

Programma

- Incontro 1:** Introduzione all'esperimento di interferenza di elettroni singoli (Olivia Levrini, Giorgio Lulli) **[24 febbraio, ore 15-17, Aula 4]**
- Incontri 2-3:** Laboratorio sull'interferenza delle onde alla superficie di un liquido e della luce (Barbara Pecori)
[2 -7 marzo, ore 15-18, Lab DF]
- Incontro 4:** Esperimenti sul comportamento ondulatorio degli elettroni con un microscopio elettronico (Giorgio Matteucci) **[9 marzo, ore 15-18, Lab DF]**
- Incontro 5:** L'esperimento più bello e la meccanica quantistica (Olivia Levrini, Giorgio Lulli) **[14 marzo, ore 15-17, Sala riunioni II piano]**
- Incontro 6:** Applicazioni della meccanica quantistica (Eugenio Bertozzi) **[16 marzo, ore 15-17, Aula 2]**

l'esperimento più bello della fisica

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

BOOKMARK

March 10, 2011



di che si tratta

spiegazione

storia

bellezza

backstage

pensare



Benvenuti nel sito "L'esperimento più bello della fisica".

dal 2009

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

il film

Esso vi guiderà alla scoperta di un esperimento di fisica che, nel 2002 è stato definito il più bello di tutti i tempi da un sondaggio della rivista *Physics World*. L'esperimento, che fu condotto nel 1976, dimostrò il comportamento sorprendente della fisica quantistica (l'apparente "doppio" comportamento onda-particella dell'elettrone) venne per molto tempo ritenuto impossibile a farsi a causa di difficoltà tecniche. Nel 1976 un gruppo di ricercatori italiani (Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli e Giulio Pozzi) superando

Interferenza di elettroni singoli: l'esperimento "più bello" della fisica

Nel 2002 un sondaggio della rivista *Physics World* identificò l'esperimento di interferenza di elettroni singoli come il più bello nella storia della fisica. Proposto da Einstein nel 1927 come esperimento "mentale" per illustrare un effetto sorprendente della fisica quantistica (il duplice comportamento onda-particella degli elettroni e della luce) esso fu per molto tempo ritenuto impossibile a farsi a causa di difficoltà tecniche. Dopo una serie di progressi a cui contribuirono vari gruppi di ricerca, nel 1976 tre fisici italiani (Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli e Giulio Pozzi) riuscirono a superare le ultime difficoltà che esistevano e, utilizzando un microscopio elettronico opportunamente modificato, realizzarono l'esperimento di interferenza con elettroni singoli, pubblicandone il primo resoconto sull'*American Journal of Physics*. Sempre nel 1976 su questo esperimento fu realizzato un film didattico-divulgativo: "Interferenza di elettroni", che ebbe immediato successo, vincendo il primo premio al Festival Internazionale del Cinema Scientifico tenutosi a Bruxelles nel 1976.

A 35 anni dalla sua realizzazione il film "Interferenza di elettroni" è oggi riproposto in versione rimasterizzata (a cura della **Cineteca di Bologna**). Lo accompagna un documentario originale che, attraverso le testimonianze dirette dei protagonisti, narra la vicenda di questo esperimento, evidenziando i vari fattori (storici, umani, tecnici) che portarono alla sua realizzazione.

Questo progetto è dedicato al ricordo di Pier Giorgio Merli, uno dei tre ricercatori che realizzarono l'esperimento, prematuramente scomparso nel 2008.

Contenuti

"Interferenza di elettroni" (1976) edizione rimasterizzata nel 2010, durata 14', formato PAL 4:3 720x576, versioni in lingua italiana e inglese

"L'esperimento più bello" (2011) durata 25', formato PAL 16:9 1280x720, lingua italiana.

"La passione, il metodo, l'esempio. Vittorio Morandi ricorda Pier Giorgio Merli" (2011) durata 4', formato PAL 16:9 1280x720, lingua italiana.



Ministero dell'Università e della Ricerca

Progetto realizzato con contributo del Ministero dell'Università e della Ricerca - Legge 6/2000 per la diffusione della Cultura Scientifica



Realizzazione: Clivis - Bologna

gruppo design e design lab 2011



interferenza di elettroni - l'esperimento più bello

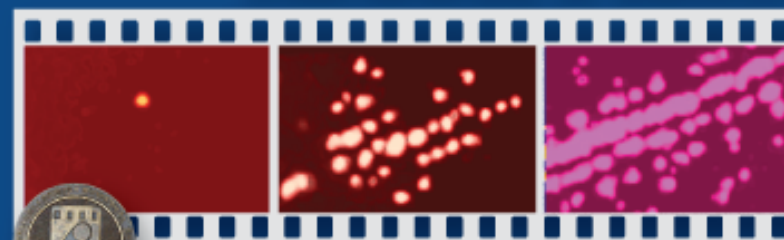


Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto per la Microelettronica e i Microsistemi
(IMM) Sede di Bologna



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI FISICA

interferenza di elettroni



Medaglia d'Oro al Festival Internazionale del Cinema Scientifico - Bruxelles 1976

Edizione rimasterizzata del film "Interferenza di elettroni" (1976) di Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli, Lucio Morettini, Dario Nobili e Giulio Pozzi.

Contiene il documentario: "L'esperimento più bello", realizzato a cura di Diego L. Gonzalez, Olivia Levrini, Giorgio Lulli, Dario Zanasi.
Regia: Dario Zanasi, Diego L. Gonzalez.

Coordinamento del progetto: Giorgio Lulli

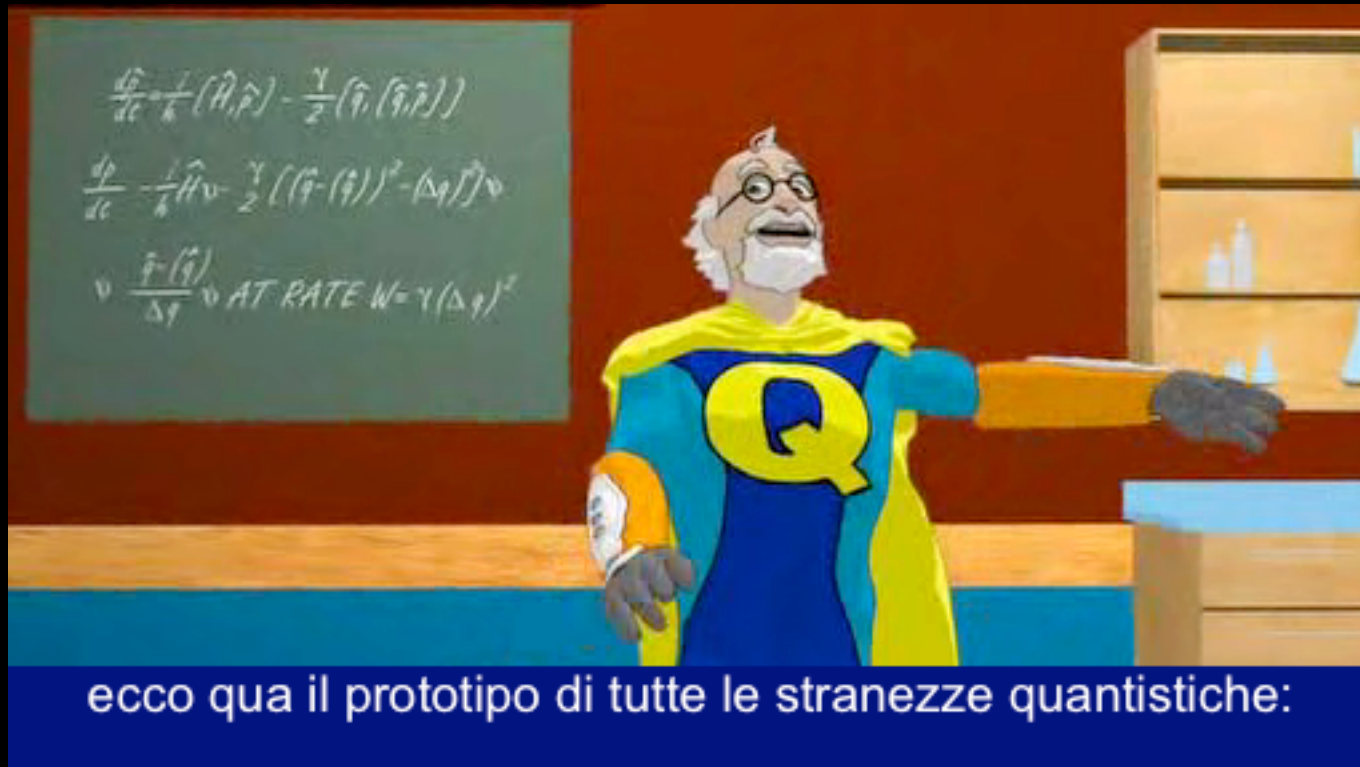
copia omaggio vietata la vendita

2010

Documentario "L'esperimento più bello", prodotto in DVD assieme all'edizione rimasterizzata di "Interferenza di elettroni" (1976)

proiezione documentario da DVD

Il Dr. Quantum presenta l'esperimento della doppia fenditura di Young con elettroni



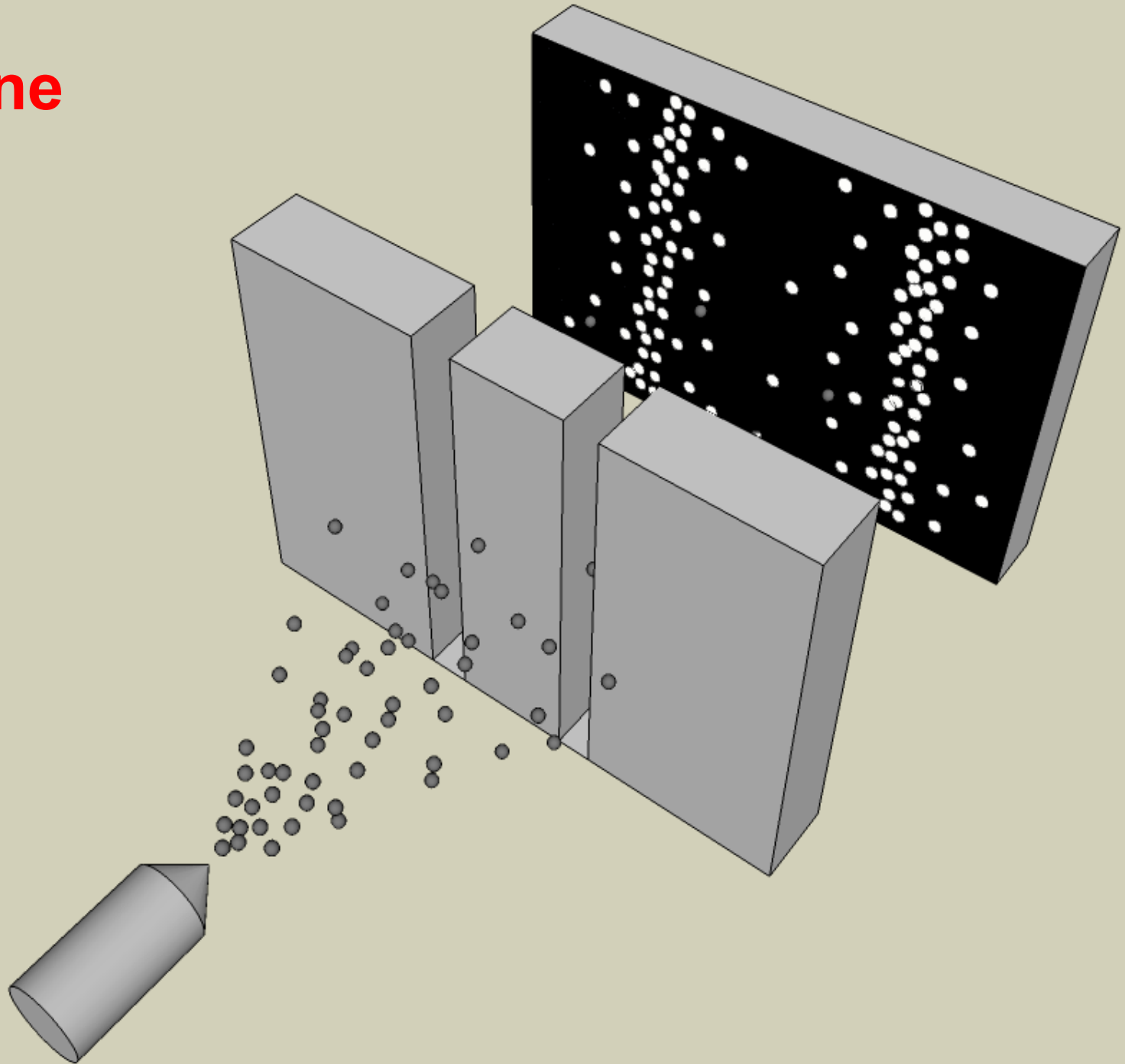
L'esperimento più bello e i suoi misteri

Olivia Levrini

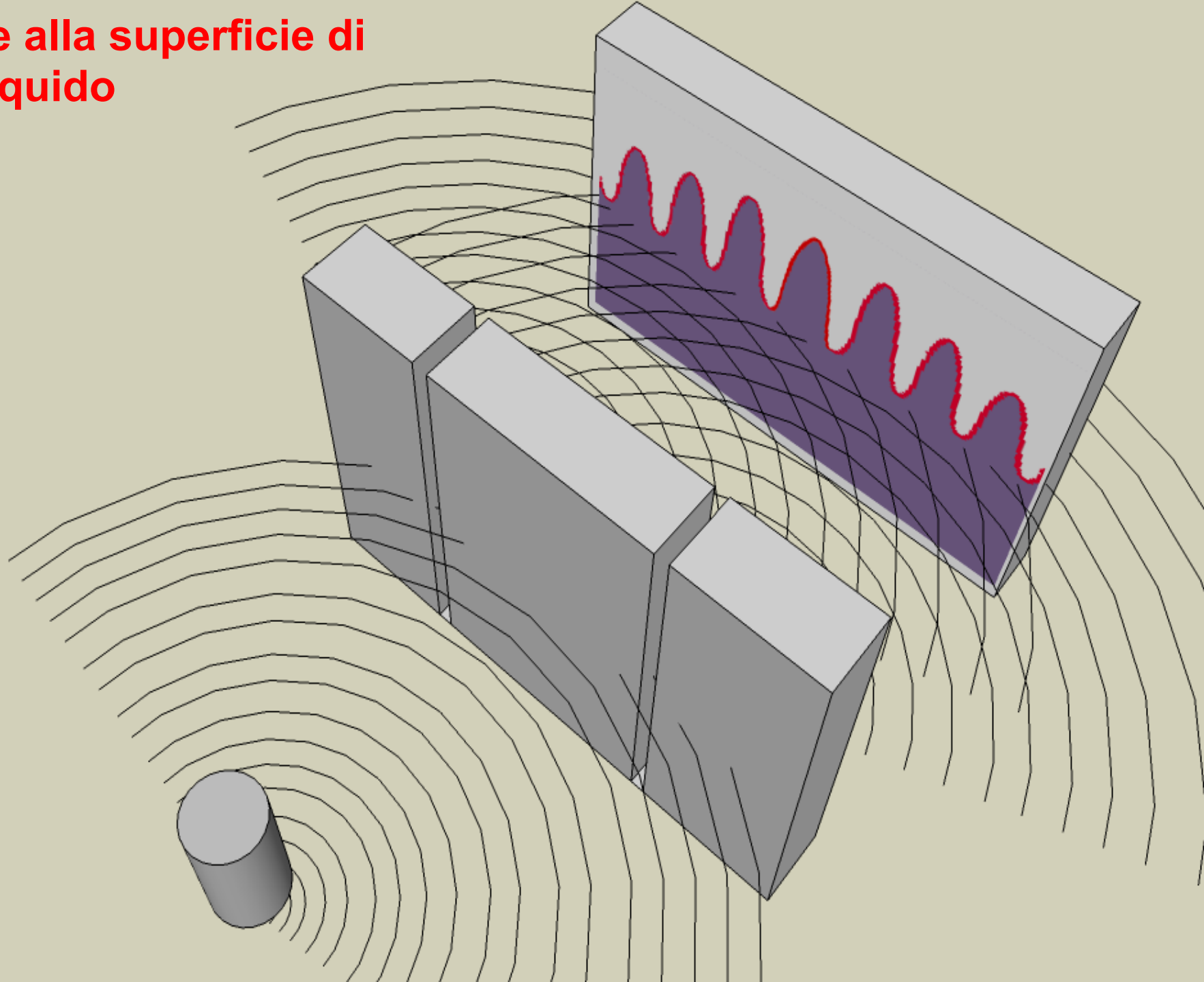
**Analisi delle situazioni considerate
nel filmato con un criterio:**

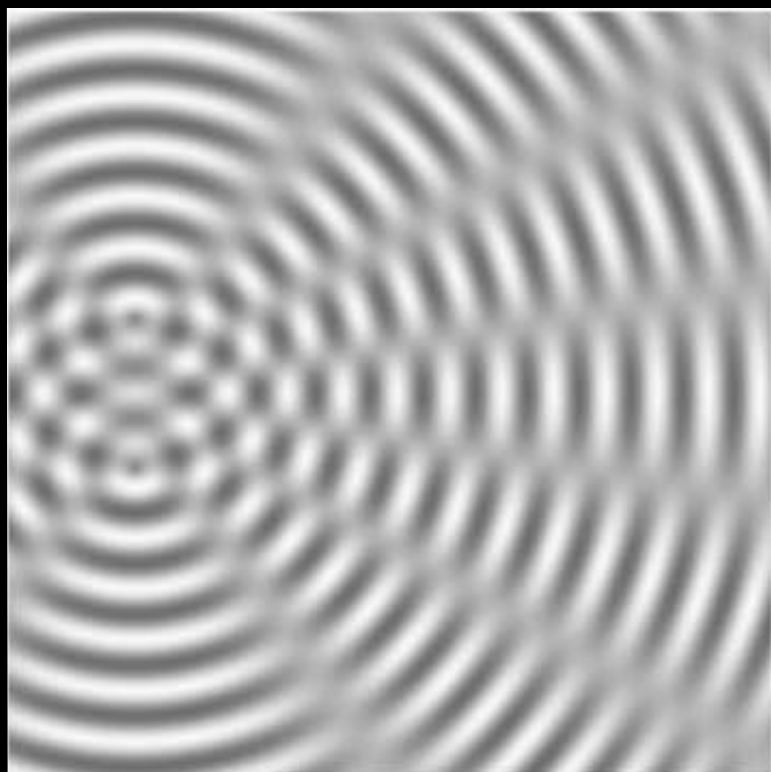
***tener sotto controllo che cosa
vediamo (i fatti) e che cosa, invece,
immaginiamo (che cosa ricostruiamo
col pensiero)***

palline

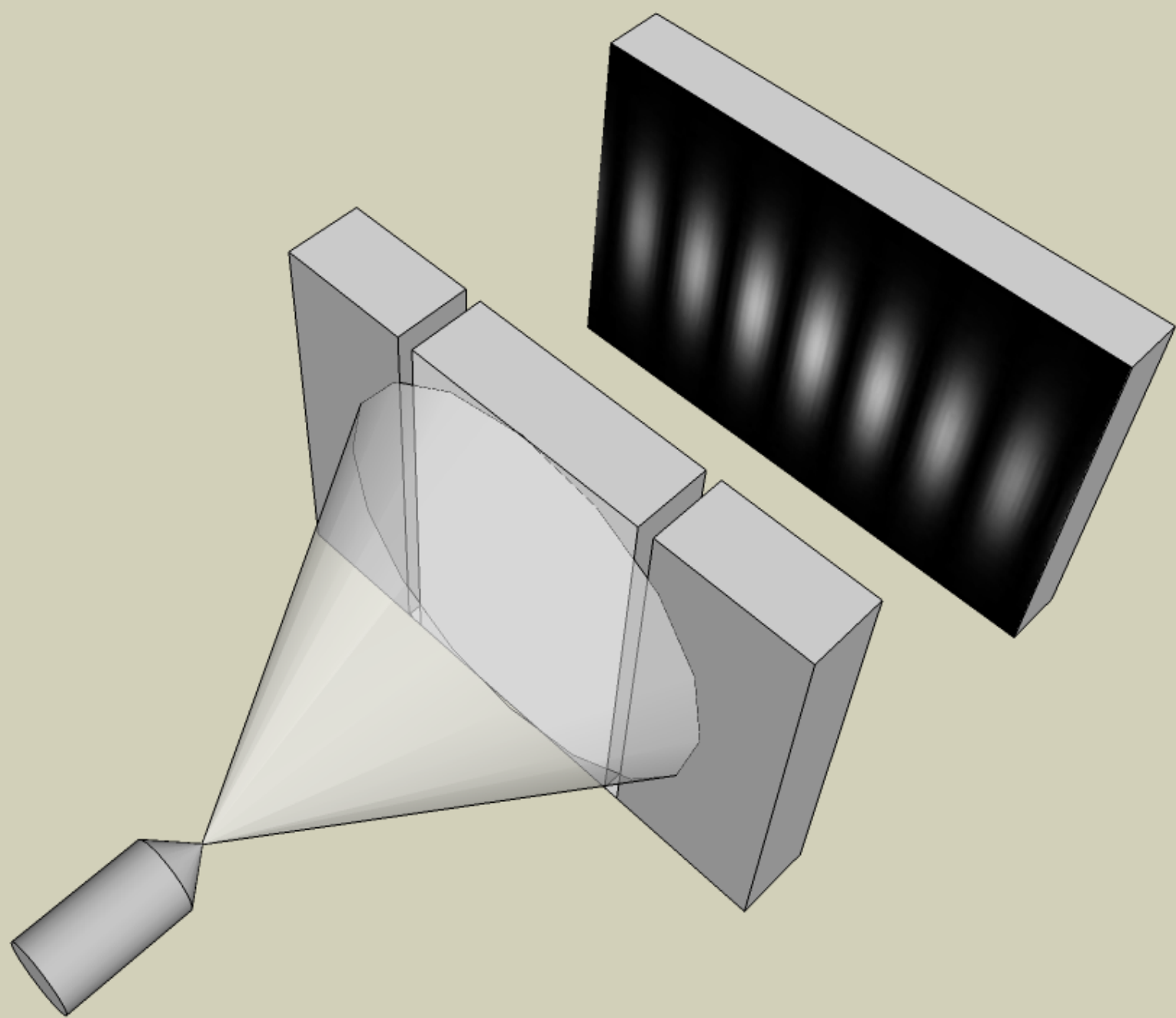


**onde alla superficie di
un liquido**





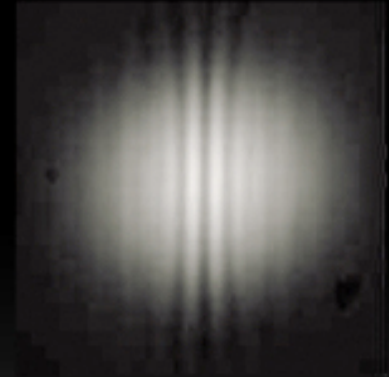
Luce



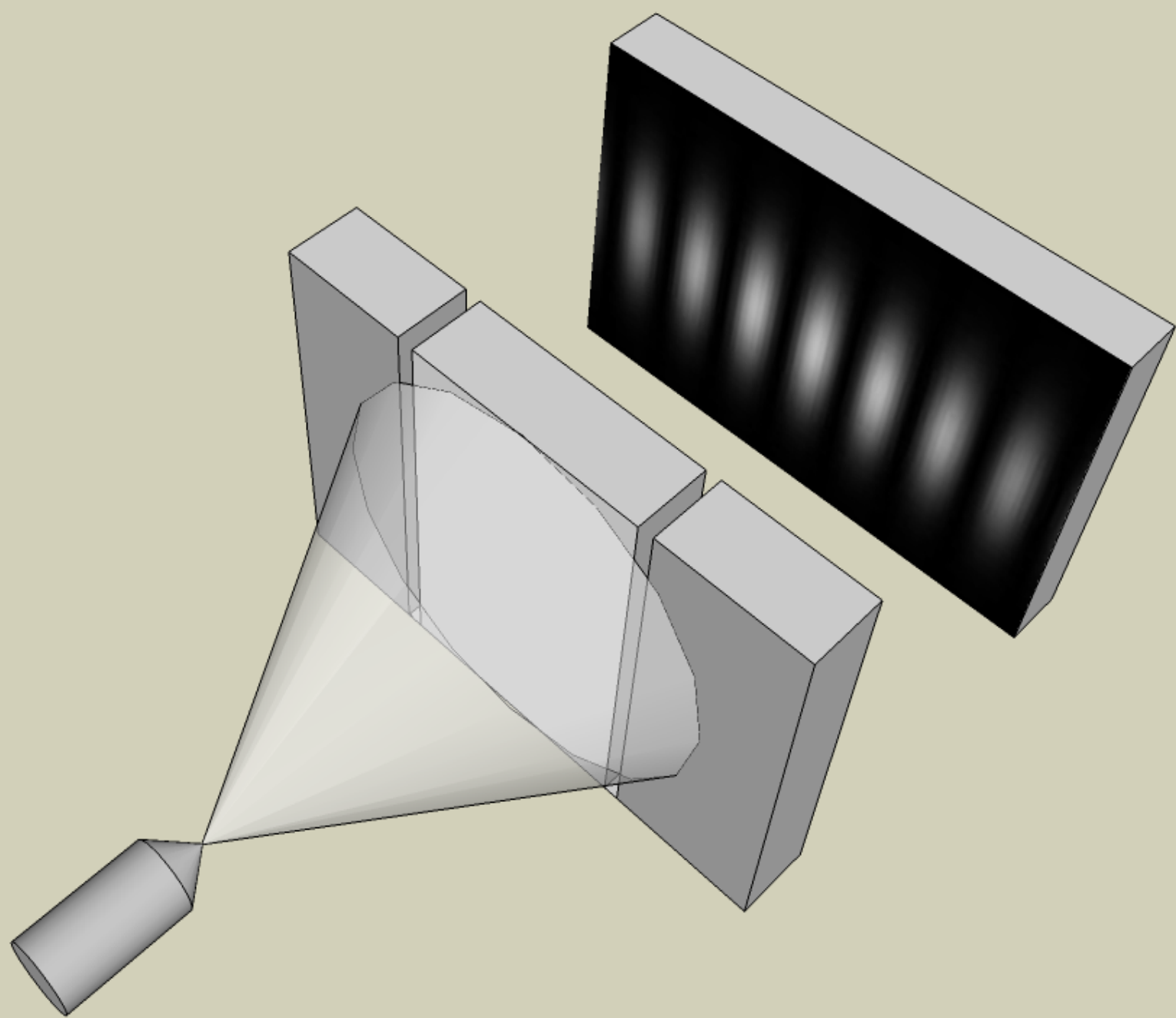
interferenza
della luce
(1803)



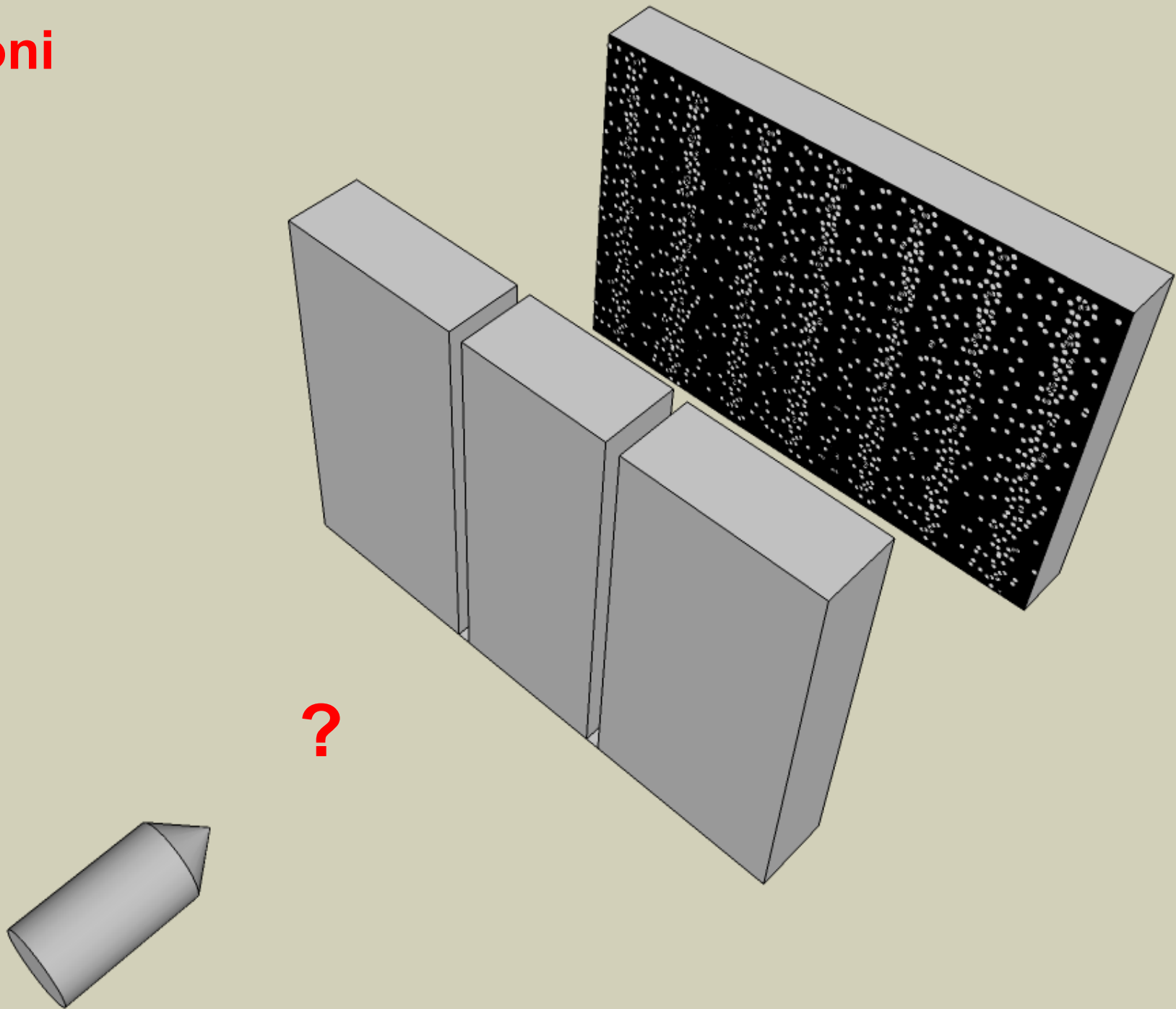
Thomas Young (1773-1829)

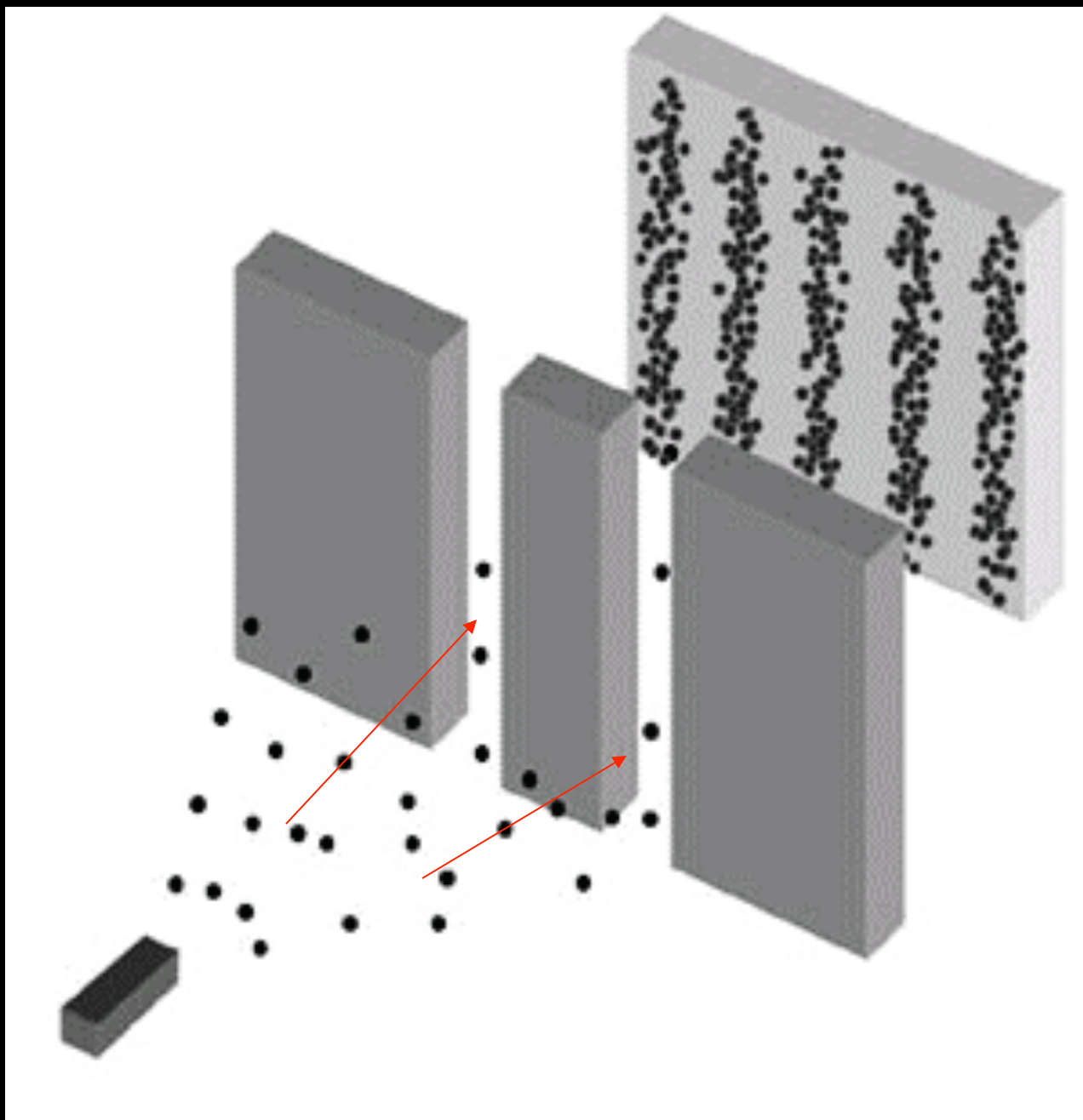


Luce



Elettroni





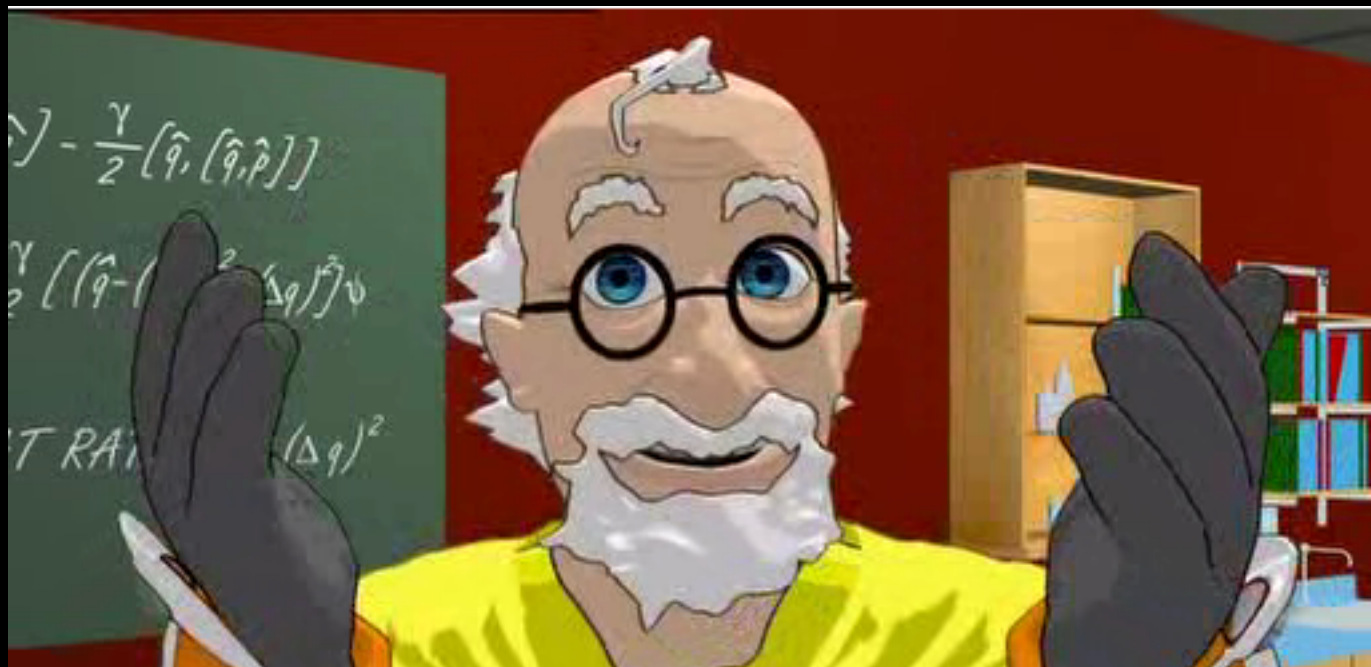
I conclusione



incrocio quantistico
portarsi su entrambe
le corsie



lo sciatore quantico

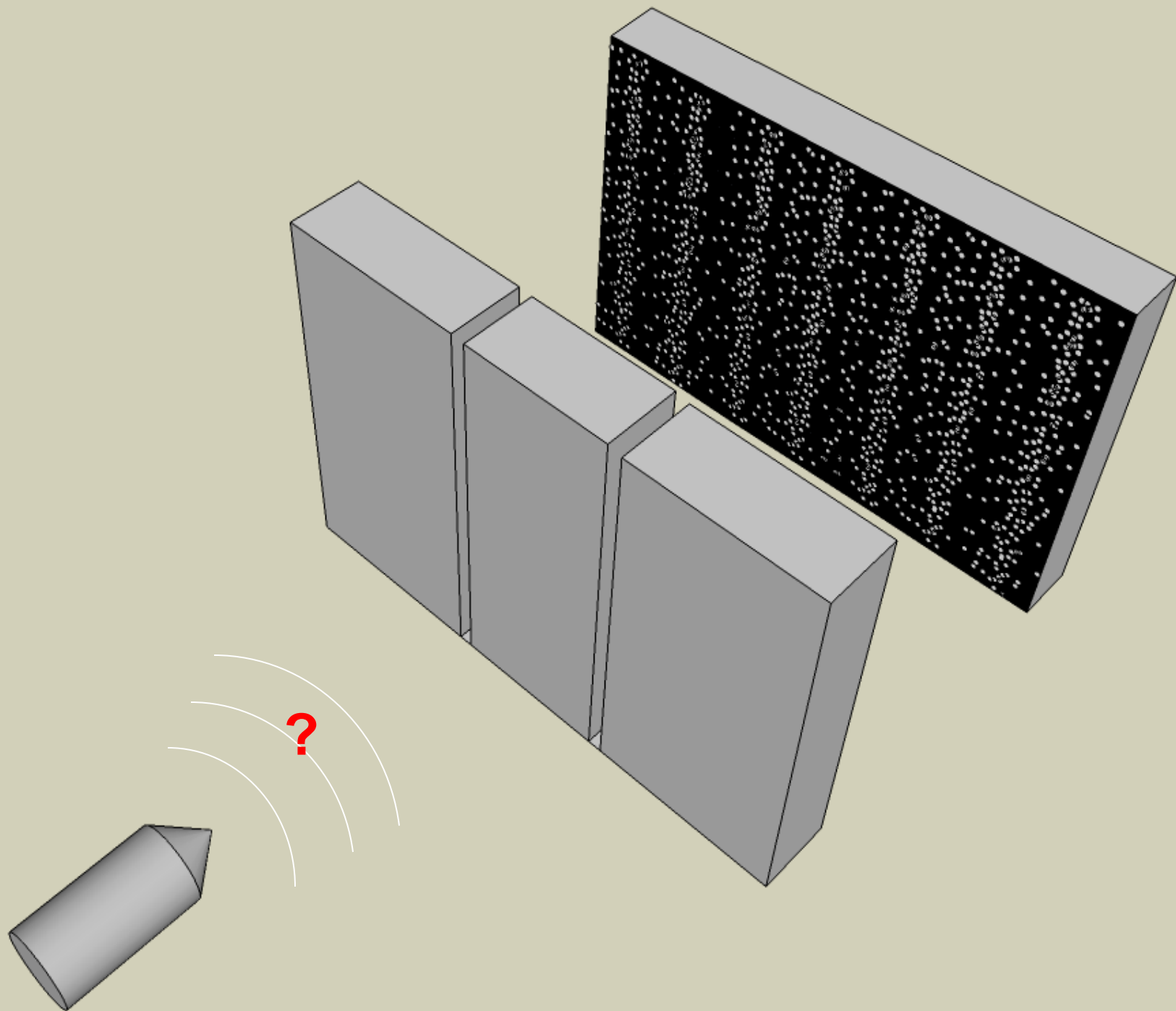


ciascun elettrone parte come una particella

“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)



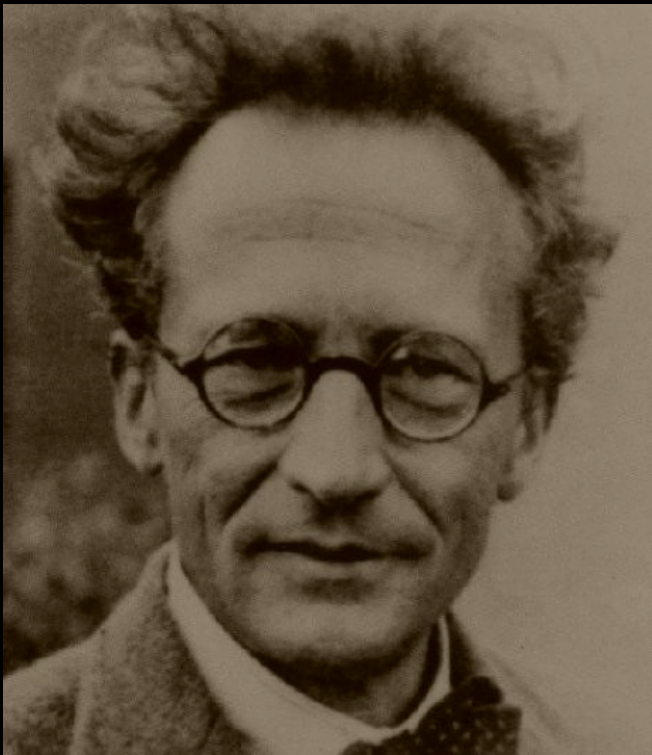
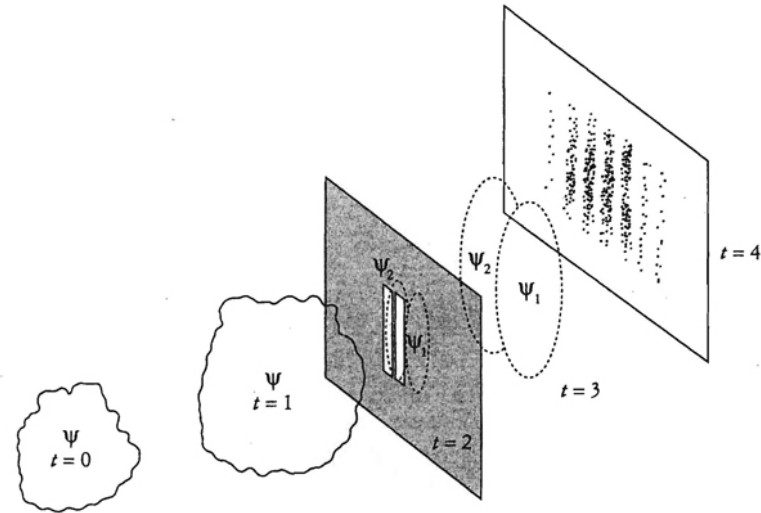
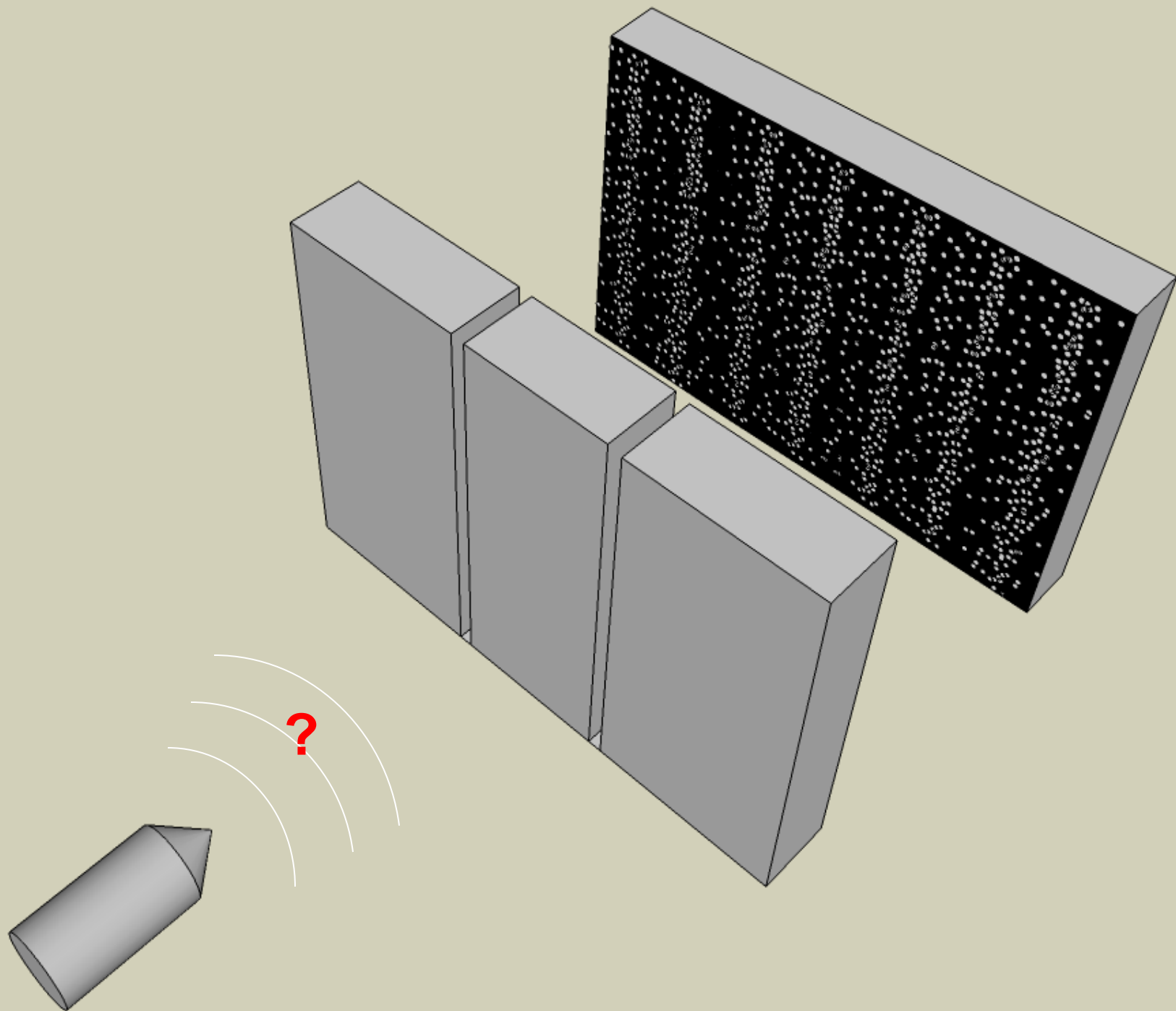


Figura 35.

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)



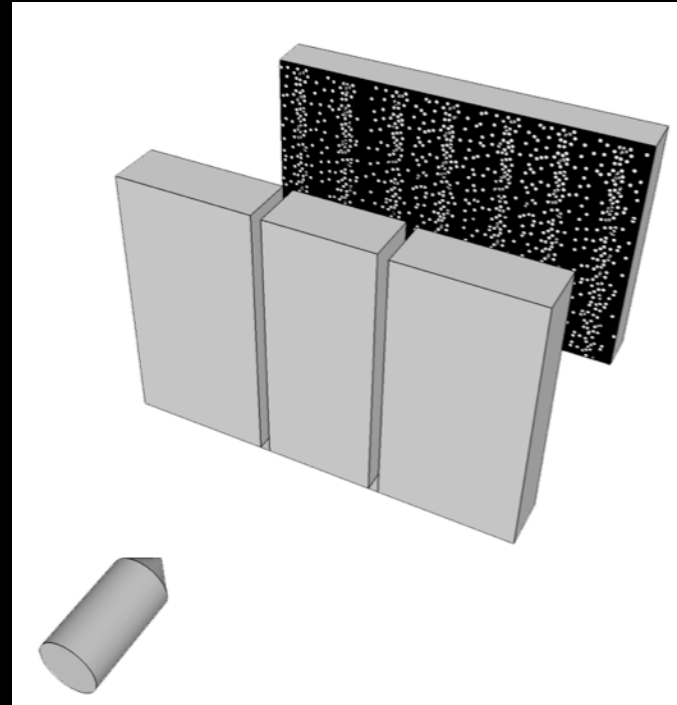
Il conclusione:

Ognuna di queste due immagini (corpuscolo o onda) permette di dare significato soltanto ad alcuni fatti.

Nessuna delle due abbraccia tutti i fenomeni noti

**SI TRATTA DI IMMAGINI PARZIALI
E COMPLEMENTARI**

III conclusione:



“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 fisica è un tentativo di afferrare concettualmente la realtà fisica, quale la si concepisce indipendentemente dal fatto di essere osservata. In questo senso si parla di “realtà fisica”. Nella fisica prequantistica, non c’era alcun dubbio sul modo di intendere queste cose: nella teoria di Newton, la realtà era rappresentata da punti materiali nello spazio e nel tempo; nella teoria di Maxwell, dal campo nello spazio e nel tempo. Nella meccanica quantistica, la rappresentazione della realtà non è così facile.”

(A. Einstein, Autobiografia scientifica, pp. 49-51)



“Decidemmo di esaminare un fenomeno che è impossibile, assolutamente impossibile spiegare in modo classico, e che sta al cuore della meccanica quantistica. In realtà contiene l’unico mistero. [...] Nel raccontarvelo dovremo raccontarvi delle peculiarità fondamentali di tutta la meccanica quantistica.”

**Richard Feynman
(1918-1988)**

La meccanica quantistica

- teoria formulata negli anni 30 (intorno al 1927), grazie al contributo di molti fisici, Planck, Bohr, Schrödinger, Heisenberg, Pauli, Jordan, Born, Dirac e altri... e anche grazie allo “speciale” contributo dato da Einstein (e le sue critiche acute);
- oggi è accettata: esistono un formalismo ed 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”

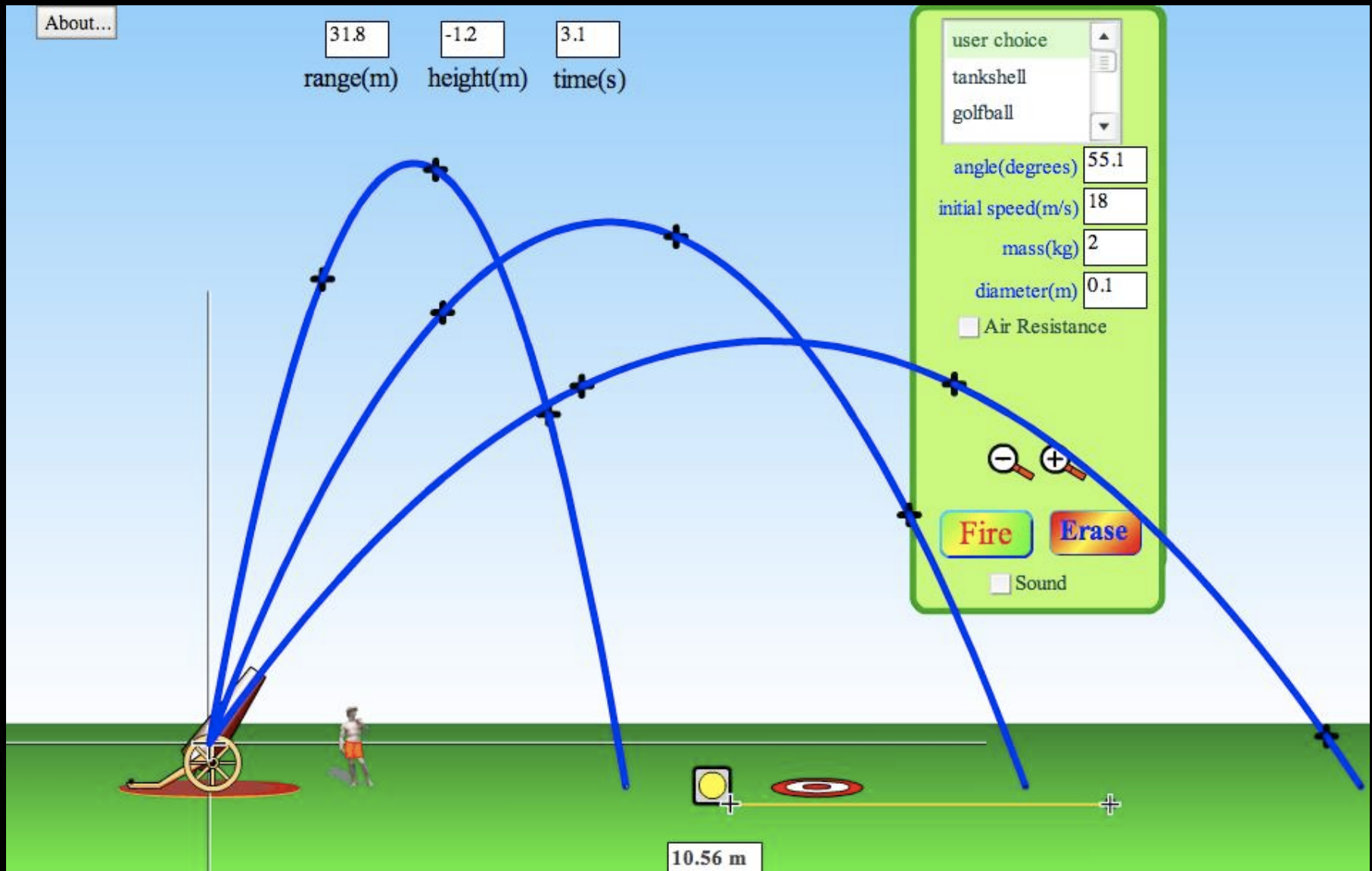
la teoria funziona perfettamente: il suo formalismo ha permesso di fare previsioni precisissime

ma

assorbe dentro di sé (eleva a principi) l'idea che si debba rinunciare ad alcune categorie su cui si basava la spiegazione dei fenomeni della fisica classica:

- 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).**

Determinismo



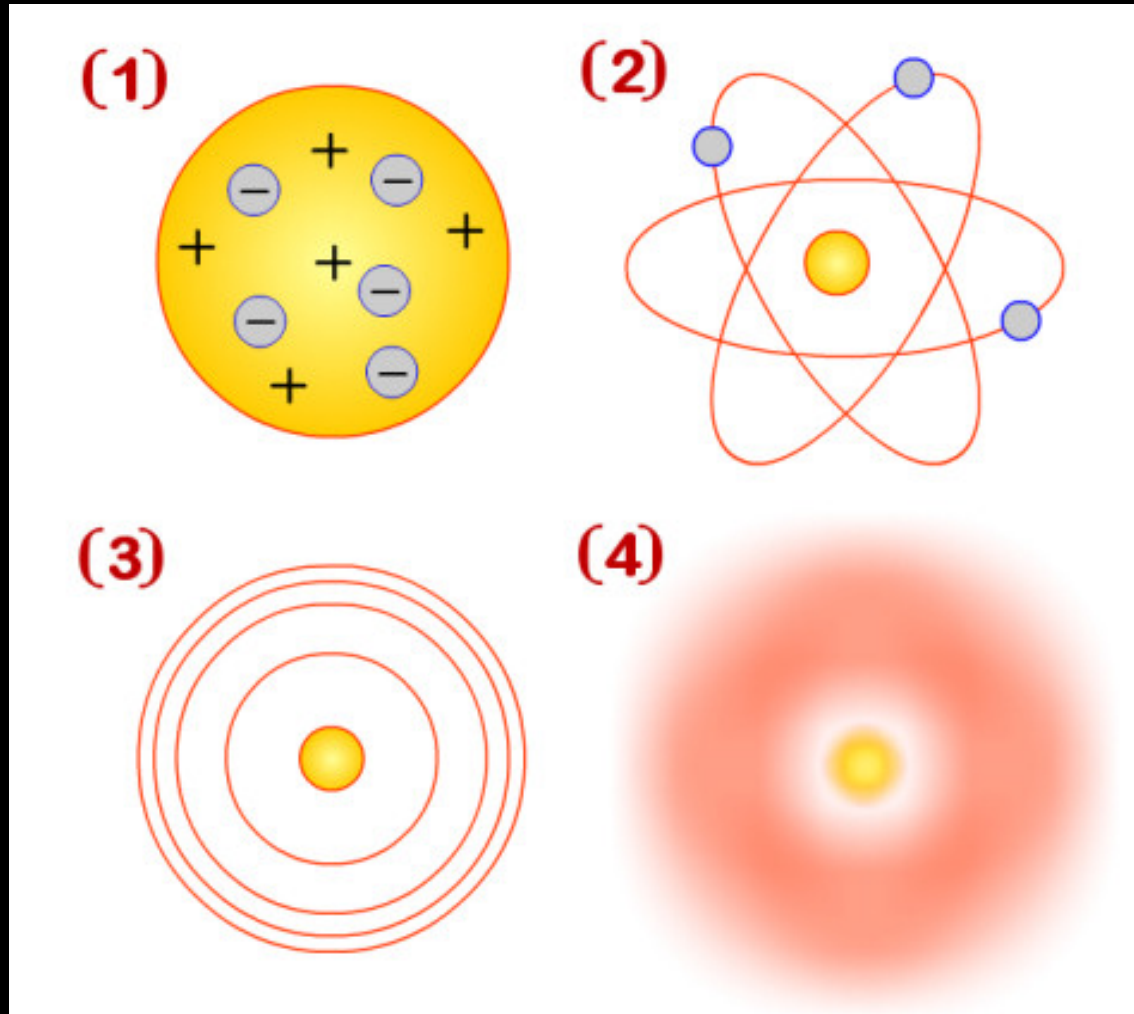
Indeterminazione quantistica

Le condizioni iniziali (posizione e velocità)
non sono determinabili simultaneamente:

*nota una, l'altra è INTRINSECAMENTE
indeterminata (nota solo
“probabilisticamente”)*

PROBABILITA' NON-EPISTEMICA

Rappresentabilità dei fenomeni nello spaziotempo



Principio di non contraddizione

"A è anche non-A" è falsa

o mitologica...



Alcuni dibattiti che hanno coinvolto i padri della meccanica quantistica:

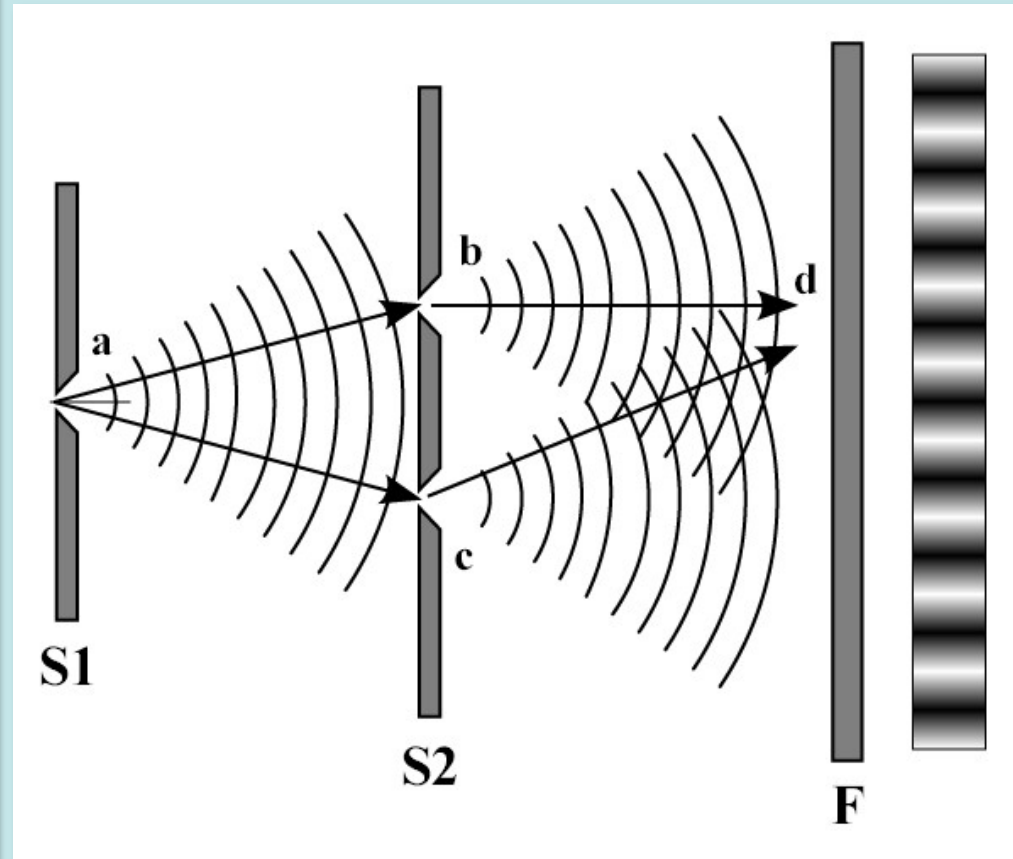
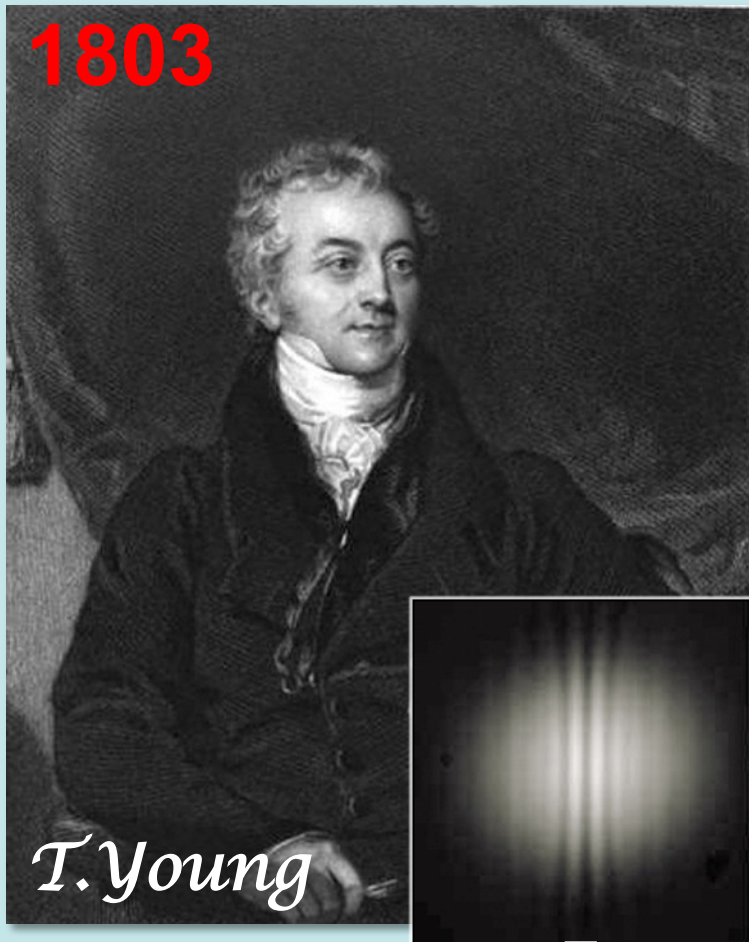
- Che cosa vuol dire “capire una teoria” quando non è più possibile formarsi immagini visualizzabili nello spaziotempo e occorre invece immaginare gli oggetti in spazi astratti? Che spazio rimane in fisica per l'intuizione quando il formalismo si fa sempre più astratto?**
- Che cosa significa, per la fisica, dover rinunciare al determinismo e assumere il caso, la probabilità, come parte integrante della spiegazione fisica?**
- Che cosa significa rinunciare all'idea di poter racchiudere tutti i fatti in un'unica immagine e assumere la complementarità?**
- (su un piano forse più estetico): una teoria fisica “bella” (convincente) può ammettere al suo interno aspetti di ambiguità o deve essere armoniosa?**

....lo vedremo all'incontro 5!

L'esperimento più bello: dalla mente al laboratorio

Giorgio Lulli

L'esperimento della doppia fenditura di Young

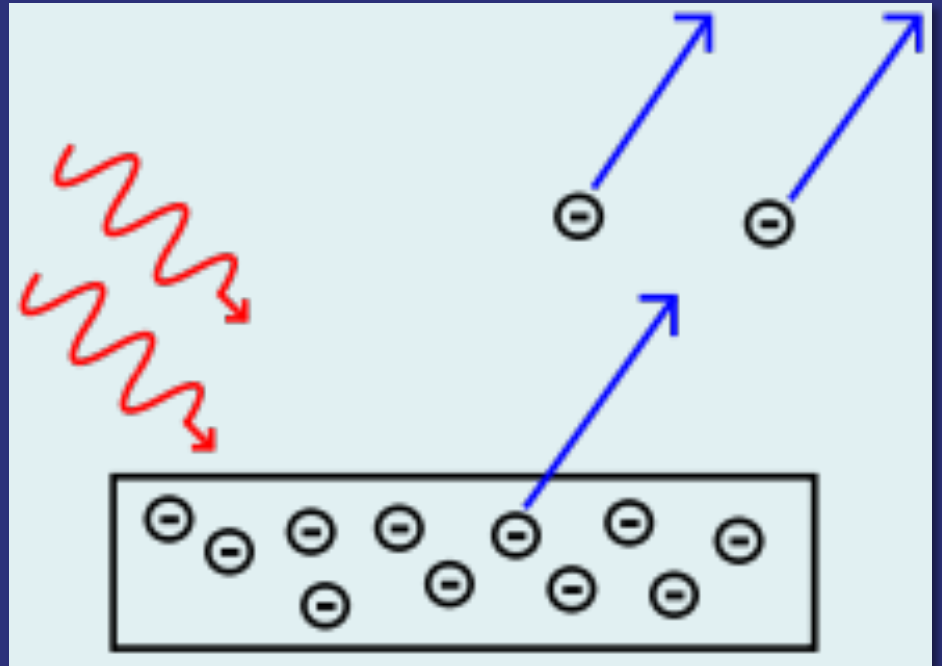


interferenza → luce = onda

1905

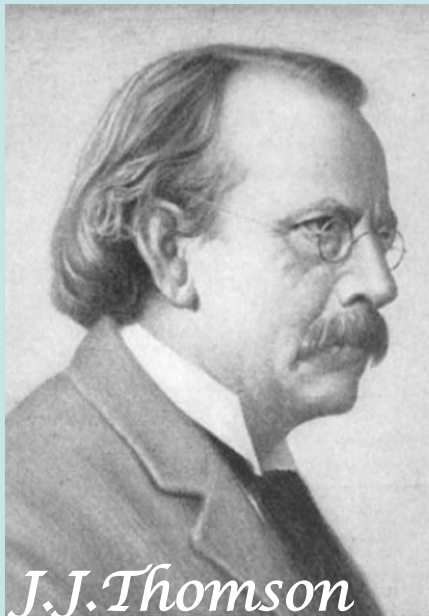


A. Einstein



effetto fotoelettrico → **luce = particelle**
(*quanti di luce o fotoni*)

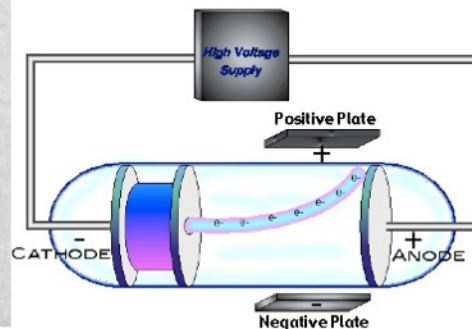
elettroni?



J.J. Thomson

1897

corpuscoli



L. De Broglie

$$\lambda = h/mv$$

onde !

1923

Lunghezza d'onda elettroni (De Broglie)

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$eV = \frac{m_0 v^2}{2}$$

$$p = m_0 v = (2m_0 eV)^{1/2}$$

$$\lambda = \frac{h}{(2m_0 eV)^{1/2}}$$

$$\lambda = \frac{h}{[2m_0 eV (1 + \frac{eV}{2m_0 c^2})]^{1/2}}$$

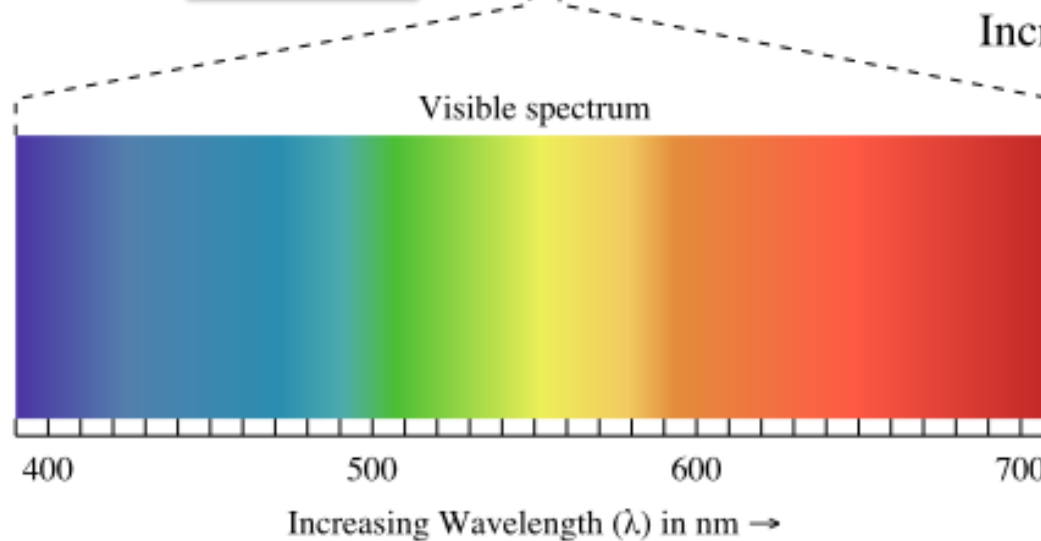
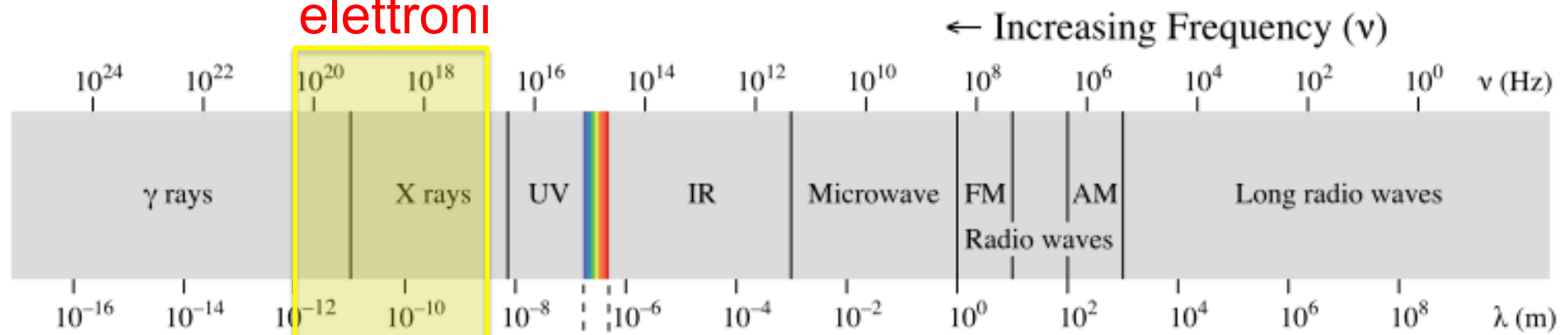
(relativistica)

$$\lambda = \frac{1.266}{(1 + 0.9788 \times 10^{-6} V) V^{1/2}}$$

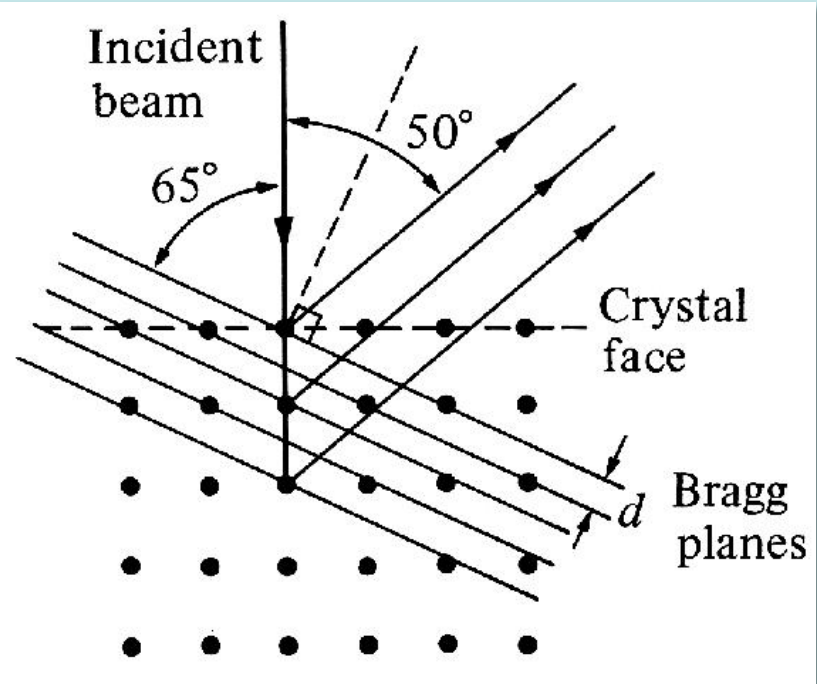
λ (nm) V (volt)

tensione accelerazione (volt)	lunghezza d'onda	
1	1.266 nm	1.266×10^{-9} m
100	0.1266 nm	1.266×10^{-10} m
100000	0.0037 nm	3.7×10^{-12} m

elettroni



diffrazione elettroni



Elettroni (54 eV) $\lambda=0.165$ nm

Distanza interplanare Nickel $d=0.091$ nm

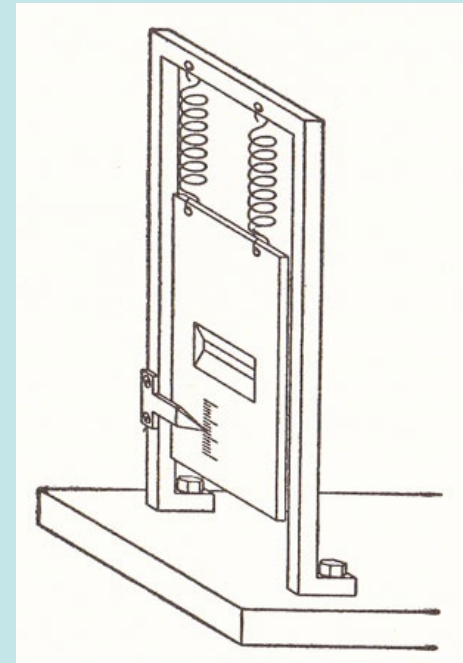
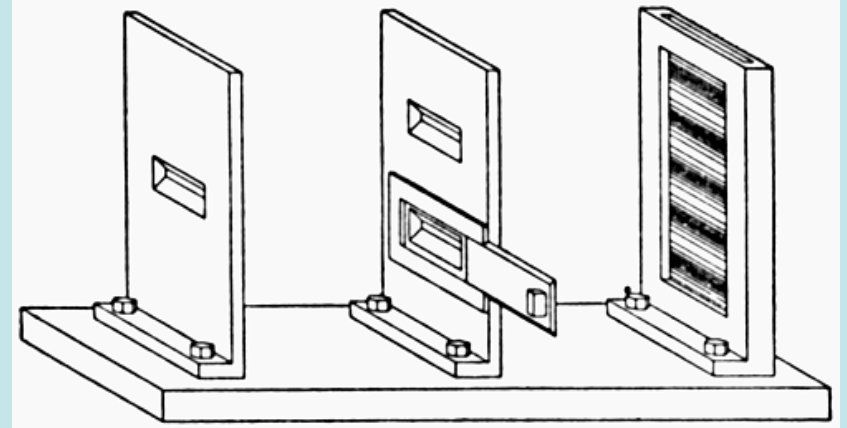
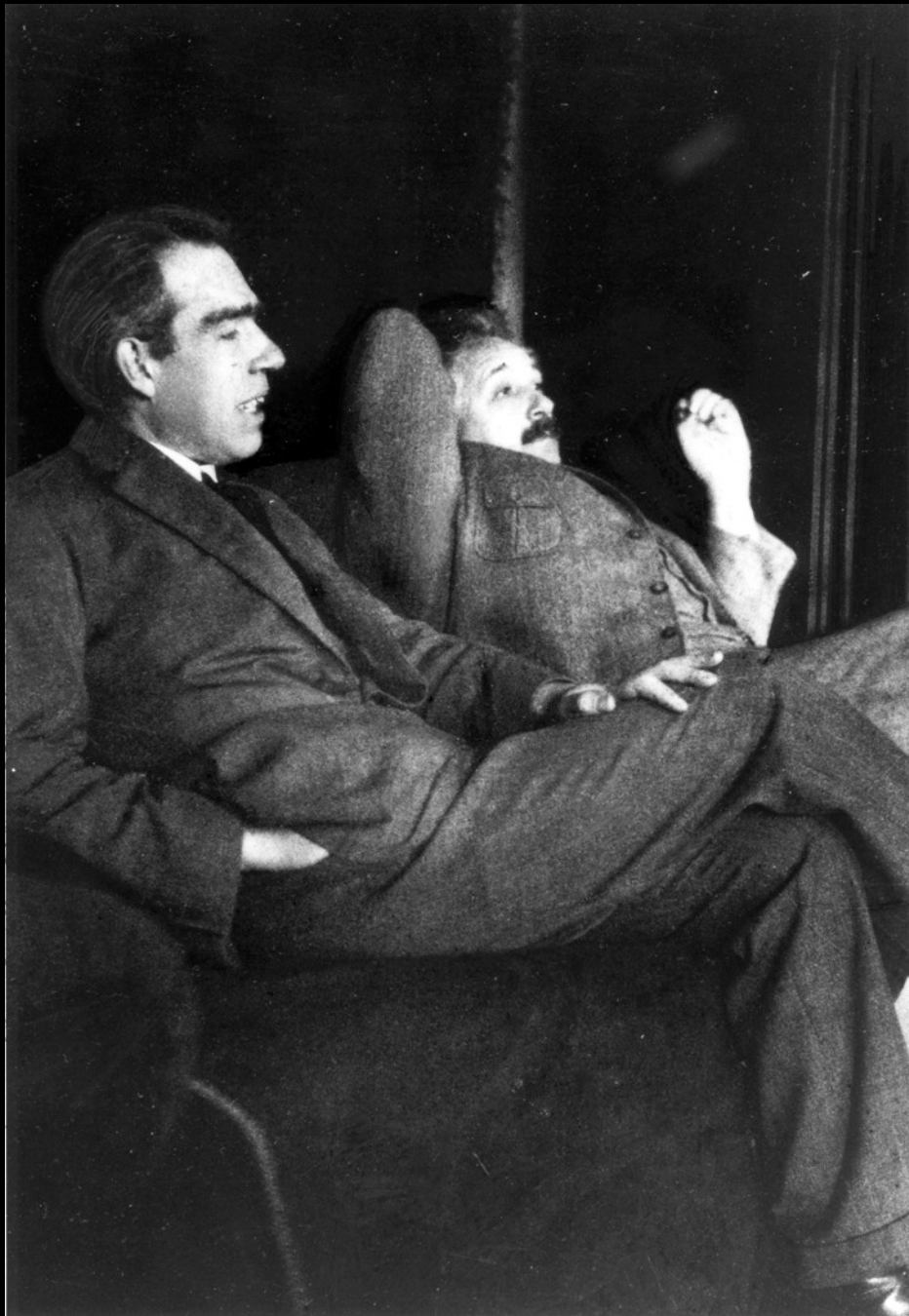
la prima dimostrazione della natura ondulatoria degli elettroni

Luce ed **elettroni** in alcuni casi danno origine a fenomeni caratteristici delle **onde**, in altri delle **particelle**.

Questo è uno degli aspetti più sorprendenti della fisica quantistica, teoria che si sviluppò nei primi 30 anni del 1900 per spiegare i fenomeni del mondo microscopico, non comprensibili con la fisica classica del 1800.

Questa proprietà viene definita come

dualismo ondulatorio-corpuscolare

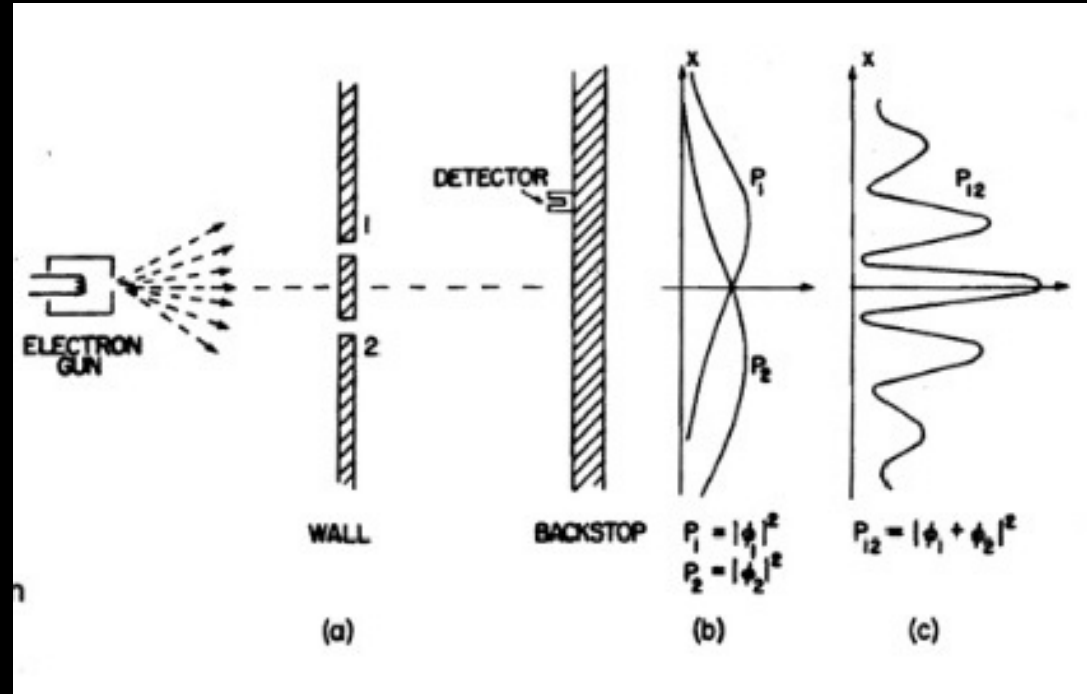


1927

bello / impossibile ... (“....impossibly small”)

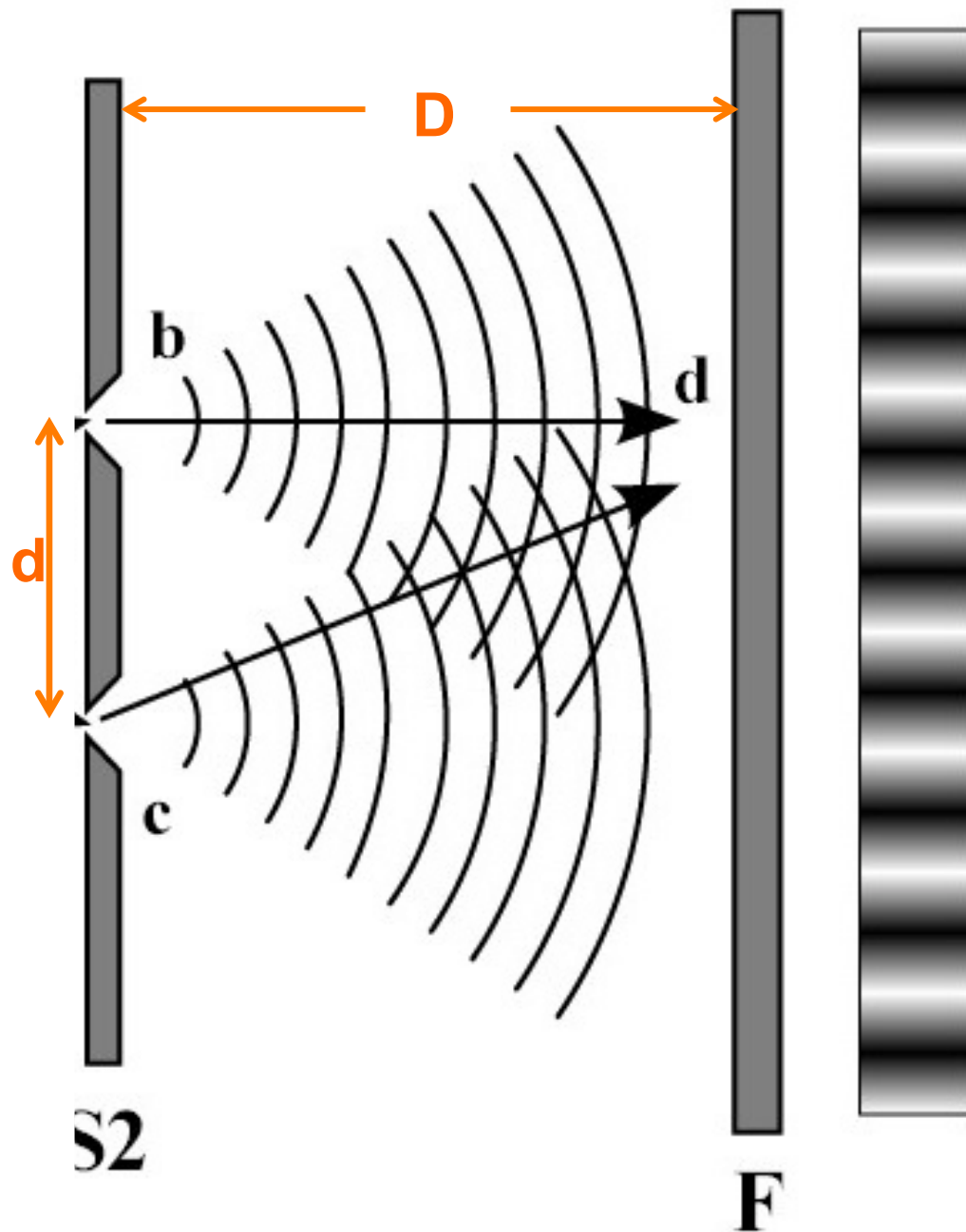


Richard Feynman (1918-1988)



“Decidemmo di esaminare un fenomeno che è impossibile, assolutamente impossibile spiegare in modo classico, e che sta al cuore della meccanica quantistica. In realtà **contiene l'unico mistero**. [...] Nel raccontarvelo dovremo raccontarvi delle peculiarità fondamentali di tutta la meccanica quantistica.”

Vi avvertiamo subito di non cercare di montare questo esperimento (come invece avreste potuto fare con i due che abbiamo già descritti). Questo esperimento non è mai stato fatto in questo modo. Il guaio sta nel fatto che, per rivelare gli effetti che ci interessano, l'apparato dovrebbe essere costruito su una scala talmente piccola da rendere impossibile la cosa. Noi stiamo quindi compiendo un “esperimento concettuale” e lo abbiamo scelto così perchè è facile ragionarci su. Noi sappiamo quali sono i risultati che *si otterrebbero*, perchè *sono stati fatti* molti esperimenti, in cui la scala e le proporzioni erano state scelte in modo da mettere in luce gli effetti che ora descriveremo.



visibilità frange

$$x = \lambda D / d$$

$$\lambda_{\text{elettroni}} = 0.0034 \text{ nm}$$

x (potere risolutivo
occhio) $\approx 0.1 \text{ mm}$

$$d \sim 500 \text{ nm}$$



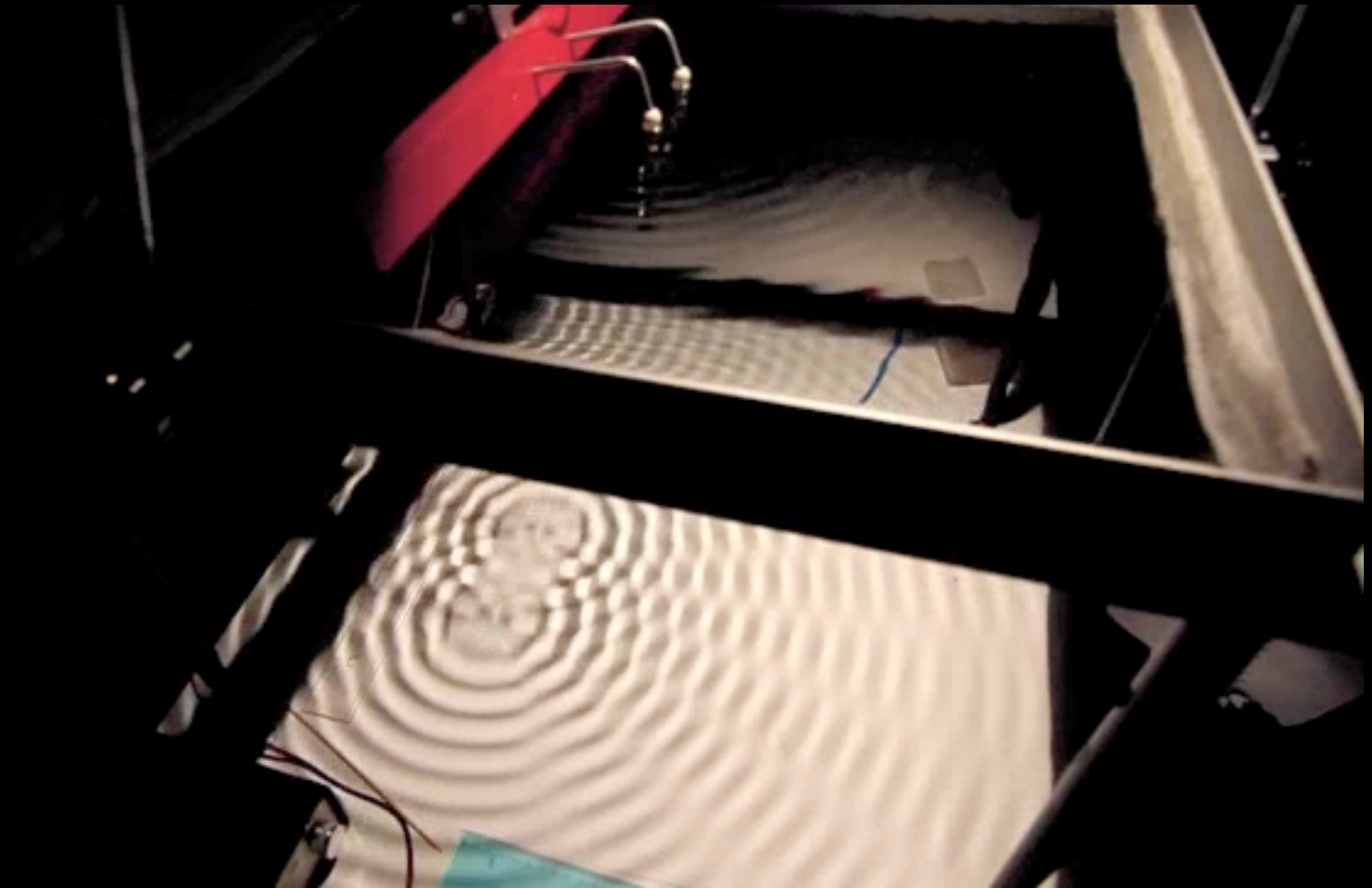
$$D = x d / \lambda \approx 150 \text{ m}$$

Il problema della *coerenza* delle sorgenti

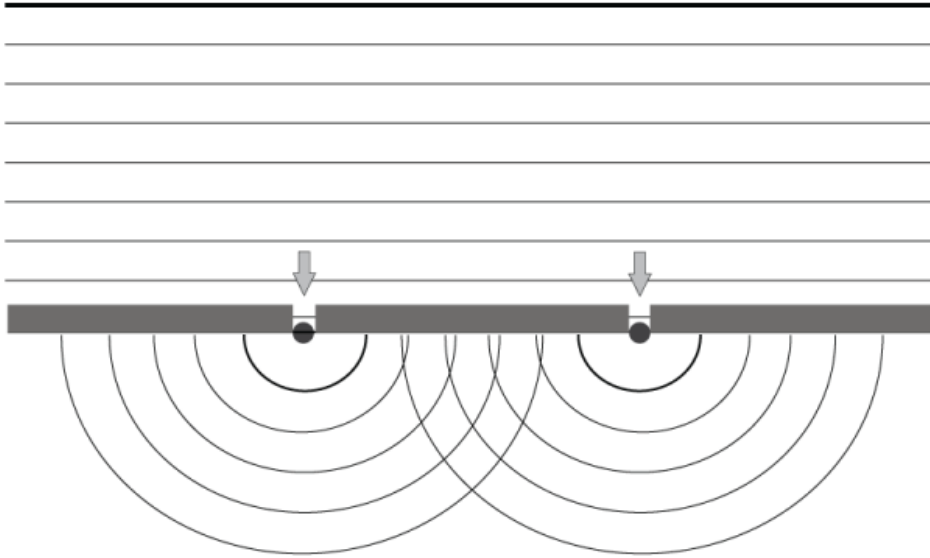
consideriamo sorgenti che emettono onde di uguale frequenza/ lunghezza d'onda e con una *sincronizzazione (relazione di fase)* costante

coerenza  **figura di interferenza *stabile* nel tempo**

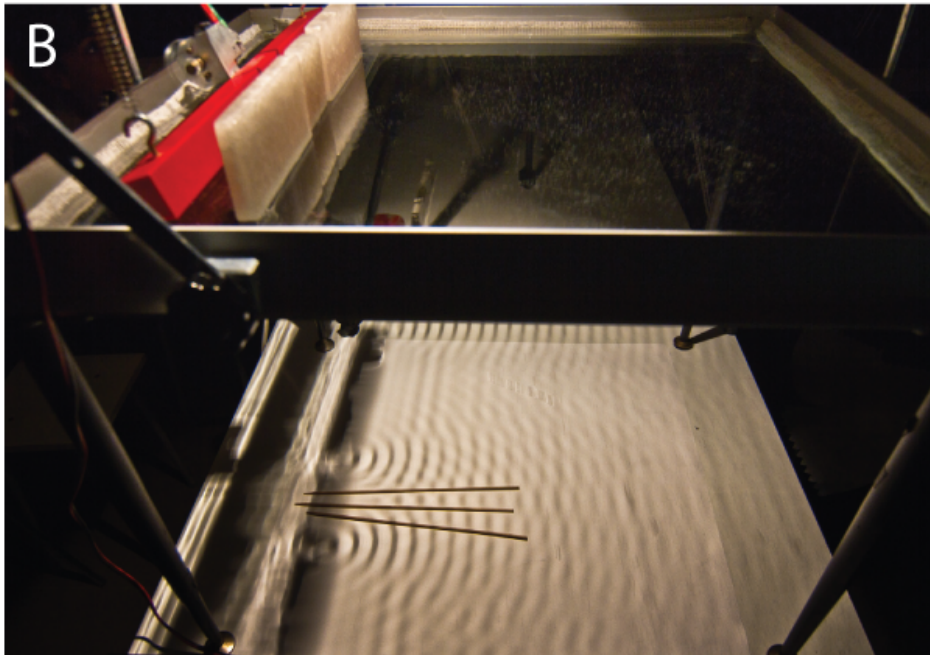
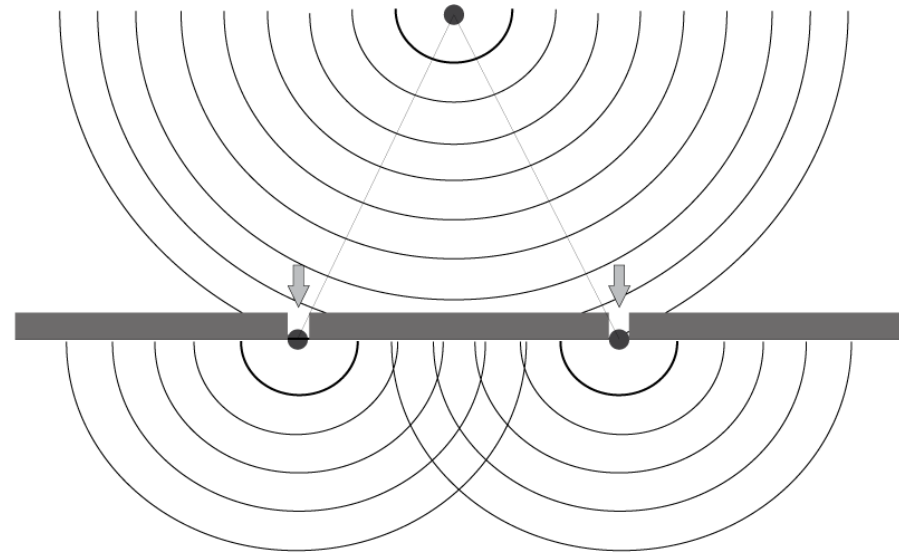
Il problema della coerenza delle sorgenti



A



B



è facile realizzare sorgenti coerenti di onde nell'acqua:

1. due sorgenti distinte (punte)
2. una unica sorgente (barretta o punta) "sdoppiata" da due fenditure

Coerenza delle sorgenti di luce e elettroni

Per motivi legati ai meccanismi fisici di emissione, le sorgenti di luce ed elettroni non sono di solito coerenti.

Problemi:

- la frequenza (lunghezza d'onda) non è costante nel tempo (non vengono emessi treni continui monofrequenza-energia, ma “pacchetti” di onde) (problema della coerenza *temporale*)
- l'emissione è un processo statistico (casuale); sorgenti diverse, ma anche punti diversi di una unica sorgente estesa, emettono in modo scorrelato, ovvero con differenza di fase variabile (problema della coerenza *spaziale*)

Coerenza delle sorgenti di luce e elettroni

Il problema della coerenza temporale in molti casi si può trascurare, e non ce ne preoccuperemo

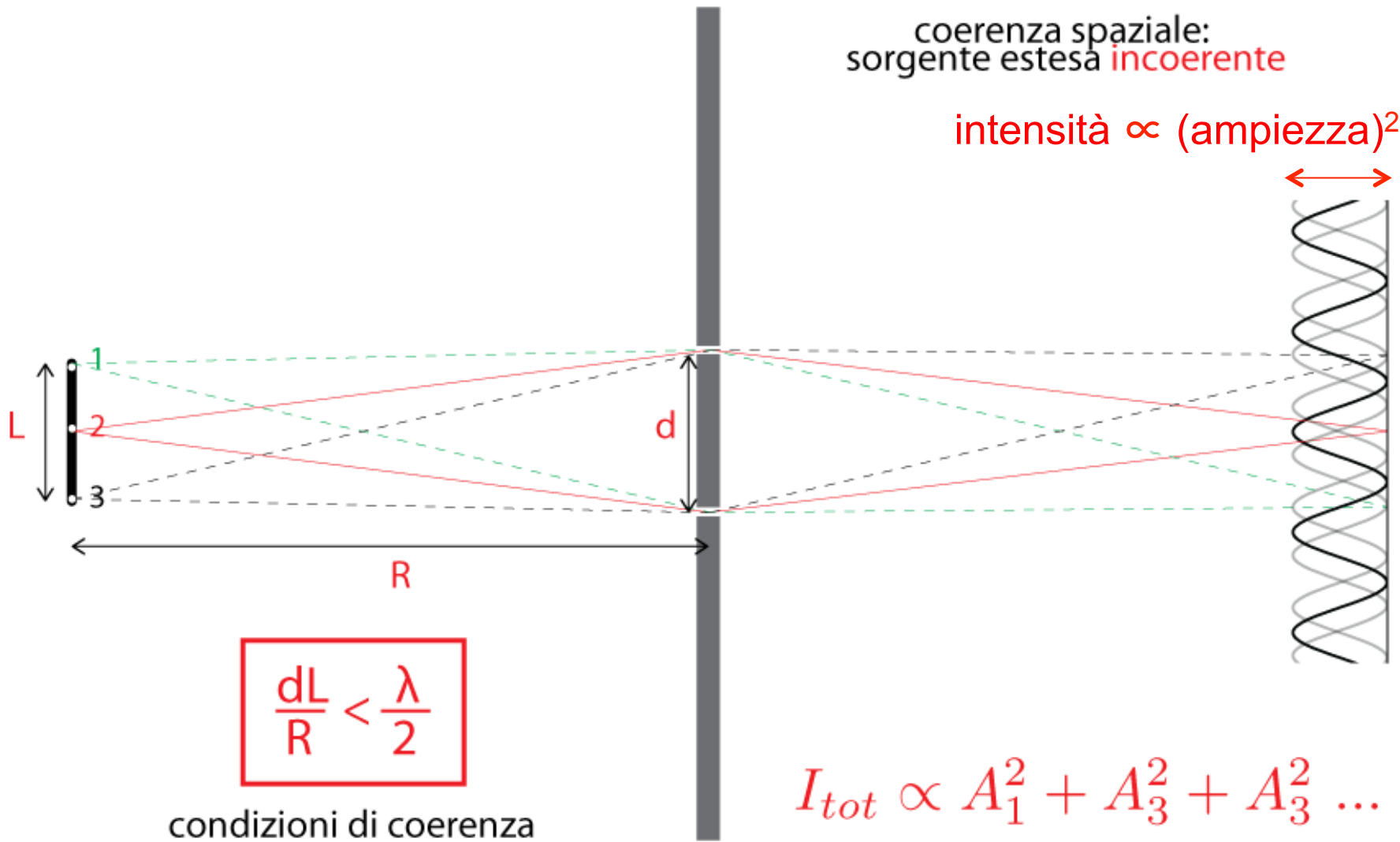
Dato che sorgenti distinte sono incoerenti, si sceglie di operare con una *sorgente singola* sdoppiandola con le due fenditure (*metodo di Young*)

Ma anche una singola sorgente, pur piccola, non è un unico punto, e punti diversi di essa emettono onde che non hanno tra loro una relazione di fase costante.

Nonostante ciò, se certe condizioni geometriche sono soddisfatte, la sorgente non puntiforme può essere sufficientemente coerente da produrre frange di interferenza.

coerenza spaziale:
sorgente estesa **incoerente**

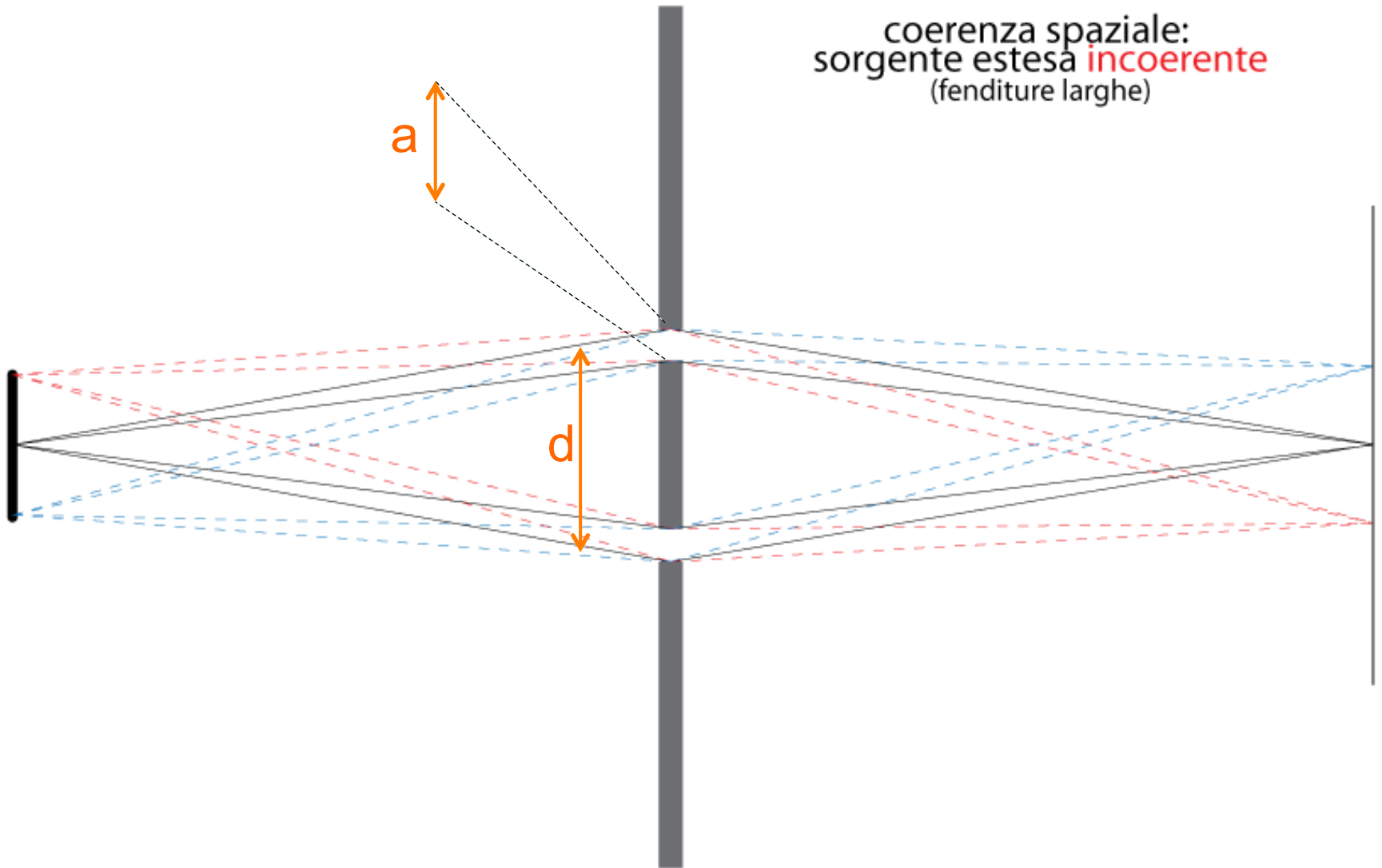
intensità $\propto (\text{ampiezza})^2$



condizioni di coerenza

$$I_{tot} \propto A_1^2 + A_3^2 + A_3^2 \dots$$

coerenza spaziale:
sorgente estesa **incoerente**
(fenditure larghe)



numero di frange visibili $\approx d/a$, ma d , per problemi di coerenza e visibilità delle frange deve essere piccolo, quindi a deve esserlo ancora di più ...

Riassunto

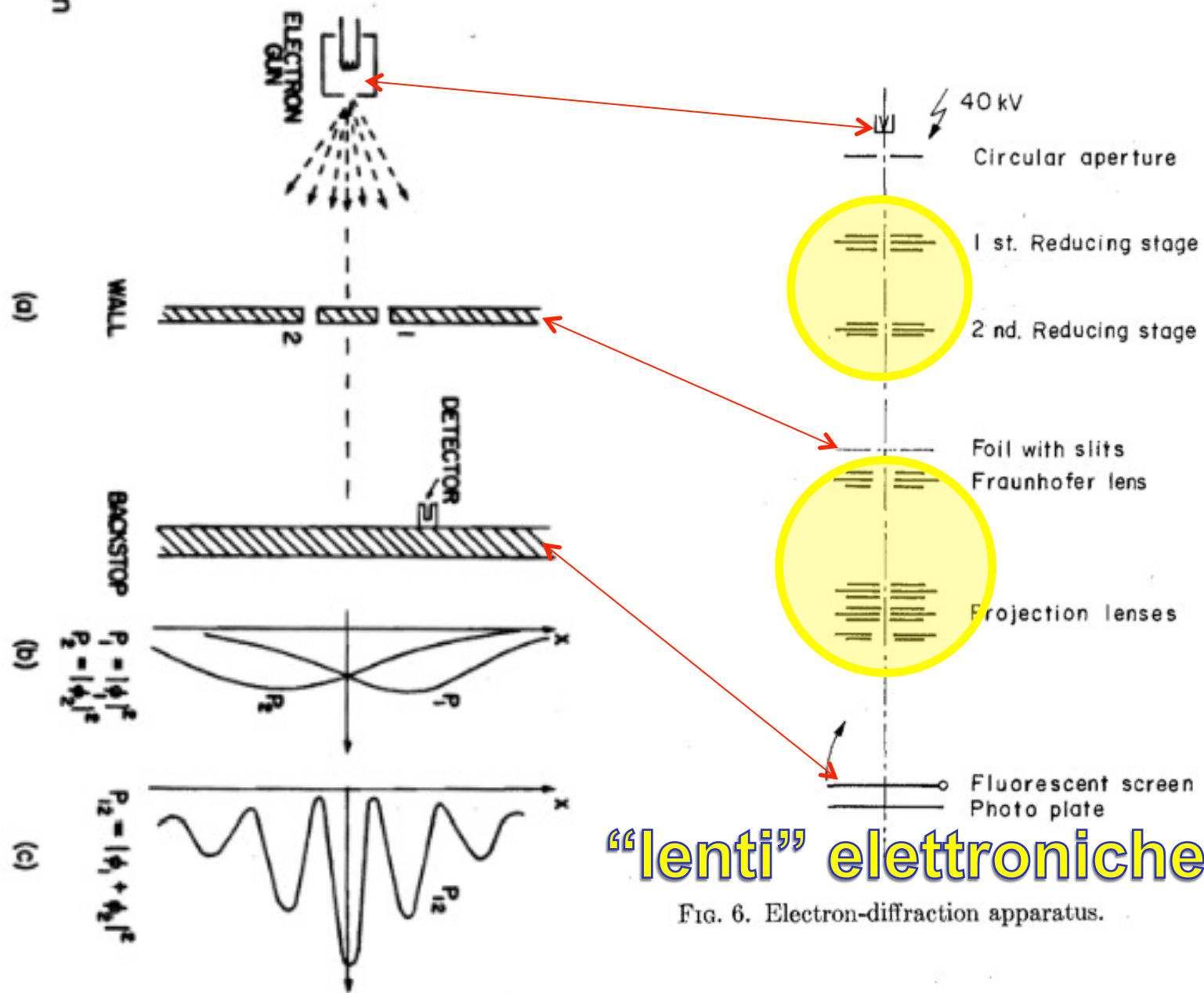
Esigenze di *visibilità* delle frange e di *coerenza* impongono una geometria in cui:

- dimensioni della sorgente primaria, delle fenditure, distanza tra le fenditure: simili alla lunghezza d'onda

(condizioni praticamente impossibili viste le lunghezze d'onda degli elettroni), oppure , in alternativa ...

- distanze sorgente-fenditure e fenditure-schermo rivelatore molto grandi (centinaia di metri!)

anche queste condizioni non sembrano facili, ma per fortuna c'è un “trucco” per realizzarle restando entro uno spazio limitato ...

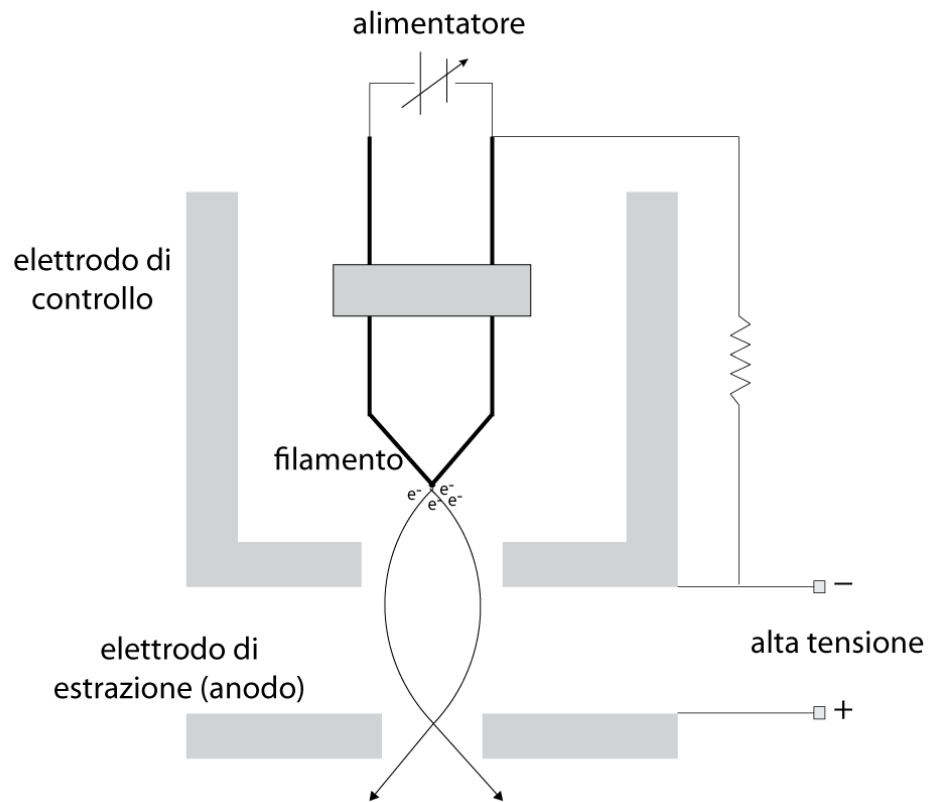


“lenti” elettroniche

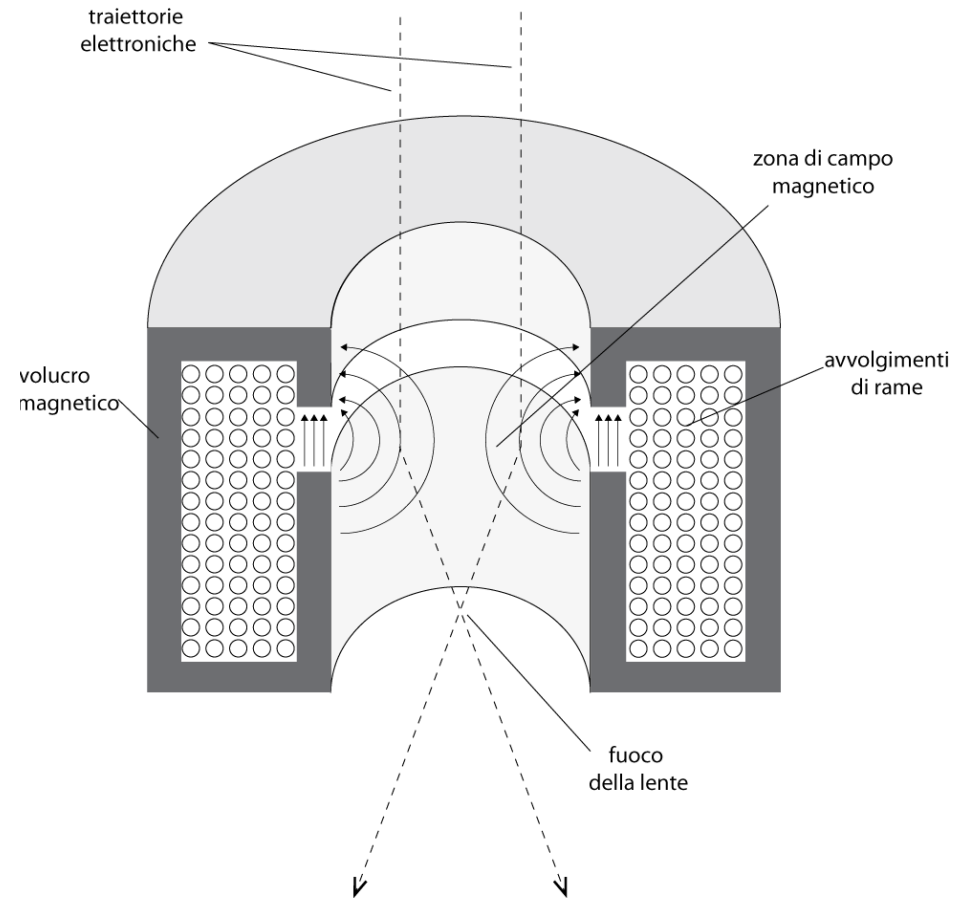
FIG. 6. Electron-diffraction apparatus.

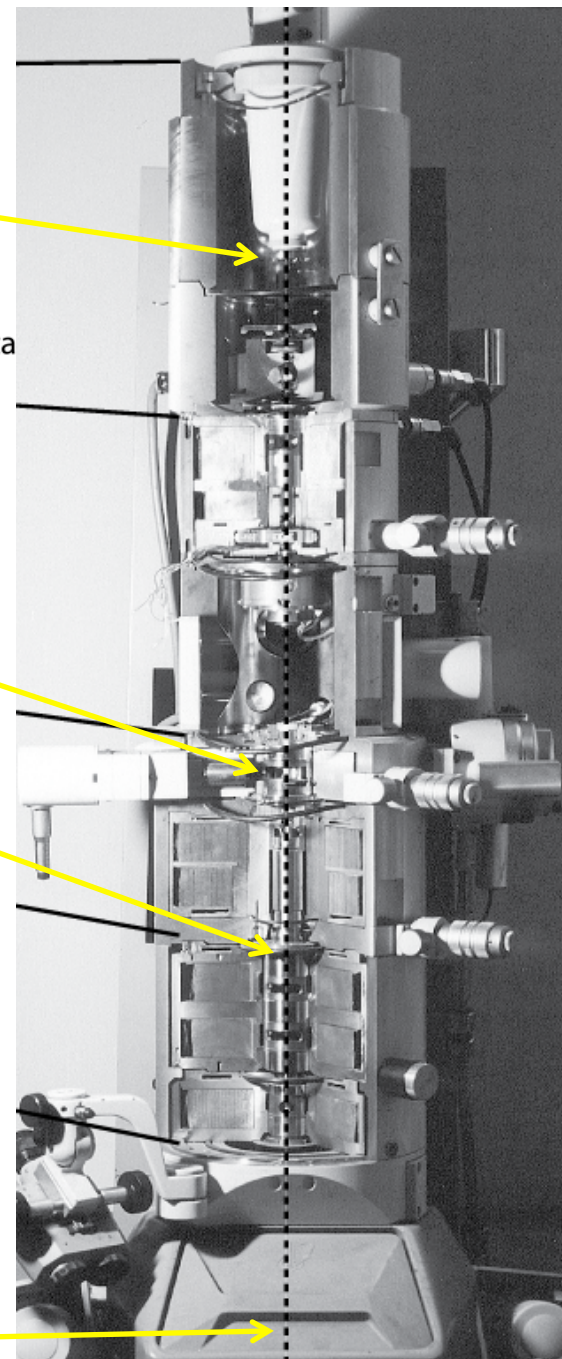
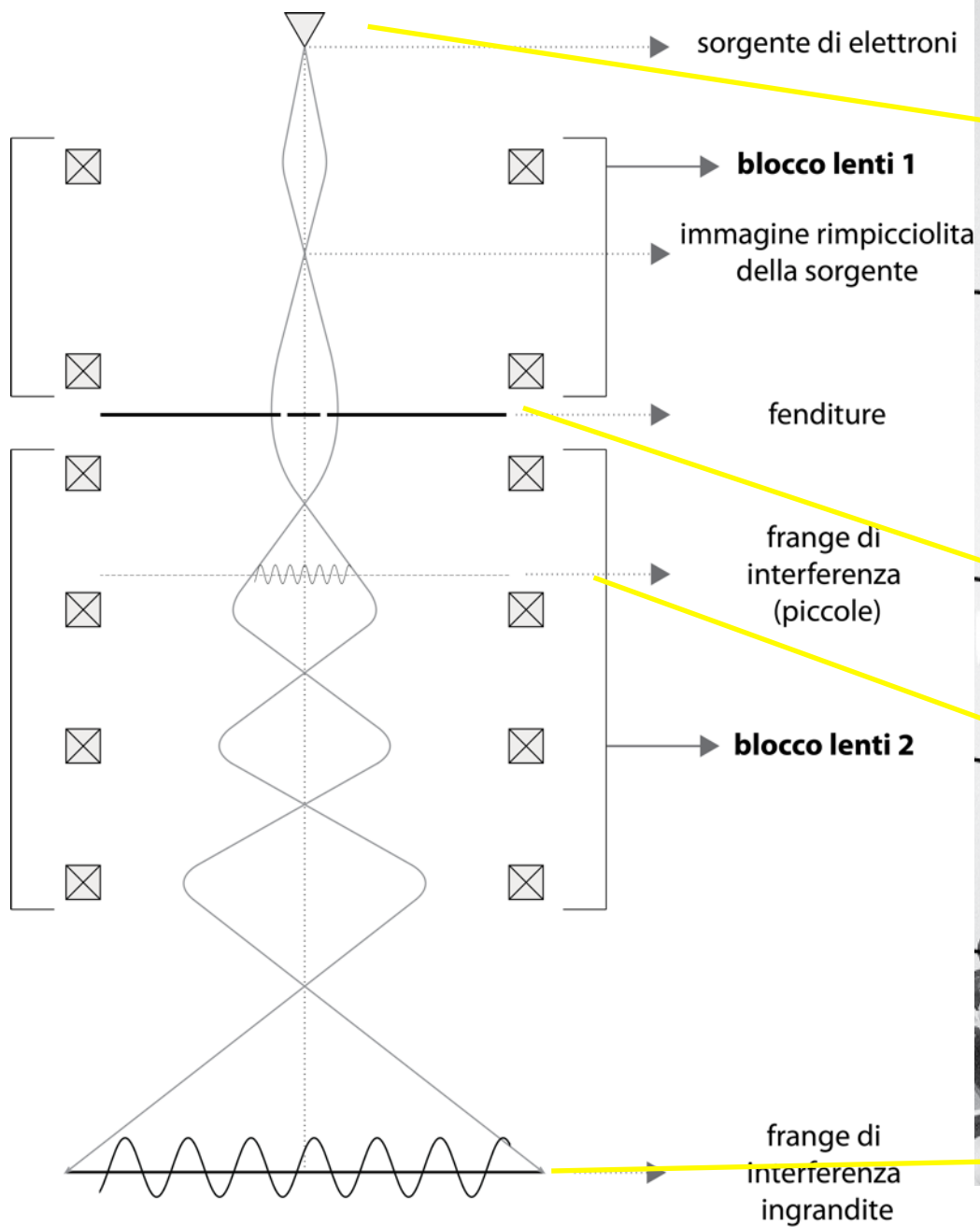
C. Jönsson (Univ. Tubinga) 1961

sorgente di elettroni



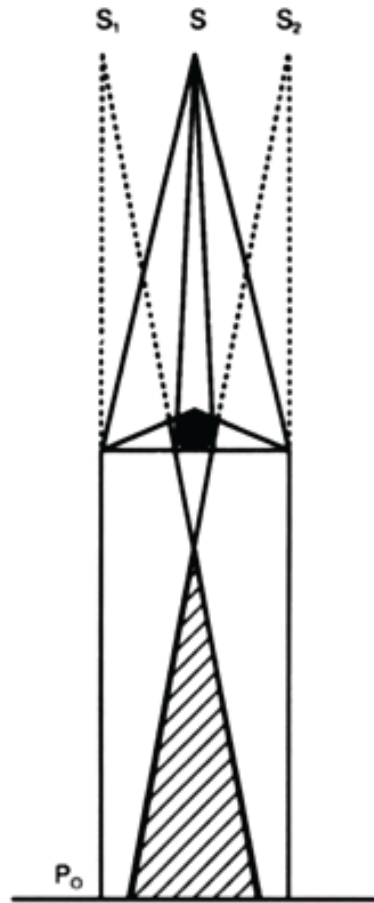
lente magnetica



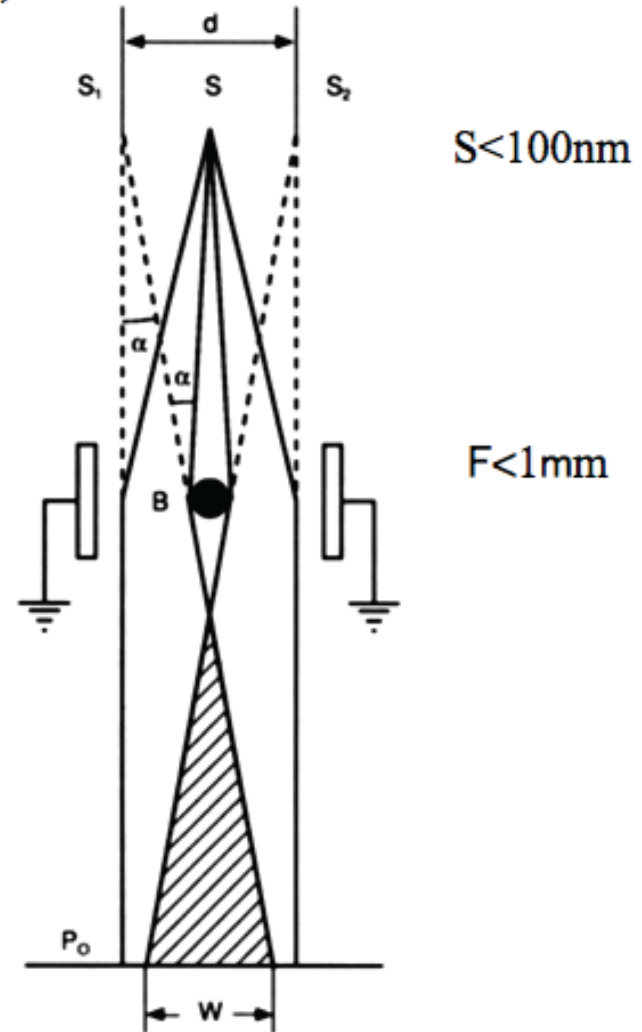


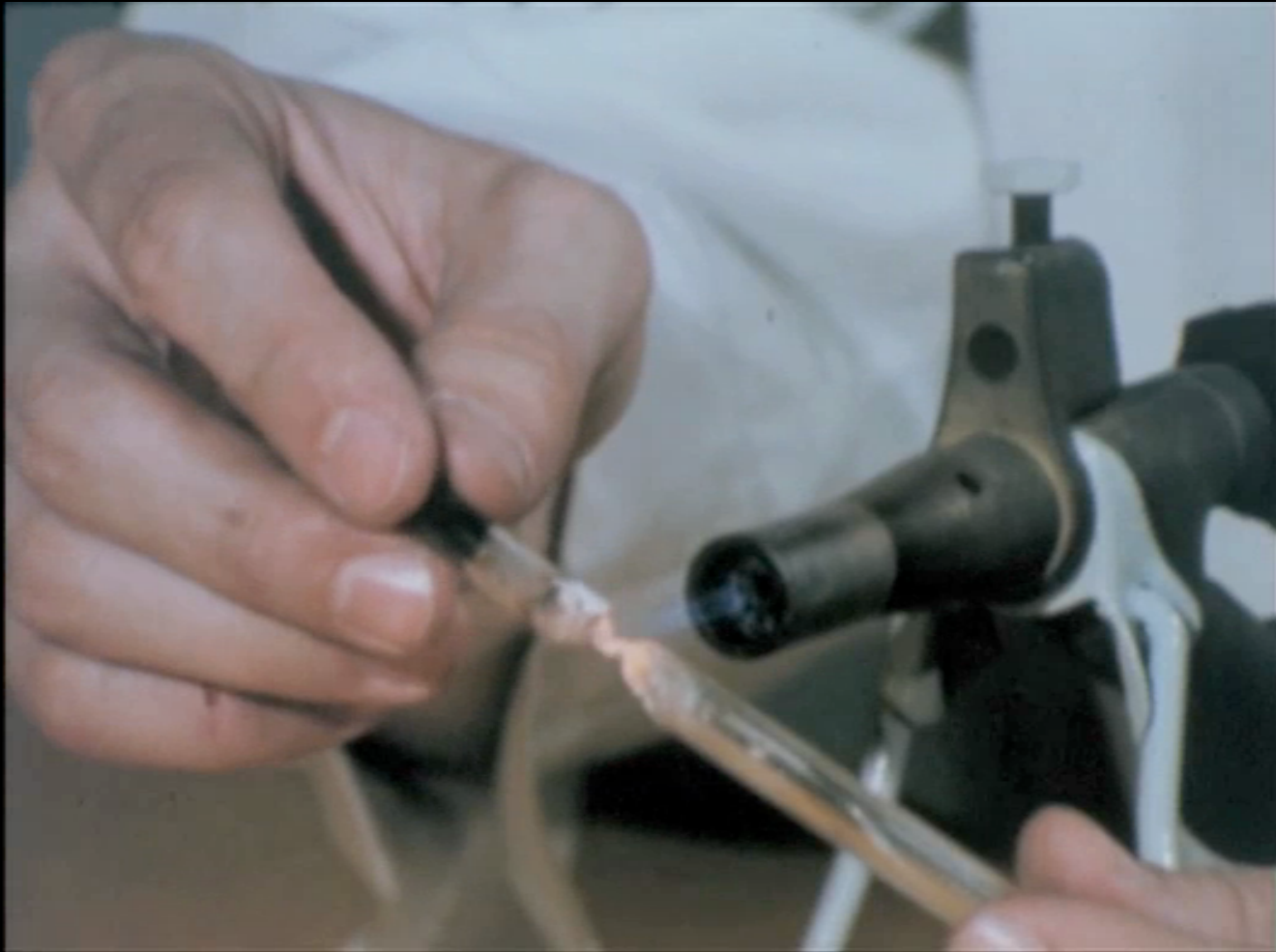
biprisma elettronico (Möllensted, Düker)

Tubinga (1955)



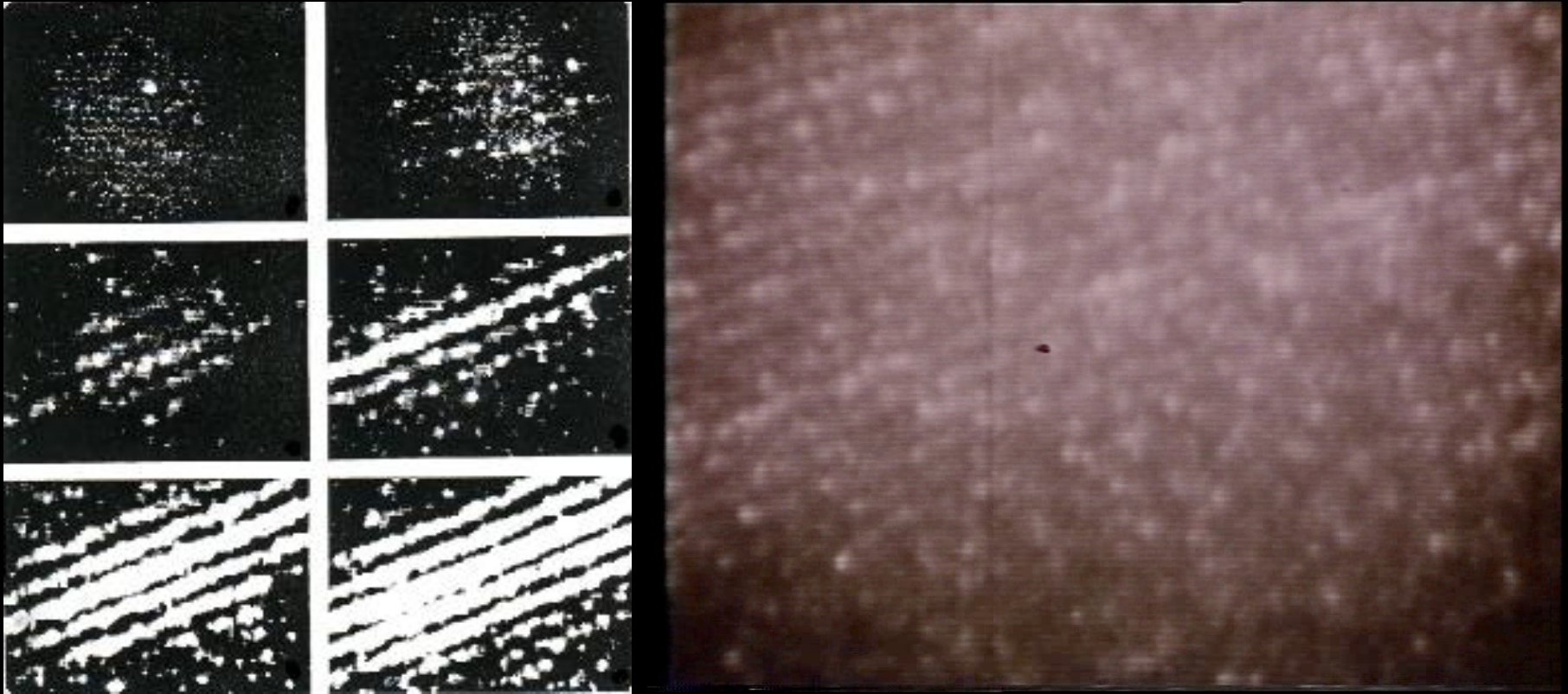
biprisma di Fresnel (luce)





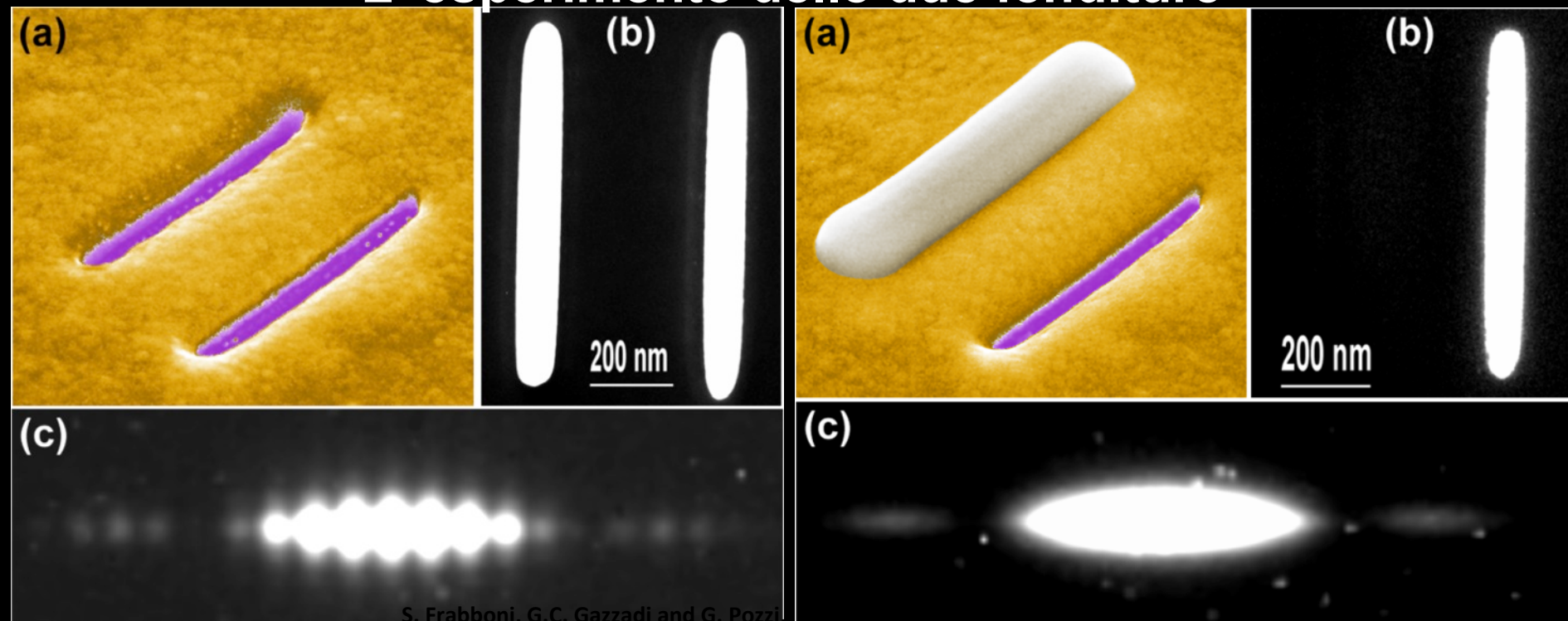
Da “Interferenza di elettroni” (1976)

Esperimento MMP: l'interferenza del singolo elettrone (1976)

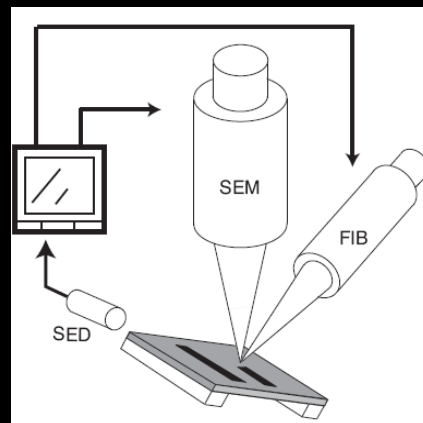
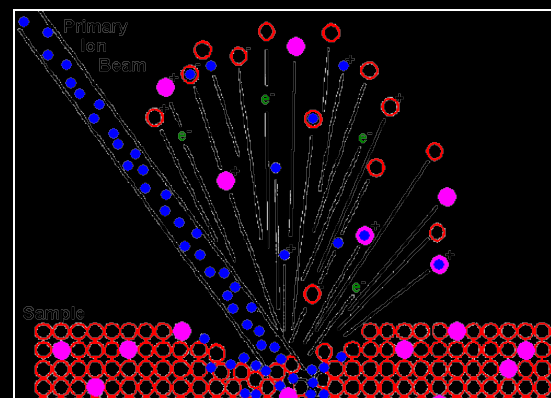


Film “Interferenza di elettroni” (1976) con collaborazione di D. Nobili, regia di L. Morettini

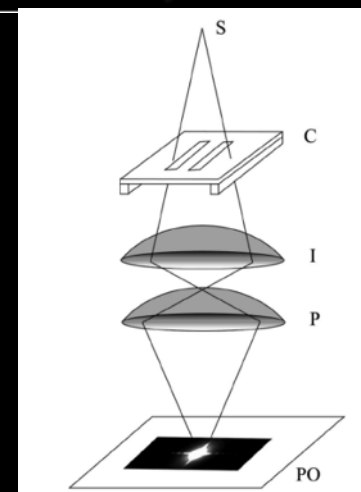
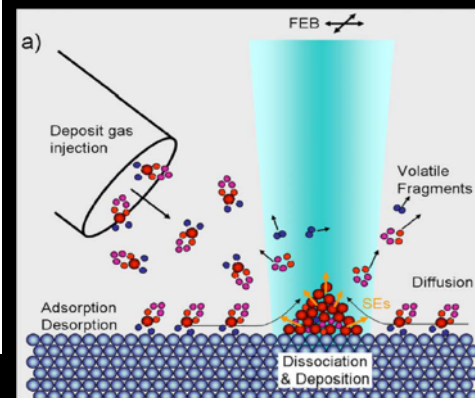
L' esperimento delle due fenditure



scavo



deposizione



Dual Beam: Fascio Ionico focalizzato(FIB) + Microscopio Elettronico a Scansione (SEM)

Microscopio elettronico in trasmissione (TEM)

Grazie per l'attenzione !