

Laboratorio di Ottica e Spettroscopia

Terza lezione

Dai raggi di luce al modello a onde
(Introduzione alla spettroscopia)

Antonio Maggio e Luigi Scelsi
Istituto Nazionale di Astrofisica
Osservatorio Astronomico di Palermo

Sommario 3^a lezione

Prima parte

- Esercizio guidato di astrometria

Seconda parte

- Fenomeni che non possono essere spiegati con l'ottica geometrica
- Modello ondulatorio della luce
- Esperienze con fenditure
- Interferenza e diffrazione
- Tecniche di misura tramite diffrazione
- Cenni di spettroscopia

Test d'uscita sui principi di ottica

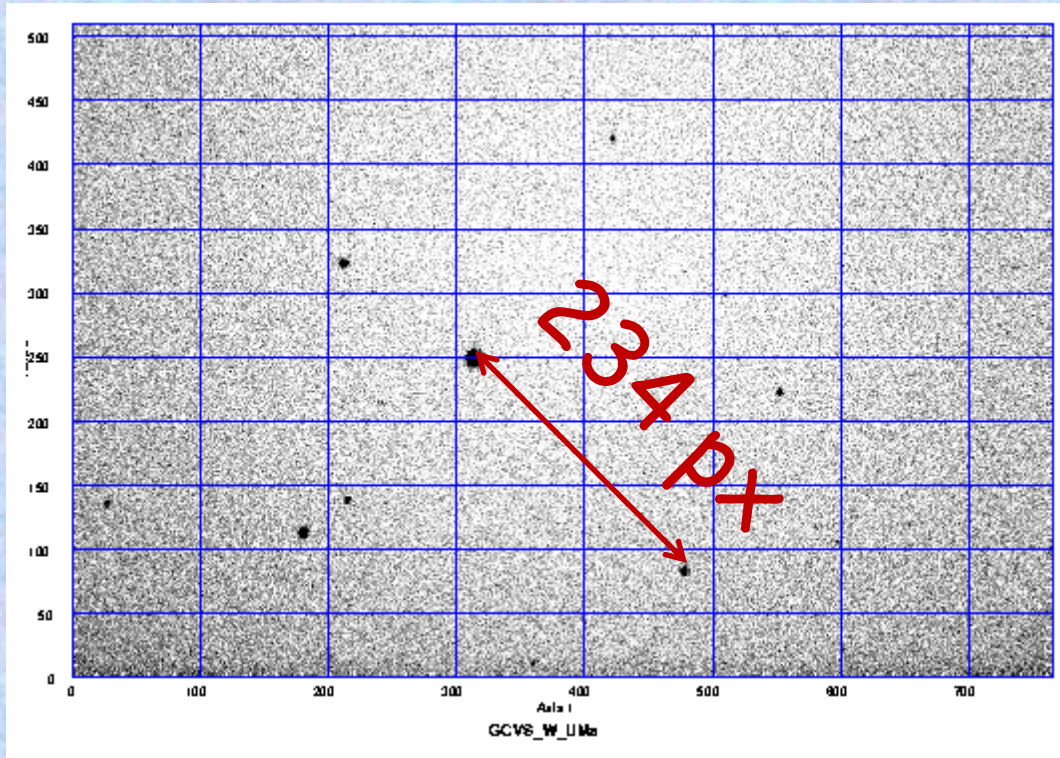
Strumenti ottici per osservazioni astronomiche

- **L'accoppiamento di varie lenti** può essere impiegato per ottenere immagini ben focalizzate e ingrandite (es. telescopio rifrattore)
- **L'ottica geometrica** ci consente di prevedere a che distanza dalla prima lente si formerà l'immagine (equazione delle lenti sottili) e la sua dimensione angolare (ingrandimento)
- La qualità dell'immagine dipende da quanta radiazione riusciamo a raccogliere e trasferire sul **rivelatore** (occhio, schermo, CCD) e da quanto precisa (univoca) è la *corrispondenza tra coordinate dei punti oggetto e coordinate dei punti immagine*

Osservazioni con un telescopio astronomico

- Dato un telescopio con una lente (o specchio) principale di diametro **D** e lunghezza focale **f** :
 - **Scala dell'immagine sul rivelatore** (dimensione **h** dell'immagine di un oggetto che sottende un certo angolo di vista **θ** (in radianti), prodotta dal telescopio sul piano focale): **$h = \theta f$** [mm]
 - **Apertura del telescopio**: **$F = f / D$**
 - **Limite di diffrazione** (migliore risoluzione spaziale possibile in un'immagine): **$\theta \sim 1,22 \lambda / D$**
- Il riflettore Schmidt-Cassegrain C14 dell'Osservatorio Astronomico di Palermo:
 - **D = 14 pollici** (355,6 mm), **F = 3.3**
 - Rivelatore CCD da 765 x 510 pixels, dimensione lineare di un pixel = 9 μm (1 $\mu\text{m} = 10^{-3}$ mm)

Immagine astronomiche



Campo stellare fotografato con il rivelatore CCD al fuoco del C14 (la stella più luminosa è W UMa)

D = 14 pollici (355,6 mm),
F = 3.3, CCD da 765 x 510 pixels, pixel da 9 μm

1. Qual è la dimensione lineare dell'immagine (in mm)?
2. Qual è la lunghezza focale del telescopio?
3. A che angolo corrisponde un pixel (scala del telescopio in arcosecondi/pixel)?
4. A quanti arcosecondi da W UMa si trova la stella indicata?

Verso un'altro modello di radiazione



- Esperienze di riflessione e interferenza:

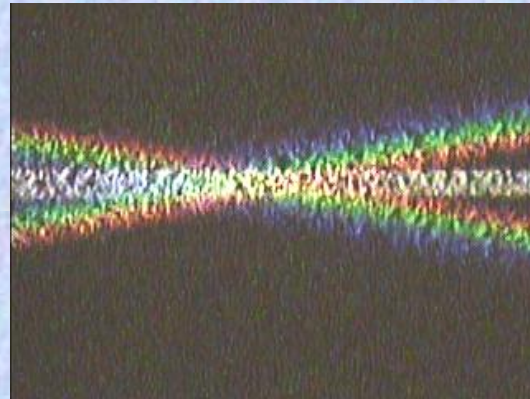
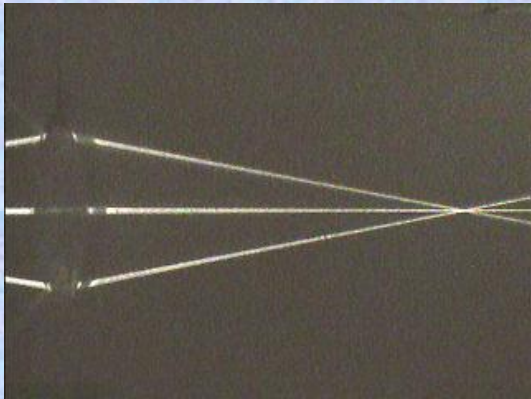
Un prisma o una goccia d'acqua illuminati creano un arcobaleno

Uno specchio riflette la luce, mentre la superficie di un CD-ROM genera effetti cromatici

Il modello a raggi (ottica geometrica) non è in grado di spiegare questi effetti. Serve un altro modello.

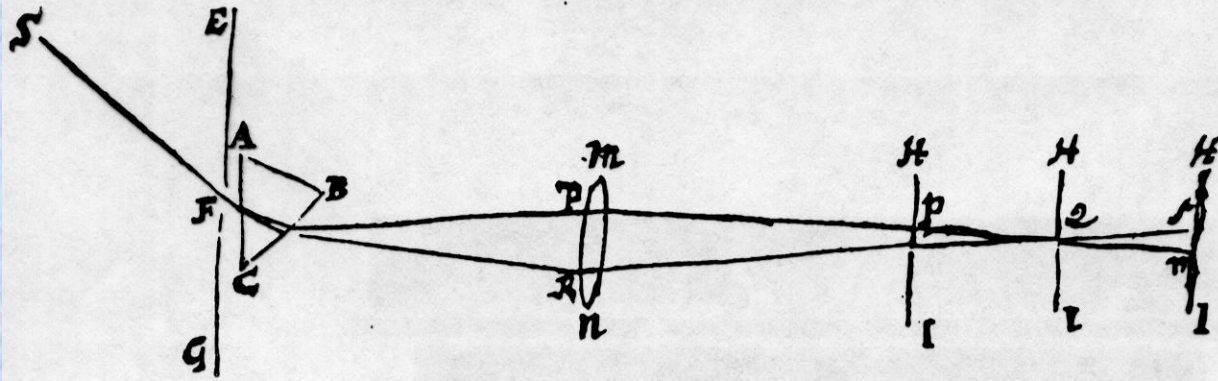
Il problema delle aberrazioni

- Aberrazioni: "difetti" di focalizzazione
- **Aberrazione cromatica** : un effetto fisico



- Causato dalla dipendenza dell'indice di rifrazione dal "colore" della radiazione
- A questa dipendenza si deve la **scomposizione spettrale** della luce che attraversa un prisma o una goccia d'acqua

Esperimenti di Newton con un prisma (1672)



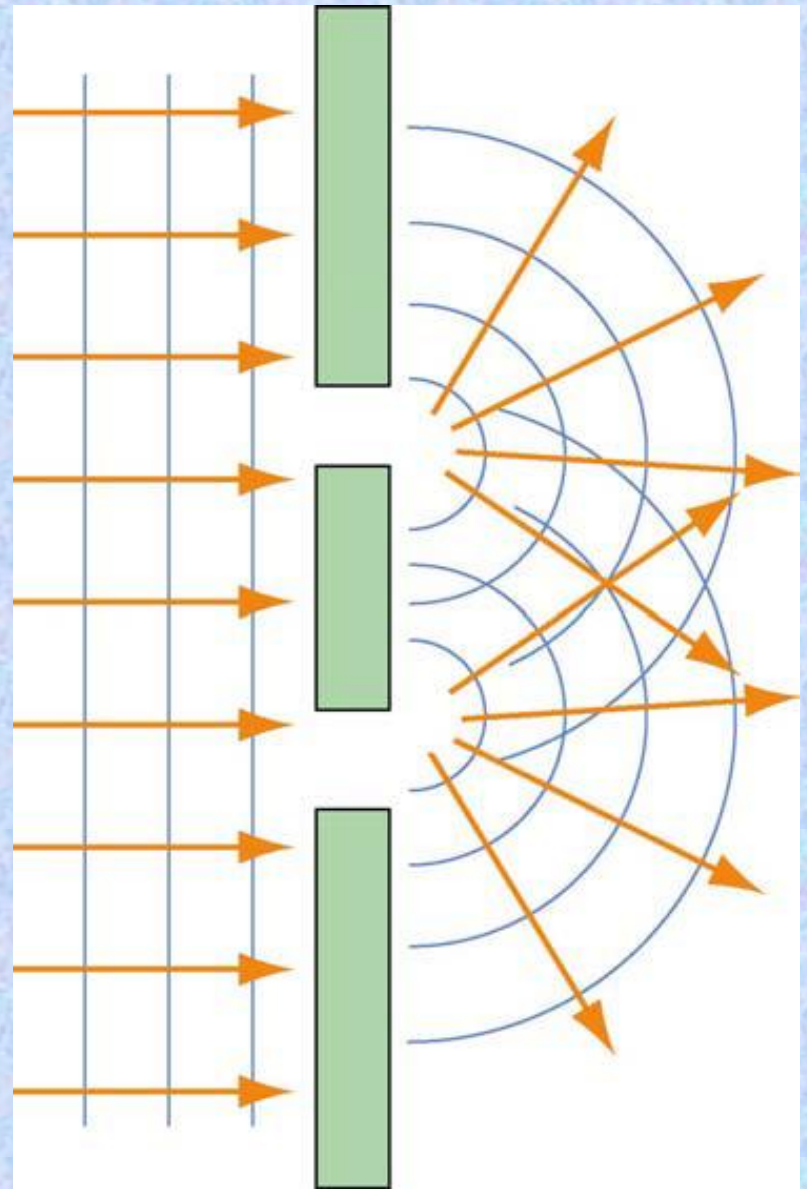
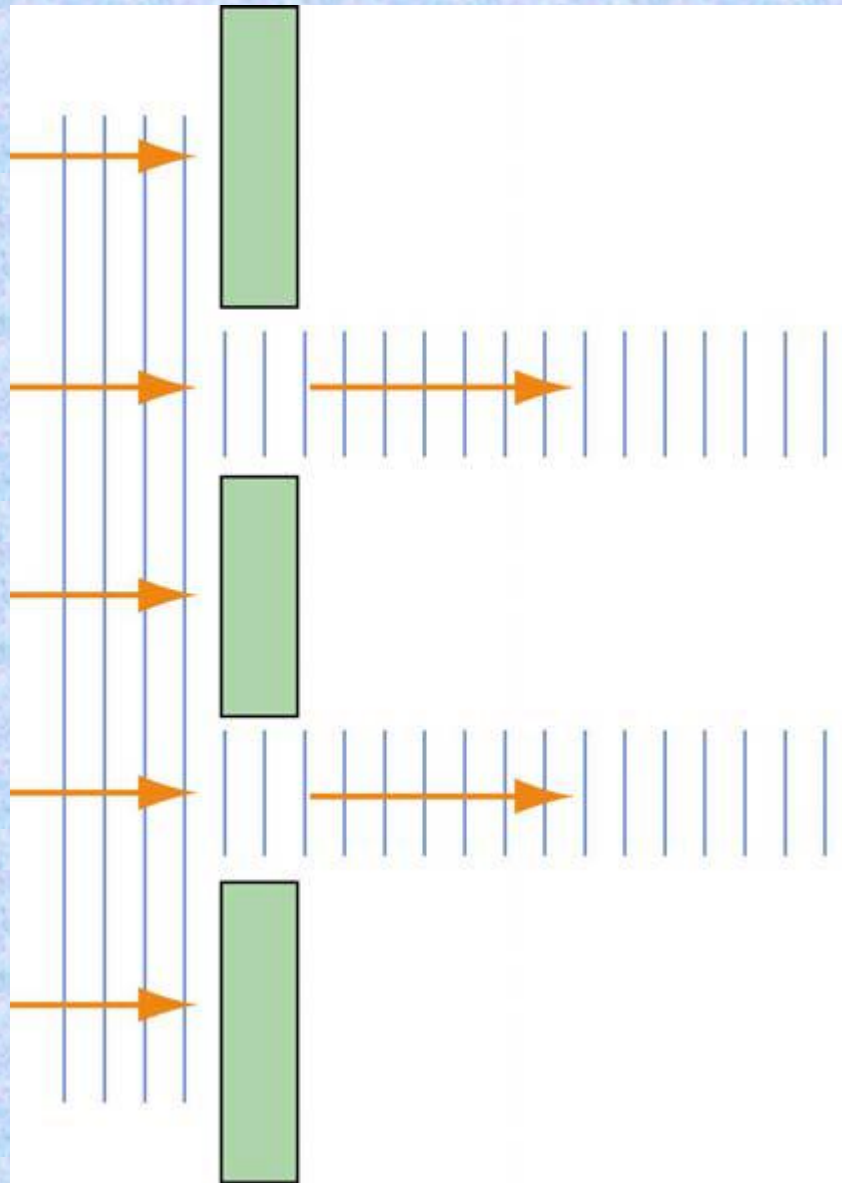
Newton's diagram showing how he combined the colours to make white light once more. Light from the Sun (left) enters the hole *F* and is separated into colours by the prism. The lens brings the colours together again. They fall on the screen *HI*, and if this is at *Q* they produce 'whiteness'. From *Philosophical Transactions*, 80, 19 Feb. 1672.

Il dibattito sulla natura della luce

Newton (1642-1727)

- Nel trattato *Opticks* (1704) descrive i suoi studi sulla scomposizione della luce solare tramite un prisma
- Newton sosteneva un *modello corpuscolare* della luce, costituita da getti di particelle ipotetiche di diverse dimensioni, cui corrispondevano i diversi colori
- Sosteneva che si trattasse di particelle perché la luce getta ombre nette, ovvero sembra propagarsi in linea retta come solo particelle di materia possono fare

Differenza tra particelle... e onde



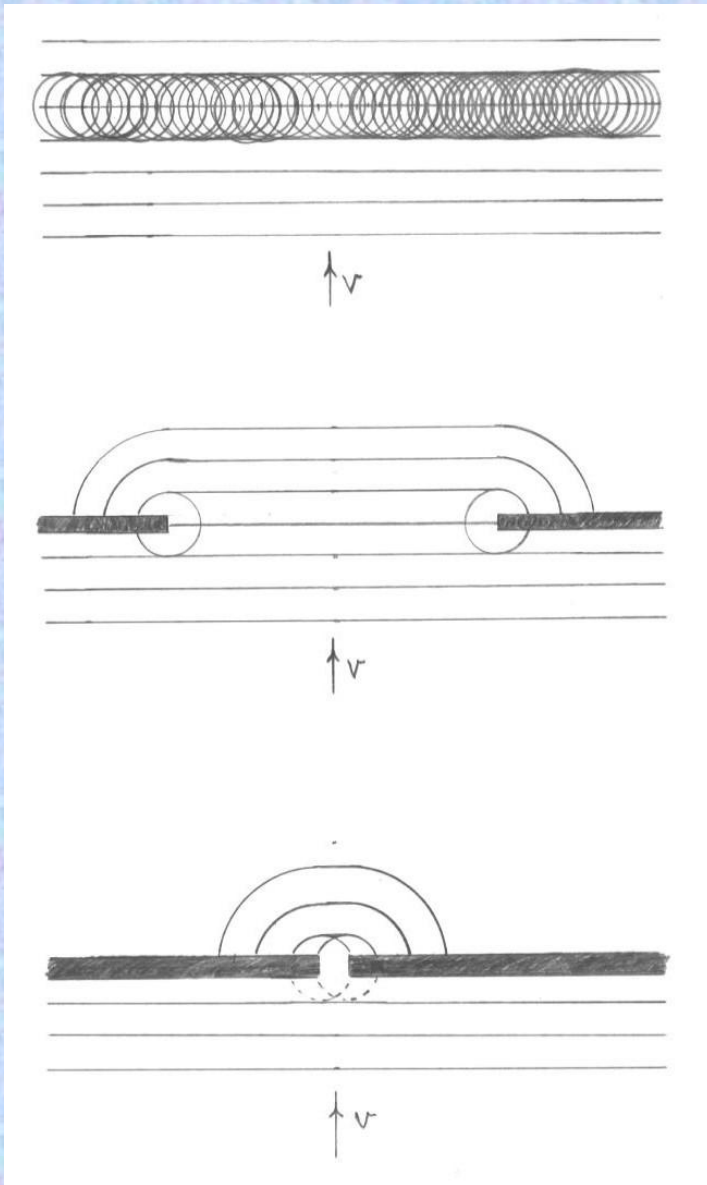
Problemi con il modello corpuscolare

- Due fasci di luce che si incrociano non mutano direzione di propagazione, come invece farebbero particelle che si scontrano
- La luce che passa da una fenditura abbastanza stretta si disperde lateralmente e appare uno schema di ombre alternate a strisce più luminose (esperienza con due matite o due dita)
- Il primo a descrivere quest'ultimo fenomeno fu Francesco Maria Grimaldi nel *De Lumine* (1665), chiamandolo **diffrazione**, ma la sua scoperta rimase ignorata per molti anni

Il dibattito sulla natura della luce

- 1690: Huygens enuncia la sua teoria ondulatoria (*Traité sur la lumiere*)
 - le onde luminose sono analoghe a quelle acustiche (meccaniche)
 - Ogni punto investito da un'onda (perturbazione) diventa a sua volta sorgente di onde che si continuano a propagare alla stessa velocità (*principio di Huygens*)
 - La luce, come altri tipi di onde meccaniche, può aggirare gli ostacoli, ovvero incurvarsi dopo essere passata attraverso una fessura sottile (*diffrazione*, fenomeno descritto dal Grimaldi nel *De Lumine*, 1665)
 - Huygens interpreta anche la legge di Snell (*rifrazione*) come effetto della variazione di velocità di propagazione della luce in mezzi diversi

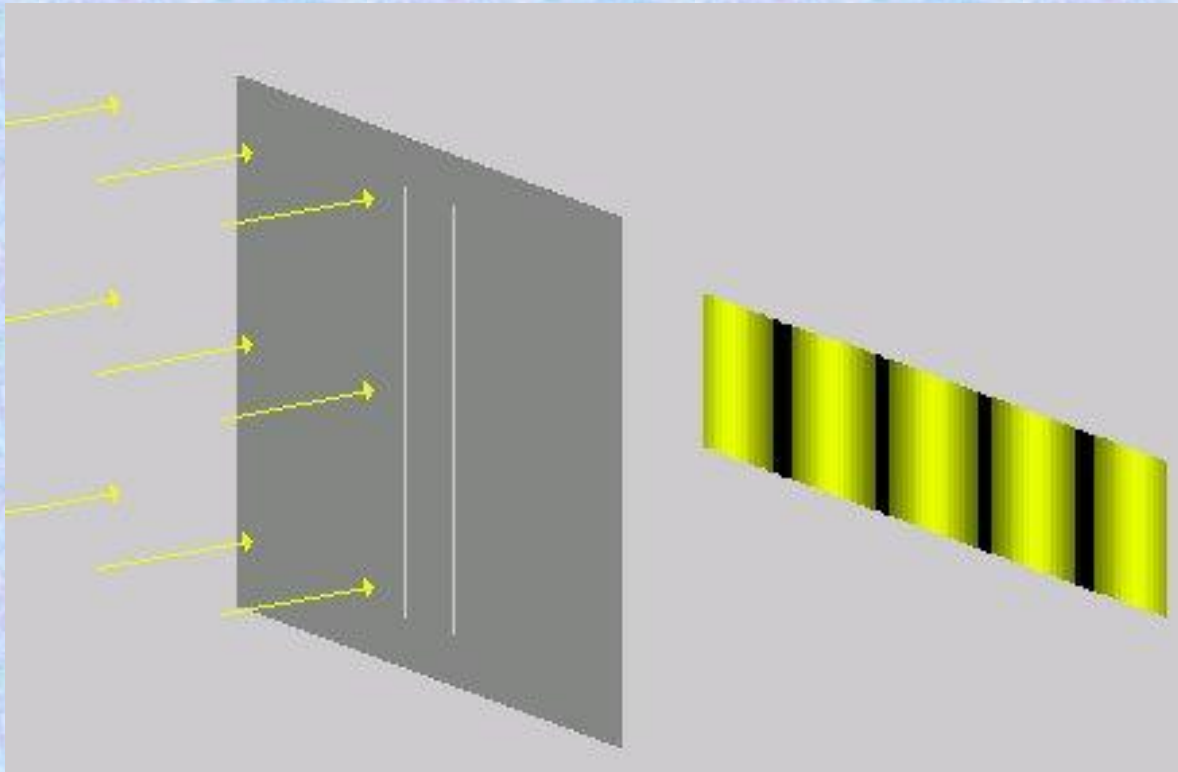
Il principio di Huygens e la diffrazione



- **Onda piana:** il fronte d'onda (retto) risulta dalla composizione delle onde generate da ogni singolo punto
- Nell'attraversare un ostacolo largo, l'onda agira i bordi
- Nel caso di una fenditura stretta, l'onda trasmessa assume un profilo quasi circolare

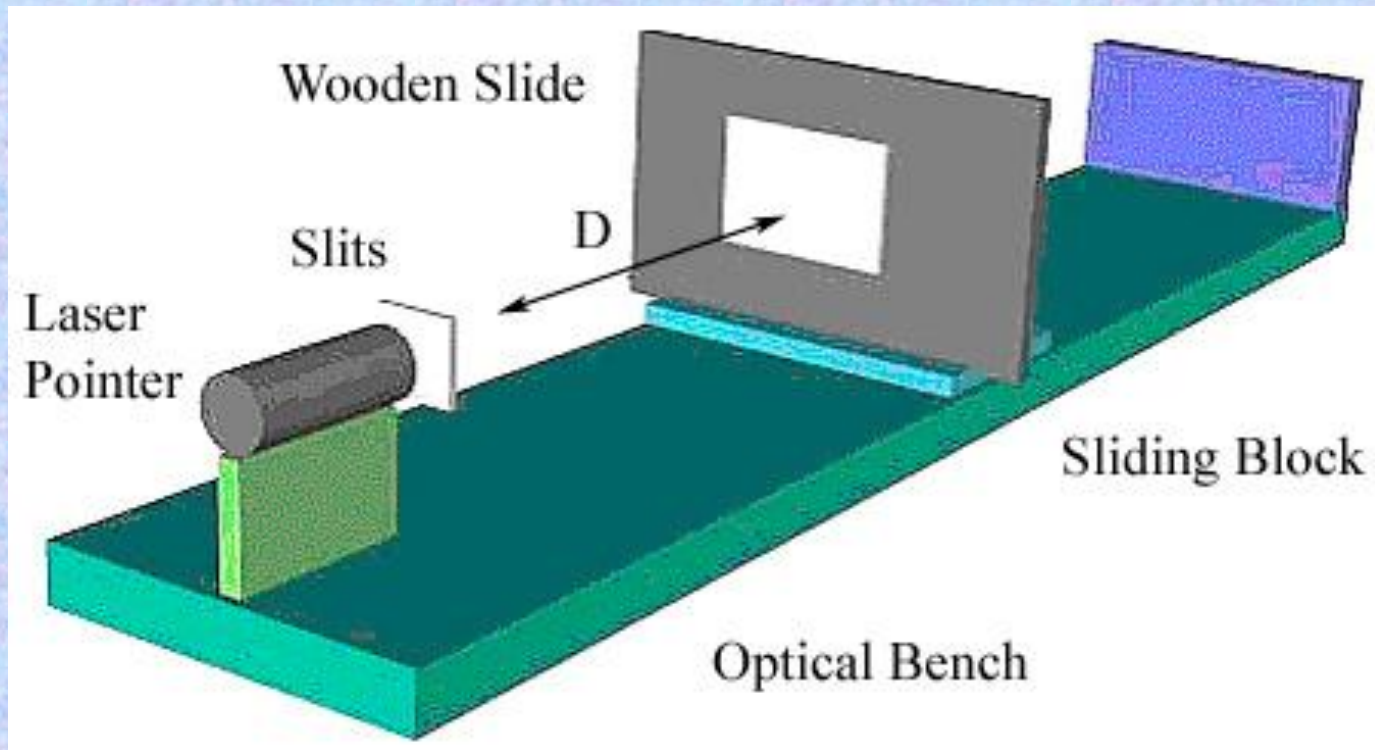
Il dibattito sulla natura della luce

- 1803: Thomas Young dimostra che la luce è fatta di onde
 - Cosa succede sommando la luce proveniente da due sorgenti (fenditure) vicine tra loro?

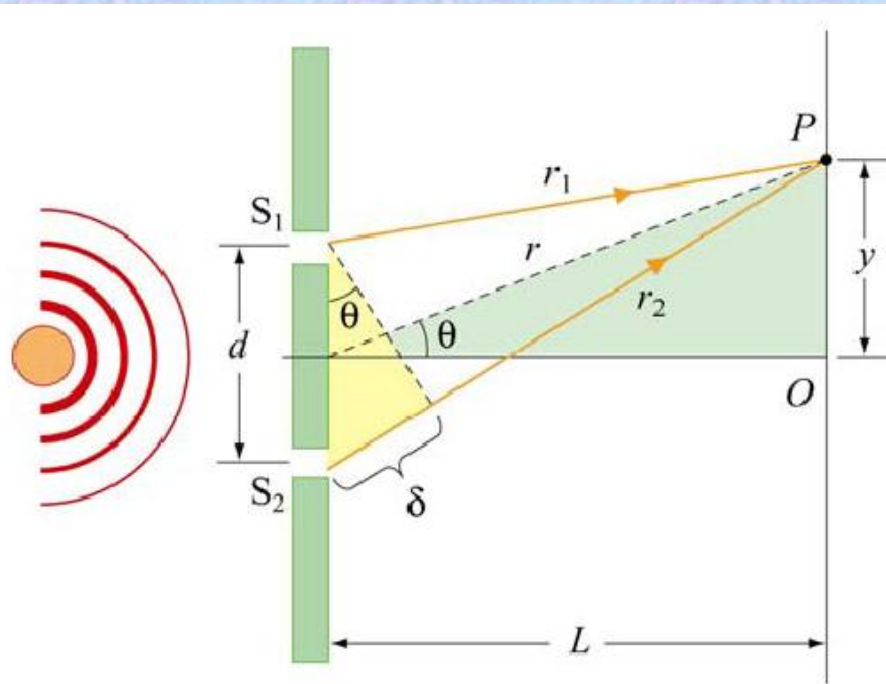


- Se la luce fosse fatta di particelle di materia ciò non sarebbe spiegabile

Esperienze con il banco ottico

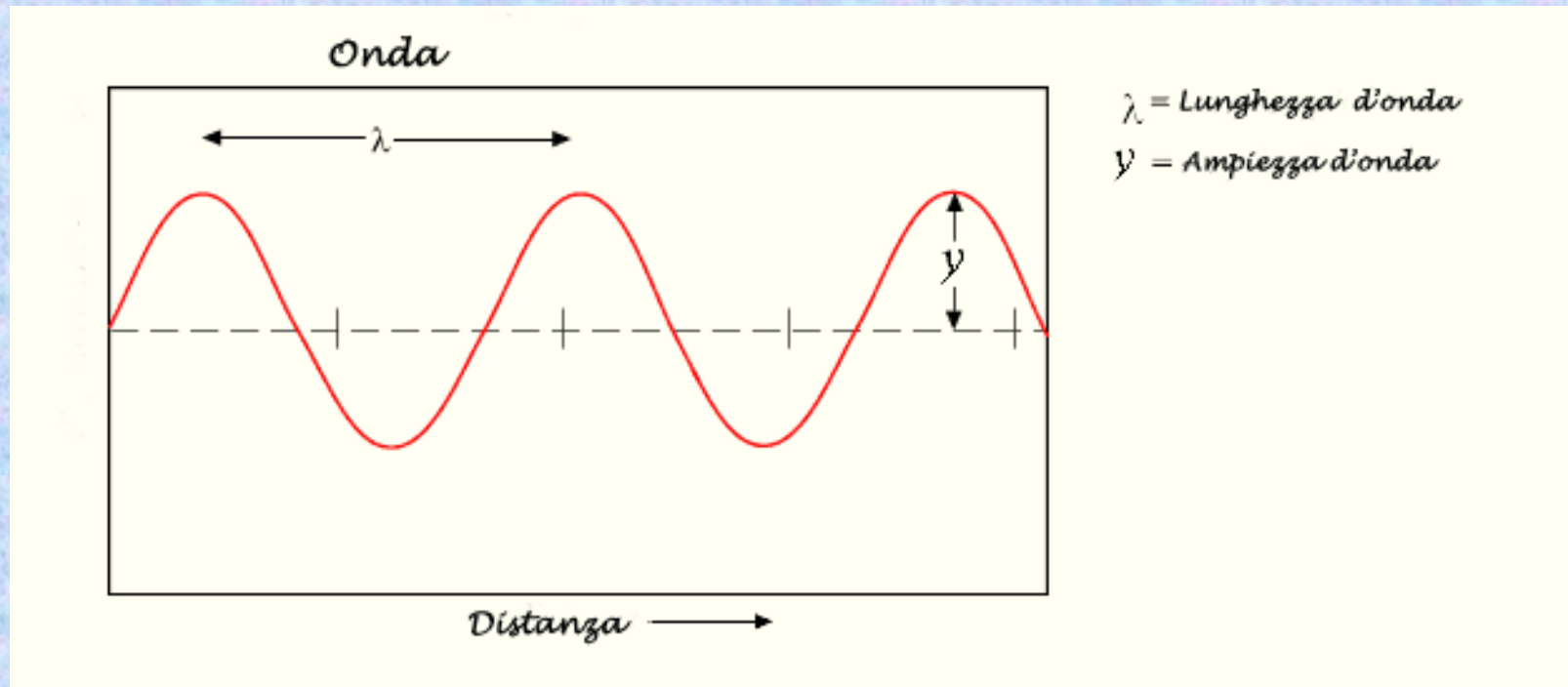


Interpretazione dell'esperienza di Young



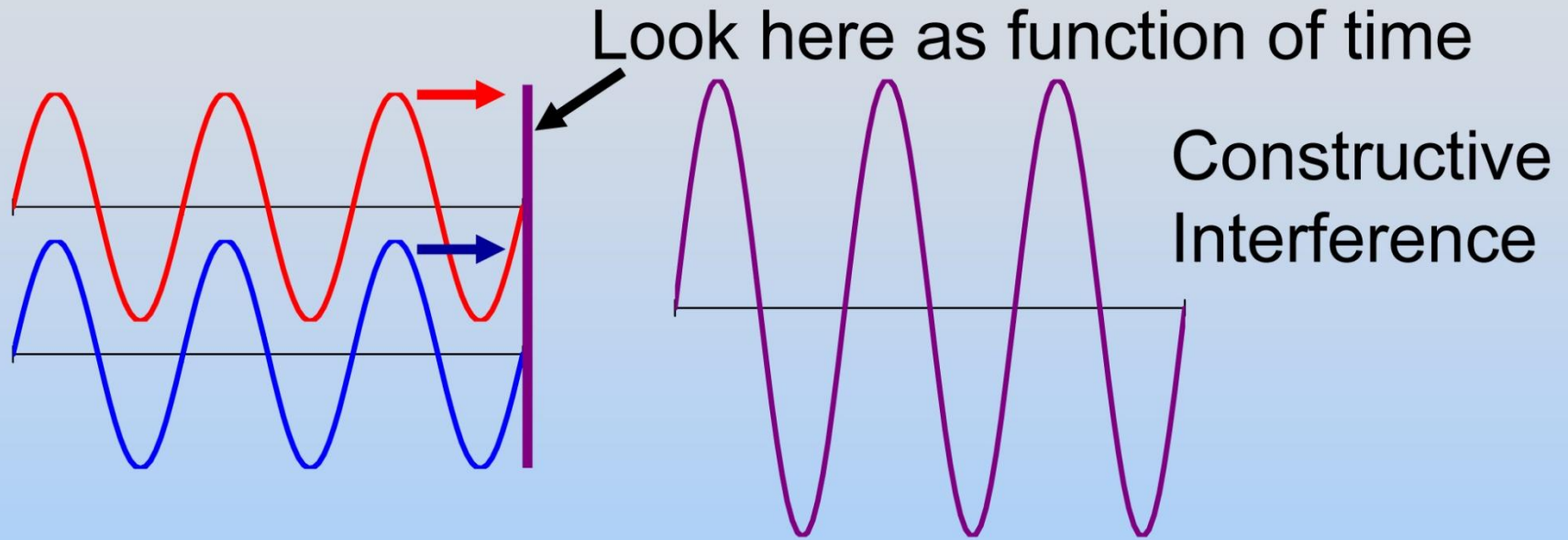
- Due fenditure di ampiezza trascurabile separate da distanza d
- Le fenditure si comportano come due sorgenti luminose, S_1 e S_2 (principio di Huygens)
- La luce arriva in un punto P sullo schermo seguendo due cammini di diversa lunghezza, r_1 e r_2

Caratteristiche di un'onda



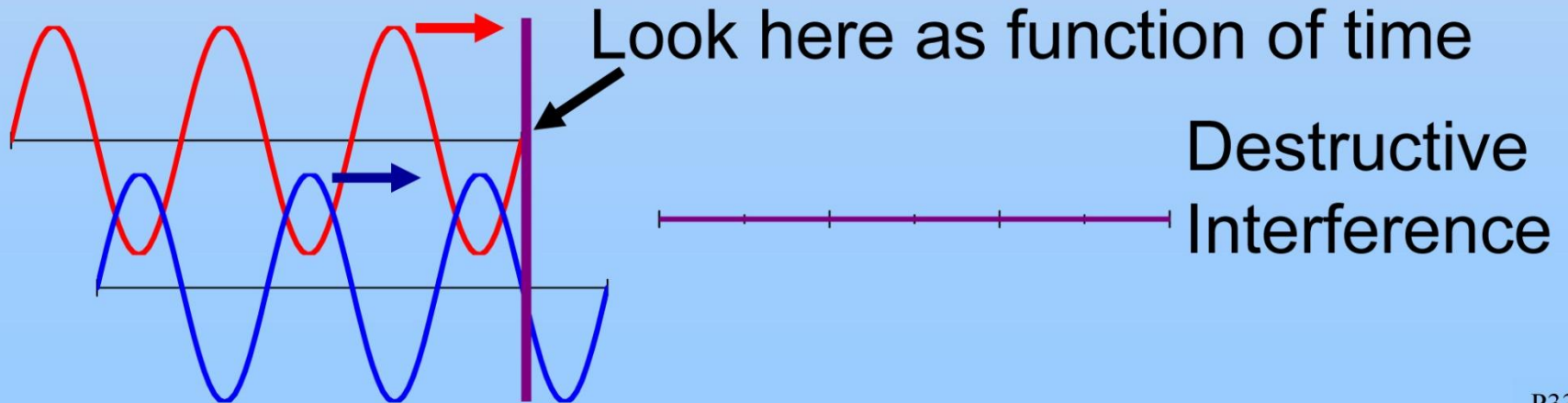
- Un'onda è un fenomeno periodico che si ripete nello spazio e nel tempo
- E' descrivibile tramite una lunghezza caratteristica, λ , un'ampiezza, A , una velocità di propagazione, v , e una frequenza $= v / \lambda$

Somma di due onde



- Se due onde con le stesse caratteristiche arrivano in un punto dello spazio con la stessa *fase* il risultato è la somma dei segnali (*interferenza costruttiva*)

Somma di due onde

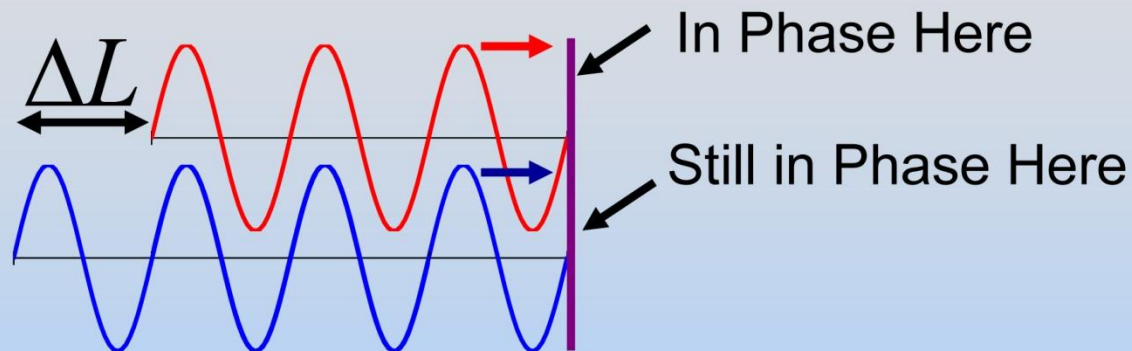


P33- 8

- Se due onde con le stesse caratteristiche arrivano in un punto dello spazio in opposizione di *fase* il risultato è l'annullamento del segnale (*interferenza distruttiva*)

Effetto di una differenza di cammino

- Se una delle due onde è traslata rispetto all'altra di un multiplo della lunghezza d'onda, λ , si ottiene ancora



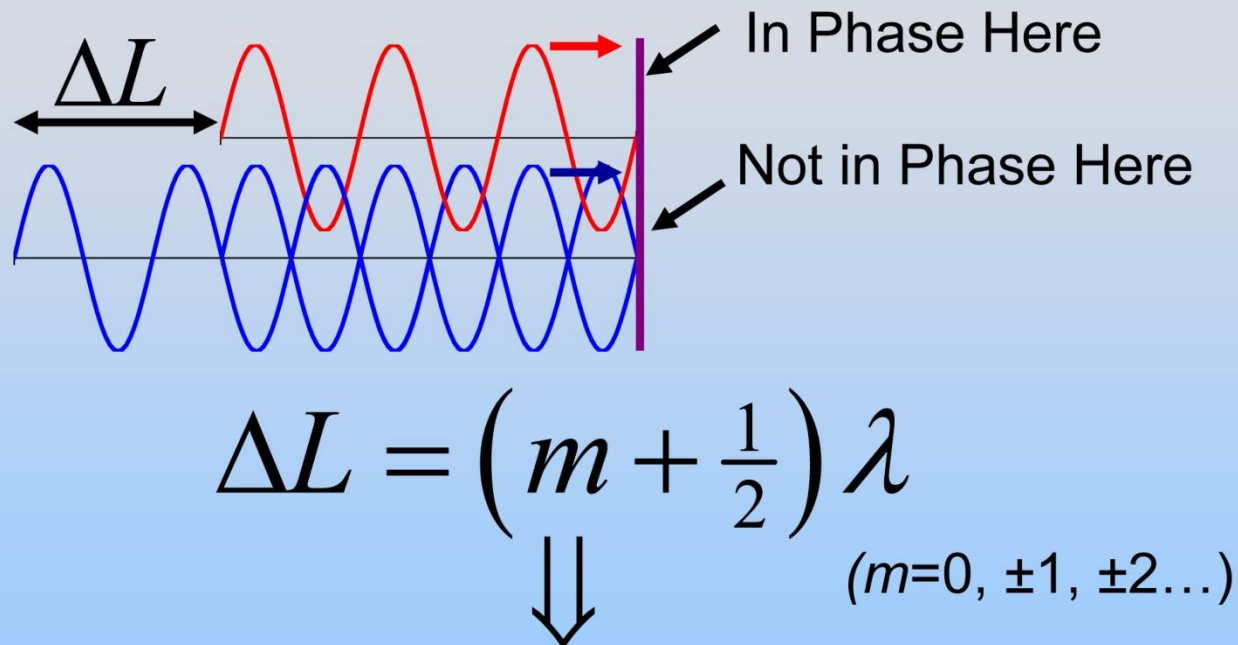
$$\Delta L = m\lambda \quad (m=0, \pm 1, \pm 2\dots)$$

⇓

interferenza costruttiva

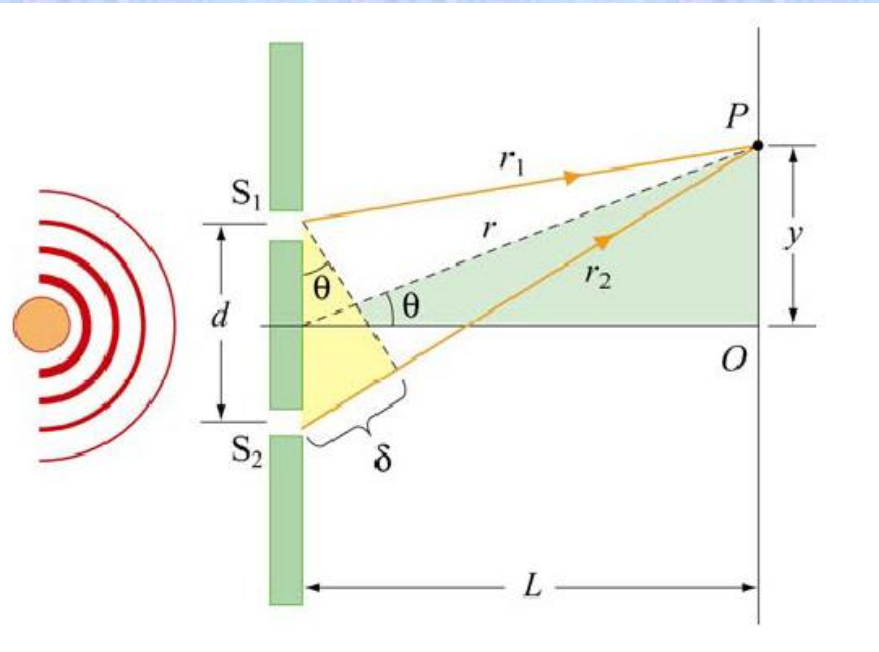
Effetto di una differenza di cammino

- Se una delle due onde è traslata rispetto all'altra di mezza lunghezza d'onda, $\lambda/2$, si ottiene invece



interferenza distruttiva

Interpretazione dell'esperienza di Young



- La differenza di cammino è circa

$$r_2 - r_1 \approx \delta = d \sin \theta$$

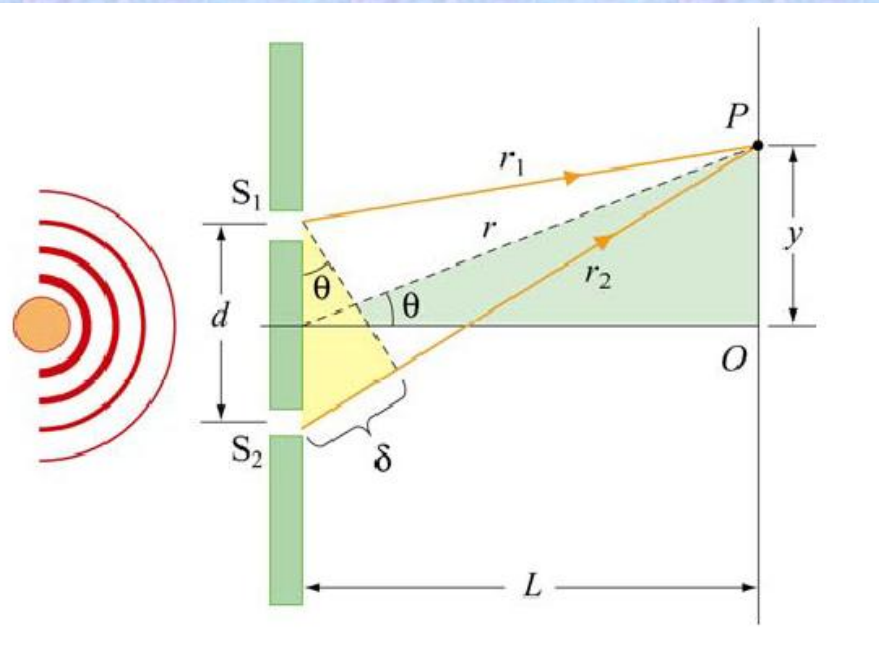
- Se è un multiplo della lunghezza d'onda

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

si ottiene interferenza costruttiva (l'intensità è massima)

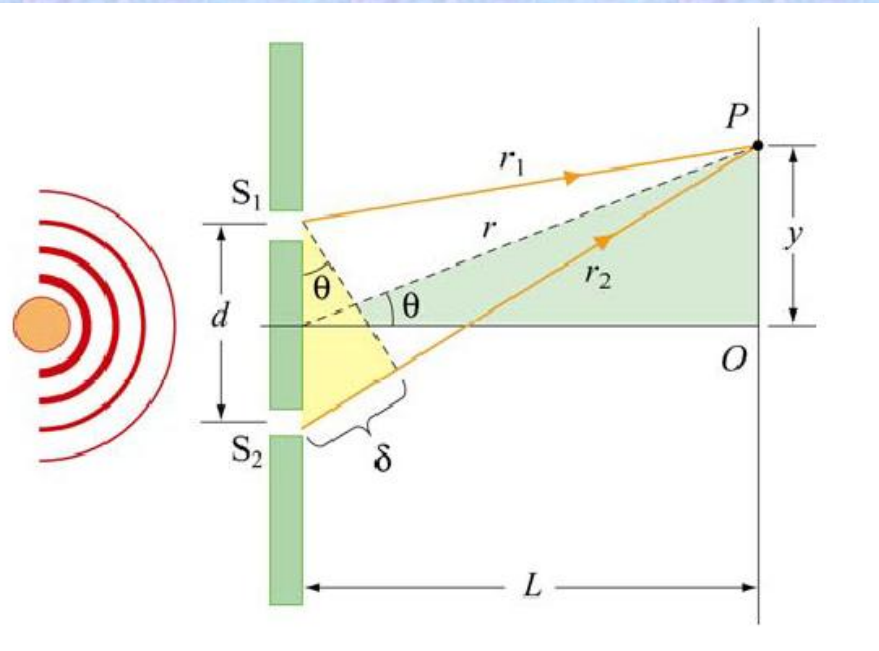
- Nei punti dove invece $\delta = (m + \frac{1}{2}) \lambda$ si ottiene interferenza distruttiva (l'intensità è minima)

Interpretazione dell'esperienza di Young



- La distanza del punto P dall'asse è
 $y = L \operatorname{tg} \theta \approx L \operatorname{sen} \theta$
(approssimazione valida se θ è molto piccolo)
- Si verifica interferenza costruttiva nei punti P dove **$\operatorname{sen} \theta = \delta/d = m\lambda/d$**
- Ovvero nei punti dove **$y_{\text{costr}} = m L \lambda / d$**
con $(m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$

Interpretazione dell'esperienza di Young



- Si verifica interferenza distruttiva nei punti P dove

$$\text{sen } \theta = \delta/d = (m + \frac{1}{2}) \lambda / d$$

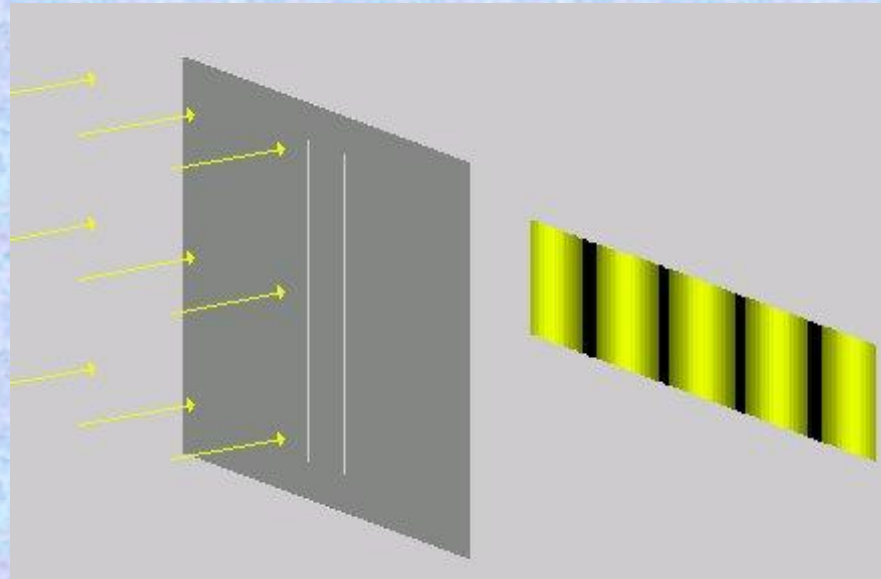
ovvero nei punti dove

$$y_{distr} = (m + \frac{1}{2}) L \lambda / d$$

con $(m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$

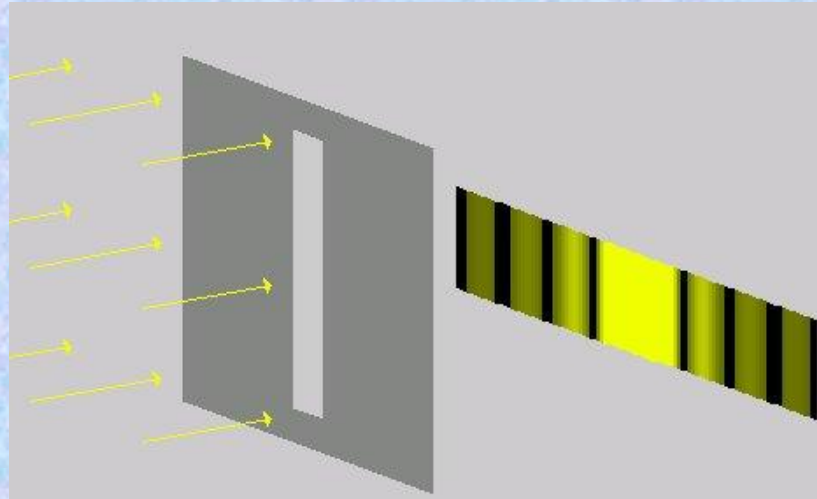
Nota bene: se sappiamo la separazione d , dalla misura di L e delle posizioni y_{distr} oppure y_{costr} possiamo ricavare il valore della lunghezza d'onda λ

Esperienze di interferenza



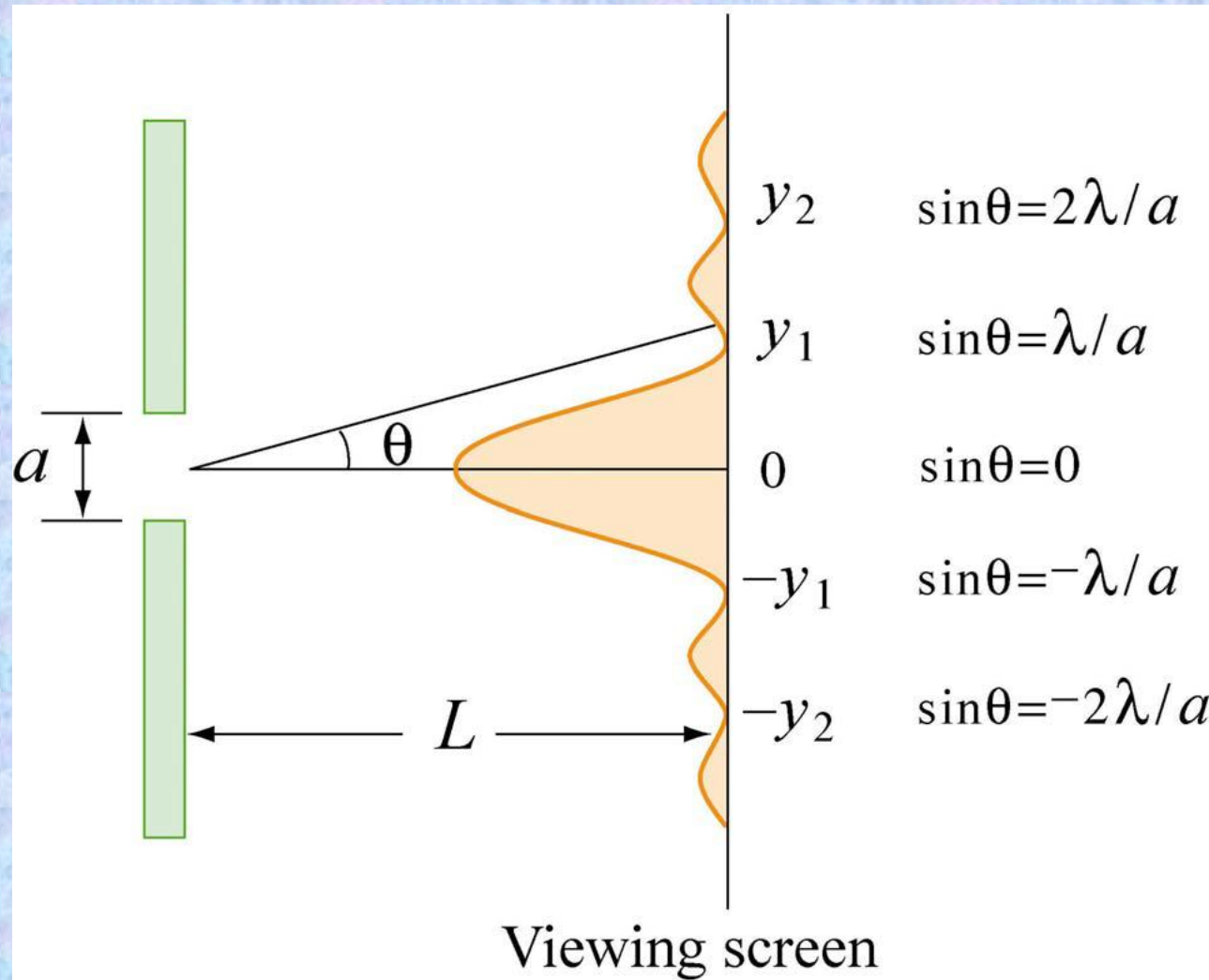
- Cosa succede se cambia la distanza, d , tra le fenditure?
- Cosa succede se cambiamo la lunghezza d'onda, λ , della luce?
- Cosa succede se usiamo luce bianca?

Esperienze di diffrazione

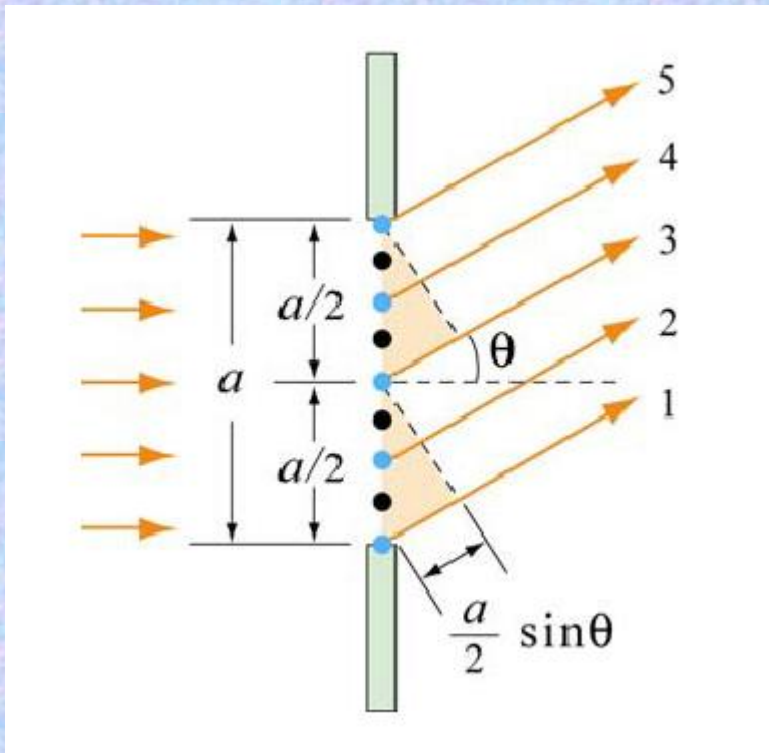


- Se si usa una sorgente *monocromatica* (laser) e la *fenditura è abbastanza stretta*, si crea una **figura di diffrazione**
- Il modello a raggi non può spiegare questo effetto; bisogna ricorrere necessariamente al modello a onde

Diffrazione da singola fenditura



Diffrazione da singola fenditura



- Sia data una fenditura di larghezza **a**
- Le onde che originano dai punti 1 e 3, 2 e 4, 3 e 5 danno luogo a interferenza distruttiva se

$$\delta = a/2 \sin \theta = (m + 1/2) \lambda$$

$$\text{ovvero se } a \sin \theta = (2m + 1) \lambda$$

Dividendo la fenditura in 4, poi in 8, poi in 16 parti, ecc., e ragionando in modo analogo, si ricavano tutte le possibilità di interferenza distruttiva:

$$a \sin \theta = m \lambda \quad \text{con } m = \pm 1, \pm 2, \dots$$

Diffrazione: alcune formule

- Condizione per il primo minimo (frangia scura) in una **figura di diffrazione** da una fenditura di ampiezza **a** :
 $a \sin \theta = \lambda$ (θ è l'angolo rispetto all'orizzontale)
- Se θ (in radianti) è piccolo **$\sin \theta \approx \theta$**
quindi **$\theta \approx \lambda / a$**
- Ampiezza angolare della frangia centrale generata dalla fenditura:
 $2 \theta \approx 2 \lambda / a$
- Distanza tra i due minimi d'intensità su uno schermo a distanza **L** dalla fenditura
 $D = 2 L \operatorname{tg} \theta \approx 2 L \theta$

Caso generale: due fenditure di ampiezza non trascurabile

Primo minimo
a $\text{sen}\theta = \lambda$

Massimo centrale
(ordine zero)

Massimo del
primo ordine
a $\text{sen}\theta = \lambda$

Profilo dovuto alla diffrazione

Distanza dei minimi legata
all'ampiezza a delle fenditure

Struttura fine dovuta
a interferenza

Distanza dei minimi legata alla
separazione d delle fenditure

Sequenza degli esperimenti e dei concetti

Esperienze

Interpretazione fisica e metodi d'analisi

8a. Luce di colore diverso viene focalizzata a distanze diverse dalla lente

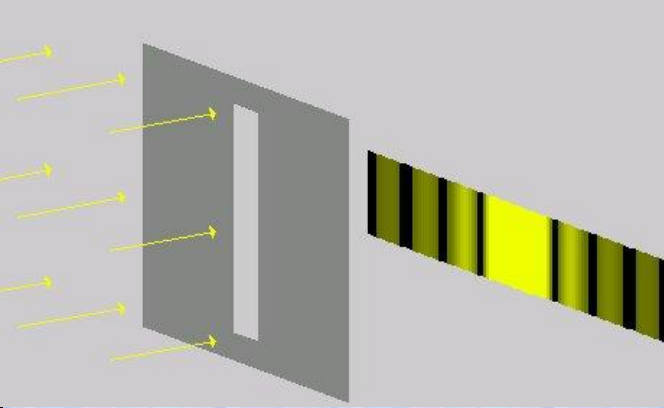
8b. Un prisma di vetro disperde la luce bianca in uno spettro cromatico



- **Aberrazione cromatica:** la velocità di propagazione della radiazione in un mezzo (ad es. una lente) e quindi l'indice di rifrazione dipendono dalla frequenza della radiazione.
- Radiazione di frequenza (o energia) diversa segue percorsi diversi. In generale l'indice di rifrazione cresce con la frequenza (la luce blu devia più di quella rossa).
- L'effetto è quello della **dispersione** della luce bianca in diversi colori
- Per interpretare questi fenomeni occorre una descrizione della radiazione come una sovrapposizione di onde (**ottica ondulatoria**)

Sequenza degli esperimenti e dei concetti

9. Una fenditura stretta (o un capello) illuminato da un fascio laser genera un'immagine con una serie di frange luminose (*figura di diffrazione*) allineate in direzione perpendicolare a quelle del fascio incidente e della fenditura (o del capello)

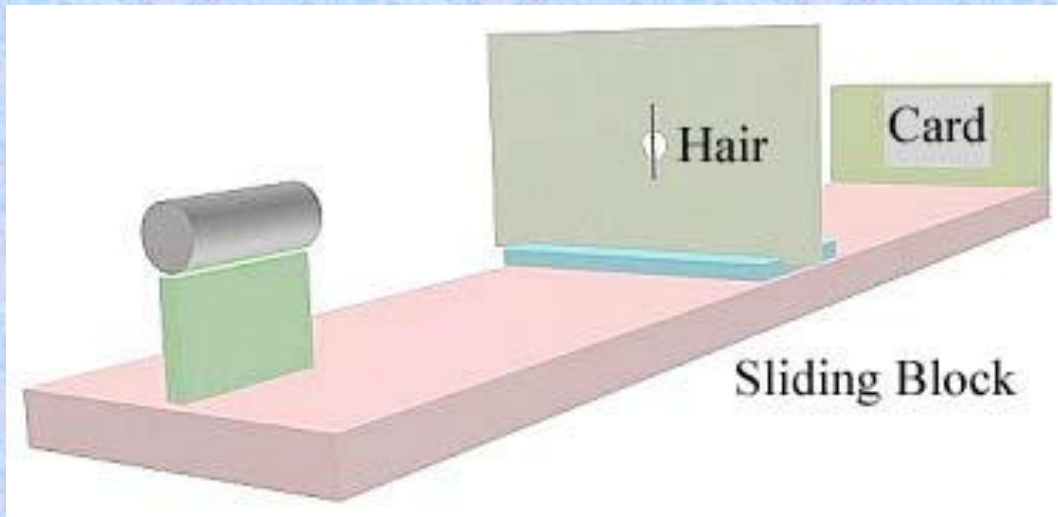


- Quando la luce incontra ostacoli delle dimensioni della propria lunghezza d'onda si verificano effetti di deviazione dalla linea retta di propagazione (*diffrazione*)
- Gli effetti di diffrazione, come quelli di dispersione, dipendono dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente
- La diffrazione è un fenomeno comune anche alle onde meccaniche e acustiche; in questi casi la diffrazione è più facile da sperimentare perché la lunghezza d'onda è generalmente molto più grande di quella della luce
- Il modello ondulatorio della luce fu introdotto da Huygens per spiegare questi effetti

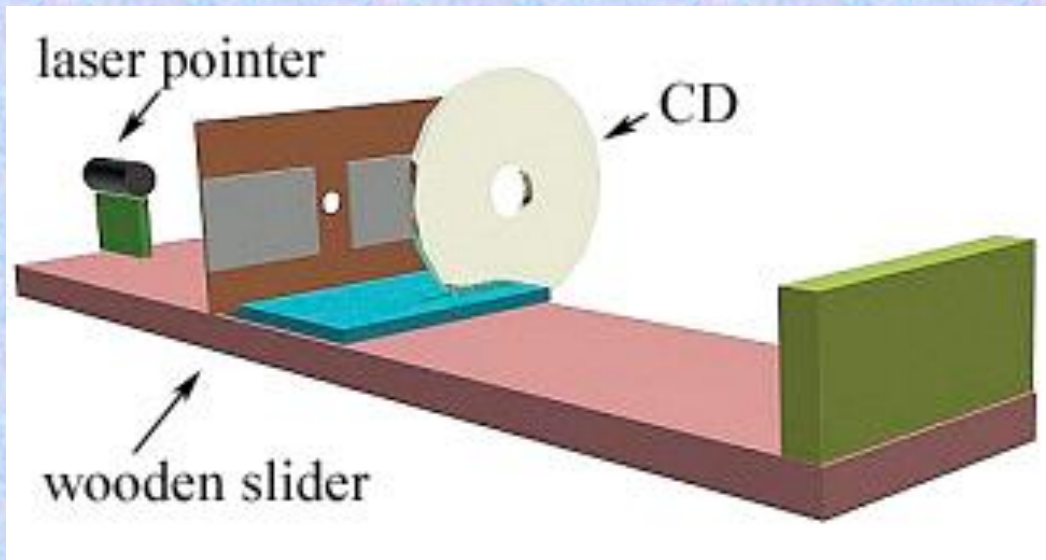
Sequenza degli esperimenti e dei concetti

| Esperienze | Interpretazione fisica e metodi d'analisi |
|--|---|
| <p>10. Uno schermo con due o più fenditure genera un'immagine con una serie di frange di simile intensità, ad angoli crescenti rispetto alla direzione retta</p> | <ul style="list-style-type: none">• Le frange sono prodotte da effetti di <i>interferenza</i> della luce trasmessa dalle singole fenditure (a loro volta sorgenti di radiazione, secondo il <i>principio di Huygens</i>)• Questi effetti, così come quelli di rifrazione e di diffrazione, dipendono dalla lunghezza d'onda (colore) e sono spiegabili con un <i>modello ondulatorio</i> della radiazione |

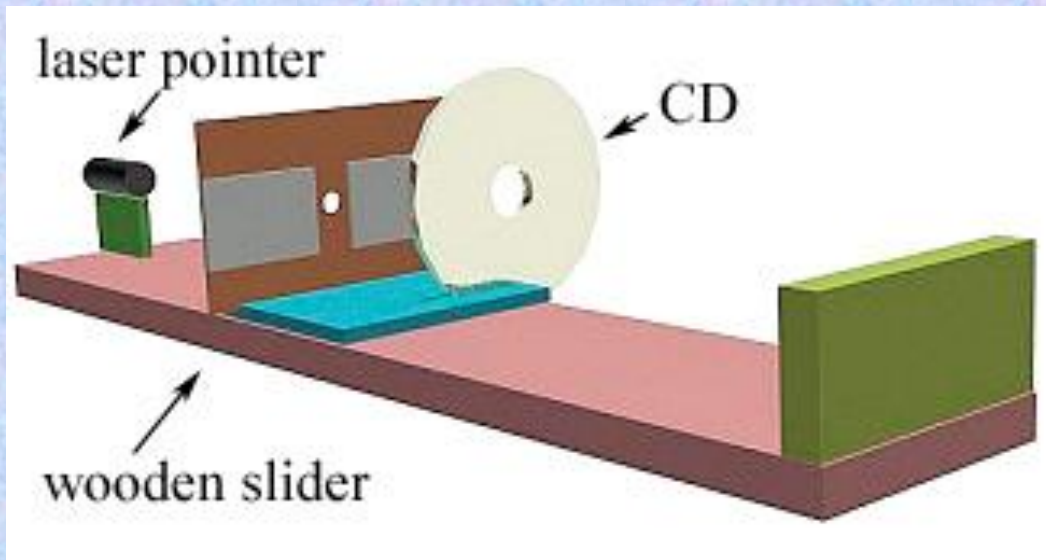
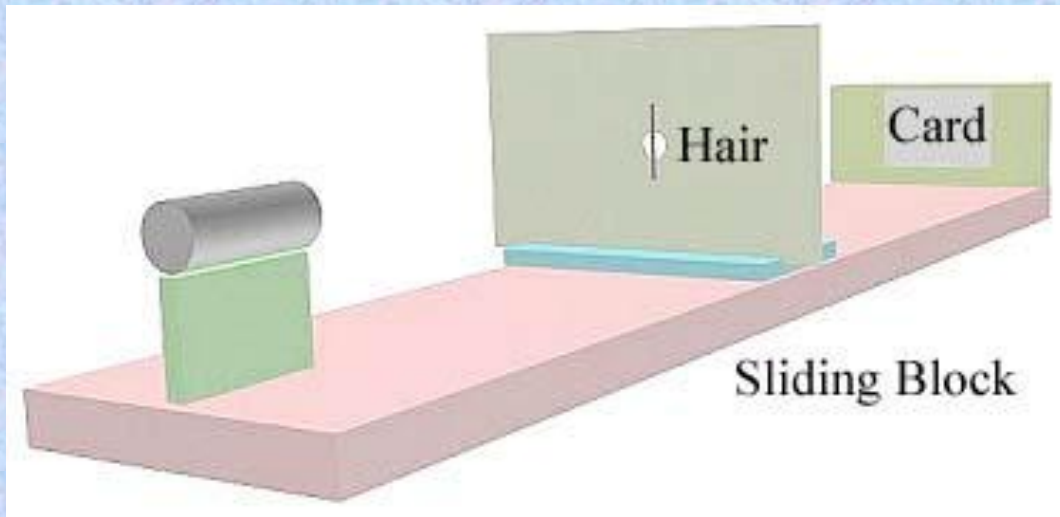
Quando si verifica la diffrazione



Un effetto di diffrazione si può osservare ogni volta che la radiazione incontra **un'ostacolo di dimensioni confrontabili con la lunghezza d'onda** (ad esempio illuminando un capello o i solchi di un CD-ROM con un fascio laser)



Misure di oggetti microscopici



Conoscendo la lunghezza d'onda λ , dalle misure della distanza dell'oggetto dallo schermo, L , e delle posizioni delle frange di diffrazione, y_m , possiamo ricavare la dimensione dell'oggetto (spessore del capello o spaziatura dei solchi del CD-ROM)

Esperienze con un *reticolo* di fenditure

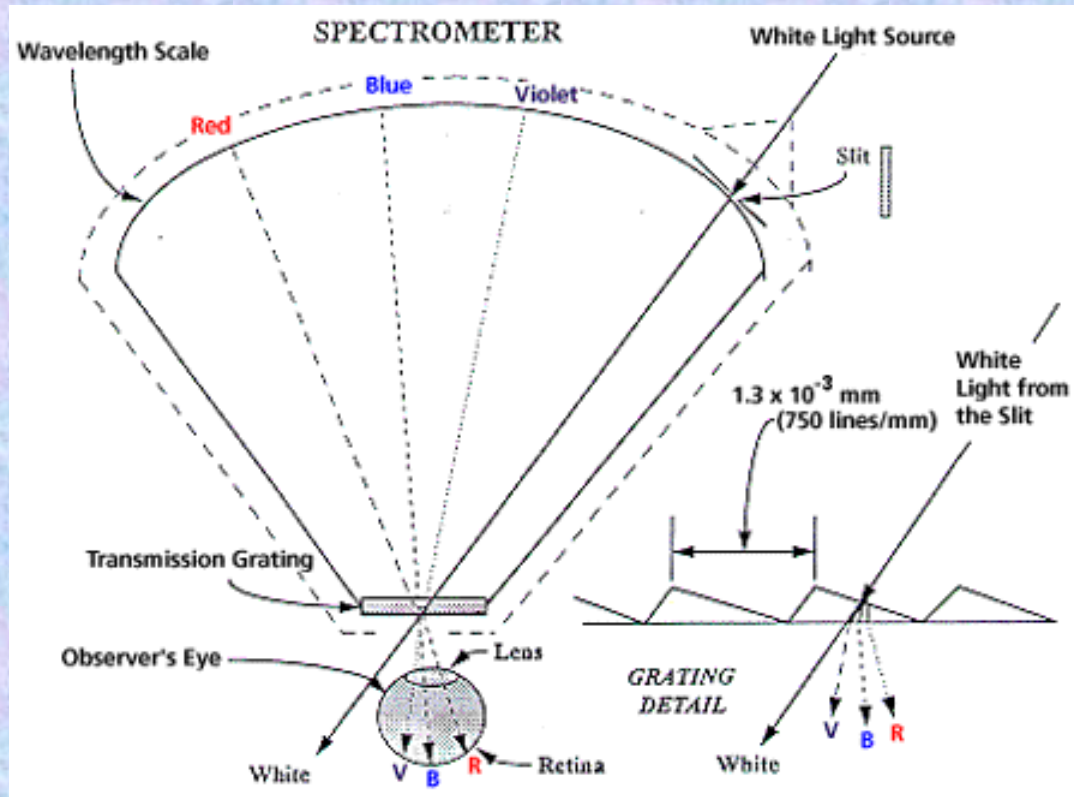
- **Previsione:** Cosa succede se illuminiamo un CD-ROM con un laser?
- Si tratta di una serie di solchi finemente spazati
- Ciascuno dei solchi, quando viene illuminato dal laser, diventa una sorgente di radiazione indipendente dalle altre; tutti i segnali si sommano con il segno stabilito dalla fase, quando raggiungono lo schermo (rivelatore)
- Condizione per l'interferenza costruttiva lungo *la direzione di dispersione* :
 $d \sin \theta = m \lambda$ con $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ (*ordini spettrali*)
- Notare almeno 3 immagini lungo *l'asse di dispersione*, corrispondenti ai primi tre *ordini spettrali*: $m = 0, 1, 2$
- Conoscendo la lunghezza d'onda λ della radiazione del laser, dalla misura degli angoli θ per i quali si verifica interferenza costruttiva è possibile ricavare la separazione d dei solchi nel CD-ROM
- Ripetere l'esperimento con un DVD. Cosa cambia?

Realizzazione di uno spettroscopio

- **Previsione:** Cosa succede se illuminiamo un *reticolo di diffrazione* con luce bianca? Suggestimento: riflettere su qual è l'*asse di dispersione spettrale*, cosa succede alla radiazione incidente di diversa lunghezza d'onda e cosa succede se la sorgente è estesa
- **Verifica:** realizzazione di uno spettroscopio utilizzando un CD-ROM trasparente
- **Interpretazione:** ogni componente della radiazione a diversa lunghezza d'onda determina interferenza costruttiva in posizioni diverse dell'immagine spettrale
- **Domande:** Qual è la funzione della fenditura d'ingresso? Qual è la separazione angolare tra l'immagine centrale della sorgente (ordine $m = 0$) e il primo ordine spettrale ($m = 1$)?
- **Osservazioni spettroscopiche:** Cosa vediamo se la sorgente è una lampada a incandescenza? Se invece è una lampada a basso consumo o a neon? E se guardassimo il Sole?

Schema di uno spettroscopio

- *Spettroscopio a trasmissione* basato su un reticolo di diffrazione a dente di sega (*blazed*)



- Vengono realizzati anche *spettroscopi a riflessione*

Ottica ondulatoria



- Gli effetti di **rifrazione** dipendono dal "colore" della radiazione: la luce rossa è meno deviata di quella violetta (*l'indice di rifrazione cresce con la frequenza*)

- Altri effetti dovuti alla natura ondulatoria della luce sono **l'interferenza** e la **diffrazione**; quest'ultima si manifesta solo quando le dimensioni dell'ostacolo (ad es. fenditura) sono confrontabili con la lunghezza d'onda della radiazione (*confrontare le lunghezze d'onda meccaniche, ad es. sonore, col quelle della radiazione visibile ai nostri occhi*).

Ottica ondulatoria



- Grazie alla dipendenza dalla lunghezza d'onda della diffrazione possiamo ottenere uno *spettro della radiazione*
- Sorgenti diverse hanno caratteristiche spettrali distinte che possono essere utilizzare per studiarne la natura

Sequenza degli esperimenti e dei concetti

| Esperienze | Interpretazione fisica e metodi d'analisi |
|--|--|
| <p>11. Una superficie con numerose scanalature (<i>reticolo</i>) produce una immagine (<i>spettro</i>) costituita da un gruppo di frange di diverso colore</p> | <ul style="list-style-type: none">• Le frange luminose di ciascun colore si formano nelle zone dell'immagine spettrale dove si realizza <i>interferenza costruttiva</i> delle onde• Un reticolo consente di riconoscere le componenti di diverso colore della radiazione (se questa non è monocromatica) |
| <p>12. Sorgenti diverse sono caratterizzati da spettri della radiazione diversi (<i>spettri continui</i> o <i>spettri a righe</i>)</p> | <ul style="list-style-type: none">• Gli spettri dipendono dalle caratteristiche della sorgente (lampada a incandescenza, neon, Sole)• L'analisi spettrale può fornire informazioni sulla natura del mezzo emittente (solido o gassoso) |

Cos'è la radiazione

- La **radiazione** (luce) è il mezzo più veloce scelto dalla natura per trasportare **energia** attraverso lo spazio
- Vale il **principio di conservazione dell'energia**: l'energia trasportata dalla radiazione si può diffondere nello spazio, può cambiare forma, ma non può essere distrutta
- L'**ottica ondulatoria** è la teoria che spiega il comportamento della radiazione assumendo che questa sia composta da **onde**.
- L'**ottica geometrica** è una semplificazione dell'ottica ondulatoria in quanto spiega alcuni fenomeni considerando semplicemente due caratteristiche delle onde, la direzione e la velocità di propagazione (**modello a raggi**)

Modelli diversi per fenomeni diversi

- L'energia può essere trasportata tramite **onde** (in un liquido, lungo una corda oscillante) oppure a pacchetti, tramite **particelle** (come fa un qualsiasi proiettile)
- Per descrivere il funzionamento di sistemi ottici fatti con lenti e specchi e i fenomeni di propagazione della luce in diversi materiali è sufficiente una descrizione molto semplice, il *modello a raggi* (**Ottica geometrica**)
- Per spiegare altri fenomeni (ad es. quello dell'interferenza) è utile un modello a onde (**Ottica ondulatoria**)
- Per spiegare i fenomeni di emissione e assorbimento della radiazione occorre un modello a fotoni (**Ottica quantistica**)