

Scheda "rifrazione"

Scheda di presentazione del progetto Scratch "QED 03".

L'impostazione del progetto "[QED 03 rifrazione](#)" si basa sulla lettura del capitolo "I fotoni: particelle di luce" del libro "QED" di Richard Feynman, collana "Gli Adelphi", 2010.

Una sorgente **S** emette un fotone ed un rivelatore **R** nei dintorni fa click se lo rileva¹.

Si vuole calcolare la probabilità che il rivelatore faccia un Click in seguito all'emissione di un fotone.

L'apparato sperimentale

Per realizzare l'esperimento illustrato a pag 70 del suddetto libro sono state apportate piccole modifiche a quello messo a punto per la [riflessione](#).

La sorgente **S** viene posizionata in alto dove si fa propagare il fotone nel primo mezzo con indice di rifrazione **n1** verso un mezzo sottostante con indice di rifrazione **n2**.

Di default il progetto prevede $n2 = 3 * n1$.

Il rapporto fra le due velocità è indicato con **Kn**:

$$kn = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

dove **n1** ed **n2** sono gli [indici di rifrazione](#) dei due mezzi.

Al di sotto della superficie di separazione, sul fondo, viene posto il rivelatore **R**.

Si tratta, come è stato fatto con lo specchio, di scoprire la direzione dalla quale il rivelatore, immerso nel proprio mezzo, vede giungere il fotone per farsi un'immagine della posizione della sorgente e viceversa.

È ancora una valutazione statistica in quanto si può solo sapere con quale probabilità il fotone percorrerà un dato cammino fra moltissimi possibili.

Per condurre l'esperimento si tratta di ripetere più volte il cammino che il fotone deve compiere partendo dalla sorgente **S** per arrivare al rivelatore **R** passando per un punto qualsiasi della superficie di separazione.

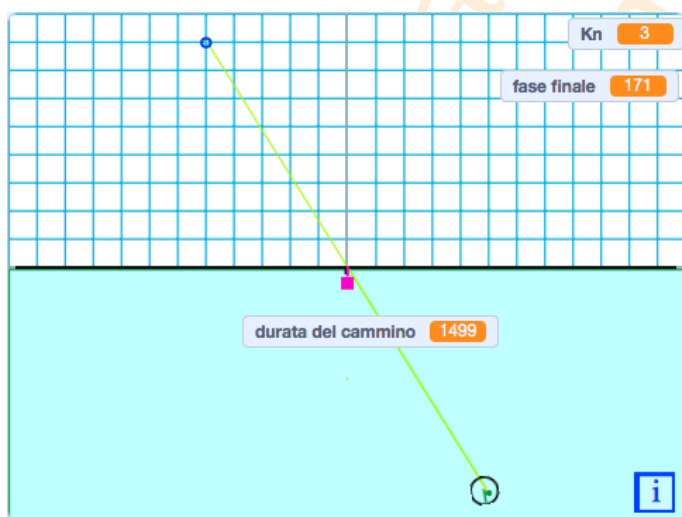
¹ QED pagina 57

Come trucco di Scratch per dirigere il cammino in una posizione a piacere della linea mediana si usa uno sprite apposito chiamato “*punto I*” che è mosso lungo la superficie di separazione tra i due mezzi di trasmissione del fotone².

Dopo aver avviato con **Bandierina Verde**, con [tasto 1] si può vedere il fotone accompagnato dalla sua freccia rotante che avanza lentamente prima verso lo sprite “*punto I*” e poi verso lo sprite “*rivelatore*” funzionanti entrambi da attrattore dello sprite “*fotone*” in due fasi successive.

Mentre il fotone disegnato con un puntino piccolissimo avanza, una freccia rotante lo accompagna ruotando lentamente.

Al termine del percorso si conoscono la fase finale della freccia rotante e la durata del percorso³.



Nel caso dell'esempio di figura si rileva:

$$Kn = 3^4$$

$$\text{fase finale} = 171^\circ$$

$$\text{durata del cammino} = 1499 \text{ tic}$$

² In un mezzo che non sia il vuoto, il fotone viene assorbito e riemesso per cui, in realtà, non si tratta dello stesso fotone. L'assorbimento e la riemissione sono la spiegazione di ciò che appare essere un rallentamento della velocità di propagazione.

³ Il tempo impiegato viene misurato in termini di conteggio delle iterazioni che si sono rese necessarie per passare da una posizione ad un'altra e si usa il termine arbitrario "tic" come unità di misura.

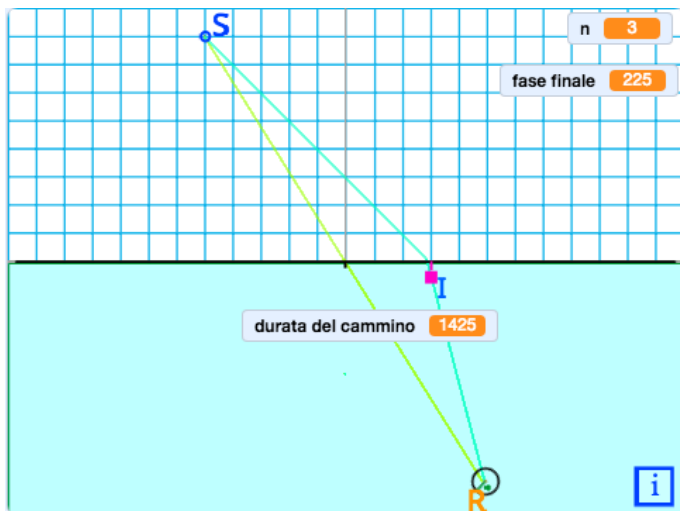
⁴ Il valore è un po' esagerato rispetto a quanto si ha in natura ma qui c'è bisogno di enfatizzare l'esperimento per renderlo ben visibile.

scheda QED

Notare che il percorso tracciato è il più breve ma, si vedrà, non è quello di durata minima.

Successivamente si sposta lo sprite il “punto I” un po’ a destra con i tasti freccia.

Si preme [tasto 1] per produrre un nuovo cammino:



La fase finale ha un valore diverso come atteso visto che il cammino è diverso ma, cosa più importante, la durata è inferiore anche se il cammino si vede più lungo.

Si possono costruire molti cammini spostando il “Punto I” e per ciascuno di essi si ottiene la fase finale.

La fase finale sarà utilizzata per costruire la poligonale della risultante.

Nota. Per vedere tutto più veloce inserire il “turbo” con [tasto shift]+bandierina verde.

Cammino di minima durata

Con [freccia destra] o [freccia sinistra] si può spostare a piacere lo sprite *punto I* lungo la superficie di separazione in modo da poter cercare il cammino di “**minima durata**” per tentativi⁵.

Già così si può rilevare che il minimo tempo prevede che il cammino per il raggio di luce che passa dal mezzo 1 al mezzo 2 sia una linea spezzata.

Una delle teorie fisiche descrive il comportamento della luce in termini di raggi che impiegano il minimo tempo e con questa semplice regola si trova che la linea è proprio una spezzata.

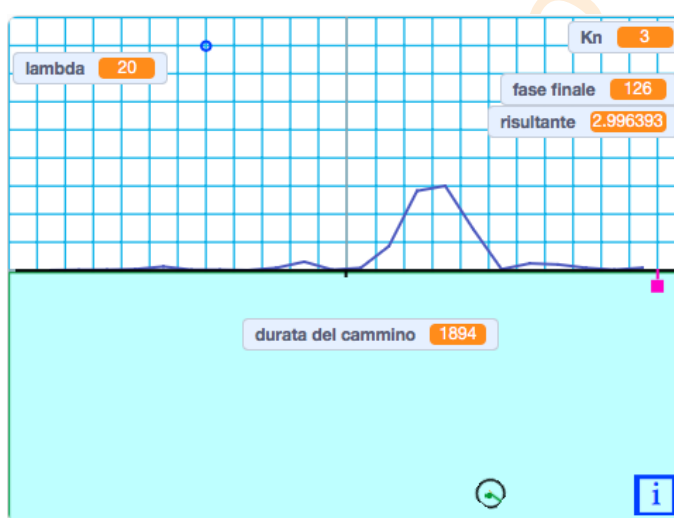
⁵ La precisione del procedimento messo a punto in questo progetto di Scratch non permette di andare oltre il numero intero per la posizione del **punto I** per cui non si trova il punto di minima durata ma un'intera gamma di valori che raggiungono il valore minimo.

La scansione

Il singolo cammino del fotone è lo strumento che serve per indagare sul suo comportamento per ogni posizione sulla superficie di separazione.

Con **[tasto 2]** si realizza la scansione della superficie per cercare il fascio di cammini di massima probabilità.

Terminata la scansione, con **[tasto P]** si ricostruisce la curva di probabilità.



La curva permette di individuare “ad occhio” la posizione di massima probabilità.

Fisso il punto di massima probabilità si può fare una prima verifica della **legge di Snell**.

Con **[tasto I]** si costruisce l’istogramma.

Indice di rifrazione

L’**indice di rifrazione** n è il rapporto fra la velocità della luce nel vuoto e la velocità della luce nel mezzo:

$$n = \frac{c}{v}$$

Dato il rapporto fra la velocità della luce nel primo mezzo v_1 e la velocità della luce della luce nel secondo mezzo v_2 , gli angoli di incidenza, misurati rispetto alla perpendicolare alla superficie, rispettano la regola

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\text{sen}(\alpha_1)}{\text{sen}(\alpha_2)} = \frac{n_2}{n_1} = Kn$$

Nel progetto anziché le due velocità è direttamente inserito il loro rapporto Kn (3 di default) che è l’inverso del rapporto fra gli indici di rifrazione.

Usando lo sprite “goniometro” è possibile fare una verifica numerica della regola dei seni.

Quando si preme [tasto G] viene visualizzato il versore del goniometro la cui origine può essere posizionata a piacere con un [mouse-click] o con [tasto G]+[freccia-destra] o [tasto G]+[freccia-sinistra].

L'origine del goniometro deve essere spostata sul punto di incidenza ritenuto di maggiore probabilità.

Con il mouse si può ruotare la semiretta per misurare gli angoli sotto cui si vedono la sorgente ed il rivelatore dal punto di incidenza scelto.

Una verifica interessante la si può fare spostando il punto di incidenza con il mouse e poi con [freccia-destra] o [freccia-sinistra] per indagare intorno al suddetto punto.

Dopo aver effettuato lo spostamento, con [tasto I] si può misurare la durata del percorso per vedere che la durata minima si verifica sempre per il punto di massima probabilità.

Freccia rossa

La freccia rossa visibile nell'immagine viene posizionata con [tasto F].

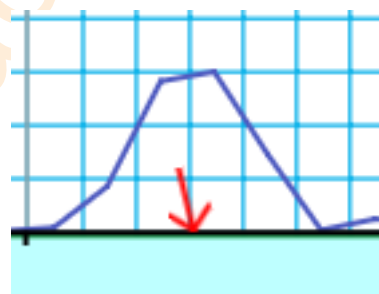
La freccia rossa indica il punto in cui Scratch trova che il rapporto

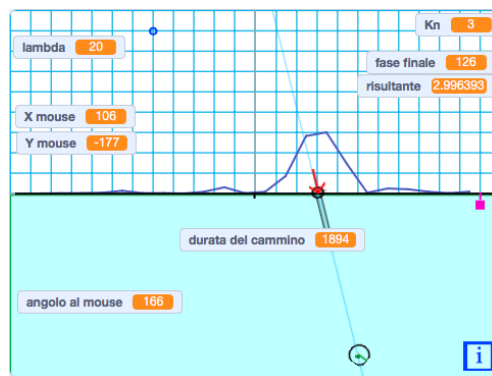
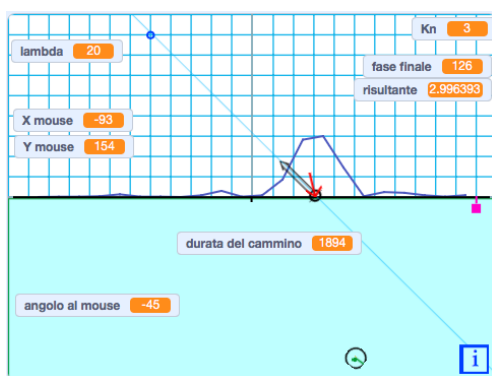
$$\frac{\text{sen}(\alpha S)}{\text{sen}(\alpha R)}$$

vale Kn individuando così il punto di rifrazione con maggiore precisione.

Si vede che la posizione della freccia rossa corrisponde bene al punto di massima probabilità.

Utilizzando il goniometro a partire da questo punto si ricavano i due angoli:





dalla figure si ottengono rispettivamente:

$$\alpha S = -45$$

$$\alpha R = 166$$

Con **[tasto R]** si inseriscono i valori misurati dei due angoli e si ottiene il rapporto **Kn** misurato che risulta essere:

$$Kn_{mis} = \left| \frac{\text{sen}(\alpha S)}{\text{sen}(\alpha R)} \right| = \left| \frac{\text{sen}(-45)}{\text{sen}(166)} \right| = 2,92$$

Il codice restituisce il valore assoluto per poter fare un confronto diretto con **Kn**; un valore negativo spiega solo che **S** ed **R** sono da parti opposte rispetto al punto di incidenza.

Un valore pari a 2,92 è sensibilmente vicino al valore impostato di **Kn = 3**.

Per un esperimento realizzato così può bastare⁶.

Con **[tasto 3]** si può indagare per valori di **Kn** diversi⁷.

Per verificare la rifrazione in altre situazioni, **S** ed **R** si possono anche spostare con l'uso del mouse.

Se si modifica con **[tasto L]** il valore di lambda (di poco) si vede che la rifrazione avviene per gli stessi punti modificando, però, la curva di probabilità.

⁶ Ci sono errori inevitabili dati dalla necessità di usare numeri interi per le posizioni dei vari oggetti sullo stage.

⁷ Se si usano valori molto diversi dalla gamma consigliata 0,2-5 si possono verificare errori dovuti dall'algoritmo ed alla geometria troppo ristretta.