

Rifrazione

La luce di una sorgente molto distante attraversa la superficie di separazione fra due mezzi con diversa velocità.

Si permette alla luce di attraversare un sottile passaggio, ancora una fenditura, creato fra i due mezzi per poter vedere dove la luce andrà ad interessare il rivelatore.

L'uso di una fenditura ci permette di focalizzare i fotoni in un'area limitata in modo da poter individuare il punto illuminato e ricostruire così il raggio luminoso.

La luce proseguirà dritto oppure subirà una flessione secondo la legge di **Snell**?

Con Scratch viene applicato il metodo dei “**cammini di Feynman**” per costruire un fascio di percorsi contigui che passano attraverso la fenditura e raggiungono un rivelatore mobile che può scorrere lungo lo schermo.

Il percorso attraversa dapprima un materiale con **indice di rifrazione** pari a n_1 e poi un materiale con indice di rifrazione pari a n_2 .

Al termine di ogni percorso un fasore associato al fotone fornisce la fase finale che viene assegnata ad un vettore unitario.

Per ciascun fascio di cammini entro la fenditura si esegue la somma vettoriale dei suddetti vettori unitari; il modulo della risultante elevato al quadrato servirà per calcolare la probabilità che il fotone raggiunga il rivelatore posizionato in quel punto.

Con il rivelatore mobile viene scansionato tutto lo schermo passando per tutti i 481 punti dello schermo in modo da costruire una lista che contiene i valori del quadrato dei moduli delle risultanti calcolati per ciascuna posizione.

Terminata la scansione dello schermo si può disegnare il grafico delle probabilità.

Utilizzare il progetto

Quando viene avviato il progetto “**05 rifrazione**” vengono visualizzati alcuni parametri che servono per definire la geometria dell'apparato.

I parametri visualizzati sono:

- ***lambda***: una grandezza caratteristica del fotone;
- la larghezza della fenditura;
- la distanza della superficie di separazione dallo schermo;
- l'ascissa della parte centrale della fenditura;

- la direzione di provenienza della luce rispetto alla normale alla superficie di separazione;
- il numero di cammini contigui da sparpagliare uniformemente entro la fenditura;
- l'avanzamento Δx del fotone effettuato ad ogni iterazione di calcolo lungo il cammino;
- la rotazione $\Delta \textit{fase/tic}$ del fasore per ogni iterazione di calcolo.

Attenzione. Tutti i parametri vanno eventualmente modificati prima di effettuare un esperimento utilizzando i cursori.

Scansione della fenditura

Con **[tasto S]** si avvia la procedura per effettuare una singola scansione della fenditura.

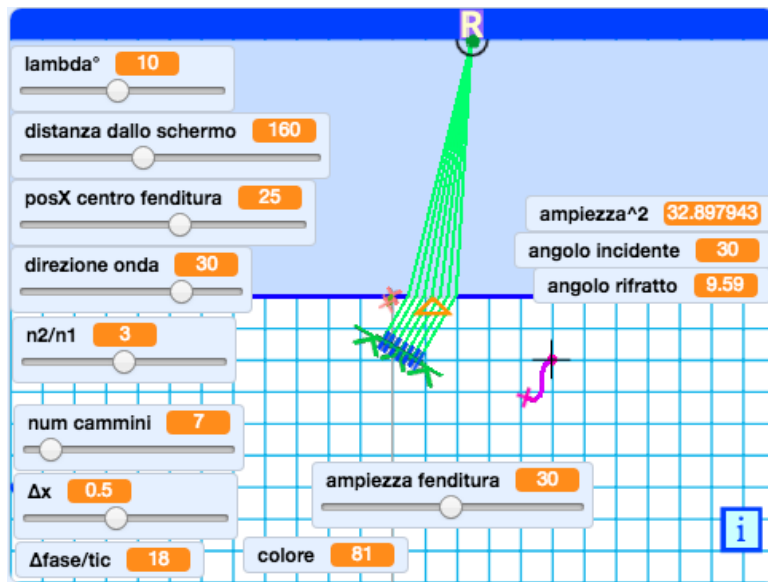
Prima di fare la scansione viene chiesto di fissare alcuni valori che nel caso dell'esempio sottostante sono:

- ampiezza della fenditura = 30 passi;
- posizione x del centro della fenditura = 25 passi;
- ascissa del rivelatore = 50 passi.

*Nota. Il parametro “**numero di cammini**” è stato preventivamente portato a 7 per permettere una facile visione dei vari cammini che attraversano la fenditura¹.*

Il risultato mostra il disegno dei cammini che al di sotto della superficie sono costituiti da tratti paralleli, data l'ipotesi di una sorgente molto lontana, e, al di sopra, da tratti che convergono sul rivelatore:

¹ Un numero così esiguo di cammini porta ad errori nella costruzione della curva di probabilità, 13 è accettabile, 15 è meglio ... vanno bene 21 cammini!



Si vedono:

- in centro una crocetta rossa che si muove per brevissimi tratti al punto da rendere impercettibile il suo spostamento; questo sprite, “plotter”, si posta di un passo ad ogni iterazione per disegnare il poligono vettoriale che servirà per calcolare il modulo della risultante;
- a destra un’altra crocetta rossa che riproduce, amplificato, gli stessi spostamenti di quello centrale; viene costruito un poligono vettoriale ben visibile che è poi la spirale di Cornu; questo poligono è disegnato dallo sprite “monitor”²;
- a destra il valore dell’ampiezza del vettore risultante del poligono disegnato dallo sprite “plotter” elevato al quadrato.

Questo poligono viene disegnato ad ogni scansione della fenditura permettendo così di osservare l’evoluzione della spirale al variare dell’ascissa della posizione del rivelatore.

Con **[tasto R]** si ripete la scansione della fenditura con gli stessi parametri.

Può essere utile provare con diversi valori dei vari parametri per vedere come cambiano il disegno del poligono vettoriale ed il modulo della risultante.

Il rivelatore lo si può spostare per trascinamento e poi click oppure facendo Click sulla barra blu dello schermo.

² Lo sprite “monitor” costruisce lo stesso poligono vettoriale disegnato dallo sprite “plotter” ma con modulo amplificato affinché sia ben visibile. L’amplificazione di default è 8 ma si può modificare con i tasti freccia su/giù.

Durata della scansione

Con **[tasto D]** viene mostrata la durata della scansione che per l'esempio su esposto con 7 cammini risulta essere di 0,726 s.

Non è poco visto che si è in modalità turbo e che la scansione dello schermo comporta 481 ripetizioni della scansione delle fenditure.

Con 21 cammini anziché 7, la durata di una singola scansione risulterebbe essere di 2,178 s circa.

Si può prevedere che la durata dell'esperimento possa essere:

$$t_{sch} = t_{fend} * 481 = 2,178 * 481 \simeq 1048s$$

che corrispondono a circa 17,5 minuti, tanto per un esperimento.

*Nota. La durata cronometrata non è un risultato stabile³, può cambiare vistosamente da una prova all'altra. Provare con **[tasto R]** per ripetere più volte l'ultima scansione.*

Scansione dello schermo

Prima di attivare la scansione dello schermo è bene fissare il valore dei parametri mostrati a schermo affinché corrispondano all'esperimento che si vuole eseguire.

Nell'esempio della figura sottostante sono stati adottati i parametri di default con una direzione dell'onda pari a 30°, una distanza dallo schermo di 160 passi ed una posizione del centro dell'ostacolo a 0.

Con **[tasto C]** si attiva la scansione completa dello schermo dopo l'inserimento del valore dell'ampiezza della fenditura posta a 15 passi.

Se si tiene premuto **[tasto K]** il calcolo grafico avviato con **[tasto C]** va in pausa per mostrare il risultato atteso.

Termine della scansione

La scansione termina dopo parecchi minuti allorquando lo schermo lampeggia sul giallo.

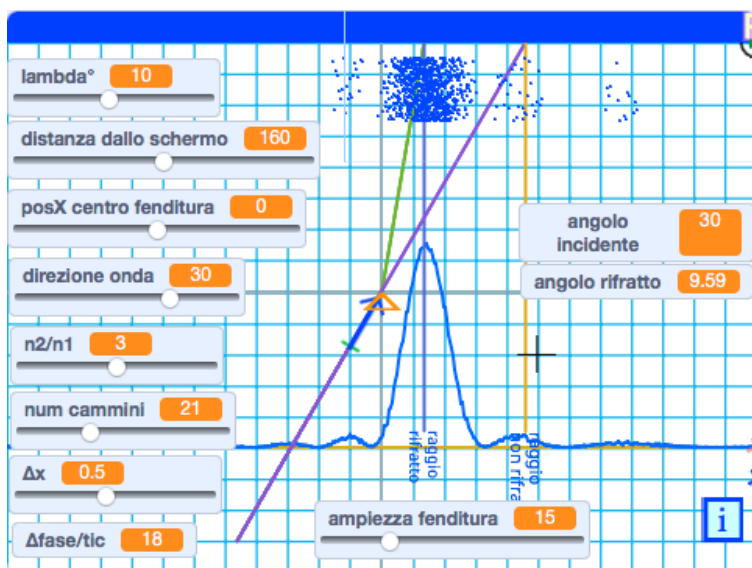
Con tasto spazio si interrompe il lampeggio arrestando tutti i processi.

Con **[tasto N]** si nascondono variabili e liste che si possono di nuovo vedere con, rispettivamente, **[tasto M]** e **[tasto L]**.

³ La durata cronometrata misurata con il cronometro interno a Scratch dipende, oltreché dalla lunghezza dei cammini, dal computer usato e da altre operazioni che sta svolgendo.

La curva di probabilità

Terminato il calcolo ed arrestati tutti i processi con **[spazio]**, con **[tasto P]** viene disegnata la curva delle probabilità in funzione della posizione sullo schermo:



Si vedono:

- i parametri del calcolo;
- la curva di probabilità;
- i raggi rifratto e non rifratto;
- la nuvola di un migliaio di singoli fotoni.

Con **[tasto A]** e in modalità turbo viene disegnato il raggio di luce ottenuto utilizzando le regole dell'ottica geometrica e la legge di Snell.

Ancora con **[tasto A]** viene disegnato il raggio in assenza di rifrazione.

Le linee verticali verde ed arancione servono per allineare geometricamente la curva di probabilità ed i punti intercettati sullo schermo con i due raggi.

Premendo di nuovo **[tasto A]** vengono disegnati gli angoli.

*Se si vogliono vedere i due diversi mezzi di propagazione come sfondo, premere **[tasto W]** prima di effettuare la visualizzazione delle immagini.*

La lista

Con **[tasto L]** viene mostrata la lista dei moduli al quadrato della risultante vettoriale calcolata al compimento dei 21 cammini passanti per la fenditura per ciascuno dei 481 punti dello schermo.

Al fondo della lista vengono registrati parametri usati nel calcolo.



Dato che il processo ha una durata notevole, può convenire salvare la lista dei valori calcolati.

In fondo alla lista vengono aggiunti i parametri utilizzati per l'esperimento; se la lista viene salvata i parametri serviranno per un eventuale riutilizzo.

La lista si salva in un file con **[click destro]** mentre il mouse è sulla lista scegliendo "esporta". Per richiamare una lista già salvata si fa la stessa operazione e si sceglie "importa" da un file presente sul PC.

Durata dell'esperimento

La doppia scansione richiede molto tempo per il fatto che vengono utilizzate le funzioni grafiche di Scratch.

Per avere una valutazione approssimata della durata si preme **[tasto T]** dopo avere impostato tutti i parametri.

La grafica permette di vedere un po' come si sviluppa il processo di calcolo basato sui cammini ma non è simpatico attendere tutto questo tempo per vedere risultati in condizioni diverse dell'apparato sperimentale.

Per costruire le curve più rapidamente si possono utilizzare calcoli geometrici che non richiedono l'impiego delle funzioni grafiche di Scratch.

Con lo sprite “calcolatore”

La stessa curva la si può ottenere molto più rapidamente usando lo sprite “calcolatore”.

Con **[tasto G]** viene attivato il calcolatore che è in grado di effettuare calcoli senza l'utilizzo della grafica di Scratch visto che è di gran lunga il maggiore responsabile dell'eccessiva durata.

Con questa modalità viene chiesto di impostare l'ampiezza della fenditura dopodiché si avvia il calcolo e dopo qualche secondo viene disegnata la curva di probabilità.

Questa modalità è utile per visualizzare rapidamente curve di probabilità corrispondenti a configurazioni diverse.

Con **[tasto X]** si può amplificare la curva di un fattore 1,41, con **[tasto Y]** la si riduce dello stesso fattore e con **[tasto 1]** si riporta il valore dell'amplificazione a 1.

Con **[tasto W]** si cancella tutto e si ridisegna lo schema.

Con **[tasto X]** si ridisegna l'ultima curva.

Con **[tasto E]** si cancellano tutti i disegni.

L'esperimento più bello?

Con **[tasto U]** viene ricostruita una nuvola di un migliaio di puntini per simulare un esperimento in cui i fotoni vengano inviati verso la fenditura uno alla volta.

Con pazienza si vedono puntini stampati uno alla volta secondo la curva di probabilità ricavata con **[tasto G]**, la curva di probabilità è eventualmente richiamabile con **[tasto K]**.

Al termine del processo la nuvola è simile a quella ricavata con **[tasto O]** se ricavata con gli stessi parametri.

*Nota. Se si ha fretta si tiene premuto il **[tasto V]**.*

Proposte

Provare per diverse larghezze, inclinazioni e indici di rifrazione per vedere come possono cambiare le curve.

Impostazioni del progetto

La maggior parte delle impostazioni del progetto è identica a quelle rappresentate per i precedenti esperimenti sulla singola e doppia fenditura a cui si rimanda.

<https://mastropaolo.net/didattica-con-scratch/fisica/cammini-di-feynman/doppia-fenditura>

L'unica differenza riguarda la diversa velocità di avanzamento del fasore nei due mezzi in ragione del rapporto n_2/n_1 .

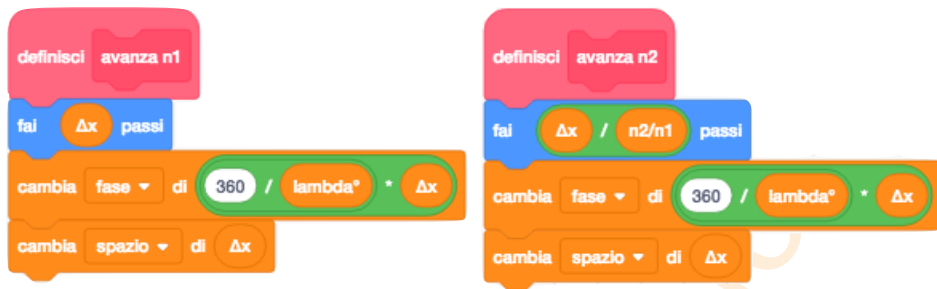
Ciascun cammino viene diviso in due parti; nella prima parte l'avanzamento avviene nel "mezzo1", nella seconda parte l'avanzamento avviene nel "mezzo2":



Finché il fasore si trova nel "mezzo1" l'avanzamento ad ogni iterazione vale Δx .

Quando il fasore si trova nel "mezzo2" l'avanzamento viene ridotto di n_2/n_1 volte.

I due diversi avanzamenti vengono invocati con le procedure:



Questo documento è allegato alla pagina web

<https://mastropaolo.net/didattica-con-scratch/fisica/cammini-di-feynman/rifrazione>