

Laboratorio di Elettromagnetismo e Ottica

Laboratorio di Ottica

Prof. C. Massimi e N. Mauri

Dipartimento di Fisica e Astronomia

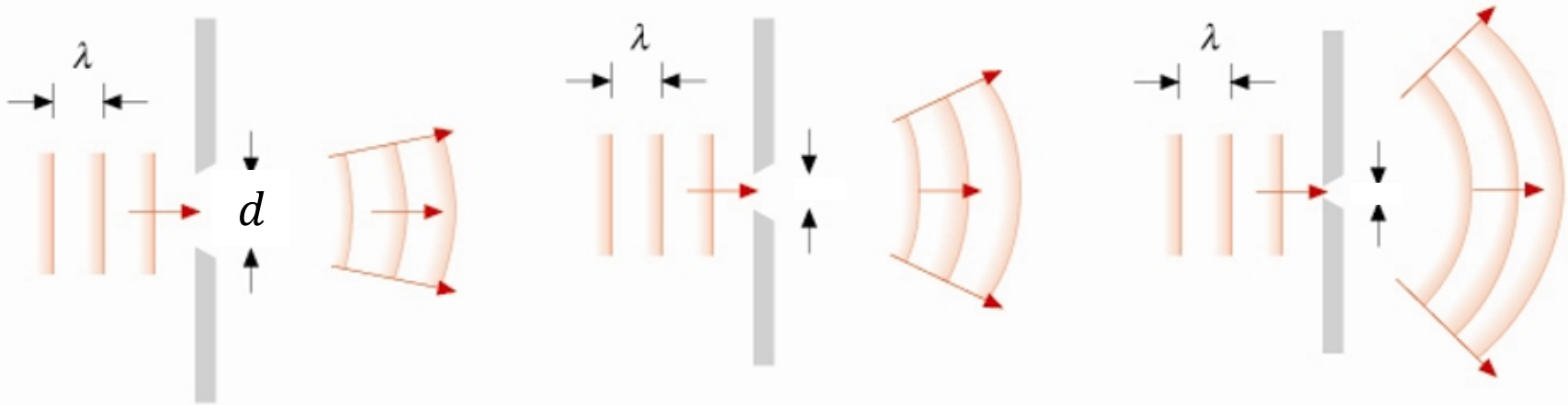
Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

Obiettivo

- Osservare i fenomeni ondulatori di diffrazione e interferenza
- Misurare profili di diffrazione e interferenza da
 - Singola fenditura rettangolare
 - Eseguire un fit dei dati sperimentali con la funzione attesa
 - Doppia fenditura (esperimento di Young)
 - In tutti i casi: verificare la compatibilità dei dati con le dimensioni attese o note



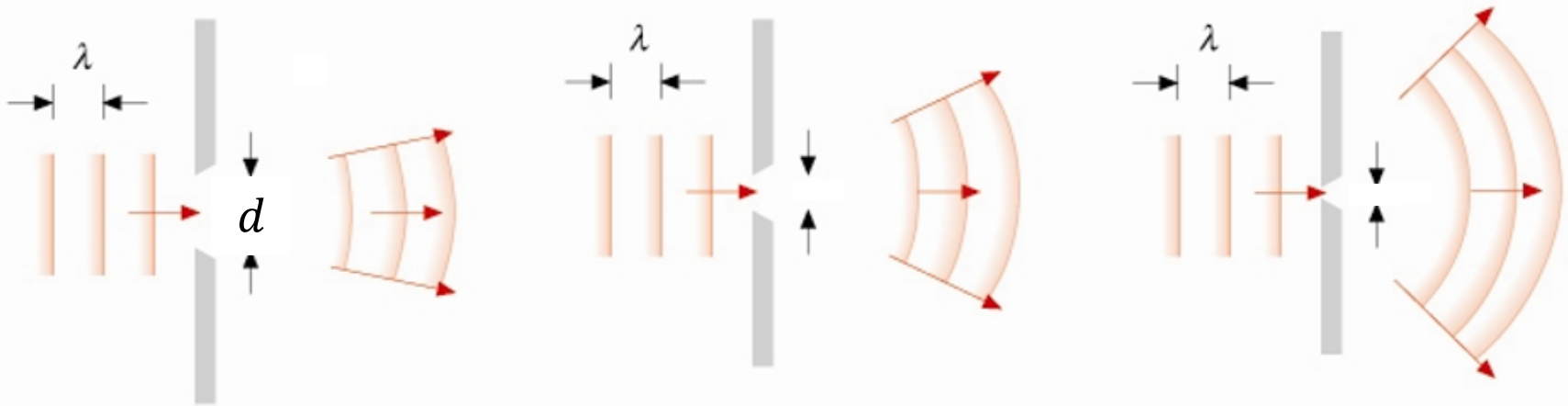
Diffrazione



- L'allargamento del fronte d'onda conseguente al superamento di un ostacolo
- Caso tipico: una fenditura



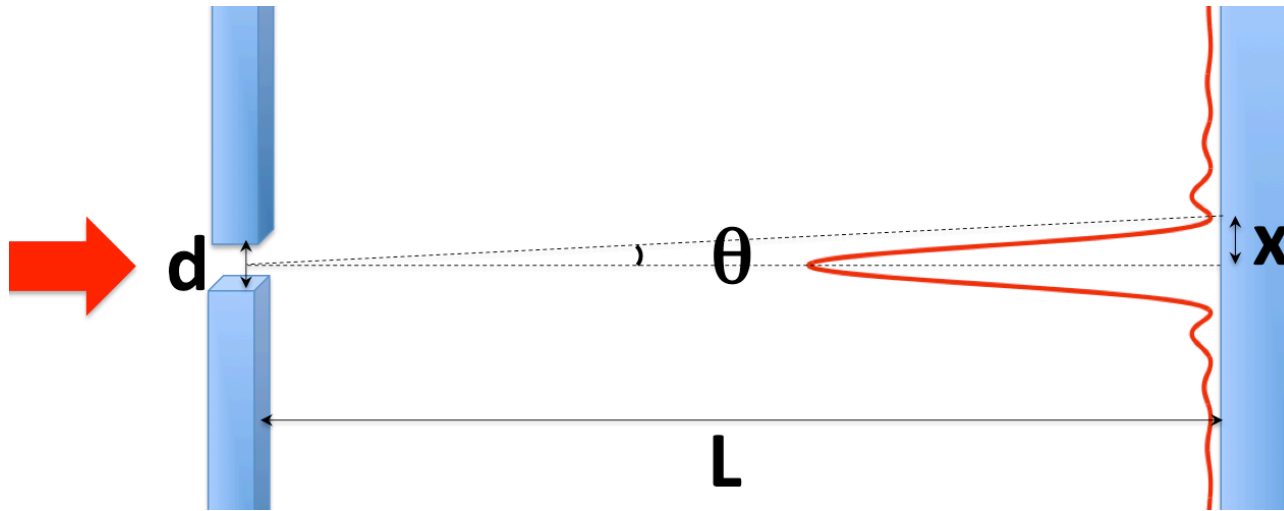
Diffrazione



- Se $d \gg \lambda$ il fronte d'onda che emerge dalla fenditura è \sim piano
- Quando $d \cong \lambda$ l'onda che emerge ha un fronte d'onda allargato
- L'effetto di «diffrazione» aumenta al diminuire di $\left(\frac{d}{\lambda}\right)$



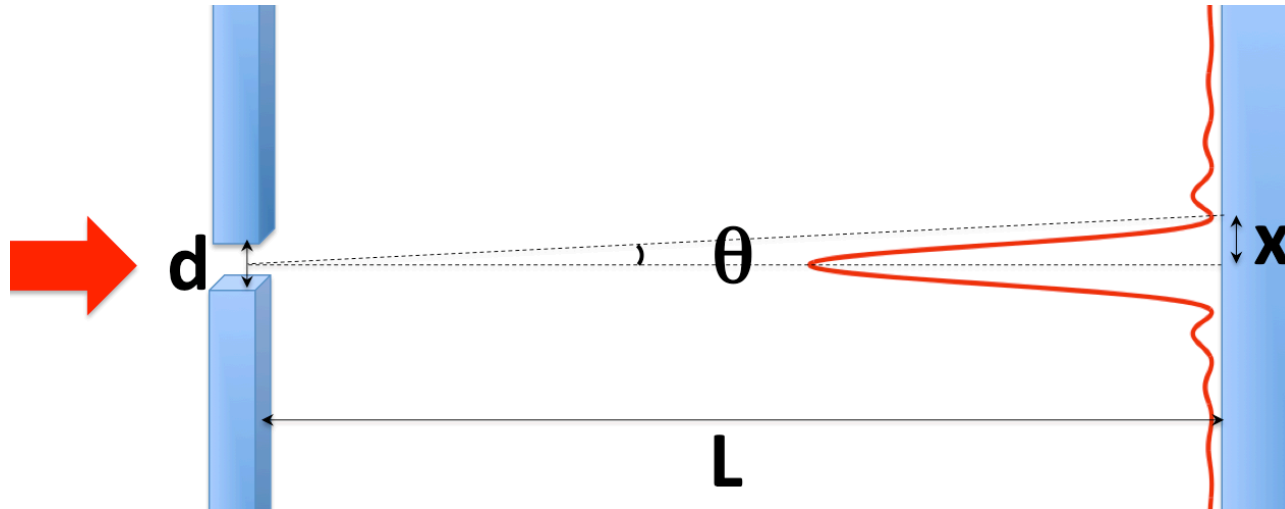
Diffrazione di Fraunhofer da una fenditura rettilinea



- Fenditura rettilinea:
larghezza (apertura) \ll lunghezza
- Fenditura illuminata da un'onda piana



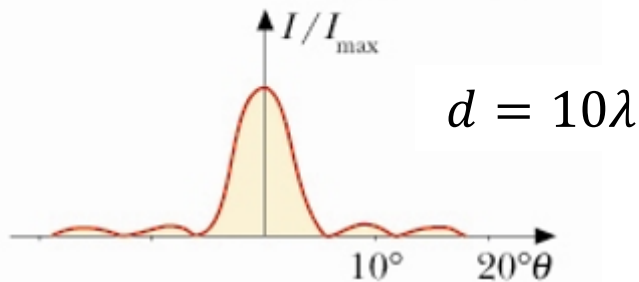
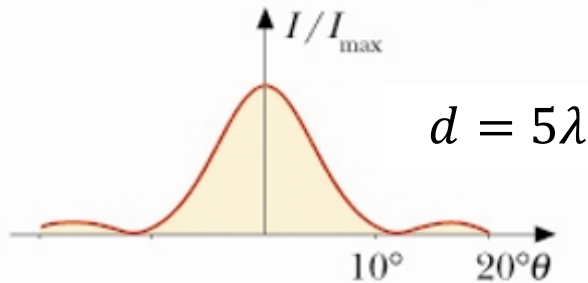
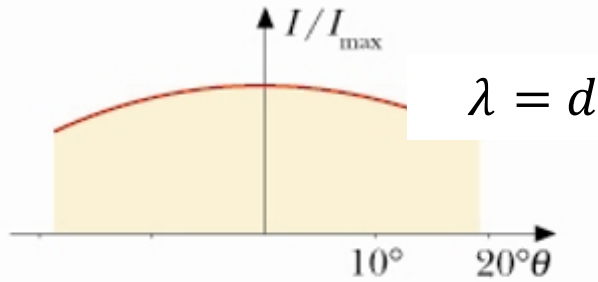
Diffrazione di Fraunhofer da una fenditura rettilinea



- Figura di diffrazione è formata da
 - Una frangia chiara centrale
 - Frange chiare laterali di intensità rapidamente decrescente allontanandosi dal centro
 - Frange scure
- Diminuendo la larghezza della fenditura tutta la figura di diffrazione si allarga



Diffrazione di Fraunhofer da una fenditura rettilinea



Si dimostra che l'intensità è

$$I(\theta) = I_0 \left[\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right]^2 =$$

$$= I_0 \left[\frac{\sin\left(\frac{kd \sin \theta}{2}\right)}{\left(\frac{kd \sin \theta}{2}\right)} \right]^2$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$



Diffrazione di Fraunhofer da una fenditura rettilinea

- L'intensità si annulla nei minimi di diffrazione, cioè quando

$$\frac{1}{2}kd \sin \theta_{\min} = m\pi$$

$$\sin \theta_{\min} = m\left(\frac{\lambda}{d}\right)$$

$$m = \pm 1, \pm 2, \dots$$



Diffrazione di Fraunhofer da una fenditura rettilinea

- I primi minimi, a destra e sinistra del massimo centrale, si hanno per

$$\sin \theta_{\pm 1} = \pm \left(\frac{\lambda}{d} \right)$$

- Inoltre per piccoli angoli vale $\sin \theta \cong \frac{x}{L}$,
e quindi:

$$\lambda \cong \frac{xd}{L}$$



Diffrazione di Fraunhofer da una fenditura rettilinea

- La larghezza angolare del massimo centrale di diffrazione è

$$\Delta(\sin \theta) = \frac{2\lambda}{d}$$

- Per angoli piccoli

- I minimi si trovano agli angoli

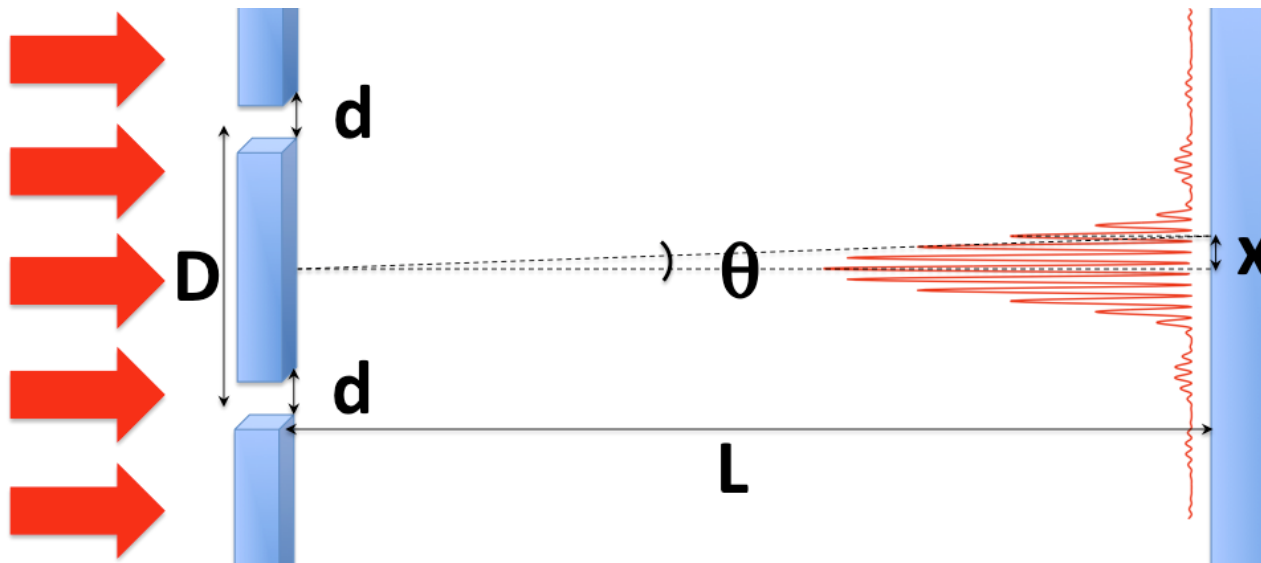
$$\theta_{\min} = m\left(\frac{\lambda}{d}\right), m = \pm 1, \pm 2, \dots$$

- La larghezza del massimo centrale è

$$\Delta\theta = \frac{2\lambda}{d}$$



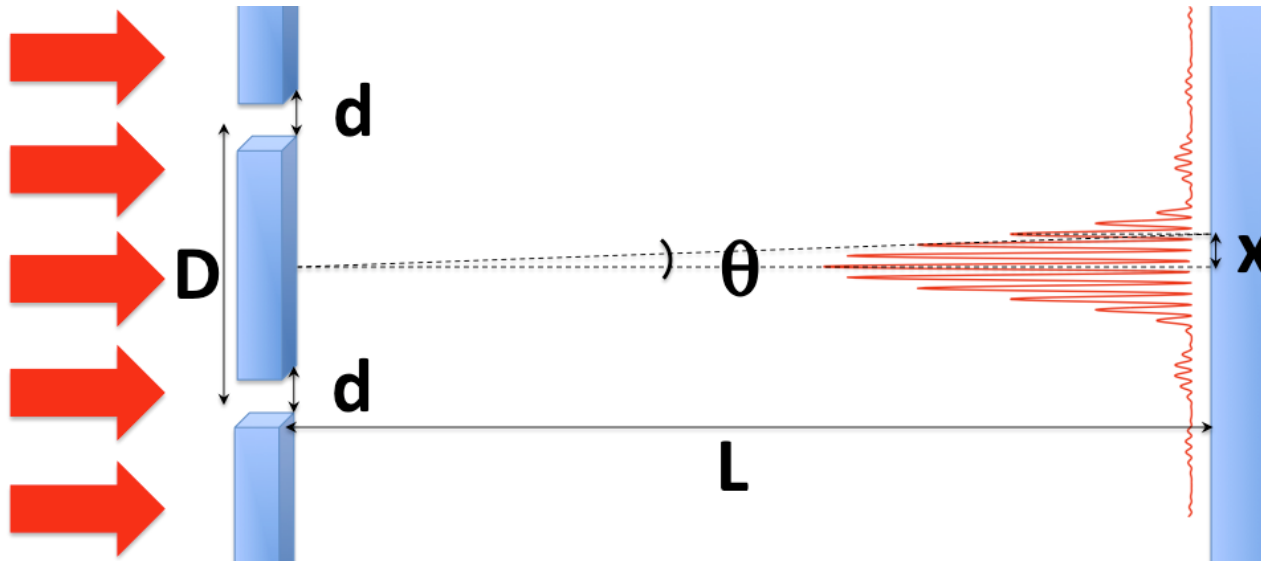
L'esperimento di Young



- Effetto principale: interferenza tra le onde provenienti dalle due fenditure
- Si tratta di due sorgenti coerenti e sincrone



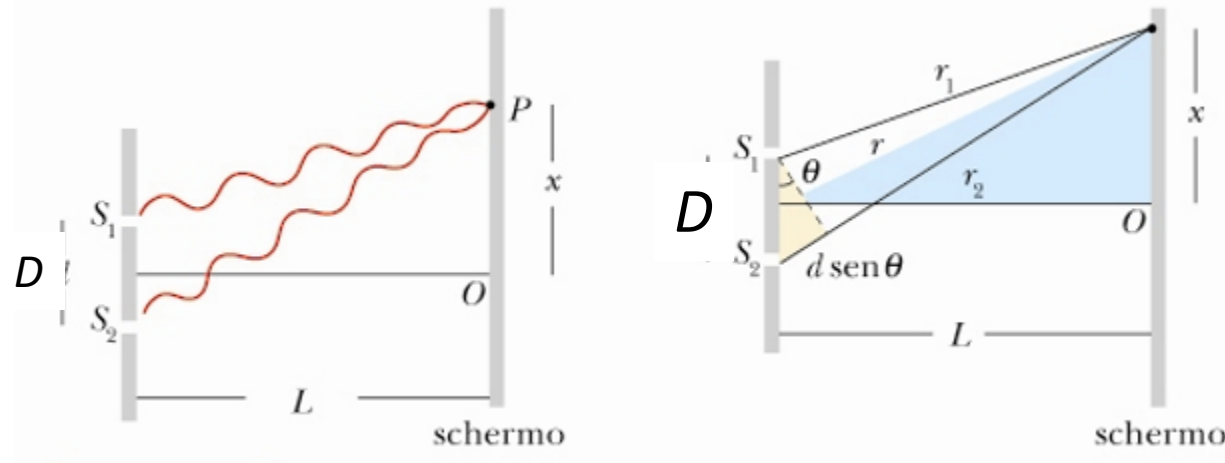
L'esperimento di Young



- Si osserva una figura di interferenza: una serie di strisce chiare e scure parallele alle fenditure, dette frange di interferenza
 - Frange chiare: intensità massima
 - Frange scure: intensità minima
- L'intensità della frangia centrale è massima
- L'intensità delle frange chiare diminuisce allontanandosi dal centro.



L'esperimento di Young

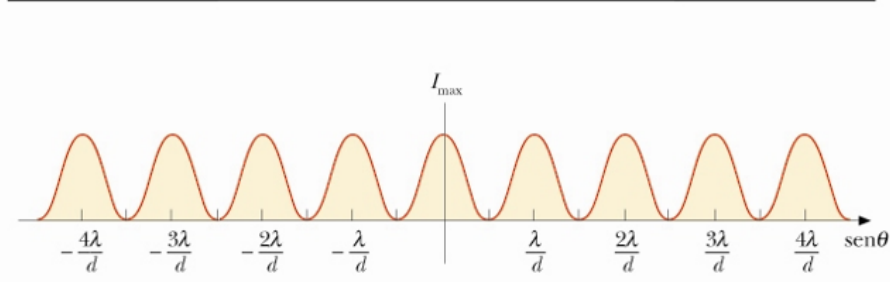
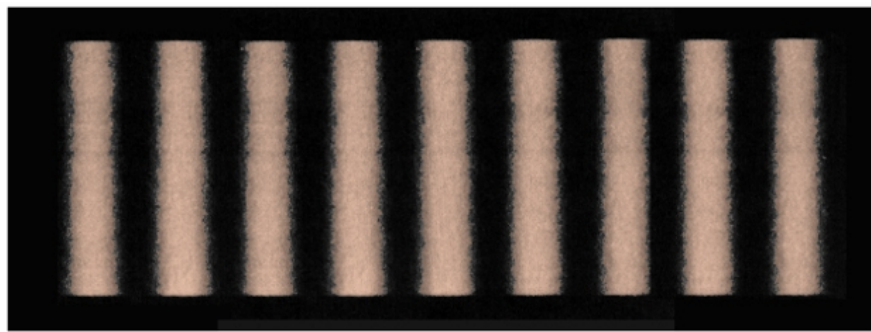


- Lo schermo è molto distante: $L \gg d$ e la differenza di fase è

$$\delta = k(r_2 - r_1)$$

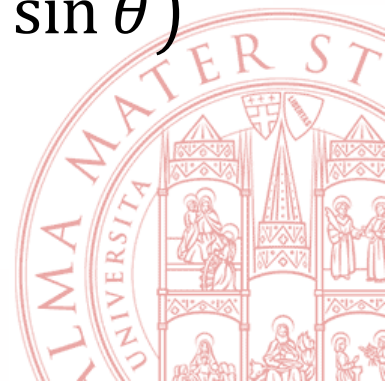


Esperimento di Young

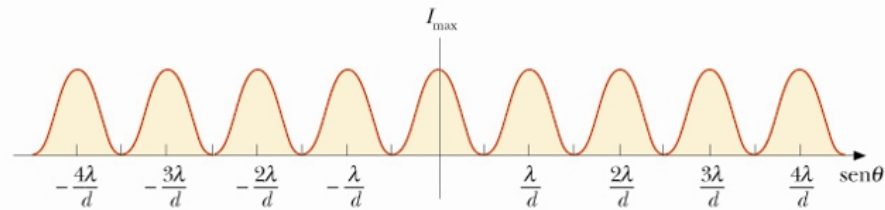
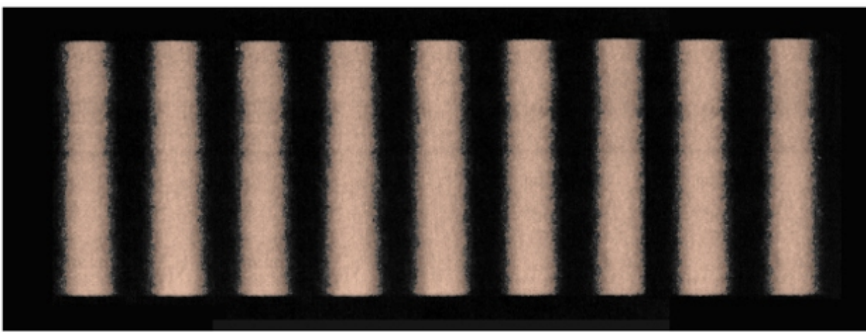


- Trascurando la diffrazione da singola fenditura si dimostra che l'intensità luminosa è

$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{1}{2}kD \sin \theta\right) = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta\right)$$



Esperimento di Young



- Massimi di intensità (interferenza costruttiva)

$$kD \sin \theta = 2m \pi, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$D \sin \theta = m\lambda, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

- Minimi di intensità (interferenza distruttiva)

$$kD \sin \theta = \pm(2m + 1) \pi, m = 0, 1, 2, \dots$$

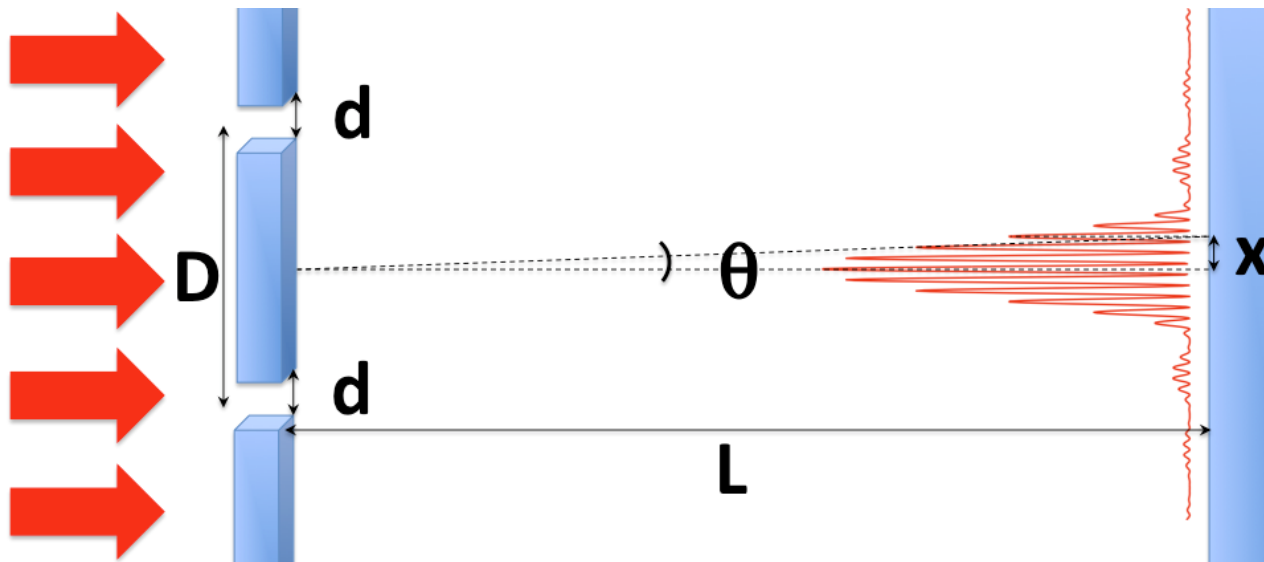
$$D \sin \theta = \pm(2m + 1)\frac{\lambda}{2}, m = 0, 1, 2, \dots$$



Esperimento di Young

- Considerando anche la diffrazione da singola fenditura si dimostra che l'intensità luminosa è

$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{1}{2}kD \sin \theta\right) \left[\frac{\sin\left(\frac{kd \sin \theta}{2}\right)}{\left(\frac{kd \sin \theta}{2}\right)} \right]^2$$



Diffrazione dei raggi X

- I medesimi concetti utilizzati per descrivere diffrazione e interferenza della luce sono alla base della «diffrazione di raggi X», il metodo principale per determinare la struttura atomica dei cristalli
- Esempio molto importante: la struttura del DNA
- Premio Nobel a Watson, Crick, Wilkins, 1962



- LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- Premi Nobel
 - 1964: C.H. Townes, N.G. Basov and A.M. Prokhorov "for fundamental work in the field of quantum electronics, which has led to the construction of oscillators and amplifiers based on the maser-laser principle"
 - 1981: N. Bloembergen and A. L. Schawlow "for their contribution to the development of laser spectroscopy"
 - 2018: Arthur Ashkin, Gérard Mourou and Donna Strickland "for groundbreaking inventions in the field of laser physics" with one half to Arthur Ashkin "for the optical tweezers and their application to biological systems", the other half jointly to Gérard Mourou and Donna Strickland "for their method of generating high-intensity, ultra-short optical pulses."



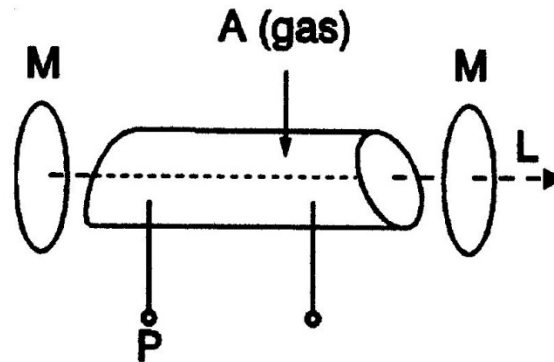
- Sono uno strumento molto utilizzato in fisica, chimica, biologia e tecnologia
- Diversi laser emettono in: microonde, infrarosso, visibile, ultravioletto e raggi X
- Due tipi fondamentali
 - Continuous Wave (CW): emissione costante nel tempo
 - Pulsed (impulsati)



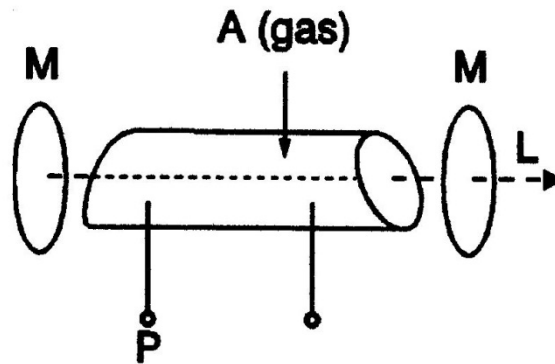
- Caratteristiche principali
- Bassissima divergenza: ~ 0.1 mrad
- Bassissima banda passante / elevatissima monocromaticità: $\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \sim 10^{-8}$
- Elevata coerenza
 - Longitudinale: 1 – 300 km, trasversale mm
- Possono avere elevata intensità
 - Usati in laboratorio: 5 mW



- Un laser è costituito da
 - Un mezzo otticamente attivo
 - Un gas, un solido, una giunzione di semiconduttore
 - Una cavità risonante
 - Un sorgente di «pompaggio ottico»



- Il funzionamento del mezzo otticamente attivo si basa sull'effetto quantistico della emissione stimolata di radiazione



Schema energetico di un sistema laser

- Si basa su transizioni di elettroni tra diversi «livelli» quantistici
- Il livello 0 è lo «stato fondamentale»
- Una sorgente esterna («pompa») induce transizioni al livello 3
- Il sistema decade al livello 2 senza emissione di luce
- Una transizione dal livello 2 al livello 1 produce la luce laser
- Il sistema decade al livello 0 senza emissione di luce

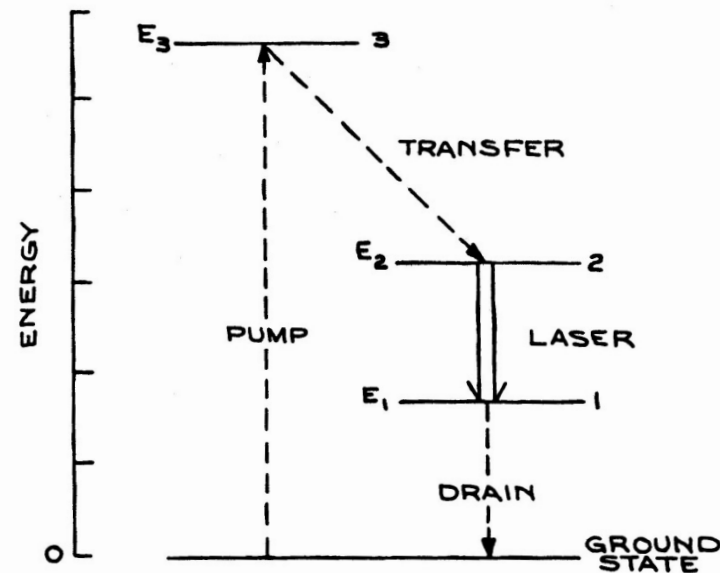
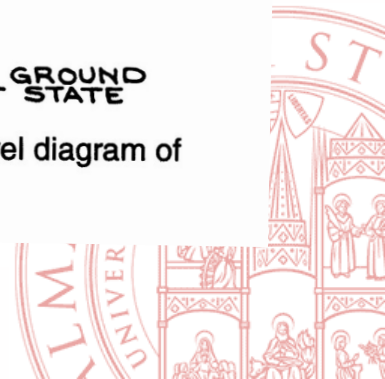


Figure 4.113 Schematic partial energy-level diagram of a laser system.



Schema energetico di un sistema laser

- Il numero di elettroni nel livello 2 > il numero nel livello 1: inversione di popolazione
- In queste condizioni il mezzo, interagendo con la luce presente nella cavità, può emettere radiazione

- La frequenza emessa è

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

dove $h \cong 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ è
la costante di Planck

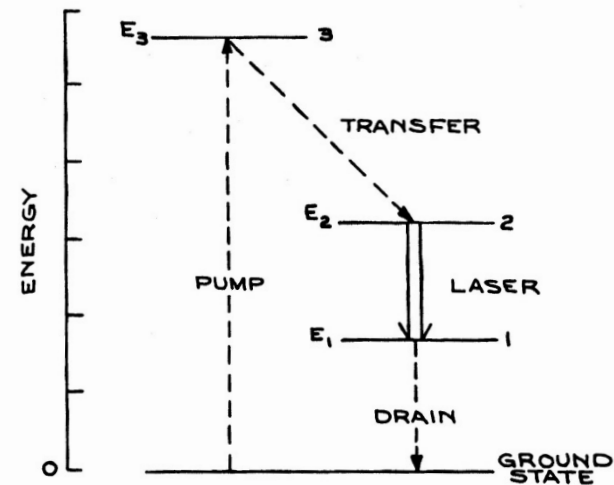
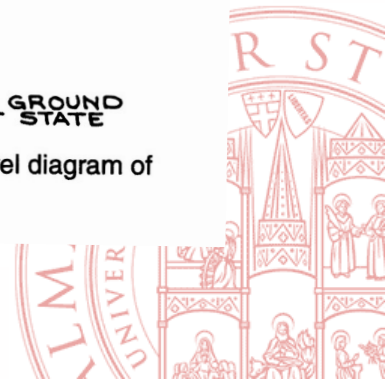


Figure 4.113 Schematic partial energy-level diagram of a laser system.



La cavità risonante

- Nell versione più semplice, la cavità risonante è costituita da due specchi a distanza L
- Uno dei due è parzialmente trasparente per permettere l'uscita della radiazione
- Nella cavità si generano onde EM stazionarie, la cui lunghezza d'onda è

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

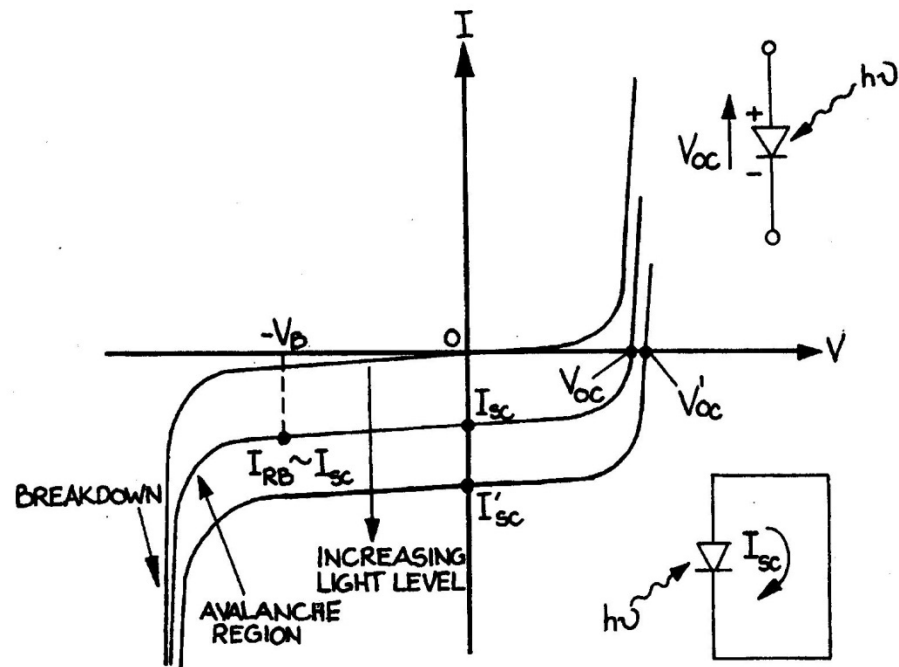
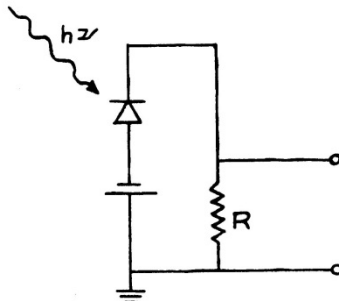
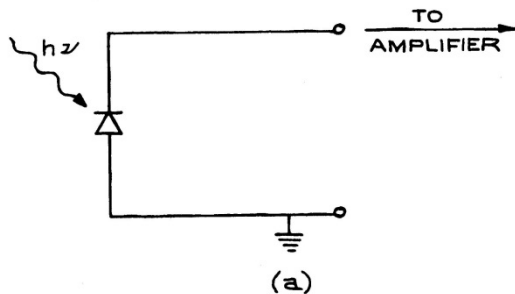


- Un diodo in cui l'assorbimento di luce induce una variazione della corrente a causa della generazione di portatori di carica (elettroni e «lacune»)

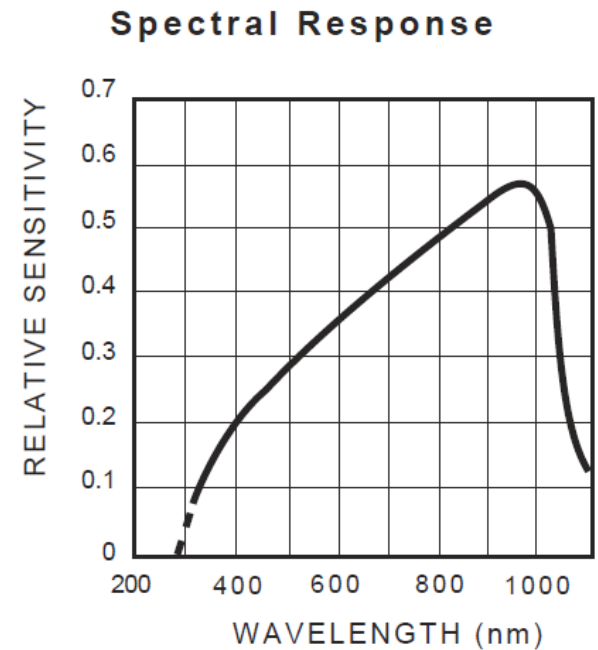
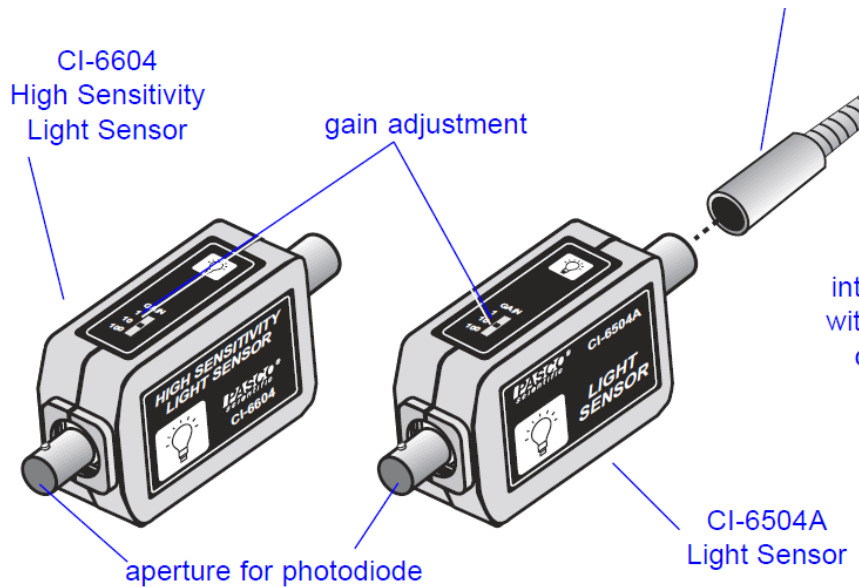


Fotodiodi

- Si possono usare
 - Circuito aperto: viene generata una tensione V_{oc}
 - Polarizzazione inversa: si genera una corrente che induce una tensione ai capi di R



Il fotodiodo utilizzato



- Fotodiode al Si
- Genera un tensione (0 – 5 V) direttamente proporzionale all'intensità luminosa: «unità arbitrarie»)
- Si varia il «guadagno»: 1, 10, 100
- Corrisponde a intensità massime di
 $\sim 73 \text{ W/m}^2, 7.3 \text{ W/m}^2, 0.73 \text{ W/m}^2$



Apparato sperimentale

- Banco ottico;
- diodo laser ;
- fotodiodo al silicio con collimatore variabile;
- micro-posizionatore lineare su cui è montato il fotodiodo
 - specifiche: passo minimo $0.124\text{ }\mu\text{m}$, spostamento massimo (corsa) 100 mm , ripetibilità $< 4\text{ }\mu\text{m}$, accuratezza sullo spostamento massimo $125\text{ }\mu\text{m}$;
- fenditura lineare;
- Varie coppie di fenditure con larghezza e distanza variabile;

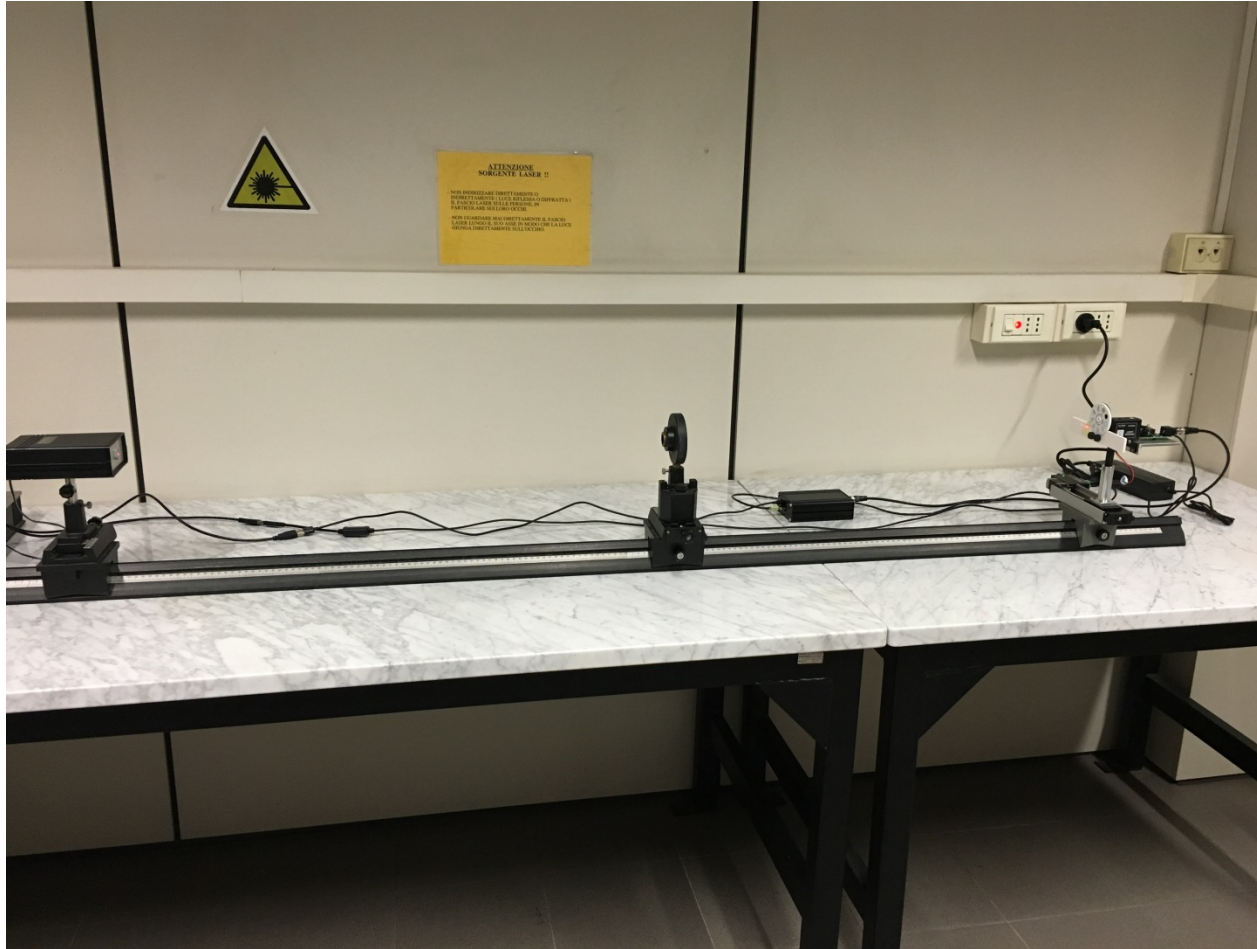


Apparato sperimentale

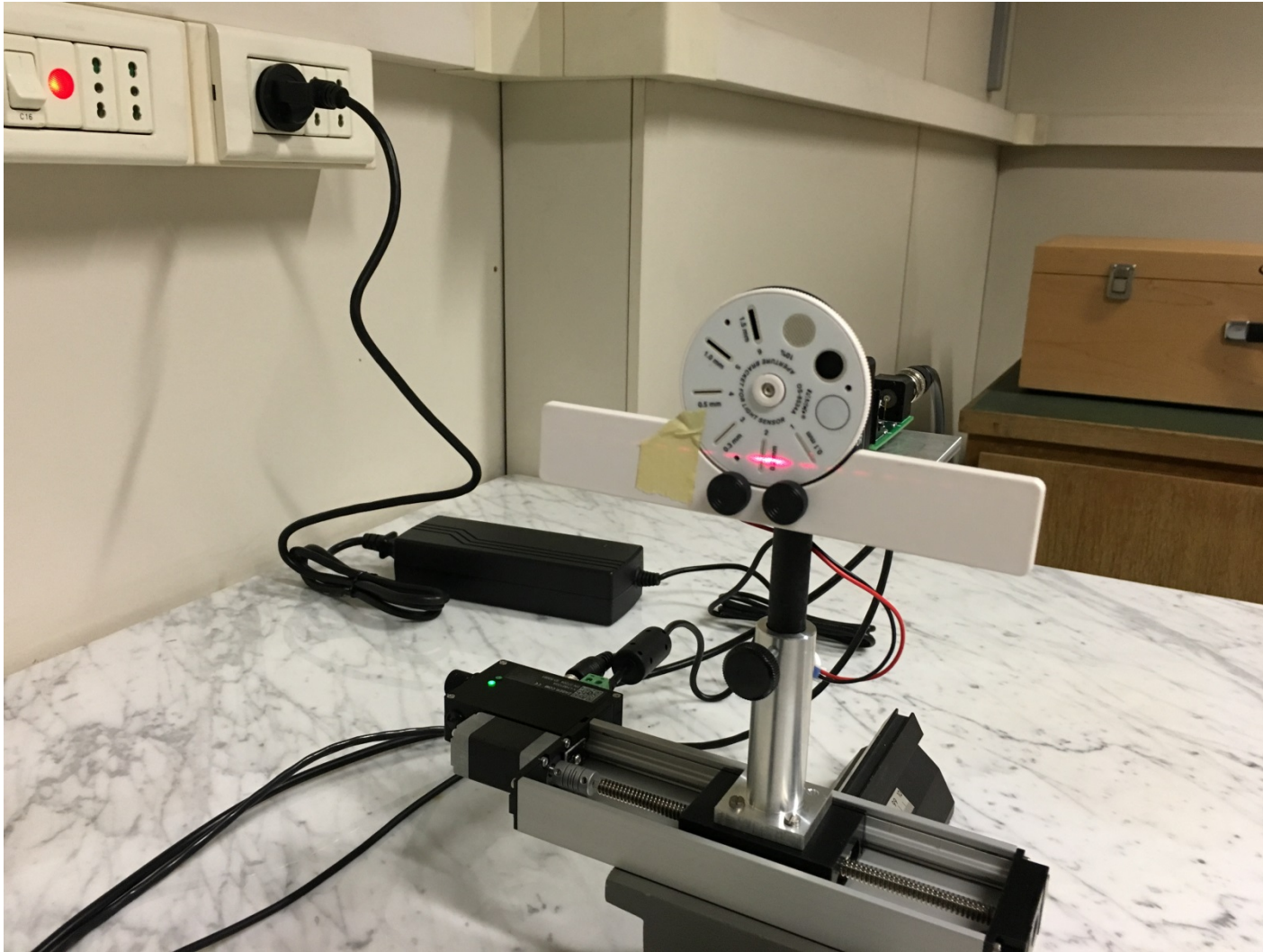
- PC e software dedicato LabView per il controllo del micro-posizionatore e la misura dell'intensità luminosa con il fotodiodo;
 - Sistema di acquisizione basato su ADC basato su un circuito integrato con specifiche
 - 10 bit (1024 step)
 - L'incertezza di misura dipende dal CI ma anche dal resto del circuito: si valuta con misure ripetute



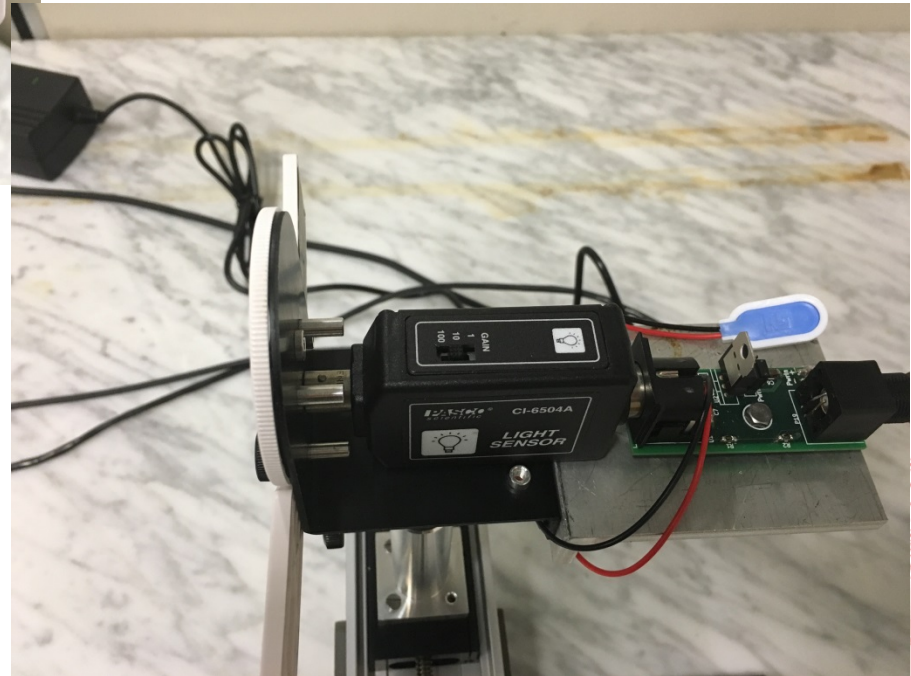
Apparato sperimentale



Apparato Sperimentale



Apparato sperimentale



Acquisizione: preliminari

- Dopo aver lanciato il programma di acquisizione e collegato posizionatore e sensore, dal pannello Linear Stage Control:
 - Premere il tasto Home
 - Attendere il posizionamento del carrello nella posizione di Home ed il messaggio di conferma.
D'ora in avanti tutti gli spostamenti sono definiti in modo relativo a questa posizione.



Acquisizione

- È possibile avviare due tipi di acquisizione:
 - una scansione della intensità luminosa in funzione della posizione
 - una acquisizione statica, cioè una misura ripetuta nel tempo della intensità nella medesima posizione del sensore.
- Per la scansione delle luminosità in funzione della posizione è possibile definire i seguenti parametri:
 - La posizione iniziale del carrello.
 - Lo spostamento del carrello tra un punto di misura ed il successivo, cioè il passo della misura.
 - La posizione finale (raggiunta la quale l'acquisizione si ferma automaticamente)
 - Il numero di misure da acquisire per ogni posizione. Sul grafico apparirà solo il punto medio di tali misure.
 - È utile controllare il tempo approssimativo di esecuzione della scansione una volta settati i parametri.



Acquisizione

- Nel pannello per la acquisizione statica è possibile impostare il numero di punti da acquisire e l'intervallo di tempo che deve intercorrere tra una misura e l'altra.



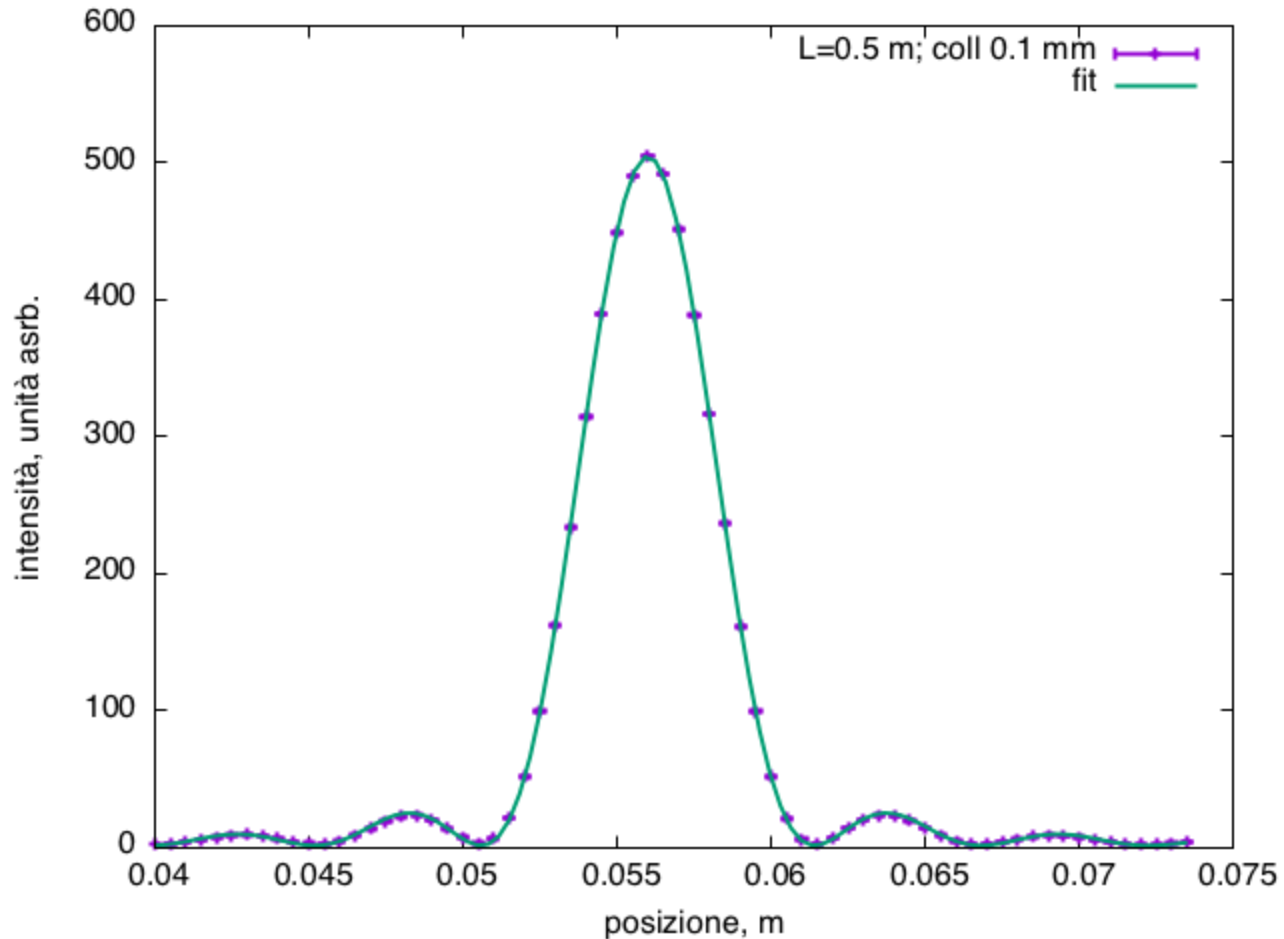
- I dati si salvano in file formato testo
- Il formato dei dati salvati per la scansione lineare è:

Posizione Intensità Dev. Std.

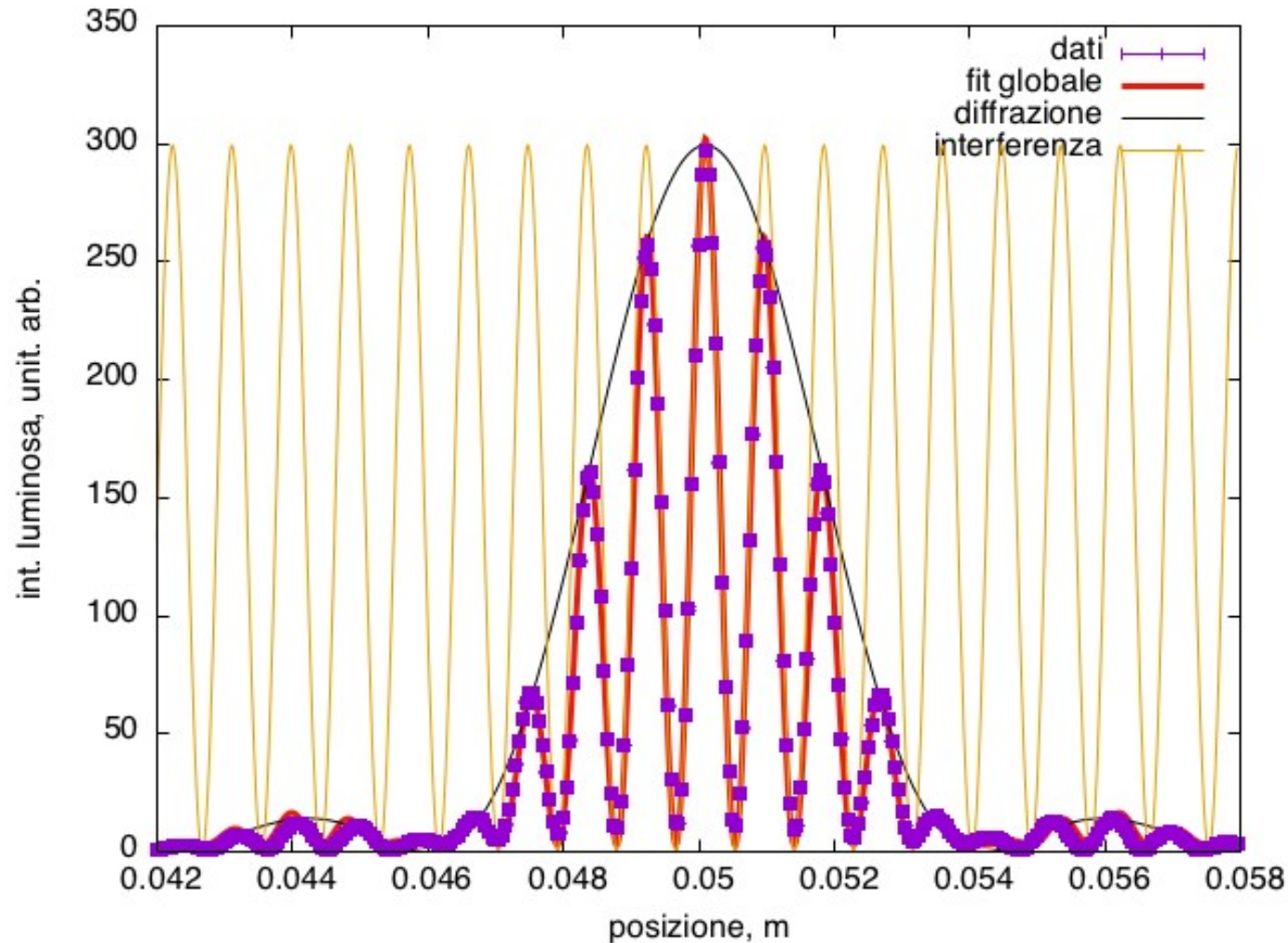
in cui la posizione è espressa in metri mentre intensità e deviazione standard sono espressi in Volt.



Fit della figura di diffrazione da singola fenditura



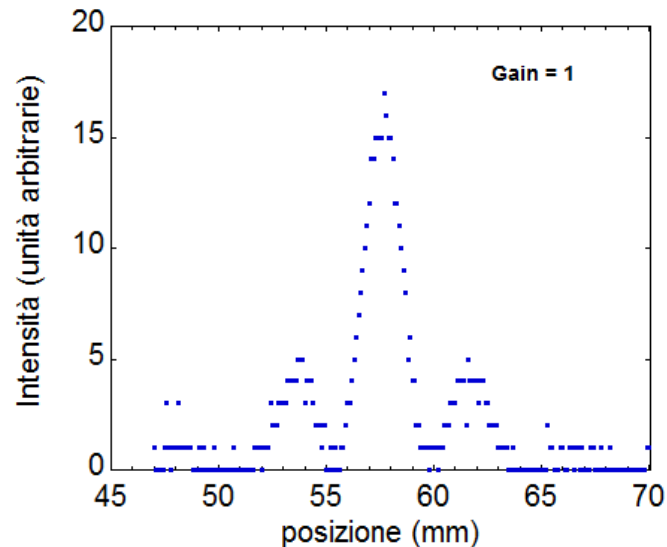
Doppia fenditura – diffrazione e interferenza



Impostazioni o condizioni di misura errate

- Una lista non esaustiva

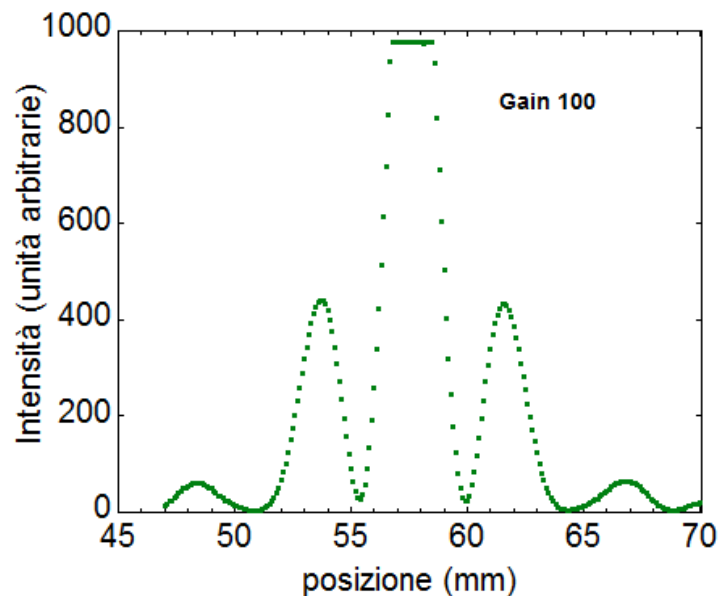




Troppo basso

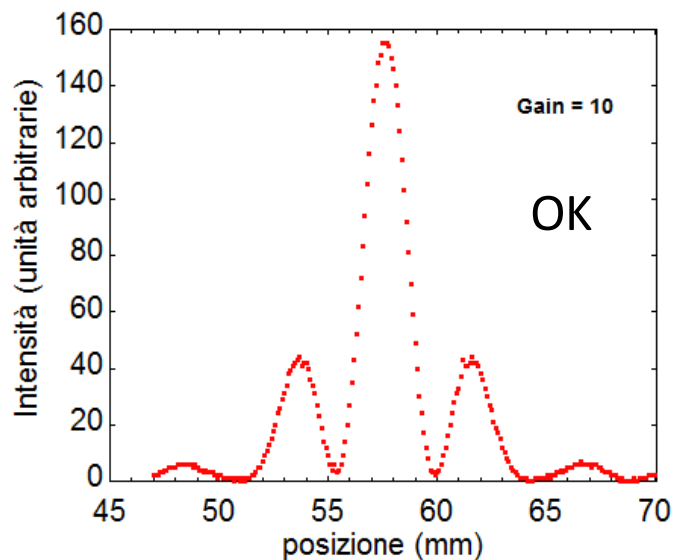
le variazioni di intensità ~ passo ADC)

Effetto del guadagno

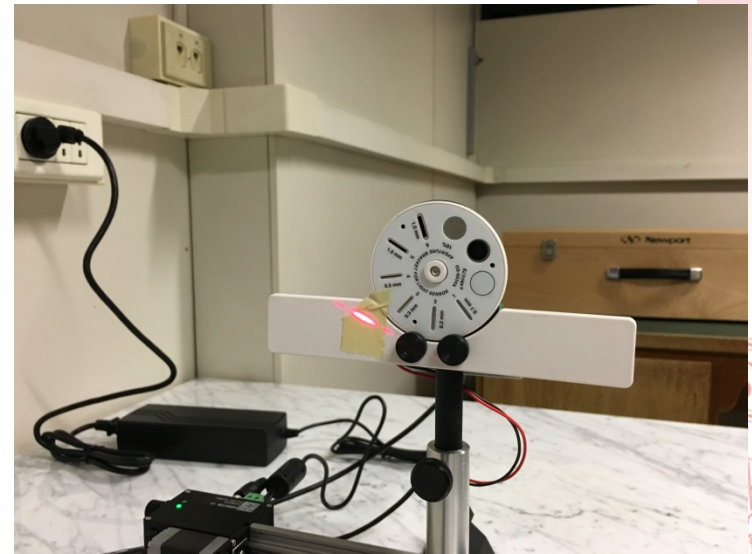
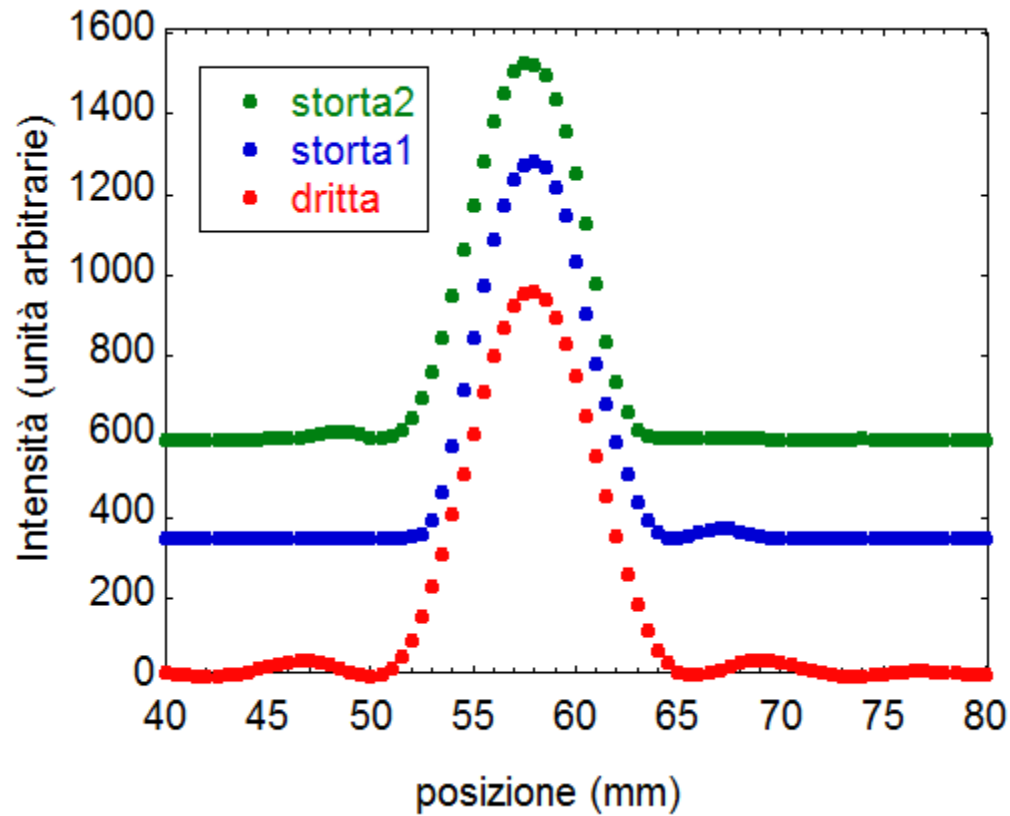


Troppo alto

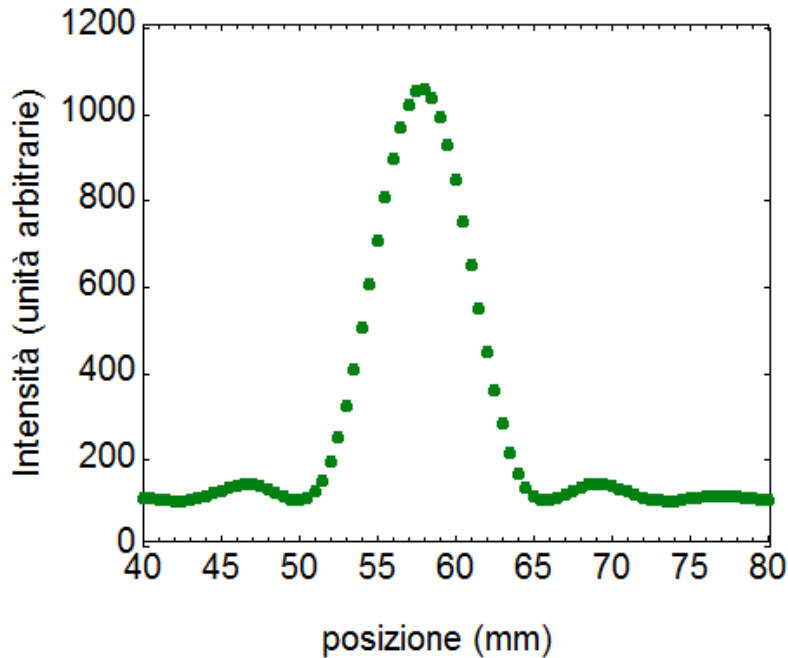
L'intensità «satura»: la tensione supera il valore massimo accettato dal ADC



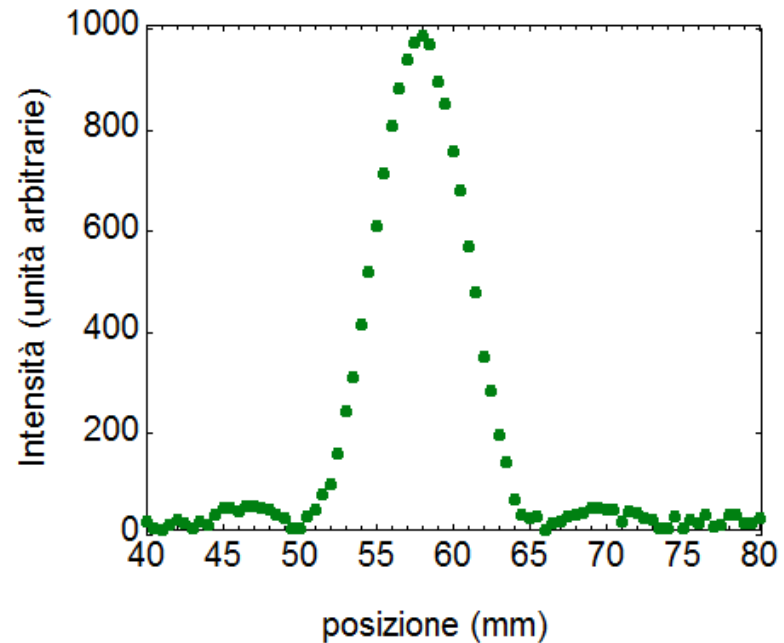
Effetto del disallineamento – fenditura storta



«Fondo» e «rumore»



- Misura con un «fondo»
- Origine: per esempio, presenza di luce ambientale



- Misura con «rumore»
- Origine: per esempio, segnale confrontabile con l'incertezza del sistema di misura

