

1) Fin qui si è parlato della formulazione “mentale” di questo esperimento. Come avviene che a un certo punto esso sia diventato realtà ?

Previsioni (..sbagliate) di un premio Nobel



La pagina sotto è riprodotta dal testo di **Richard Feynman** (fisico e premio Nobel nel 1965), *Feynman lectures on Physics, Vol. 3*

Riferendosi all'esperimento di interferenza di elettroni, Feynman dice:

*"Dovremmo dirvi che non dovrete tentare di realizzare questo esperimento, che non è mai stato fatto in questo modo. Il guaio è che l'apparato che bisognerebbe costruire per mostrare gli effetti nei quali siamo interessati sarebbe troppo piccolo, **impossibile da realizzare**. Quello che stiamo facendo è in realtà un **esperimento "mentale"** che abbiamo scelto perchè è facile da immaginare. Conosciamo il risultato che si otterrebbe perchè ci sono molti esperimenti che sono stati fatti, nei quali le scale e le proporzioni sono state scelte in modo da poter mostrare gli effetti che descriveremo." (1963).*

Abbiamo già sentito da Olivia che il premio nobel Richard Feynman attribuiva un ruolo importantissimo a questo esperimento. D'altra parte, però, nel **1963**, sostenne che esso, per difficoltà tecniche, non avrebbe mai potuto essere realizzato ( *[...] non dovrete tentare di realizzare questo esperimento, che non è mai stato fatto in questo modo. In guaio è che l'apparato che bisognerebbe costruire per mostrare gli effetti nei quali siamo interessati sarebbe troppo piccolo, **impossibile da realizzare**.*).

2) **Impossibile ..., strano, detto da uno come Feynman, che dall'altra parte (vedi il famoso articolo “There’s plenty of room at the bottom” del 1959) aveva previsto lo sviluppo della nanotecnologia e la manipolazione degli atomi ... ma allora come si è riusciti a smentire questa previsione così categorica?**

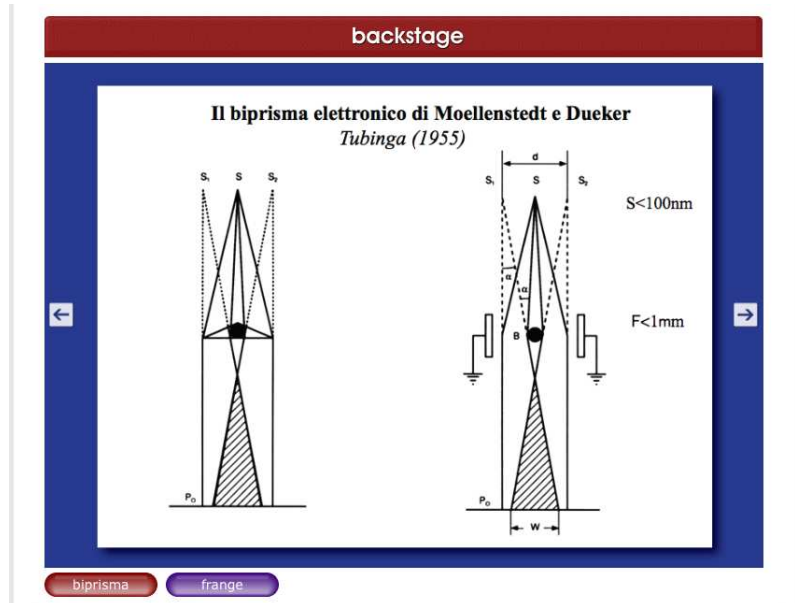
backstage

Claus Jönsson (Tubinga 1959-61)

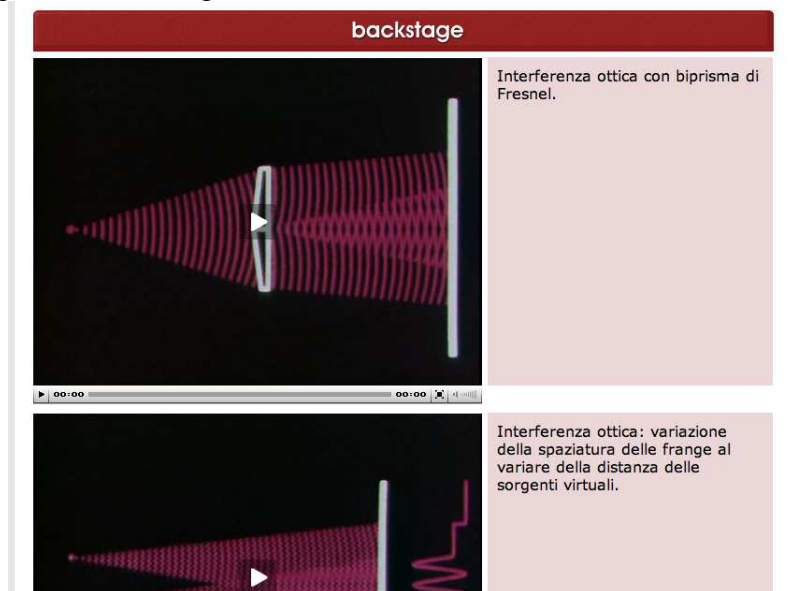
The image shows a diagram of the experimental setup for electron diffraction. It includes labels for '200 Å Silver', 'Glass Plate', '10-50 Å Polymer Slit', and '3000 Å Copper'. Below the diagram are two sets of vertical bars representing slits, labeled 'FIG. 1. Production of the slits.' and 'FIG. 5. Electron micrograph of the slit free material.' A large electron micrograph on the right shows vertical interference fringes. Navigation arrows are present on the left and right sides of the diagram area.

biprisma      frange

Negli anni compresi tra il **1959** e il **1961** il giovane dottorando **Claus Jönsson**, dell'Università di Tubinga è già riuscito, con una raffinata tecnica di incisione con fascio elettronico, simile a quella che si usa oggi per fabbricare i microdispositivi elettronici, a costruire un sistema di fenditure sufficientemente piccole per ottenere una figura di interferenza di elettroni.



Nella stessa università di Tubinga già nel **1955**, quindi ancora diversi anni prima, è stato inventato uno strumento che permette di aggirare la difficoltà di costruire due fenditure tanto sottili. Si tratta del *biprisma elettronico* di **Möllenstedt e Dücker**, l'analogo del biprisma ottico di **Fresnel**: entrambi i dispositivi deviano i “raggi” luminosi o gli elettroni in modo da generare l'effetto di “sdoppiamento” di una singola sorgente in due sorgenti virtuali.



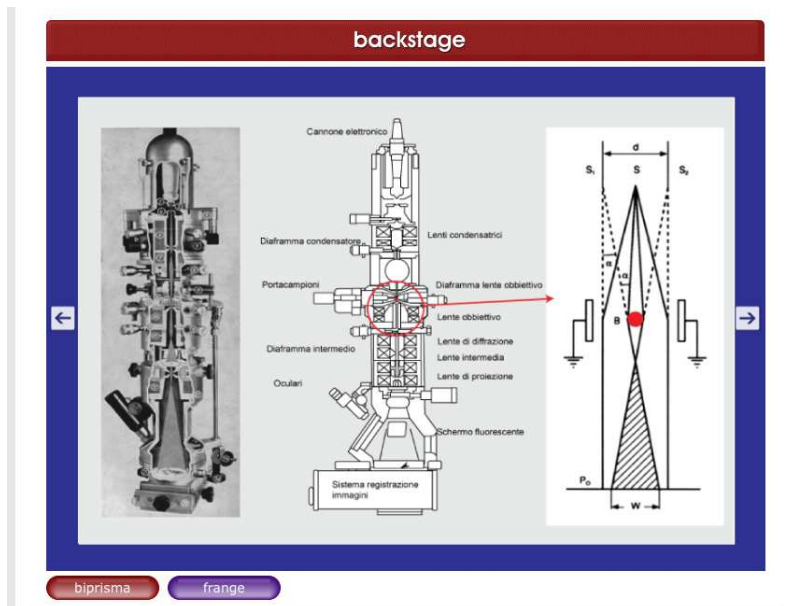
Nel caso degli elettroni il biprisma è costituito un filo conduttore molto sottile, tenuto a potenziale positivo che devia il percorso degli elettroni in virtù del suo campo elettrico. Qui sono i due fasci in cui il biprisma separa il fascio emesso dalla sorgente a interagire tra loro e a produrre interferenza. Anche con questo sistema erano state ottenute nel periodo **1955-1959** frange di interferenza di elettroni.

### 3) Ma a questo punto l'esperimento era già praticamente fatto, cosa c'era ancora da aggiungere?

Bè, guardando le figure di interferenza ottenute a Tubinga, vediamo delle frange *continue*, dove non si vedono le tracce dei *singoli* elettroni. I rivelatori di elettroni usati in questo periodo sono in pratica delle lastre fotografiche: queste non hanno la sensibilità sufficiente per evidenziare le tracce dell'arrivo di ogni singolo elettrone. Prima di poter registrare un segnale visibile esse devono essere esposte a un flusso di moltissimi elettroni. Il passaggio dal singolo evento all'insieme di molti eventi, come era descritto dall'esperimento ideale di cui parla Feynman (e come l'abbiamo visto descritto nel filmato del Dr. Quantum) non è ancora osservabile.



Qui entrano in gioco i tre ricercatori bolognesi, **Giulio Pozzi**, **Gian Franco Missiroli** (oggi qui con noi come ospiti speciali) e **Pier Giorgio Merli** (prematuramente scomparso nel febbraio dell'anno scorso e a cui è dedicato il sito "L'esperimento più bello"). Nei primi anni '70 Merli (proveniente dall'Università e passato successivamente al CNR) Missiroli e Pozzi (Dip. Fisica Università) collaborano assieme nella ricerca in microscopia elettronica.



La strada che i tre scelgono per realizzare l'interferenza di elettroni è diversa da quella di Tubinga, dove per fare gli esperimenti era stata costruita un'apparecchiatura apposita. Essi decidono invece di modificare un microscopio elettronico commerciale, realizzando una versione del biprisma di Möllensted-Dücker che possa essere montato all'interno del microscopio, utilizzando lo spazio dove di solito vengono messi i preparati da osservare.

dell'esperimento.

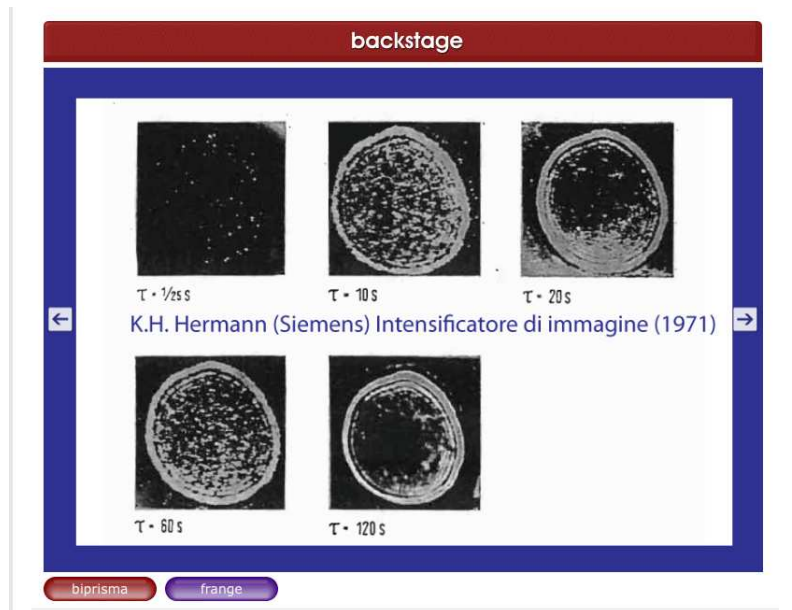
**1976:** sequenza del film "interferenza di elettroni" dove si mostra la fabbricazione del "biprisma elettrostatico", accessorio utilizzato nella tecnica nota come *olografia elettronica*, e elemento che ha reso possibile la realizzazione dell'esperimento di interferenza di elettroni singoli all'interno di un microscopio elettronico in trasmissione.

**2008:** dopo più di 30 anni ecco finalmente svelata dalla voce del protagonista (Giulio Pozzi) la verità sulla scena della fabbricazione del filo sottile per il biprisma (riprese di F. Bisi - INFN Multimedia).

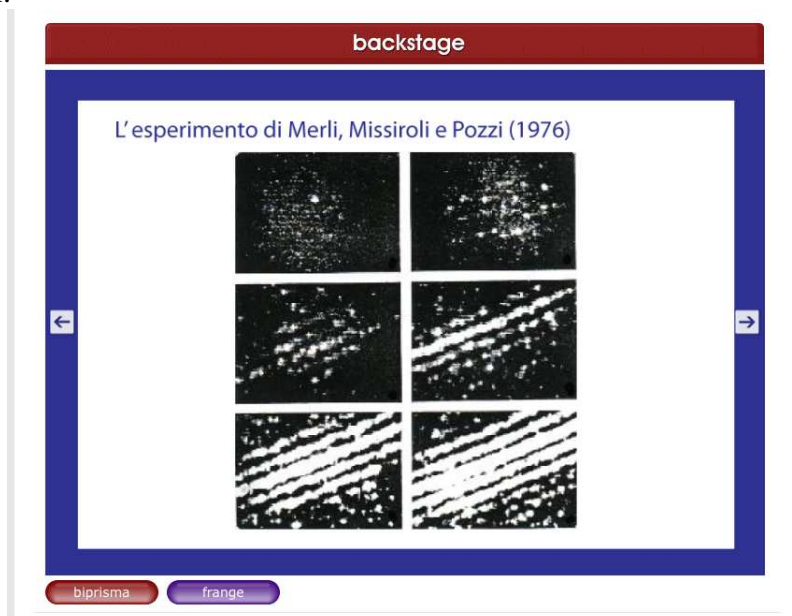
HOME | DI CHE SI TRATTA | SPIEGAZIONE | STORIA | BELLEZZA | [BACKSTAGE](#) | PENSARE | IL FILM | CHI SIAMO | LINKS & BIBLIO | CONTATTO

top

Il biprisma viene realizzato artigianalmente, con l'aiuto di altri collaboratori (in particolare **Oriano Donati** e **Giorgio Matteucci**). Con esso vengono ottenute, dentro al microscopio elettronico, figure di interferenza di elettroni, simili a quelle ottenute a Tubinga. E fin qui ancora nulla di veramente nuovo. Ma Merli e Pozzi vengono a conoscenza durante una scuola estiva a Erice nel **1974** dell'invenzione da parte di un ricercatore della Siemens (**Hermann**) di un dispositivo (intensificatore di immagine) così sensibile da poter visualizzare la traccia di un singolo elettrone.



Uno di questi dispositivi (parecchio costosi all'epoca) viene acquisito nel **1973** da un laboratorio di Milano (**Prof. Angelo Bairati**) e installato su un microscopio elettronico uguale a quello su cui venivano fatti gli esperimenti a Bologna. I tre decidono di tentare il "colpo grosso" ovvero, utilizzando questo nuovo rivelatore, fare l'esperimento in cui si possano evidenziare nello stesso tempo le tracce dei singoli elettroni e la formazione delle frange a partire dall'accumulo di queste tracce, come abbiamo visto nel filmato del Dr. Quantum. Ottengono il permesso di utilizzare lo strumento di Milano e decidono di andarci con la cinepresa per riprendere gli esperimenti.



**backstage**



Formazione delle frange di interferenza in seguito all'accumulo delle tracce dei singoli elettroni. Tratto dal film "Interferenza di elettroni" (1976) che racconta la realizzazione dell'esperimento di Merli, Missiroli e Pozzi. Le immagini sono visibili sullo schermo dell'intensificatore di immagine installato all'interno di un microscopio elettronico.

HOME | DI CHESI TRATTA | SPIEGAZIONE | STORIA | BELLEZZA | **BACKSTAGE** | PENSARE | IL FILM | CHI SIAMO | LINKS & BIBLIO | CONTATTO

[top](#)

Ed ecco appunto il risultato (*sequenza filmato*). Il lavoro viene pubblicato nel **1976** su una rivista scientifica internazionale.

## l'esperimento più bello della fisica

<http://l-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/>

HOME | DI CHESI TRATTA | SPIEGAZIONE | STORIA | BELLEZZA | BACKSTAGE | PENSARE | **IL FILM** | CHI SIAMO | LINKS & BIBLIO | CONTATTO

**il film**

**making the movie**

Nel 1976 il CNR produsse un breve film che documentava l'esperimento di interferenza di elettroni singoli. Accanto ai tre autori dell'esperimento (**Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli e Giulio Pozzi**), la sceneggiatura vide la collaborazione di **Dario Nobili** (all'epoca Dirigente di Ricerca dell'Istituto LAMEL-CNR) e, in veste di regista, **Lucio Morettini**, responsabile del Reparto di Cinematografia Scientifica del LAMEL-CNR.

Il film ottenne il **premio** nella sezione "Fisica" del Settimo Festival Internazionale del Film Scientifico e Tecnico, tenutosi a Bruxelles nel 1976. Nel 2004 è stato inserito nel DVD che raccoglie i filmati del PSSC, edito da Zanichelli (Bologna).

Nel Marzo 2008 i film scientifici prodotti dal Reparto di



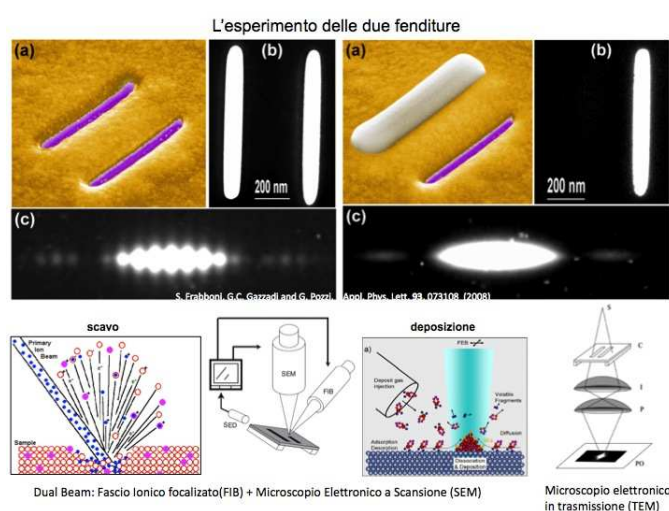
Trailer del film "Interferenza di elettroni" (1'18")

Contemporaneamente il materiale filmato, arricchito da animazioni e riprese di laboratorio, viene utilizzato per produrre un film didattico/divulgativo (“**Interferenza di elettroni**”), con la regia di **Lucio Morettini** e la collaborazione alla sceneggiatura di **Dario Nobili**, allora responsabile del laboratorio del CNR dove Pier Giorgio Merli lavora dopo il periodo post-laurea all’Università. Il film ricevette il primo premio al festival del cinema scientifico di Bruxelles nel 1976. Questa decisione evidenzia la sensibilità particolare che i tre ricercatori hanno nel porsi il problema di comunicare il loro lavoro ad un pubblico vasto, utilizzando un mezzo diverso da quelli accademici tradizionali. Questo film è importante anche perchè inaugura l’attività del Reparto di Cinematografia Scientifica del CNR di Lucio Morettini, che dal 1976 ai primi anni ‘90 produce più di 20 documentari su argomenti in vari campi della ricerca scientifica. Il filmato “Interferenza di elettroni” fa oggi parte integrante della edizione **2004** del DVD dei filmati PSSC a cura di Zanichelli.

Per chi è interessato, il sito “L’esperienza più bello” contiene il link che consente di vedere in streaming o scaricare liberamente il film intero.

**4) Siamo nel 1976: arrivati a questo punto, cosa è successo dopo? Se in questo esperimento c'era già "tutto" come dice Feynman, cosa restava da dimostrare?**

Se ci riferiamo alle ricerche che riguardano il comportamento quantistico degli elettroni, alcuni ricercatori come lo stesso Pozzi, in collaborazione con colleghi dell’Università di Modena, o Giorgio Matteucci, anche lui del Dipartimento di Fisica dell’Università di Bologna, hanno continuato a portare avanti esperienze fondamentali di interferometria con il microscopio elettronico.



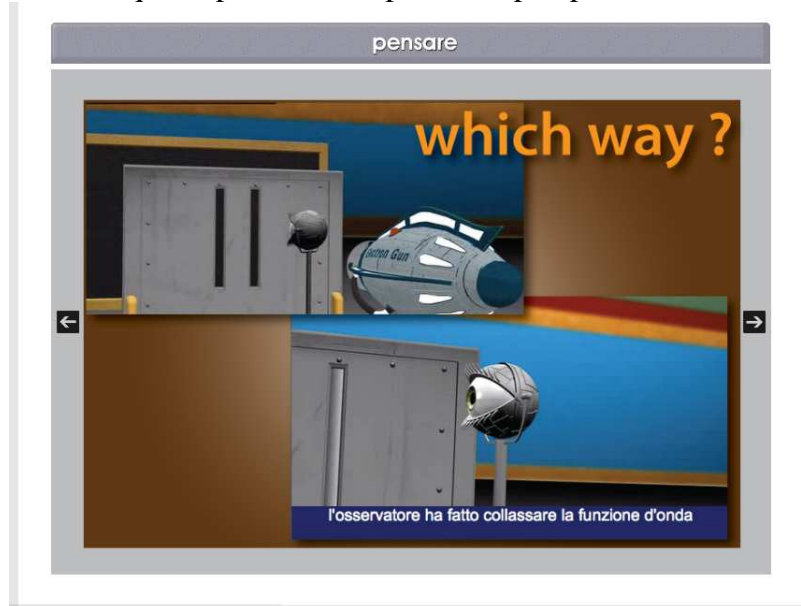
Qui vediamo ad esempio dei risultati molto recenti risultato della collaborazione di Giulio Pozzi, e Stefano Frabboni e Gian Carlo Gazzadi (Università di Modena), in cui gli esperimenti sono realizzati con vere fenditure, e non più con il biprisma. La raffinata tecnologia utilizzata per produrre queste fenditure che si basa sull’uso di un fascio ionico estremamente sottile, consente di realizzare fenditure della dimensione di alcune decine di nanometri (miliardesimi di metro), risultato che sarebbe stato totalmente fuori dalla portata delle tecnologie degli anni ’70 e ’80.

**5) Nella parte finale del Dr. Quantum abbiamo visto quel singolare effetto per cui se si prova ad osservare da che parte passa l’elettrone, sparisce misteriosamente la figura di interferenza ... Ma anche di questo è stato fatto l’esperimento reale ?**

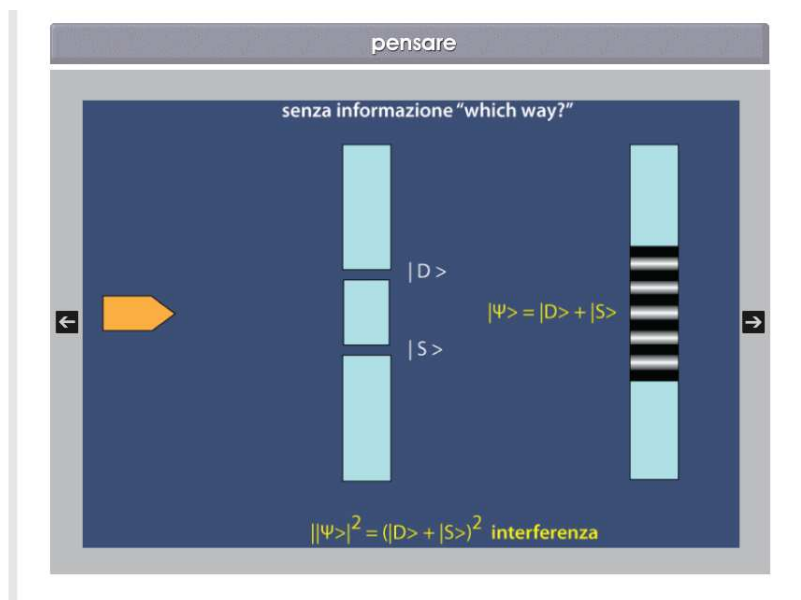
Sì, certo. Va detto però che in questo tipo di esperimenti, come è accaduto per la maggior parte di quelli realizzati negli ultimi decenni in meccanica quantistica, sono stati usati *quanti di luce*, piuttosto che elettroni. Olivia ci ha detto prima che anche la luce presenta un doppio comportamento ondulatorio-corpuscolare al pari degli elettroni. Infatti se l’esperimento delle 2 fenditure viene fatto con una sorgente di luce molto debole e un rivelatore molto sensibile, le frange si formano anche qui a partire dall’accumulo di puntini, ciascuno dei quali indica l’arrivo di un singolo quanto di luce, detto anche *fotone*. Diciamo che il fotone incarna la parte corpuscolare della

natura della luce. La scelta di usare i fotoni per fare gli esperimenti, dipende da vari motivi, uno dei quali è che gli apparati sperimentali dell'ottica (laser, cristalli birifrangenti, specchi semiargentati e rivelatori di singoli fotoni) sono relativamente più semplici e a buon mercato degli apparati necessari a condurre sperimentazioni sugli elettroni.

Veniamo all'esperimento di cui mi hai chiesto, noto in gergo come effetto *WHICH WAY*, ovvero: cosa accade se con qualche mezzo di osservazione cerchiamo di sapere da che parte (which way) è passato l'elettrone/fotone. Notate che ponendoci questa domanda noi stiamo già pensando al nostro oggetto come una *particella*, che possiede una *traiettoria* e che dunque se passa da una parte non può passare dall'altra ...

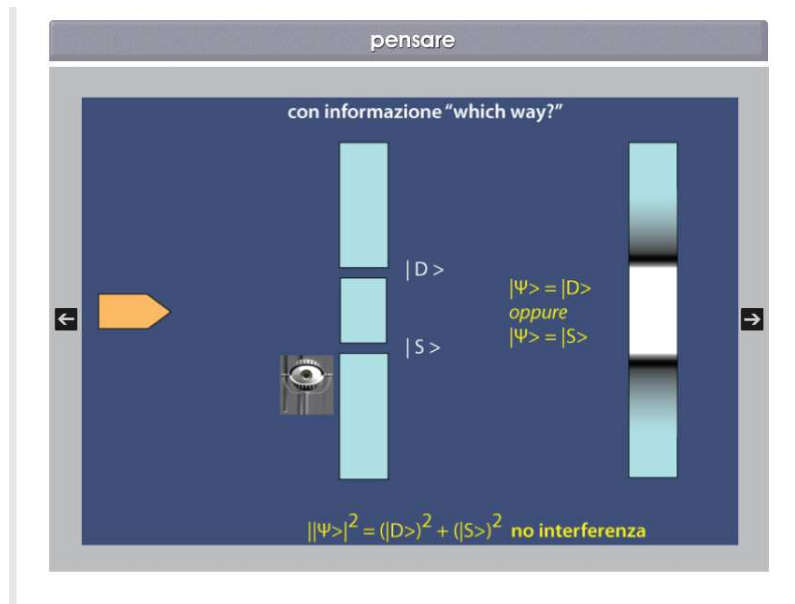


Vediamo i fatti.



**Situazione 1, già vista prima.** Osserviamo quello che accade al rivelatore, non sappiamo cosa succede nello spazio tra la sorgente e il rivelatore. In questo caso, le tracce dei singoli eventi, accumulandosi nel tempo, formano le frange di interferenza.





**Situazione 2.** Con uno strumento andiamo a vedere da che fenditura passa ciascun fotone o elettrone, in questo caso la figura di interferenza scompare, sostituita da un qualcosa di analogo alla figura che si ottiene quando facciamo l'esperimento con le palline, come mostrato prima da Olivia.

Diciamo subito che un vantaggio di usare i fotoni è che l'esperimento reale può essere congelato in modo tale che l'informazione sul percorso può essere facilmente ottenuta *senza esercitare alcuna perturbazione su essi*. Quindi il risultato è determinato non da un disturbo esterno, ma dalla *decisione* dello sperimentatore di osservare una proprietà che appartiene alla natura corpuscolare dell'oggetto. In accordo con il principio di complementarità di Bohr, se, nello spazio tra sorgente e rivelatore, evidenziamo una proprietà corpuscolare del nostro oggetto, allora esso non può avere qui un comportamento ondulatorio, per cui la figura di interferenza scompare ...

**6) .. mi stai dicendo che il fatto di comportarsi come onda o come particella dipende dalla nostra *sogettiva* decisione di come fare la misura ?**

Apparentemente accade proprio questo. Tale comportamento se vogliamo ancora più sorprendente di quelli visti fin qui, mette in crisi persino l'idea che esista una realtà oggettiva che si comporta in modo *indipendente* dal soggetto che la osserva. Questo ingresso del soggettivismo nella fisica ha creato ovviamente dibattiti e controversie a non finire, e non solo in campo strettamente scientifico, ma anche in quello filosofico. È anche uno dei motivi principali per cui Einstein rifiutò fino all'ultimo di accettare che la meccanica quantistica fosse una teoria completa e definitiva. A questo proposito è famosa la frase in cui disse che a lui piaceva pensare che la luna stesse lassù nel cielo anche quando lui non la guardava ....