

# Molti cammini di Feynman

## Utilizzare il progetto

Il progetto di **molti cammini** viene attivato come al solito con **[bandierina verde]**.

È ancora possibile attivare un singolo cammino con **[tasto U]**, spostare con il mouse la sorgente e il rivelatore, spostare il rivelatore con i tasti freccia, osservare la fase finale che cambia al modificarsi del percorso.

In questo progetto è anche possibile modificare  $\lambda$  e  $\Delta x$  prima di avviare il cammino in modo da vedere come si modificano la fase finale e il numero dei passi necessari al completamento del cammino.

In modalità **normale** si osserva il fasore che incrementa l'angolo con l'avanzamento del fotone.

In modalità **turbo**<sup>1</sup> si perde l'animazione ma si raggiunge rapidamente il risultato della fase finale.

Con **[tasto Z]** si rallenta la modalità turbo.

## Un cammino

In questo progetto il cammino è un segmento rettilineo che viene percorso dallo sprite “fotone”<sup>2</sup> a cui è associato uno sprite “fasore” che ruota mentre il fotone avanza.

Al termine del cammino si ha come risultato al fase finale compresa fra 0 e 360°.

La fase finale si vede grazie al vettore rotante posizionato sulla destra dello stage che lascia un'impronta ogni volta che viene concluso un cammino.

## Seguire un cammino passo passo

Si può mettere in pausa il moto del fotone lungo il cammino con **[tasto P]** e riavviarlo premendo di nuovo **[tasto P]** oppure, una volta messo in pausa farlo procedere a passo singolo con **[tasto S]**.

---

<sup>1</sup> Lo scambio fra modalità normale e modalità turbo avviene premendo il tasto maiuscole mentre si fa click sulla bandierina verde.

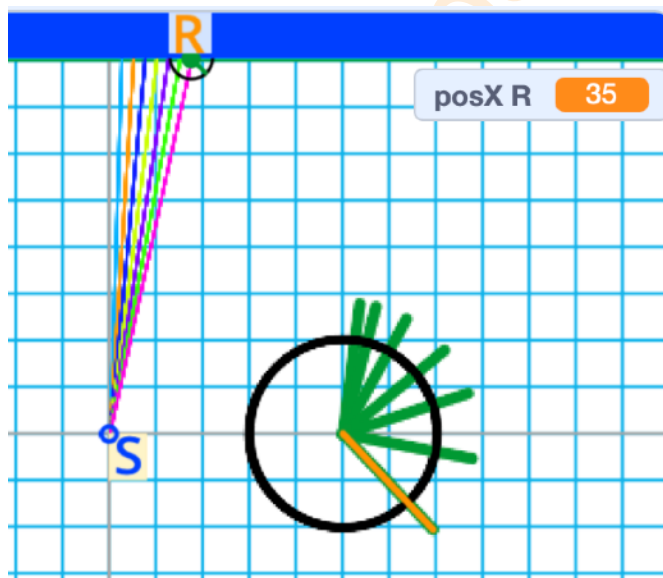
<sup>2</sup> Nome di comodo che non necessariamente deve rappresentare cosa faccia un fotone anche perché dove si trovi nel tratto compreso fra la sorgente e il rivelatore non lo sa nessuno ammesso che ci sia qualcosa da scovare.

In questo modo si possono osservare i valori che le variabili assumono mano mano che il fotone avanza di  $\Delta x$  lungo un cammino.

### Attivare più cammini consecutivi automaticamente

Senza premere [bandierina verde], per non dover iniziare daccapo cancellando tutto, si può percorrere più di un cammino per vedere che la direzione finale cambia al variare del cammino.

Un esempio tipico è rappresentato dalla possibilità di spostare il rivelatore per vedere che ogni cammino produce una fase finale che cresce più o meno rapidamente a seconda della posizione del rivelatore rispetto alla sorgente e l'effetto è visualizzato dalla sovrapposizione delle impronte di più vettori rotanti:



La posizione del rivelatore può essere impostata con [tasto R] per poi usare [tasto U] per avviare il cammino corrispondente.

Il cammino può essere automaticamente avviato se il rivelatore viene spostato nei seguenti modi:

- di un passo alla volta con i tasti freccia sx/dx.
- di 10 passi alla volta con i tasti freccia su/giù,
- facendo click sulla barra blu del bersaglio poco alla destra o alla sinistra del rivelatore per spostarlo nella stessa direzione di un passo;
- facendo click agli estremi della barra blu per spostarlo di 5 passi.

Per ulteriori esperimenti, si può anche spostare la sorgente trascinandolo con il mouse e ripetere una nuova successione di cammini.

Se si usa il trascinamento, è necessario registrarne le posizioni facendo click sopra lo sprite.

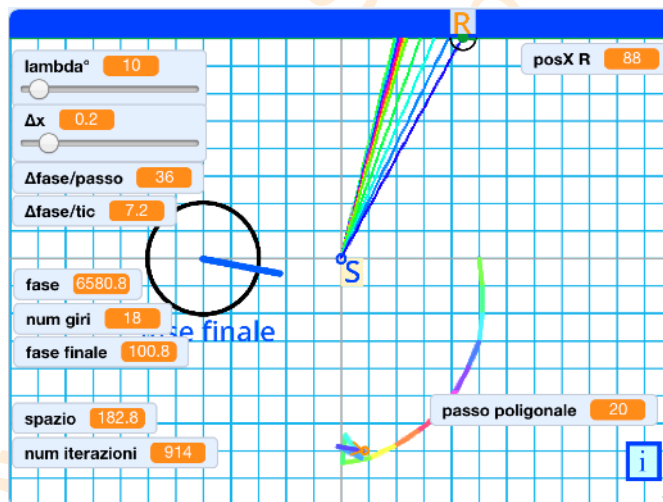
*Attenzione. Il parametro  $\Delta\text{fase}/\text{passo}$ , che di default vale  $7,2^\circ/\text{passo}$  rappresenta il limite della risoluzione dello strumento che approssimerà il calcolo della fase finale sempre ad un numero intero di volte tale valore.*

## La poligonale

Con una successione di cammini si può costruire una poligonale di vettori che serve per calcolare il modulo finale della scansione; tale valore è utile per indagare sul comportamento di un oggetto quantistico col metodo dei cammini di Feynman attraverso la costruzione di un grafico di distribuzione delle probabilità.

Attraverso questa operazione si può osservare come il modulo della risultante possa essere incrementato o decrementato con l'accumulo dei risultati di vari cammini.

Per ottenere questa opzione si preme **[tasto F]** prima di avviare cammini.



Fatto questo si vede sulla destra un vettore che avanza di un certo numero di passi nella direzione data dalla fase finale del cammino.

Lo spostamento dello sprite lascia una traccia che è la componente del vettore da usare per costruire la poligonale.

Con più cammini consecutivi si ha la possibilità di calcolare la risultante graficamente oppure con **[tasto D]**.

Per avere una grafica osservabile, lo spostamento dello sprite è amplificato di una quantità pari al *passo poligonale*.<sup>3</sup>

## Esperimento

Impostare una posizione qualunque del rivelatore e premere **[tasto U]**.

Modificare la posizione del rivelatore di un passo con **[freccia dx]** e ripetere più volte per vedere il disegno della poligonale.

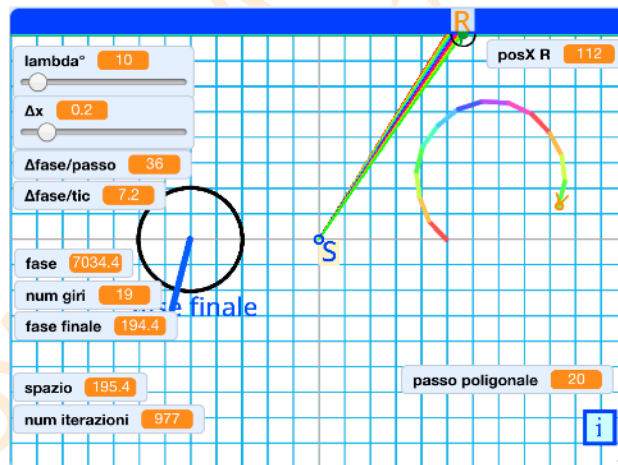
Con il rivelatore prossimo all'ascissa x della sorgente la differenza di fase finale fra componenti successive è minima; con il rivelatore distante dall'ascissa x ella sorgente la differenza di fase finale aumenta.

Notare che il minimo di differenza di fase si trova quando il rivelatore si trova intorno alla stessa ascissa della sorgente.

Con **[tasto M]** vengono mostrate anche le variabili connesse con il fasore.

I valori presentati permettono di fare il calcolo dell'ampiezza finale del vettore risultante.

L'esempio che segue costruisce il poligono vettoriale per posizioni del rivelatore che vanno da 100 a 112.



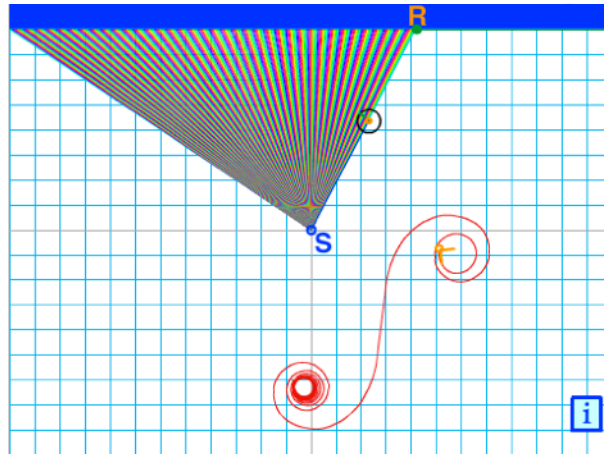
Con **[tasto N]** si nascondono le variabili.

---

<sup>3</sup>La lunghezza del segmento risultante misurata sullo stage risulterà maggiorata di altrettante volte.

## Scansioni complete

Si possono realizzare scansioni complete dello schermo con diverse modalità e contemporaneamente disegnare la poligonale<sup>4</sup> di vettori di modulo costante unitario e con direzione pari alla fase finale per poter ricavare alla fine il vettore risultante ottenendo il seguente risultato grafico:



La curva che si ottiene è una doppia spirale detta anche spirale di Eulero o di Cornu o Clotoide.

Si tratta di una spirale a variazione costante di curvatura.

Con **[tasto C]** si disegna una spirale di Cornu o Clotoide tramite un algoritmo che produce una variazione costante di curvatura con un passo di avanzamento costante dello sprite.

Con **[tasto 1]** si realizza una scansione completa dello schermo per tutte le ascisse da -240 a +240 con una animazione e dei suoni inseriti per cogliere le fasi di realizzazione del percorso e di costruzione della poligonale.

Con **[tasto 2]** si produce la stessa scansione ma senza suoni.

Con **[tasto 3]** si ha la stessa ricostruzione ottenuta con **[tasto 2]** ma senza ritardi.

Con **[tasto 4]** si può realizzare una scansione parziale scegliendo la posizione iniziale del rivelatore ed arrestando a piacere la scansione con **[tasto spazio]**. È così possibile osservare come brevi scansioni eseguite in posizioni diverse dello schermo producano vettori risultanti di modulo molto diverso.

---

<sup>4</sup> La poligonale viene disegnata con ampiezza amplificata dei vettori affinché sia ben visibile.

La poligonale viene disegnata con ingrandimento sufficiente da renderla facilmente osservabile dato dalla variabile “*passo poligonale*”.

Con [tasto D] viene calcolato il modulo della risultante<sup>5</sup> e viene disegnato il vettore risultante amplificato.

## La liste

Al termine di ogni cammino, il valore della rotazione totale viene registrato nella lista “*lista rotazione totale*” ed il valore della fase finale viene registrato nella lista “*lista fase finale*”.

Le liste diventano visibili con [tasto L].

Le liste possono servire per ricostruire a posteriori il vettore finale.

Le liste si possono nascondere con [tasto N] insieme a tutte le variabili.

Con [tasto 8] viene disegnata la curva della rotazione angolare totale e con [tasto 9] viene disegnata la curva della fase finale che ha valori compresi fra 0 e 360.

## Ipotesi di sviluppo

La scansione dello schermo appena effettuata viene realizzata con una sorgente fissa dalla quale parte un singolo cammino per ciascuno dei punti dello schermo.

Impostata in questo modo la scansione dello schermo produce molti cammini ma non è utile per individuare la probabilità di trovare un fotone in un singolo punto.

La probabilità di trovare un fotone in un dato punto dello schermo, dove si trova il rivelatore, deriva dallo studio di innumerevoli cammini che convergono in quello stesso punto confrontato con gli altri punti dello schermo.

Il passo successivo nella costruzione dello strumento consiste nel costruire una scansione dello schermo con una pluralità di cammini contigui per ciascun punto dello schermo che partano da una sorgente e che puntino sullo stessa posizione del rivelatore.

In sostanza occorrono due scansioni:

- lo schermo deve essere scansionato per intero e
- per ogni punto dello schermo la sorgente deve produrre una pluralità di cammini contigui per poter calcolare la probabilità che un dato punto dello schermo possa ricevere un fotone.

I cammini contigui saranno costruiti apposta per verificare alcune leggi di ottica note.

---

<sup>5</sup> Il valore della risultante è calcolato sommando vettori di lunghezza unitaria.

Giovanni Mastropaolo  
[www.mastropaolo.net](http://www.mastropaolo.net)

# Impostazioni del progetto

## Lo schermo

In alto una fascia blu rappresenta lo schermo o bersaglio incontrando il quale i fotoni terminano l'esistenza.

## L'avanzamento lungo il cammino

Tutti i movimenti del fotone dalla sorgente al rivelatore sono generati per iterazione di uno spostamento di valore costante.

Mentre il fotone avanza, il fasore associato ruota.

Ogni iterazione rappresenta una unità di tempo (che chiamo arbitrariamente "tic").

Ad ogni iterazione il fotone avanza di una quantità  $\Delta x$  e ruota di una quantità  $\Delta \text{fase}$ ; sono di fatto delle velocità.

$\Delta x$  è l'avanzamento minimo in passi che viene imposto al vettore ad ogni iterazione.

$\lambda$  (*lambda*) è una caratteristica del fotone e corrisponde alla sua lunghezza d'onda; dopo un giro intero del fasore, il fotone è avanzato di una quantità pari a *lambda*.

Aumentare il valore di  $\Delta x$  significa aumentare l'incremento della fase che si produce ad ogni iterazione di calcolo

$$\Delta \text{fase} = \frac{\Delta x}{\lambda} * 360$$

Mentre la variabile  $\Delta \text{fase}$  fornisce l'incremento angolare ad ogni iterazione, la variabile  $\Delta \text{fase/pass}$  fornisce l'incremento della fase ad ogni avanzamento di un passo sullo stage.

*Nota. Con  $\Delta x$  più grande, l'errore nel calcolo della fase finale aumenta per scarsa definizione ma la durata del cammino diminuisce. Aumentare il valore di *lambda* produce l'effetto opposto.*

## La fase finale

Quando ha raggiunto il bersaglio, il fotone smette di esistere.

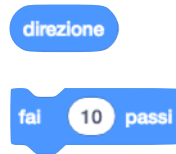
Grazie al falso re si rilevano:

- la fase finale che si ricava con *resto di (fase/360)*;
- il numero totale dei giri "*num giri*" compiuti *intero inferiore di (fase/360)*.

## Lo sprite “vettore”

Lo sprite “vettore” ruota come il fasore associato al fotone e con esso si esegue la somma vettoriale approfittando delle proprietà di spostamento polare disponibile con Scratch.

Ogni sprite su Scratch ha un proprio orientamento definito dalla proprietà “*direzione*” e può essere spostato nella suddetta direzione utilizzando il comando “*fai \_\_ passi*”:



La direzione utilizzata è proprio quella assunta dal vettore al termine del cammino.

## Lo sprite “risultante”

Il calcolo del modulo della risultante viene realizzato utilizzando una proprietà di Scratch che permette di ottenere la distanza fra i centri di due sprite con il comando:



Questo comando è posto nello sprite “risultante”.

Lo sprite “risultante” viene posizionato alla posizione iniziale dello sprite “vettore” dove c’è l’origine della poligonale.

Quando il vettore è al termine del disegno della poligonale, la distanza tra i due sprite è la risultante amplificata del fattore “*passo poligonale*”.

## Lo “sprite spirale”

La spirale di Cornu (vedi [progetto](#)) viene disegnata con lo sprite che avanza ad ogni iterazione di un passo costante e con angolo crescente dato da una variazione costante di curvatura:

