Scheda “lenti”

Scheda di presentazione del progetto Scratch “QED 05: lenti”.

L’impostazione del progetto “QED 05: lenti” 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*** posto in un punto nei dintorni fa click se lo rileva[1].

Si vuole calcolare la probabilità che il rivelatore faccia un Click in seguito all’emissione di un fotone che colpisce una lente frapposta fra sorgente e rivelatore.

In questo articolo si vuole verificare se un mezzo che propaga la luce a velocità minore a quella del vuoto sia in grado di modificare la probabilità di rivelare il fotone.

Precisamente, si vuole seguire il suggerimento di Feynman di inviare fotoni al rivelatore da diverse posizioni della faccia superiore del vetro facendo in modo da mantenere costante la durata del tragitto agendo sullo spessore e sulla diversa velocità di propagazione.

In un mezzo omogeneo ci si aspetta che percorsi distanti dalla linea più breve che congiunge la sorgente con il rivelatore abbiano tanta meno probabilità di eccitare il rivelatore quanto più si allontanino dalla retta congiungente la sorgente e il rivelatore.

Questa ipotesi è stata saggiata con l’esperimento precedentemente illustrato nell’articolo “**QED 04: miraggi**” dove si rileva il fatto che i fotoni, la luce, viaggiano praticamente in linea retta.

Il progetto “**QED 05: lenti**” riprende l’esperimento proposto a pag 78: interporre fra la sorgente ed il rivelatore un mezzo che abbia la caratteristica di rallentare la propagazione dei fotoni, come il vetro o l’acqua, con una forma tale da rendere necessario lo stesso tempo per fare propagare la luce dalla sorgente al rivelatore sia che passi per la zona centrale sia che passi per le aree periferiche.

Una lente piano-convessa ha la forma che interessa: il percorso diretto, lungo l’asse centrale, è più breve rispetto a quelli laterali ma lo spessore più grande in centro rallenta per più tempo il suo attraversamento da parte dei fotoni.

---

[1] *QED pag. 57*

Il problema consiste nell'individuare la forma che deve assumere la faccia inferiore della lente per assicurare questo risultato.

Per condurre l'esperimento con i "cammini di Feynman" si devono produrre un insieme di tragitti che partano dalla sorgente ed "esplorino" una sottile fascia di percorsi vicini in modo da creare un po' di interferenza fra cammini per poter calcolare la probabilità necessaria a costruire la curva che serve per valutare l'effetto.

Il procedimento è stato utilizzato per la riflessione, le rifrazione e la trasmissione della luce in altri esperimenti di questo tipo già considerati in altri articoli (vedi **link**).

La sorgente ***S*** viene posta lontanissimo, nella parte alta dello stage; la sorgente è cosi lontana che i suoi raggi arrivano paralleli fra loro e perpendicolari alla faccia piana della lente.

Nella parte alta, a quota 100 dello stage di Scratch, c'è la faccia superiore della lente, mentre il rivelatore ***R*** sta sotto, a quota -160.

Si costruiscono diversi cammini composti da:

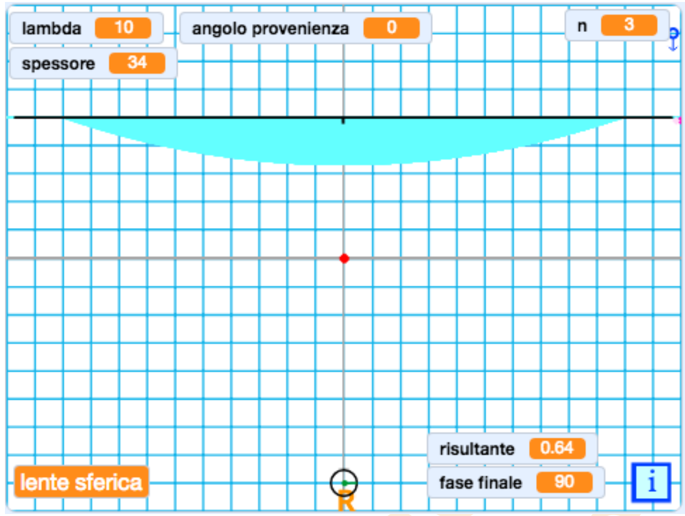
- un primo tratto uscente da ***S*** rivolto verso la superficie piana della lente,
- un secondo tratto che attraversa lo spessore variabile della lente, secondo una regola che viene decisa prima, ed
- infine un tratto per raggiungere il rivelatore ***R*** tenuto fisso in centro, in basso.

Per generare i diversi cammini paralleli, la sorgente viene fatta muovere da sinistra verso destra mentre ogni cammino viene percorso dalla sorgente verso la faccia superiore piana.

Quando il cammino interessa lo spessore della lente la velocità di traslazione del fotone viene ridotta in proporzione al parametro ***n*** che è il rapporto fra gli indici di rifrazione dei due mezzi.

La velocità di rotazione del vettore rimane invariata con la conseguenza che il rallentamento nel vetro modifica l'effetto sulla fase finale e, di conseguenza, la distribuzione delle probabilità.

Nell'esperimento si esagera un po' inserendo di default il valore 3 per il rapporto fra gli indici di rifrazione ... neanche i diamanti arrivano a tanto!



Vengono proposte sei forme differenti:

1) lente speciale “ad hoc”;
2) lente sferica;
3) lente parabolica;
4) lente ellittica;
5) lente iperbolica;
6) lastra piatta spessa.

Impostazione delle prove

All’avvio con bandierina verde vengono impostati i parametri di default:

- ***lambda*** = 10; cammino necessario per fare compiere un giro intero al vettore ruotante, è modificabile con **[tasto L]**;
- lo ***spessore*** iniziale viene posto a 34 passi all’avvio del progetto, altrimenti viene posto al valore che viene determinato dal calcolo della lente speciale il cui spessore deriva la sua costruzione; per modificare lo spessore si preme il **[tasto S]**;
- ***v0***, è la velocità del fotone in un mezzo “non denso” misurato in passi per ogni iterazione (Δs/tic) ed è posta di default a 0.5; si può modificare con **[tasto V]**;
- ***n***, il rapporto fra gli indici di rifrazione (o fra velocità nel mezzo “non denso” e quella nel mezzo “denso”), viene posto a 3 per esaltare gli effetti della diffrazione; si preme **[tasto R]** per modificare il rapporto ***n***;
- la superficie piana della lente viene posta a ***y = 100*** per avere a disposizione molto spazio dal lato del rivelatore;
- il rivelatore è fisso in centro a quota -160 passi;

- la sorgente, che si suppone lontanissima, viene posta a quota +160 e si muove da sinistra a destra per inviare raggi fra loro paralleli; si può cambiare la direzione di provenienza dei raggi con **[tasto A]** alternando fra 0° e -7°.
- la lente ha un diametro di 400 passi per non occupare tutto lo spazio a disposizione sullo stage e consentire così di osservare meglio l'effetto della sua presenza controllando cosa accade per i percorsi esterni ad essa.

Per tutte le prove si hanno a disposizione risultati che sono osservabili in questi modi:

- con **[tasto P]** viene disegnata la curva della probabilità che un fotone che passa per l'ascissa ***x*** della lente arrivi al rivelatore e con con **[tasto I]** l'istogramma corrispondente;
- con **[tasto O]** viene disegnata una possibile configurazione di puntini che rappresenterebbero l'impressione su pellicola fotografica di singoli fotoni che attraversano la lente e raggiungono il rivelatore;
- viene disegnata anche una linea spezzata che serve a individuare la direzione di provenienza dei fotoni in base all'impostazione geometrica data (utile quando si usa la direzione inclinata).

Nota. Il processo è lento, per vedere tutto più veloce inserire il "turbo" con ***[tasto shift] +bandierina verde****.*

La lente speciale

A proposito della forma che deve avere la lente, Feynman punta direttamente alle proprietà cinematiche e non tanto a quelle geometriche.

Feynman vuole una lente con una curvatura che renda i tempi di percorrenza uguali:

"Adesso divertiamoci un po' e proviamo a 'imbrogliare la luce', faccendoni modo che tutti i percorsi richiedano lo stesso tempo"[2].

Il 'giochino' viene realizzato con **[tasto 1]**.

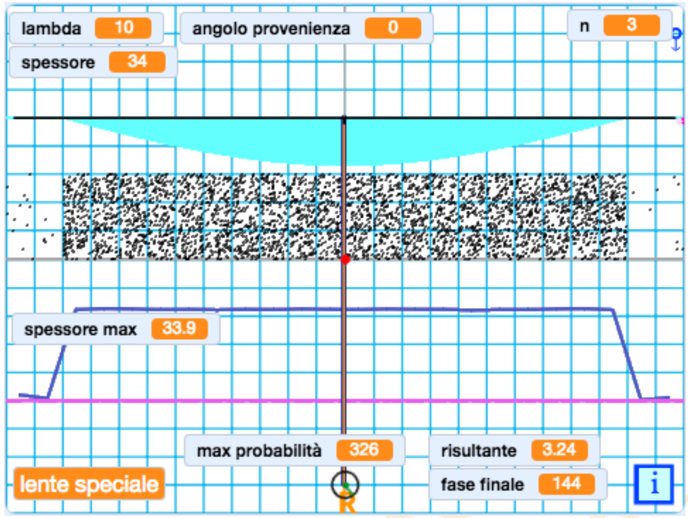
Come si vedrà per la ricostruzione delle altre lenti, anche qui viene calcolato il profilo che, però non ha una espressione algebrica di facile rappresentazione tale da permettere di ricavare lo spessore in funzione dell'ascissa.

Nota. Lo spessore viene ricavato con metodo numerico per cui la durata del calcolo del profilo della lente è più lunga.

Al termine, comunque, viene effettuato il processo di rilevamento della probabilità dei percorsi ed il risultato è il seguente:

---

[2] *QED, pag 78*



Si vedono:

- la curva delle probabilità che è piatta; significa che la probabilità di eccitare il rivelatore è uniforme per tutta la lente;
- i puntini neri mostrano la stessa distribuzione di probabilità.

La figura risponde pienamente a quanto richiesto: la probabilità è costante per ogni percorso che interessa la lente[3].

Validità

Questo esito vale per qualunque distanza fra lente e rivelatore purché la forma venga calcolata ogni volta "ad hoc".

Con ***n*** compreso fra 1,3 e 4 si ottiene sempre la stessa distribuzione piatta e questo accade anche spostando la faccia piana della lente nell'intervallo compreso fra -40 e 100.

La distribuzione non cambia nemmeno modificando la ***v0*** o ***lambda***, purché il profilo sia ricalcolato ogni volta con **[tasto 1]**.

La funzione di una lente con queste caratteristiche si rivela interessante se si scambiano di posizione la sorgente con il rivelatore: con una sorgente posta nella posizione del rivelatore che emette luce puntiforme si ha sopra la lente un fascio luminoso di intensità costante per tutta la sua estensione.

---

[3] *Leggere deviazioni dalla forma piatta sono spiegabili con errori di approssimazione nei calcoli. Basta aumentare lambda e la linea superiore viene piatta.*

Nota. Mentre Scratch procede con il calcolo, notare la composizione vettoriale di quella che dovrebbe essere la ***spirale di Cornu****: i tratti sono praticamente tutti allineati e costruiscono una risultante che coincide con la somma aritmetica.*

Finito?

La trattazione dell'argomento potrebbe finire qui, la regola proposta da Feynman nel libro citato, funziona.

Ma già che ci siamo e visto che sembra facile riprodurre l'esperimento per altri casi, si procede con lo studio di lenti con curvatura definita con le coniche.

Avvertenza*. Questo articolo non è un trattato sulle lenti. È un esercizio di applicazione delle regole di Feynman che permette di scoprire alcune caratteristiche della luce senza volersi addentrare nelle regole dell'ottica geometrica. Tra le molte cose da tenere presente c'è quella che non si fa nessun riferimento alle distanze focali. La geometria del sistema ottico (posizione della sorgente, del rivelatore e della lente) è fissata con il solo scopo di rendere visibili i processi relativi ai cammini di Feynman applicati sulle varie forme delle lenti. In certi casi il rivelatore si trova nei pressi del fuoco della lente, in altri no.*

Inoltre. Lo spessore inserito di default è già notevole in relazione alle distanze per cui andrebbero usate le regole delle lenti spesse … non è qui il caso di tenerne conto, stiamo solo esplorandola QED giocando con Scratch. Se si è interessati si può approfondire ***qui*** *o* ***qui****.*

Avvertenza Con l'esperimento della lente speciale viene anche aggiornato lo spessore della lente.

Profili lenticolari diversi

Premessa

Ho dovuto constatare che la forma della distribuzione delle probabilità dipende molto da ***lambda***, dalla ***v0*** ed addirittura dal computer[4] per cui i risultati che si ottengono da qui in poi non sono molto affidabili in termini di grafici della probabilità.

Le figure cha accompagnano la presentazione possono essere diverse da quelle che ciascuno potrà osservare sul proprio PC.

Quello che mi interessa rilevare è che forme diverse da quella speciale costruita "ad hoc" danno risultati diversi salvo la lente di profilo iperbolico che, malgrado modificazioni di parametri presenta sempre una curva di probabilità molto piatta.

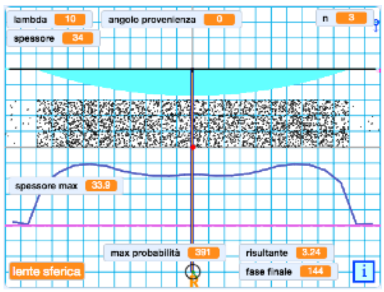
[4] *Accade con SO diversi e tra la versione offline e online. Ho anche usato mBlock e Mind+ con risultati ancora diversi.*

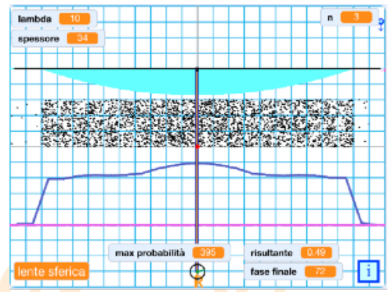
Lente sferica

Con **[tasto 2]** si costruisce una lente a calotta sferica di spessore e diametro fissati.

Lo spessore ed il diametro vengono utilizzati per calcolare il raggio della sfera e la posizione del suo centro ***Yc*** in modo da poter calcolare le ordinate del profilo inferiore.

L'esperimento produce risultati come questi[5]:





La curva di probabilità è "abbastanza" piatta ed illustra che il rivelatore anche in questo caso può "fare click" per qualunque posizione della lente per una sorgente lontana ma non così bene come avviene con la lente speciale di Feynman.

Lenti non sferiche

Lenti che non hanno una superficie ad andamento sferico sono chiamate "**asferiche**", queste lenti sono utilizzate per risolvere alcune particolari aberrazioni.

Qui non se ne parla.

A puro scopo illustrativo, un po' per completare il gioco intrapreso, si immagina di costruire lenti con superfici che derivano dalla rotazione delle curve coniche come la parabola, l'ellisse e l'iperbole[6].

Lente parabolica

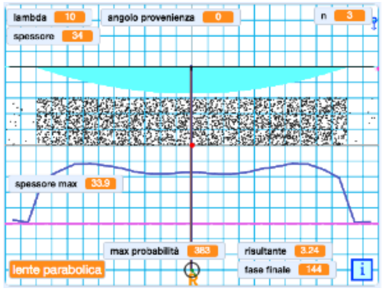
Con **[tasto 3]** si costruisce una lente con profilo parabolico.

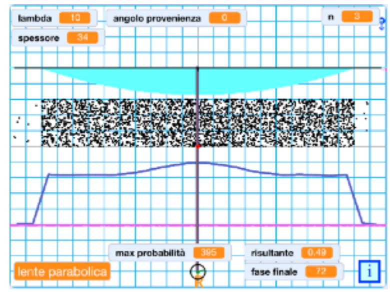
Lo spessore ed il diametro permettono di calcolare il parametro ***c*** di una parabola con asse coincidente con l'asse delle y che interseca l'asse delle x nei punti -200 e +200 e vertice in ***-c***. con risultati come questi:

---

[5] *Quello di sinistra è stato ottenuto con iMac del 2011 e quello di destra con MacBook pro del 2017.*

[6] *Non sono sicuro che ci siano applicazioni pratiche; tutti gli articoli Scientifici o tecnici che ho trovato sul WEB si occupano prevalentemente di lenti sferiche con qualche cenno alle lenti asferiche.*

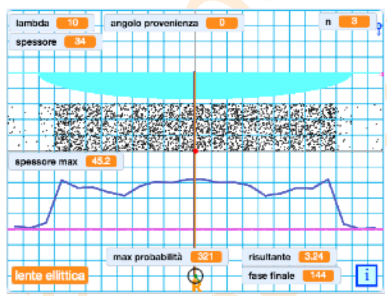




La curva illustra che anche questo tipo di lente produce una distribuzione quasi uniforme della probabilità di eccitare il rivelatore qualunque sia il punto toccato dal fotone.

Lente ellittica

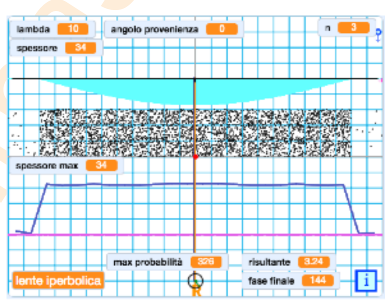
Con **[tasto 4]** si costruisce una lente con profilo ellittico con un risultato di questo tipo:



La curva è abbastanza distante da una curva piatta, come si vede si comporta peggio della lente sferica.

Lente iperbolica

Con **[tasto 5]** si costruisce una lente con profilo iperbolico con il seguente risultato:



La curva è ottima: sarà fortuna?[7].

Questo tipo di profilo è stato illustrato con un'animazione realizzata **con Geogebra**.

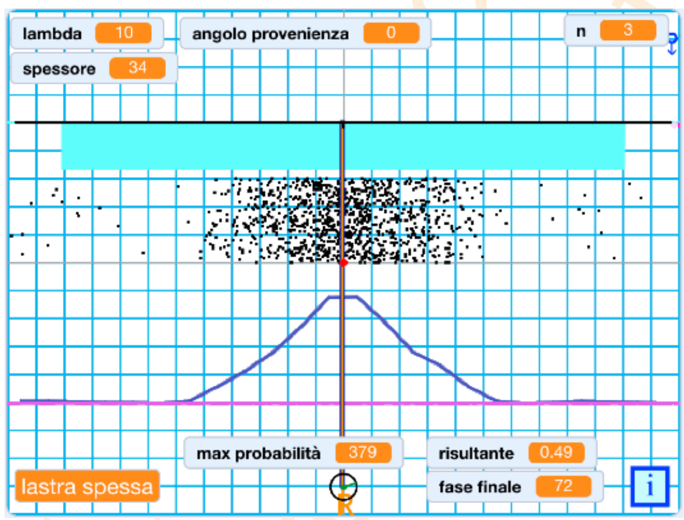
Suggerimenti

Per ciascuna delle lenti esaminate si potrebbe indagare cosa accade inserendo con **[tasto S]** uno spessore diverso per vedere se si riesce ad approssimare la lente speciale.

Lastra di vetro spessa

Con **[tasto 6]** viene ricavato il profilo delle probabilità di una lastra di vetro a facce parallele al solo scopo di permettere un confronto.

Il risultato è il seguente:



Il rivelatore è interessato dai fotoni che giungono prevalentemente dalla direzione della sorgente; le estremità della lastra non forniscono cammini utili al rilevamdento.

Il risultato è simile a quello ottenuto con l'esperimento "**QED 04: miraggi**" e supporta l'ipotesi che i fotoni viaggino sostanzialmente in linea retta[8].

Direzione inclinata.

Con **[tasto A]** è possibile commutare tra direzione verticale (0°), quella fin qui utilizzata, e direzione -7° per vedere cosa cambia.

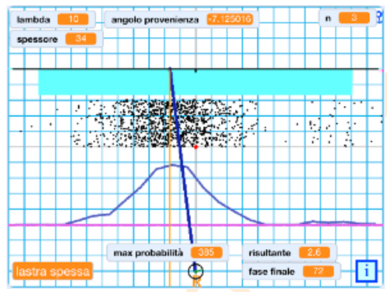
[7] *Non so se sia un caso fortunato in quanto non conosco le regole delle lenti iperboliche. La lente iperbolica è comunque usata per ottenere proprio questo risultato.*

[8] *Nella QED Feynman suggerisce di non usare termini come "esattamente" o "solamente".*

L'inclinazione dei raggi comporta una fase diversa per il vettore associato a seconda del punto di incidenza sulla superficie piana della lente; questo effetto è stato realizzato spostando la sorgente lungo una linea inclinata; la differente lunghezza del percorso nella parte superiore dei cammini dovrebbe simulare la fase diversa[9].

Lastra

Con la lastra a superfici piane parallele si ottiene la seguente immagine:



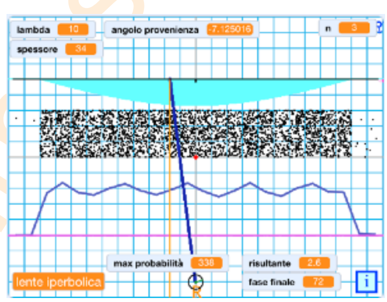
La linea blu è inclinata di -7° circa e va ad intersecare la superficie piana della lente proprio nel punto di massima probabilità o massima densità dei puntini.

Si può affermare che il punto di massima probabilità è proprio nella direzione della sorgente.

Impostando una direzione inclinata con le lenti a faccia inferiore curva si osservano grandi differenze di omogeneità e comportamento.

Lente iperbolica.

Per esempio, con la lente iperbolica ed una inclinazione dei raggi di -7° circa, il grafico delle probabilità è:



[9] *Quelli che si vedono non sono raggi ma cammini di Feynman che non necessariamente coincidono con i raggi. Unico requisito richiesto per i cammini è quello di essere distribuiti bene in modo da non privilegiarne particolari per non introdurre errori sul calcolo delle probabilità.*

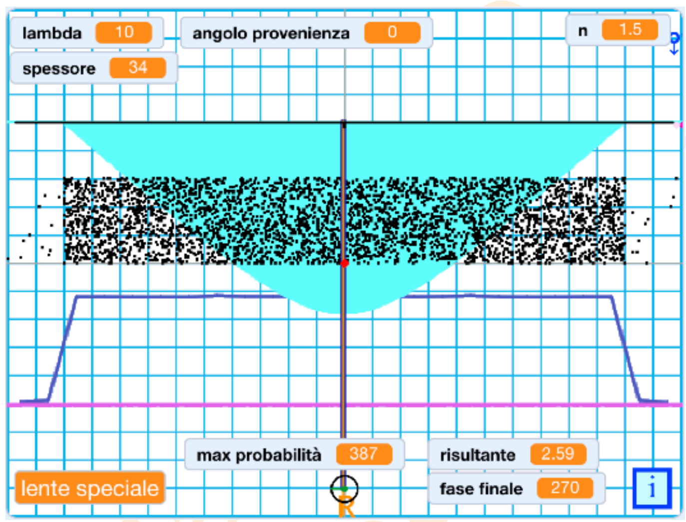
La distribuzione di probabilità appare chiaramente disomogenea anche se la nuvola di puntini sembra non manifestarlo.

Per altre lenti accade pressappoco la stessa cosa. Non resta che provare.

Il rapporto "n"

Il rapporto ***n*** fra i coefficienti di rifrazione influisce sullo spessore delle lenti.

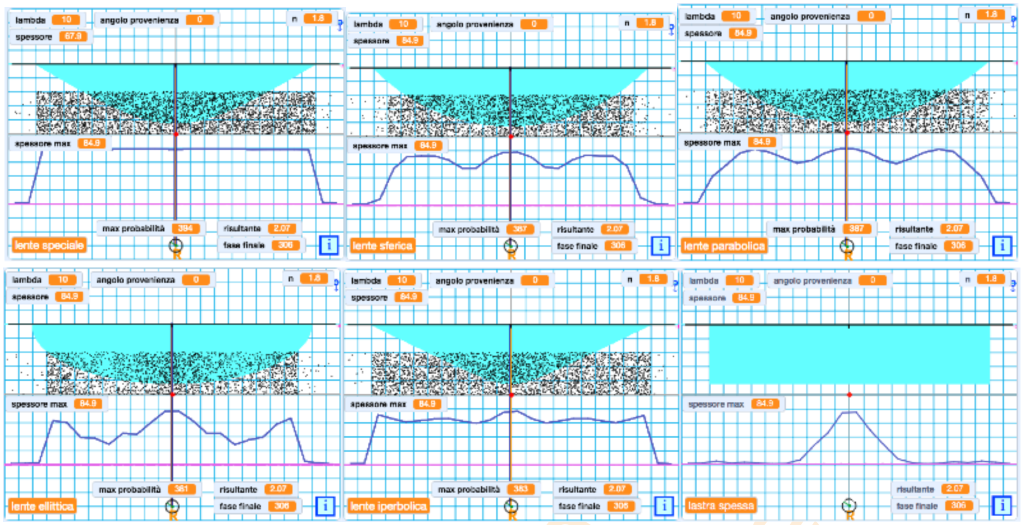
Se con **[tasto R]** si pone n = 1,5 e si cerca il profilo della lente speciale, l'unico che non prevede la definizione dello spessore a priori, si ottiene questo risultato:



Per gli altri profili si tratta solo di andare per tentativi a cercare la soluzione migliore; non è detto che il miglior risultato si verifichi con lo stesso spessore.

Con n = 1,8

si hanno questi risultati:


lambda 10
angolo provenienza 0
n 1.8
spessore 67.9
spessore max 84.9
max probabilità 394
risultante 2.07
fase finale 306
lente speciale
lambda 10
angolo provenienza 0
n 1.8
spessore 84.9
spessore max 84.9
max probabilità 387
risultante 2.07
fase finale 306
lente sferica
lambda 10
angolo provenienza 0
n 1.8
spessore 84.9
spessore max 84.9
max probabilità 387
risultante 2.07
fase finale 306
lente parabolica
lambda 10
angolo provenienza 0
n 1.8
spessore 84.9
spessore max 84.9
max probabilità 381
risultante 2.07
fase finale 306
lente ellittica
lambda 10
angolo provenienza 0
n 1.8
spessore 84.9
spessore max 84.9
max probabilità 383
risultante 2.07
fase finale 306
lente iperbolica
lambda 10
angolo provenienza 0
n 1.8
spessore 84.9
spessore max 84.9
risultante 2.07
fase finale 306
lastra spessa

Appunti sulla costruzione dei profili

Generalità

Il profilo della lente viene disegnato dallo sprite “laboratorio ottico” che calcola la coordinata ***y*** della faccia inferiore della lente piano-convessa al variare della posizione ***x***.

I valori trovati vengono registrati in una lista che sarà poi utilizzata per definire il tratto di cammino entro la lente.

Viene quindi calcolata la probabilità di rivelare fotoni provenienti dalla parte superiore che investono perpendicolarmente la faccia piana utilizzando i cammini di Feynman:

- alla partenza il vettore associato al fotone ha fase nulla;
- ad ogni iterazione di calcolo la fase ruota di una certa quantità[10];
- per ogni ascissa x il cammino arriva verticale sulla faccia piana della lente, il primo tratto viene percorso con velocità ***v0***;
- durante l’attraversamento della lente, il cammino viene rallentato di ***n*** volte riducendo della stessa quantità l’avanzamento effettuato ad ogni iterazione;
- uscito dalla lente, il cammino viene percorso alla sua velocità base ***v0*** e viene diretto verso il rivelatore;
- con un fascio di 20 cammini si recupera la risultante della poligonale di Cornu utile per calcolare la probabilità di percorrere quel gruppo di cammini.

Al termine, con **[tasto P]** si disegna la curva che rappresenta la probabilità che una data porzione di lente invii fotoni al rivelatore o con con **[tasto I]** si disegna l’istogramma corrispondente.

Con **[tasto O]** si disegna la “nuvola” di puntini per rappresentare diversamente la distribuzione di probabilità; viene anche disegnata la retta che corrisponde alla direzione dei raggi “visti” dal rivelatore per consentire un controllo eventuale della direzione tramite il risultato.

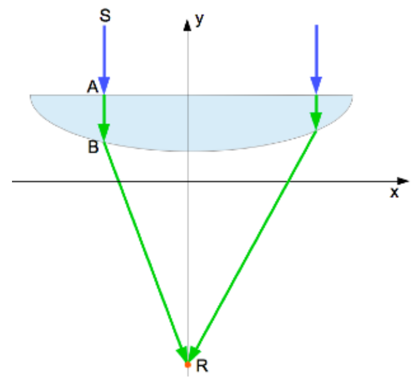
Lente speciale

Due parole sulla realizzazione della lente speciale.

Si deve fare in modo che per ogni cammino che proviene dalla sorgente, il tempo impiegato per percorrere il tratto che attraversa la lente più il tratto che dalla lente va al

[10] *Un’iterazione è una unità di tempo in tic.*

rivelatore (frecce verdi) sia lo stesso indipendentemente dal punto di incidenza A del fotone sulla lente.



Il punto di incidenza è caratterizzato dalla sua ascissa ***x*** per cui si calcola ***yB*** affinché ad ogni ***x*** della lente la somma dei tempi di percorrenza sia costante:

$$t_{SA} + t_{AB} + t_{BR} = cost$$

Per raggi che arrivano dalla direzione 0° il tempo da S ad A è uguale per tutti i cammini per cui non viene tenuto in conto l'effetto della parte al di sopra della faccia piana così ci si può limitare ad assicurare che:

$$t_{AB} + t_{BR} = cost$$

Quando il percorso interessa la lente, la velocità è ridotta di ***n*** volte dove ***n*** è il rapporto fra gli **indici di rifrazione** dei due mezzi (per esempio aria e vetro):

$$n = \frac{v_a}{v_v}.$$

Questo fatto consente di realizzare la condizione di cui sopra in quanto percorsi più lunghi in aria verrebbero compensati da percorsi più brevi nel vetro.

Si tratta di calcolare l'espressione del profilo ***y(x)*** che dia lo spessore data la coordinata ***x***.

L'espressione algebrica da ricavare parte dal calcolo della durata del cammino AR che dipende dallo spessore, dalla velocità e dall'ascissa x:

$$t_{AR}(x, sp) = \frac{\overline{AB}}{v_v} + \frac{\overline{BR}}{v_a}$$

dove:

- v_v è la velocità della luce nel vetro e v_a la velocità della luce nell'aria;
- la lunghezza del segmento AB è lo spessore ed è la grandezza da trovare per avere l'ordinata $y_B(x)$;

- la lunghezza del segmento BR è l'ipotenusa di un triangolo rettangolo;

L'espressione che ne risulta è:

$$t_{AR}(x, y_B) = \frac{y_B - y_A}{v_v} + \frac{\sqrt{(y_R - y_B)^2 + x^2}}{v_a} =$$
$$= \frac{1}{v_a}[(y_A - y_B) * n + \sqrt{(y_B - y_R)^2 + x^2}]$$

dove:

- le lunghezze dei segmenti devono essere valori positivi;
- le estremità della lente di diametro 400 passi sono in x = ± 200;
- l'ordinata ***y*** di A è quella della superficie piana della lente (y = 100);
- la differenza y_B-y_A in valore assoluto è lo spessore;
- l'ordinata del rivelatore è posta a y = -160;
- la velocità ***v0*** nell'aria è 0,5 passi/tic[11].

Poiché trovo difficile invertire analiticamente l'espressione per ricavare y_B dato ***x***, ho preferito utilizzare un metodo numerico per il calcolo di $y_B(x)$ cercando per tentativi il valore di y_B che per un dato ***x*** soddisfi al meglio la condizione:

$$t_{AR}(x) = cost$$

Per trovare il valore della costante si stabilisce che all'estremità della lente il cammino nel vetro sia nullo (la lente inizia e finisce a 'punta') per cui per x= -200 si ha y_A=y_B e l'espressione si riduce a:

$$t_{AR}(-200, y_A) = \frac{1}{v_a}\sqrt{260^2 + 100^2} \simeq 656\ tic$$

Il valore ottenuto è la costante da usare per risolvere il problema.

Fissato questo, si cerca il valore di y_B per ogni ascissa di ***x*** cha va da -200 a +200 applicando l'espressione di cui sopra inserendo in essa valori di y_B via via crescenti a partire da -160[12].

Si tratta di chiedersi quale sia la curva ***y(x)*** che rappresenta la funzione

---

[11] *I passi sono l'unità di misura delle lunghezze sullo stage e il tic è l'unità di tempo corrispondente ad una iterazione di calcolo.*

[12] *-160 è l'ordinata del rivelatore in quanto si spera che la lente non lo inglobi, ne qual caso non esisterebbe soluzione.*

$$t_{AR}(x, y_B) = cost\ = t_{AR}(-200)$$

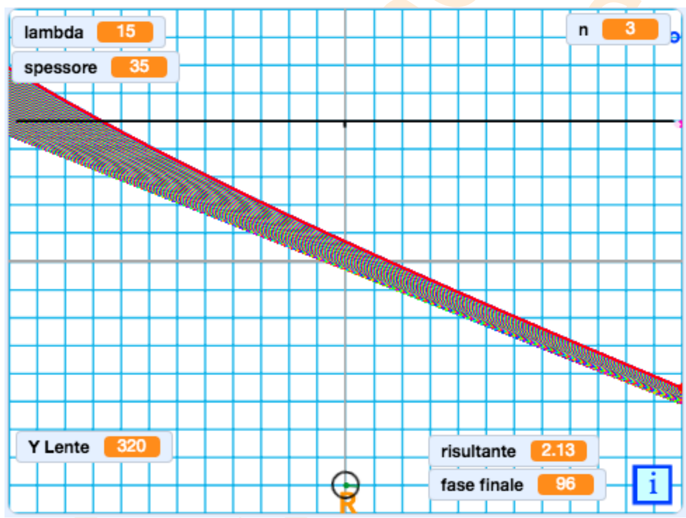
o, anche, trovare ***y(x)*** che annulla la differenza

$$t_{AR}(x, y_B) - t_{AR}(-200) = 0$$

Prima di tutto bisogna vedere se esiste una soluzione, cioè se esiste un valore di ***x*** che annulli la suddetta differenza.

Per questo motivo viene disegnata una famiglia di curve: ad ogni ***x*** si introduce un valore di ***y*** che varia da -240 a + 240[13] e si vede se il valore di ***y*** cambia di segno.

Con **[tasto G]** si disegna la suddetta famiglia di curve che mostrano il valore della differenza al variare di ***Y Lente*** da -160 a 100 usando come parametro tutti i valori di ***x*** compresi fra -240 e 240:



Nella gamma di valori di ***x*** che interessano l'esperimento, l'espressione della differenza è una funzione decrescente che passa da valori positivi a valori negativi al variare di ***Y Lente*** compreso fra la posizione del rivelatore e la faccia piana della lente.

In altri termini, se si aumenta ***y*** a partire da YR = -160 si vede che t_{AR} decresce e ad un certo punto la differenza vista sopra diventa negativa: **la soluzione esiste**.

[13] *Estremi assunti come massima dimensione della lente e per sfruttare tutto lo stage nella ricerca della soluzione.*

Si assume per ***Y Lente*** il valore che effettua il cambio di segno, il valore così individuato è l'ordinata del profilo della lente e viene registrato nella lista per essere utilizzato nella scansione della lente.

Lenti con le "coniche"

Per le lenti sferiche e quelle asferiche si tratta di disegnare un profilo derivato dalle espressioni delle coniche con il vincolo di passare per i punti (-200,100) e (200,100) (che sono gli estremi della lente dove lo spessore è zero) ed il punto (0,spessore della lente).

Il profilo è simmetrico rispetto all'asse y per tutte le lenti, il punto più basso è quello del massimo spessore che viene dato come parametro quando è stato effettuato il calcolo conta lente speciale oppure quando è stato assegnato con **[tasto S]**.

Nel calcolo della lente speciale lo spessore deriva dal parametro ***n*** (che di default è 3) e vale 33,9 passi; per assicurare un minimo di confrontabilità fra le curve di probabilità questo è il valore dello spessore assegnato di default per tutti i profili conici.

La costruzione del profilo viene di volta in volta realizzata calcolando i parametri delle rispettive curve secondo le regole della geometria analitica.