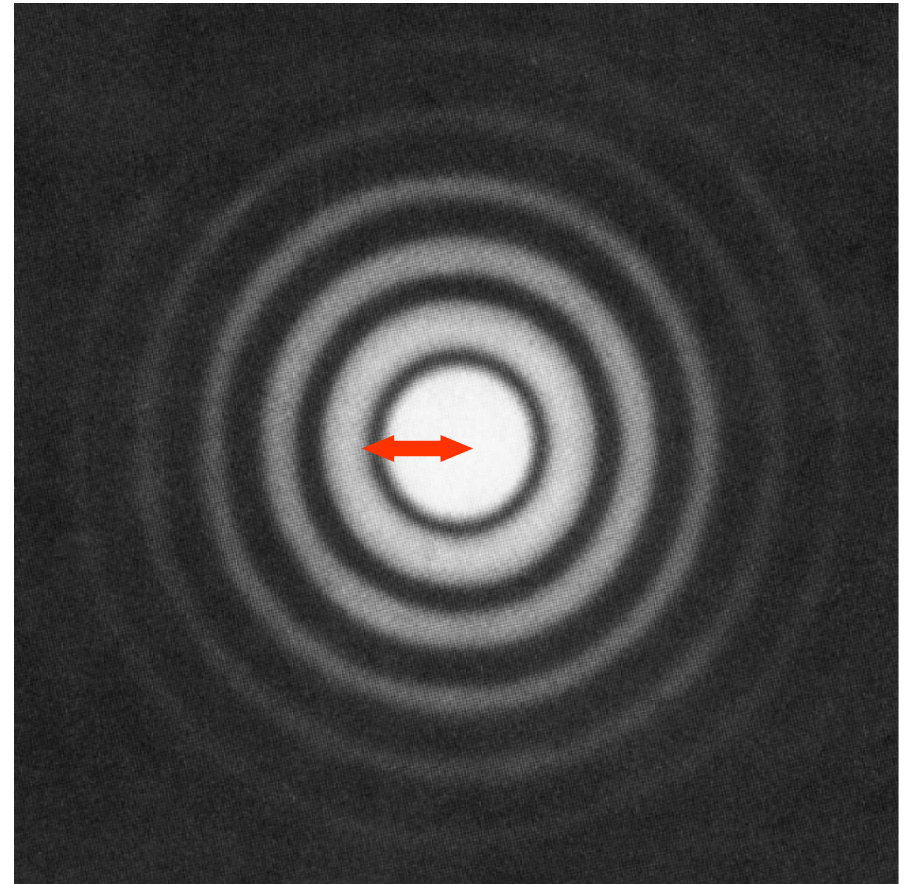


Figura di diffrazione da apertura circolare



Prima frangia scura

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



Esperienza n.5

- Analisi della figura di diffrazione della radiazione luminosa prodotta da una fenditura

Strumenti a disposizione:

Banco ottico

Diodo laser ($\lambda = 650 \text{ nm}$)

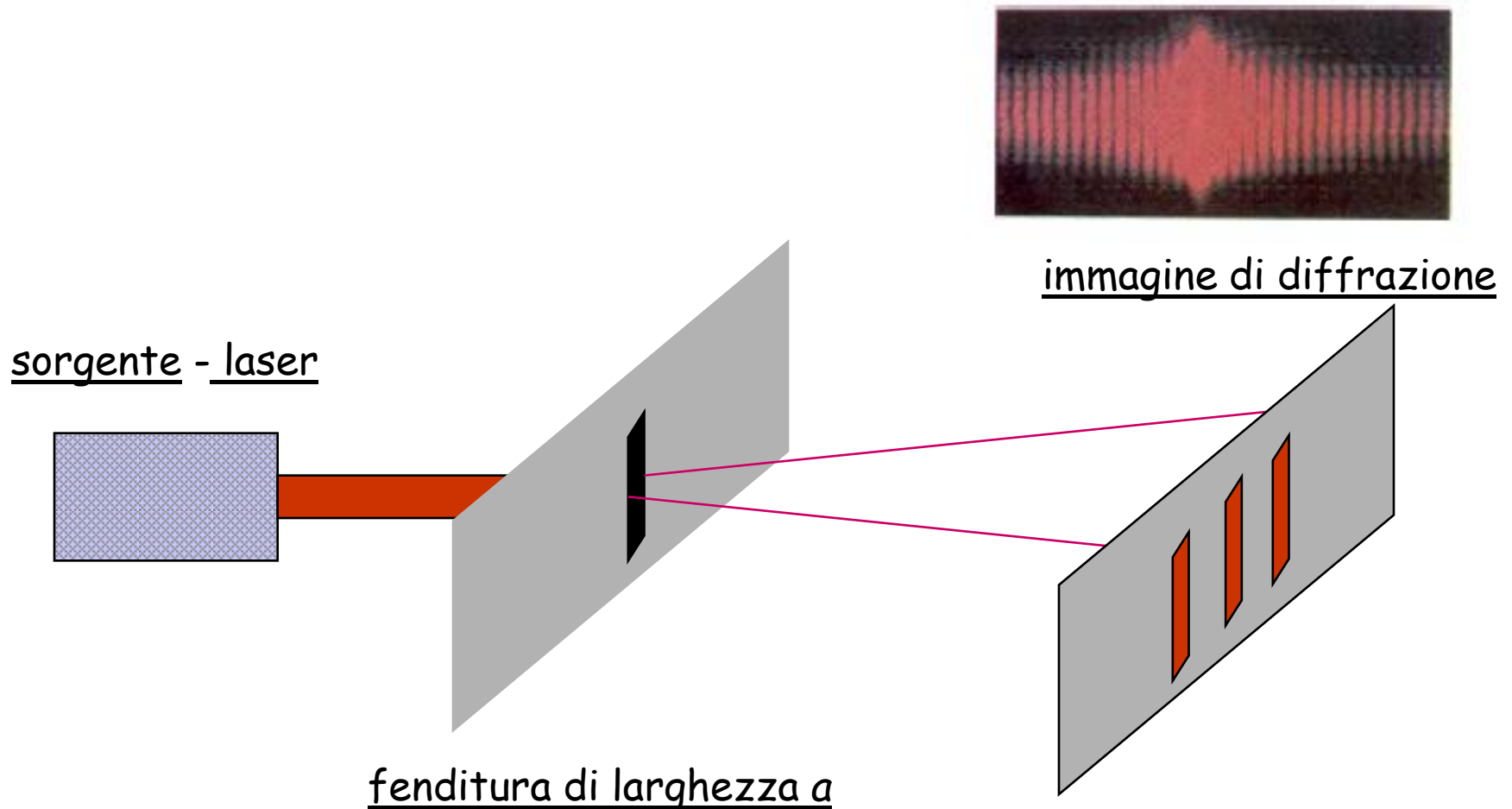
Fenditura

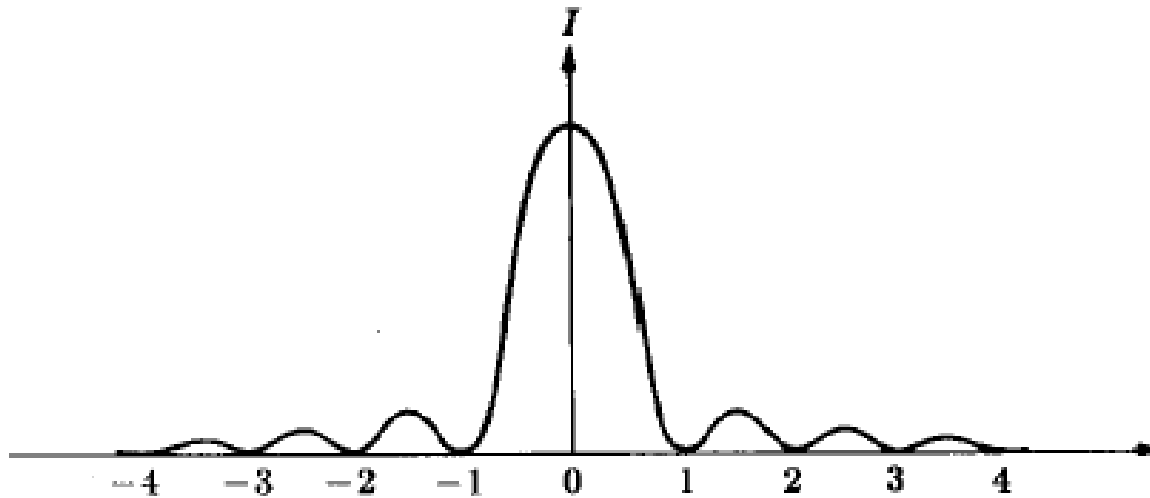
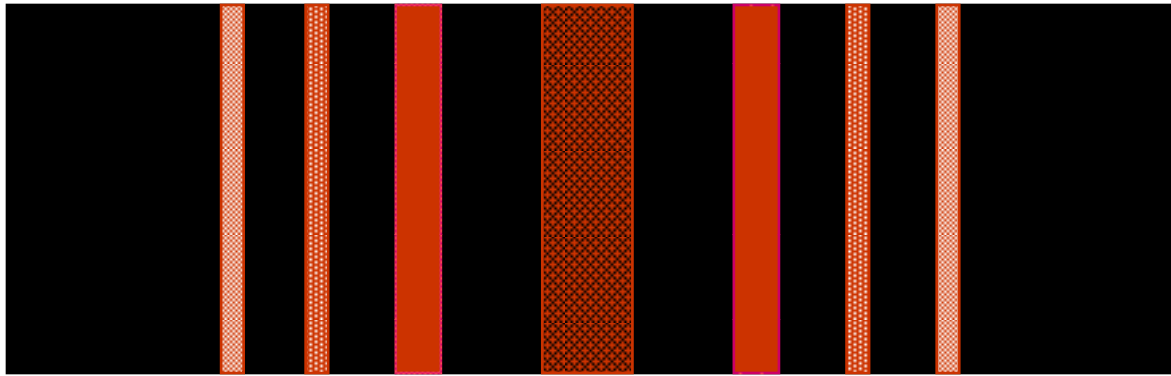
Schermo

Sensore di luce

Computer per acquisizione ed analisi dati - programma Data Studio)

Obiettivo della misura è la stima dell'ampiezza della fenditura





Distribuzione dell'intensita' delle frange di interferenza prodotte da una fenditura

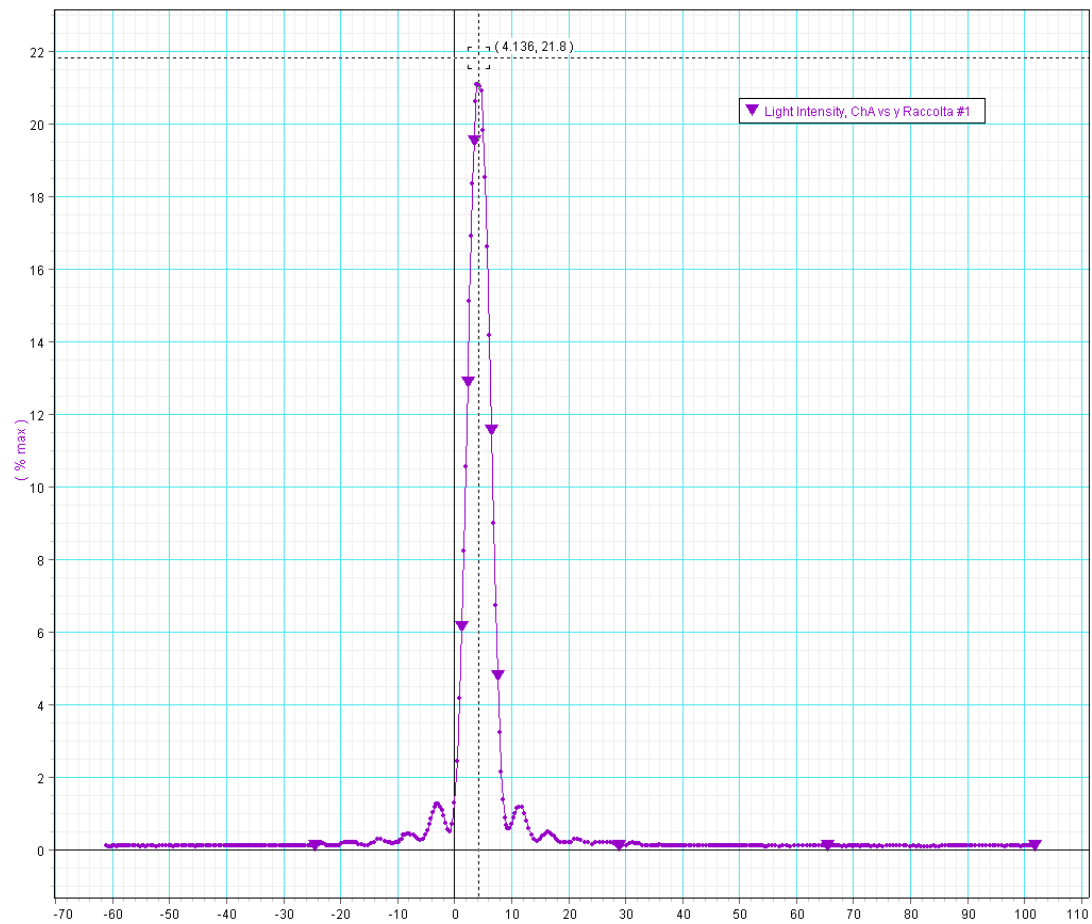
y =distanza del k -esimo minimo rispetto al massimo centrale

L =distanza fenditura-schermo

a =ampiezza della fenditura

λ =lunghezza d'onda della luce

$$y = \frac{kL\lambda}{a}$$



$$y = \frac{kL\lambda}{a}$$



$$a = \frac{kL\lambda}{y}$$

... e Δa ?

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta y}{y}$$



$$\Delta a = \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta y}{y} \right) a =$$

Polarizzazione

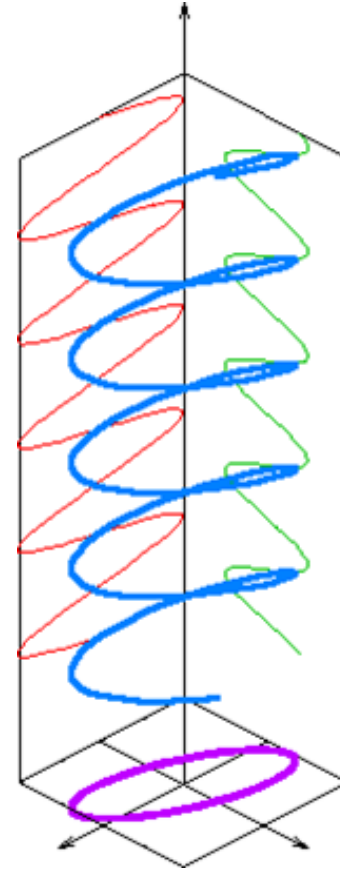
Il fenomeno della polarizzazione è una proprietà che specifica le direzioni del campo elettrico e del campo magnetico associati a un'onda elettromagnetica.

In particolare la direzione di polarizzazione dell'onda elettromagnetica è definita come la direzione lungo la quale il campo elettrico vibra

La luce naturale non possiede un particolare stato di polarizzazione. È, infatti, un'onda elettromagnetica il cui campo elettrico può vibrare in tutte le direzioni (onda luminosa non polarizzata)

Tipi di polarizzazione: ellittica, lineare, circolare

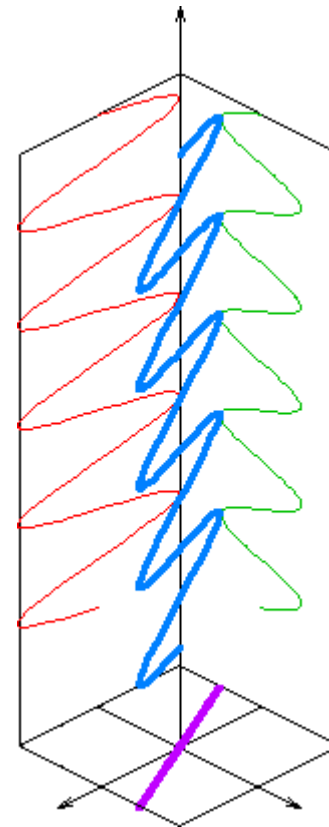
Nella polarizzazione **ellittica** il vettore campo elettrico non si mantiene costante, ma cambia direzione, e l'estremo del vettore descrive un'elica ellittica con asse coincidente con il raggio



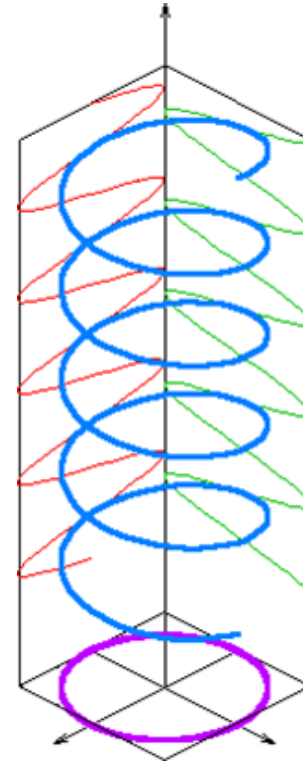
La polarizzazione **lineare** è caratterizzata dalla direzione del vettore campo elettrico costante nel tempo.

Per ogni punto del raggio di luce polarizzata il vettore campo elettrico mantiene costante la sua direzione variando periodicamente l'ampiezza, in modo tale da far oscillare il suo estremo con moto sinusoidale lungo un segmento di retta perpendicolare al raggio.

Pertanto l'estremo del vettore campo elettrico descrive nel tempo un segmento.

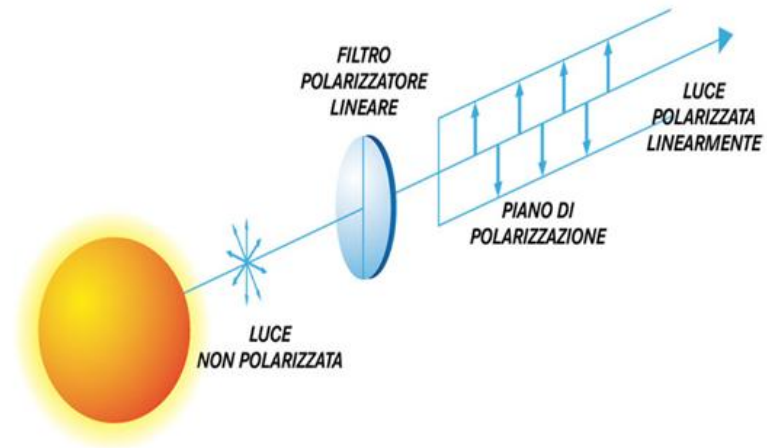


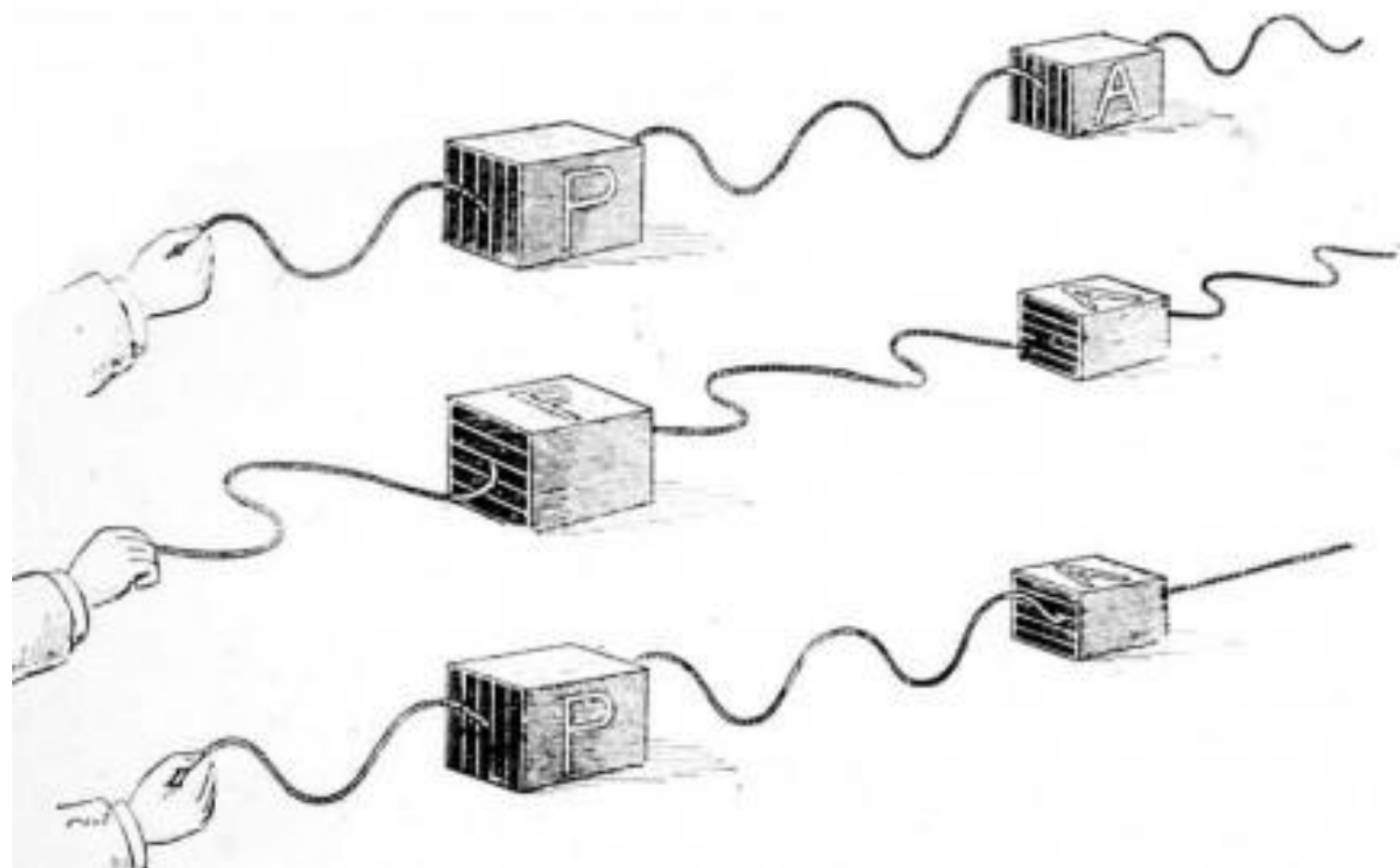
Nella polarizzazione **circolare** il vettore campo elettrico mantiene invariata la sua ampiezza e ruota uniformemente intorno al raggio. L'estremo del vettore campo elettrico esegue nel tempo un'elica circolare, che ha come asse la direzione di propagazione della luce



È possibile ottenere un fascio di luce polarizzata linearmente facendo passare il fascio inizialmente non polarizzato attraverso una lamina polarizzatrice che trasmette solo la componente del campo elettrico parallela ad una particolare direzione detta asse di trasmissione

POLARIZZAZIONE LINEARE





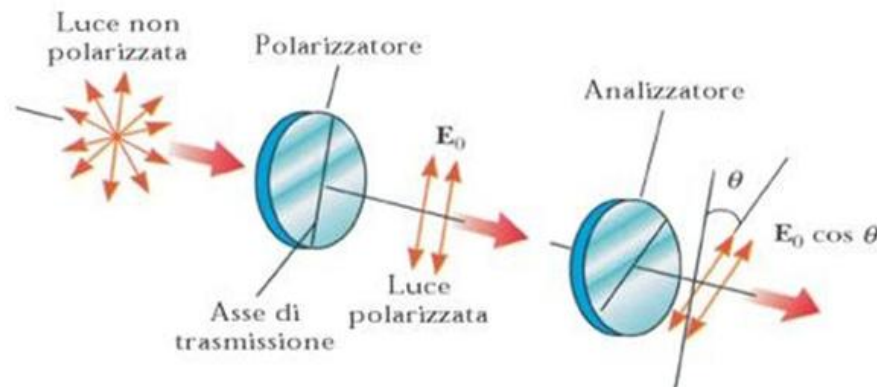
L'ampiezza del campo elettrico dell'onda trasmessa è:

$$E_T = E_0 \cos \theta$$

Poiché l'intensità (trasmessa) varia con il quadrato dell'ampiezza (trasmessa), l'intensità della luce polarizzata trasmessa dipenderà da θ secondo la legge:

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

LEGGE DI MALUS



Esperienza n.6

- Studio della polarizzazione mediante la verifica della legge di Malus

Strumenti a disposizione:

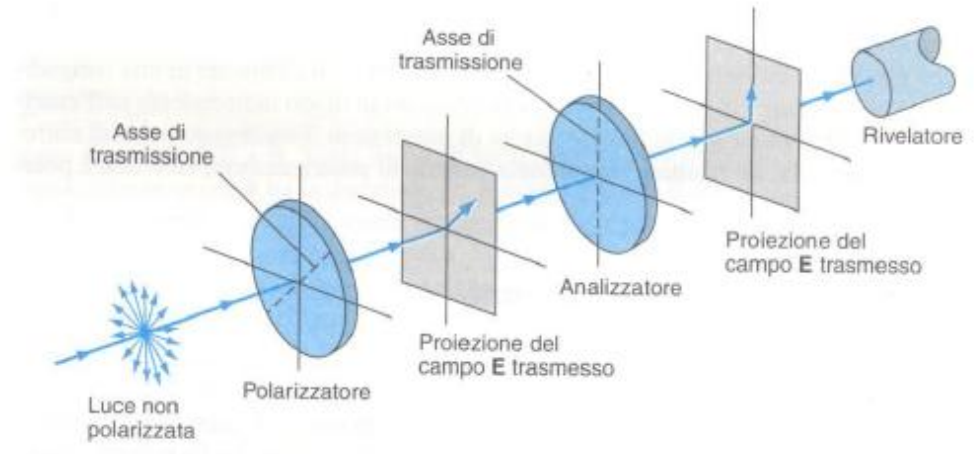
Banco ottico

He-Ne ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)

Due polarizzatori

Fotodiodo

Amperometro



Utilizzando come sorgente luminosa un laser He-Ne, dirigere perpendicolarmente il fascio luminoso su di una lamina polarizzatrice P e raccogliere la luce su di un fotodiodo.

Ruotare il polarizzatore in modo da verificare se la sorgente è polarizzata. In caso di sorgente polarizzata ottenere la massima intensità trasmessa, che indichiamo con I_0

Aggiungere un secondo polarizzatore (analizzatore) A .

Ruotando l'analizzatore rispetto al polarizzatore, registrare l'intensità I in funzione dell'angolo di polarizzazione θ facendo attenzione a non far saturare il fotodiodo

Confrontare i dati sperimentali ottenuti con quelli teorici previsti dalla legge di Malus graficando di I in funzione di θ .

