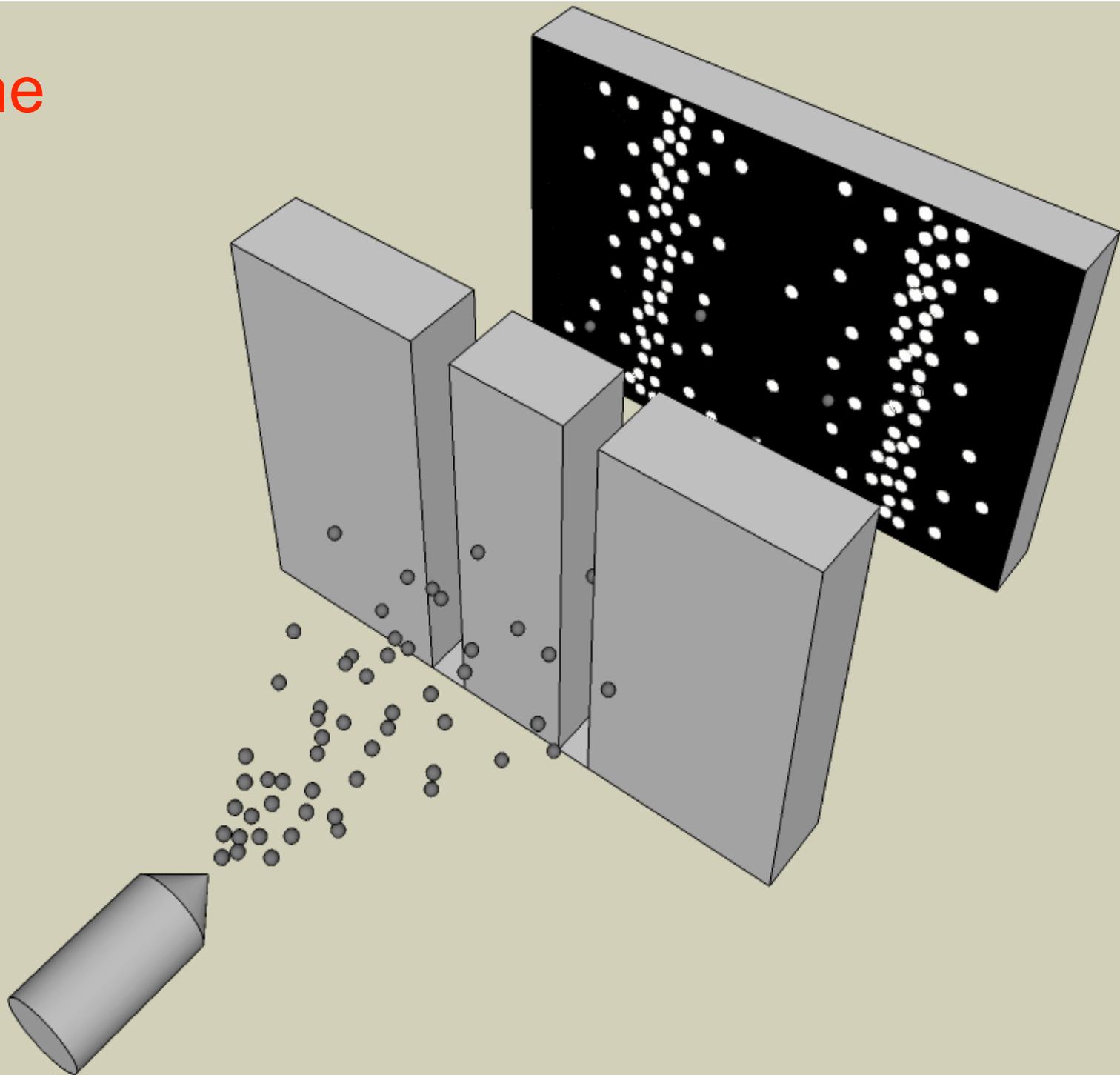


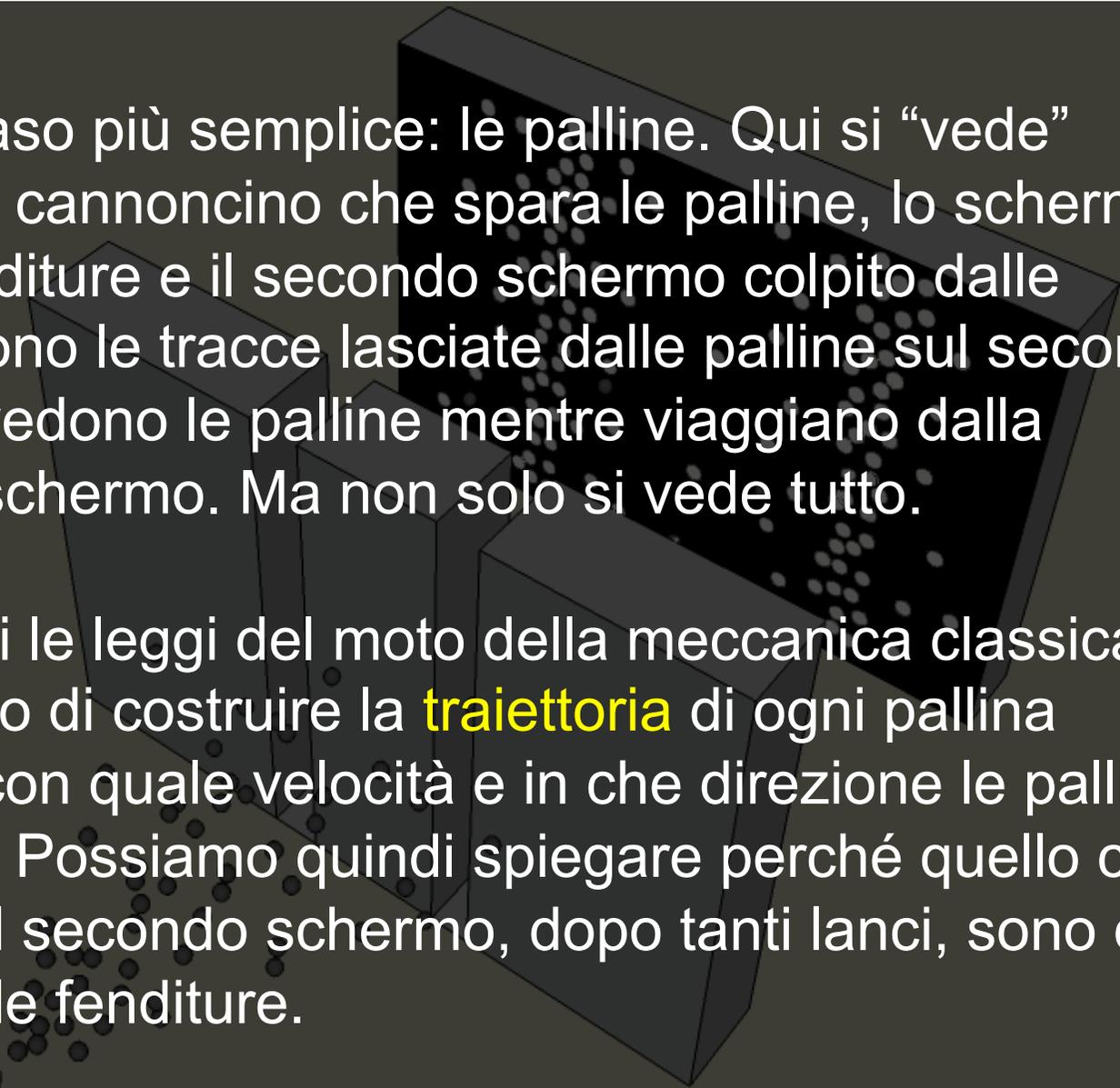
Un esperimento, tante immagini
della realtà

olivia levrini

Per cogliere le particolarità dell'esperimento, ripercorreremo le diverse situazioni viste assieme al Dr. Quantum e proveremo a chiederci che cosa vediamo (i fatti) e che cosa, invece, immaginiamo, aiutandoci con la ricostruzione del nostro pensiero.

palline





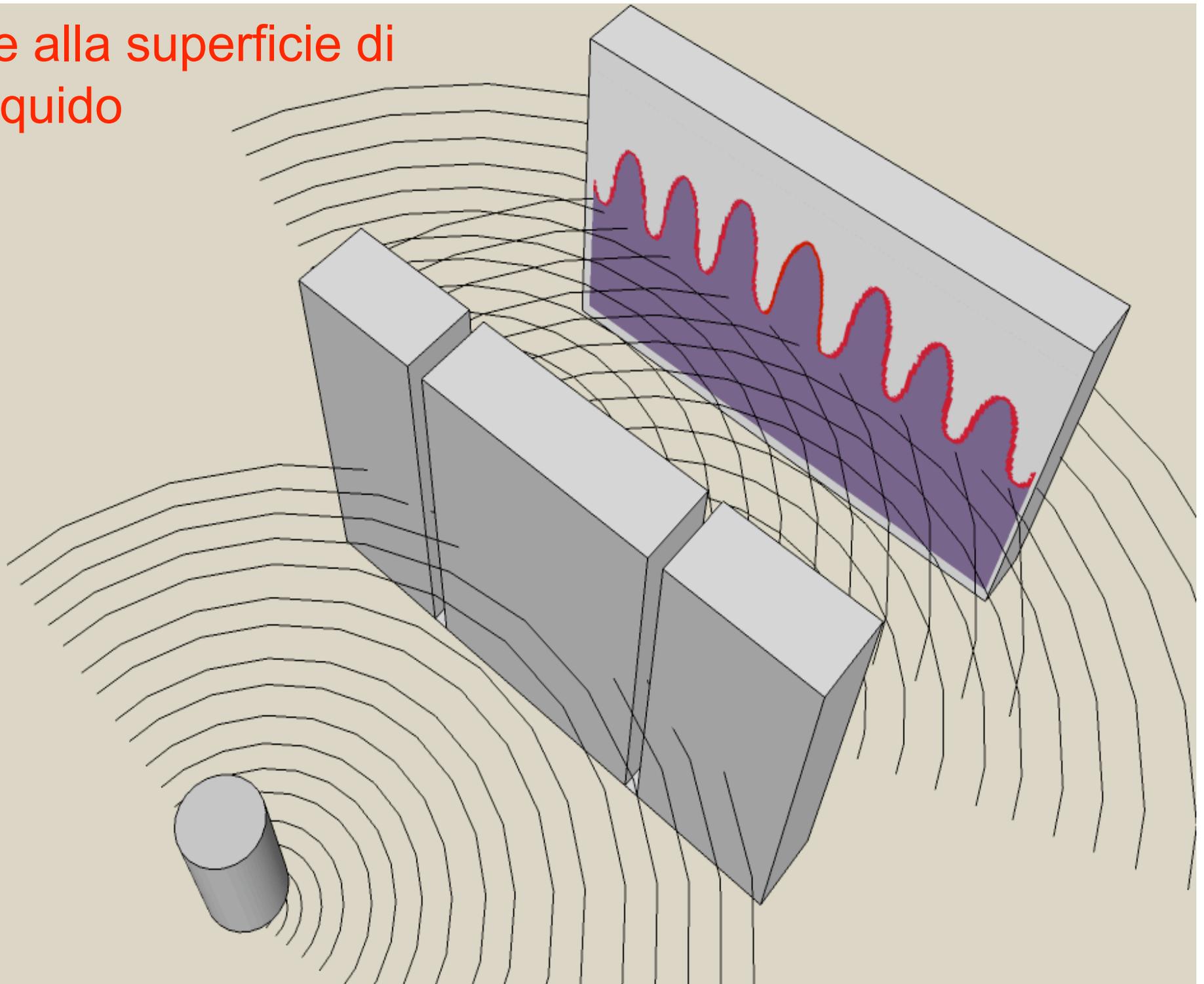
Iniziamo col caso più semplice: le palline. Qui si “vede” tutto: si vede il cannoncino che spara le palline, lo schermo con le due fenditure e il secondo schermo colpito dalle palline; si vedono le tracce lasciate dalle palline sul secondo schermo e si vedono le palline mentre viaggiano dalla sorgente allo schermo. Ma non solo si vede tutto.

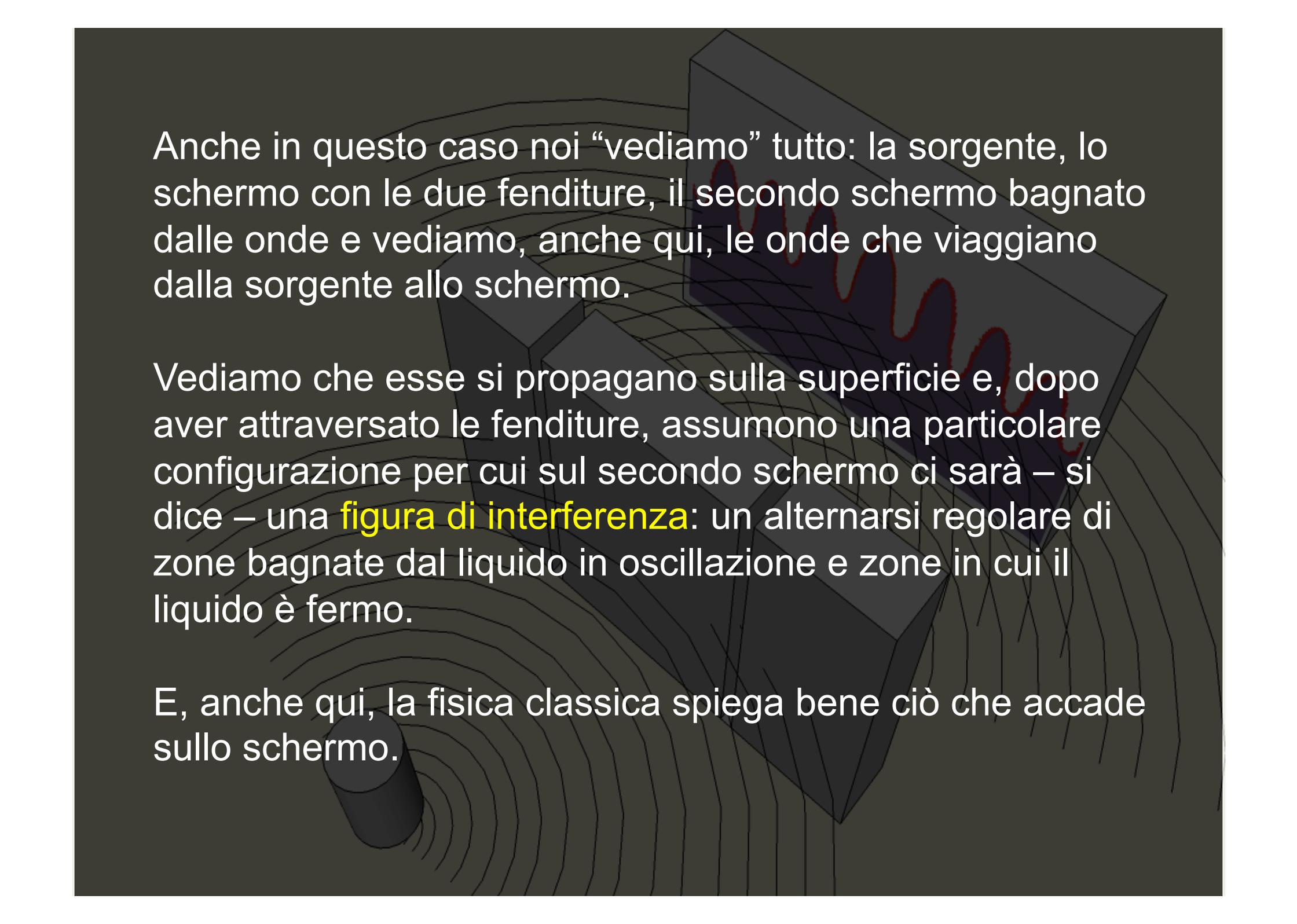
Abbiamo infatti le leggi del moto della meccanica classica che permettono di costruire la **traiettoria** di ogni pallina (conoscendo con quale velocità e in che direzione le palline sono sparate). Possiamo quindi spiegare perché quello che registriamo sul secondo schermo, dopo tanti lanci, sono due “immagini” delle fenditure.



Prendiamo adesso in considerazione il caso delle onde prodotte alla superficie di un liquido (una bacinella d'acqua).

onde alla superficie di
un liquido

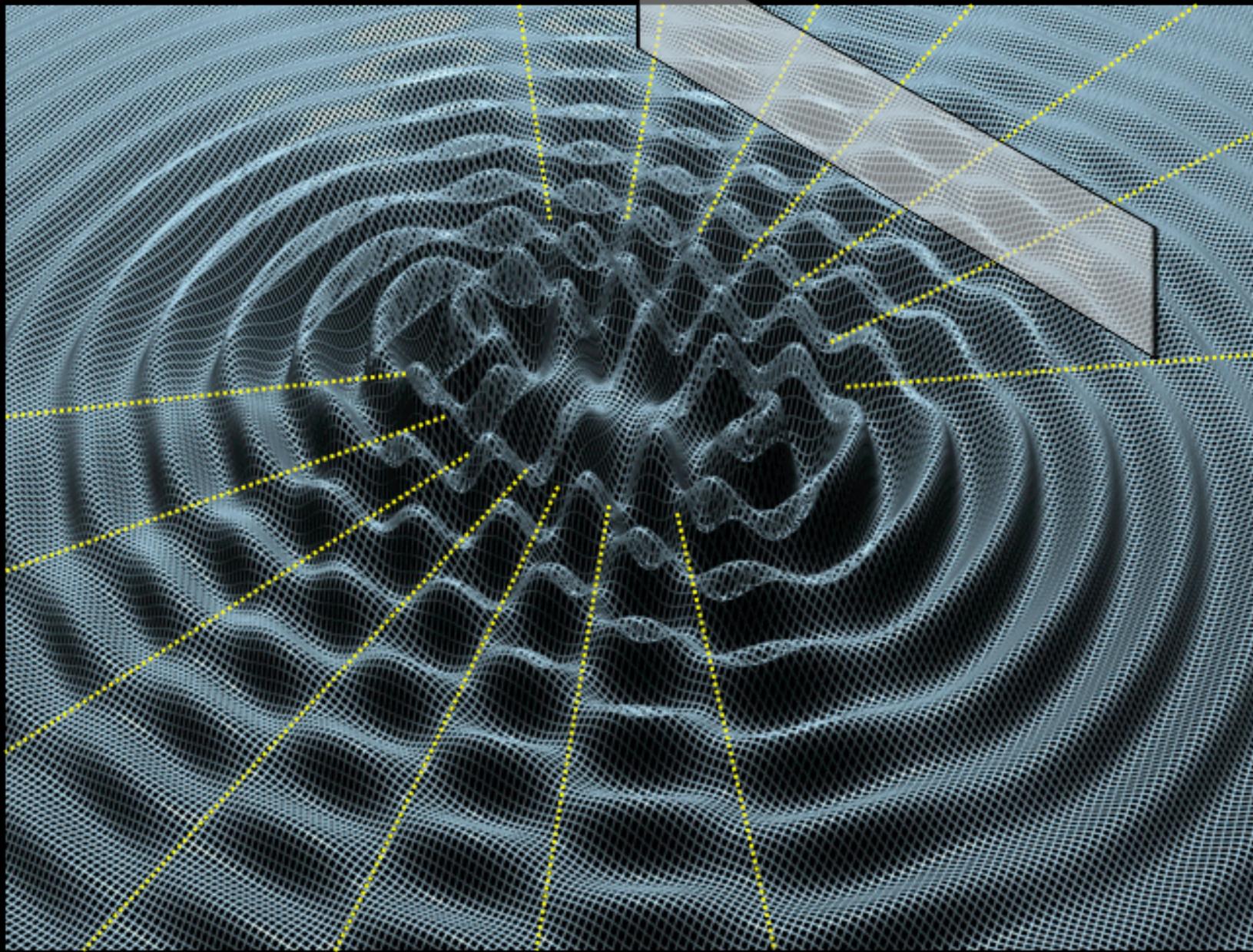


A diagram illustrating a double-slit interference experiment with water waves. A cylindrical source on the left emits concentric circular waves. These waves pass through two slits in a barrier. On the right, a second barrier with a screen shows the resulting wave pattern. A red line traces the wave amplitude on the screen, showing a central maximum and smaller side maxima, characteristic of an interference pattern. The text is overlaid on the diagram in white and yellow.

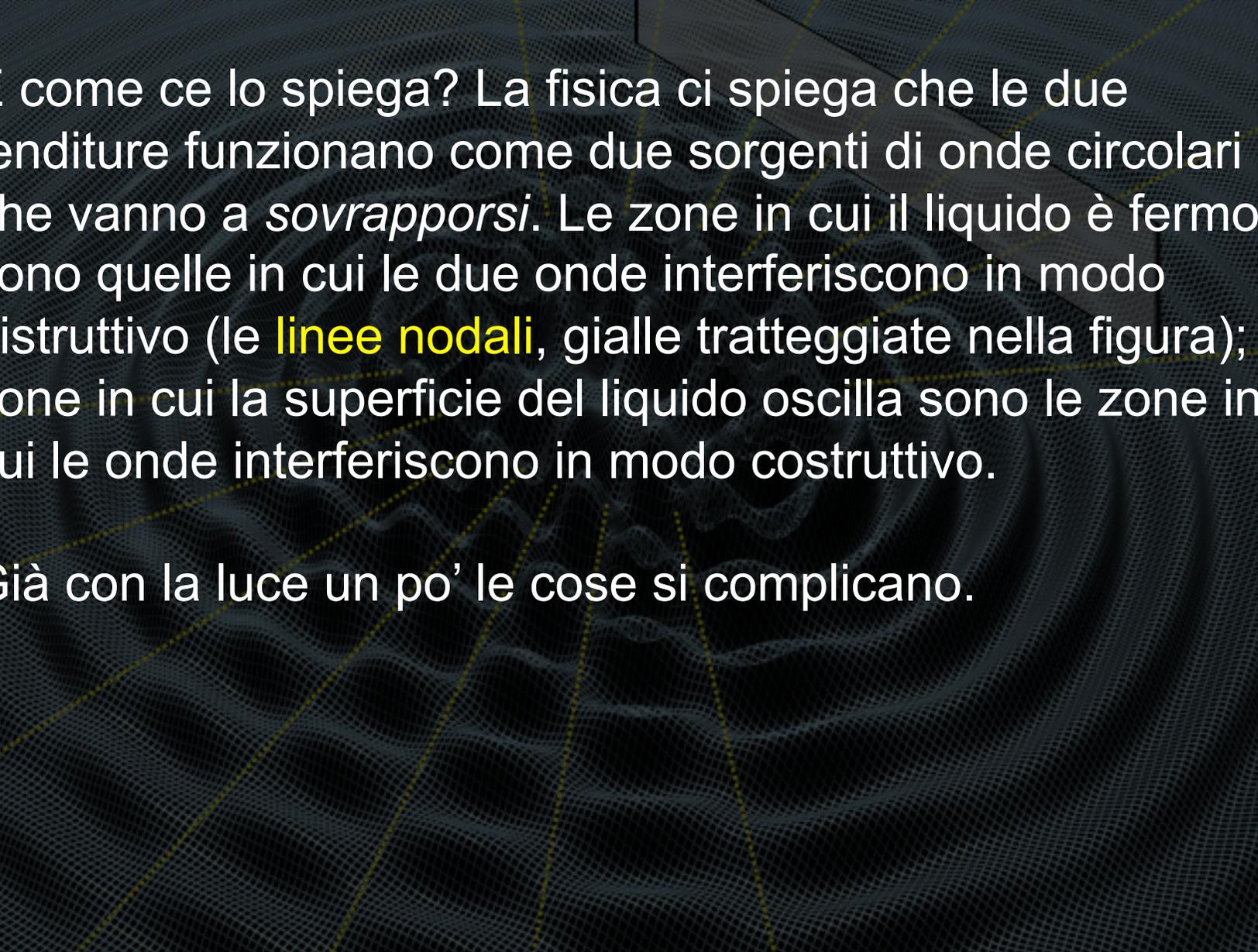
Anche in questo caso noi “vediamo” tutto: la sorgente, lo schermo con le due fenditure, il secondo schermo bagnato dalle onde e vediamo, anche qui, le onde che viaggiano dalla sorgente allo schermo.

Vediamo che esse si propagano sulla superficie e, dopo aver attraversato le fenditure, assumono una particolare configurazione per cui sul secondo schermo ci sarà – si dice – una **figura di interferenza**: un alternarsi regolare di zone bagnate dal liquido in oscillazione e zone in cui il liquido è fermo.

E, anche qui, la fisica classica spiega bene ciò che accade sullo schermo.



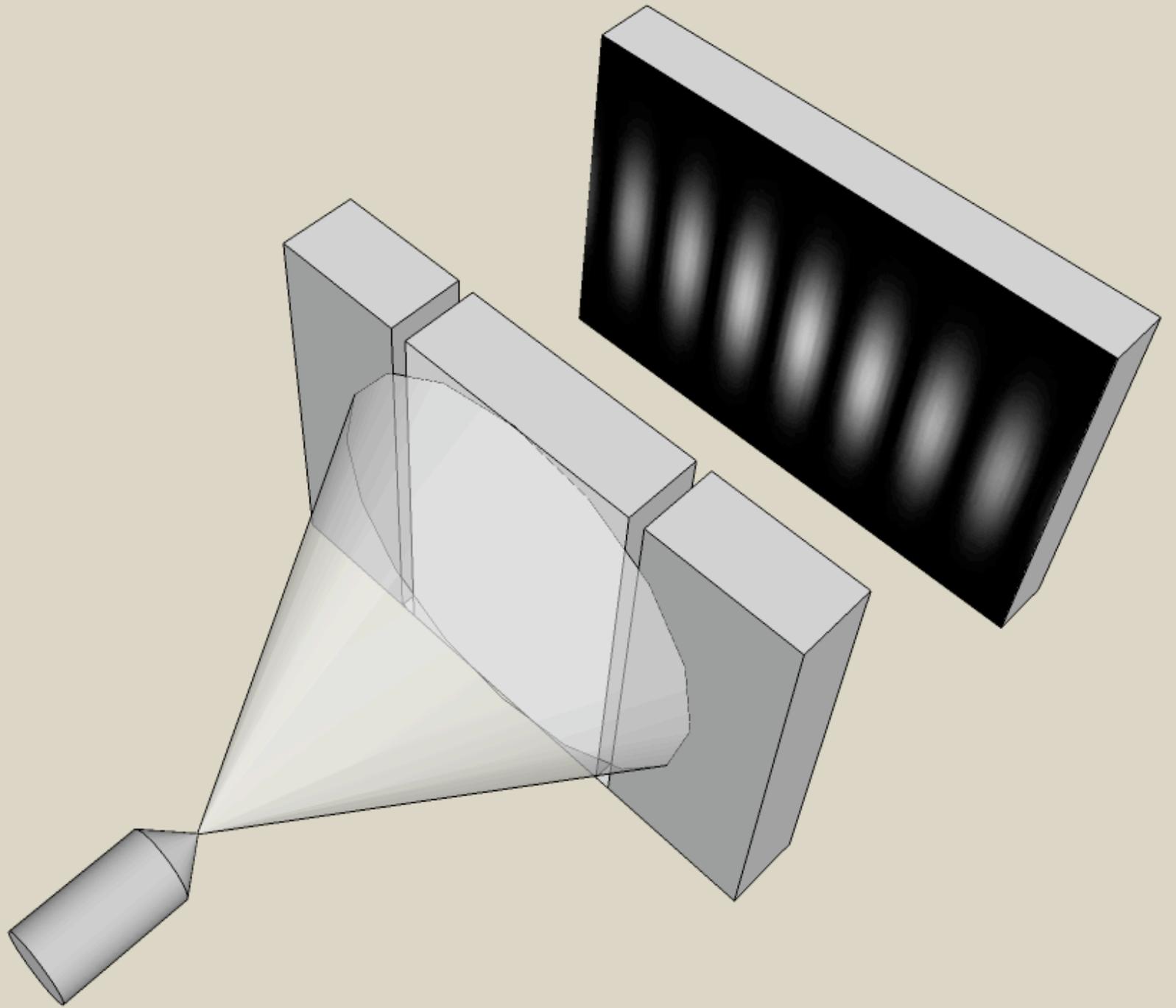
interferenza di due sorgenti di onde circolari

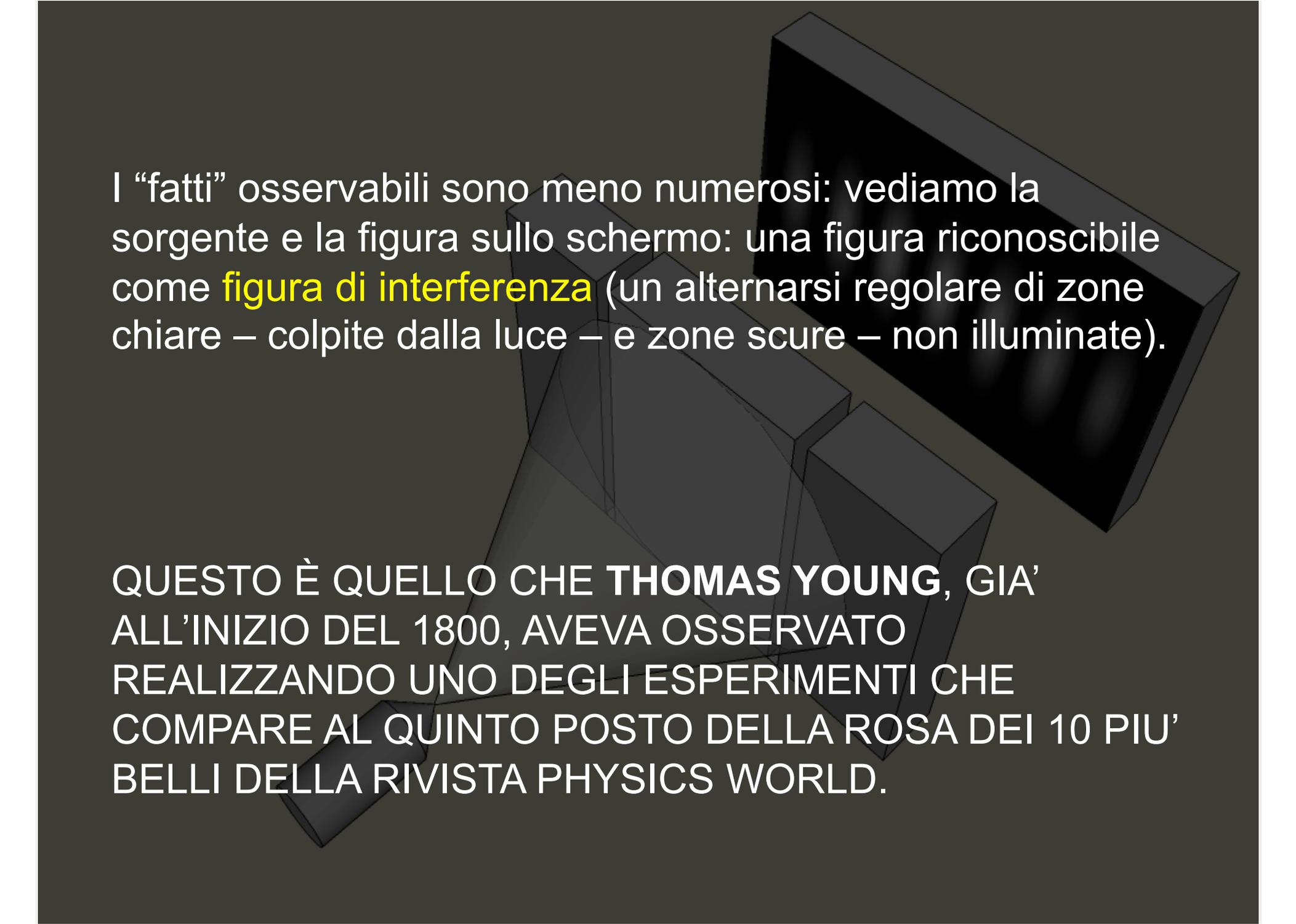


E come ce lo spiega? La fisica ci spiega che le due fenditure funzionano come due sorgenti di onde circolari che vanno a *sovrapporsi*. Le zone in cui il liquido è fermo sono quelle in cui le due onde interferiscono in modo distruttivo (le **linee nodali**, gialle tratteggiate nella figura); le zone in cui la superficie del liquido oscilla sono le zone in cui le onde interferiscono in modo costruttivo.

Già con la luce un po' le cose si complicano.

luce

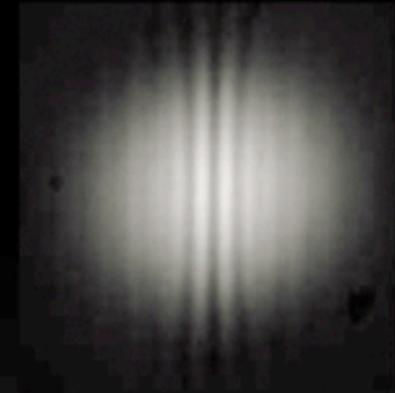




I “fatti” osservabili sono meno numerosi: vediamo la sorgente e la figura sullo schermo: una figura riconoscibile come **figura di interferenza** (un alternarsi regolare di zone chiare – colpite dalla luce – e zone scure – non illuminate).

QUESTO È QUELLO CHE **THOMAS YOUNG**, GIÀ' ALL'INIZIO DEL 1800, AVEVA OSSERVATO REALIZZANDO UNO DEGLI ESPERIMENTI CHE COMPARE AL QUINTO POSTO DELLA ROSA DEI 10 PIU' BELLI DELLA RIVISTA PHYSICS WORLD.

interferenza
della luce
(1803)



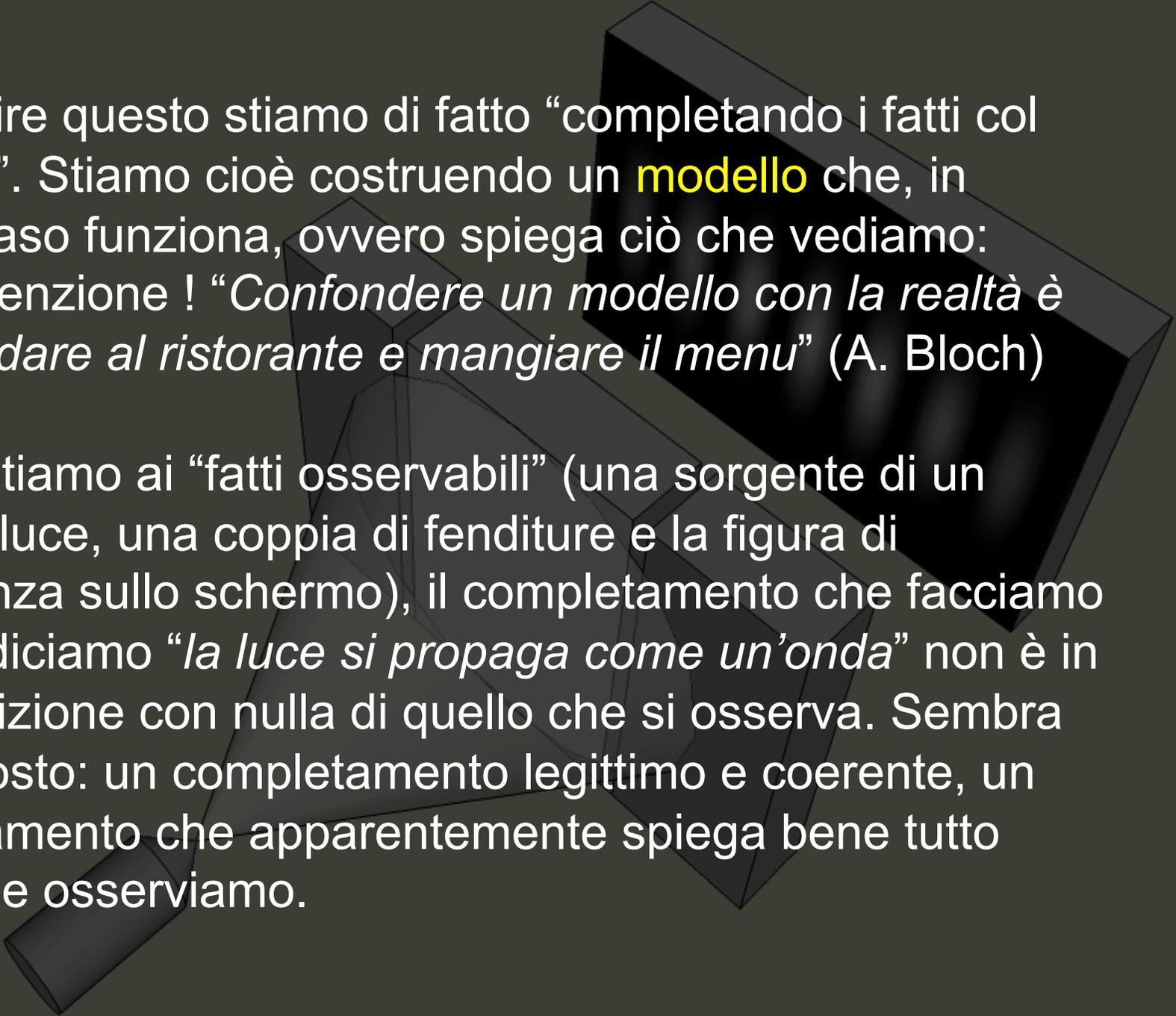
Thomas Young (1773-1829)

Dove sta la differenza con il caso delle onde nel liquido?

Qui NON vediamo la luce viaggiare e oscillare [a meno di non operare in un certo modo... ad esempio cospargendo l'ambiente di fumo... ma anche qui vedremmo effetti secondari, la luce che viene diffusa, non la luce che si propaga].

A rigore, di fronte ad una figura d'interferenza prodotta da un fascio di luce, non possiamo dire "*la luce è un'onda*".

Possiamo dire la "*luce si comporta come una onda*": ovvero, la luce, come un'onda, produce una figura d'interferenza.

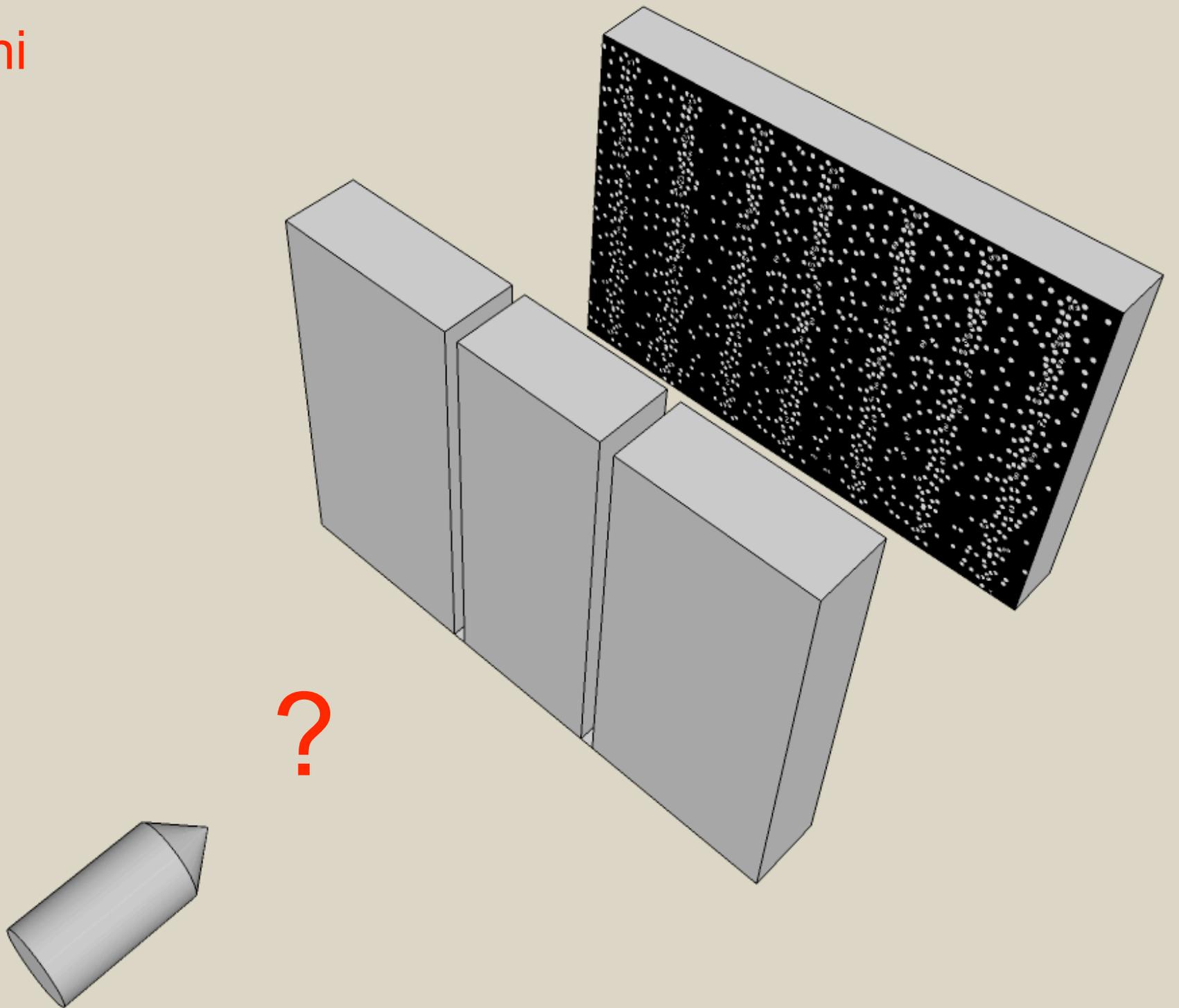


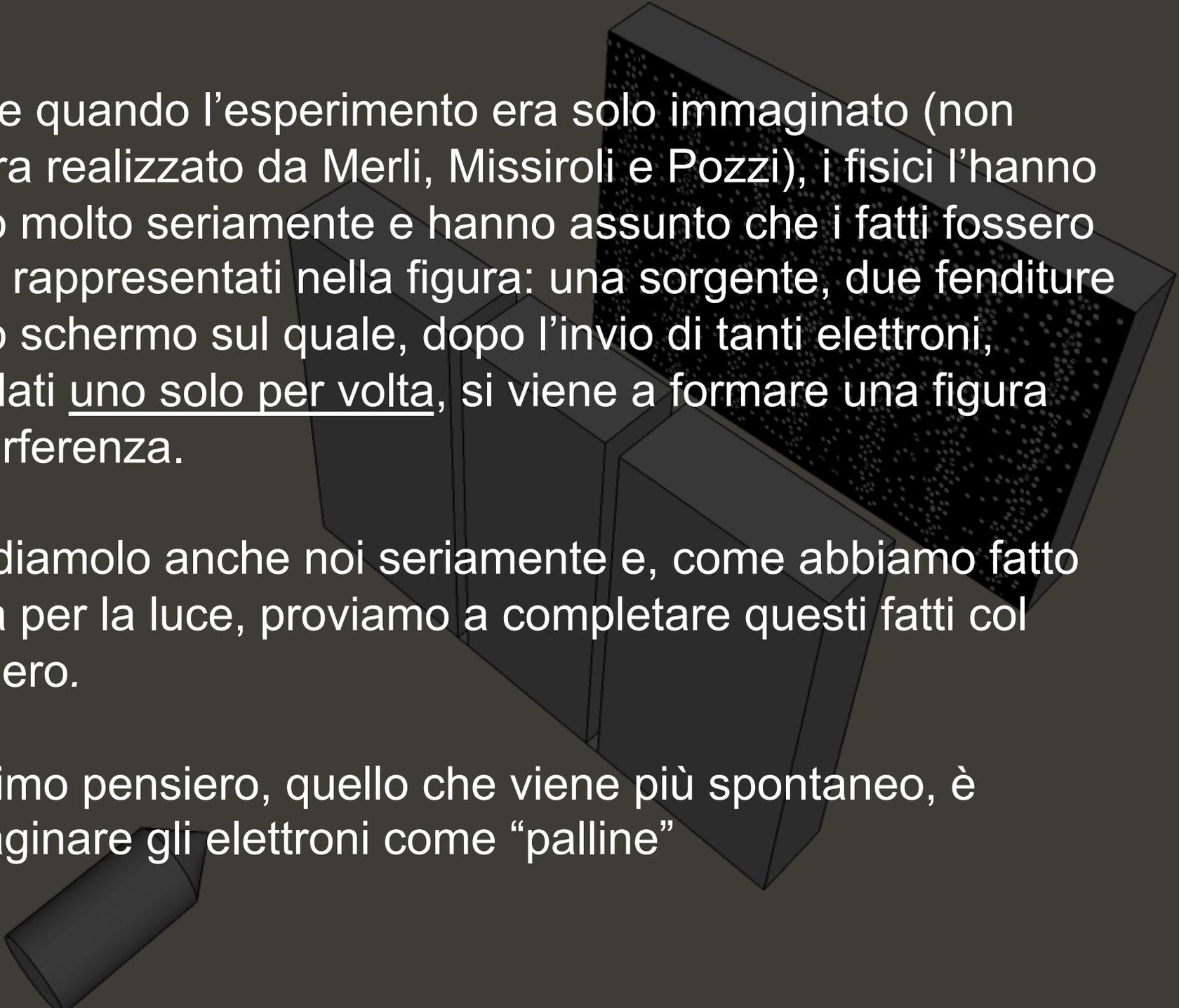
Ma nel dire questo stiamo di fatto “completando i fatti col pensiero”. Stiamo cioè costruendo un **modello** che, in questo caso funziona, ovvero spiega ciò che vediamo: ma ... attenzione ! *“Confondere un modello con la realtà è come andare al ristorante e mangiare il menu”* (A. Bloch)

Se ci limitiamo ai “fatti osservabili” (una sorgente di un fascio di luce, una coppia di fenditure e la figura di interferenza sullo schermo), il completamento che facciamo quando diciamo *“la luce si propaga come un’onda”* non è in contraddizione con nulla di quello che si osserva. Sembra tutto a posto: un completamento legittimo e coerente, un completamento che apparentemente spiega bene tutto quello che osserviamo.

Passiamo ora agli elettroni e occupiamoci dell'esperimento nella sua versione di **esperimento mentale**, esperimento cioè pensato (o, come viene anche chiamato con termine tedesco, *gedanken experiment*).

elettroni

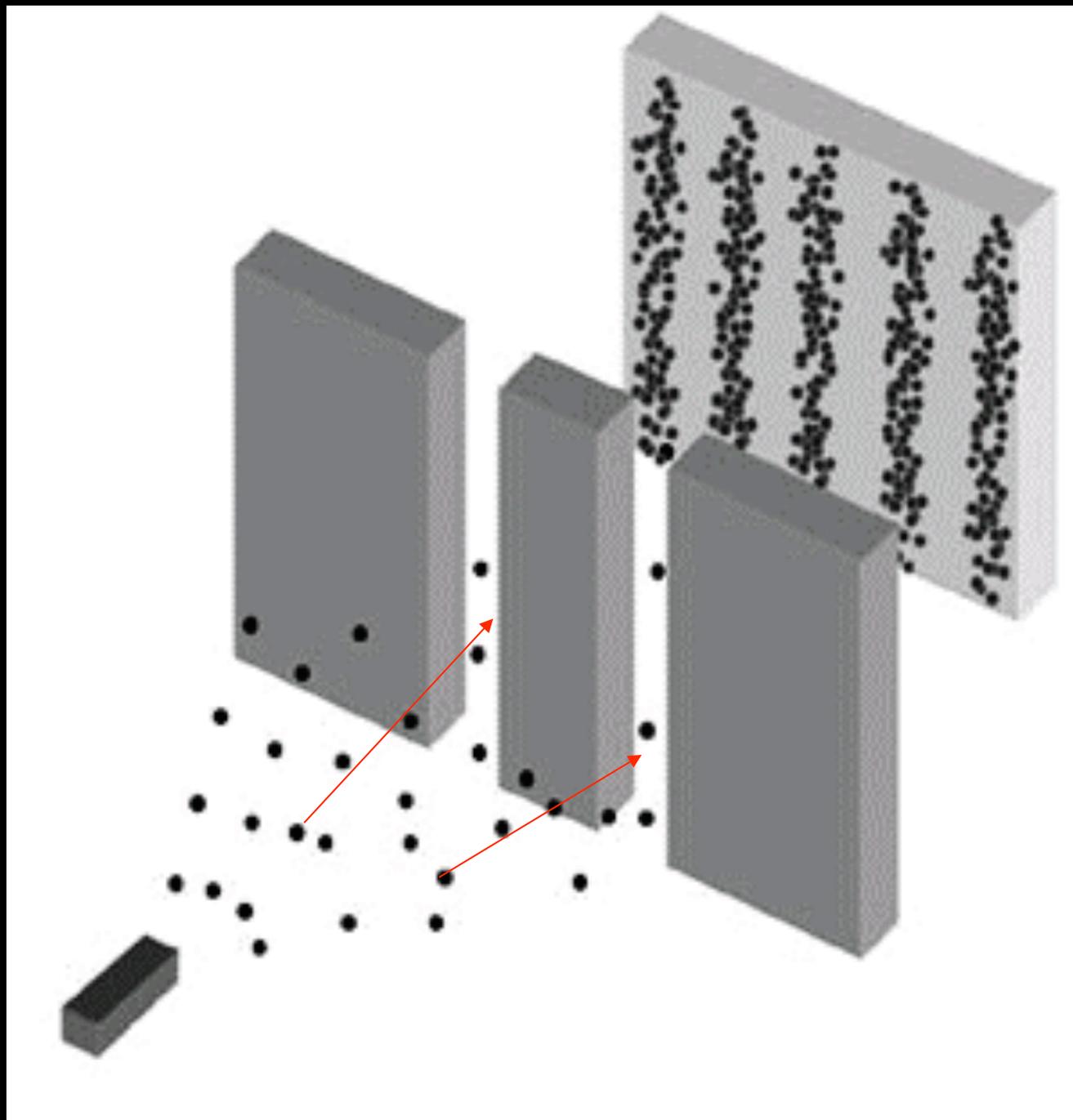




Anche quando l'esperimento era solo immaginato (non ancora realizzato da Merli, Missiroli e Pozzi), i fisici l'hanno preso molto seriamente e hanno assunto che i fatti fossero quelli rappresentati nella figura: una sorgente, due fenditure e uno schermo sul quale, dopo l'invio di tanti elettroni, mandati uno solo per volta, si viene a formare una figura d'interferenza.

Prendiamolo anche noi seriamente e, come abbiamo fatto prima per la luce, proviamo a completare questi fatti col pensiero.

- il primo pensiero, quello che viene più spontaneo, è immaginare gli elettroni come "palline"



Questa è l'immagine che viene subito in mente quando si pensa agli elettroni nei modelli planetari dell'atomo rappresentati in molti libri sia di fisica sia di chimica. In questi modelli gli elettroni sono i piccolissimi "*pezzetti di materia*" (come li ha definiti il Dr. Quantum) che orbitano intorno al nucleo dell'atomo fatto di protoni e neutroni.

Proviamo dunque a pensare che gli elettroni siano palline libere, estratte dagli atomi della materia, che seguono **traiettorie**, analoghe a quelle seguite dalle palline di prima ...

...si capisce facilmente che l'immagine che ci dà questo modello è troppo semplicistica... non funziona.

O meglio, funziona per spiegare il puntino lasciato da ogni elettrone quando colpisce lo schermo, ma non per spiegarci perché sullo schermo si forma una figura d'interferenza, perché cioè si abbia una serie regolare di strisce chiare dove gli elettroni arrivano e strisce scure dove non arrivano mai (le palline, lo abbiamo visto prima, dovrebbero formare sullo schermo semplicemente le immagini delle due fenditure).

Come fa una pallina a formare una figura d'interferenza?
Con cosa interferisce ogni singolo elettrone? **Dirac**, diceva, "*interferisce con sè stesso*". Ma cosa significa?

Conclusione: l'immagine dell'elettrone come **particella (pallina) che segue una traiettoria** porta a situazioni paradossali, come queste.

incrocio quantistico
portarsi su entrambe
le corsie

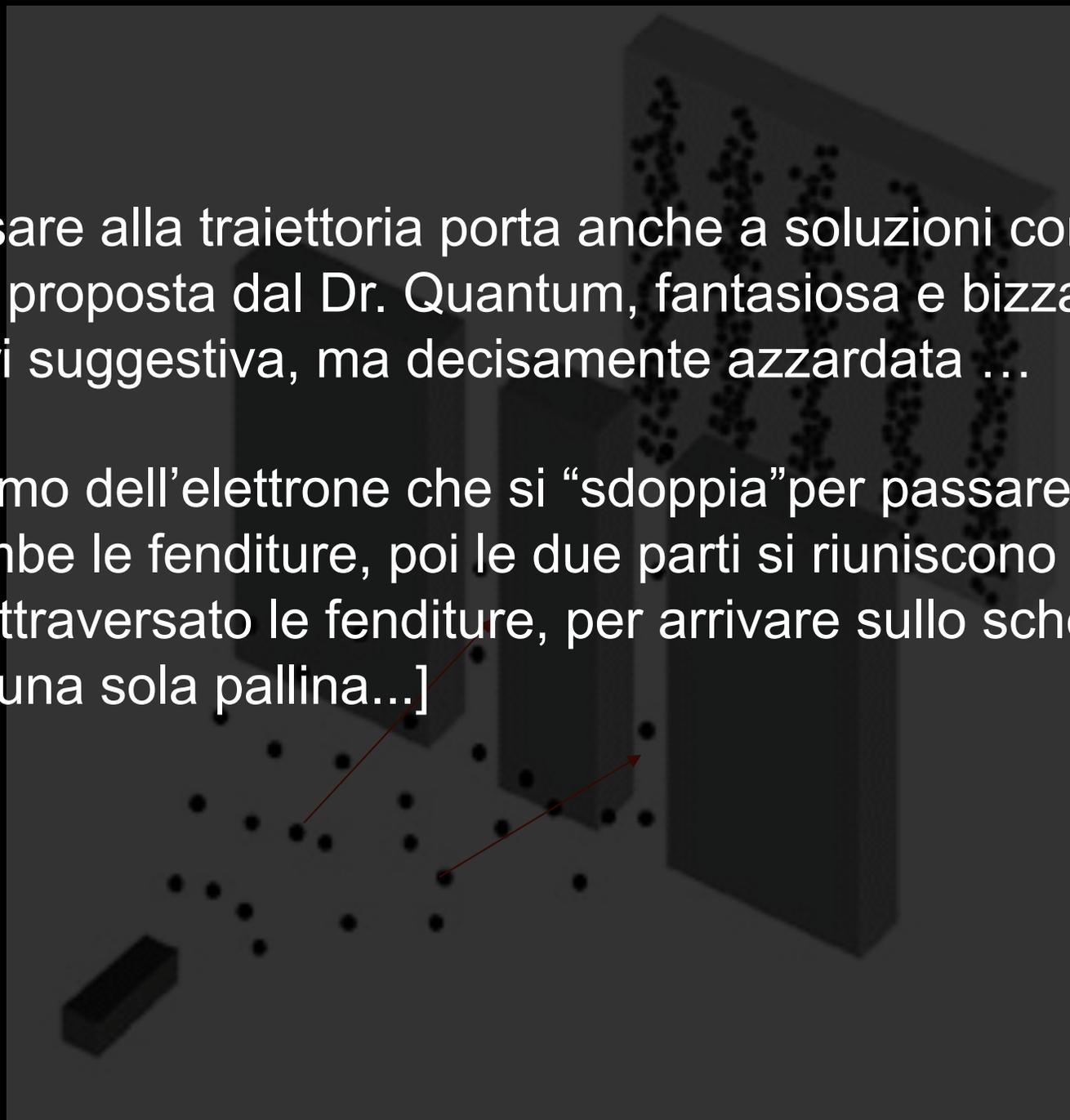


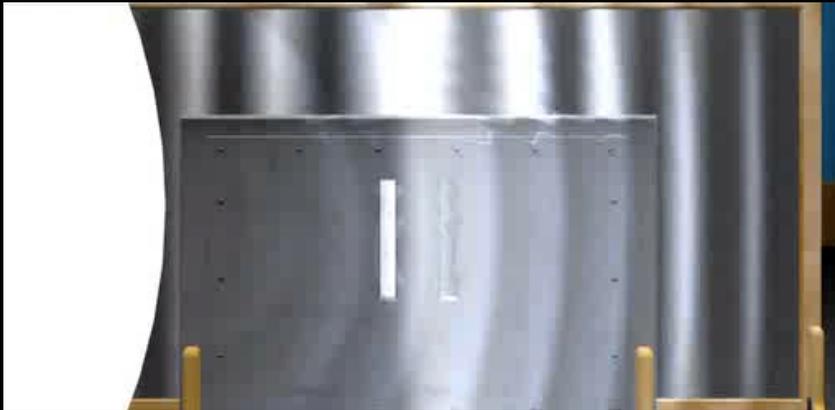


lo sciatore quantico

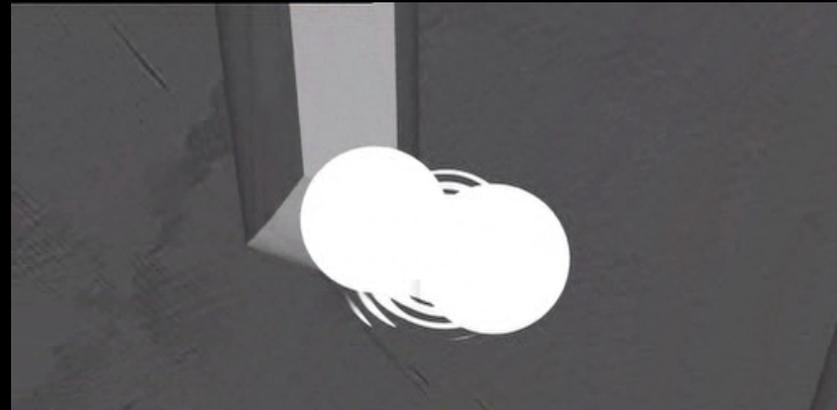
Il pensare alla traiettoria porta anche a soluzioni come quella proposta dal Dr. Quantum, fantasiosa e bizzarra, magari suggestiva, ma decisamente azzardata ...

[parliamo dell'elettrone che si "sdoppia" per passare da entrambe le fenditure, poi le due parti si riuniscono dopo aver attraversato le fenditure, per arrivare sullo schermo come una sola pallina...]





ciascun elettrone parte come una particella



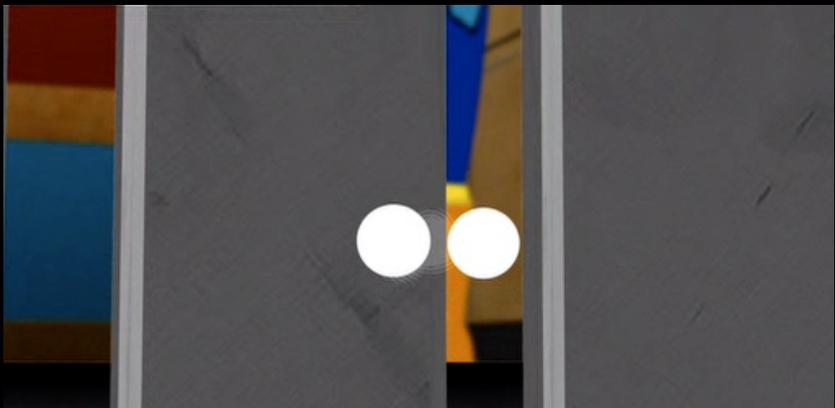
ciascun elettrone parte come una particella



diventa un'onda di potenziale, passa attraverso entrambe le fenditure



e interferisce con sè stesso per colpire il muro come una particella

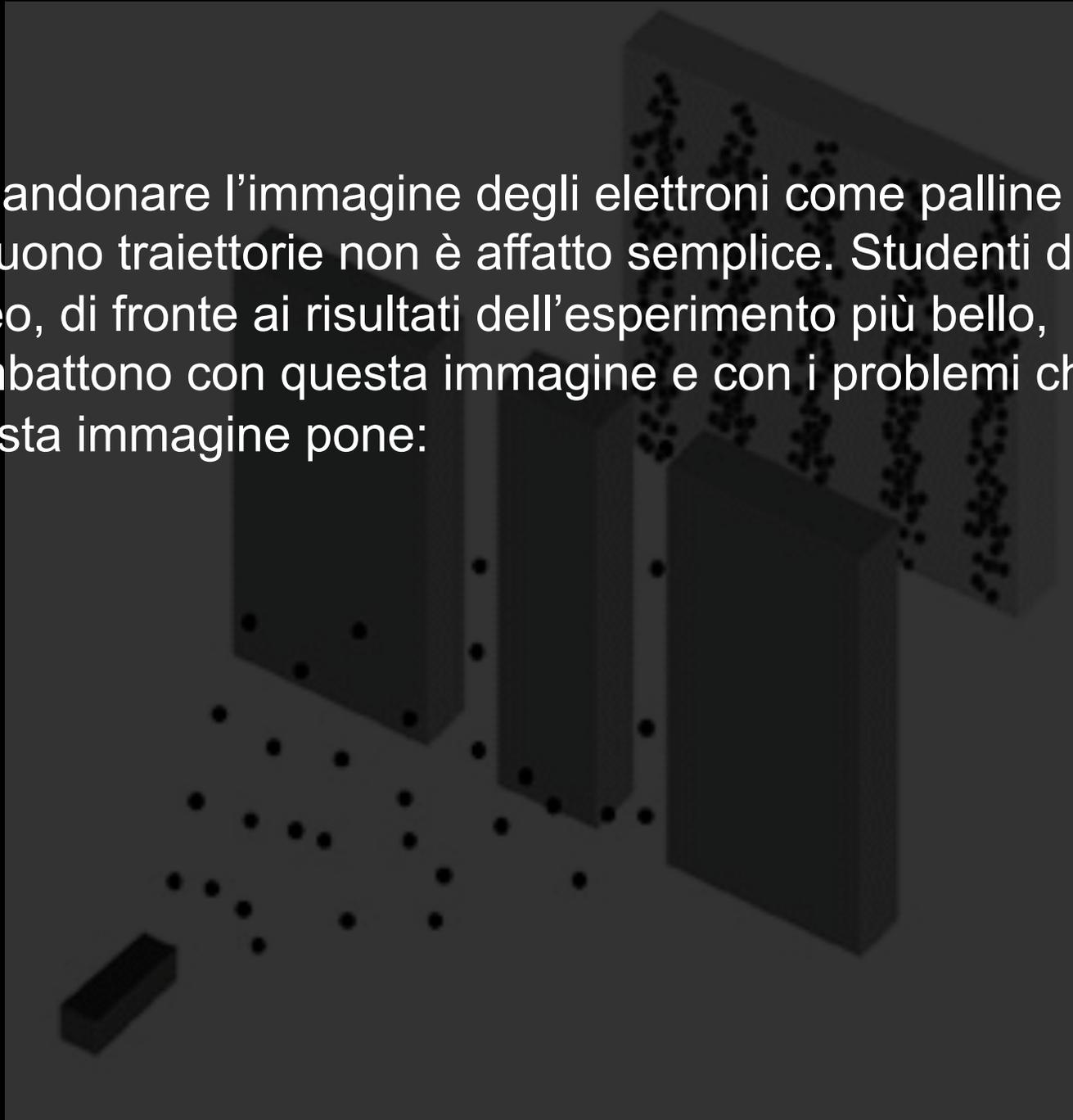


e interferisce con sè stesso per colpire il muro come una particella



e interferisce con sè stesso per colpire il muro come una particella

Abbandonare l'immagine degli elettroni come palline che seguono traiettorie non è affatto semplice. Studenti di Liceo, di fronte ai risultati dell'esperimento più bello, combattono con questa immagine e con i problemi che questa immagine pone:



“Non è possibile che una particella sia contemporaneamente in due punti distinti e riesca ad interferire con se stessa, o è a destra o è a sinistra.” (Matteo)

“Ma ci sarà qualcosa che passa attraverso le due fenditure, o un quanto enorme, o un quanto spaccato a metà.” (Alessandro)

“Quello che non riesco a capire è, anche se io non riesco a vederlo ci sarà qualcosa che si muove, che ha un certo comportamento, che so che si trova a destra o a sinistra. Invece sembra di no!” (Chiara)

Proviamo adesso ad immaginare gli elettroni come onde.



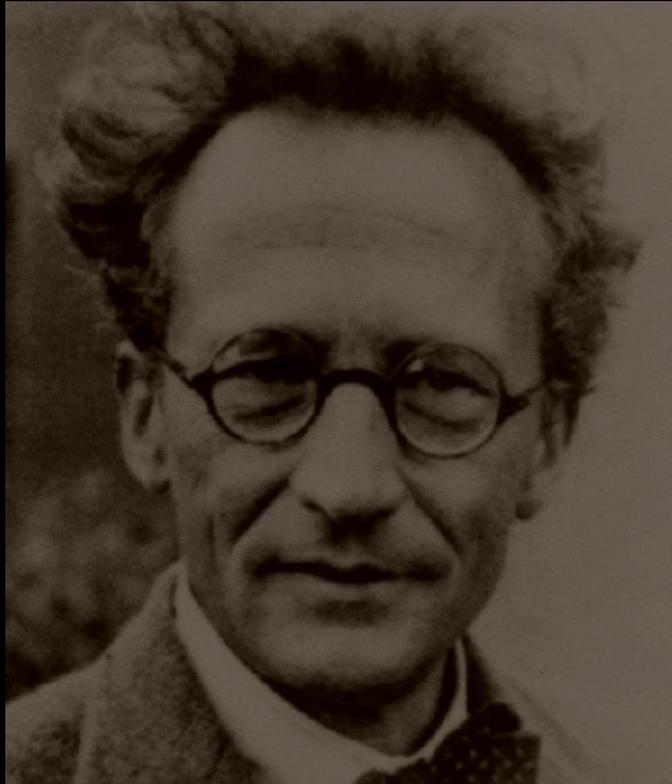
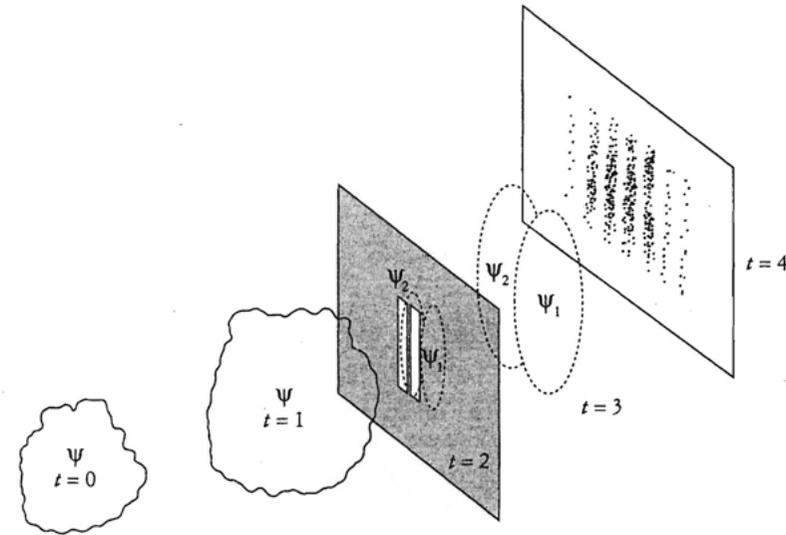


Figura 35.

Una «nube» di funzione d'onda ψ che si avvicina a due fessure ($t = 0$ e $t = 1$), le attraversa, si divide in due ($t = 2$), si espande e si sovrappone ($t = 3$) e urta lo schermo ($t = 4$).



“Non si deve attaccare alcun significato speciale al cammino dell’elettrone... e ancor meno alla posizione di un elettrone nel suo cammino.... l’onda...non solo riempie tutto il cammino simultaneamente, ma si estende addirittura notevolmente in tutte le direzioni.” (E. Schrödinger)

Già questa immagine sembra più ricca... quanto meno riesce a spiegare la figura d'interferenza.

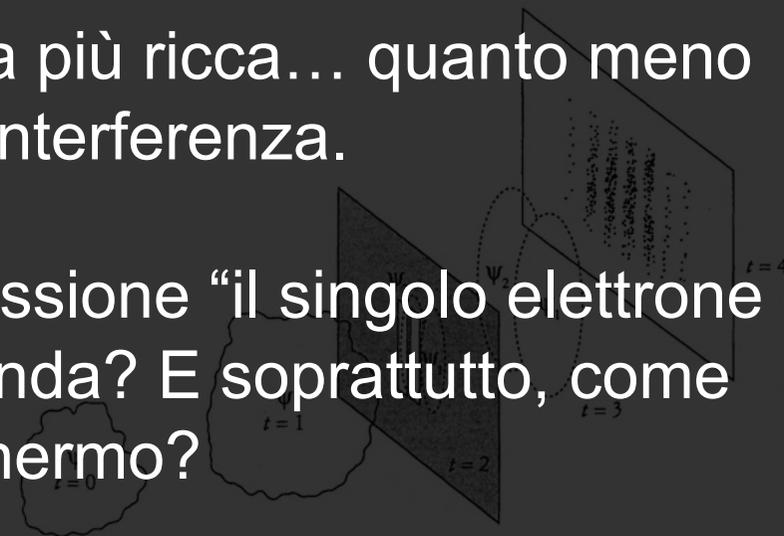
Ma che cosa significa l'espressione "il singolo elettrone è un'onda"? Che cos'è quest'onda? E soprattutto, come spieghiamo i puntini sullo schermo?

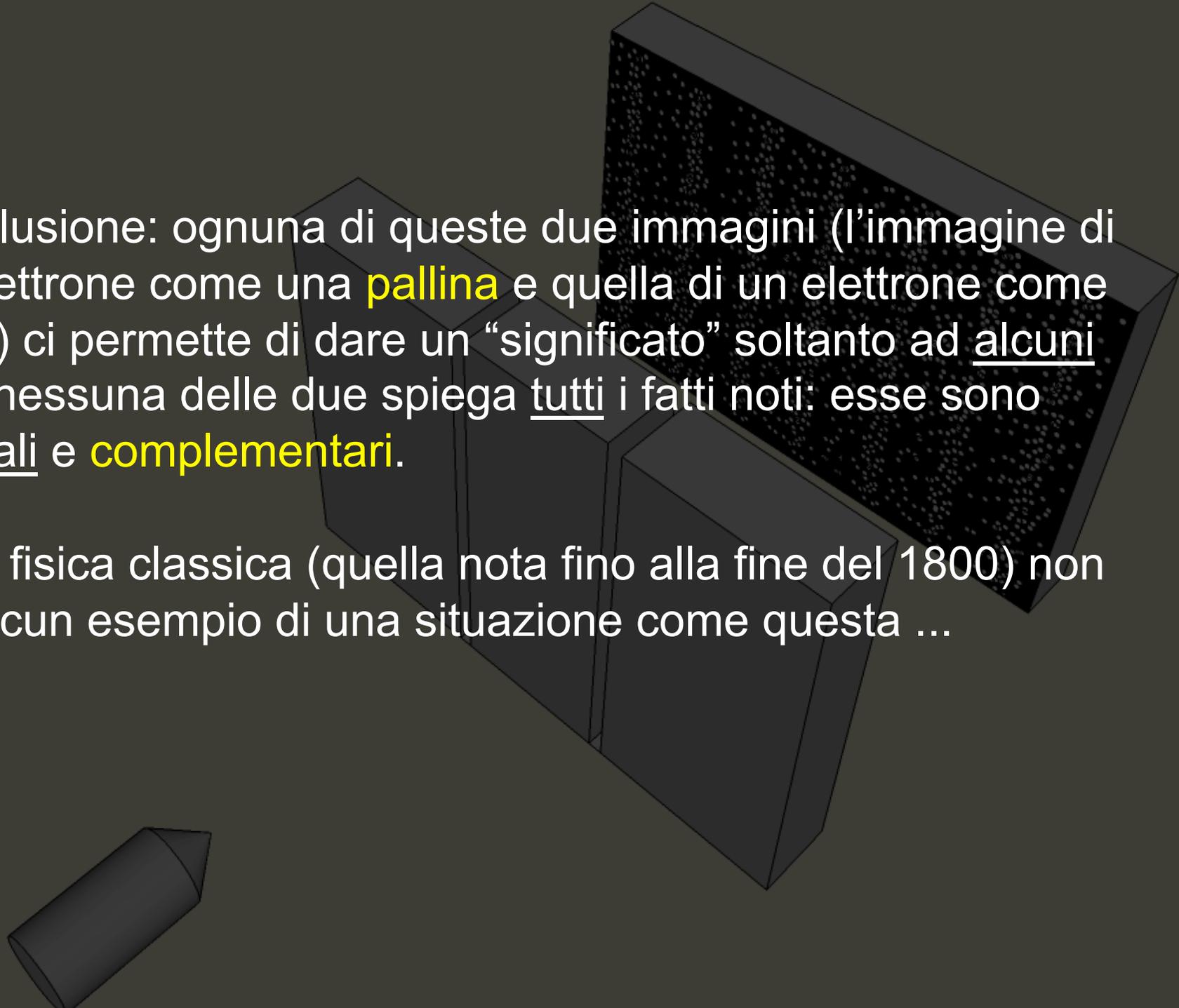
Anche il pensare all'onda non ci permette di completare con il pensiero *tutti* i fatti osservati...

"Non si deve attaccare alcun significato speciale al cammino dell'elettrone... e ancor meno alla posizione di un elettrone nel suo cammino.... l'onda...non solo riempie tutto il cammino simultaneamente, ma si estende addirittura notevolmente in tutte le direzioni." (E. Schrödinger)

Figura 35.

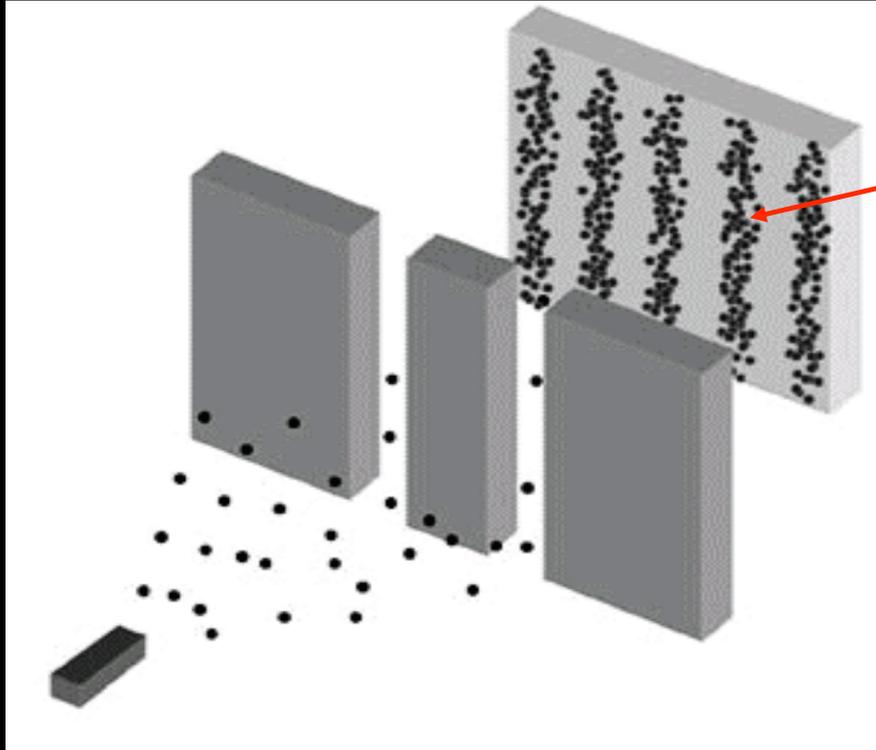
Una «nube» di funzione d'onda ψ che si avvicina a due fessure ($t = 0$ e $t = 1$), le attraversa, si divide in due ($t = 2$), si espande e si sovrappone ($t = 3$) e urta lo schermo ($t = 4$).





Conclusione: ognuna di queste due immagini (l'immagine di un elettrone come una **pallina** e quella di un elettrone come **onda**) ci permette di dare un “significato” soltanto ad alcuni fatti: nessuna delle due spiega tutti i fatti noti: esse sono parziali e **complementari**.

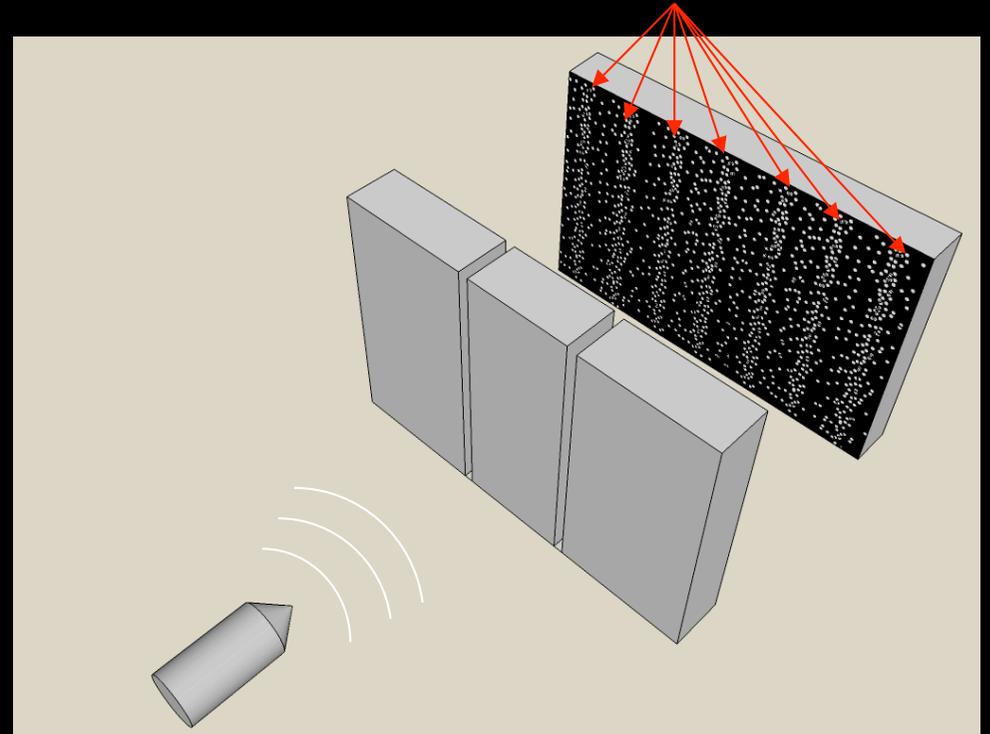
Nella fisica classica (quella nota fino alla fine del 1800) non c'è alcun esempio di una situazione come questa ...



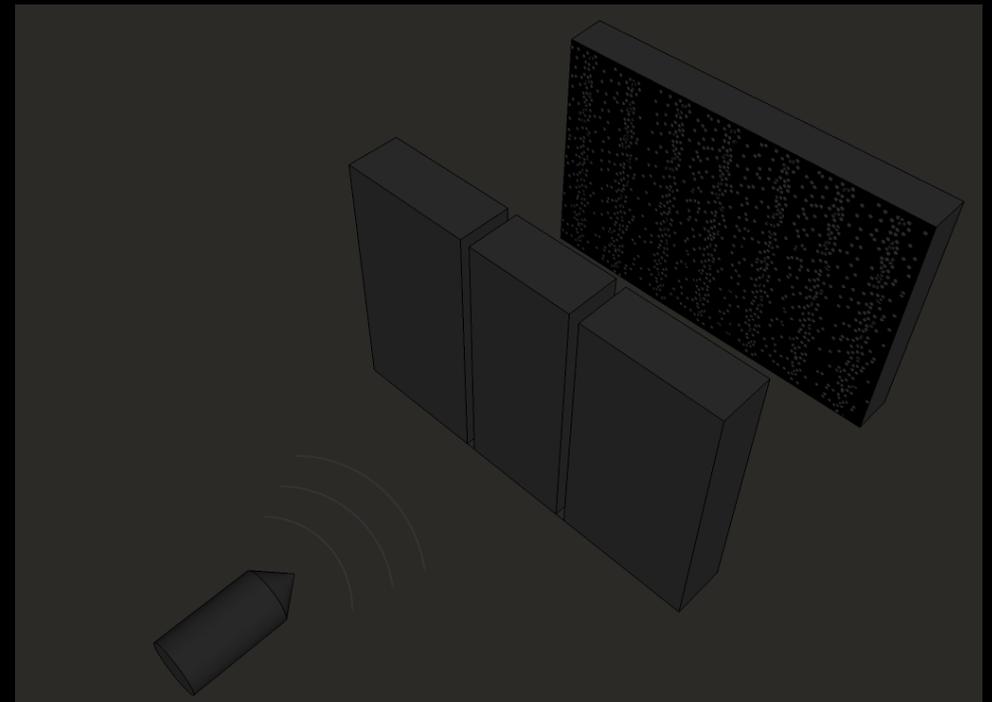
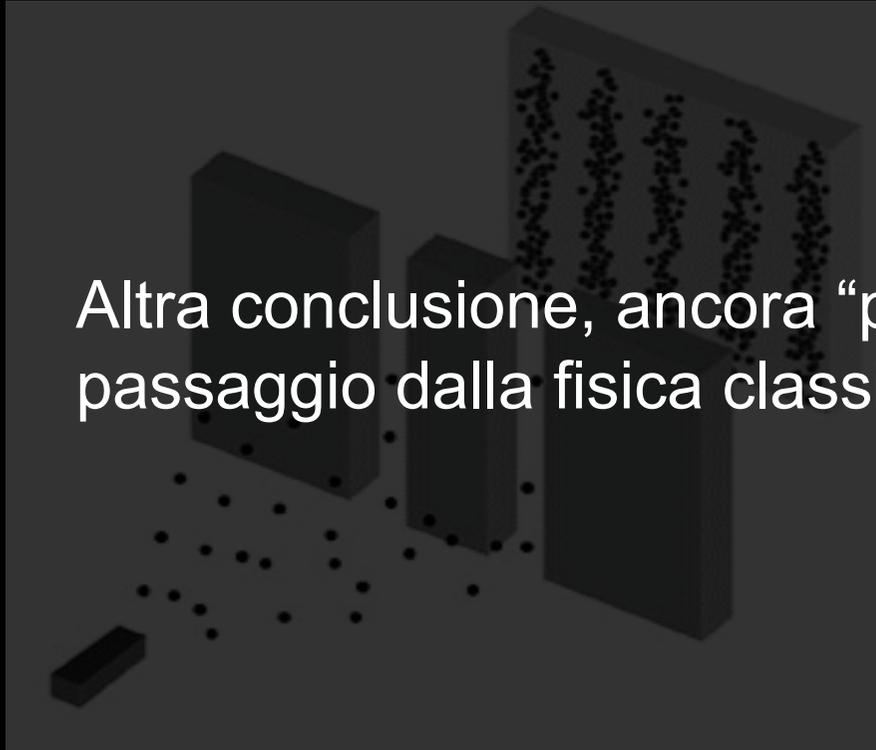
particelle (puntini)

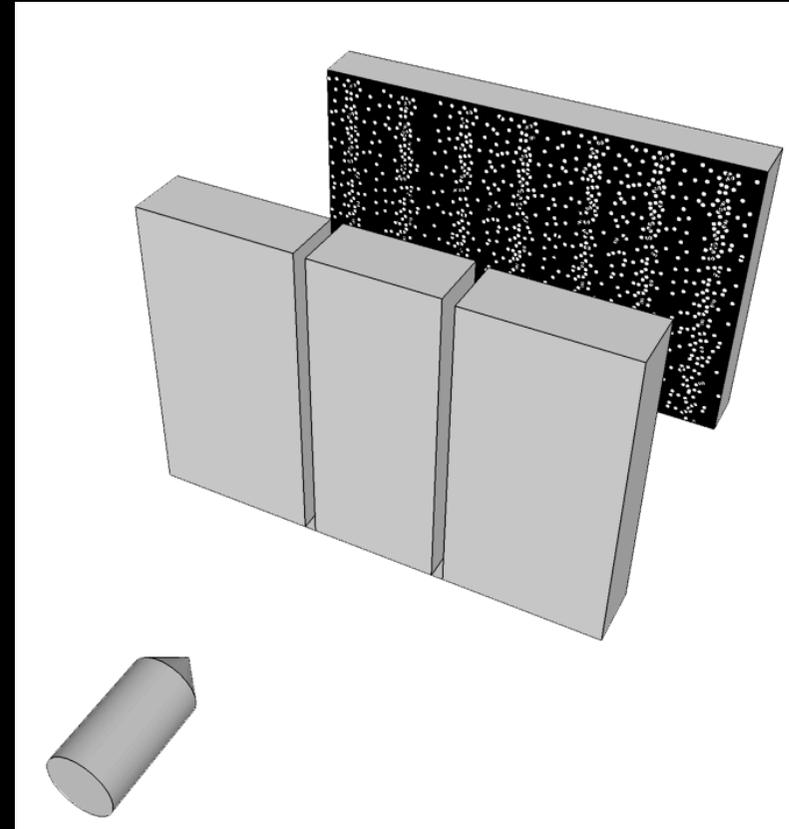
Immagini “complementari”

onde (strisce di interferenza)

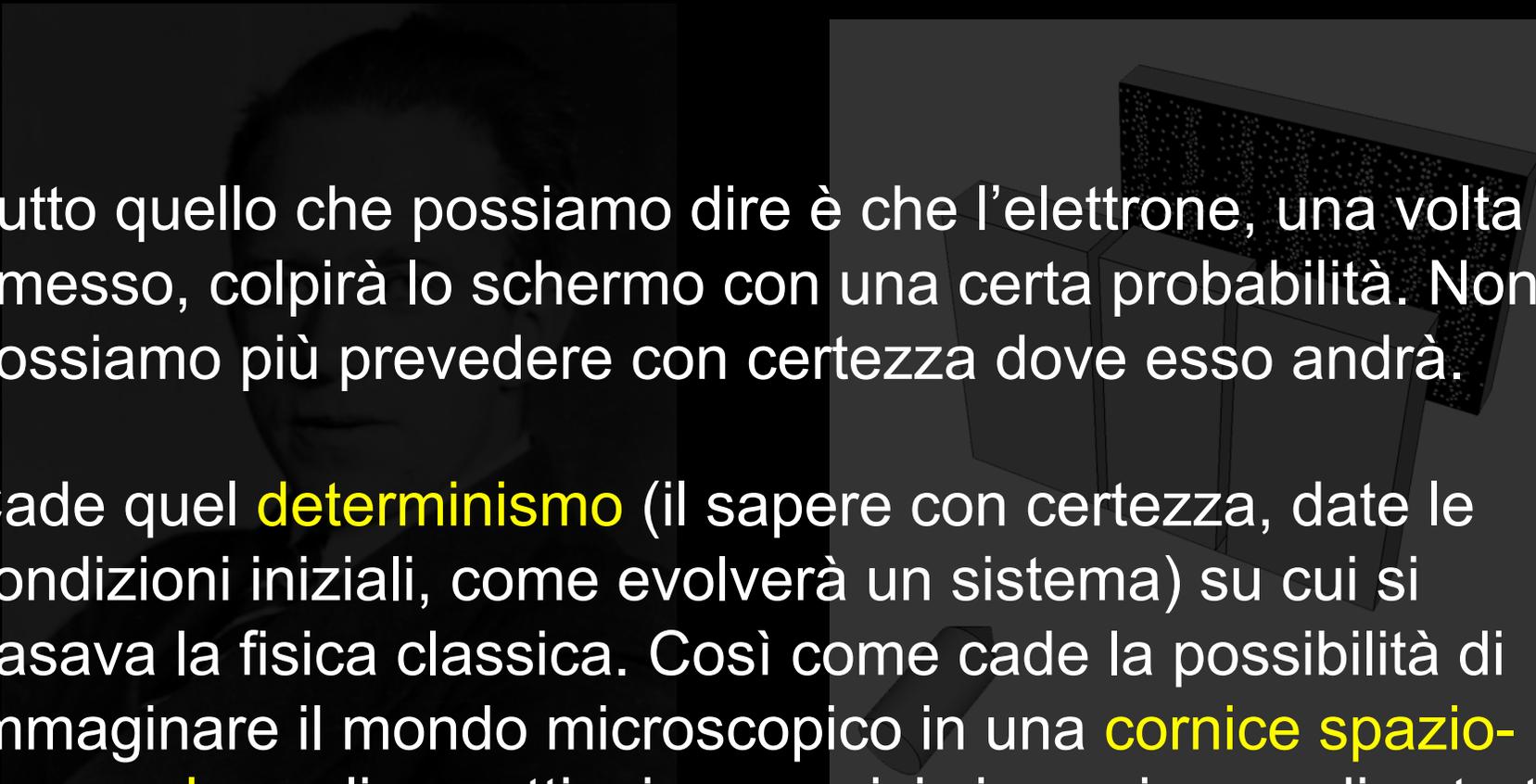


Altra conclusione, ancora “più drammatica”, che segna il passaggio dalla fisica classica alla fisica contemporanea ...





“Non esiste assolutamente alcuna possibilità di descrivere ciò che accade tra due osservazioni consecutive. Può essere certo allettante dire che l'elettrone deve essere stato in qualche posto fra le due osservazioni e che perciò deve aver descritto un certo percorso, o un'orbita, anche se può risultare impossibile sapere quale sia.” (W. Heisenberg)



Tutto quello che possiamo dire è che l'elettrone, una volta emesso, colpirà lo schermo con una certa probabilità. Non possiamo più prevedere con certezza dove esso andrà.

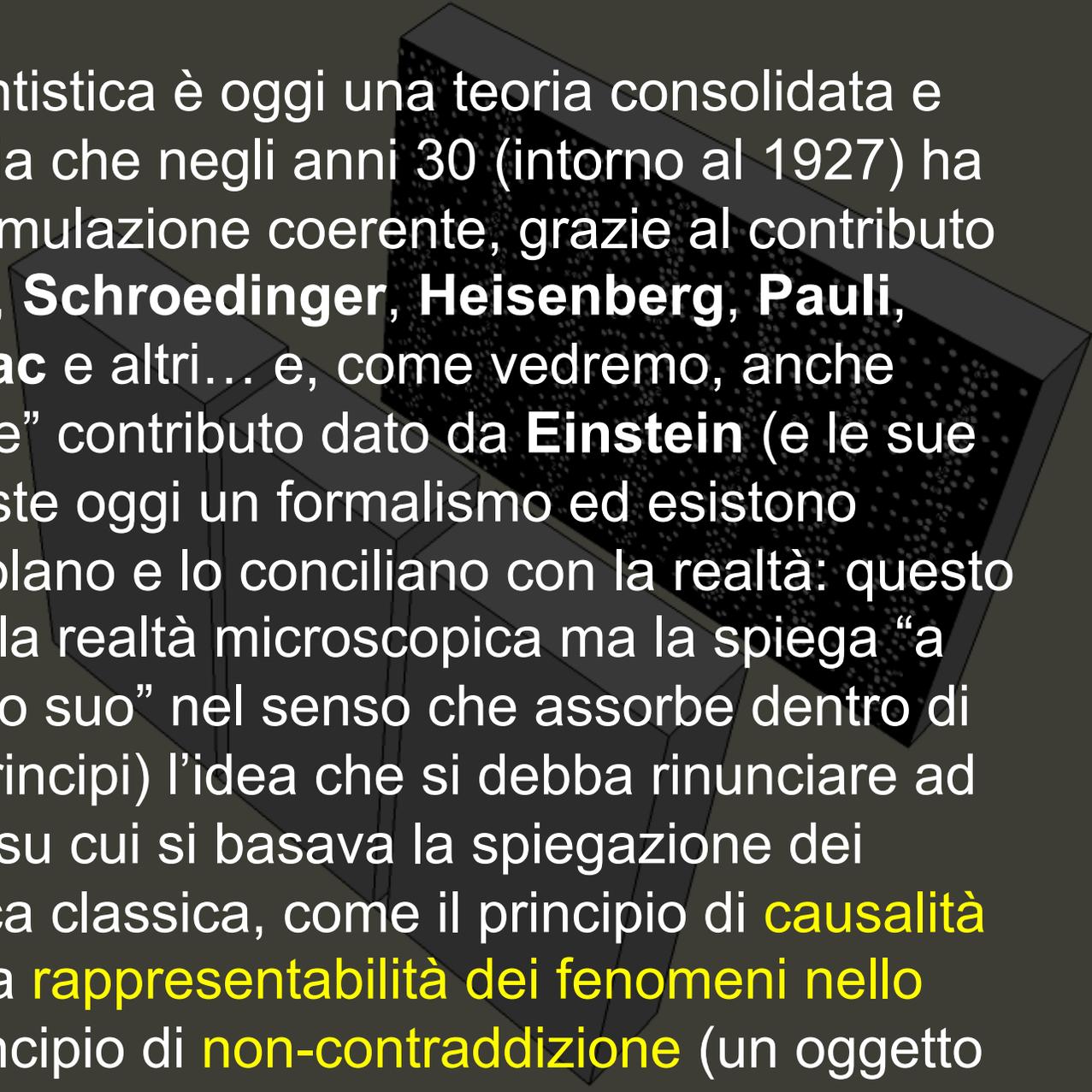
Cade quel **determinismo** (il sapere con certezza, date le condizioni iniziali, come evolverà un sistema) su cui si basava la fisica classica. Così come cade la possibilità di immaginare il mondo microscopico in una **cornice spazio-temporale**... gli oggetti microscopici vivono in mondi astratti.

E QUESTO LASCIA UN PO' ESTERREFATTI...

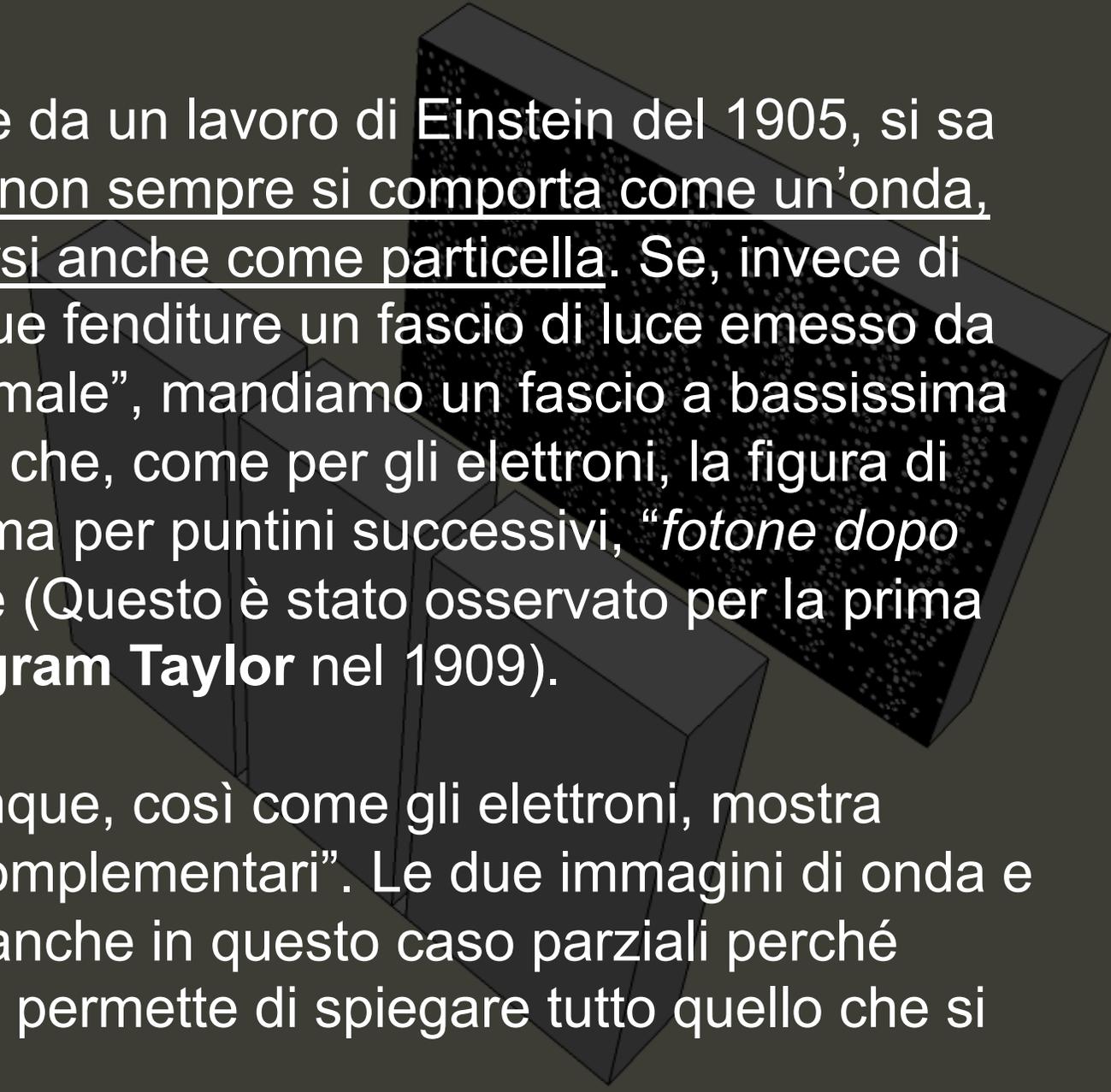
“Non esiste assolutamente alcuna possibilità di descrivere ciò che accade tra due osservazioni consecutive. Può essere certo allettante dire che l'elettrone deve essere stato in qualche posto fra le due osservazioni e che perciò deve aver descritto un certo percorso, o un'orbita, anche se può risultare impossibile sapere quale sia.” (W. Heisenberg)

“[...] era tutto così chiaro fino a prima che ora sono confuso... ma è possibile che cambino le leggi solo perché faccio un cambio la scala? Forse si deve aspettare che arrivi un altro Newton che faccia rientrare tutto in un'unica legge, come per la gravità” (Marco)

“Secondo me qui bisogna che gli scienziati si diano una mossa, perché non hanno ancora scoperto tutto. Per ora hanno creato solo una grande confusione, manca qualcosa, questa è l'unica spiegazione, che ancora dobbiamo scoprire per riuscire a spiegare quello che succede” (Tiago)



La meccanica quantistica è oggi una teoria consolidata e accettata: una teoria che negli anni 30 (intorno al 1927) ha trovato una sua formulazione coerente, grazie al contributo di molti fisici, **Bohr, Schroedinger, Heisenberg, Pauli, Jordan, Born, Dirac** e altri... e, come vedremo, anche grazie allo “speciale” contributo dato da **Einstein** (e le sue critiche acute). Esiste oggi un formalismo ed esistono assiomi che lo regolano e lo conciliano con la realtà: questo formalismo spiega la realtà microscopica ma la spiega “a modo suo”, “a modo suo” nel senso che assorbe dentro di sé (elevandola a principi) l’idea che si debba rinunciare ad alcuni presupposti su cui si basava la spiegazione dei fenomeni della fisica classica, come il principio di **causalità** (il **determinismo**), la **rappresentabilità dei fenomeni nello spaziotempo**, il principio di **non-contraddizione** (un oggetto o è una cosa o un’altra).



Oltretutto, a partire da un lavoro di Einstein del 1905, si sa che anche la luce non sempre si comporta come un'onda, ma può comportarsi anche come particella. Se, invece di mandare contro due fenditure un fascio di luce emesso da una sorgente “normale”, mandiamo un fascio a bassissima intensità, succede che, come per gli elettroni, la figura di interferenza si forma per puntini successivi, “*fotone dopo fotone*”, si usa dire (Questo è stato osservato per la prima volta **Geoffrey Ingram Taylor** nel 1909).

Anche la luce, dunque, così come gli elettroni, mostra comportamenti “complementari”. Le due immagini di onda e di particella sono anche in questo caso parziali perché nessuna delle due permette di spiegare tutto quello che si osserva.

La fisica, si è dunque “data una mossa” e ha prodotto teorie come la **meccanica quantistica**, raffinatissime dal punto di vista formale, per spiegare tutto questo.

Ma la costruzione del formalismo è stata tutt'altro che semplice: essa è stata accompagnata da dibattiti accesissimi nei quali ogni scienziato coinvolto proiettava le proprie convinzioni sulla realtà nonché le proprie aspettative sulla teoria stessa.

Accettare un formalismo perchè esso funziona non significa che la sua interpretazione sia immediata e, soprattutto, univoca.



Anche perché, come diceva il Prof. Missiroli (nel filmato di apertura della pagina “pensare”) qui non è come chiedersi se la terra è piatta o tonda (“ ... e una volta osservato che la terra è tonda quelli della terra piatta sono tranquilli ...”).

Qui accettare i risultati e la teoria della meccanica quantistica lascia aperte domande di fondo a cui il formalismo e i risultati sperimentali non danno risposta.

Sulle risposte a queste domande rimane quindi parecchio spazio per l’interpretazione e per assumere posizioni diverse ...

... altro che mettersi tranquilli !