

Film sottile e luce

giocare con i cammini di Feynman

L'interferenza su una lamina trasparente sottile viene spiegata bene con la teoria ondulatoria.

Senza prendersi troppo sul serio ho voluto tradurre l'esperimento presentato nell'introduzione al libro "QED, la strana teoria della luce e della materia"¹ con una animazione realizzata con Scratch.

L'orologio di Feynman

Nel libro, Feynman immagina di associare ad un fotone un oggetto che si muove insieme ad esso e modifica nel frattempo la posizione angolare come fa la lancetta contasecondi di un orologio.

In questo progetto, questo orologio è un vettore ruotante di modulo costante pari a 0,2².

Per simulare il movimento si utilizza l'iterazione sia dello spostamento che della rotazione.

Ad ogni iterazione il fotone si sposta di Δs lungo una direzione e con esso l'orologio che ruota³ di $\Delta \theta$.

Non c'è un tempo vero e proprio ma una sequenza ordinata di momenti, o istantanee, che fotografano una singola iterazione. Un intervallo di tempo è dato da una iterazione; uso il termine "*tic*" per indicare l'intervallo di tempo fra due iterazioni successive, in pratica è l'unità di misura del tempo nella simulazione.

Se si vuole, l'intervallo di tempo fra due momenti diversi è dato dal conteggio delle iterazioni effettuate per passare dal momento iniziale a quello finale ovvero dal numero dei tic.

¹ Adelphi edizioni, collana "Gli Adelphi", num. 375 del 2010.

² Valore preso così com'è dal libro QED; il suo quadrato, 4%, corrisponde alla riflessione parziale del vetro ovvero alla quantità di luce che viene riflessa da una superficie di vetro rispetto a quella che viene ricevuta (p33).

³ Gli angoli di Scratch sono misurati in gradi ed hanno come verso positivo quello orario.

La rotazione unitaria Δf_{ase} dipende da una caratteristica dell'oggetto che chiamo λ che è lo spazio percorso per fare una rotazione intera, in pratica è la lunghezza d'onda dell'oggetto.

Se ad ogni iterazione lo spostamento del fotone è Δs allora la rotazione del versore ad ogni iterazione⁴ è:

$$\frac{\Delta f_{ase}}{\Delta s} = \frac{360}{\lambda}$$

Un valore basso di λ significa una rotazione più rapida del vettore a pari spostamento s .

Premessa

Per esaminare il fenomeno si dà per scontato che la luce viaggi in linea retta e che la riflessione avvenga secondo le regole dell'ottica geometrica.

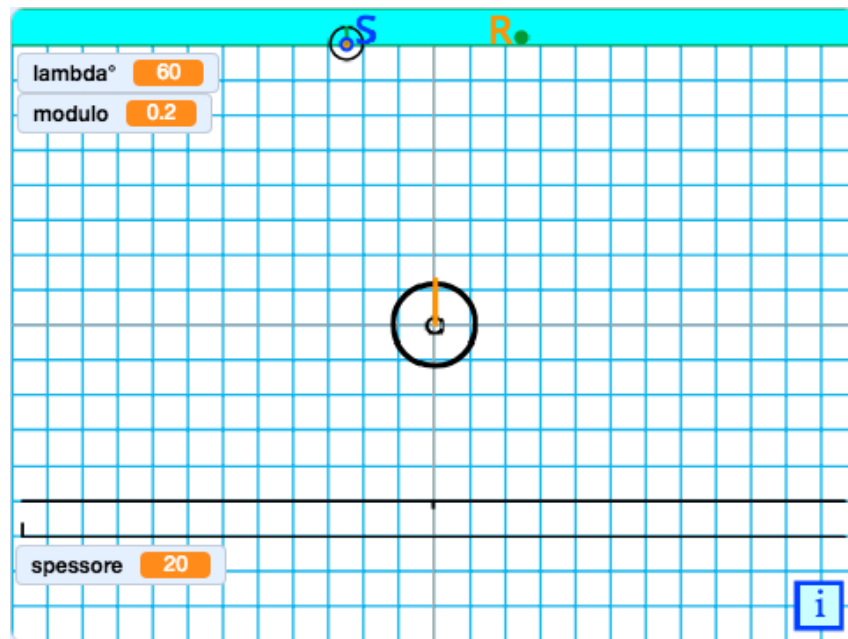
Nota. Viene dimostrato che è proprio così usando sempre il metodo di Feynman.

Quanto segue è contenuto nel progetto di Scratch "[QED lamina sottile](#)".

Impostazione di Scratch

In alto, alla stessa ordinata y , vengono posizionati lo sprite per la sorgente dei fotoni e lo sprite per il rivelatore in posizioni simmetriche rispetto a $x=0$.

⁴ Questa grandezza deve avere a che fare con il numero d'onda $2\pi/\lambda$.



Ad una certa distanza in basso viene posizionata la superficie riflettente superiore e, più in basso in base allo **spessore** scelto, viene posizionata la superficie riflettente inferiore.

Il fotone che interessa è quello che esce dalla sorgente diretto verso la parte centrale delle due superfici e che ritorna verso il rivelatore.

In $x=0$ vengono posizionati i due sprite che rappresentano i punti di riflessione della superficie superiore e della superficie inferiore, questo per rendere efficace il funzionamento di Scratch.

Questo fotone, viene rappresentato con un puntino arancione sul quale viene sovrapposto il vettore ruotante.

Alla partenza il fotone ha sempre fase zero, e compie un viaggio di riflessione sulla superficie superiore e poi un viaggio di riflessione sulla superficie inferiore.

Al termine di ciascuno dei due viaggi si costruisce un vettore di modulo 0,2 mentre la fase finale viene ricavata da quanto risulta al termine dei due viaggi.

Con i due vettori si fa la somma vettoriale per ottenere il modulo della risultante.

Lo sprite "vect monitor" appositamente creato, segue la rotazione del vettore ruotante associato al fotone e viene usato per costruire la somma vettoriale (ingrandita per rendere visibile il processo).

Il modulo così ricavato viene elevato al quadrato con il che si ha la probabilità di avere una riflessione per un dato spessore ed un dato lambda nella posizione del rivelatore.

Il valore viene registrato in una lista che permette poi di costruire dei grafici ottenuti variando λ oppure variando lo spessore.

Esperimenti

Impostazione

Il progetto prevede valori di default: $\lambda = 60$ e spessore = 20^5 .

Con **[tasto 1]** si vede il fotone avanzare lentamente lungo le direzioni delle due riflessioni accompagnato dal suo vettore associato.

Le pause sono state introdotte per motivi didattici.

In particolare si vede che sulla superficie superiore la riflessione avviene con una rotazione del vettore di 180 gradi.

Sulla stage si vedono anche la costruzione del vettore risultante, fatta dallo sprite “vect monitor”, ed il valore del modulo.

Con **[tasto 2]** viene ripetuta la stessa costruzione ma senza i ritardi dovuti alle pause.

Se si imposta la funzione turbo con **[bandierina verde]+[tasto shift]** si ottiene subito il modulo.

Con **[tasto L]** si può cambiare λ e con **[tasto S]** si può cambiare lo spessore della lamina.

Modificando i valori di λ e dello spessore si vede sia graficamente che in valore assoluto che il modulo della risultante e le fasi dipendono da entrambi i parametri.

Lambda costante

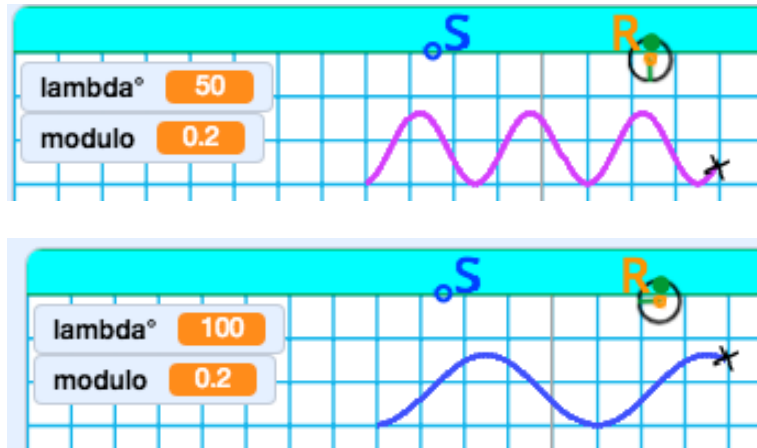
Con **[tasto 3]** si avvia un processo che calcola la probabilità di avere un fotone riflesso al variare dello spessore mantenendo costante λ .

Per 80 volte viene calcolato il modulo aumentando lo spessore di 1 ad ogni ripetizione del calcolo passando da 1 a 80.

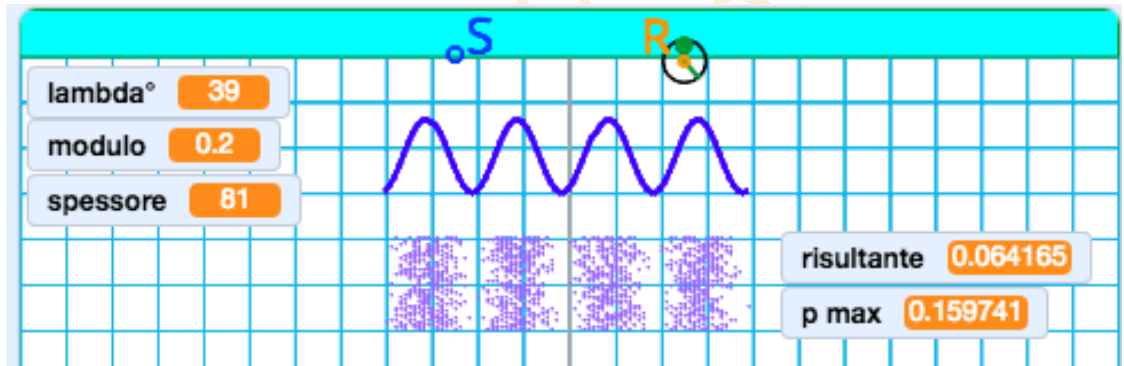
La probabilità di avere un fotone riflesso è proporzionale al quadrato del modulo della risultante; tale valore viene registrato in una lista al termine di ogni percorso di riflessione.

⁵ L'unità di misura delle lunghezze usate da Scratch è il passo che corrisponde ad un pixel in modalità editor.

Con **[tasto P]** si ottiene il grafico della distribuzione delle probabilità al variare dello spessore della lamina per un dato valore di λ .



Viene anche disegnata una nuvola di puntini viola per rappresentare la distribuzione delle probabilità:



Spessore costante

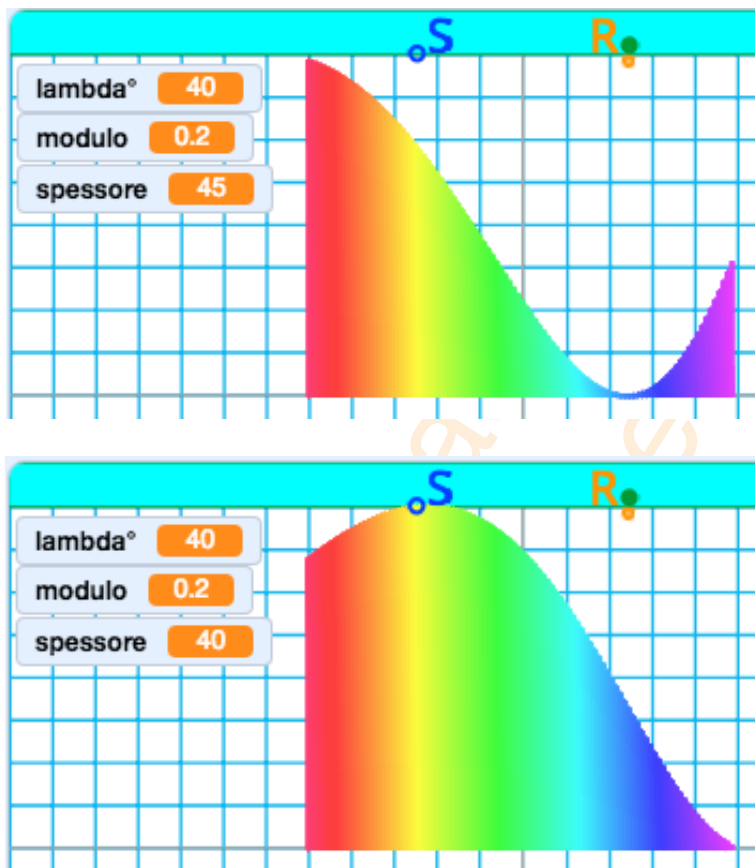
Con **[tasto 4]** si realizza un processo che calcola la probabilità di avere un fotone riflesso al variare di λ , cioè del colore, mantenendo costante lo spessore.

Per 100 volte si ripete il calcolo variando λ da 57,6 a 40 con una diminuzione di 0,176 per iterazione.

Questi valori sono stati scelti per rispettare il rapporto fra la lunghezza d'onda del rosso (625 nm) e la lunghezza d'onda del violetto (435 nm) ai limiti dello spettro visibile⁶ ... scelta arbitraria ma sensata e comunque è un gioco!

⁶ Wikipedia: https://it.wikipedia.org/wiki/Spettro_visibile

Con [tasto H] si ottiene la distribuzione delle probabilità di avere un dato colore dipendentemente dallo spessore della lamina.



Nota. I colori usati nella costruzione dell'istogramma tentano di riprodurre la gamma del visibile per dare la sensazione che a spessore diverso il colore prevalente riflesso è diverso.

È quello che accade nei film sottili delle bolle di sapone, con le macchie di olio sull'acqua, nell'arcobaleno, con le piume dei pavoni ...