

Scheda “specchi”

Scheda di presentazione del progetto Scratch “QED 02”.

L'impostazione del progetto [QED 02 specchi](#) 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 verso una superficie riflettente ed un rivelatore R fa click se lo rileva¹.

Con la grafica di Scratch si vuole calcolare la probabilità che il rivelatore faccia un click in seguito all'emissione di un fotone.

Grazie a questo esperimento si possono avere informazioni sulla riflessione della luce.

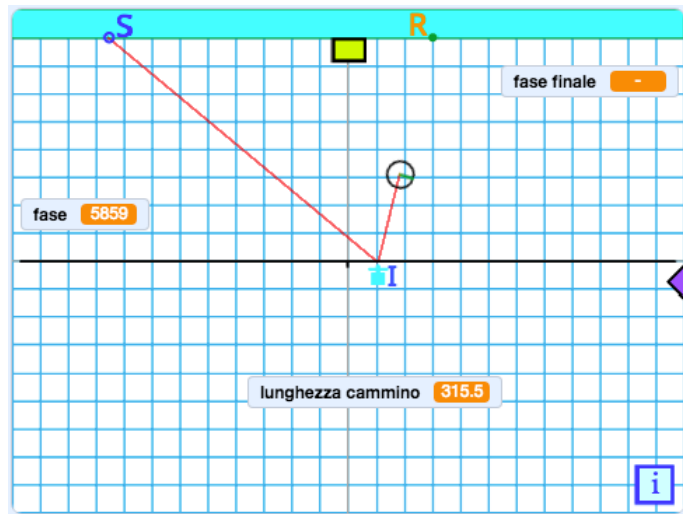
Nel progetto “[QED 02 specchi](#)” vengono realizzati diversi esperimenti.

Lo stage è il piano sul quale giacciono i cammini di Feynman.

In alto c'è lo schermo (la striscia celeste) lungo il quale sono posizionati la sorgente ed il rivelatore.

Lo specchio è posizionato nella parte centrale dello stage; su di esso è posizionato il punto di incidenza.

¹ QED pagina 57



Per effettuare calcoli sui cammini si muove un fotone che esce dalla sorgente **S** verso il punto di incidenza **I** per poi dirigerlo verso il rivelatore **R**.

Il movimento viene ottenuto per incremento Δs reiterato.

Una singola iterazione definisce l'unità di tempo e viene chiamato "tic".

Il fotone "esploratore" è accompagnato da un oggetto ruotante, un vettore, che serve a calcolare la fase finale, unico dato interessante ai fini del calcolo della probabilità di compiere quel dato percorso.

Il modulo del vettore è unitario, il vettore ruota man mano che il cammino viene coperto in modo che ad ogni iterazione aumenti di una quantità predeterminata $\Delta \text{fase} / \text{tic}$.

La principale caratteristica del fotone è data dalla grandezza "lambda" che è la distanza che il fotone deve percorrere per compiere un giro.

Posto in questi termini ed usando le convenzioni valide per Scratch² la fase del vettore procede come:

$$\text{fase} = \frac{360}{\text{lambda}} * s$$

Vengono misurati sia la lunghezza **s** del cammino che la fase finale.

² Lunghezze misurate in passi e angoli misurati in gradi sessadecimali.

Con **[tasto 1]** si produce un singolo cammino³.

Sorgente, punto di incidenza e rivelatore si possono spostare per trascinamento col mouse in qualunque posizione per vedere l'effetto che fa sulle due misurazioni.

Se si fa click su di essi li si riallinea con lo schermo o lo specchio, a seconda dei casi.

La lunghezza del cammino la si può anche rilevare con semplici calcoli geometrici e di conseguenza ricavare la fase finale analiticamente senza impiegare tempo dietro la ricostruzione delle immagini.

Qui si vuole evidenziare cosa accade al vettore associato al fotone utilizzando un processo di simulazione grafica.

Nella disposizione di default i tre oggetti sono disposti nella posizione di simmetria rispetto al punto di incidenza che porta a costruire il cammino di minima lunghezza, che, come si sa, è quello che viene utilizzato in ottica geometrica per disegnare il percorso del raggio incidente e riflesso.

Qualunque altra posizione produrrà un cammino più lungo, basta provare!

Con **[tasto 2]** si fa scorrere automaticamente il punto di incidenza dall'estremità sinistra a quella destra con lo scopo di costruire un vettore risultante dalla somma vettoriale di tutti i contributi dei singoli cammini.

Man mano che vengono percorsi i vari cammini si può osservare come cambia la fase finale.

Quando il punto di incidenza si trova alle estremità, la fase finale assume valori disparati fra vari cammini consecutivi, mentre quando si trova intorno al centro la fase finale varia di poco.

Questa osservazione è importante per capire come sia la parte centrale a dare un contributo importante alla costruzione del vettore risultante.

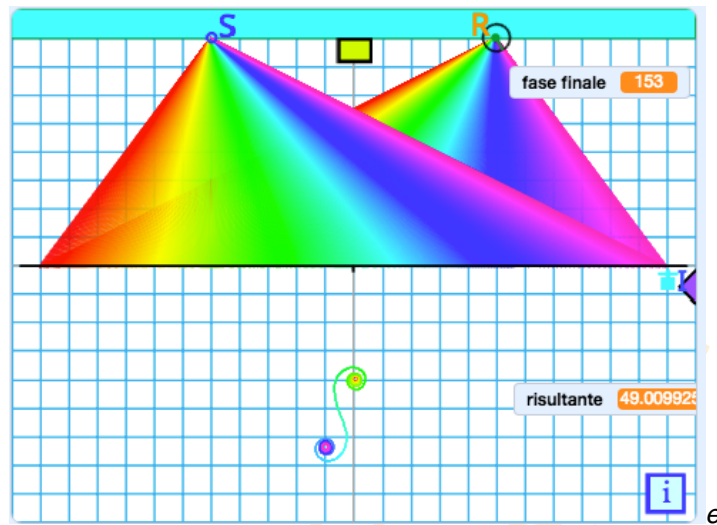
Ne esce un disegno policromo costruito con tutti i cammini così programmati.

Nella parte bassa dello stage viene costruito il vettore risultante come somma vettoriale dei singoli vettori finali e ne viene indicato il modulo.

³ Se si ha fretta si inserisce il "turbo" facendo click su "bandierina verde" insieme a [tasto maiuscole].

Il disegno che emerge dalla costruzione del vettore risultante è una spirale di Cornu, o di Eulero o clotoide⁴. Con **[tasto C]** si ridisegna la spirale ingrandita.

Con **[tasto E]** si cancella tutto.



I colori servono per capire quale cammino contribuisca di più a definire il modulo del vettore finale.

I cammini che interessano la parte centrale, di colore turchese, sono quelli che allungano decisamente la spirale.

Nota. Con diversi λ si hanno diversi risultati finali e diverse configurazioni della clotoide. Ma non cambia il contributo della parte centrale.

I cammini vengono colorati in modo differente per illustrare graficamente il processo mettendo in relazione un cammino con un particolare segmento della spirale.

Nota. Dato che il processo dura molto tempo, lo si può accelerare inserendo il turbo con il quale però si perde l'effetto dell'animazione.

Questa costruzione dice poco su quale sia la parte di specchio interessata alla riflessione.

⁴ La clotoide è stata trattata in un **progetto** che comprende disegni di diversi tipi di spirale allegato al libro "**Geometria 2 con Scratch**".

L'approccio dei molti cammini, che esclude che il fotone "sappia" quale sia il percorso da compiere, si basa sul considerare milioni di vie percorribili per andare da S a R toccando lo specchio⁵.

Per semplificare i calcoli Feynman propone di suddividere lo specchio in numerose strisce discrete per misurare la fase finale data da ciascuna di esse⁶.

Con **[tasto 3]** si fa ancora meglio.

Lo specchio viene suddiviso in strisce larghe 20 passi (un quadretto) e per ogni striscia vengono realizzati 20 percorsi equidistanti (uno ad ogni passo) con i quali viene calcolato il modulo finale del vettore risultante dato da quella specifica striscia.

Per fare questo è sufficiente spostare di un passo il punto di incidenza **posX I** ogni volta che viene compiuto un cammino, quindi si calcola il modulo del vettore finale costruito con i cammini di una striscia e se ne registra il quadrato in una apposita lista.

Con due percorsi il modulo sarà al massimo la somma dei due; per effetto della rotazione angolare del secondo vettore, il modulo della risultante sarà compreso fra zero e due

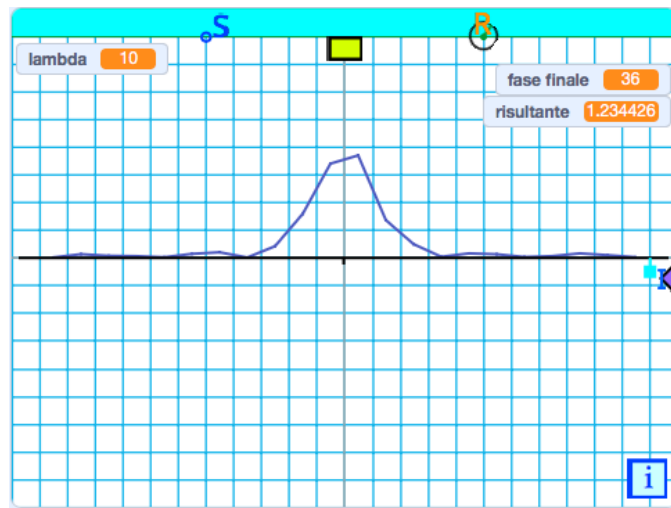
Con numerosi percorsi la risultante sarà sempre compreso fra zero e la somma aritmetica dei vettori finali.

Se la fase finale varia rapidamente da un percorso a quello adiacente il modulo del vettore finale sarà modesto.

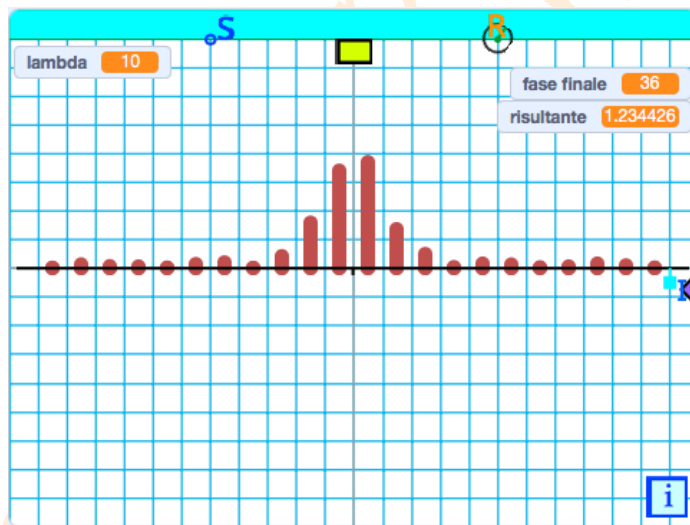
Con **[tasto P]** viene disegnata la curva delle probabilità in corrispondenza della posizione centrale di ciascuna striscia:

⁵ QED, pag 59.

⁶ QED pag 60.



con **[tasto I]** si disegna il corrispondente istogramma:



La parte centrale dello specchio è quella che contribuisce maggiormente alla riflessione di un fotone che parte da S e raggiunge R.

In particolare, cambiando λ , cioè la lunghezza d'onda, la riflessione avviene sempre con la stessa regola conosciuta con l'ottica geometrica: la regola della riflessione vale per qualunque colore.

Una verifica è possibile usando lo sprite “goniometro”.

Quando si preme **[tasto G]** viene visualizzato il cursore 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]**.

Con il mouse si può spostare la semiretta per misurare gli angoli.

Con questo strumento si può verificare che sia la sorgente che il rivelatore vengono visti dal punto di massima probabilità di riflettere un fotone sotto lo stesso angolo.

Si può anche spostare il punto di incidenza trascinandolo con il mouse e poi con **[freccia-destra]** o **[freccia-sinistra]**; con **[tasto 1]** si può misurare la durata del percorso per vedere che la durata minima si verifica sempre per il punto di massima probabilità di riflettere un fotone.

Nota. I valori misurati sono tutti soggetti ad errori dati dall'impossibilità di muovere con precisione il fotone. Gli errori di misurazione ci sono sempre negli esperimenti, basta farci l'abitudine e sapere delle loro esistenza.

Togliere le parti inutili dello specchio

Nota: Si badi bene: non è impossibile che una porzione laterale dello specchio non restituisca un fotone al rivelatore, è solo improbabile. Le parti laterali dello specchio sembrerebbero inutili ma Feynman non è d'accordo (come contraddirlo?).



Poi si prende un CD in mano e si vede che sulla sua superficie si riflette la luce proveniente dal davanti, mentre se la sorgente luminosa è dietro o di lato (come in figura, basta guardare le ombre) si vedono bellissimi colori.

Nello stesso capitolo Feynman si sofferma a considerare che anche le parti estreme dello specchio riflettono fotoni sul rivelatore solo che producono un contributo di fase talmente diversificato da impedire che ci sia un contributo al modulo della risultante che sia significativo.

In sostanza Feynman propone di rigare lo specchio in modo selettivo⁷, infatti, il trucco funziona ad una specifica lunghezza d'onda.

La rigatura, se fatta bene, permette di inviare al rivelatore solo quei fotoni che danno vettori quasi equiversi tali per cui la loro risultante sia significativa.

⁷ QED pag. 65

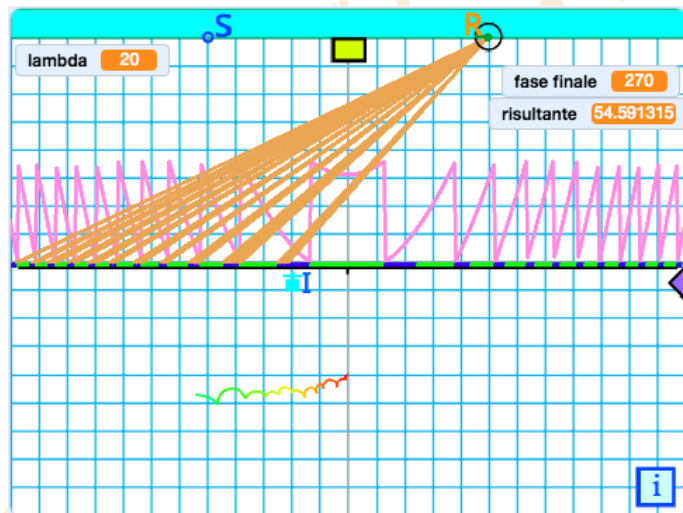
Funziona bene solo per una precisa lunghezza d'onda, altre lunghezze d'onda, i colori, avranno bisogno di una differente rigatura oppure saranno rivelate in posizioni diverse del rivelatore.

Con [tasto 4] viene proposto un altro esperimento per fare vedere che anche le parti laterali dello specchio contribuiscono alla riflessione.

Viene calcolata prima la fase finale per ciascun punto dello specchio e viene disegnata in colore rosa.

Successivamente si fa in modo che la parte che produce fasi finali comprese tra 120° e 360° diventi opaca colorandola di verde mentre la parte che deve riflettere viene colorata di blu.

Per ottenere la riflessione selettiva si utilizza una funzione di Scratch che consente di giocare sui colori per realizzare delle scelte di tipo <se... allora ...> in modo che il fotone venga inviato al rivelatore solo se tocca il colore blu.



La successiva scansione dello specchio viene limitata alla parte sinistra.

Dall'animazione si vede che il vettore risultante (quel vermetto multicolore che non è più una spirale di Cornu) cresce continuamente costruendo un vettore che ha un modulo significativo grazie al fatto che mantiene una direzione prevalente⁸.

Questo significa che la probabilità che un fotone con un dato λ raggiunga il rivelatore provenendo da una parte laterale dello specchio ha un valore non trascurabile.

⁸ QED pag. 67.

Se si cambia λ cambia la configurazione delle parti opache/riflettenti che corrisponde al fatto che il modulo è grande solo per una data configurazione geometrica di posizione della sorgente, del rivelatore e delle righe.

Questa è la situazione che si verifica con il reticolo di diffrazione infatti i segmenti che riflettono il fotone in modo che la fase finale sia contenuta in modo che la risultante sia importante sono diversi a seconda del valore di λ impostato prima di premere [tasto 4].

Si spiega così anche il **reticolo di diffrazione**.

L'iridescenza visibile sul CD deriva dal fatto che il reticolo è fisso con solchi concentrici equidistanti, la luce incidente è multicolore (pressoché bianca) e l'angolo di incidenza del punto di vista del sensore della macchina fotografica o dell'occhio risolve ad angolazioni diverse colori diversi⁹.

⁹ I coni della retina sono tanti sensori disposti in posizioni diverse e lo stesso è per le velle sensibili del sensore della macchina fotografica.