

# 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**

## 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.

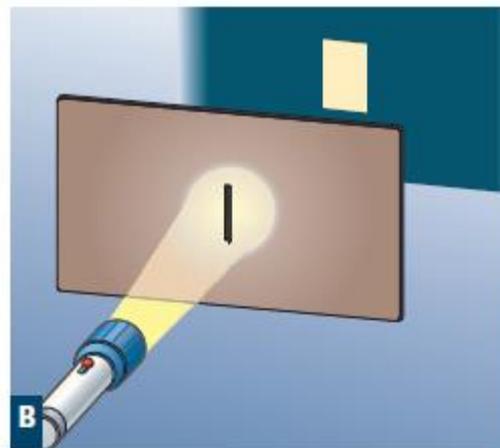
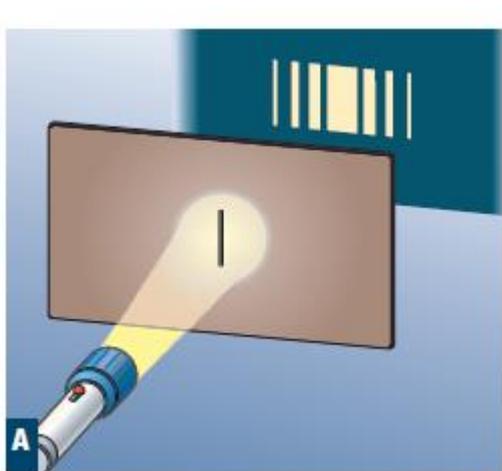
Esistono però fenomeni che non possono essere spiegati nell'ambito dell'ottica geometrica.

## 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.

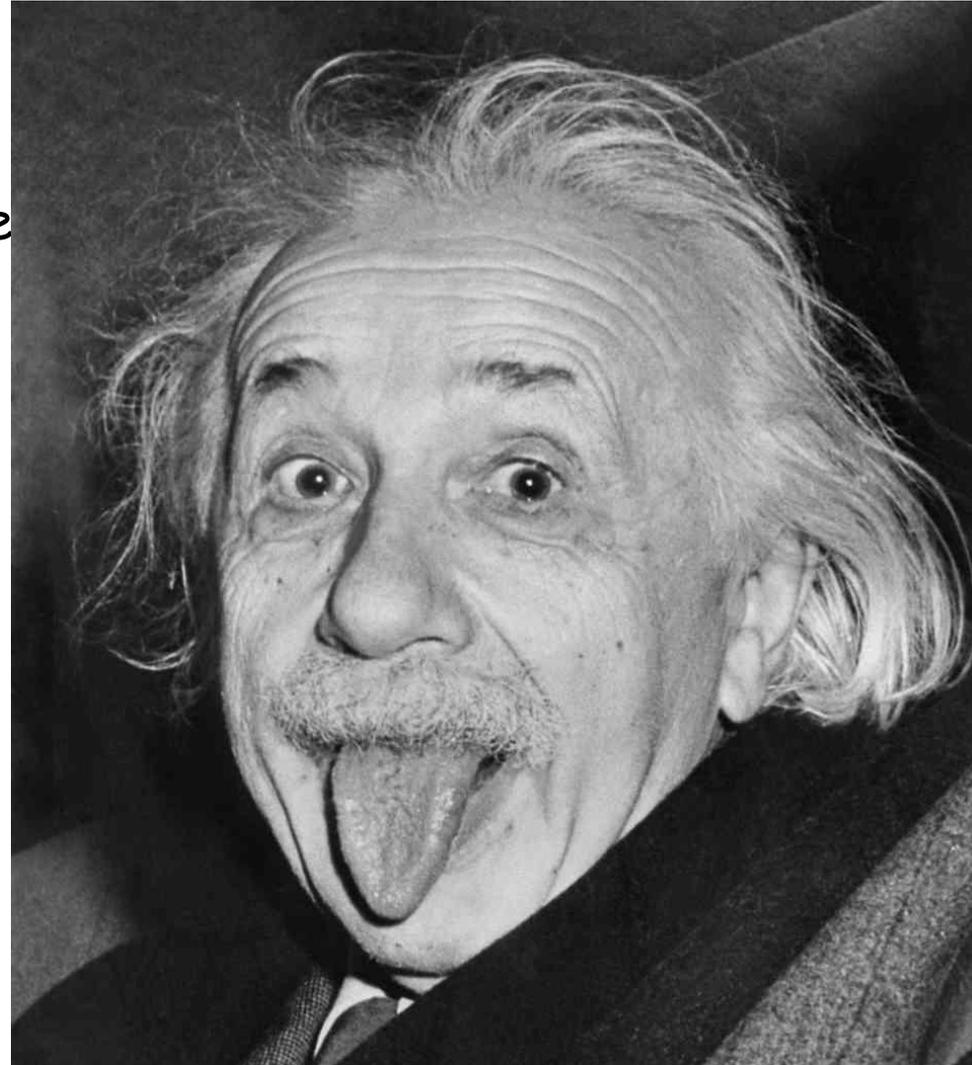


## La luce è sia onda sia corpuscolo

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*.

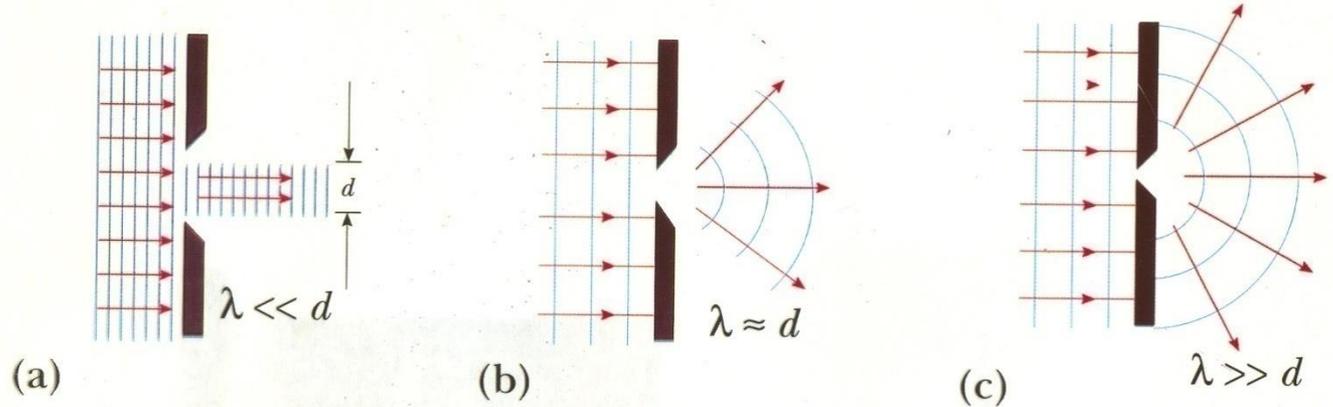
Oggi si ritiene che i modelli siano tutti e due validi, nel senso che descrivono caratteristiche diverse della luce.

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



# Ottica ondulatoria

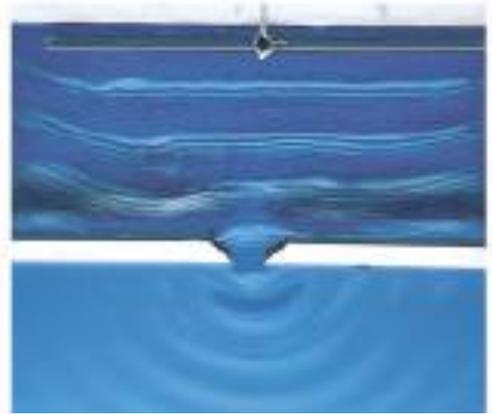
Quando lungo il percorso della luce vi sono fenditure ed ostacoli con dimensioni dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda incidente gli effetti non sono spiegabili con l'ottica geometrica ma solo con l'ottica ondulatoria di cui l'ottica geometrica è un caso particolare.



Limite dell'ottica geometrica (raggi luminosi)

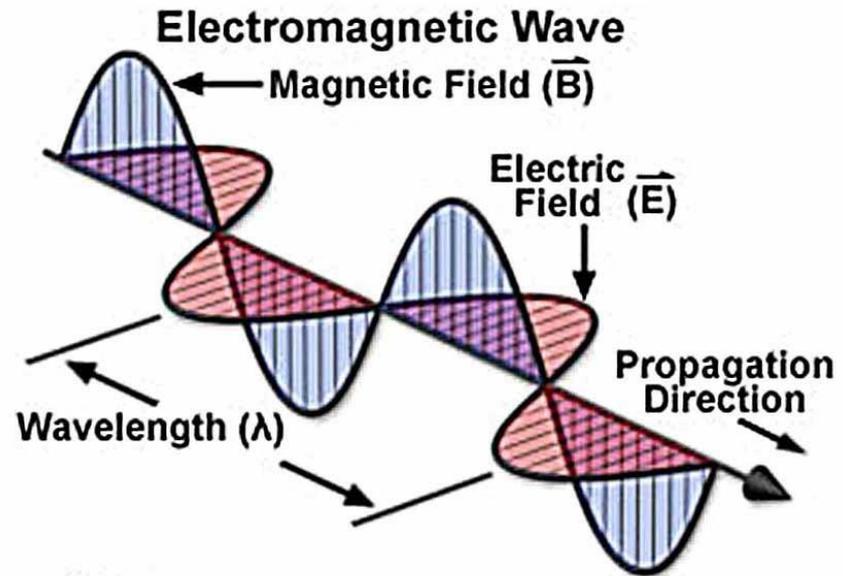
Condizioni per l'ottica ondulatoria

In analogia con 

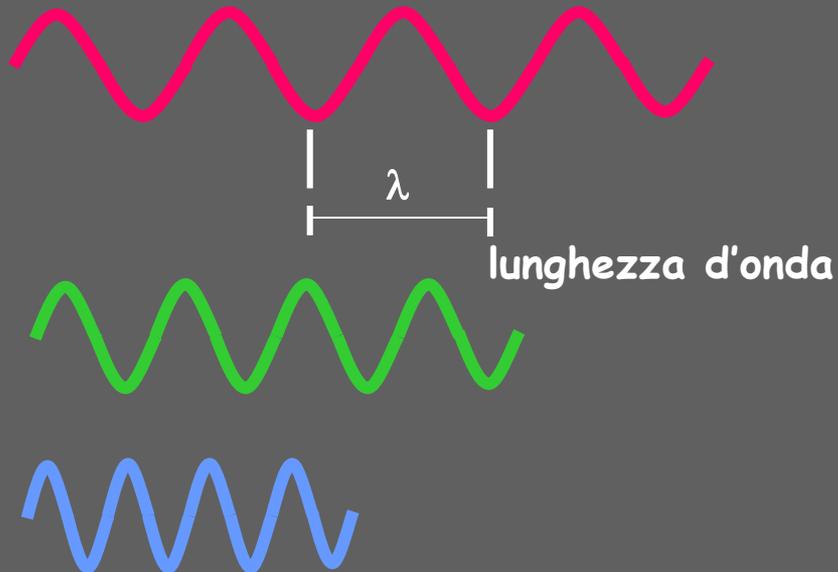


La teoria ondulatoria della luce interpreta il fenomeno della luce come **un'onda elettromagnetica**, ossia come una variazione periodica dei campi elettrico e magnetico nello spazio e nel tempo

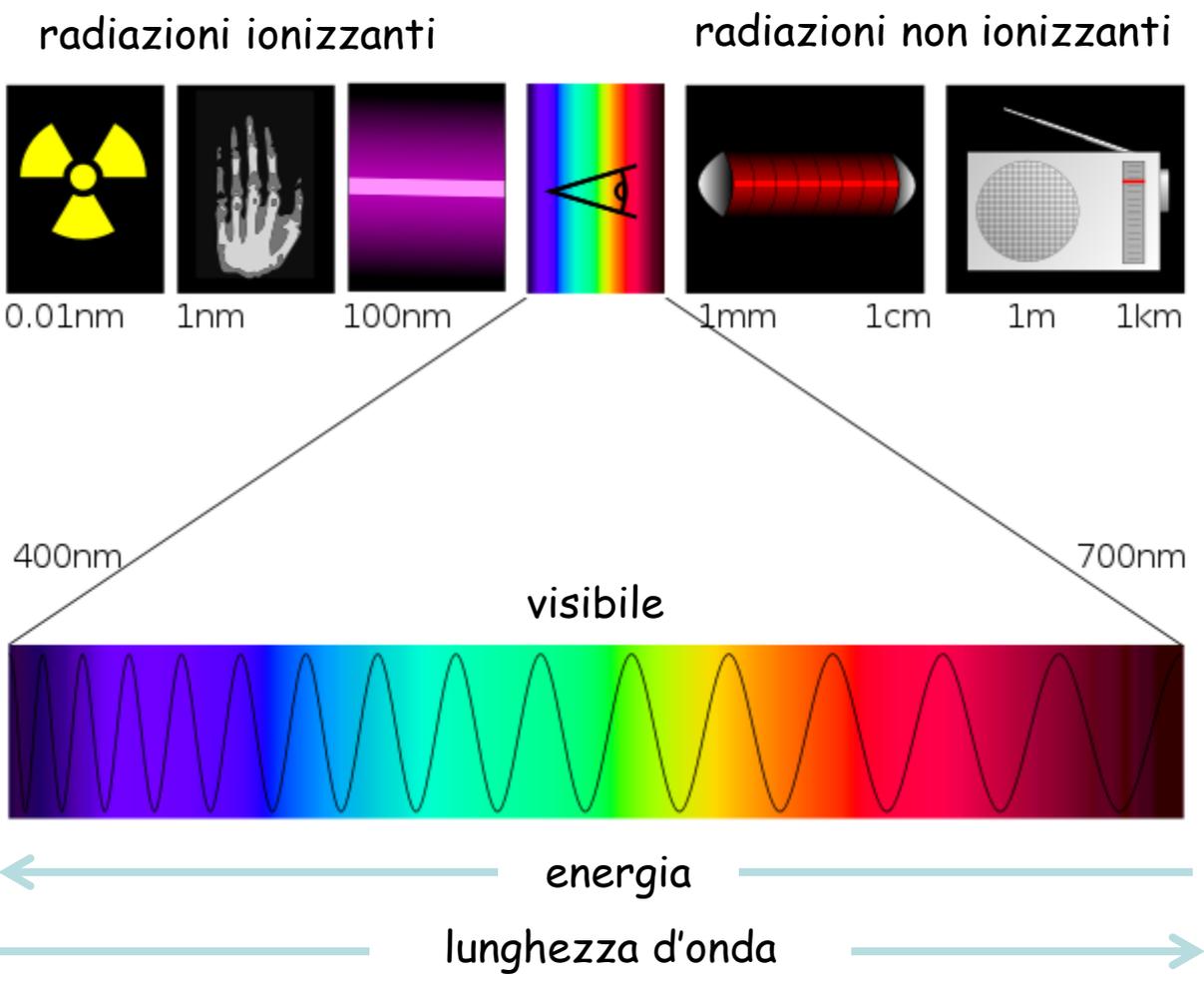
## Luce come fenomeno ondulatorio



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

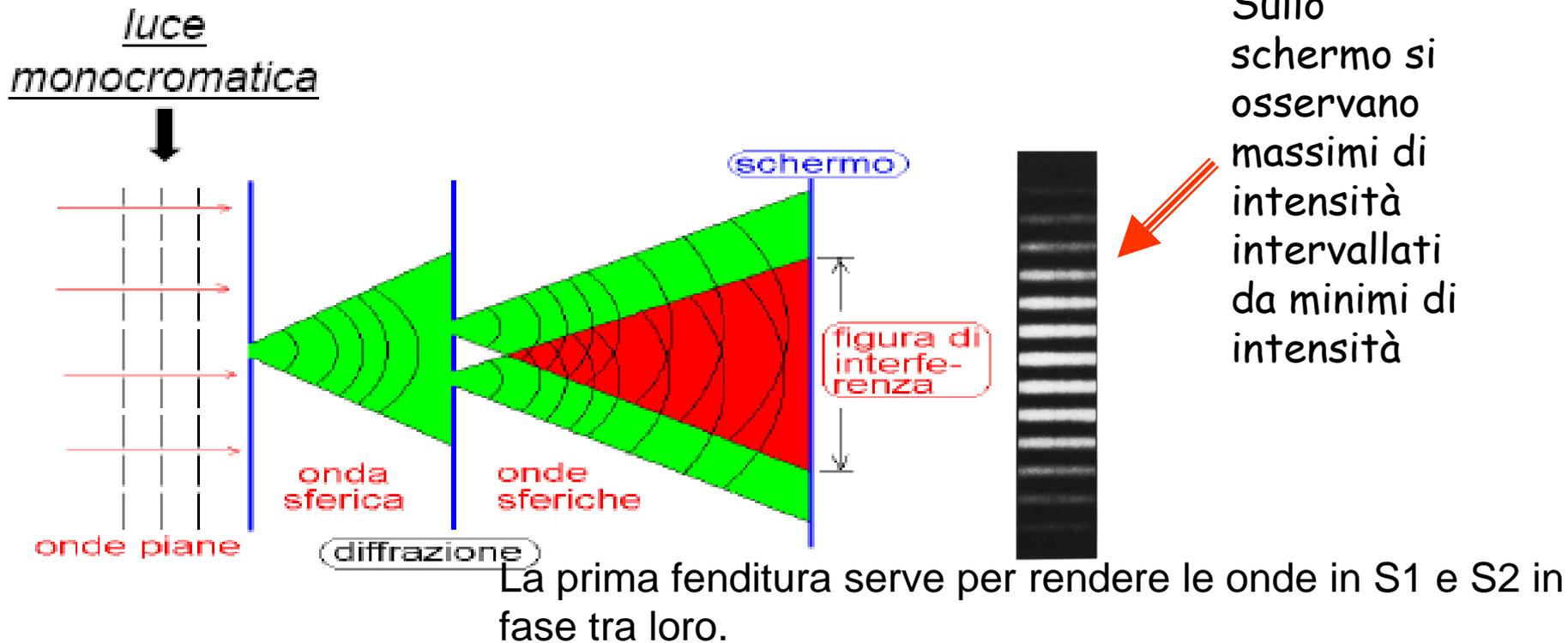


$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$



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:



# Interferenza

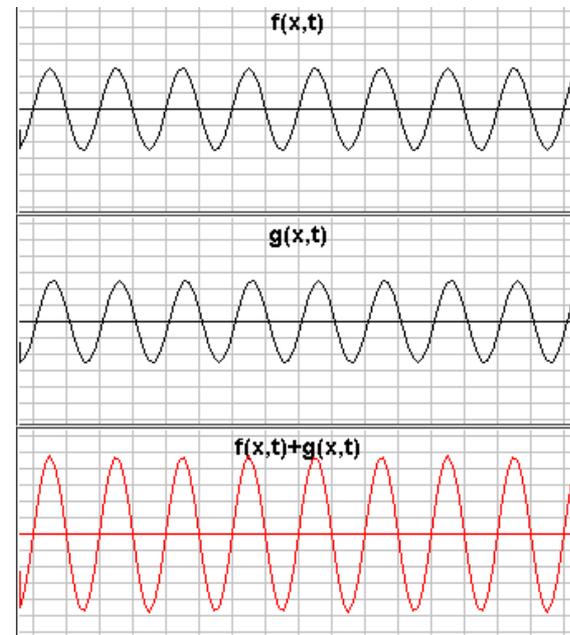
Sovrapposizione in un punto dello spazio di due o più onde.



# Interferenza

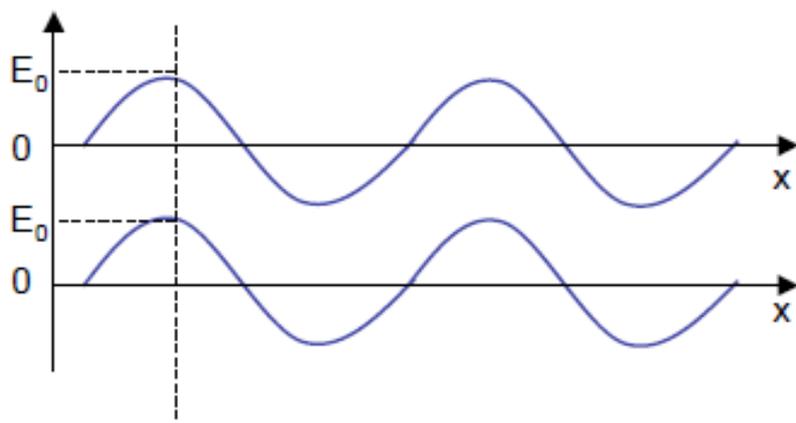
Il fenomeno dell'interferenza si osserva in vari campi della Fisica:  
onde acustiche,  
onde meccaniche sulla superficie di un liquido,  
onde luminose etc.

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

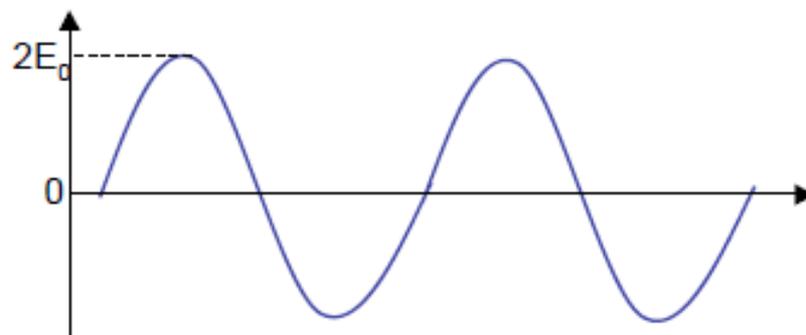


Due onde della stessa natura che si incontrano nello stesso punto dello spazio interagiscono e generano una perturbazione di ampiezza pari alla somma delle loro ampiezze

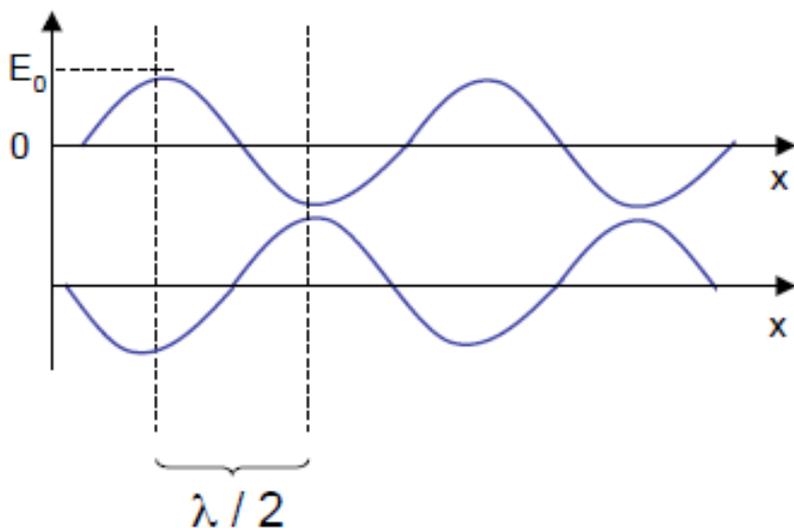
Onde in fase



interferenza costruttiva

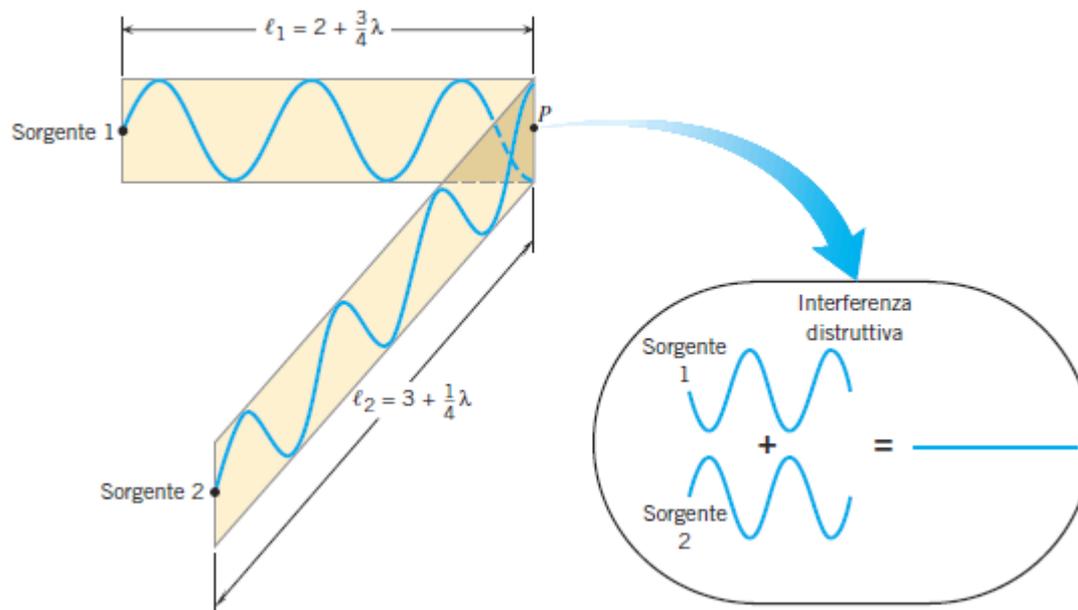
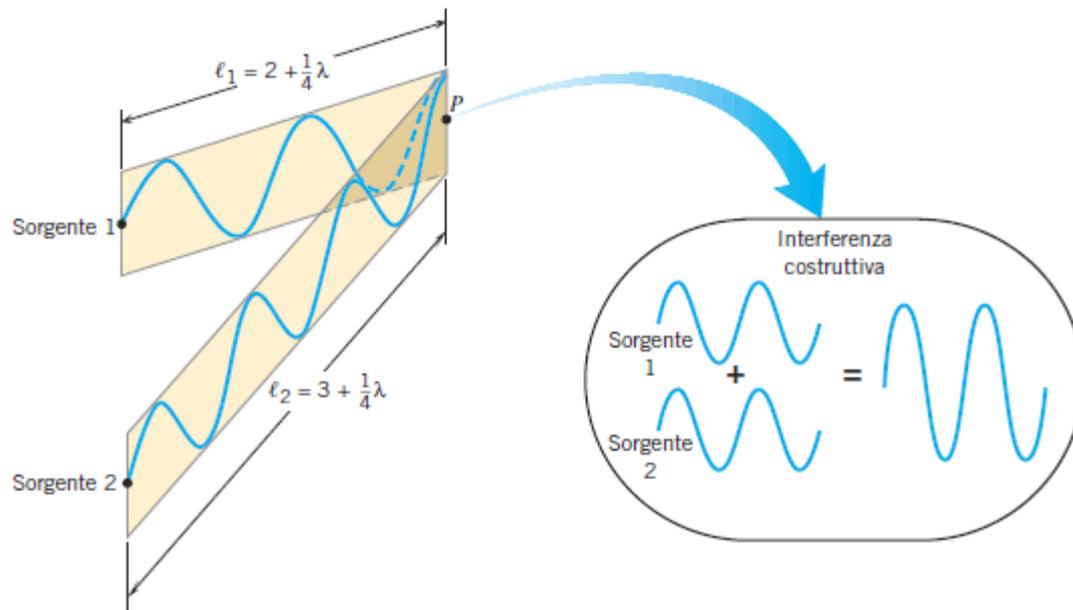


Onde sfasate di  $\lambda / 2$



interferenza distruttiva

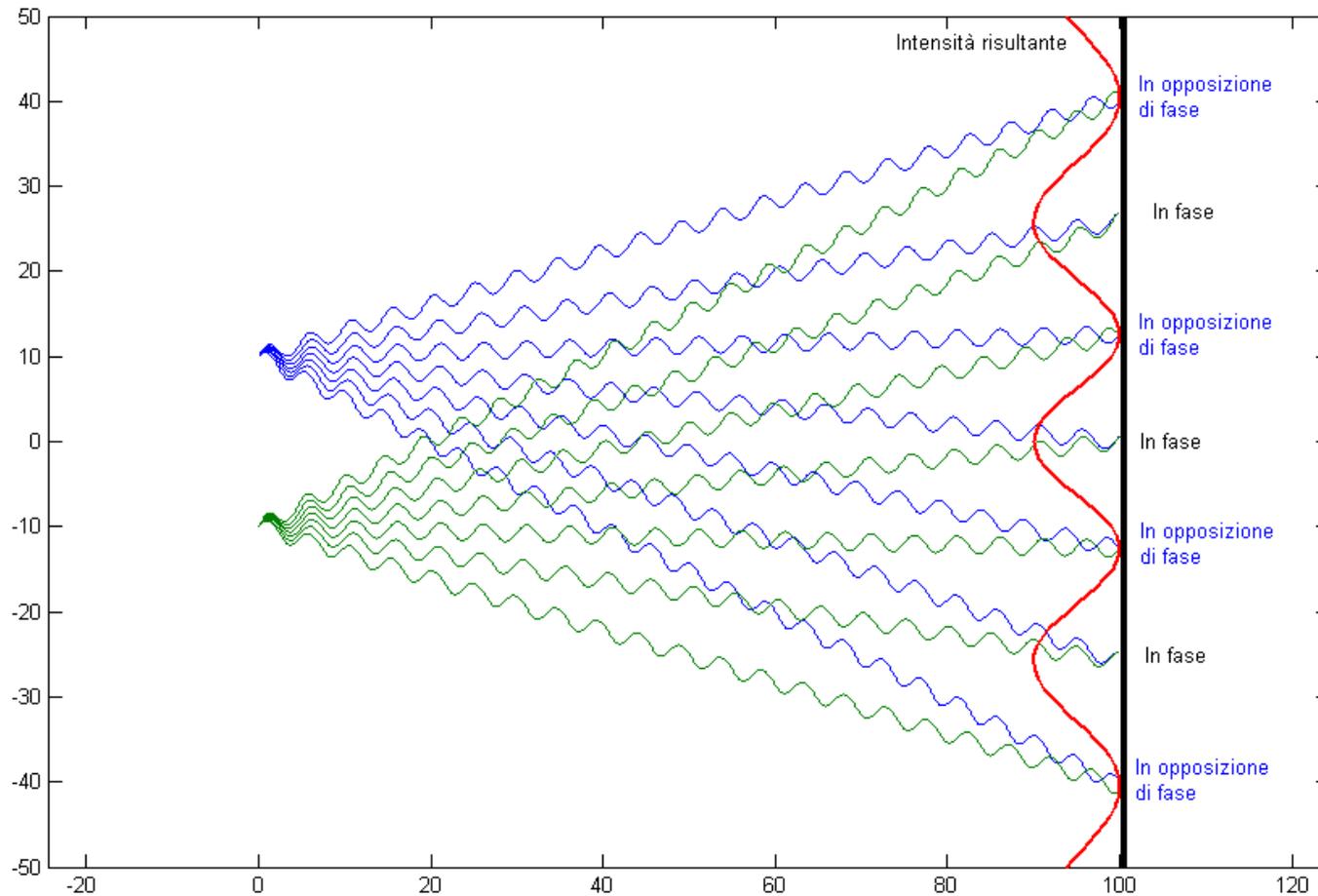




# Interferenza tra due onde elettromagnetiche

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

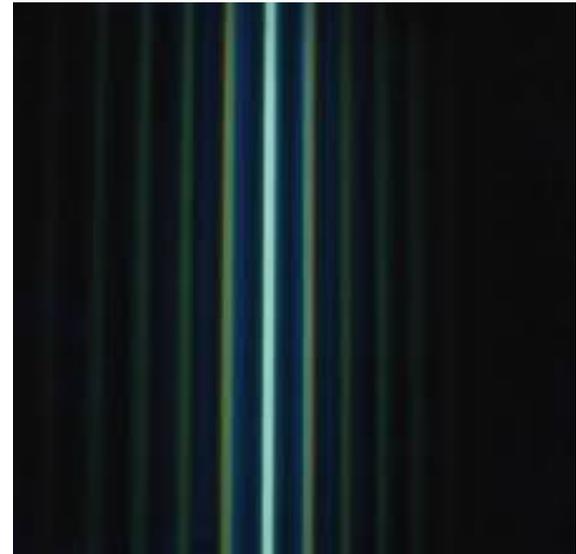
- Se la differenza di cammino ottico è pari a  $m\lambda$ , le onde si sommano (interferenza costruttiva).
- Se la differenza di cammino ottico è pari a  $(m+1/2)\lambda$ , le onde si sottraggono (interferenza distruttiva).



## Diffrazione da una fenditura

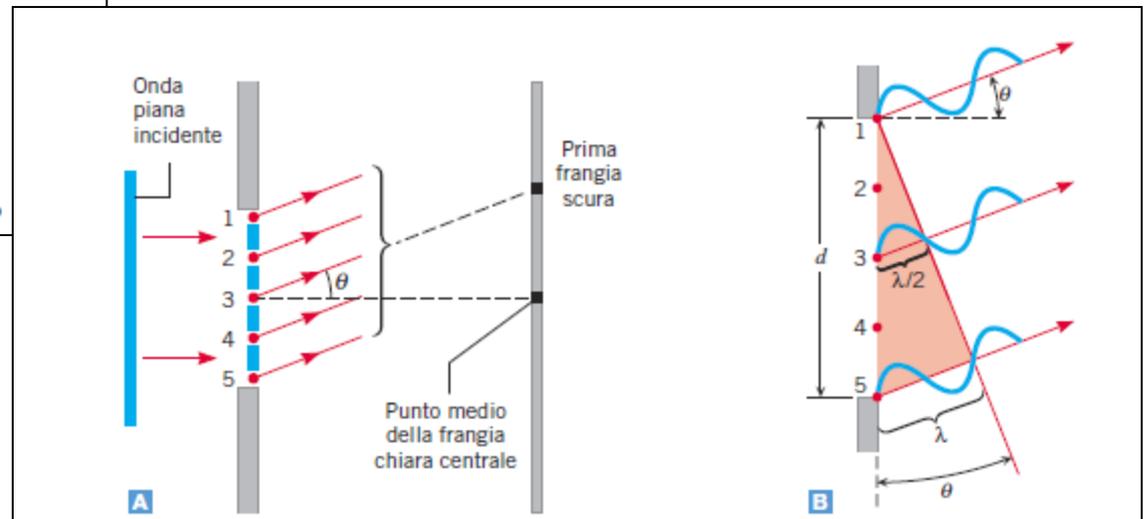
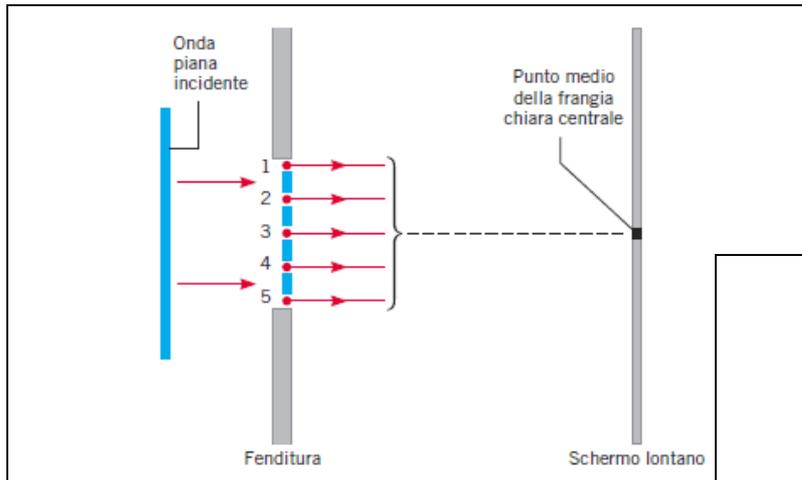
Quando un raggio di luce attraversa una piccola apertura, si osservano delle frange alternate di luce o buio, piuttosto che una macchia luminosa.

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.



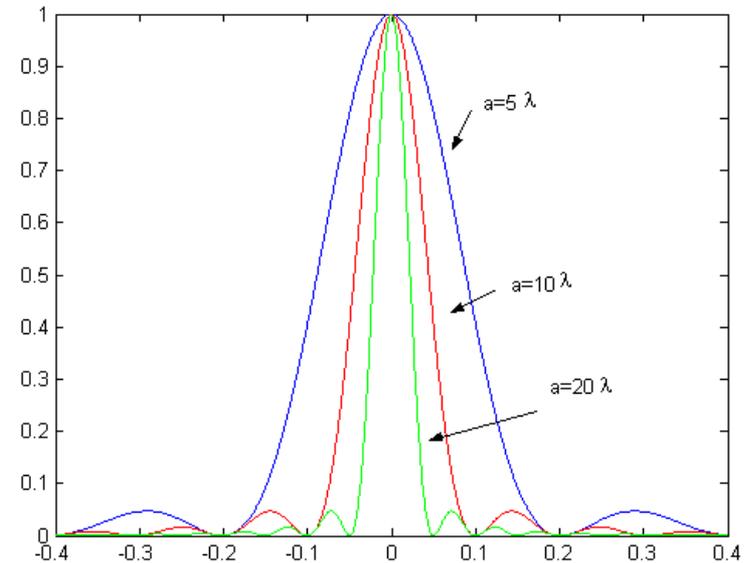
# PRINCIPIO DI HUYGENS

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.

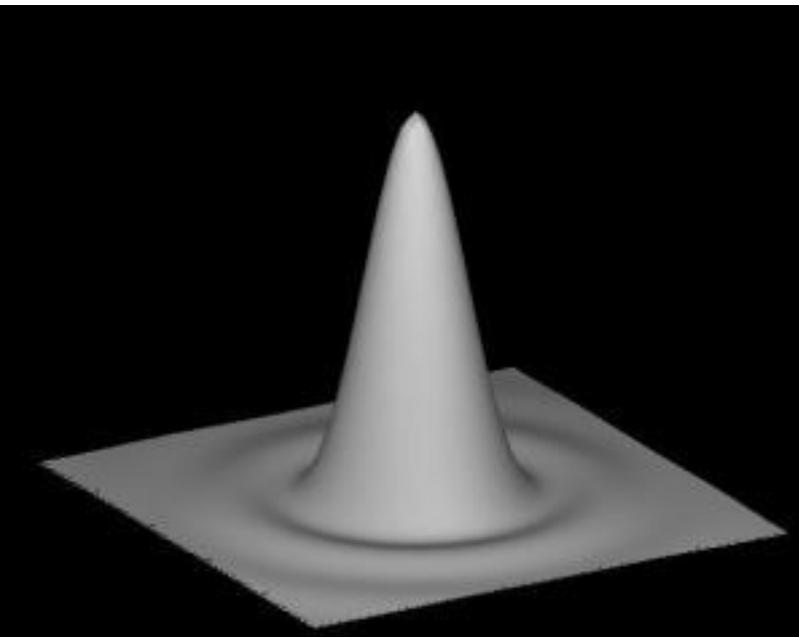
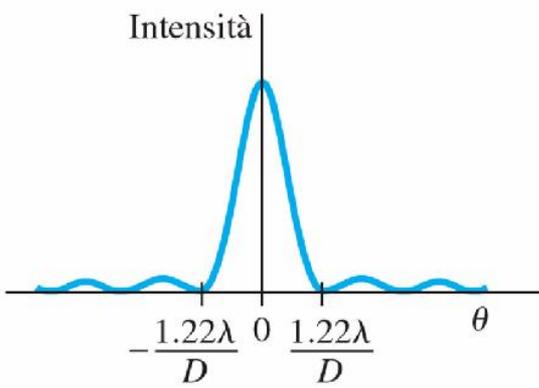


La figura di diffrazione si allarga man mano che la fenditura si stringe mentre si verifica che se l'apertura è abbastanza grande, allora l'intensità luminosa è concentrata intorno al massimo centrale. Cio' vuol dire essenzialmente che la maggior parte della radiazione prosegue con la stessa direzione 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.

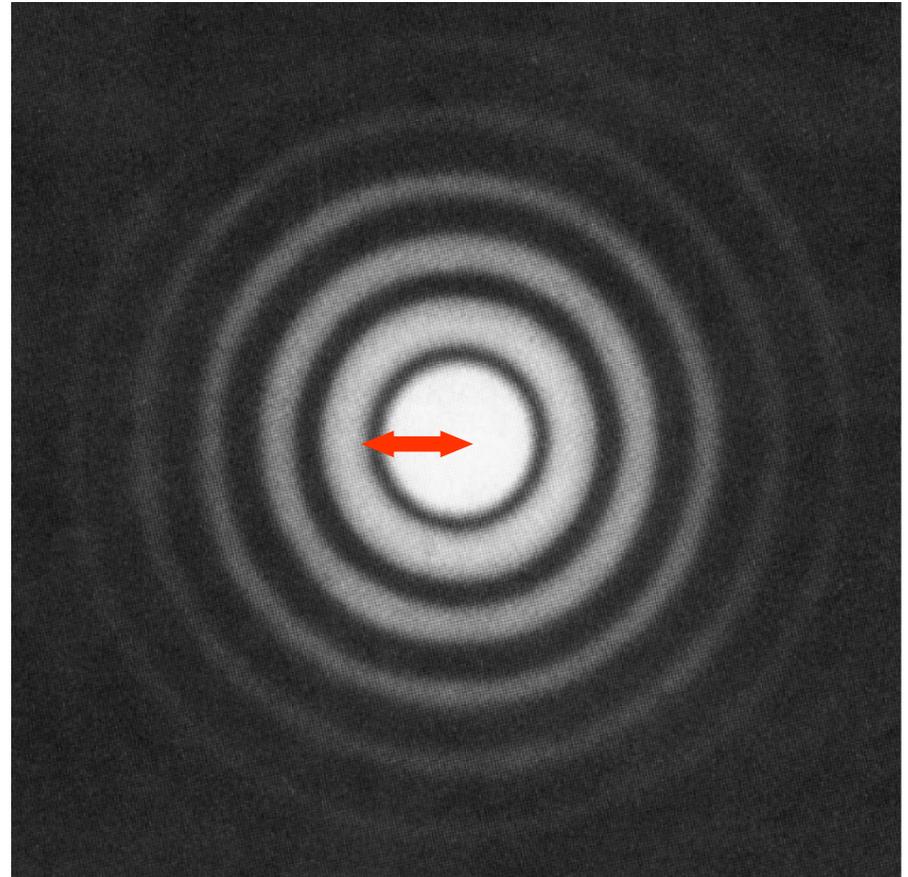


# Figura di diffrazione da apertura circolare



Prima frangia scura

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



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

### **Strumenti a disposizione:**

Banco ottico

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

Fenditure

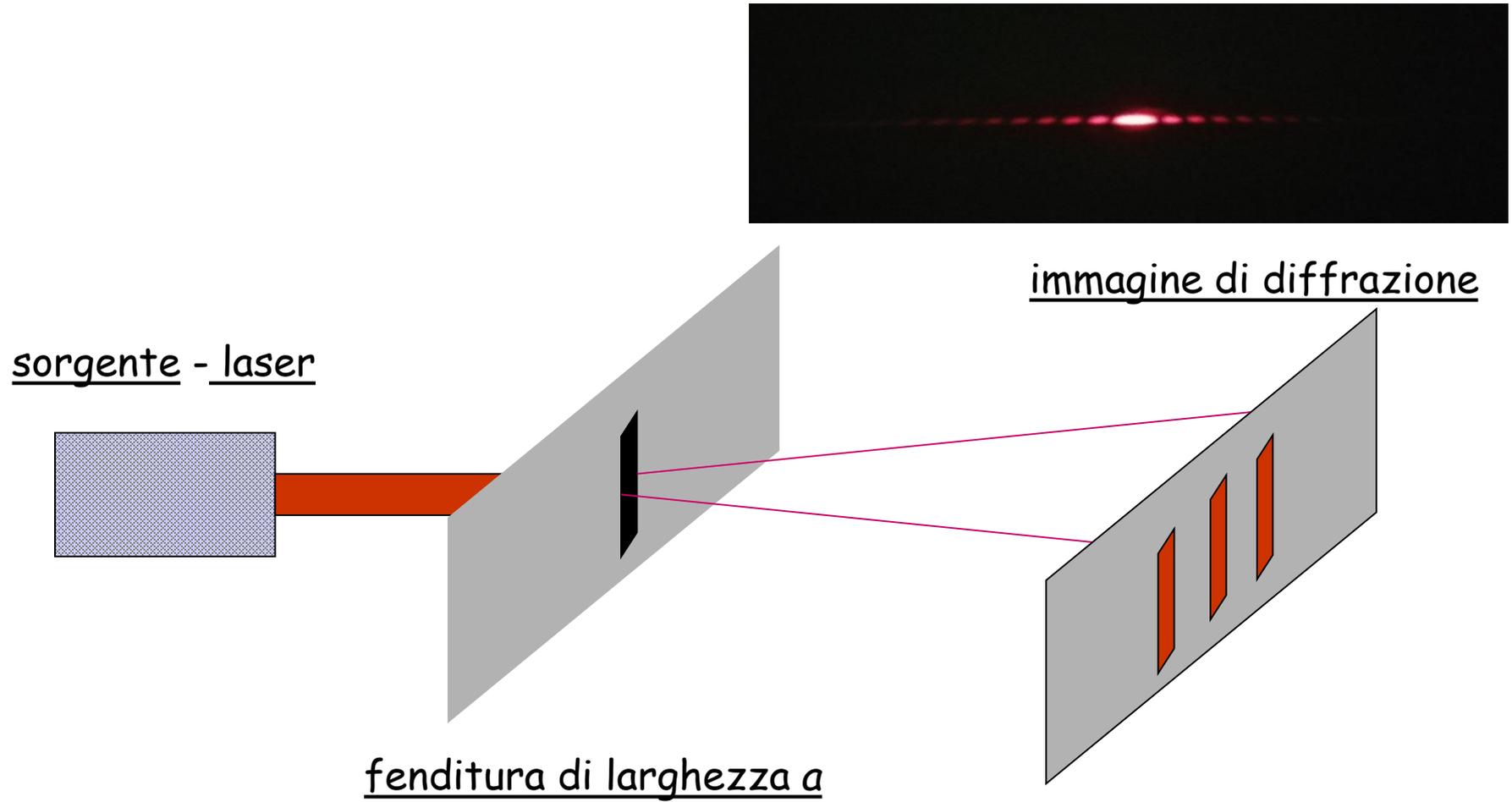
Schermo

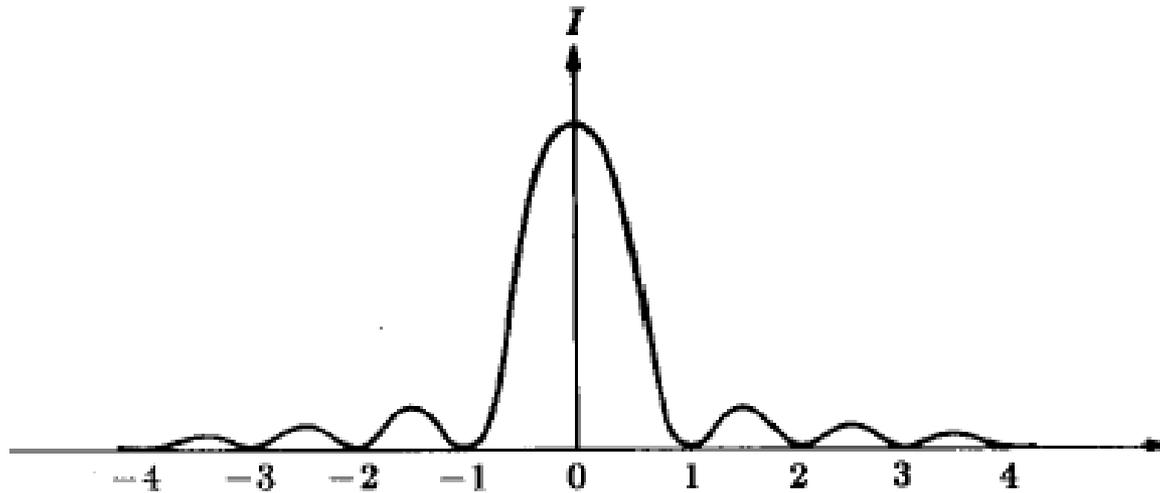
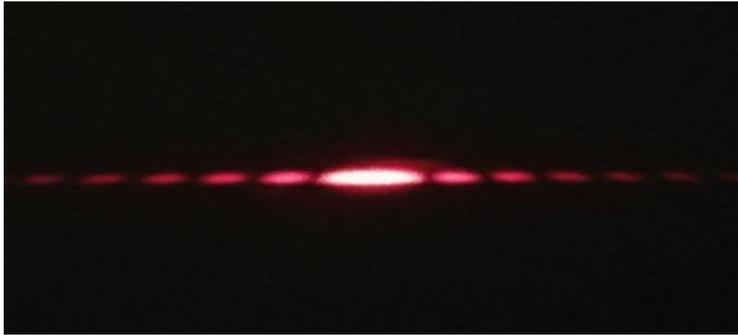
Carta millimetrata

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

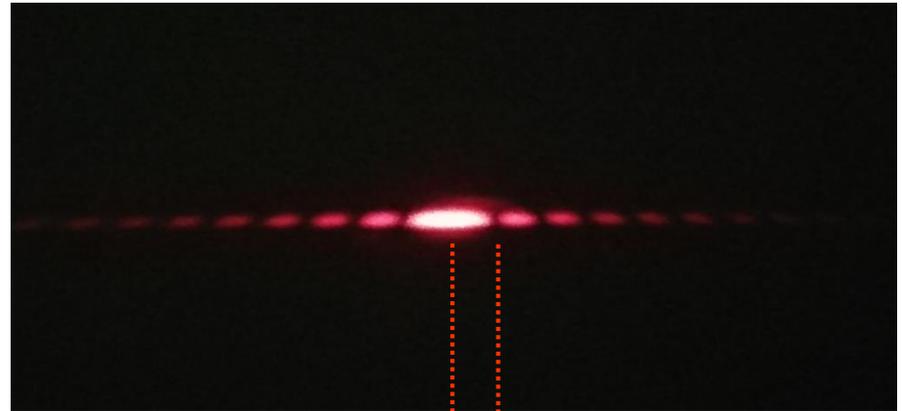
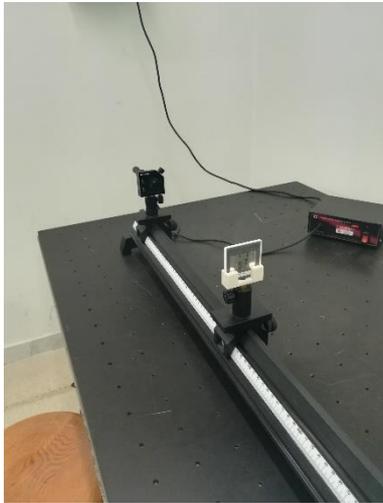
$y$ =distanza del  $k$ -esimo minimo rispetto al massimo centrale

$L$ =distanza fenditura-schermo

$a$ =ampiezza della fenditura

$\lambda$ =lunghezza d'onda della luce

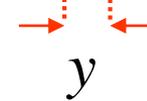
$$y = \frac{kL\lambda}{a}$$



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



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

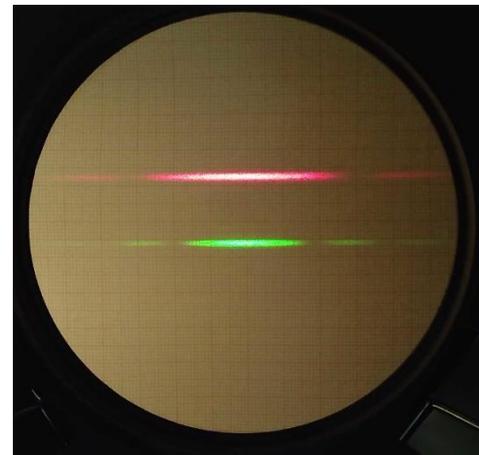
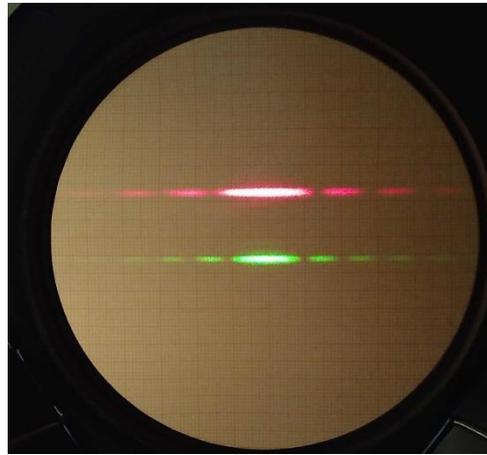
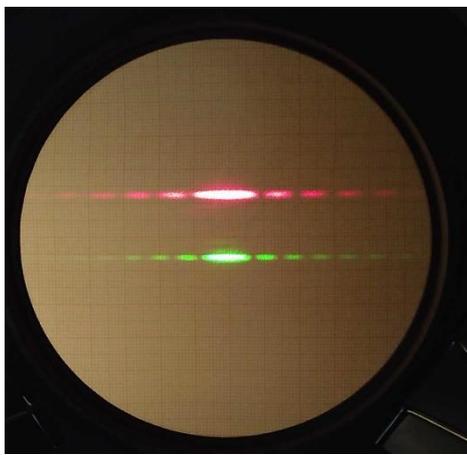
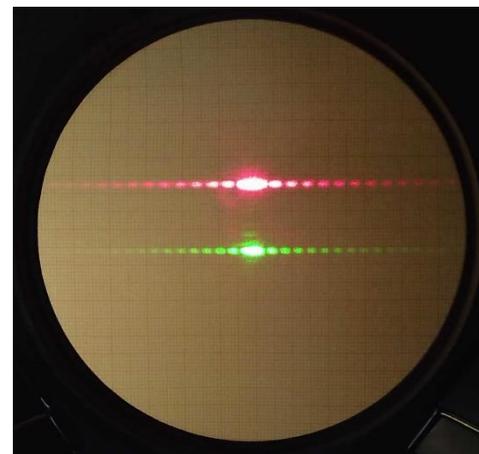
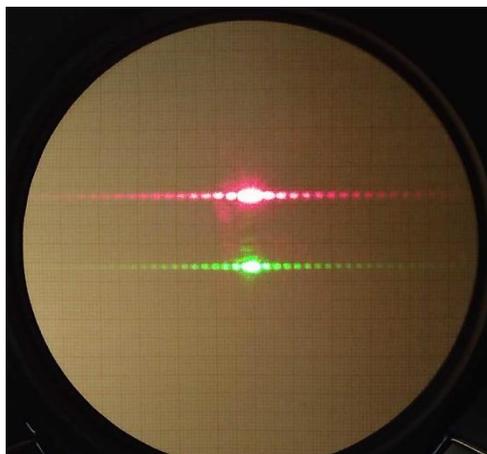
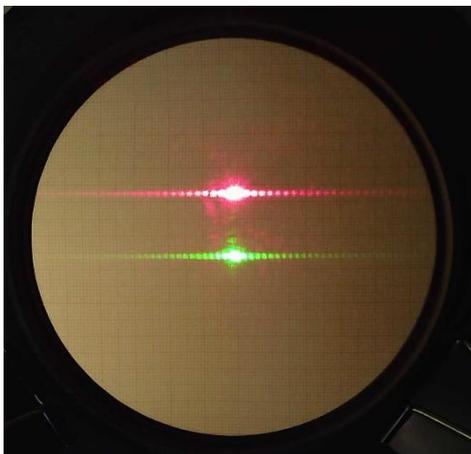
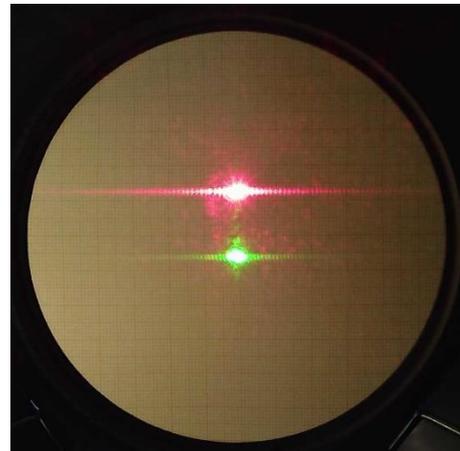
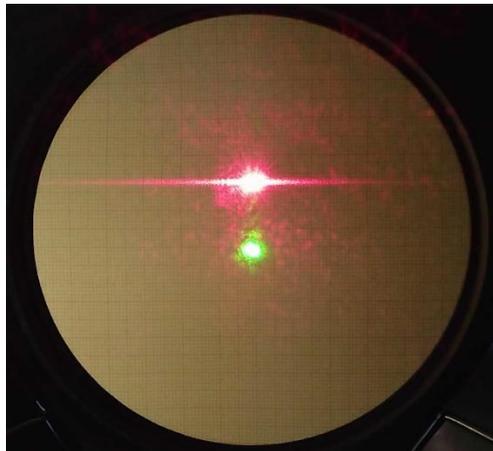


... e  $\Delta a$ ?

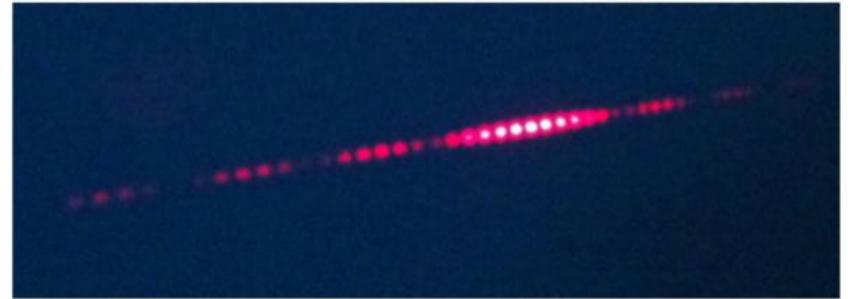
$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta y}{y}$$



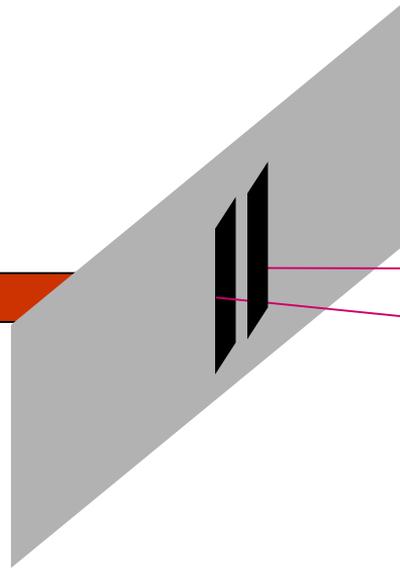
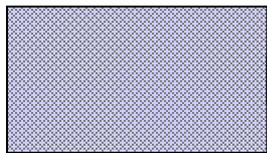
$$\Delta a = \left( \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta y}{y} \right) a =$$



Obiettivo della misura è la stima dell'ampiezza delle fenditure e della loro separazione

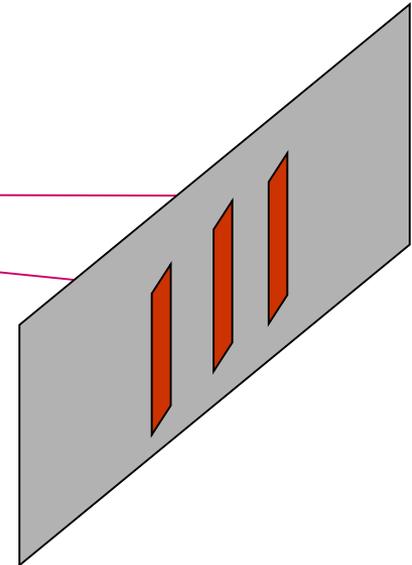


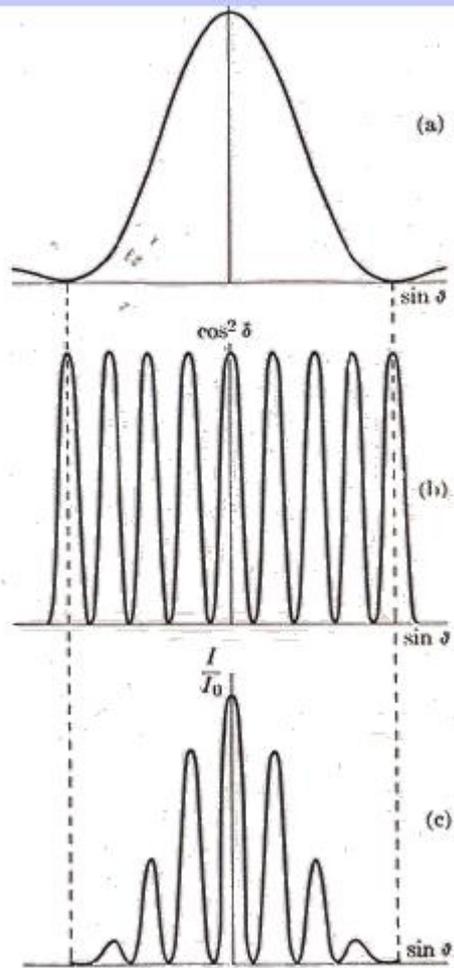
sorgente - laser



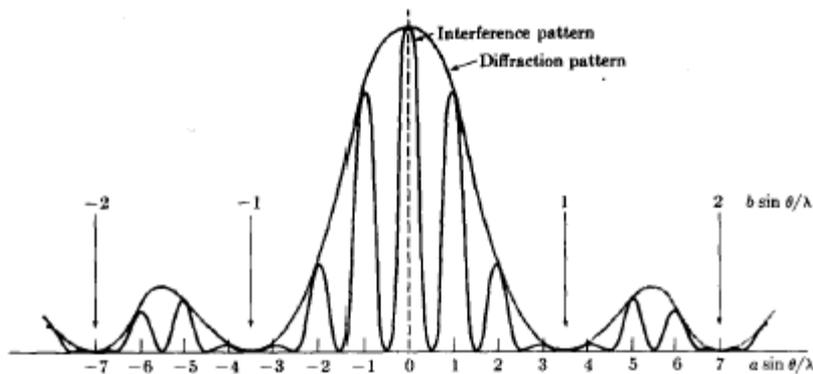
fenditure di larghezza  $a$   
e distanza  $h$

immagine di diffrazione





Distribuzione dell'intensita' delle frange di interferenza prodotte da due fenditure

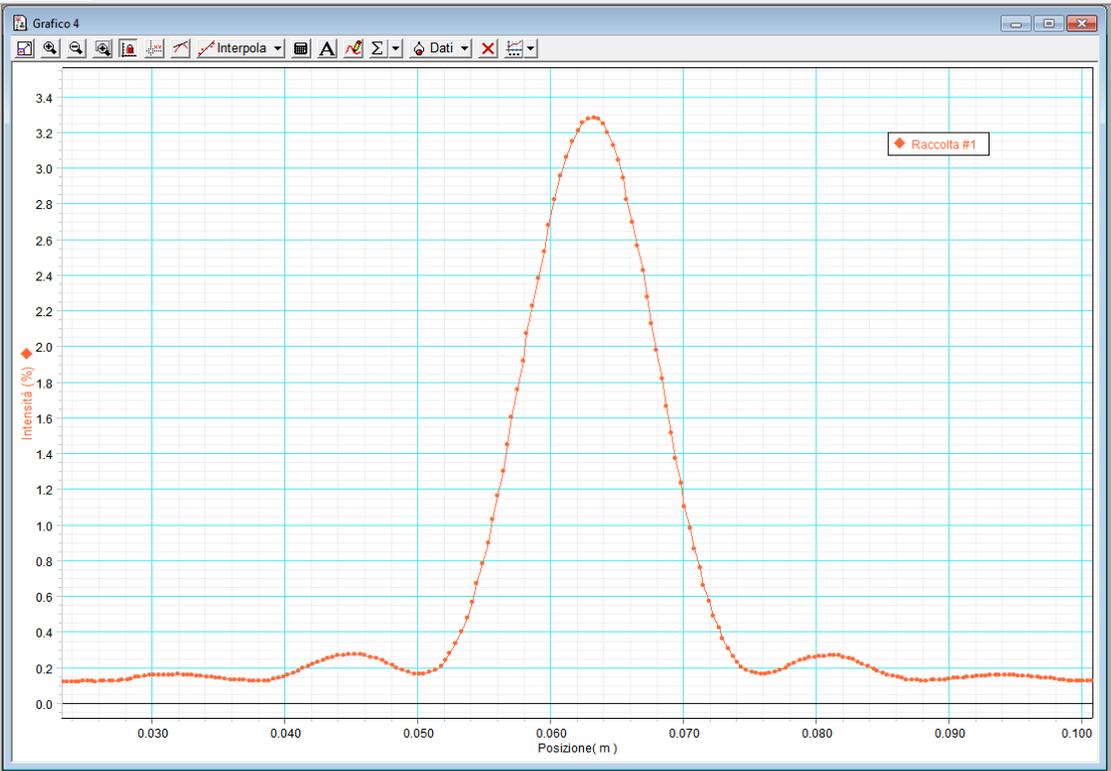


**Dati**

- Posizione, Can 1 e 2 ( m )
  - Raccolta #1
  - Raccolta #4
- Intensità luminosa, Can A ( % max )
  - Raccolta #1
  - Raccolta #4
- Intensità luminosa, Can A in funzione di Posizione, Can 1
  - Raccolta #1
  - Raccolta #4
- Intensità = livellare(5.x)
  - Raccolta #1
  - Raccolta #4

**Visualizzazioni**

- Analizzatore audio
- FFT
- Grafico
  - Grafico 1
  - Grafico 2
  - Grafico 3
  - Grafico 4
- Istogramma
- Oscilloscopio
- Quaderni di laboratorio
- Sound Creator
- Tabella
- Visore analogico
- 314 Visore digitale

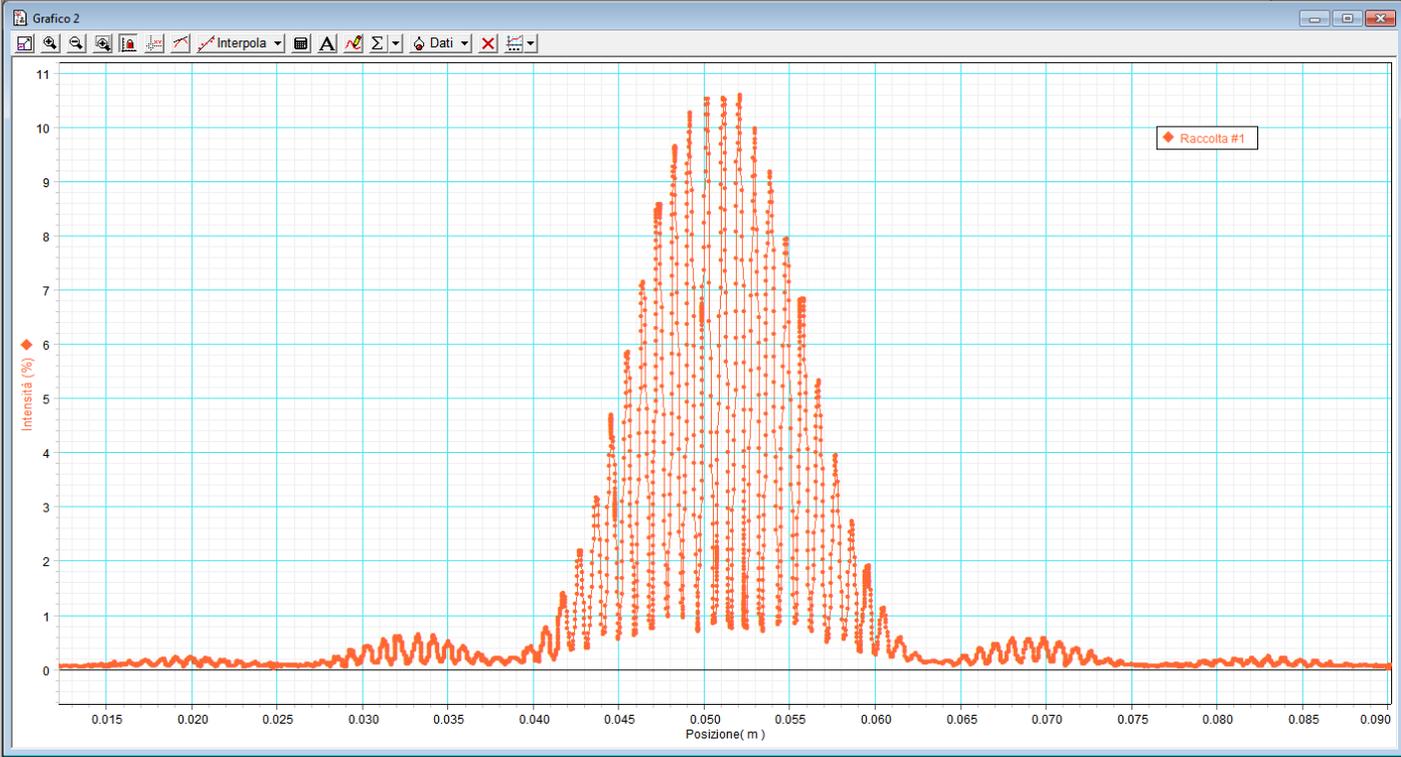


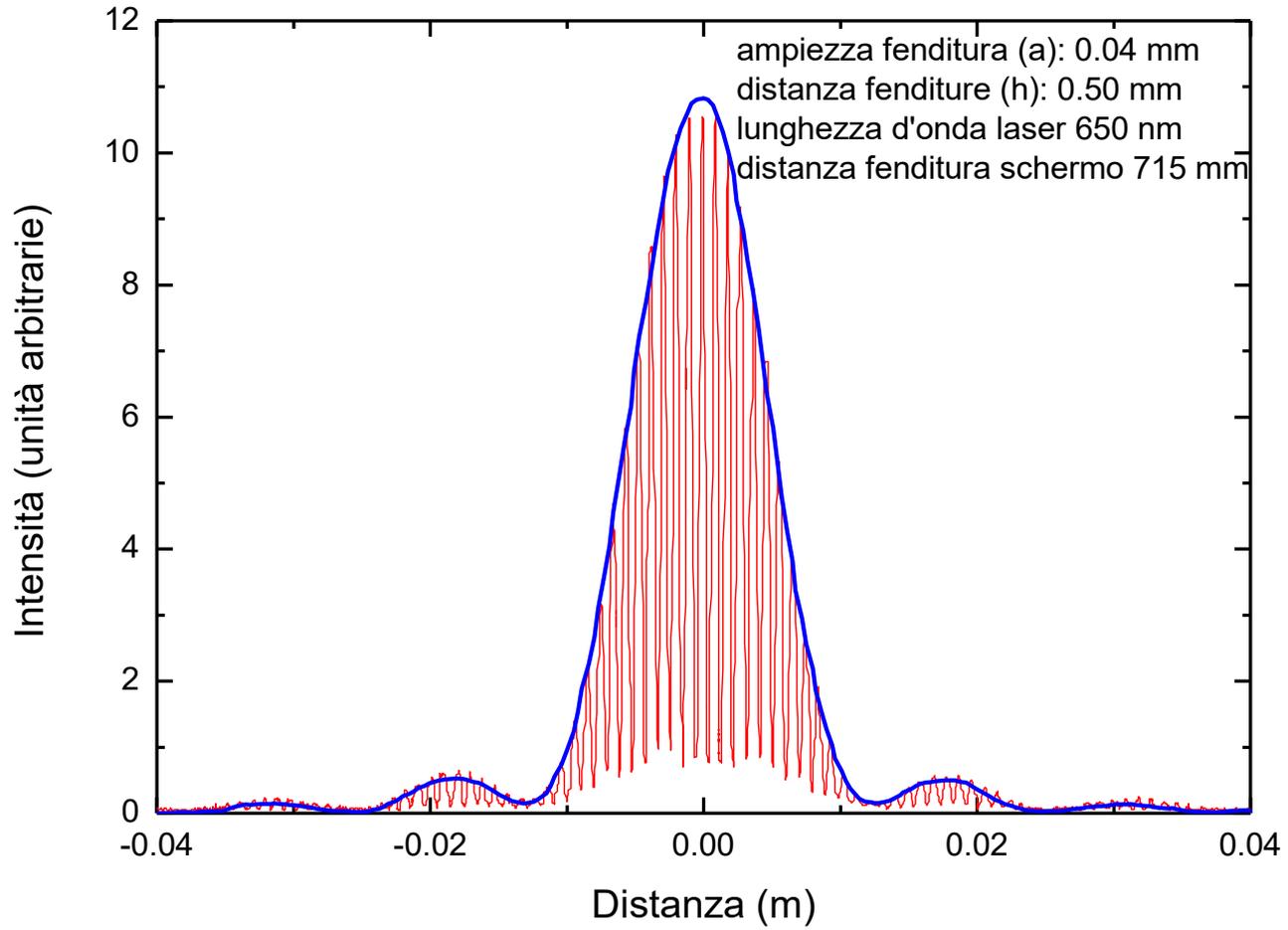
**Dati**

- Posizione, Can 1 e 2 ( m )
  - Raccolta #1
- Intensità luminosa, Can A ( % max )
  - Raccolta #1
- Intensità luminosa, Can A in funzione di Posizione, Can 1
  - Raccolta #1
- Intensità = livellare(5,x)
  - Raccolta #1

**Visualizzazioni**

- Analizzatore audio
- FFT
- Grafico
  - Grafico 1
  - Grafico 2
- Istogramma
- Oscilloscopio
- Quaderni di laboratorio
- Sound Creator
- Tabella
- Visore analogico
- Visore digitale





## Figura di interferenza

$l$ =distanza del  $k$ -esimo massimo rispetto al massimo centrale

$L$ =distanza fenditura-schermo

$h$ =distanza fra i centri delle fenditure

$\lambda$ =lunghezza d'onda della luce

$$l = \frac{nL\lambda}{h}$$

## Figura di diffrazione

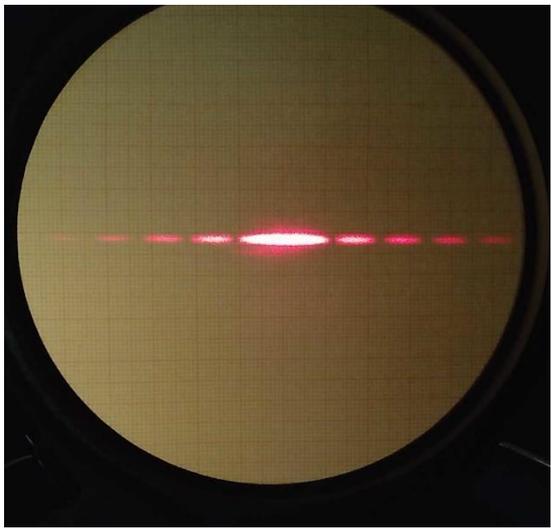
$y$ =distanza del  $k$ -esimo minimo rispetto al massimo centrale

$L$ =distanza fenditura-schermo

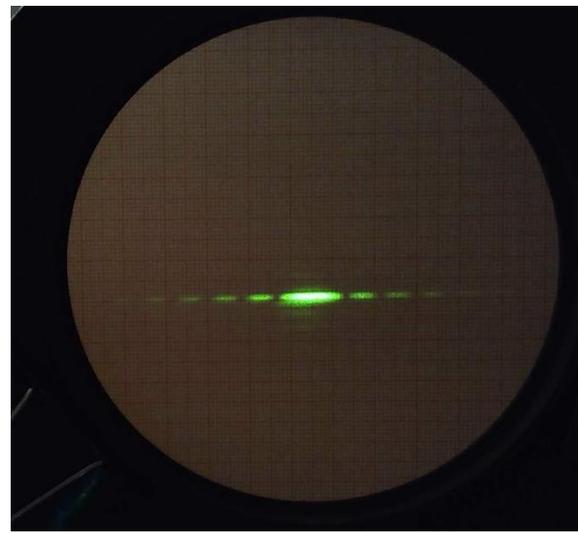
$a$ =ampiezza della fenditura

$\lambda$ =lunghezza d'onda della luce

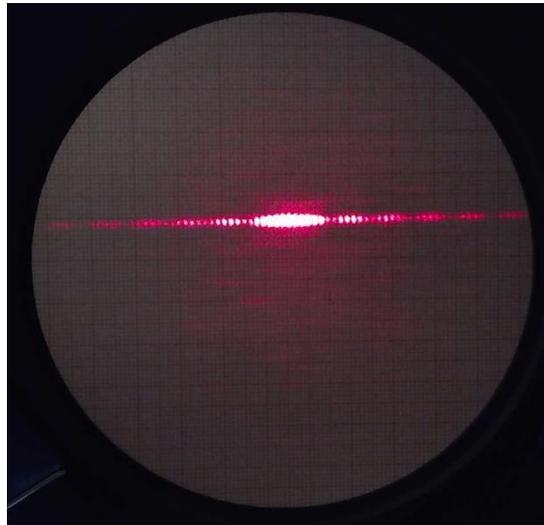
$$y = \frac{kL\lambda}{a}$$



ampiezza fenditura (a): ????? mm  
lunghezza d'onda laser 650 nm  
distanza fenditura schermo 230 mm



ampiezza fenditura (a): ????? mm  
lunghezza d'onda laser 532 nm  
distanza fenditura schermo 230 mm

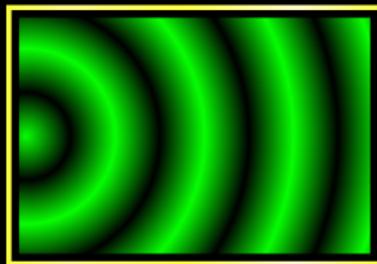


ampiezza fenditura (a): 0.15 mm  
distanza fenditure (h): 1.0 mm  
lunghezza d'onda laser 650 nm  
distanza fenditura schermo 230 mm

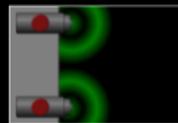
[https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_en.html)

← → ↻ [phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_en.html) 🔒 ☆ 🌐 ⋮

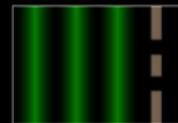
# Wave Interference



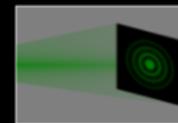
Waves



Interference



Slits



Diffraction

# Polarizzazione

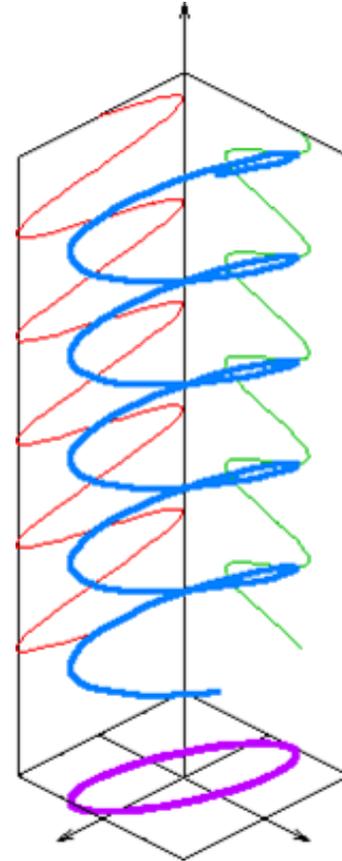
Il fenomeno della polarizzazione è una proprietà che specifica le direzioni del campo elettrico e del campo magnetico associati a un'onda elettromagnetica.

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

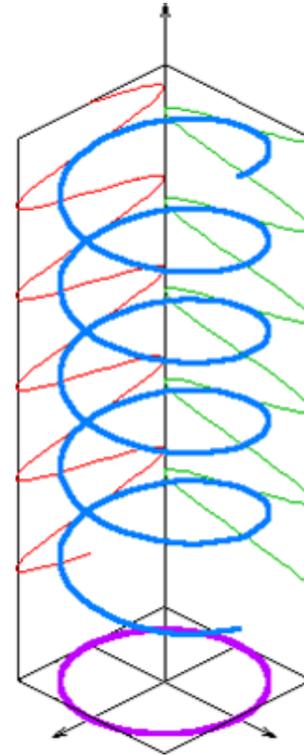
La luce naturale non possiede un particolare stato di polarizzazione. È, infatti, un'onda elettromagnetica il cui campo elettrico può vibrare in tutte le direzioni (onda luminosa non polarizzata)

# 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



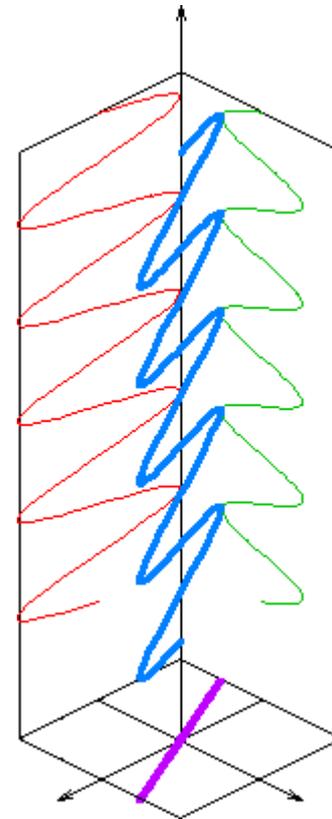
Nella polarizzazione **circolare** il vettore campo elettrico mantiene invariata la sua ampiezza e ruota uniformemente intorno al raggio. L'estremo del vettore campo elettrico esegue nel tempo un'elica circolare, che ha come asse la direzione di propagazione della luce



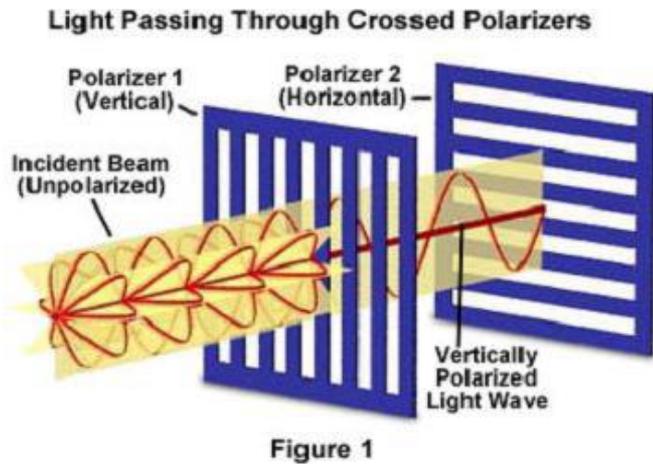
La polarizzazione **lineare** è caratterizzata dalla direzione del vettore campo elettrico costante nel tempo.

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.

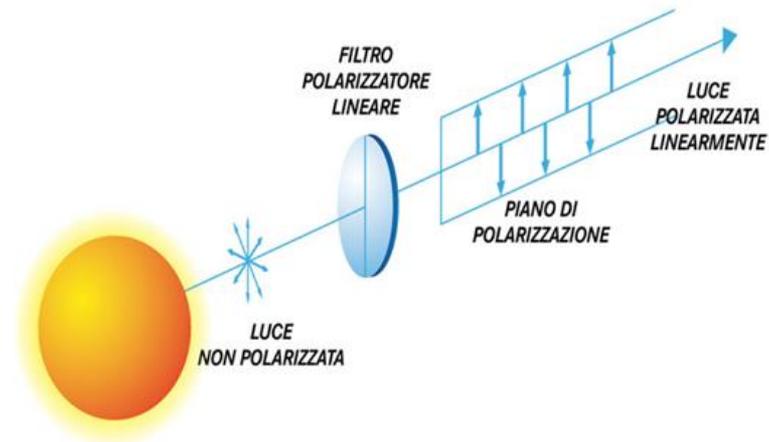
Pertanto l'estremo del vettore campo elettrico descrive nel tempo un segmento.

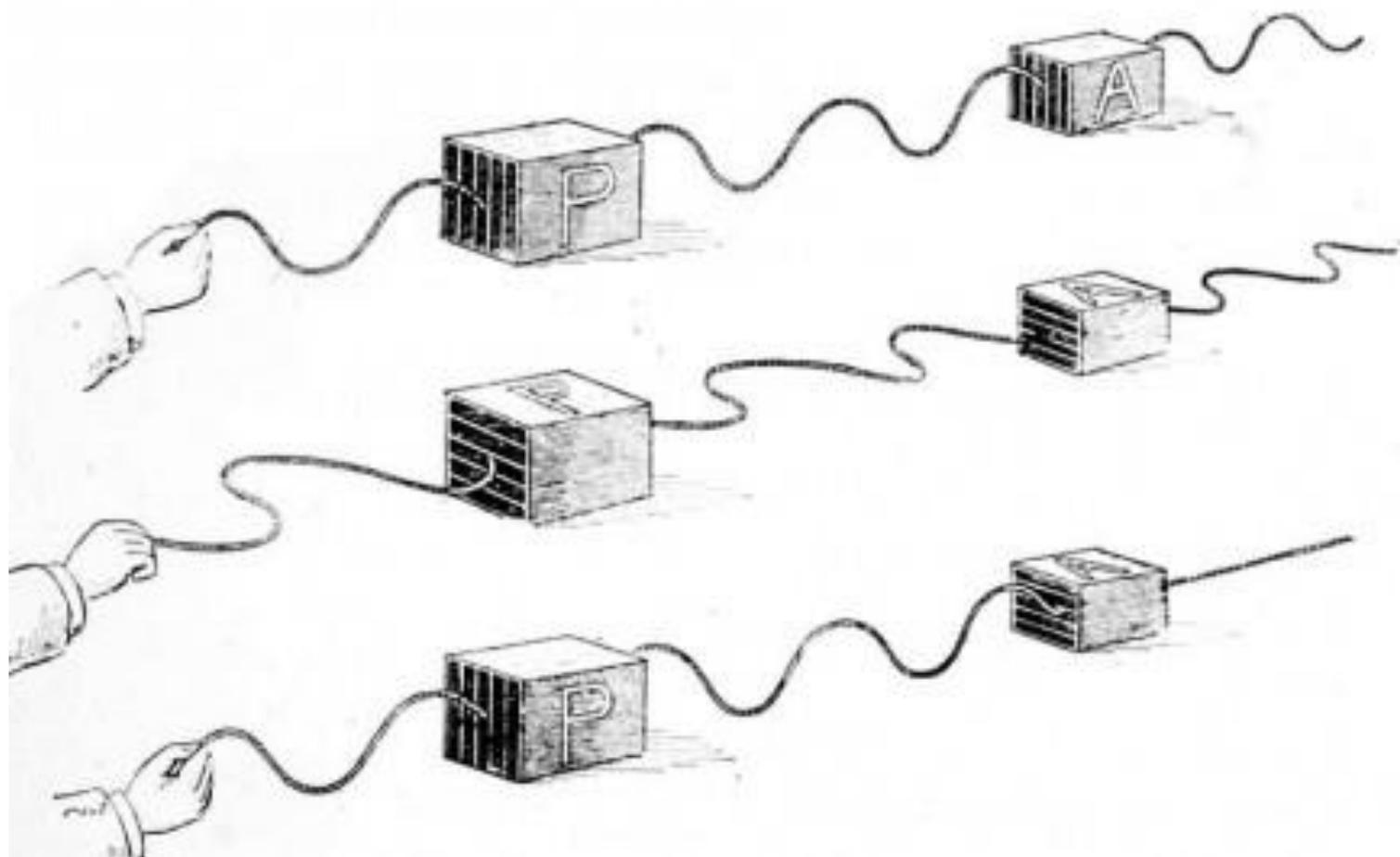


È possibile ottenere un fascio di luce polarizzata linearmente facendo passare il fascio inizialmente non polarizzato attraverso una lamina polarizzatrice che trasmette solo la componente del campo elettrico parallela ad una particolare direzione detta asse di trasmissione



POLARIZZAZIONE LINEARE





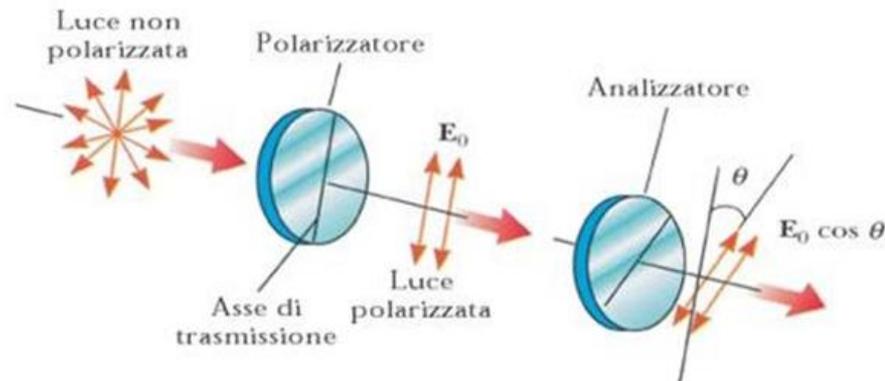
L'ampiezza del campo elettrico dell'onda trasmessa è:

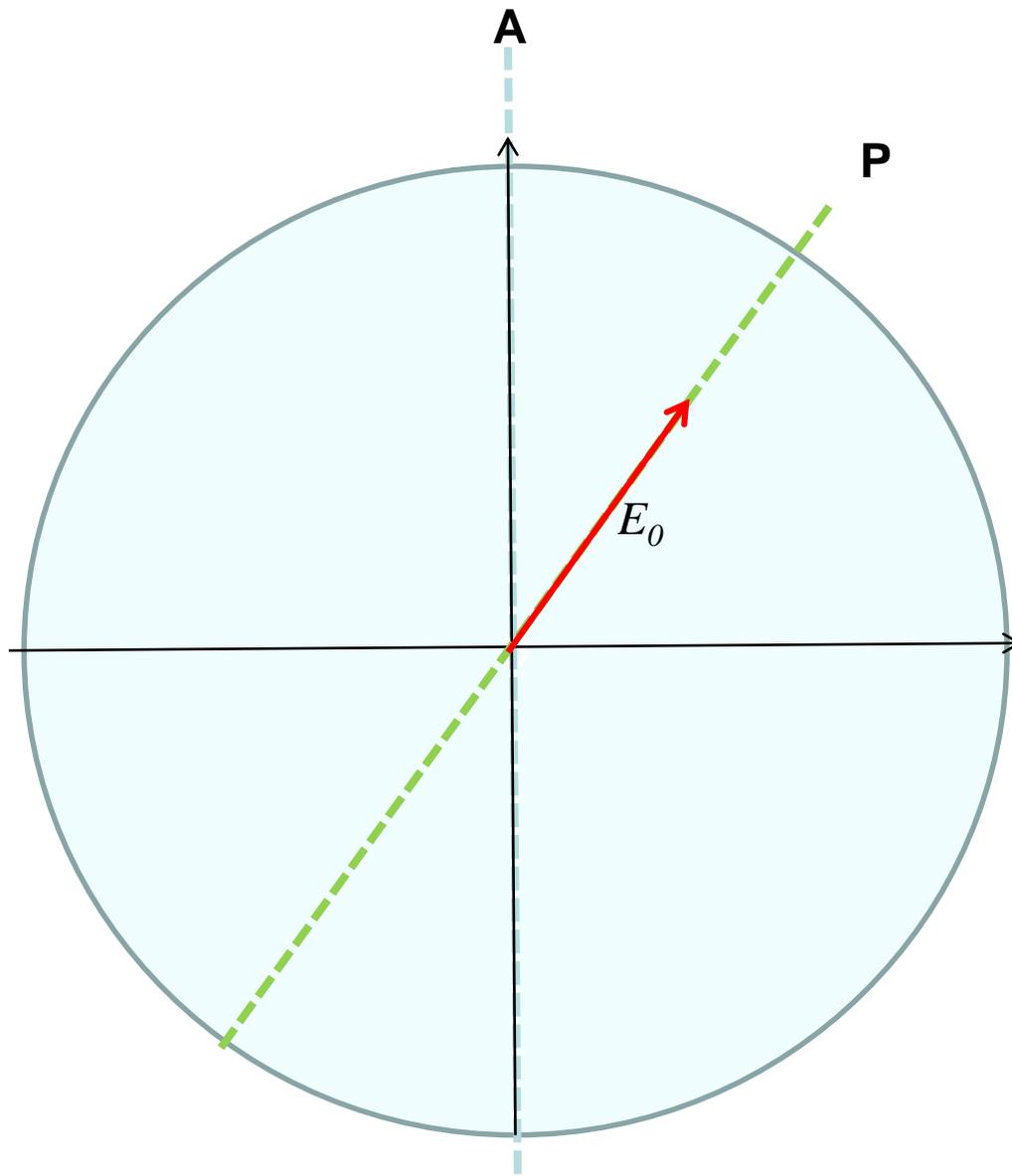
$$E_T = E_0 \cos \theta$$

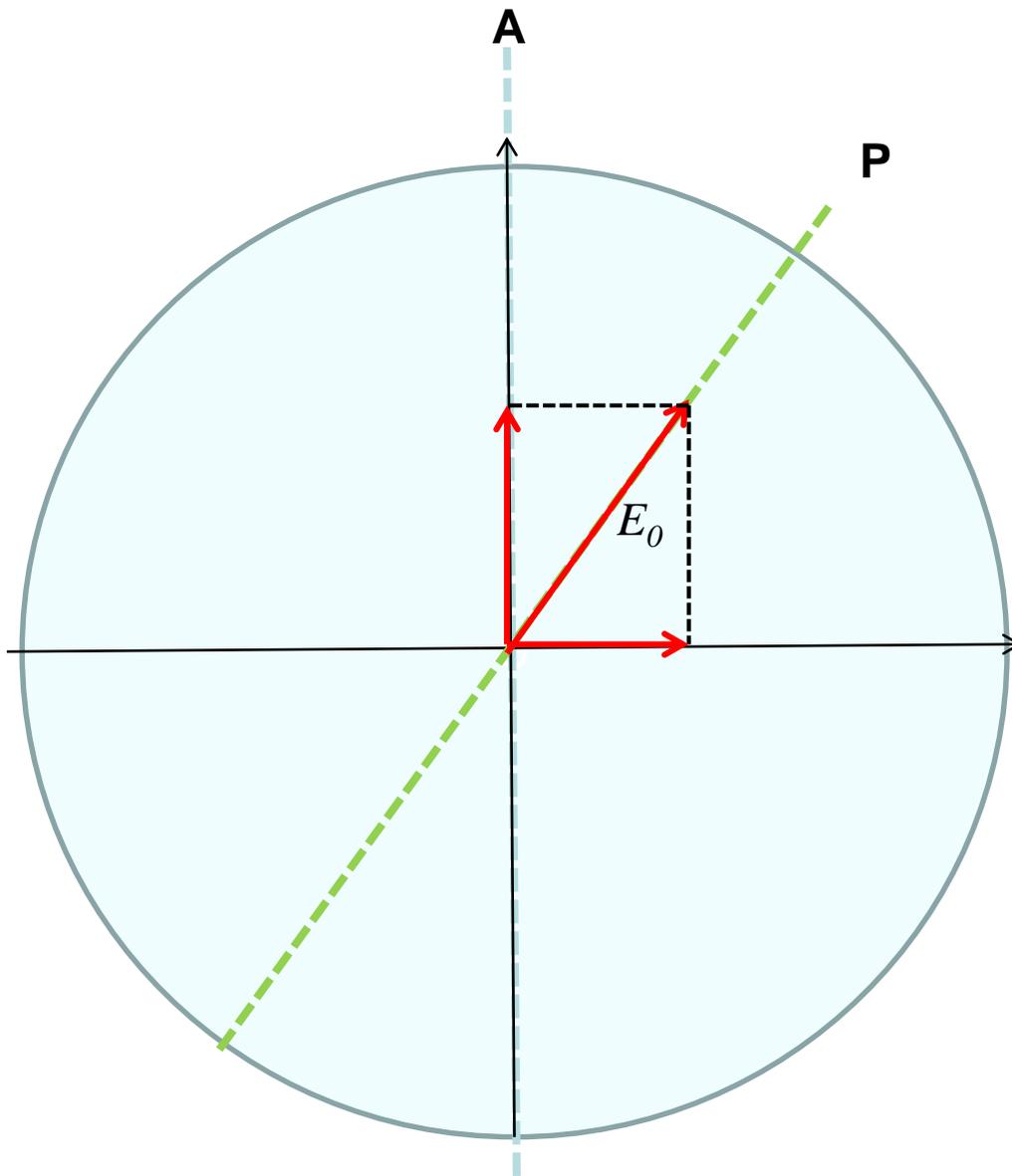
Poiché l'intensità (trasmessa) varia con il quadrato dell'ampiezza (trasmessa), l'intensità della luce polarizzata trasmessa dipenderà da  $\theta$  secondo la legge:

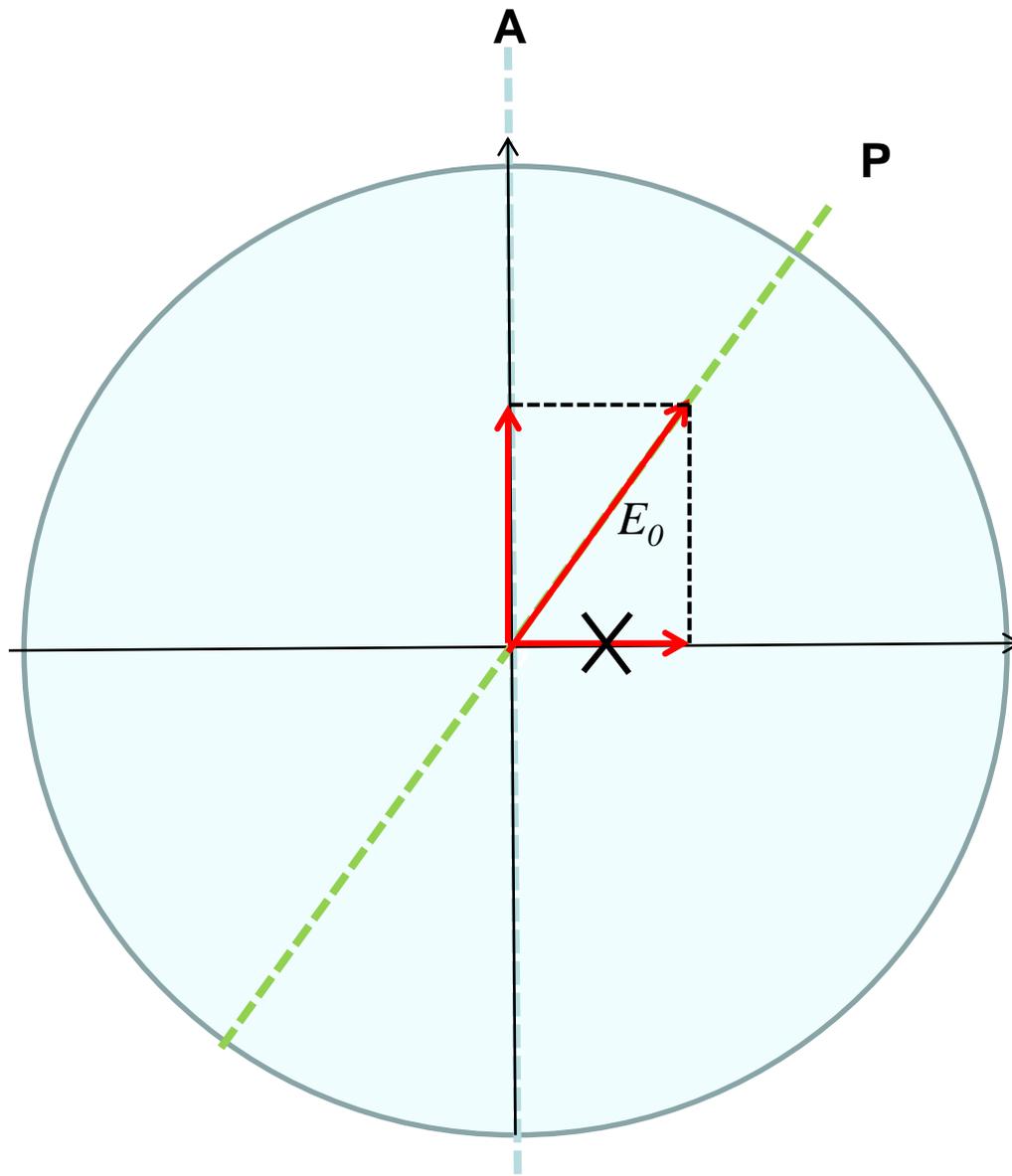
$$I_T = I_0 \cos^2 \theta$$

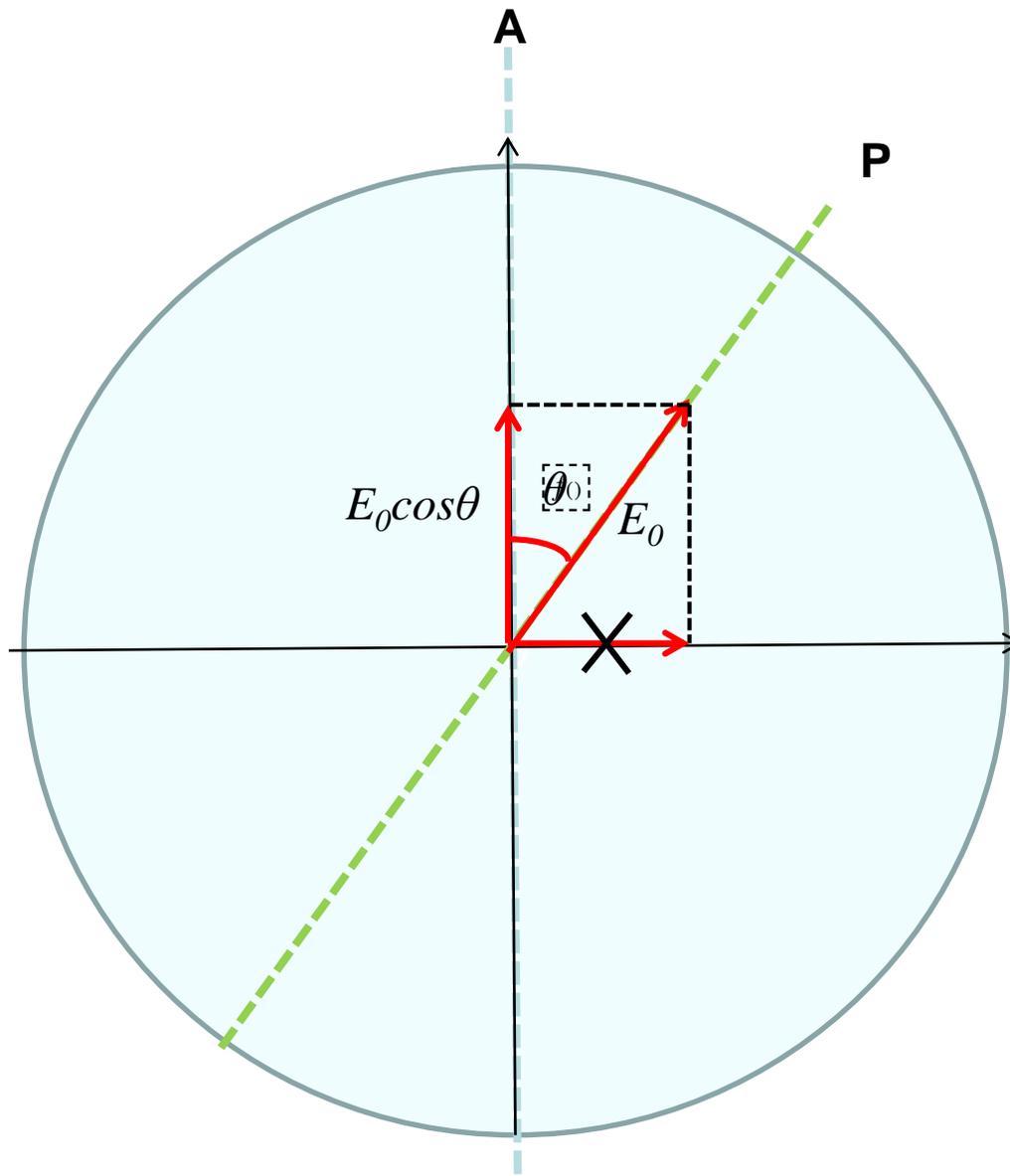
**LEGGE DI MALUS**

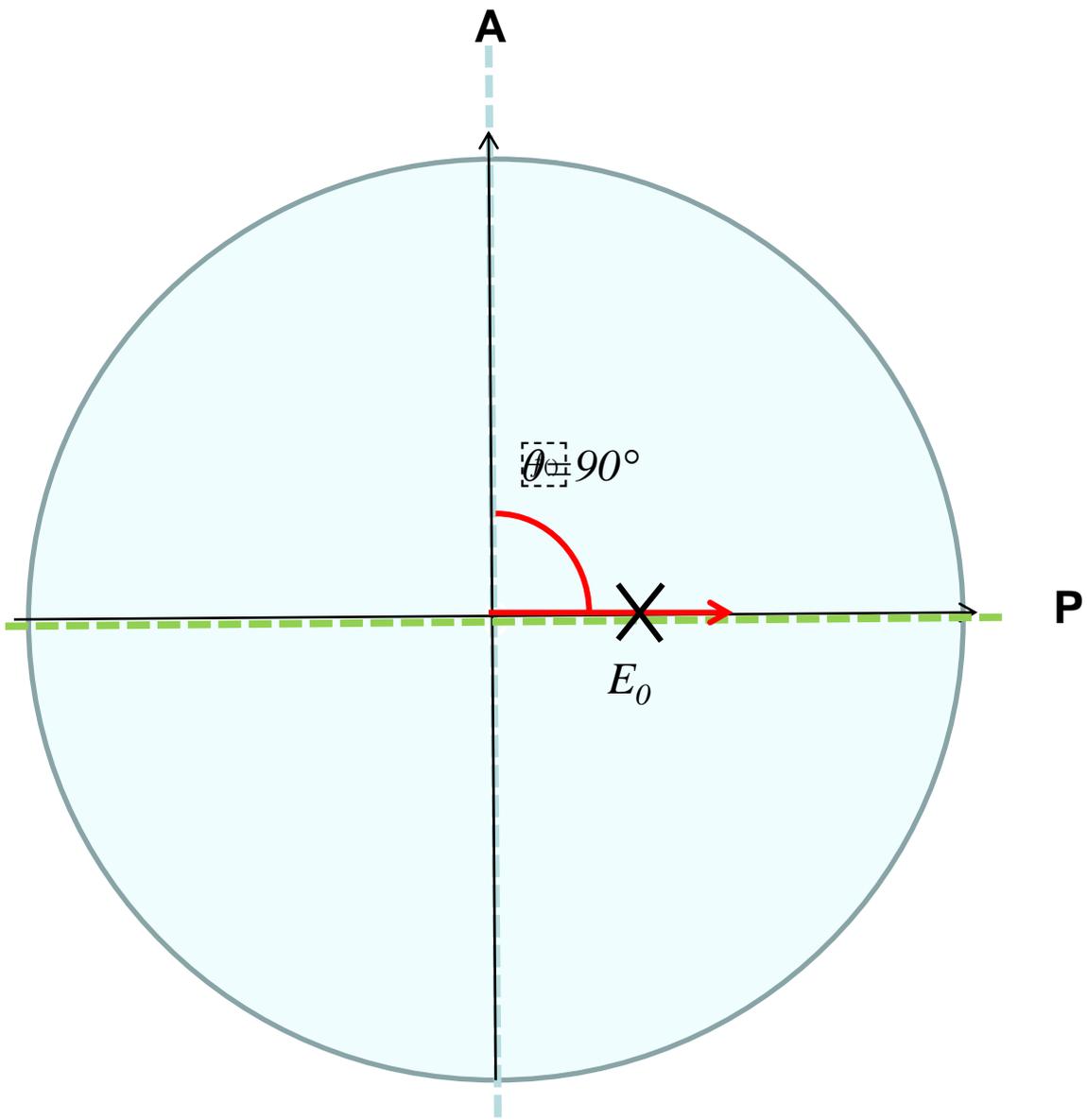


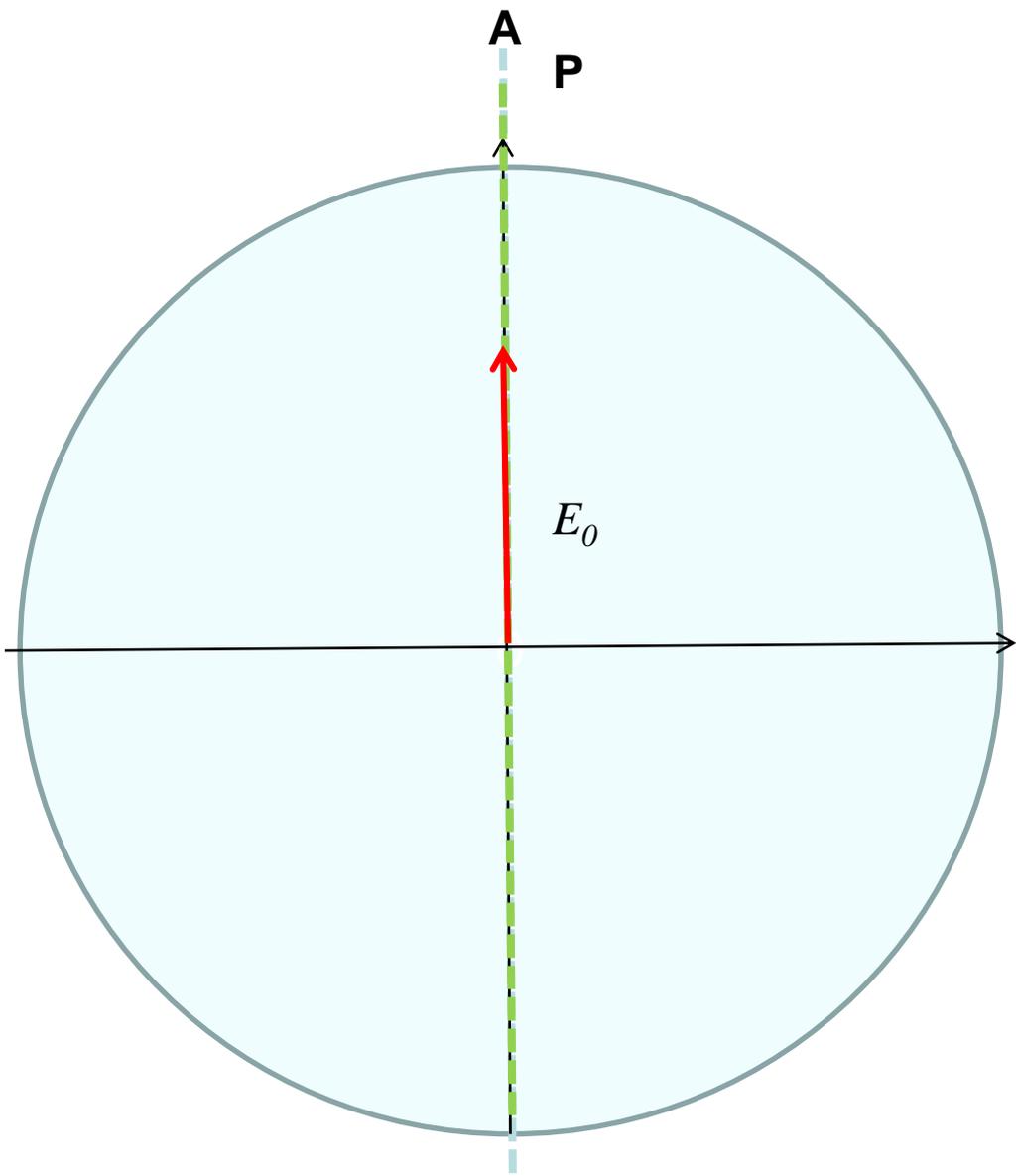


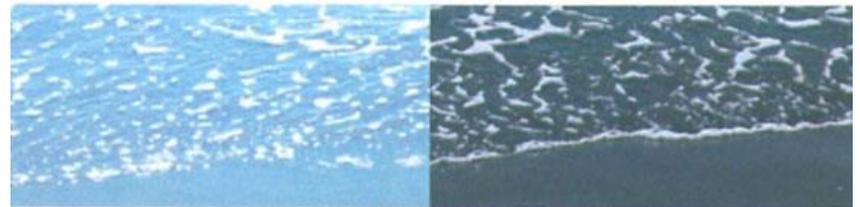
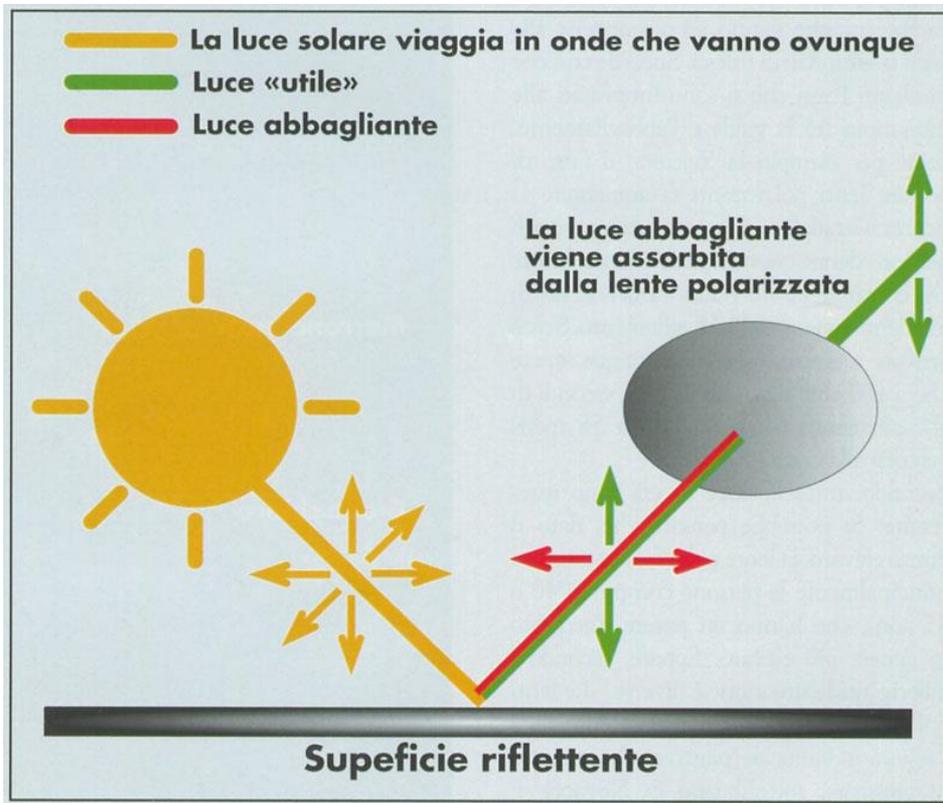


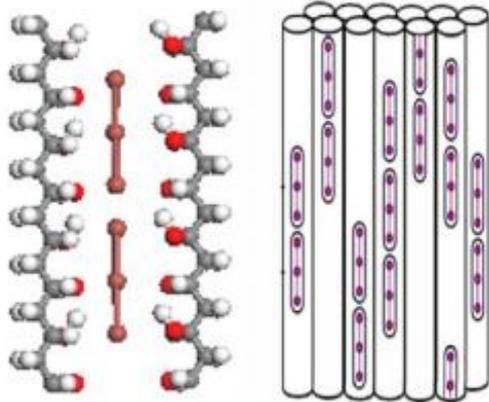




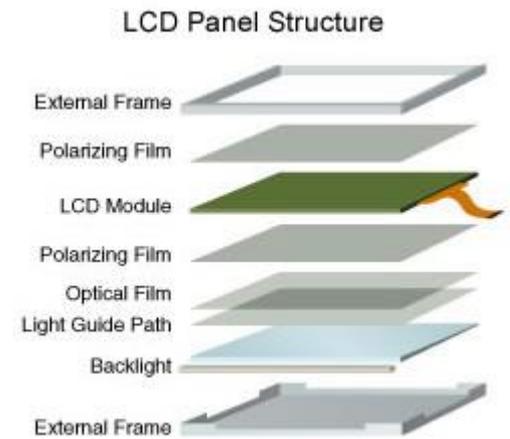








Catene di PVA (alcool polivinilico) e molecole di Iodio (I<sub>2</sub>)



## Esperienza n.4

- Studio della polarizzazione mediante la verifica della legge di Malus

### Strumenti a disposizione:

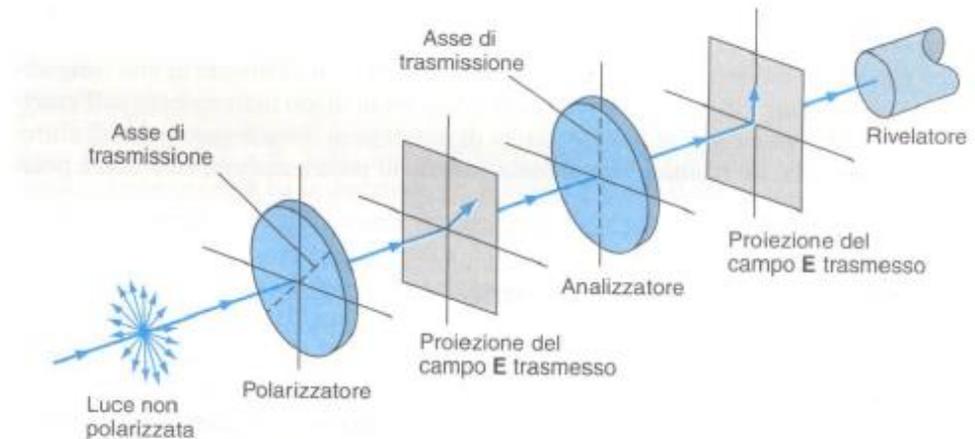
Banco ottico

Laser

Due polarizzatori

Fotodiodo

Amperometro



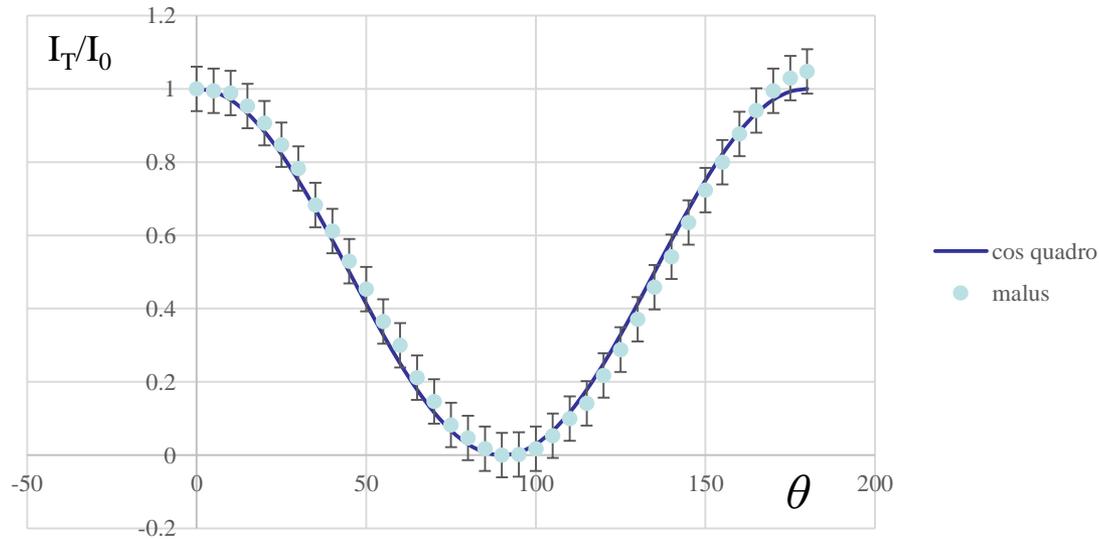
Utilizzando come sorgente luminosa un laser, dirigere perpendicolarmente il fascio luminoso su di una lamina polarizzatrice  $P$  e raccogliere la luce su di un fotodiodo.

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  $\theta$  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  $\theta$ .



**LEGGE DI MALUS**  $I_T = I_0 \cos^2 \theta \rightarrow I_T/I_0 = \cos^2 \theta$

<https://www.uv.es/indoptic/applets/Malus/index.html>

uv.es/indoptic/applets/Malus/index.html

## POLARIZATION OF LIGHT: MALUS' LAW

