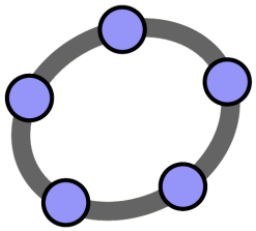
Simulazioni GeoGebra per l'approccio di Feynman della somma sui cammini



Massimiliano Malgieri, Università di Pavia

Pasquale Onorato, Università di Trento

Anna De Ambrosis, Università di Pavia

massimiliano.malgieri01@universitadipavia.it

103° CONGRESSO NAZIONALE
della SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA
Trento, 11-15 settembre 2017

Piano Lauree Scientifiche
In collaborazione con MIUR, con.Scienze, Confindustria

Linee generali del percorso

- Il percorso mira a superare l'approccio pseudo-storico adottato dalla gran parte dei libri di testo e a mettere a fuoco aspetti concettuali della fisica quantistica che possano rimanere parte del patrimonio culturale dello studente.

- L'approccio di Feynman consente di individuare una proprietà generale dei sistemi quantistici nella regola con cui si calcola la probabilità di un evento che può avvenire attraverso due o più "canali" (cammini, ma anche più in generale processi fisici) A, B, C... tra loro mutuamente esclusivi:
  In fisica classica si ha

$$P = P_A + P_B + P_C \ldots$$

  mentre in fisica quantistica agli eventi sono associate ampiezze (complesse, che noi rappresentiamo come vettori) $\psi_A, \psi_B, \psi_C \ldots$ e la probabilità dell'evento risulta

$$P = \left|\psi_A + \psi_B + \psi_C \ldots\right|^2$$

- L'approccio consente di analizzare anche esperimenti moderni, specialmente di ottica quantistica, che sono essenziali per chiarire aspetti concettuali come quelli legati alle misure "which way".

- L'approccio di Feynman consente agli studenti di *visualizzare il modello matematico* adottato. Risulta tuttavia fondamentale per superare le difficoltà degli studenti distinguere il piano del modello dal piano della realtà.

Visualizzare la fisica quantistica: un problema didattico

- Molti studenti hanno necessità di costruire modelli visivi, per immagini dei fenomeni per poterli comprendere. In fisica quantistica la visualizzazione costituisce un aspetto problematico.

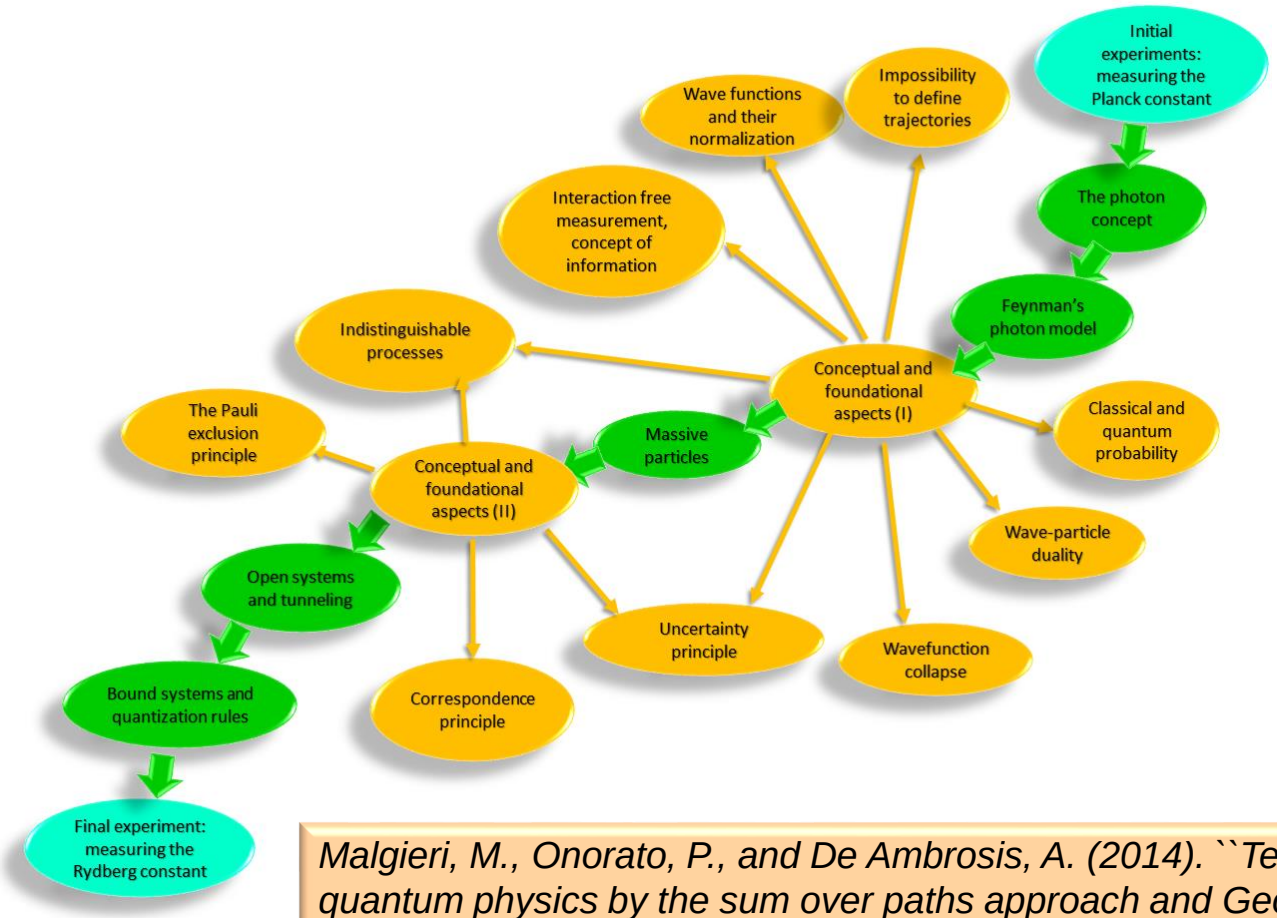
- Alcune immagini visive (es. fotone che colpisce l'elettrone nell'effetto fotoelettrico, visualizzazione del modello di Bohr) possono diventare "attrattori" troppo potenti per le rappresentazioni mentali degli studenti, impedendo loro di costruire modelli genuinamente quantistici.

- L'approccio di Feynman fornisce un aiuto all'immaginazione visiva degli studenti: è necessario però che essi abbiano presente che ciò che visualizzano è una rappresentazione del modello matematico, che non ha necessariamente una corrispondenza diretta con la realtà fisica. Ignorare questo avvertimento può condurre a difficoltà e modelli alternativi.

- Dal punto di vista della progettazione delle simulazioni, il nostro approccio è stato quello di evitare rappresentazioni dirette degli oggetti quantistici (fotone, elettrone) e concentrare piuttosto l'attenzione sulla rappresentazione del setup sperimentale macroscopico, e di elementi del modello (cammini, vettori, probabilità di rivelazione...)

Piano Lauree Scientifiche
In collaborazione con MIUR, con.Scienze, Confindustria

Il percorso progettato



Malgieri, M., Onorato, P., and De Ambrosis, A. (2014). ``Teaching quantum physics by the sum over paths approach and GeoGebra simulations." European Journal of Physics, 35(5), 055024.

Piano Lauree Scientifiche
In collaborazione con MIUR, con.Scienze, Confindustria

Materiali

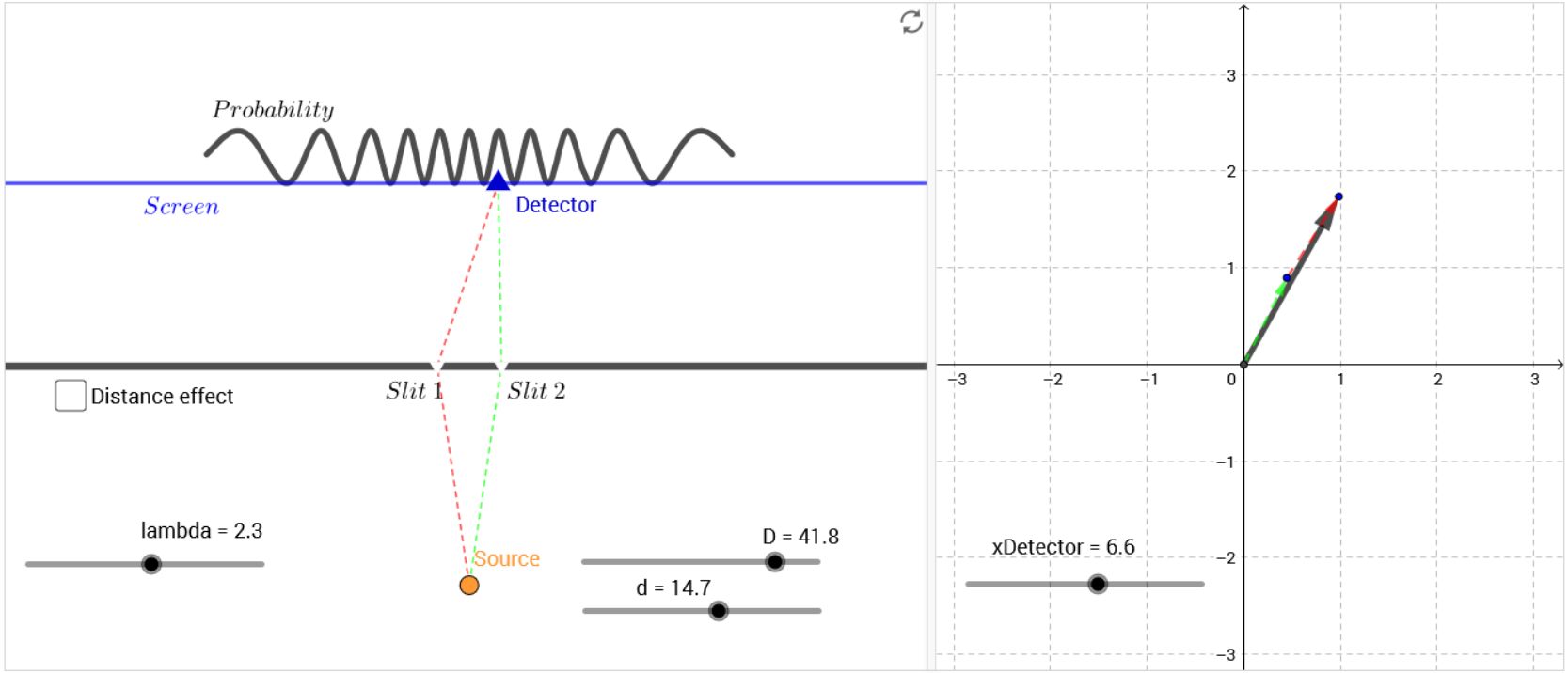
I materiali per gli insegnanti attualmente disponibili per gli insegnanti comprendono:

- Le dispense del corso, al link http://www-5.unipv.it/dida-pls/filespdf/dispense2016.pdf
- Tutte le simulazioni GeoGebra, al link http://www-5.unipv.it/dida-pls/fileszip/simulazioni2017.zip
- In fase di costruzione: un "libro" interattivo, su GeoGebra Tube al link https://www.geogebra.org/m/B5T7nkEG . Si tratta di un materiale a supporto delle dispense, che racchiude tutte le simulazioni in un contesto organico, con istruzioni per l'uso e riassumendo alcune parti essenziali del percorso.

Piano Lauree Scientifiche
In collaborazione con MIUR, con.Scienze, Confindustria

Doppia fenditura con fenditure puntiformi

Vediamo ora la simulazione con GeoGebra della stessa situazione fisica.

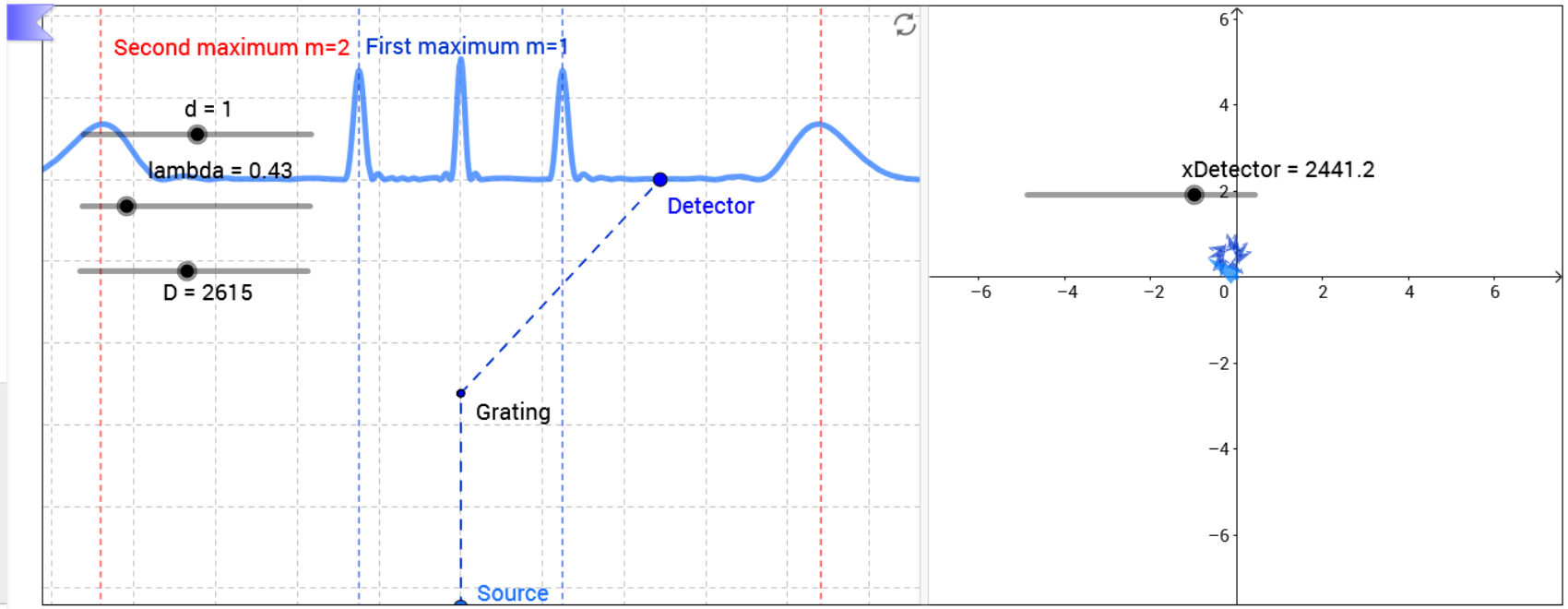


Nella finestra di sinistra della simulazione è rappresentata schematicamente la situazione fisica con tutti i suoi elementi fondamentali: la sorgente, il rivelatore, lo schermo, le fenditure. Inoltre, viene riportata la probabilità di rivelazione del fotone (curva nera), che risulta essere proporzionale al quadrato del

https://www.geogebra.org/m/B5T7nkEG#material/v322CWF9

L'esperimento della doppia fenditura costituisce un asse portante del percorso, in quanto permette di esemplificare la maggior parte dei nodi concettuali della fisica quantistica.

Il reticolo di diffrazione



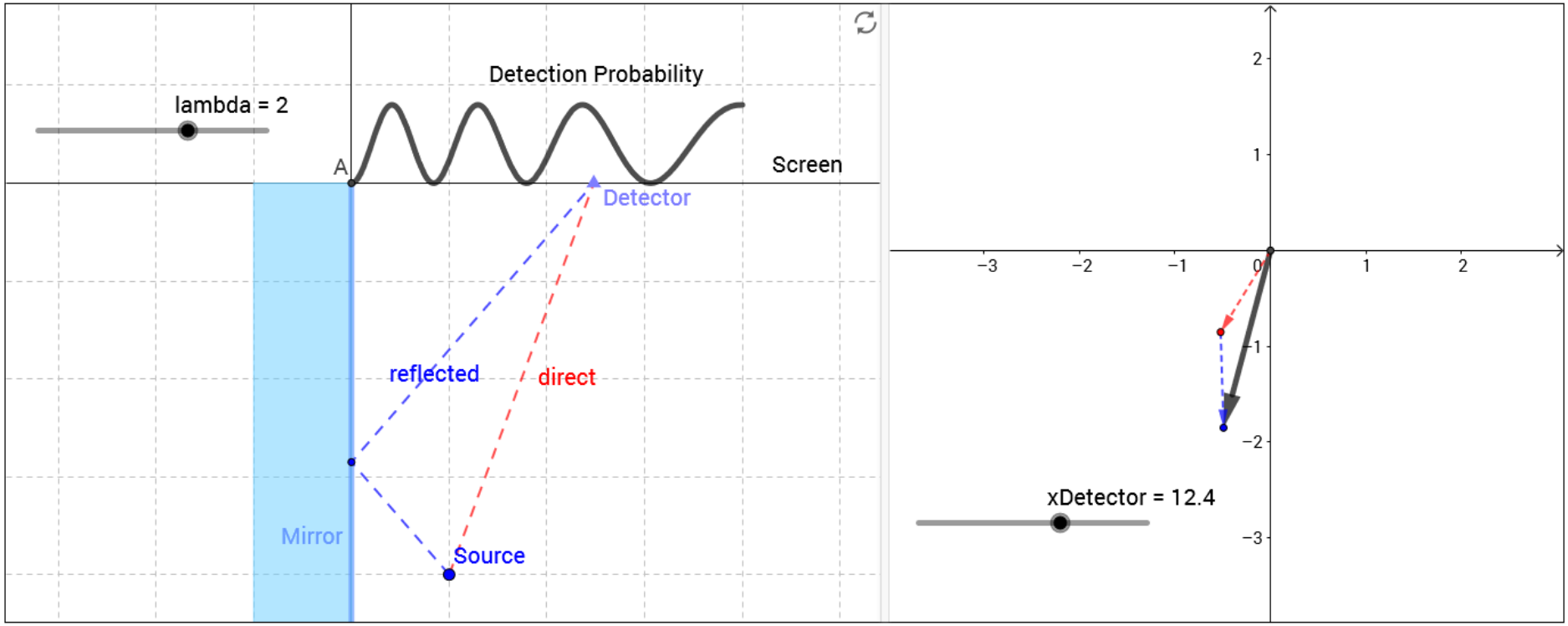
In questa simulazione applichiamo il metodo della somma sui cammini per un reticolo di diffrazione. Rispetto al caso dell'interferenza da due fenditure puntiformi, dove avevamo solo due cammini possibili e due fasori associati, in questo caso abbiamo molti più cammini possibili (per visualizzarli è necessario

https://www.geogebra.org/m/UWPB4p8s#material/NSVnU2jY

Mediante la simulazione del reticolo di diffrazione, è possibile rinforzare il collegamento con gli aspetti sperimentali del percorso didattico.

Piano Lauree Scientifiche
In collaborazione con MIUR, con.Scienze, Confindustria

Il fotone e gli specchi: lo specchio di Lloyd



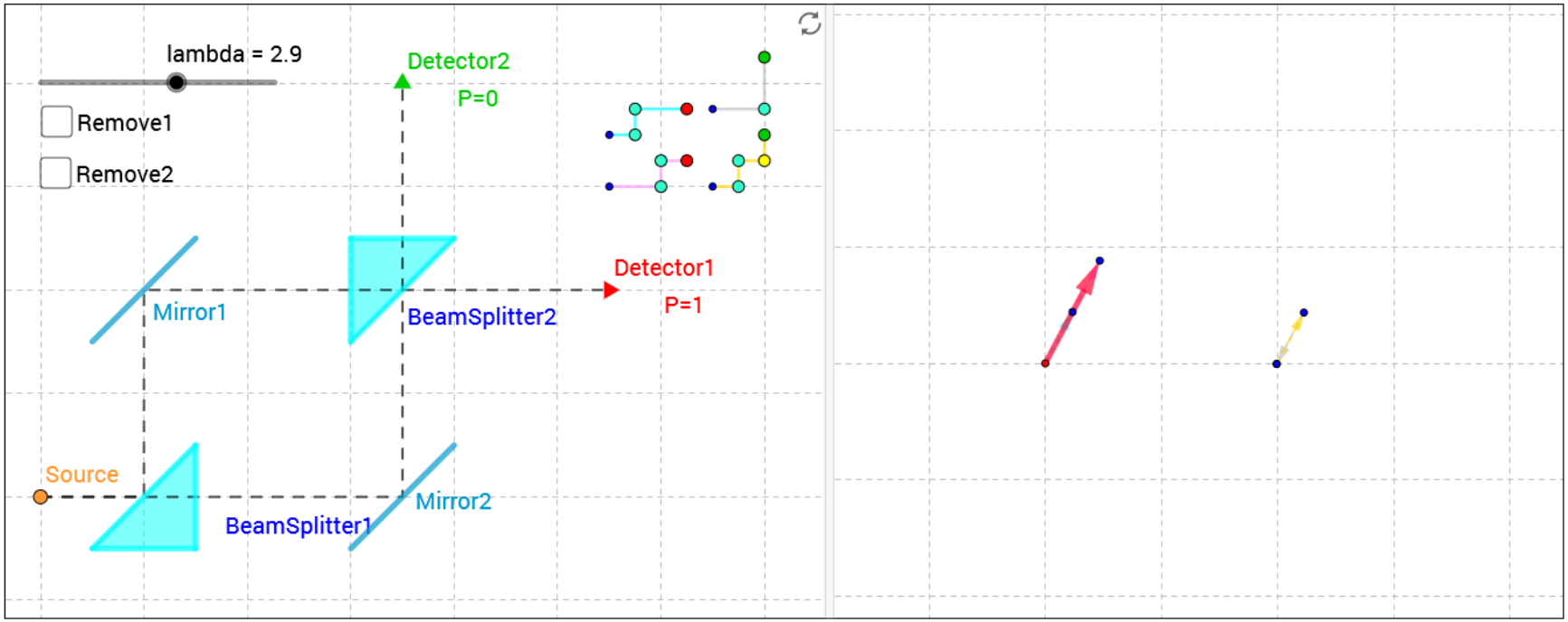
Vediamo, ora, la simulazione realizzata con GeoGebra della situazione fisica descritta nell'esperimento dello specchio di Lloyd.

https://www.geogebra.org/m/UWPB4p8s#material/NSVnU2jY

Ai fini del percorso è importante introdurre l'idea che il vettore associato al cammino del fotone subisce uno sfasamento di π a seguito di una riflessione "esterna".

Interferometro Mach-Zehnder e le misure which way

La simulazione si riferisce alla sezione 2.5, pagine 23-26 delle dispense del corso.

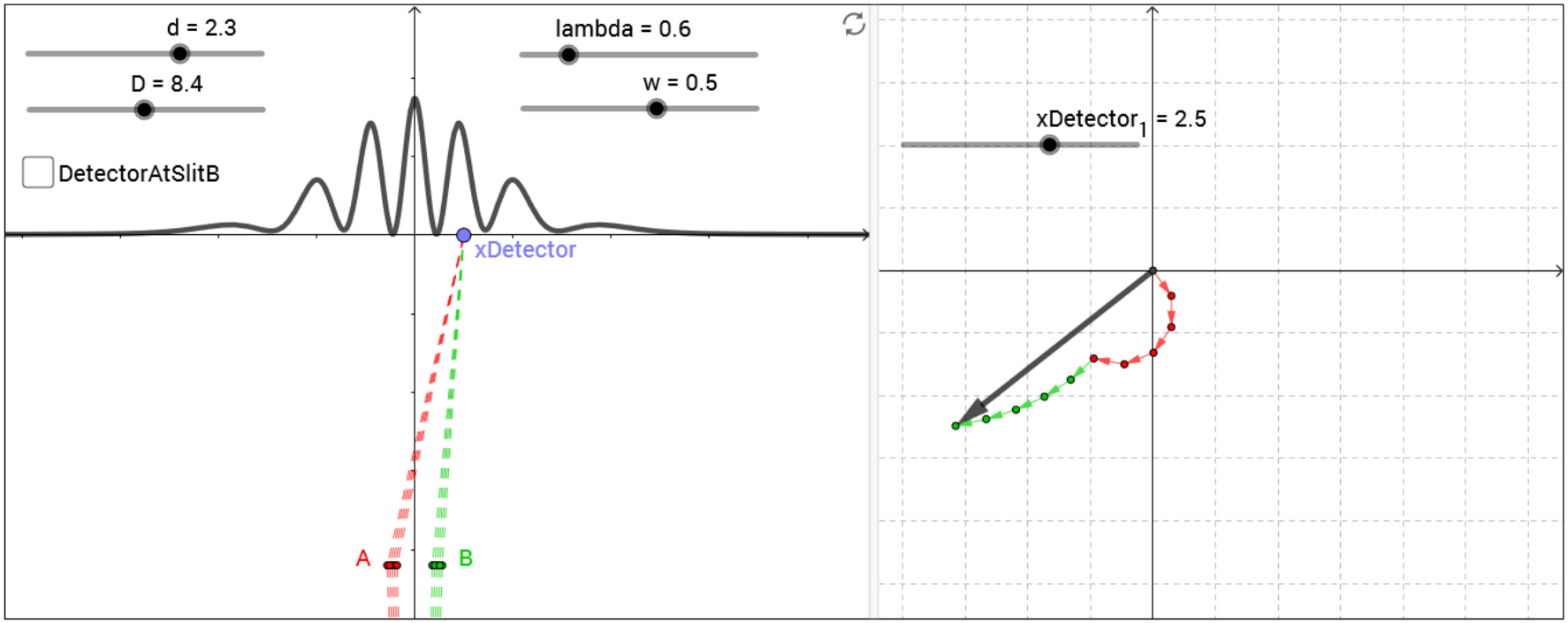


Vediamo ora, nel dettaglio, la simulazione realizzata con GeoGebra per riprodurre l'esperimento con

https://www.geogebra.org/m/B5T7nkEG#material/Yx2H9jCy

L'interferometro Mach-Zehnder consente non solo di discutere argomenti concettuali, ma anche di approfondire aspetti più tecnici del metodo di Feynman, come la questione della normalizzazione delle ampiezze associate ai cammini.

Doppia fenditura con rivelatore*



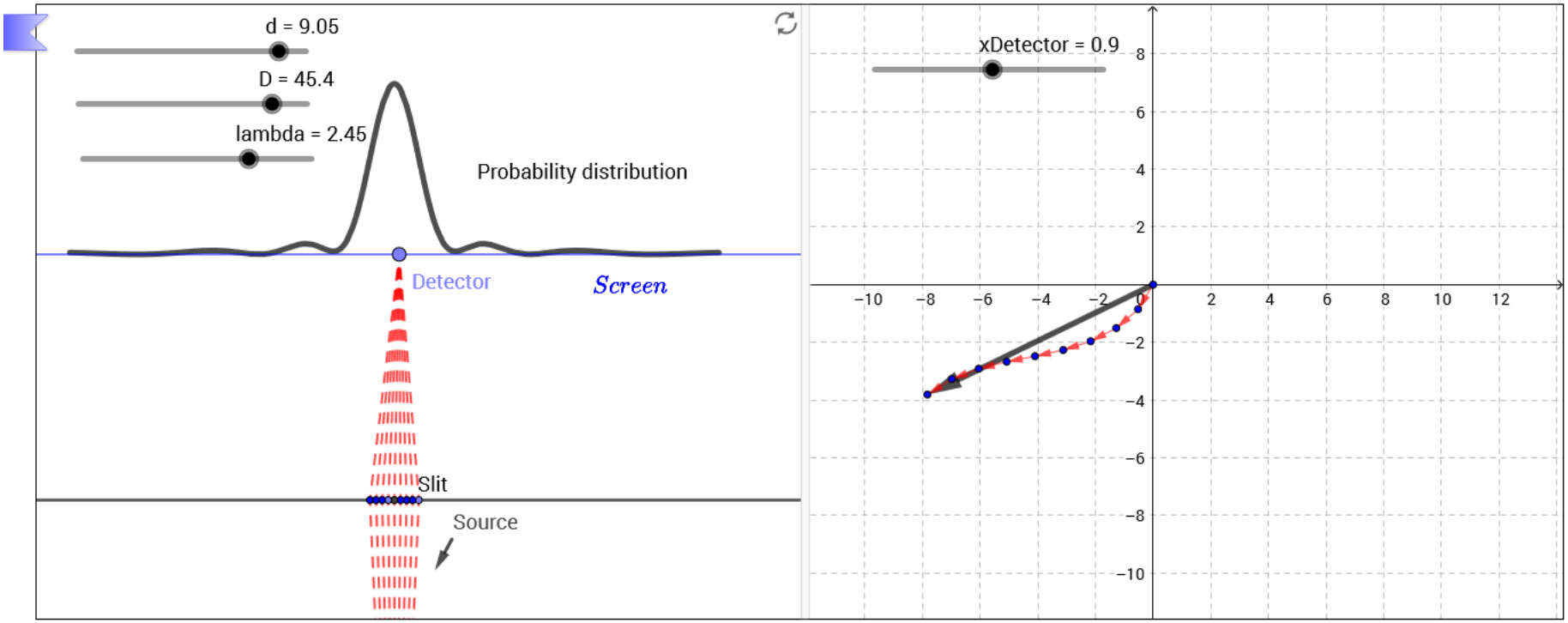
In riferimento all'analogia precedente tra l'esperimento ZWM e la doppia fenditura con rivelatori, consideriamo la seguente simulazione. In essa, oltre a poter variare i soliti parametri (distanza tra le

https://www.geogebra.org/m/B5T7nkEG#material/CmeNJZpc

Dopo aver introdotto gli esperimenti "which way" attraverso l'interferometro di Mach-Zehnder e la discussione dell'esperimento di Zhou-Wang-Mandel, la questione viene riportata all'esempio delle due fenditure.

Piano Lauree Scientifiche
In collaborazione con MIUR, con.Scienze, Confindustria

La diffrazione da singola fenditura e il principio di indeterminazione



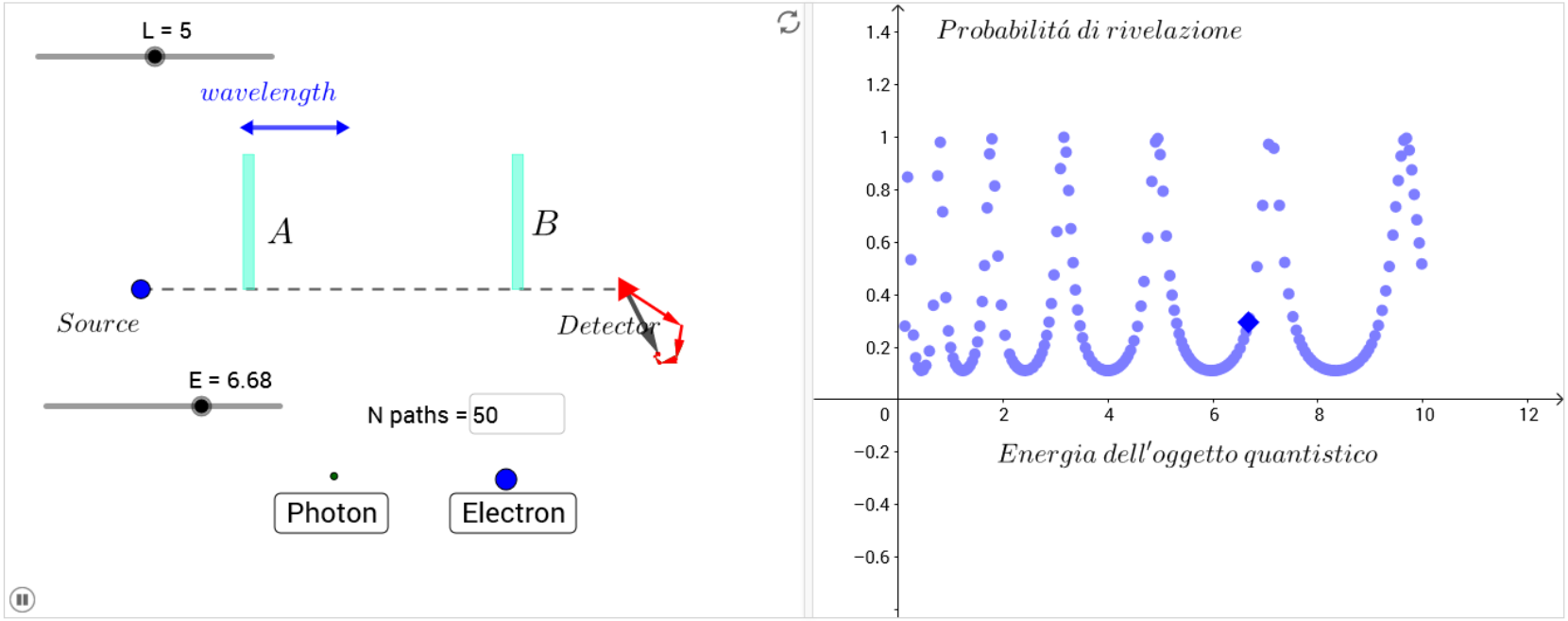
Esaminiamo la simulazione realizzata con GeoGebra della diffrazione da fenditura singola.
In generale, per questa situazione fisica, si ha una sorgente che emette fotoni, che attraversano una

https://www.geogebra.org/m/B5T7nkEG#material/p45Yr8GA

La simulazione della diffrazione da una singola fenditura di larghezza variabile viene utilizzata per introdurre il principio di indeterminazione.

Tunneling risonante da doppia barriera

Doppia barriera risonante*

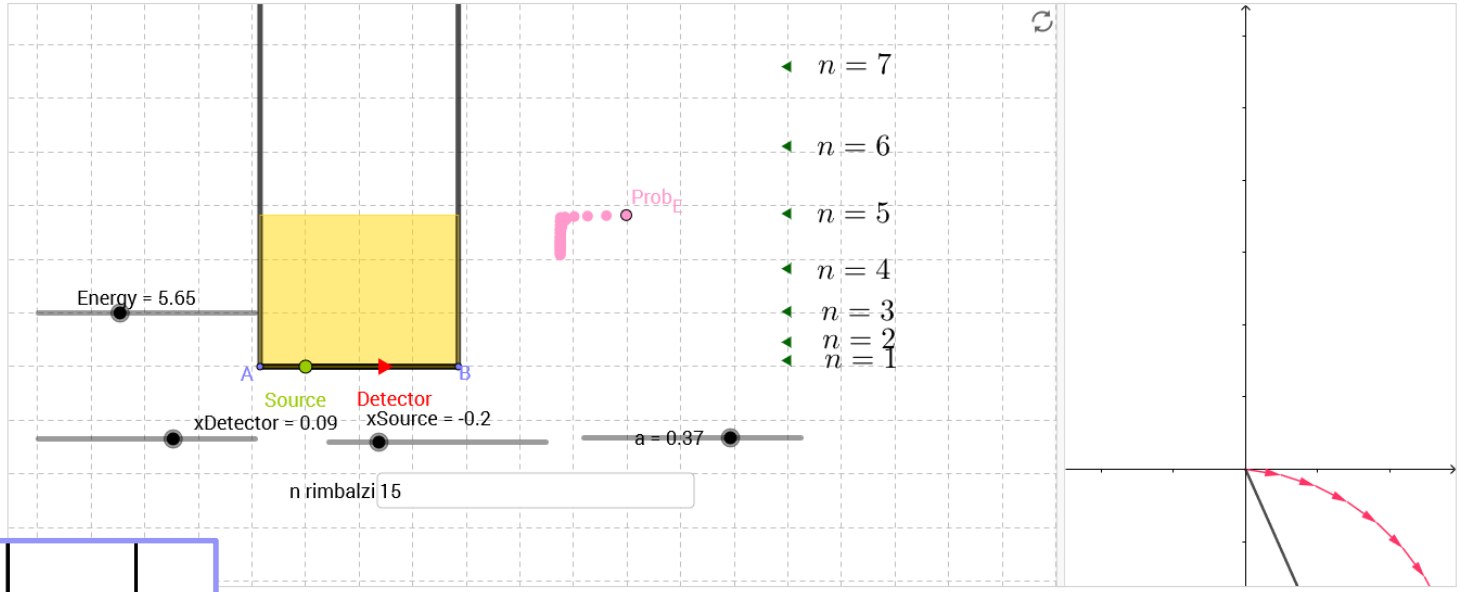


Consideriamo il seguente problema: un fotone di energia E, emesso dalla sorgente S, deve attraversare due beam splitter a distanza L uno dall'altro; il fotone ha il 50% di probabilità di essere riflesso o trasmesso da ognuno dei due beam splitter. Come abbiamo visto, ad ogni riflessione viene attribuito

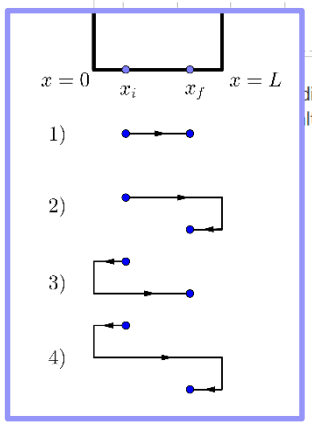
https://www.geogebra.org/m/B5T7nkEG#material/QjpnD4gt

Il problema del tunneling risonante da una doppia barriera ha la funzione di "ponte" tra il trattamento dei sistemi aperti e quello dei sistemi legati. La possibilità di cambiare il tipo di oggetto quantistico utilizzato (fotone o elettrone) evidenzia le (molte) analogie e le (poche) differenze tra i modelli dei due oggetti.

Elettrone in una scatola*



di un elettrone confinato in una scatola unidimensionale di larghezza L, cioè in
ltezza infinita; l'elettrone non può sfuggire dalla regione entro cui è



https://www.geogebra.org/m/B5T7nkEG#material/wAMfrCAN

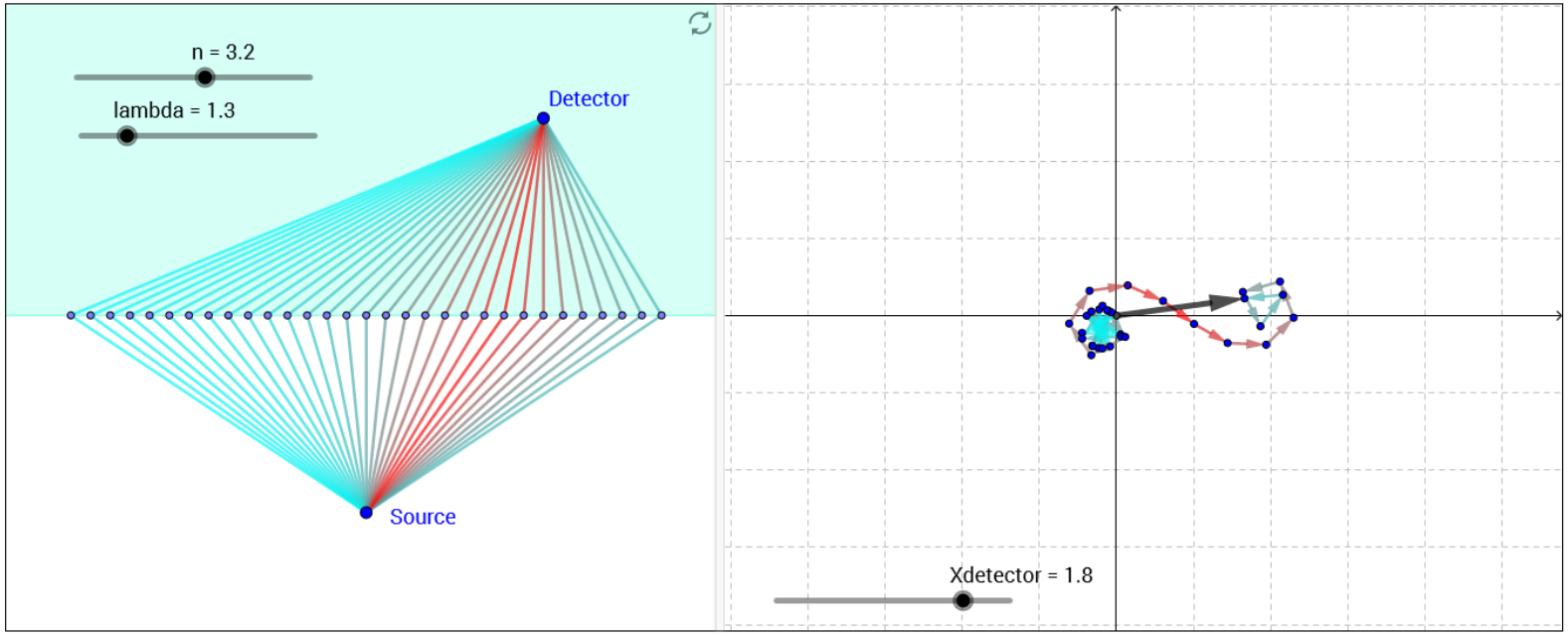
Per la particella in una buca di potenziale, i livelli di energia permessi corrispondono ai valori per cui i fasori corrispondenti alle diverse possibili "famiglie" di cammini sono in fase

Piano Lauree Scientifiche
In collaborazione con MIUR, con Scienze, Confindustria

Il principio di corrispondenza: rifrazione della luce

SIMULAZIONE: Rifrazione

La simulazione si riferisce al capitolo 9, pagine 48-49 delle dispense del corso.

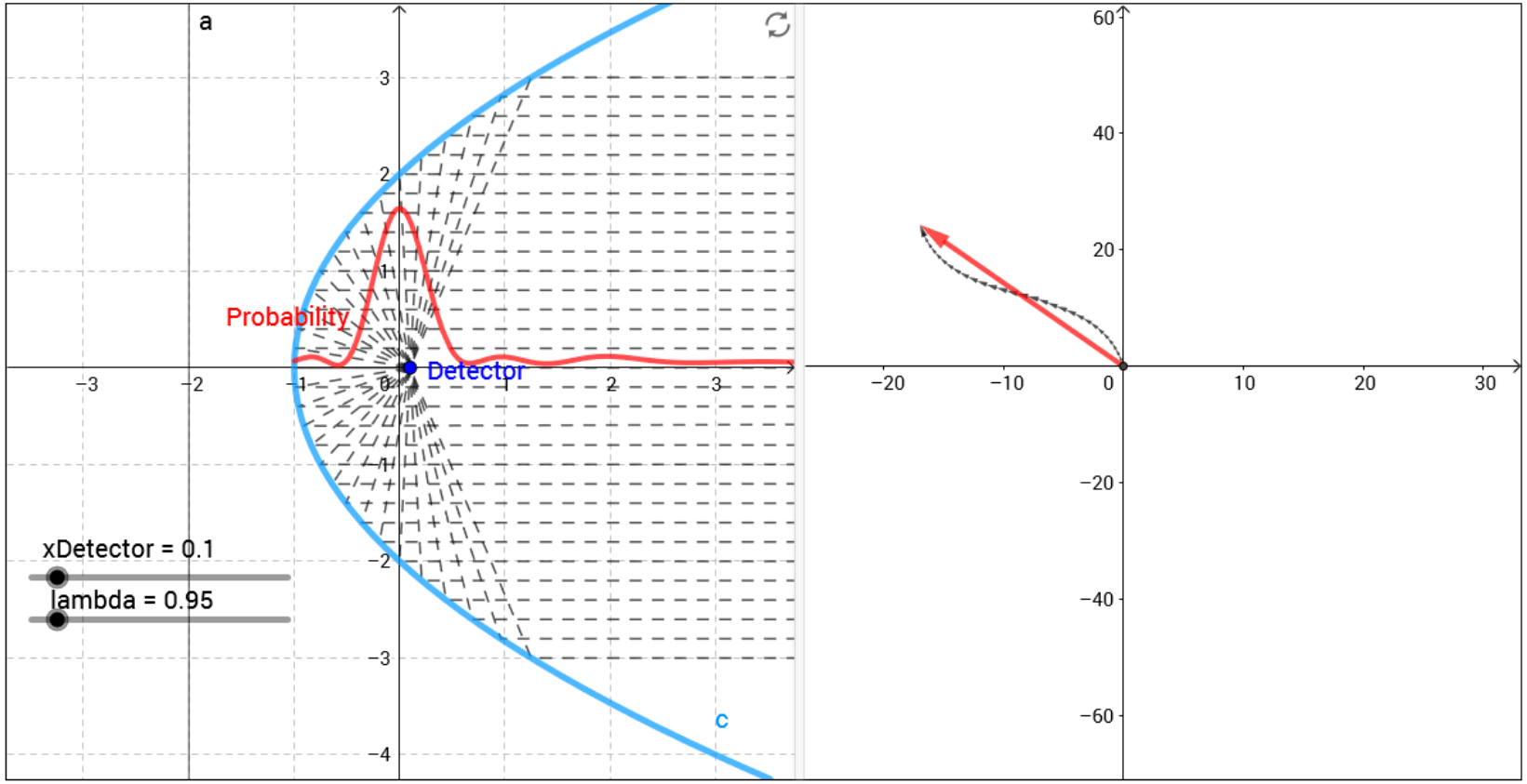


Analizziamo, ora, la simulazione riguardante la rifrazione di un fotone all'interfaccia tra due mezzi.
Nella finestra di sinistra, troviamo gli elementi che caratterizzano tale situazione fisica: la sorgente, il

Molte simulazioni possono essere usate per trattare i problema, cruciale per la coerenza "longitudinale" del percorso, di come la meccanica quantistica permetta di ritrovare i risultati della fisica classica nel limite di piccole lunghezze d'onda.
La rifrazione della luce è un esempio classico: la legge di Snell emerge naturalmente dall'algoritmo dei cammini di Feynman (condizione di fase stazionaria).

Il principio di corrispondenza: lo specchio parabolico

Secondo QED di R.P. Feynman: analisi dello specchio parabolico nella transizione tra l'ottica ondulatoria (e quantistica) e quella geometrica.



https://www.geogebra.org/m/HAjTXKhw

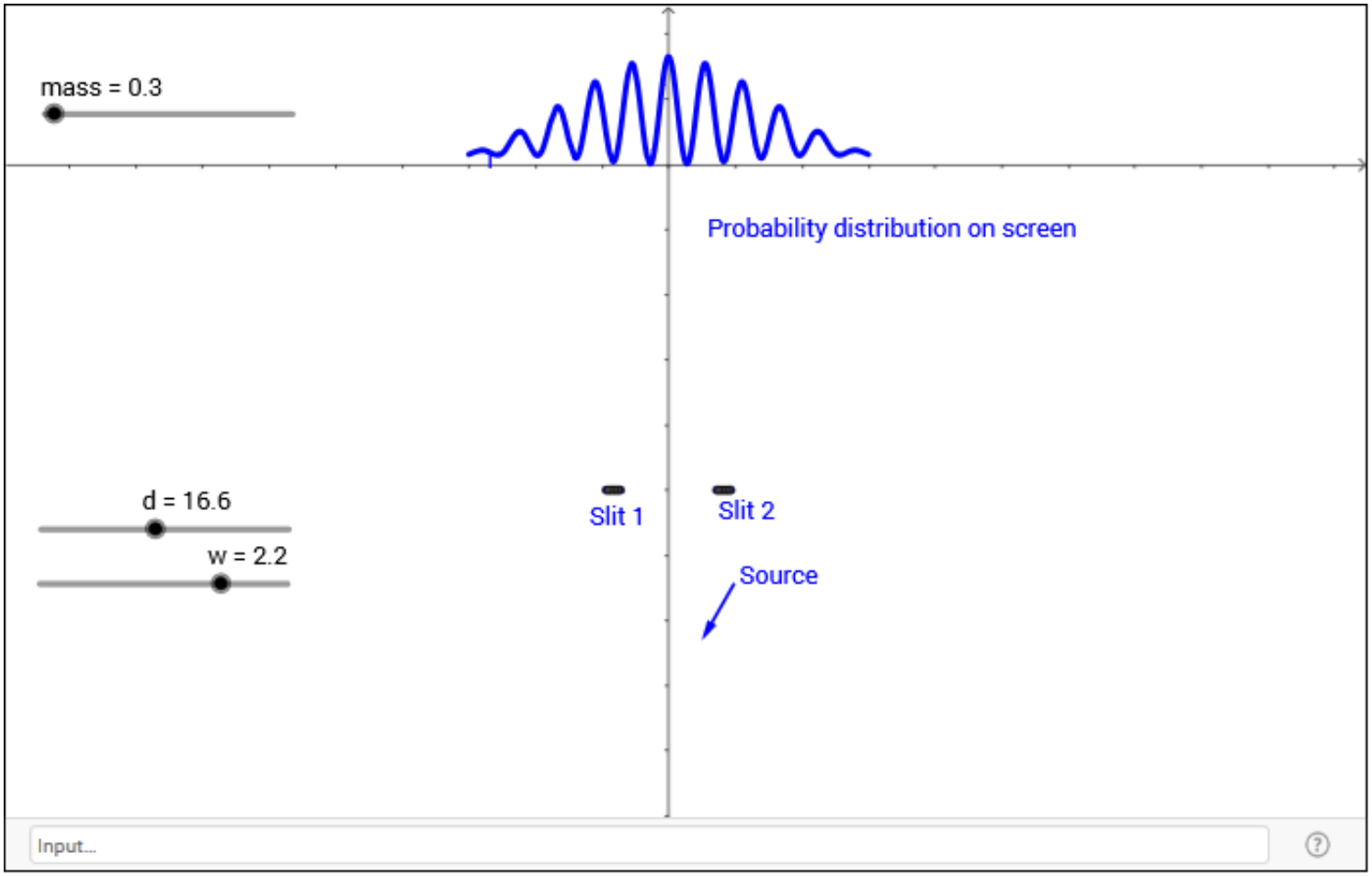
Un altro esempio di come dal metodo di Feynman emerga, nel limite di piccole lunghezze d'onda, l'ottica geometrica, è lo specchio parabolico

Conclusioni e progetti futuri

- Per alcune simulazioni sono state progettate attività specifiche che gli studenti possono svolgere, ad esempio attività di esplorazione o problemi da risolvere aiutandosi con le simulazioni. Tali attività saranno inserite nel "libro" interattivo. L'obiettivo è disseminare il percorso il più possibile, e migliorarne la fruibilità da parte degli studenti.

- Sono in fase di sviluppo altre simulazioni, non mostrate in questa presentazione; ad esempio quella relativa al modello atomico di Bohr.

Il principio di corrispondenza: doppia fenditura con particelle massive



Ancora un esempio che riguarda la doppia fenditura: all'aumentare della massa della particella, la distribuzione di probabilità di rivelazione si avvicina all'aspettativa classica.