



*Piano Lauree Scientifiche*  
**Laboratorio di Ottica:**  
**Diffrazione ed Interferenza – parte I**  
**Incontro 3 – 27/4/2011**

Parzialmente tratto dalle presentazioni della prof.ssa Ianniello

*Fabio Sciarrino*



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

Dipartimento di Fisica,  
“Sapienza” Università di Roma



**INO-CNR**  
ISTITUTO  
NAZIONALE DI  
OTTICA

Istituto Nazionale di Ottica, CNR

---

[fabio.sciarrino@uniroma1.it](mailto:fabio.sciarrino@uniroma1.it)  
<http://quantumoptics.phys.uniroma1.it>

# Supporto informatico

- Sito e-learning

<http://elearning.uniroma1.it>

- Sito PLS – Dipartimento di Fisica

<https://sites.google.com/site/pianolaureescientifiche/>

# Programma del Corso di Ottica

## Luce e colori

I colori

## Ottica geometrica

Riflessione

Rifrazione

Il banco ottico

Lenti

Prismi

## Ottica ondulatoria

Diffrazione

Interferenza

Polarizzazione

# Esperienze didattiche

## Biennio

Per gli studenti del biennio sono previste 3 esperienze didattiche:

**Esperienza I : Luce e colori**

**Esperienza II : Riflessione e Rifrazione della luce**

**Esperienza III: Ottica geometrica**

## Triennio

Per gli studenti del triennio sono previste 3 esperienze didattiche più un approfondimento:

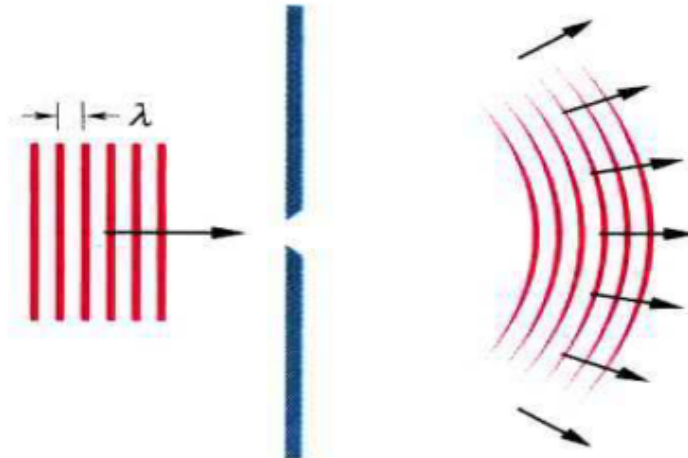
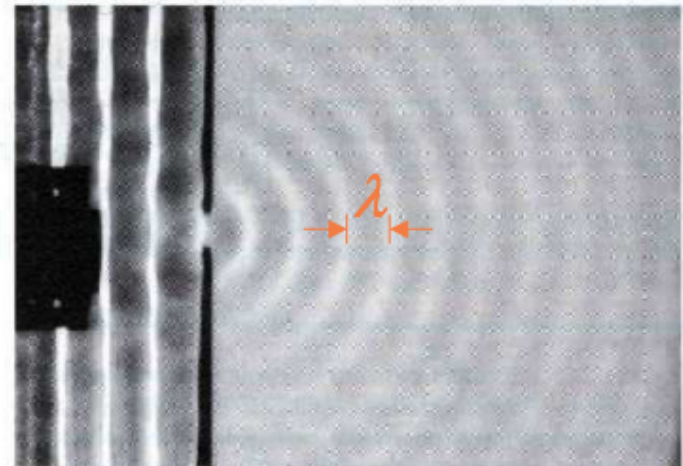
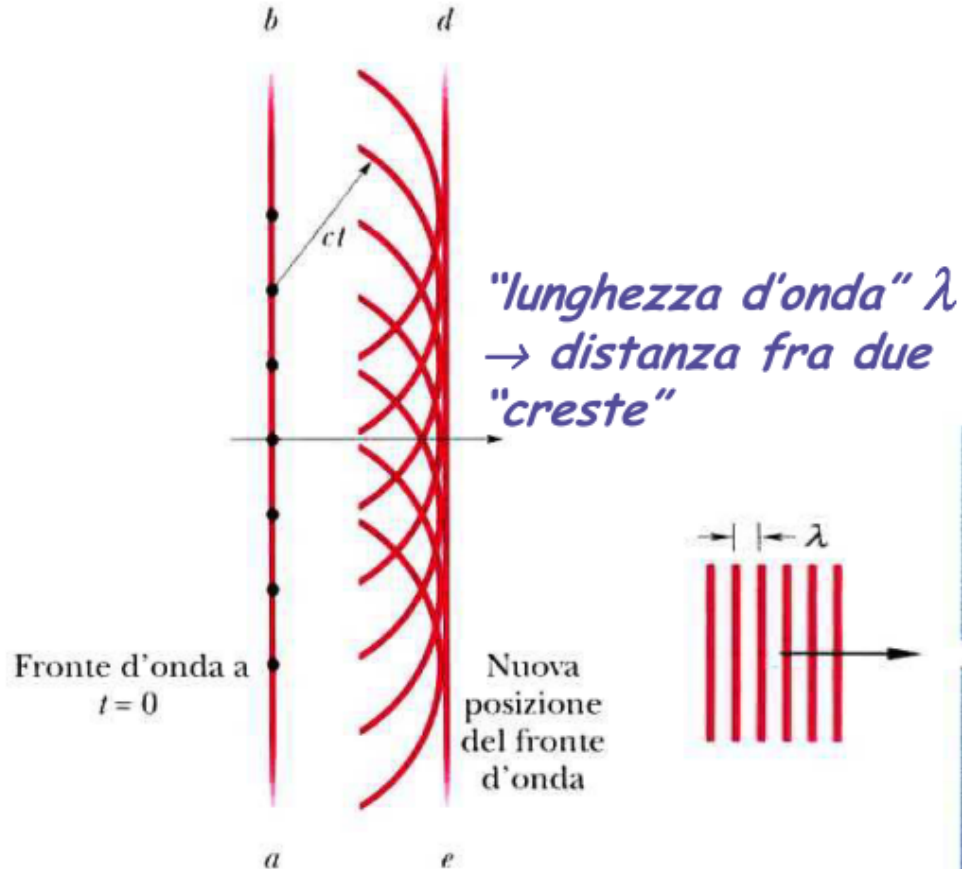
**Esperienza IV : Diffrazione della luce**

**Esperienza V: Interferenza della luce**

**Esperienza VI: Polarizzazione**

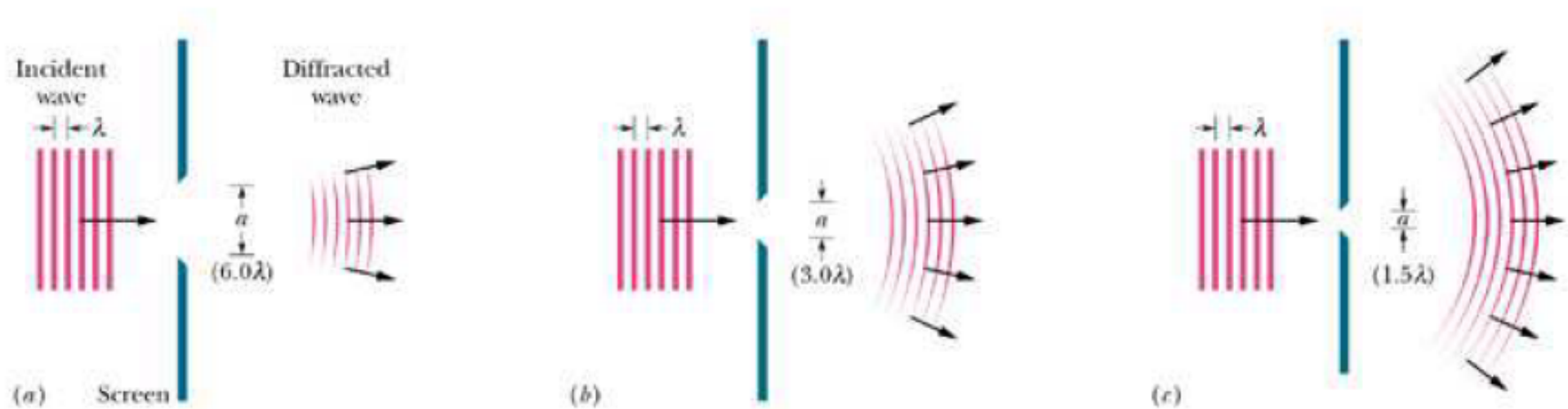
# Natura ondulatoria della luce

1678 **principio di Huygens**: la luce consiste di "onde sferiche" di una certa "lunghezza d'onda  $\lambda$ ", tutti i punti di un "fronte d'onda" all'istante  $t$  possono essere considerati centro del nuovo fronte d'onda all'istante  $t'$

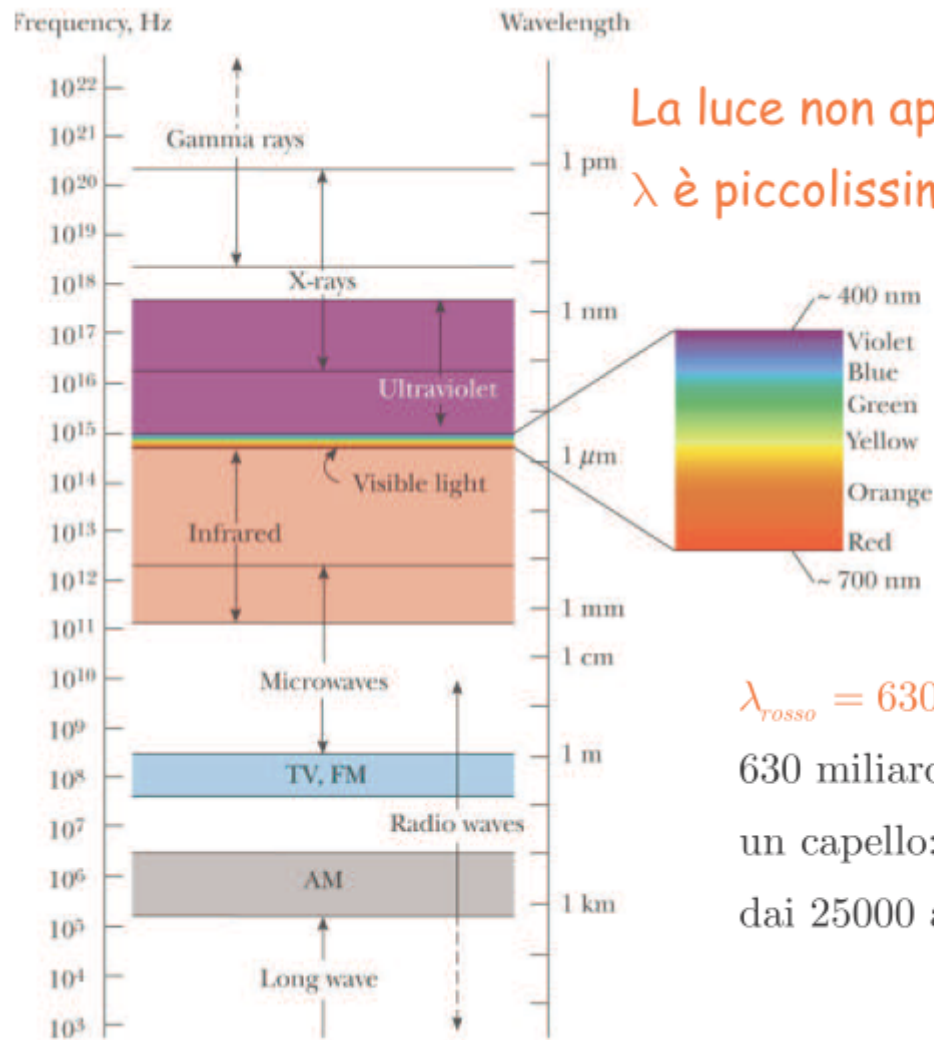


# Diffrazione da fenditura

Per osservare quanto previsto dal principio di Huygens dobbiamo creare un'apertura dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda. Esperimento: diffrazione da fenditura



# Nature ondulatoria della luce



La luce non appare un'onda perché  $\lambda$  è piccolissima rispetto a noi

$$\lambda_{\text{rosso}} = 630 \text{ nm}$$

630 miliardesimi di metro

un capello:

dai 25000 ai 100000 nanometri

# Diffrazione da singola fenditura

$$a = \frac{m\lambda D}{y}$$

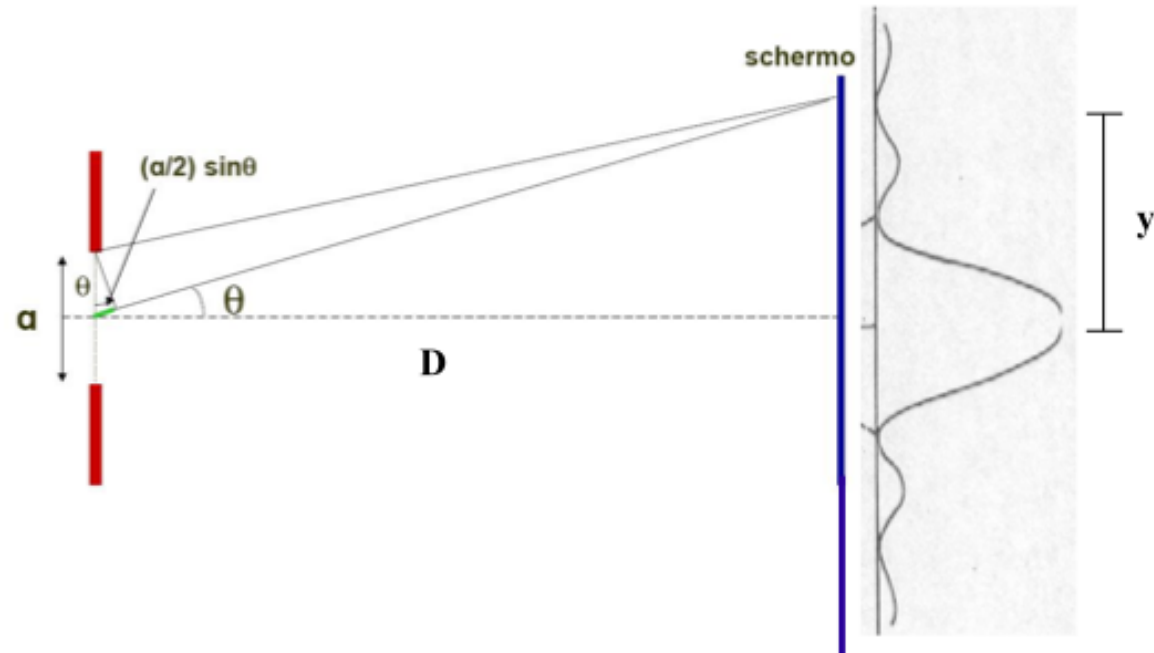


Figure 2: Schema del processo di diffrazione da singola fenditura

$y$  = la distanza dal centro della figura di diffrazione all' $m$ -esimo minimo

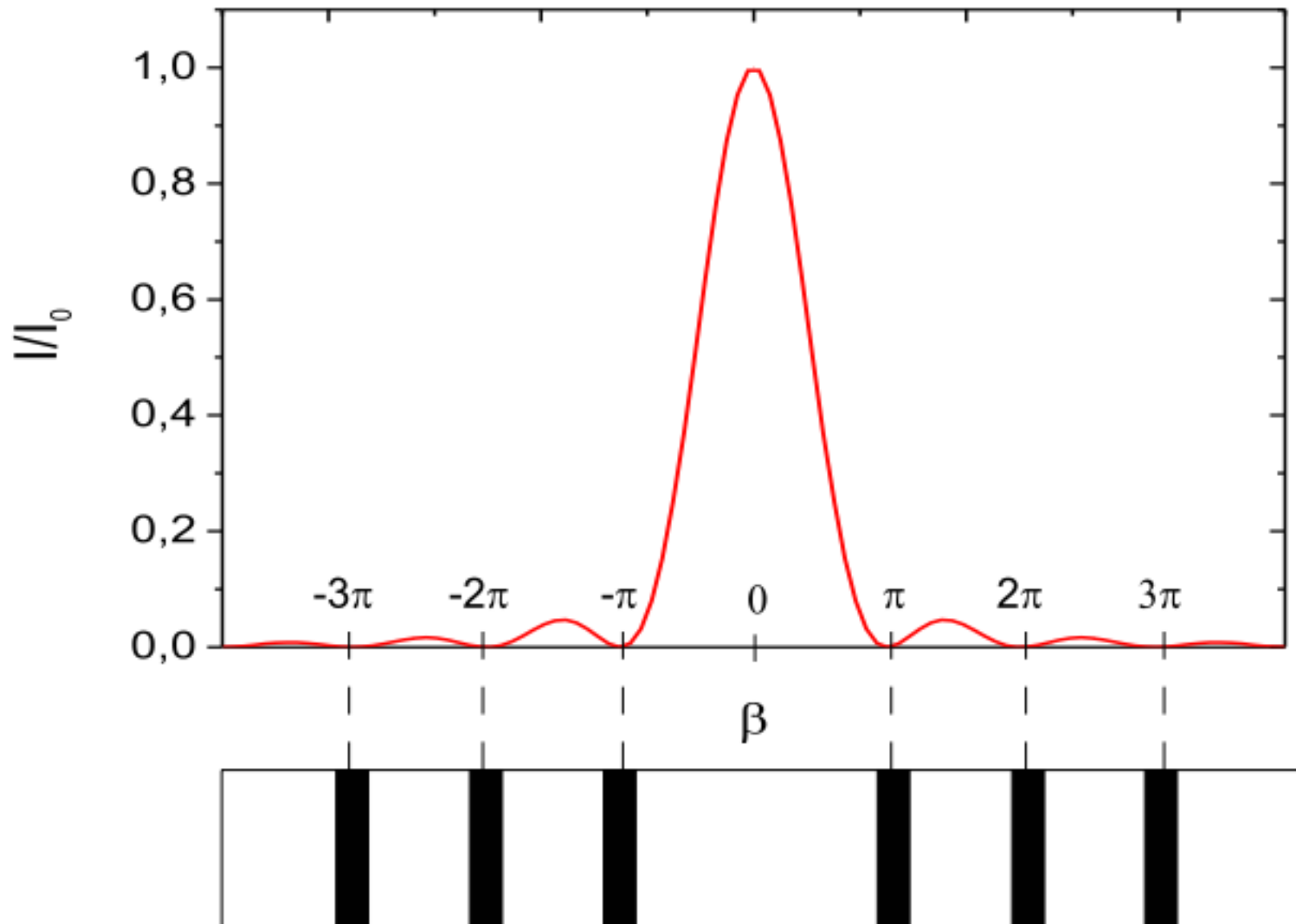
$a$  = larghezza fenditura

$D$  = distanza schermo da fenditura

$m$  = ordine di diffrazione



# Diffrazione da singola fenditura



# Diffrazione da foro

$y$  è la distanza dal centro della figura di diffrazione all' $m$ -esimo minimo

$$d = 1.22 \frac{\lambda D}{y}$$

dove  $d$  indica il diametro dell'apertura circolare.

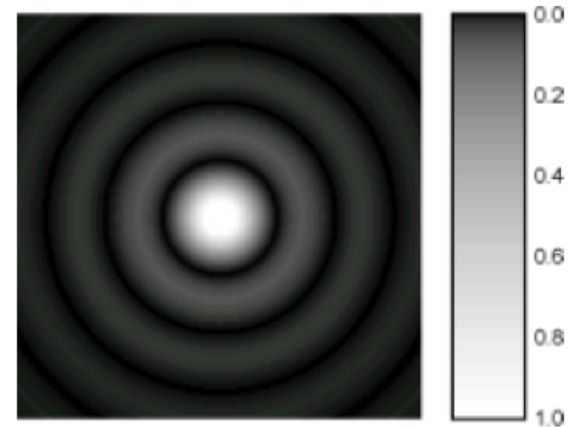
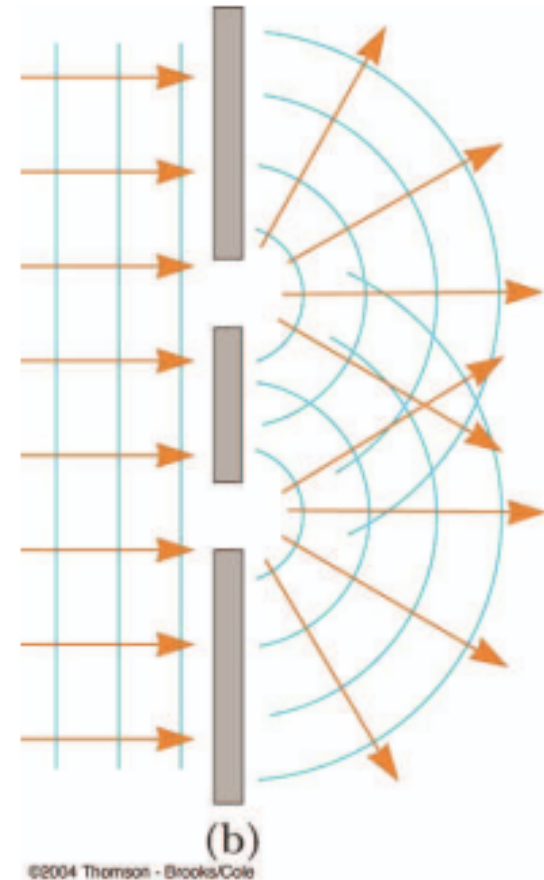


Figure 4: Disco di Airy ottenuto dalla diffrazione da foro circolare.

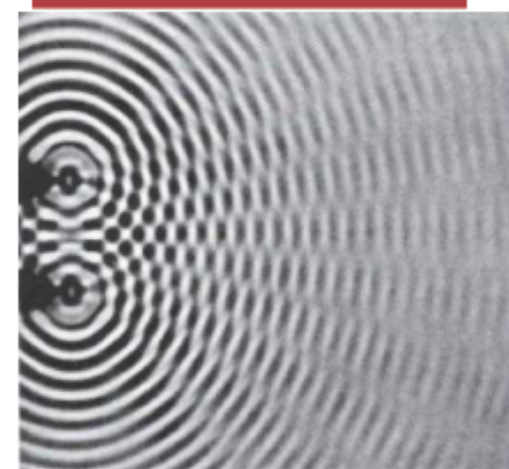
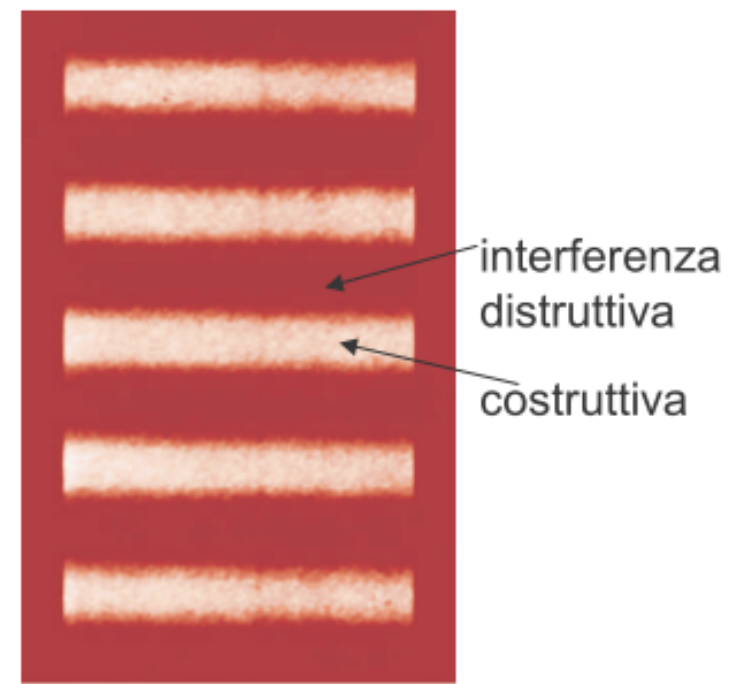
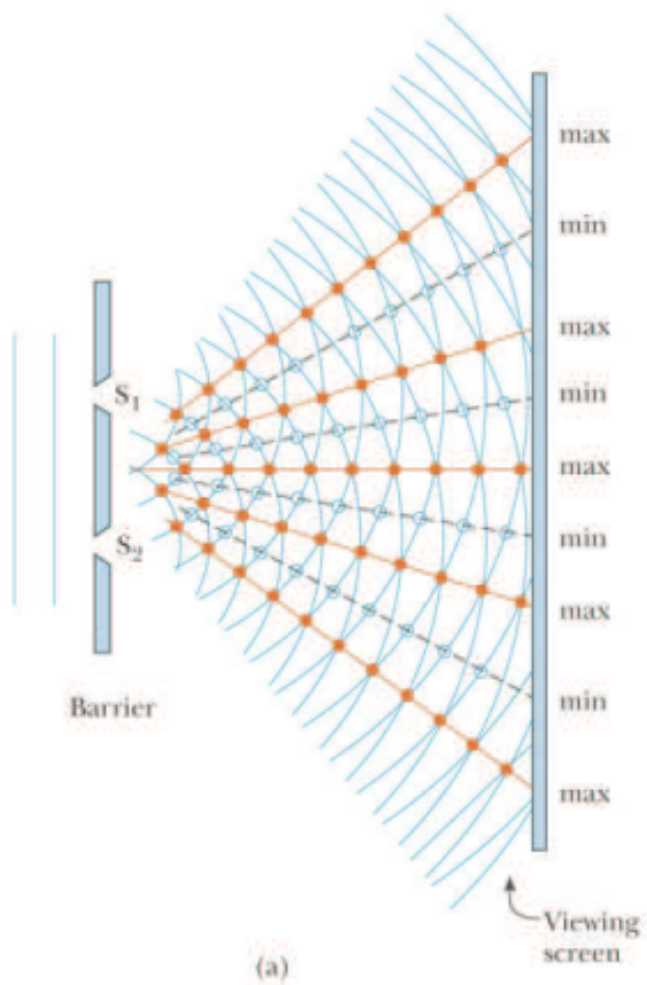
Il profilo d'intensità per la luce diffratta dipende da particolari funzioni a simmetria circolare, note come *funzioni di Bessel*, risultanti dalla risoluzione dell'integrale di Fresnel-Kirchhoff in coordinate polari, relazionate quindi al raggio della fenditura circolare. Il *pattern* di diffrazione risultante in questo caso, prende il nome di *disco di Airy*, ed è riportato in Fig.(4).

# Interferenza: esperimento di Young (1801)

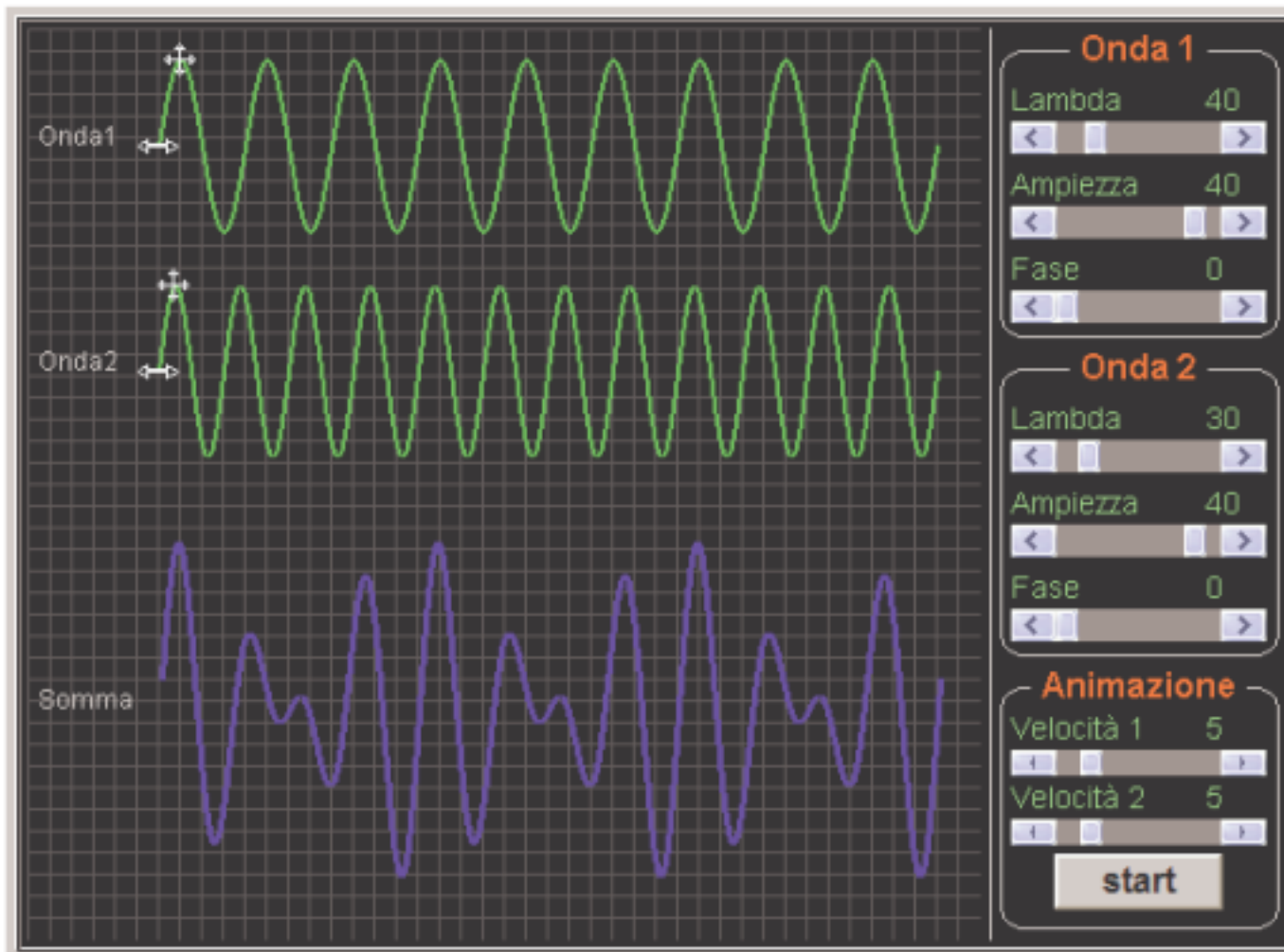
Un'onda luminosa che incontra due piccole fenditure si propaga attraverso le fenditure come se si trattasse di sorgenti puntiformi **coerenti**



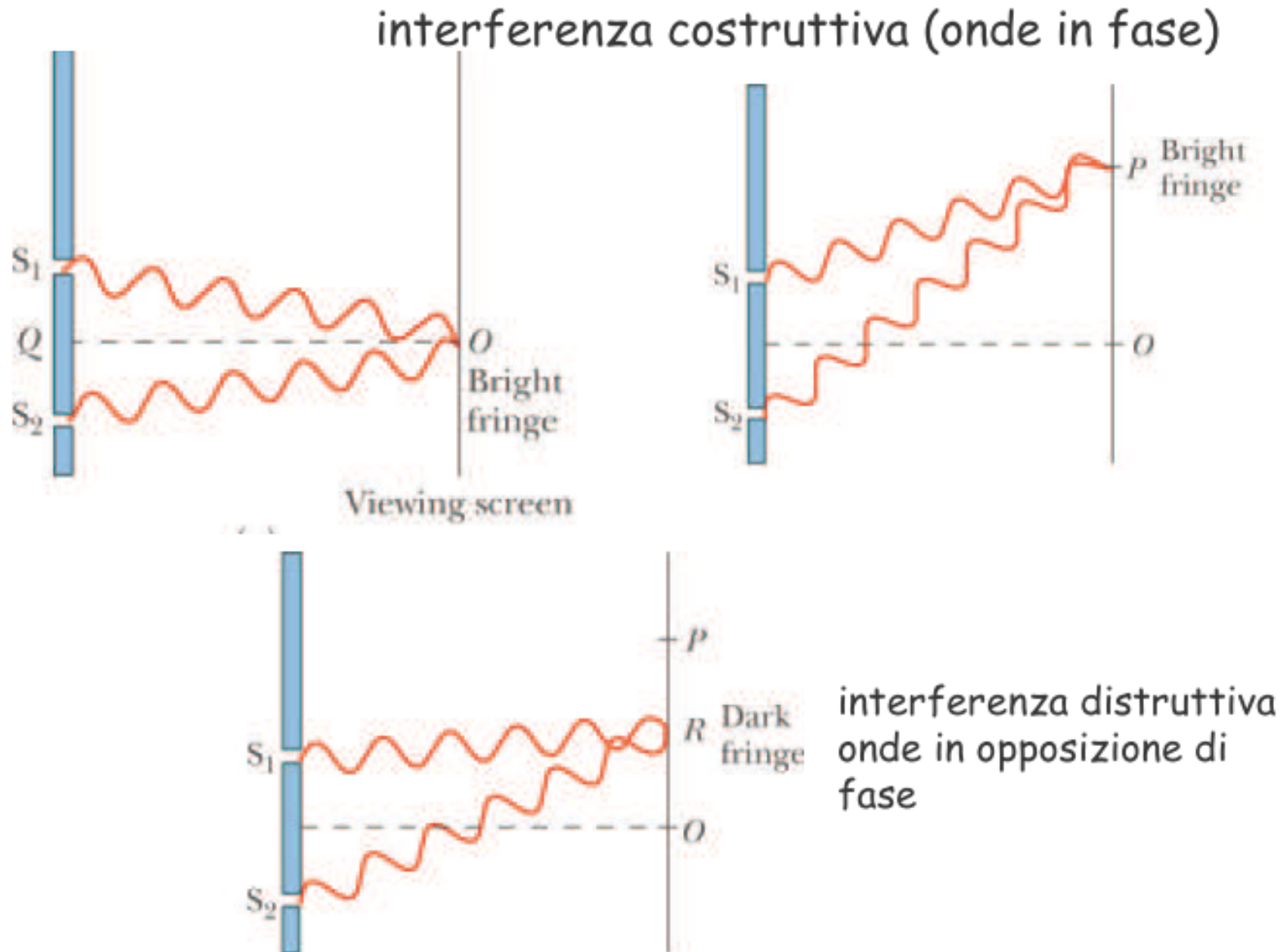
# Interferenza da N fenditure



# Interferenza



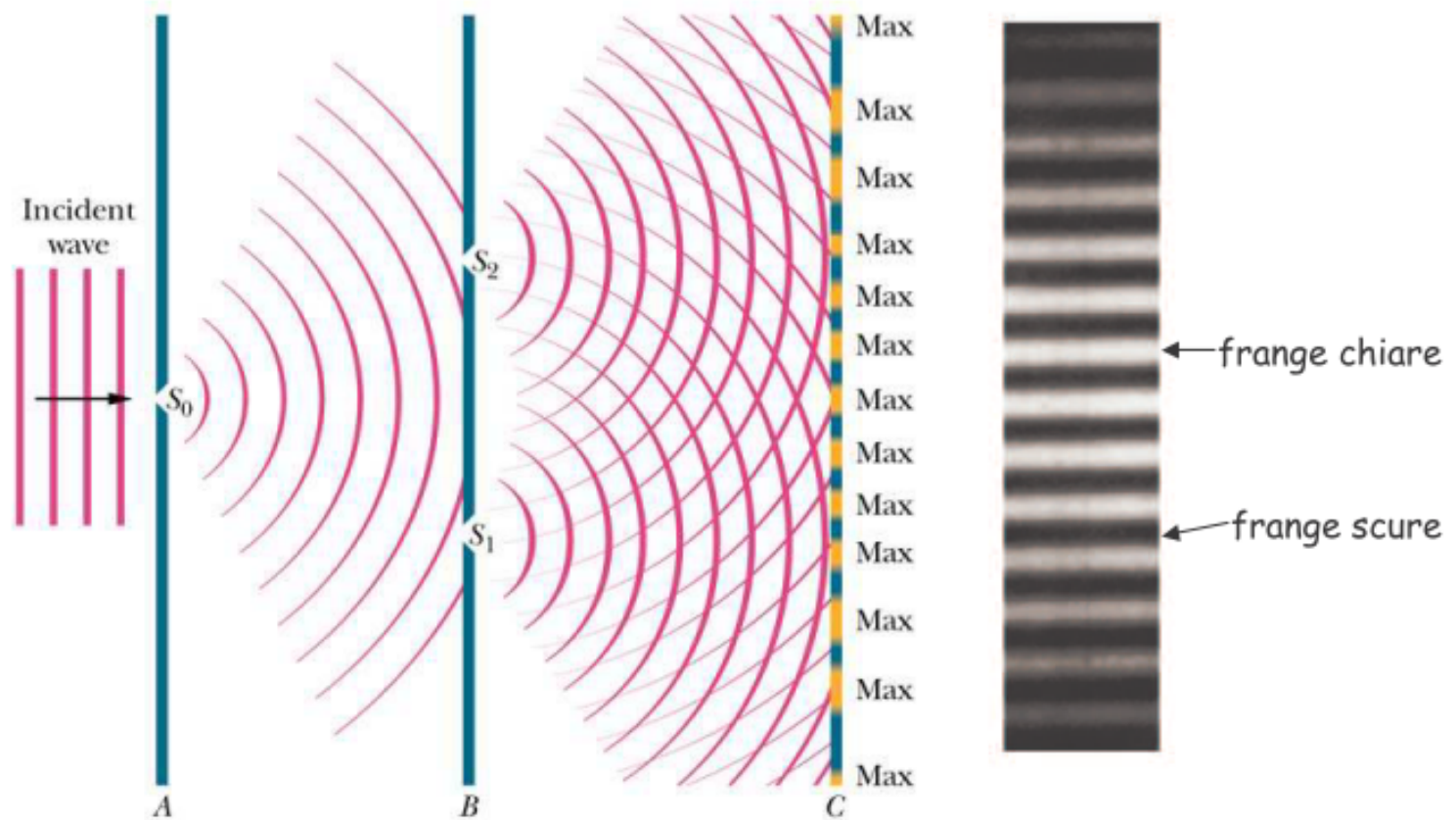
# Interferenza da 2 fenditure



# Esperimento di Young

La diffrazione può essere studiata in modo quantitativo usando il fenomeno di interferenza

Frange di interferenza



# Simulazione didattica

**<http://phet.colorado.edu/en/simulation/wave-interference>**



# Interferenza da doppia fenditura

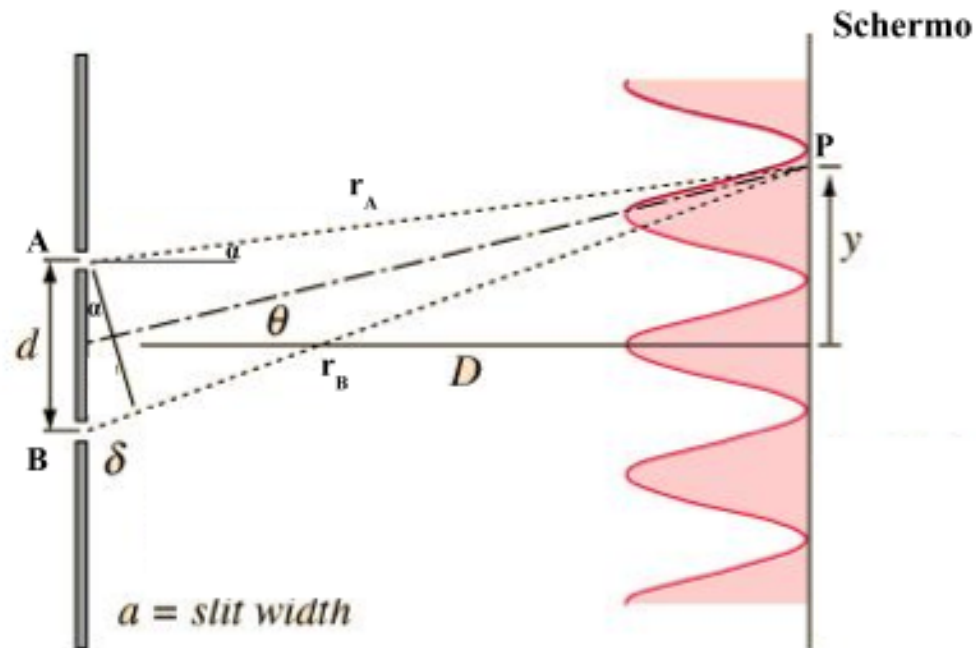


Figure 1: Profilo d'interferenza di un'onda che oltrepassa una doppia fenditura.

# Interferenza da doppia fenditura

$$E_A = E_0 \cos(kr_A + \omega t) \text{ ed } E_B = E_0 \cos(kr_B + \omega t)$$

$$E = E_A + E_B = 2E_0 \cos \frac{k(r_A + r_B)}{2} \cos \frac{k(r_A - r_B)}{2}$$

se si considera l'approssimazione  $r_A + r_B \approx 2r_A$ , e, si osserva (dalla figura 1) che  $\delta = r_A - r_B = d \sin \alpha$  si ha:

$$E = 2E_A \cos \frac{kd \sin \alpha}{2}. \quad (4)$$

Quello che si osserva sullo schermo nel punto  $P$  non è però il campo bensì la sua intensità ovvero:

$$I = E^2 = 4 |E_A|^2 \cos^2 \frac{kd \sin \alpha}{2}. \quad (5)$$

# Interferenza da doppia fenditura

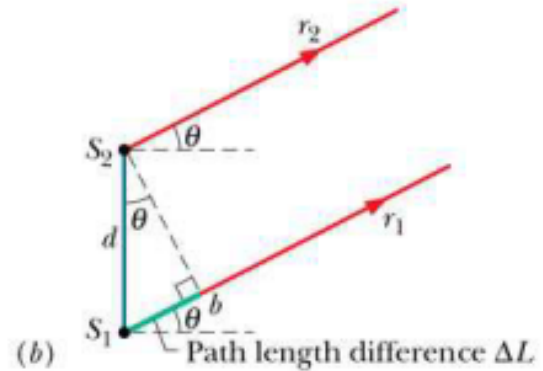
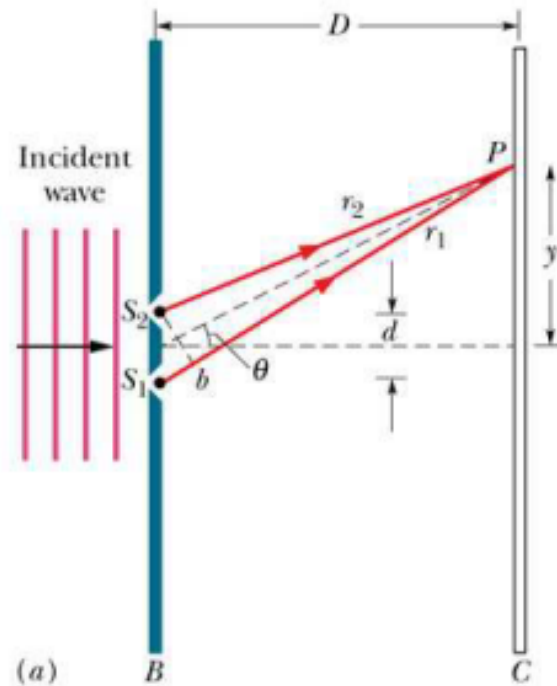
Sullo schermo si osserverà quindi un profilo oscillante di intensità, i cui massimi coincidono col caso in cui la differenza tra i cammini ottici è pari a multipli interi della lunghezza d'onda  $\lambda$  della radiazione, viceversa si osservano dei minimi:

$$\sin \alpha = \frac{n\lambda}{d} \rightarrow \textit{massimi per } n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6)$$

$$\sin \alpha = \frac{n\lambda}{2d} \rightarrow \textit{minimi per } n = \pm 1, \pm 3, \dots \quad (7)$$

# Interferenza costruttiva e distruttiva

## Posizione delle frange



Differenza di cammino

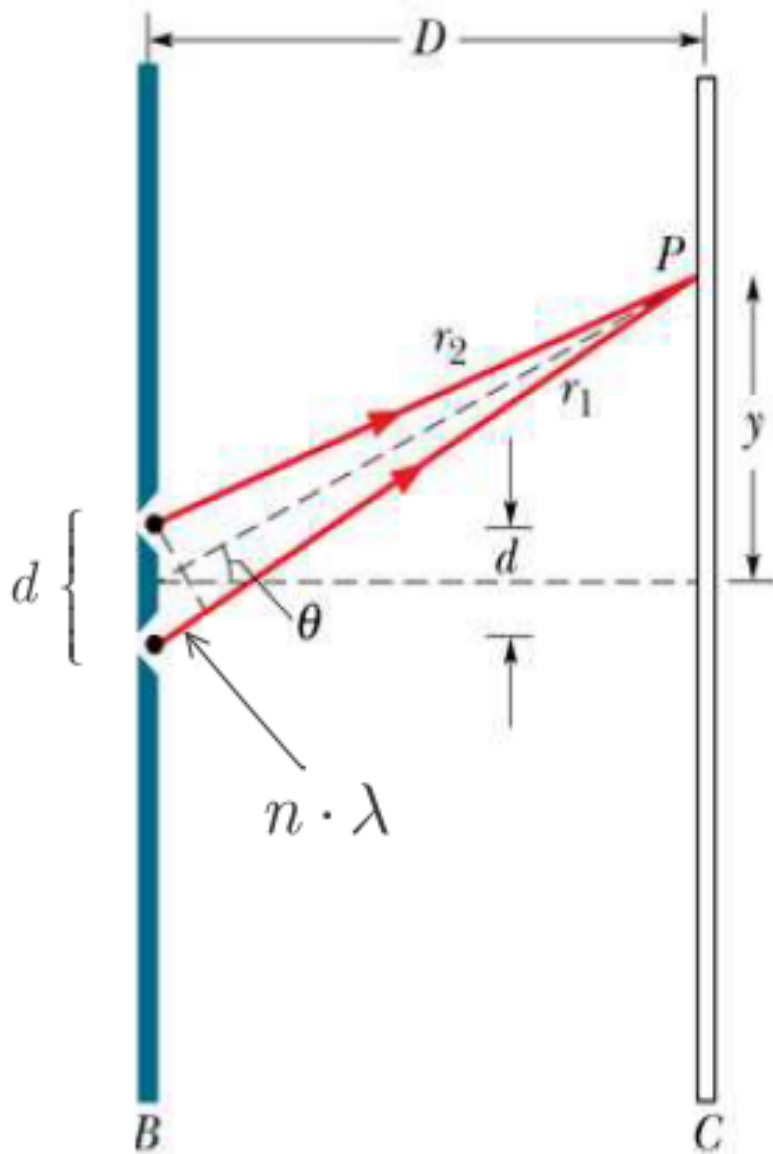
$$\Delta L = d \cdot \sin \vartheta$$

Interferenza costruttiva per differenza di cammino uguale a zero o a un multiplo intero di lunghezze d'onda:

$$d \cdot \sin \vartheta = n \cdot \lambda \quad \text{con } n=0,1,2,\dots \quad \text{massimi, frange chiare}$$

$$d \cdot \sin \vartheta = \left(n + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda \quad \text{minimi, frange scure}$$

# Interferenza costruttiva e distruttiva



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

$$\sin \vartheta \approx \frac{n \cdot \lambda}{d} = \frac{\lambda}{d}$$

$$\frac{y}{D} \approx \frac{\lambda}{d}$$

$$y \approx \frac{\lambda \cdot D}{d}$$

# Interferenza costruttiva e distruttiva

Esempio:

Lunghezza d'onda  $\lambda = 630 \text{ nm}$ , (rosso)

distanza tra le fenditure  $d = 0.20 \text{ mm}$

distanza  $D$  tra gli schermi  $D = 50 \text{ cm}$

si assuma che l'angolo  $\vartheta$  sia sufficientemente piccolo da poter introdurre l'approssimazione  $\sin \vartheta = \tan \vartheta = \vartheta$

Qual è la distanza tra due massimi vicino al centro della figura d'interferenza?

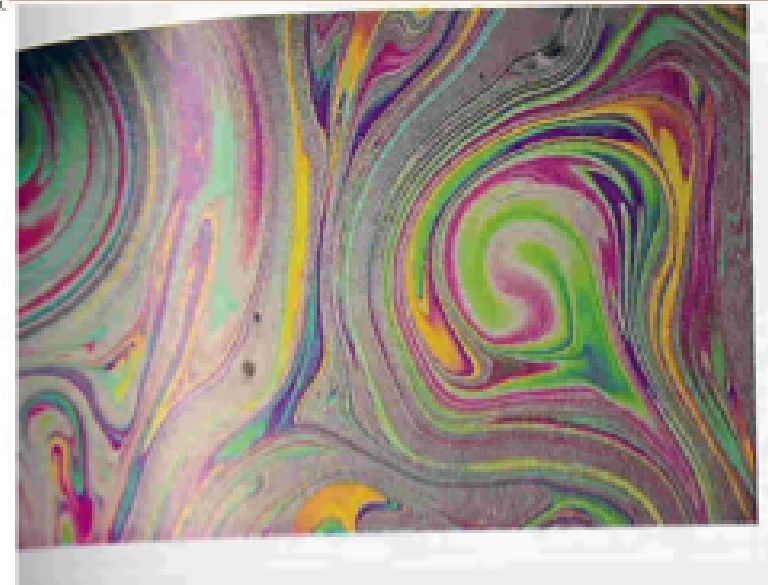
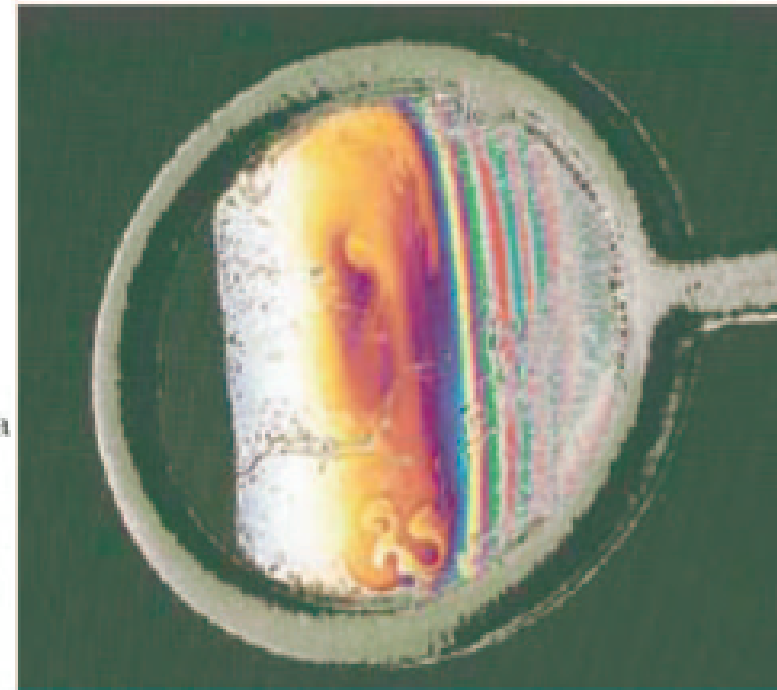
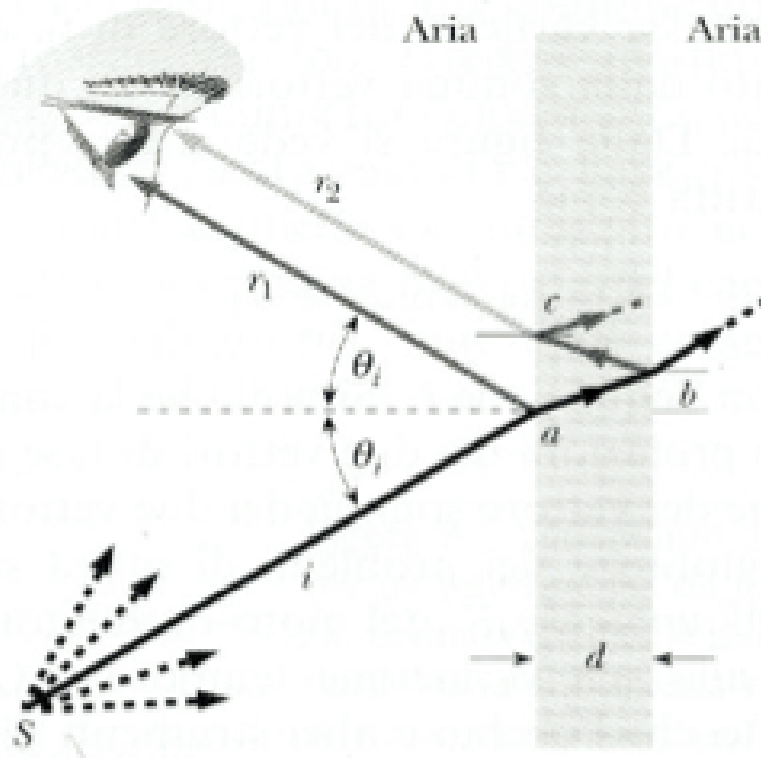
$$y \approx \frac{\lambda \cdot D}{d}$$


$$\left. \begin{array}{l} \tan \vartheta \approx \frac{y_n}{D} \\ \sin \vartheta \approx \frac{n \cdot \lambda}{d} \end{array} \right\} \begin{array}{l} y_n = \frac{n \cdot \lambda \cdot D}{d} \\ y_{n+1} = \frac{(n+1) \cdot \lambda \cdot D}{d} \end{array}$$

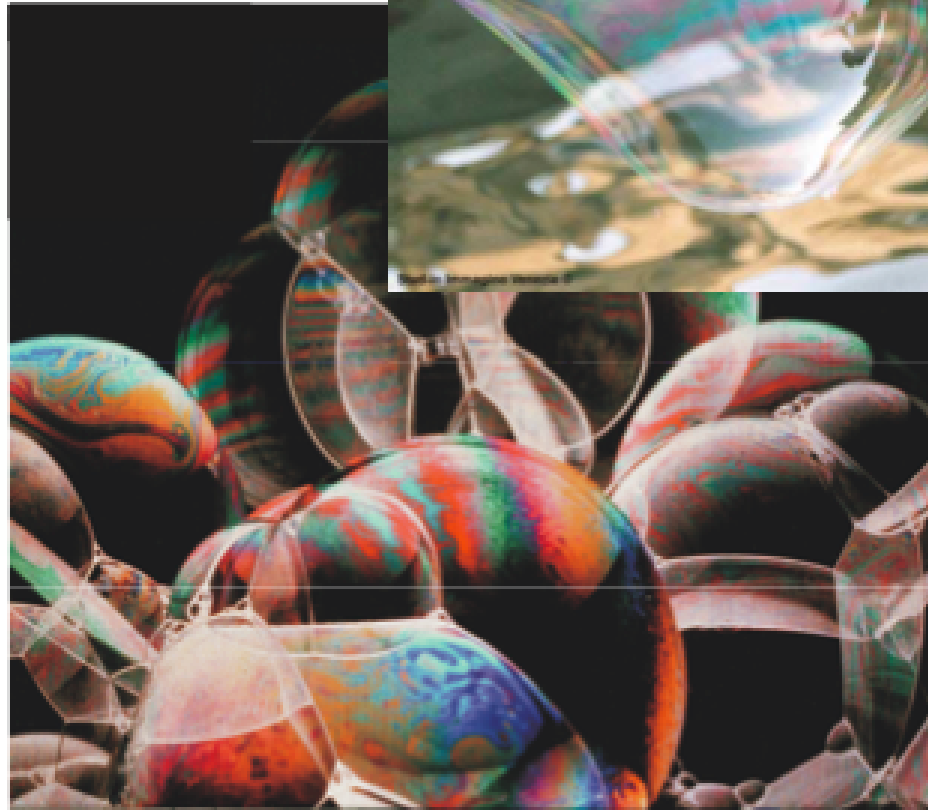
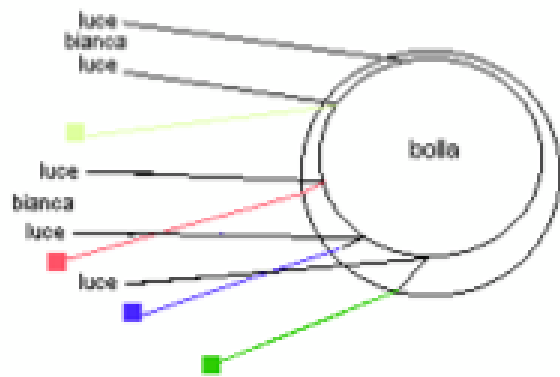
$$h = y_{n+1} - y_n = \frac{\lambda \cdot D}{d} = \frac{630 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 50 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{0.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \approx 1.6 \text{ mm}$$

# Fenomeni di interferenza nella vita quotidiana

## Interferenza da pellicola sottile

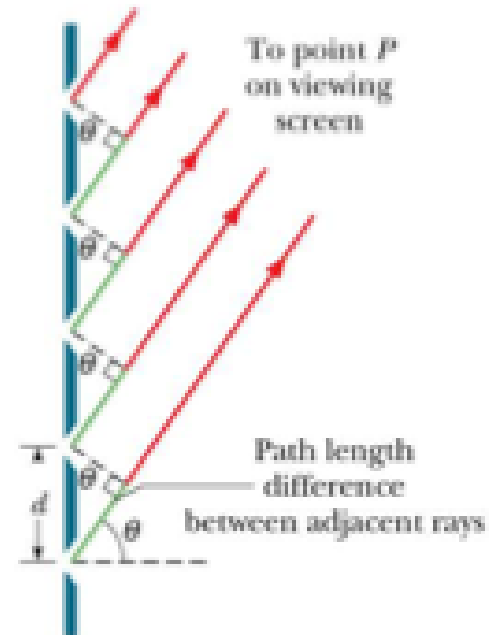
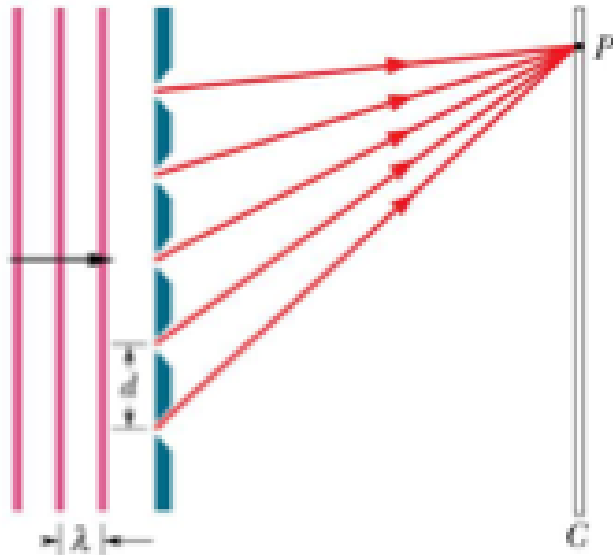


## Bolle di sapone





# Reticolo di diffrazione



o fenditure

o intagli paralleli in superfici opache

$$y \approx \frac{\lambda \cdot D}{d}$$

Costante reticolare:

$g$  = passo del reticolo in cm

$n = 40$  linee/cm

$$\Rightarrow g = \frac{1}{40} = 0.025 \text{ cm}$$

## Misura con il reticolo

$$\lambda \approx y \frac{d}{D}$$

$$D \approx 1.13 \text{ m} \quad y = \frac{\text{dist col-col}}{2} = \frac{0.44 \text{ m}}{2} = 0.22 \text{ m}$$

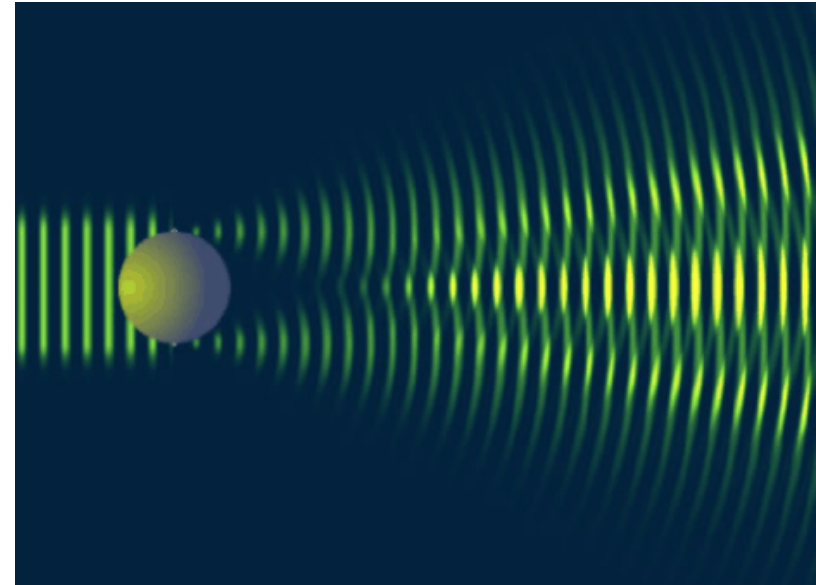
$$300 \text{ fenditure/mm} \Rightarrow d = \frac{10^{-3}}{300} = 3.33 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{rosso}} \approx (0.22 \text{ m}) \frac{3.33 \times 10^{-6} \text{ m}}{1.13 \text{ m}} \approx 0.648 \times 10^{-6} \text{ m}$$

# Esperienza IV – Diffrazione

Sommario:

1. Esperimenti proposti
  - 1.1 Diffrazione da singola fenditura
2. Analisi dei risultati



*Lo scopo di quest'esperienza è di osservare la natura ondulatoria della luce nel fenomeno della diffrazione delle onde. In particolare, si osserverà il comportamento di un fascio di luce dalle caratteristiche note, prodotto da un diodo laser, quando viene diffratto da una fenditura di forme diverse. Si studieranno quindi le frange prodotte sullo schermo senza l'ausilio del computer o di sensori di luce.*

# Esperienza IV – Diffrazione da fenditura

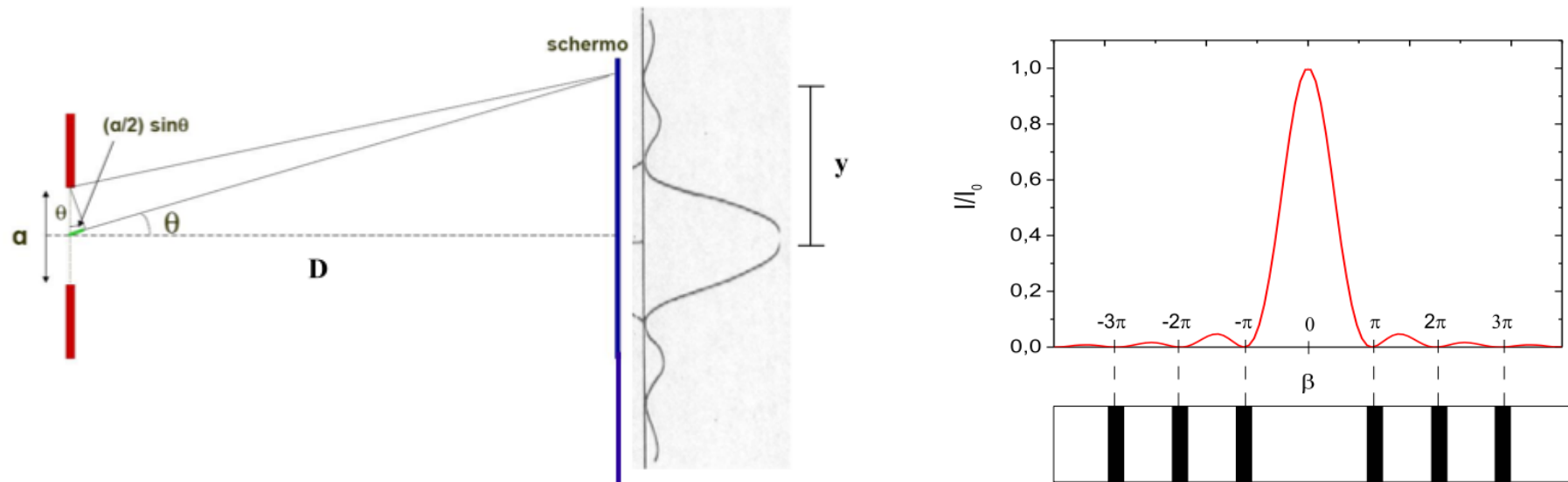


Figure 2: Schema del processo di diffrazione da singola fenditura

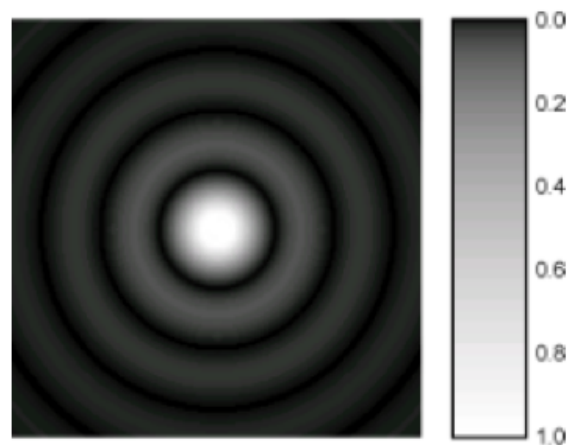


Figure 4: Disco di Airy ottenuto dalla diffrazione da foro circolare.

# Esperienza IV – Strumentazione

Per l'implementazione degli esperimenti proposti sulla diffrazione sono necessari i seguenti elementi:

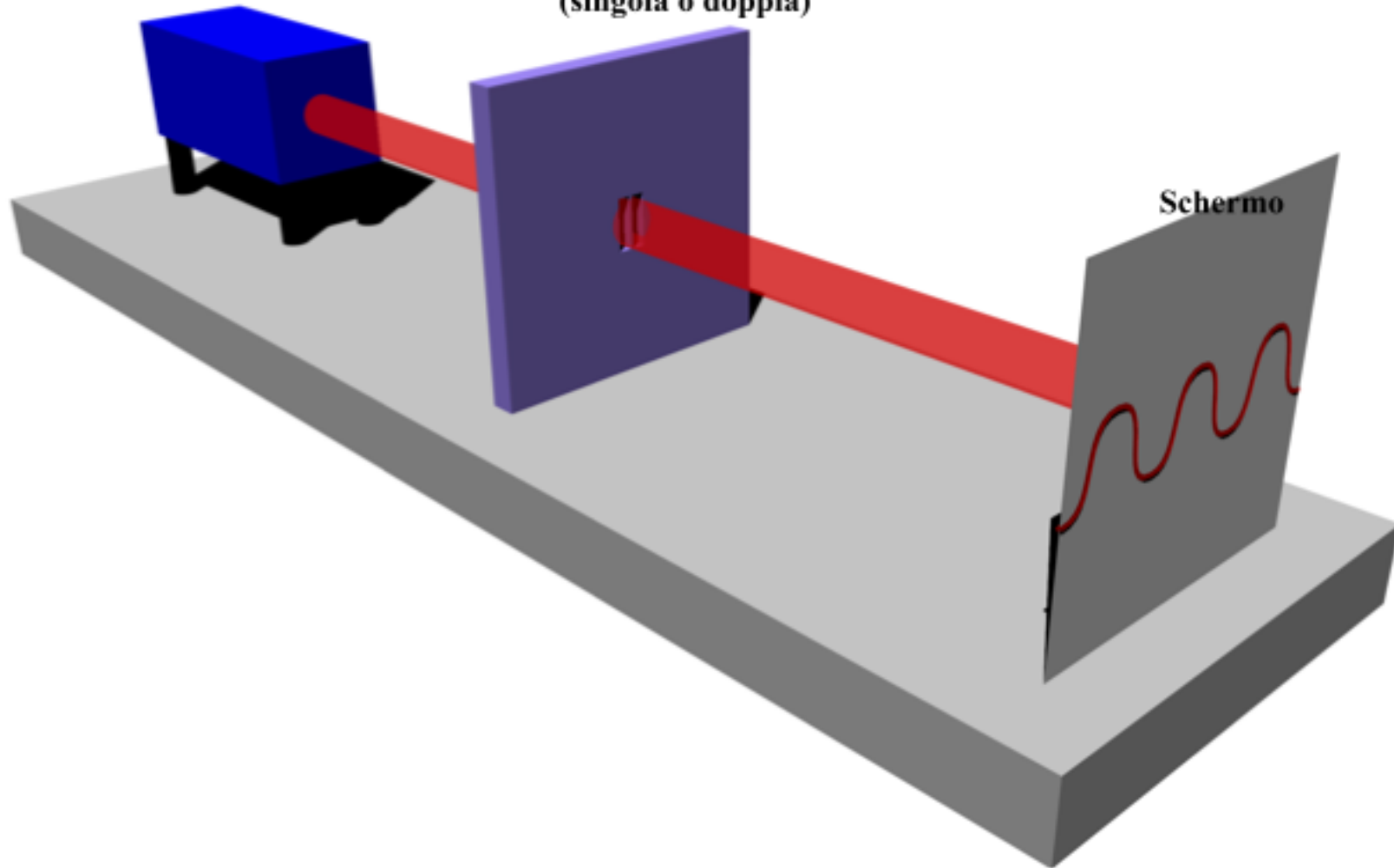
- Diodo laser
- Schermo bianco
- Fenditure di larghezza variabile (circa 3 misure diverse)
- Fori circolari di diametro diverso

# Esperienza IV – Apparato sperimentale

Sorgente Laser (o lampada + filtro monocromatico)

Fenditura (singola o doppia)

Schermo



## Esperienza IV – Apparato sperimentale



Figure 6: Preparazione del setup per gli esperimenti.

# Esperienza IV – Procedimento

## Procedimento di misura:

- Osservare come varia la figura di diffrazione prodotta sullo schermo bianco al variare della dimensione delle singole fenditure lineari.

Si noti che fenditure più larghe danno figure di diffrazione più strette, al limite di fenditura molto larga la figura di diffrazione svanisce.

- Osservare quindi le figure di diffrazione relative a diversi fori di grandezza variabile, come cambia la figura della diffrazione?



## Esperienza IV – Procedimento

*Attaccare sullo schermo bianco un foglio di carta millimetrata, facendo attenzione a disporlo in modo esattamente orizzontale ortogonalmente alla direzione di incidenza del fascio. Allineare il disco fissando una determinata fenditura lungo il percorso del fascio laser.*

- Misurare la distanza  $D$  dalla fenditura allo schermo con il relativo errore.
- Segnare sulla carta millimetrata dei puntini in corrispondenza dei primi due minimi, uno a destra e uno a sinistra del massimo principale relativo alla figura di diffrazione, individuando in questo modo le posizioni di  $y_m$  ed  $y_{m+1}$  in equazione 9.
- Ripetere l'operazione per diversi valori  $a$  delle dimensioni della fenditura, mantenendo fissa la distanza  $D$  dello schermo dalla fenditura.
- Ripetere lo stesso procedimento con delle fenditure circolari, di cui si varia il diametro  $d$ . Raccogliere i corrispondenti valori delle posizioni dei minimi relativi ai primi due dischi concentrici lungo la direzione orizzontale ortogonale alla direzione di incidenza del fascio.
- Misurare diversi minimi ad ordini successivi.

# Esperienza IV – Analisi

## 1. Diffrazione da fenditura

- Riportare in una tabella i valori di  $\Delta y$  osservati per diversi valori di  $a$ ,
- Riportare su un grafico l'andamento di  $\Delta y$  in funzione di  $1/a$ . In questo modo ci si aspetta un andamento lineare.
- Ricavare la lunghezza d'onda del laser dal coefficiente angolare della retta ottenuta e confrontarla con quella fornita dalla ditta produttrice del laser.

## 2. Diffrazione da foro

- Riportare in una tabella i valori di  $\Delta y$  osservati per diversi valori di  $a$ ,
  - Riportare su un grafico l'andamento di  $\Delta y$  in funzione di  $1/d$ . In questo modo ci si aspetta un andamento lineare.
  - Ricavare la lunghezza d'onda del laser dal coefficiente angolare della retta ottenuta e confrontarla con quella fornita dalla ditta produttrice del laser.
- 
- Verificare che le due lunghezze d'onda ottenute con i diversi set di fenditure coincidono.

## Esperienza IV – Immagine di diffrazione

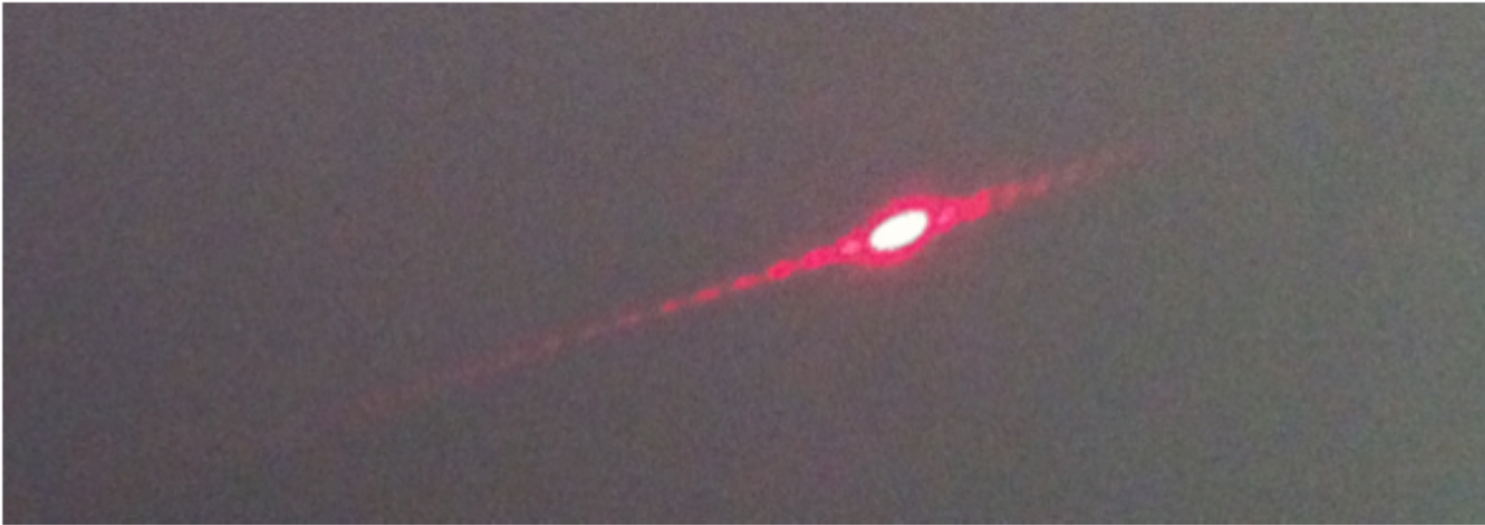


Figure 8: Figura di diffrazione da singola fenditura

## Esperienza IV – Risultati sperimentali

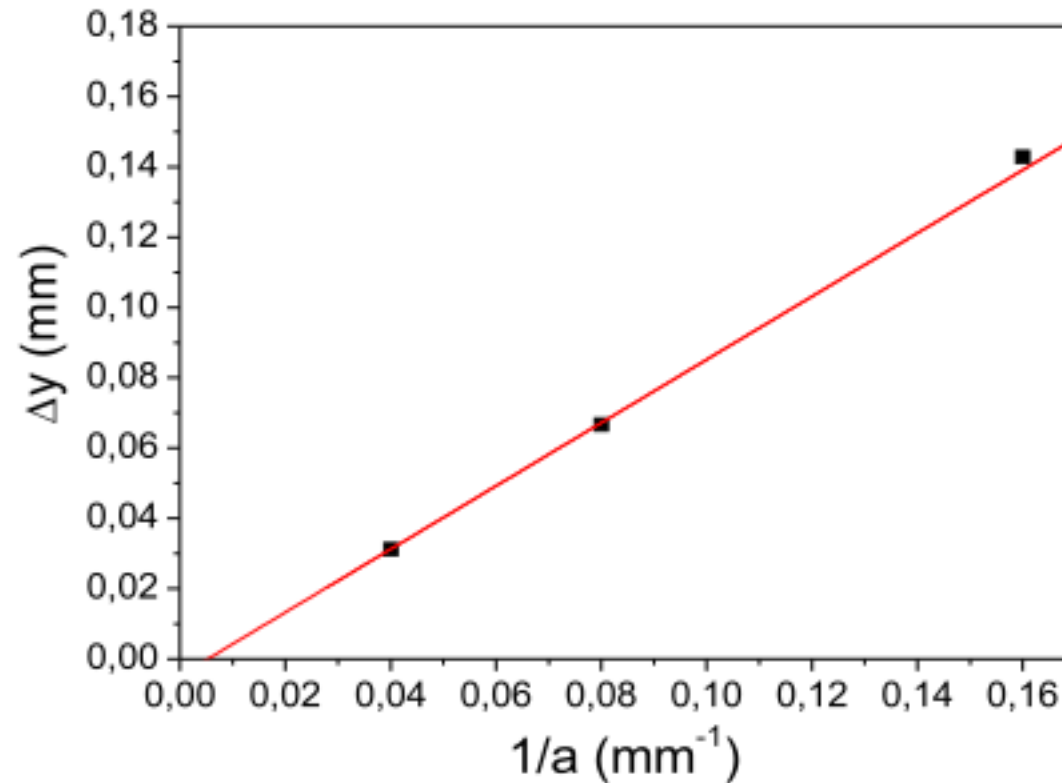
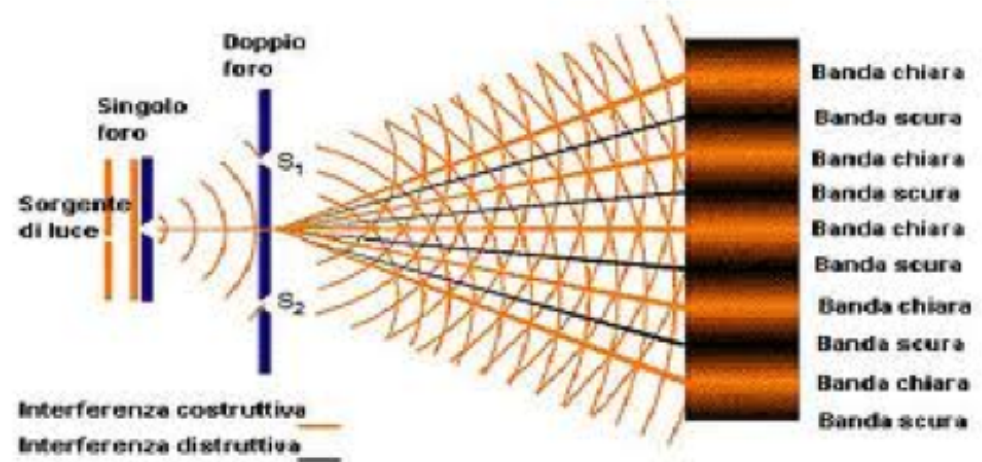


Figure 10: Esempio dell'andamento sperimentale dei punti presi.

# Esperienza V – Interferenza

Sommario:

1. Esperimenti proposti
  - 1.1 Interferenza da doppia fenditura
2. Analisi dei risultati



*Lo scopo di questo esperimento è osservare la natura ondulatoria della luce, nel fenomeno dell'interferenza propria delle onde. In particolare, si osserverà il comportamento di un fascio di luce dalle caratteristiche note, prodotto da un diodo laser (o da una lampada), quando interferisce dopo essere passato attraverso due fenditure.*

# Esperienza V – Interferenza da doppia fenditura

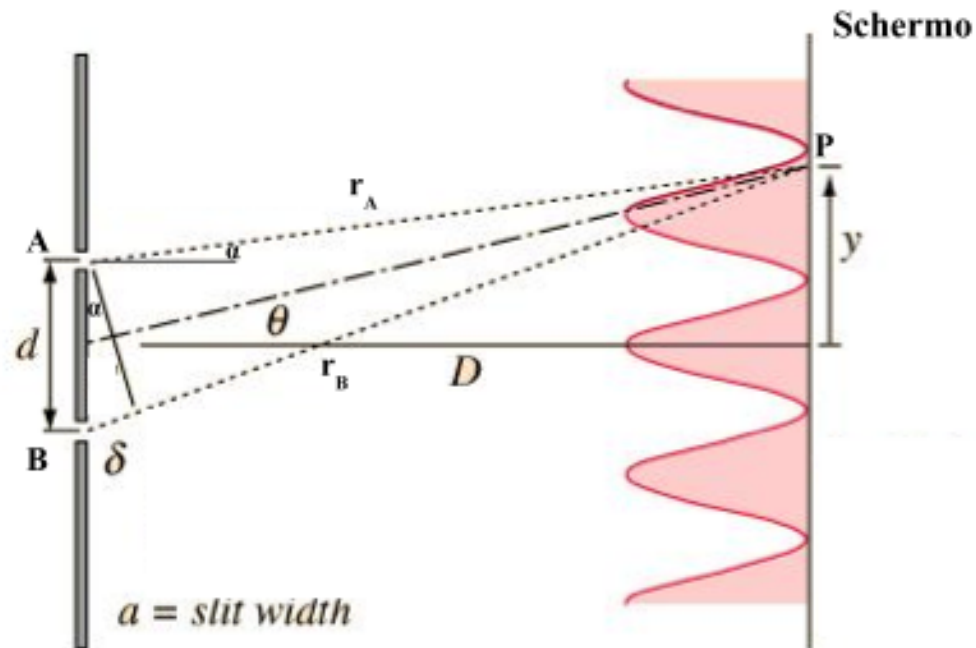


Figure 1: Profilo d'interferenza di un'onda che oltrepassa una doppia fenditura.

# Esperienza V – Interferenza versus diffrazione

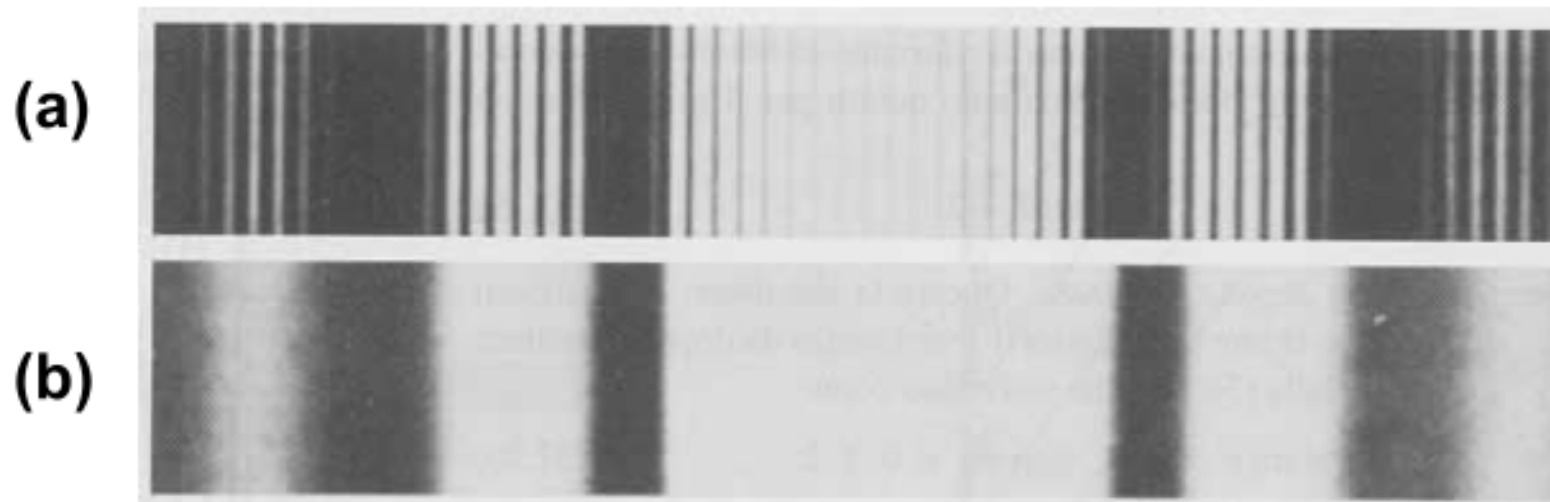


Figure 2: (a) Figura relativa alla diffrazione e all'interferenza da fenditura doppia.  
(b) Figura relativa alla diffrazione da fenditura singola.

# Esperienza V – Interferenza

Per l'implementazione degli esperimenti proposti sull'interferenza sono necessari i seguenti elementi:

- Diodo laser
- Schermo bianco
- Diverse maschere per l'interferenza
- Fori circolari di diametro diverso

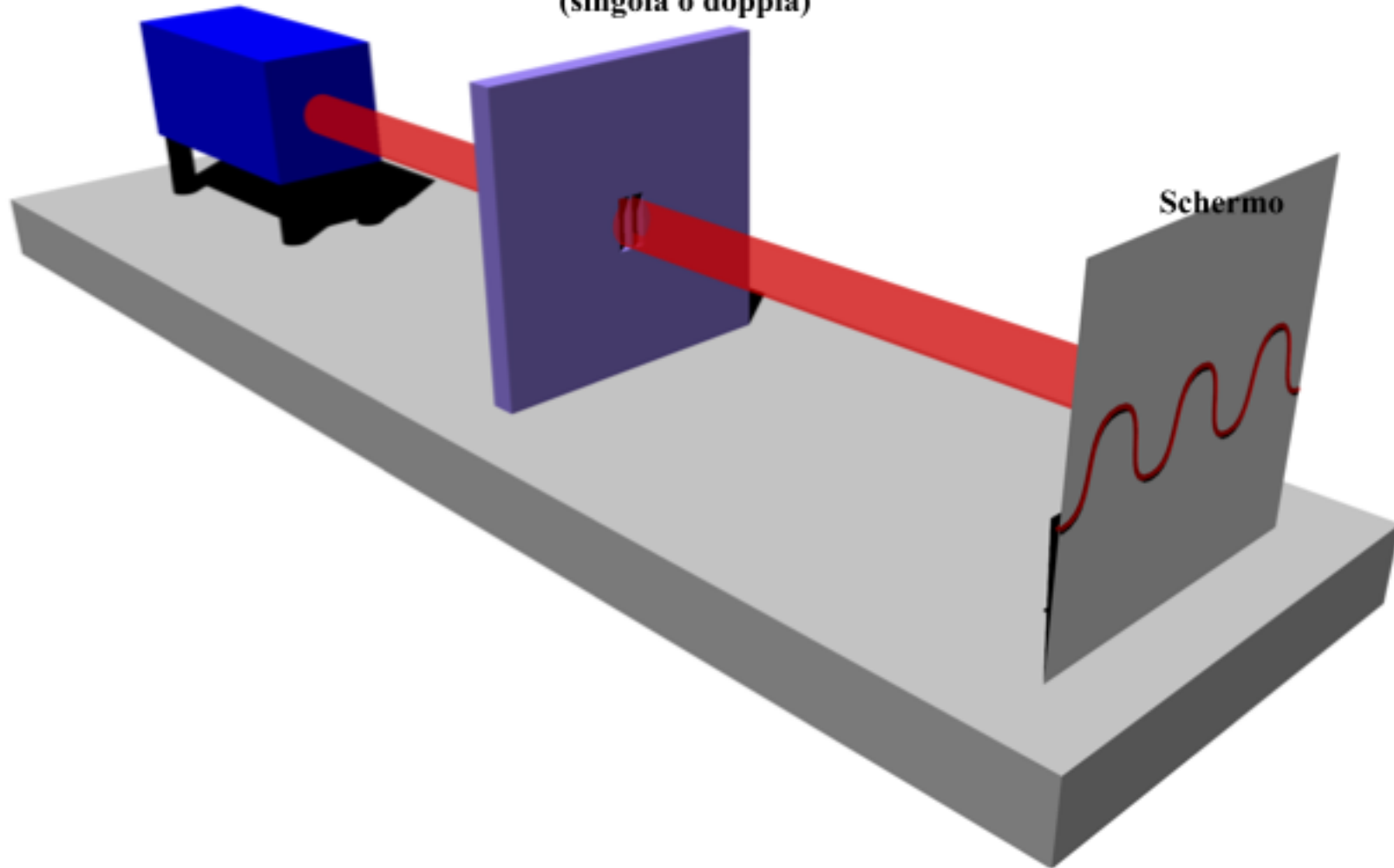


# Esperienza V – Apparato sperimentale

Sorgente Laser (o lampada + filtro monocromatico)

Fenditura (singola o doppia)

Schermo



# Esperienza V – Apparato sperimentale



Figure 6: Preparazione del setup per gli esperimenti.

# Esperienza V – Procedimento

- Coprendo una delle due fenditure, osservare come cambia la figura sulla lavagna, che mostra il solo contributo diffrattivo. Scompaiono infatti le modulazione interne al profilo di diffrazione.
- Osservare che, mentre nel caso della diffrazione, l'intensità luminosa sullo schermo varia tra massimi differenti, nel caso dell'interferenza non si ha una variazione nell'intensità tra massimi adiacenti.
- Osservare la variazione delle frange d'interferenza al variare della distanza tra le fenditure. Variando la distanza tra le fenditure si modifica infatti la struttura delle frange di interferenza che divengono via via più spaziate all'aumentare della distanza tra le fenditure stesse. Al limite la figura di interferenza sparisce.
- Osservare cosa avviene invece se si cambia la dimensione delle fenditure. In questo caso è il contributo di diffrazione a cambiare forma e non più la sua modulazione interna legata all'interferenza.
- Osservare infine la figura relativa al reticolo di diffrazione, cercando di individuare i contributi relativi alla diffrazione e all'interferenza tra fenditure differenti.

# Esperienza V – Immagine d'interferenza

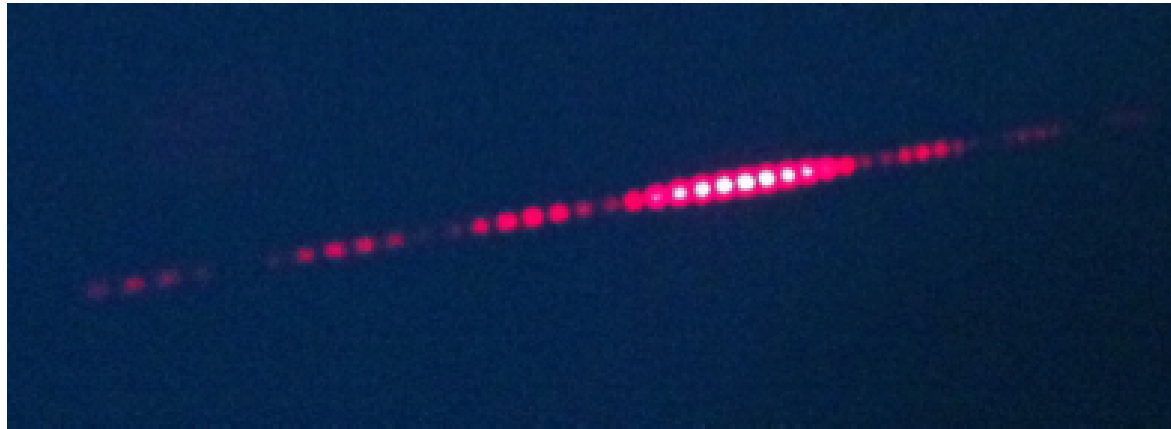


Figure 8: Figura di interferenza relativa ll'utilizzo di due fenditure.

# Esperienza V – Procedimento

- Attaccare sulla lavagna bianca un foglio di carta millimetrata, facendo attenzione a disporlo in modo esattamente orizzontale ortogonalmente alla direzione di incidenza del fascio.
- Allineare il disco fissando una determinata coppia di fenditure lungo il percorso del fascio laser.
- Segnare sulla carta millimetrata dei puntini in corrispondenza di due massimi di intensità nel profilo di interferenza, all'interno del massimo principale relativo alla figura di diffrazione, individuando in questo modo le posizioni di  $y_1$  ed  $y_2$ .
- Ripetere l'operazione per diversi valori della spaziatura  $d$  delle dimensioni della fenditura, mantenendo fissa la distanza  $D$  della lavagna dalle fenditure.

## Esperienza V – Analisi

- Riportare in una tabella i valori di  $\Delta y$  osservati per diversi valori di  $d$ .
- Riportare su un grafico l'andamento di  $\Delta y$  in funzione di  $1/d$ .
- Utilizzando il valore di  $\lambda$  trovato nell'esperienza della diffrazione, calcolare il valore di  $d$  relativo alle diverse fenditure