

L'ottica ondulatoria

1. La parziale inadeguatezza del modello di raggio di luce

Finora abbiamo interpretato un **fascio di luce** come un **insieme di sottili fascetti** ciascuno dei quali può venire rappresentato mediante una **retta** che ne individua la direzione di propagazione.

A tale piccolissimo fascetto abbiamo dato il nome di **raggio di luce**.

La figura che segue sembra confermare la validità di questa modellizzazione matematica della luce:



Il modello del raggio di luce, insieme alle leggi di **riflessione** e **rifrazione** della luce, consente di dare una spiegazione ad una vasta gamma di fenomeni, tra i quali abbiamo esaminato quelli correlati alla formazione dell'immagine in uno **specchio** piano oppure curvo.

L'analogia *raggio di luce – linea geometrica* è però **troppo approssimata**, non essendo in grado di descrivere alcuni importanti fenomeni in cui è coinvolta la luce.

Tra questi ricordiamo:

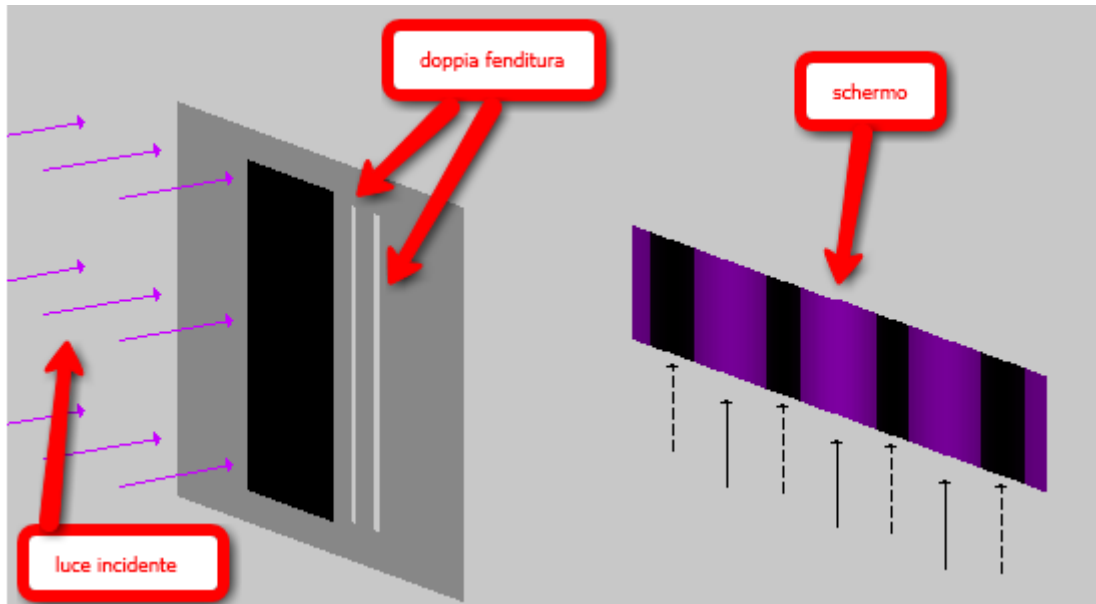
1. il fatto che l'**intensità del raggio riflesso** dipende dall'angolo di incidenza, risultando maggiore per angoli più grandi;
2. la formazione di **frange colorate in una lamina di sapone** illuminata dalla luce di una lampada ad incandescenza, come nella figura che segue:



In questo caso, il modello del raggio di luce prevede invece che la luce riflessa abbia un colore giallo uniforme: una previsione, dunque, completamente errata.

3. il succedersi di **zone (frange) illuminate e buie** su di uno schermo, posto a circa un paio di metri dietro una lamina opaca, nella quale sono state praticate due

fenditure molto strette la cui larghezza è dell'ordine del **decimo di millimetro**, che viene investita da un fascio di luce monocromatica:



In questo caso, il modello del raggio di luce prevede la comparsa di **due ombre nette** dietro ciascuna fenditura: una previsione nuovamente errata.

2. La disputa Newton – Huygens: due modelli della luce a confronto

Newton (1643 – 1727) propose per la luce un **modello corpuscolare** secondo il quale la luce è composta da un numero enorme di **corpuscoli**¹, dotati di massa infinitesima ed in movimento con una velocità elevatissima, che si muovono in linea retta².

Huygens (1629 – 1695) propose, invece, un **modello ondulatorio**: la luce è un'onda **meccanica** che si propaga in un particolare mezzo materiale, che prende il nome di etere, il quale pervade tutto lo spazio.

¹ I cosiddetti **corpuscoli-luce**.

² La velocità è talmente elevata da rendere irrilevanti gli effetti della gravità: il corpuscolo – luce, quindi, procede per inerzia in linea retta.

Entrambe le teorie forniscono spiegazioni, *più o meno convincenti*, della riflessione e della rifrazione della luce, che in queste pagine, per brevità, non esponiamo.

Entrambe, ad esempio, giungono alla conclusione, corretta, che il fenomeno della rifrazione è dovuto alla **differente velocità** con cui la luce si propaga in mezzi diversi: più precisamente, il modello corpuscolare ipotizza che la luce viaggi **più velocemente** in un mezzo più rifrangente, mentre quello ondulatorio afferma l'esatto contrario, cioè che la luce si muova **più lentamente** in un mezzo più rifrangente.

Allo scopo di sconfessare uno dei due modelli sarebbe dunque bastato calcolare la velocità della luce in due mezzi differenti, ad esempio l'aria e l'acqua.

Ma nel Seicento – Settecento nessuno si dimostrò capace di misurare con sufficiente precisione la **velocità della luce**³ e così nella comunità scientifica prevalse, a causa del prestigio del suo autore, la concezione newtoniana della luce.

Bisognerà attendere il 1849, grazie a **Fizeau** (1819 – 1896), per ottenere un valore un po' più preciso della velocità della luce⁴ e l'anno successivo, il 1850, per permettere a **Foucault** (1819 – 1868) di dimostrare sperimentalmente che la velocità della luce nell'acqua è minore di quella nell'aria, **confermando le previsioni del modello ondulatorio**.

Ma il vero esperimento, datato **1801**, che dimostra **la natura ondulatoria della luce** è l'**esperimento di Young** (1773 – 1829) **della doppia fenditura**, che ci accingiamo a descrivere nei prossimi paragrafi.

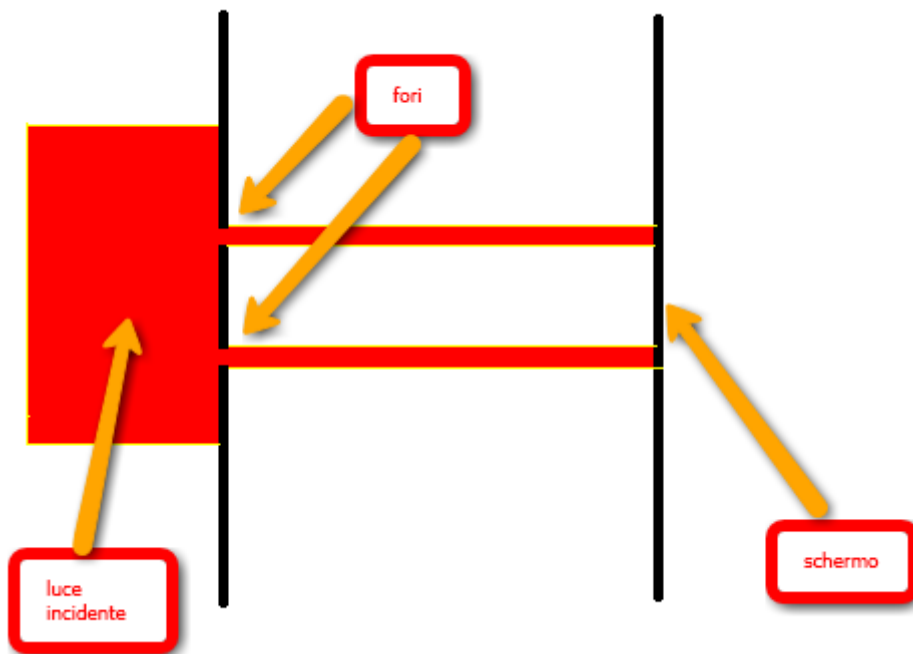
³ Huygens, basandosi sui dati astronomici raccolti da **Romer** (1644 – 1710) attribuì alla velocità della luce il valore di $2,14 \cdot 10^8$ m/s . Il **valore reale**, come sappiamo, è $2,99 \cdot 10^8$ m/s .

⁴ $3,13 \cdot 10^8$ m/s .

3. L'esperienza di Young⁵

Un giorno, facendo uno dei suoi tanti esperimenti, si trovò⁶ ad osservare un singolare fenomeno. Egli inviava un fascio di luce monocromatica (ossia di un solo colore) verso due forellini⁷ praticati su un cartone posti a breve distanza l'uno dall'altro.

Secondo la teoria corpuscolare, su uno schermo posto ad una certa distanza dal cartone si sarebbero dovute formare **due macchie luminose distinte** in corrispondenza delle aperture, come nella figura che segue:



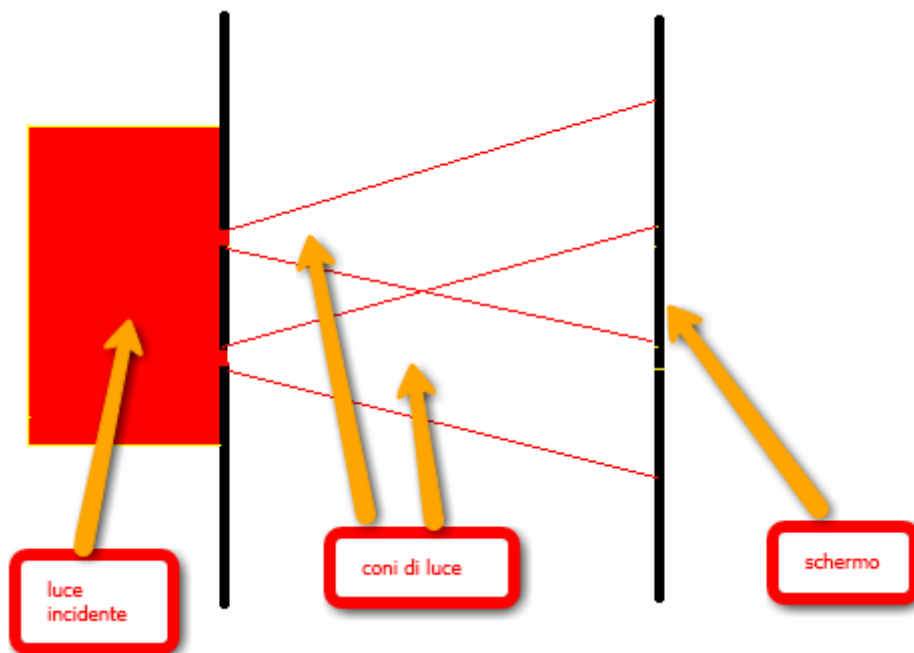
Invece, l'esperienza di Young mostra che:

La luce che emergeva dall'altro lato attraverso i forellini **non procedeva in linea retta**, cioè nella stessa direzione del raggio incidente sul cartone. Essa invece si allargava a formare **due specie di larghi coni**.

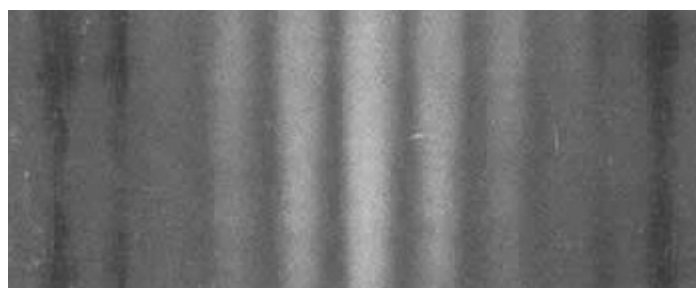
⁵ La parte in Arial Narrow è tratta dal libro **Luce colore visione** di *Andrea Frova*.

⁶ Young

⁷ Il diametro di questi forellini è dell'ordine di qualche centesimo di millimetro!



Pertanto, la luce incontra un ostacolo (il cartone in cui sono stati praticati i due piccoli fori) e va ad invadere quella che, secondo la teoria di Newton, dovrebbe essere una zona d'ombra e, cosa singolare, sullo schermo, come risultato di questo esperimento, si alternano **zone di massima luminosità e di buio completo, come mostra la figura che segue:**



Inoltre,

con fori più grandi, per esempio di qualche decimo di millimetro, il comportamento era del tutto normale: sullo schermo apparivano **due macchie luminose distinte in corrispondenza dei fori.**

Gli esiti dell'esperimento, che a noi per il momento appaiono piuttosto oscuri, confermano ad Young che **la luce si comporta esattamente come una perturbazione ondosa**.

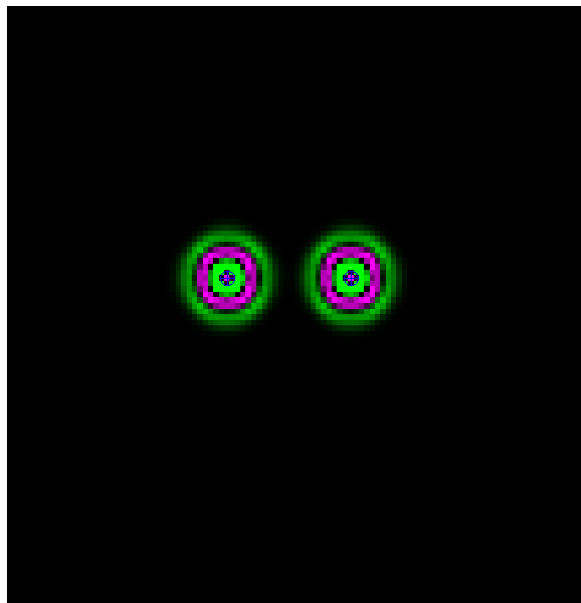
Nei prossimi paragrafi cercheremo di capirne il perché.

4. La spiegazione dell'esperimento di Young

Per comprendere l'esperimento di Young, dobbiamo ricordare quello che accade in un ondoscopio⁸ quando si immergono periodicamente due punte metalliche in fase.

Sappiamo che, in questo caso, si formano due perturbazioni ondose, i cui fronti d'onda sono circolari, le quali **interferiscono tra loro**.

Ecco, mediante una simulazione con un applet⁹, cosa accade¹⁰:

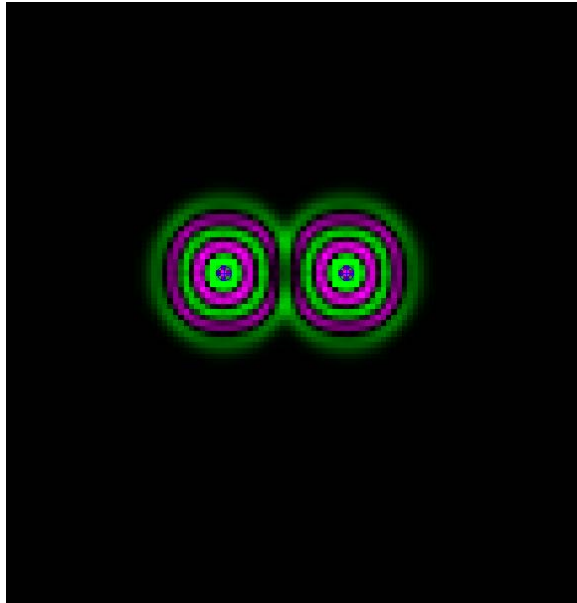


Le due perturbazioni partono in fase dalle sorgenti.

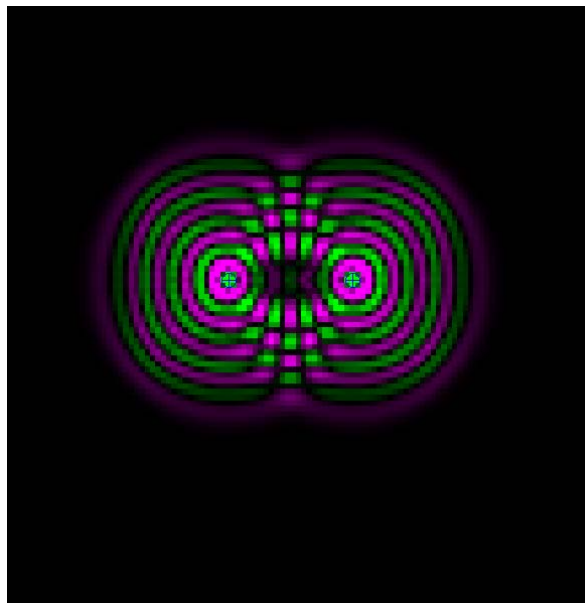
⁸ Possiamo pensare che il liquido contenuto nell'ondoscopio sia acqua distillata.

⁹ Puoi utilizzare l'applet all'indirizzo http://fisicaondemusica.unimore.it/Applet_Onde_2D.html.

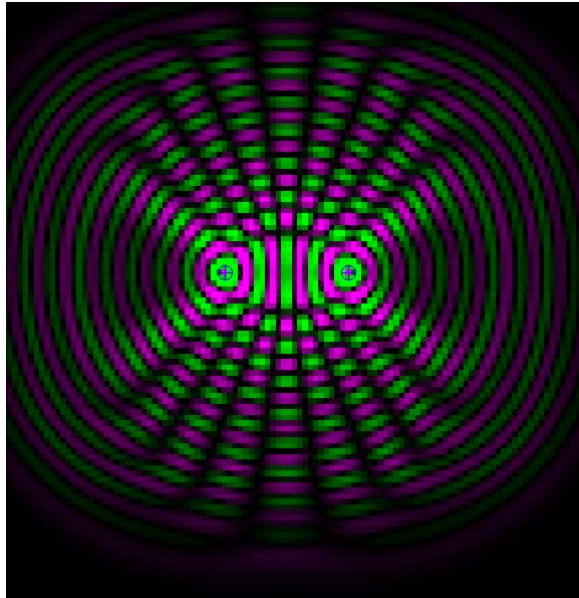
¹⁰ I differenti colori (verde e magenta) nell'applet che segue indicano creste e gole.



Le due perturbazioni iniziano ad interferire.



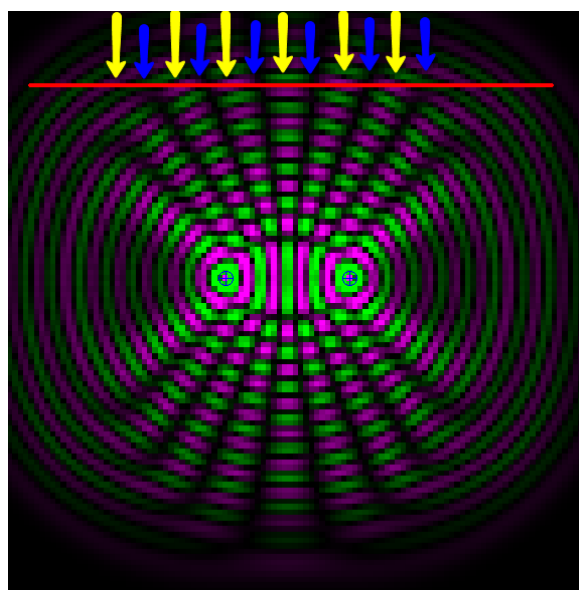
Si sta formando la figura di interferenza.



La figura di interferenza è (quasi) completa.

Nell'ultima immagine si possono apprezzare nitidamente le **iperboli di interferenza** costruttiva e distruttiva.

Su una **linea** (è quella rossa nella figura che segue) posta ad una certa distanza dalle due sorgenti si alternano dunque zone in cui le onde interferiscono costruttivamente (individuate dalle frecce gialle) e zone in cui le onde interferiscono distruttivamente (individuate dalle frecce blu).



Proviamo, per il momento, a supporre che **la luce sia una perturbazione ondosa** di un qualche tipo¹¹ e torniamo all'esperienza di Young.

L'onda luminosa, partita da qualche sorgente, investe i due fori nel cartone, i quali diventano due sorgenti luminose da cui partono due treni di onde circolari.

Tali perturbazioni ondose **interferiscono tra loro** e su uno schermo posto ad una certa distanza dalle sorgenti (i fori) si alternano zone nelle quali l'interferenza è costruttiva (zone di luce) e zone nelle quali l'interferenza è distruttiva (zone d'ombra).

Restano così spiegate le frange luminose che appaiono su uno schermo posto dietro al cartone in cui sono stati praticati i due forellini: esse sono una conseguenza dell'interferenza della luce e, dunque, della sua **natura ondulatoria**.

5. La lunghezza d'onda della luce

L'onda luminosa pertanto attraversando una apertura **si diffrange**, cioè va ad invadere le zone che secondo la teoria newtoniana dovrebbero rimanere buie, e va a disegnare su uno schermo posto dietro l'apertura le cosiddette **frange di diffrazione**, zone di luminosità che si alternano a zone di buio.

Per osservare tali frange, però, Young dovette utilizzare fori, e dunque aperture, **il cui diametro era dell'ordine del centesimo di millimetro**.

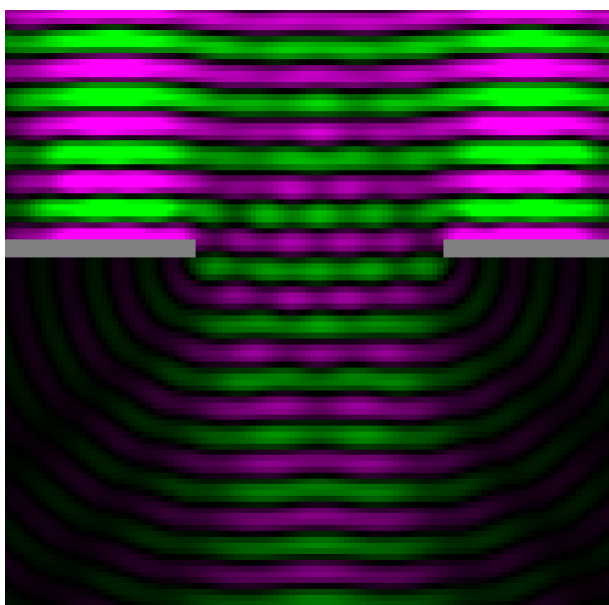
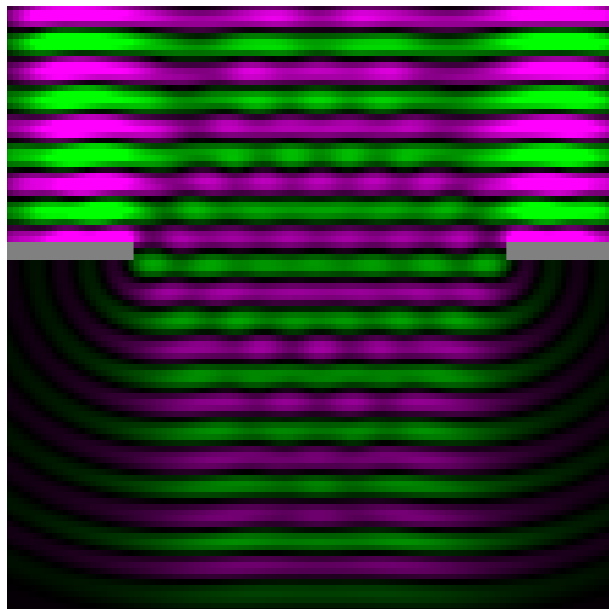
Come abbiamo già visto,

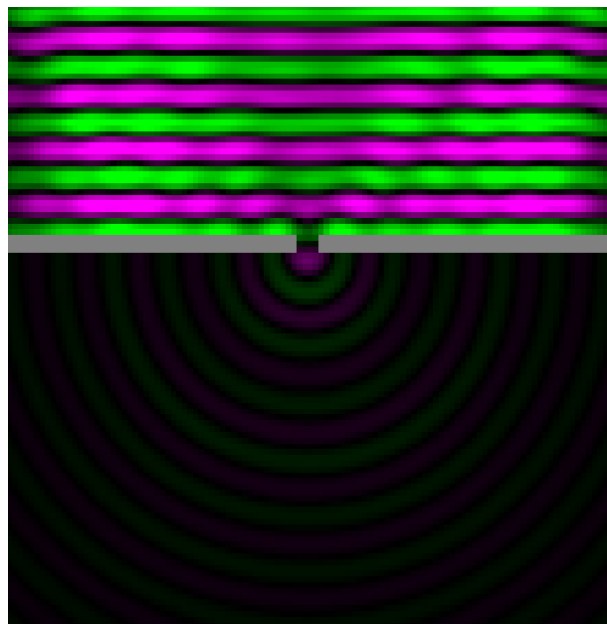
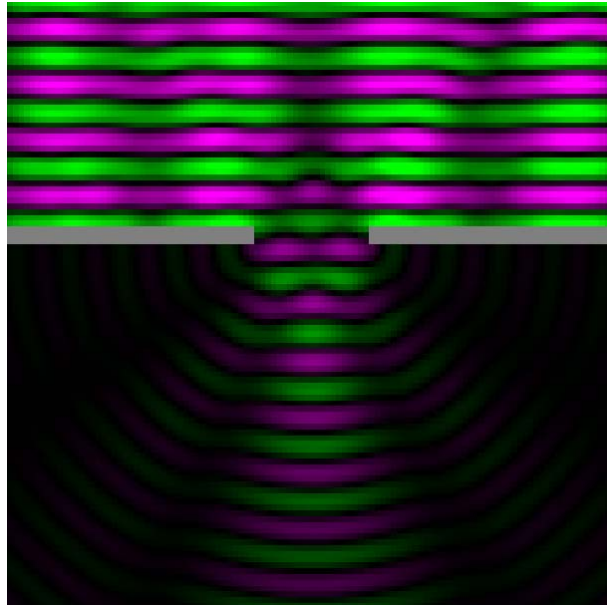
con fori più grandi, per esempio di qualche decimo di millimetro, il comportamento era del tutto normale: sullo schermo apparivano **due macchie luminose distinte in corrispondenza dei fori**.

Per comprendere tale comportamento, andiamo ad esaminare cosa accade ad una perturbazione ondosa quando attraversa una apertura (fenditura).

¹¹ Per il momento imprecisato.

Osserviamo le immagini che seguono:





L'analisi delle precedenti immagini ci dice che il comportamento della perturbazione ondosa al di là dell'apertura dipende dalla **lunghezza d'onda** λ della perturbazione e dalla **larghezza** d dell'apertura.

In particolare:

- se $\lambda \gg d$, l'onda procede pressoché indisturbata e diffrange lievemente ai lati;
- man mano che λ diminuisce, mantenendosi sempre maggiore di d , i fronti (piani) dell'onda tendono sempre più a curvarsi;
- se $\lambda \cong d$, i fronti dell'onda diventano circolari.

Pertanto, tornando al nostro esperimento di Young, siamo costretti ad ammettere che affinché si notino fenomeni di diffrazione nel passaggio della luce al di là dei due fori praticati nel cartone, **la perturbazione luminosa deve “incurvarsi” e dunque avere una lunghezza d'onda che non si discosta molto dal diametro dei forellini**, che è dell'ordine del centesimo di millimetro, cioè 10^{-5} m.

In verità, la **lunghezza d'onda della luce** è addirittura di circa **100 volte inferiore** al diametro dei forellini: essa va da circa $4 \cdot 10^{-7}$ m a $8 \cdot 10^{-7}$ m.

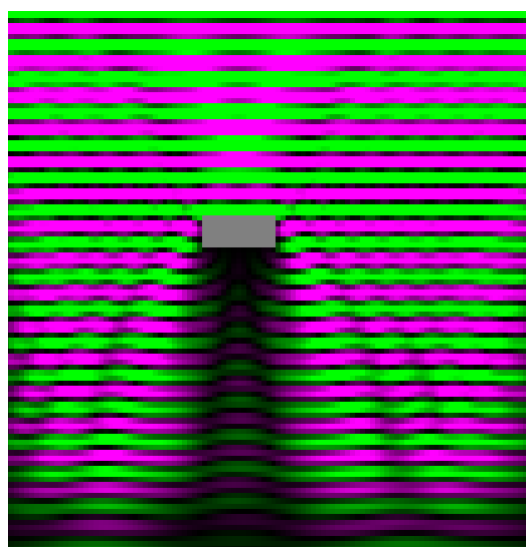
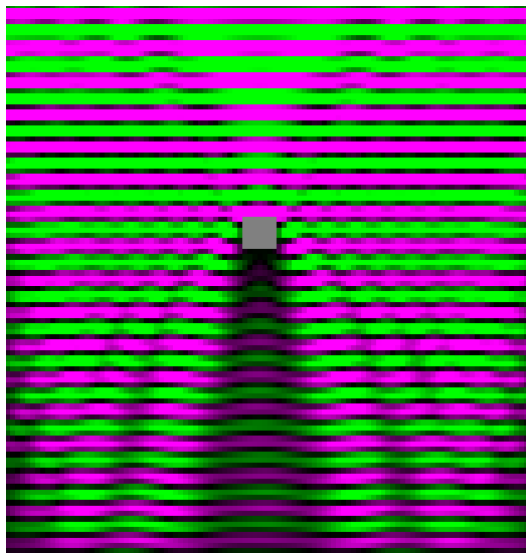
Quindi, nell'esperimento di Young la larghezza delle fenditure è cento volte più grande della lunghezza d'onda della perturbazione luminosa incidente: siamo però in grado di visualizzare su uno schermo posto a debita distanza, 1 o 2 metri, le frange di diffrazione **grazie all'estrema vicinanza**, dell'ordine del decimo di mm, delle due sorgenti (i due forellini).

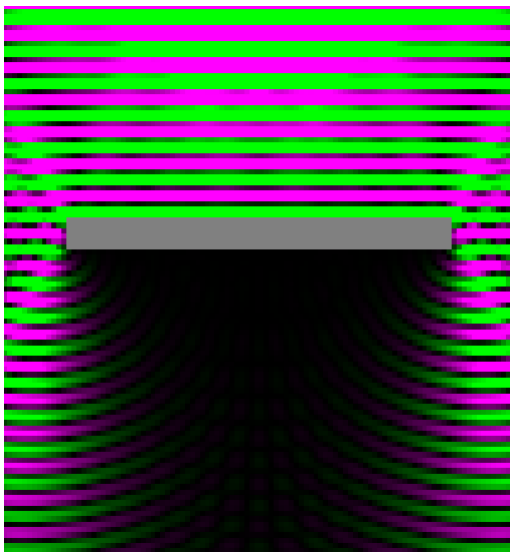
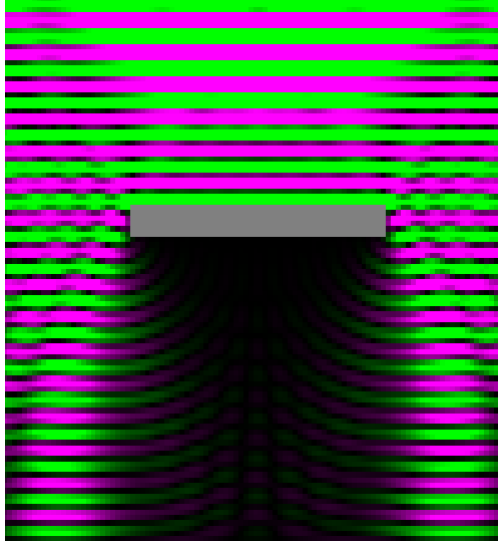
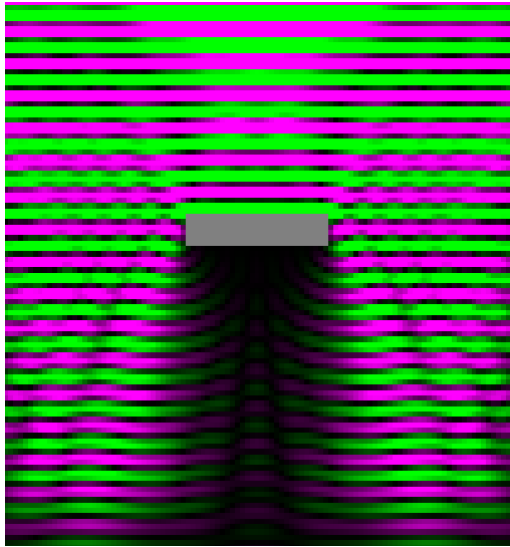
Così, se l'apertura attraversata dalla luce è **superiore a qualche decimo di millimetro**, **risulta praticamente impossibile vedere la diffrazione e la luce sembra quasi proseguire in linea retta**: a tale proposito, è sufficiente osservare la luce che, dopo essere passata attraverso una porta, si proietta su un muro.

Inoltre,

Gli oggetti che vediamo solitamente intorno a noi hanno dimensioni assai più grandi della lunghezza d'onda della luce, ed è per questo che essa non aggira gli ostacoli, come invece fanno le onde sonore. **Ecco perché la luce produce ombre dai contorni ben definiti.**

A tale proposito, osserviamo, nelle immagini che seguono, il comportamento di una perturbazione ondosa quando incontra sul suo cammino un **ostacolo**:





Le immagini sono di facile lettura: man mano che la dimensione dell'ostacolo diventa più grande rispetto alla lunghezza d'onda della perturbazione incidente, si forma dietro l'ostacolo **una zona in quiete sempre più grande**.

Nel caso delle onde luminose, la zona indisturbata corrisponde ovviamente ad una **zona di buio**.

L'ultima immagine fa comprendere bene per quale motivo **in presenza di luce le ombre sono così nette**.

6. Lo spettro elettromagnetico

La luce è un'onda elettromagnetica, cioè una perturbazione ondosa in cui le grandezze vettoriali variabili sono il campo elettrico ed il campo magnetico.

Le **onde elettromagnetiche** vengono classificate in base alla loro **lunghezza d'onda** o, equivalentemente, alla loro **frequenza**:

Radiazione elettromagnetica	Lunghezza d'onda
Onde radio	$\geq 10 \text{ cm}$
Microonde	10 cm - 1 mm
Infrarossi	1 mm - 700 nm
Luce visibile	700 - 400 nm
Ultravioletti	400 nm - 10 nm
Raggi X	10 nm - 1 pm
Raggi gamma	$< 1 \text{ pm}$

Nella precedente tabella, un nanometro $1 \text{ nm} = 10^{-7} \text{ m}$, un picometro $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$.

Lo **spettro elettromagnetico** è la classificazione delle onde in funzione della loro lunghezza d'onda o frequenza.

Su Wikipedia leggiamo:

Lo **spettro elettromagnetico** è l'intervallo di tutte le possibili frequenze delle radiazioni. Le radiazioni sono onde elettromagnetiche caratterizzate da una lunghezza d'onda e da una frequenza. Poiché la lunghezza d'onda e la frequenza di una radiazione sono inversamente proporzionali, tanto minore sarà la lunghezza d'onda, tanto maggiore sarà la frequenza e quindi l'energia.

Con la vista riusciamo a percepire lunghezze d'onda comprese tra i 380 e i 760 nanometri (nm) a cui diamo il nome di luce visibile. Lunghezze d'onda minori corrispondono ai **raggi ultravioletti**, ai **raggi X** ed ai **raggi gamma** che hanno tutti quindi frequenza superiore alla luce visibile e perciò maggiore energia. Le **radiazioni infrarosse**, le **onde radio** e le **microonde** hanno invece lunghezze d'onda maggiori della luce e trasportano energia inferiore.

Come l'orecchio ha dei limiti nella percezione del suono, **l'occhio umano ha dei limiti nella visione della luce.** In entrambi i casi, vi sono limiti superiori e inferiori. **L'occhio non può vedere la radiazione elettro-magnetica oltre la zona violetta dello spettro e al di sotto della zona rossa.** Lo spettro elettromagnetico si compone delle zone al di sopra e al di sotto di questi limiti, incluso il campo visibile. Anche se l'ultima lunghezza d'onda considerata nel campo visibile è di 0,4 μm , alcune persone possono vedere la radiazione con una lunghezza d'onda anche di solo 0,3 μm .

La radiazione con una lunghezza d'onda inferiore a 0,4 μm è denominata luce ultravioletta. Questa zona scende fino a una lunghezza d'onda di circa 0,35 μm ¹². Al di sotto di questa zona, si trova quella dei raggi X e si stende fino a una lunghezza d'onda di circa 0,006 μm . La parte inferiore dello spettro si compone di onde denominate raggi gamma. Questa zona si trova al di sotto della zona dei raggi X. Dalla parte dello spettro, dove la luce ha lunghezza d'onda maggiore, cioè oltre il rosso, si trova la zona denominata infrarossa. Quest'ultima va da 0,7 μm a 0,4 mm. Quindi, viene la zona delle microonde, con lunghezze d'onda da 0,4 mm. a 100 cm. Oltre a

¹² 100 μm = 1 nm.

questa, vi sono tre campi di onde radio: onde corte da 1 m a 100 m; onde medie da 200 m a 600 m; onde lunghe superiori a 600 m.

È interessante rilevare che **solo una parte assai limitata dello spettro contiene radiazioni visibili all'occhio**. Per quanto le onde delle diverse zone abbiano tutte le stesse proprietà, **si impiega il termine luce solo per la parte visibile dello spettro e le due zone circostanti**. Le parti di luce visibile dello spettro sono emesse da corpi incandescenti. Il campo di raggi gamma rappresenta il risultato della disintegrazione radioattiva. Le onde radio possono essere generate da scariche che producono onde elettromagnetiche. Quantunque si distinguano varie zone nello spettro, **non si può dire che esistano tra esse limiti netti**.

7. Lo spettro dei colori

Abbiamo dunque visto che le proprietà delle onde elettromagnetiche sono definite dalla loro frequenza o, ciò che è equivalente, dalla loro lunghezza d'onda. Quando ci si limita alla regione visibile tra 380 e 760 nm, la proprietà che più evidentemente varia con la lunghezza d'onda è quella che, al nostro occhio, appare come colore.

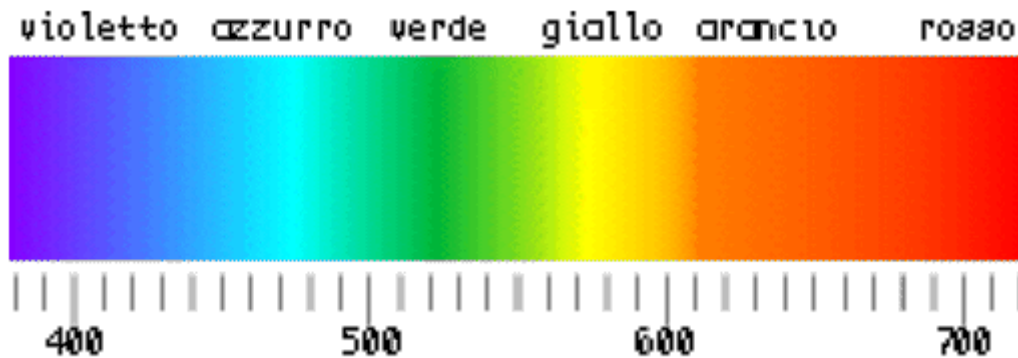
Pertanto, il colore è la traduzione fisiologica della lunghezza d'onda della perturbazione luminosa che incide sulla nostra retina.

La tabella che segue elenca la lunghezza d'onda e la frequenza associata a ciascun colore:

I colori dello spettro di luce visibile

colore	intervallo di lunghezza d'onda	intervallo di frequenza
rosso	~ 700–630 nm	~ 430–480 THz
arancione	~ 630–590 nm	~ 480–510 THz
giallo	~ 590–560 nm	~ 510–540 THz
verde	~ 560–490 nm	~ 540–610 THz
blu	~ 490–450 nm	~ 610–670 THz
viola	~ 450–400 nm	~ 670–750 THz

Quello che segue è lo **spettro dei colori**:



8. A cosa è dovuto il colore di un oggetto?

Gli oggetti **hanno colori differenti** poiché quando sono investiti dalla luce bianca, come quella del Sole o di una lampadina, **assorbono alcuni colori e ne riflettono altri**, quelli che giungono alla nostra retina.

Un oggetto che ci appare giallo ha la proprietà di riflettere le onde luminose che hanno una lunghezza d'onda nella zona del giallo (560 – 590 nm) e di assorbire tutte le altre onde luminose che presentano lunghezze d'onda differenti da quella del giallo, così come un oggetto che ci appare verde ha la proprietà di riflettere le onde luminose che hanno una lunghezza d'onda nella zona del verde (490 -560 nm) e di assorbire tutte le altre onde luminose che presentano lunghezze d'onda differenti da quella del verde.

Gli oggetti pertanto **non hanno un colore proprio**: tale colore dipende infatti dalla luce che investe l'oggetto stesso.

Al buio, un oggetto investito da una luce monocromatica rossa sarà in grado di riflettere unicamente il colore rosso e le sue parti nere rimarranno nere.

