

# Programma

- Incontro 1:** Introduzione all'esperimento di interferenza di elettroni singoli (Olivia Levrini, Giorgio Lulli)
- Incontro 2:** Laboratorio sull'interferenza delle onde alla superficie di un liquido e sull'interferenza della luce (Barbara Pecori)
- Incontro 3:** Esperimenti sul comportamento ondulatorio degli elettroni con un microscopio elettronico (Giorgio Matteucci)
- Incontro 4:** La "Quantistica": Dall'esperimento più bello agli esperimenti which way (Giorgio Lulli, Vittorio Monzoni)
- Incontro 5:** La "Quantistica": un nuovo capitolo della fisica (Elisa Ercolessi, Vittorio Monzoni)
- Incontro 6:** Applicazioni della fisica quantistica (Eugenio Bertozzi)

**Il materiale didattico (slide delle presentazioni) sarà reso disponibile in download dopo lo svolgimento delle lezioni sulla pagina dedicata del sito sull'esperimento più bello della fisica:**

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

# **Introduzione**

(l'esperimento "più bello" della fisica: di che si tratta?)

*Giorgio Lulli*

# 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

il film



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

dal 2009

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 "mentale" per illustrare un effetto 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

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

## 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



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



Realizzazione: Clivis - Bologna

graphic design ©giorgio lulli 2011



interferenza di elettroni - l'esperimento più bello

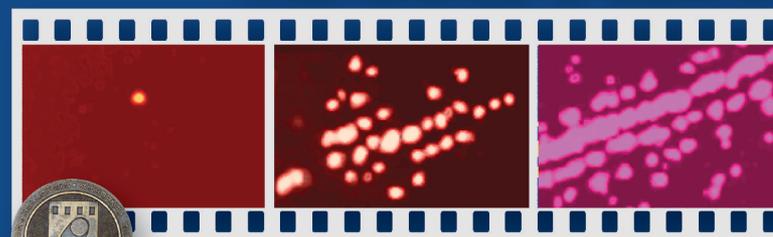


Consiglio Nazionale delle Ricerche  
Istituto per la Microelettronica e i Microsistemi  
(IMM) Sede di Bologna



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 del 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 gratuita con la vendita

# 2010

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

proiezione documentario

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

ecco qua il prototipo di tutte le stranezze quantistiche:

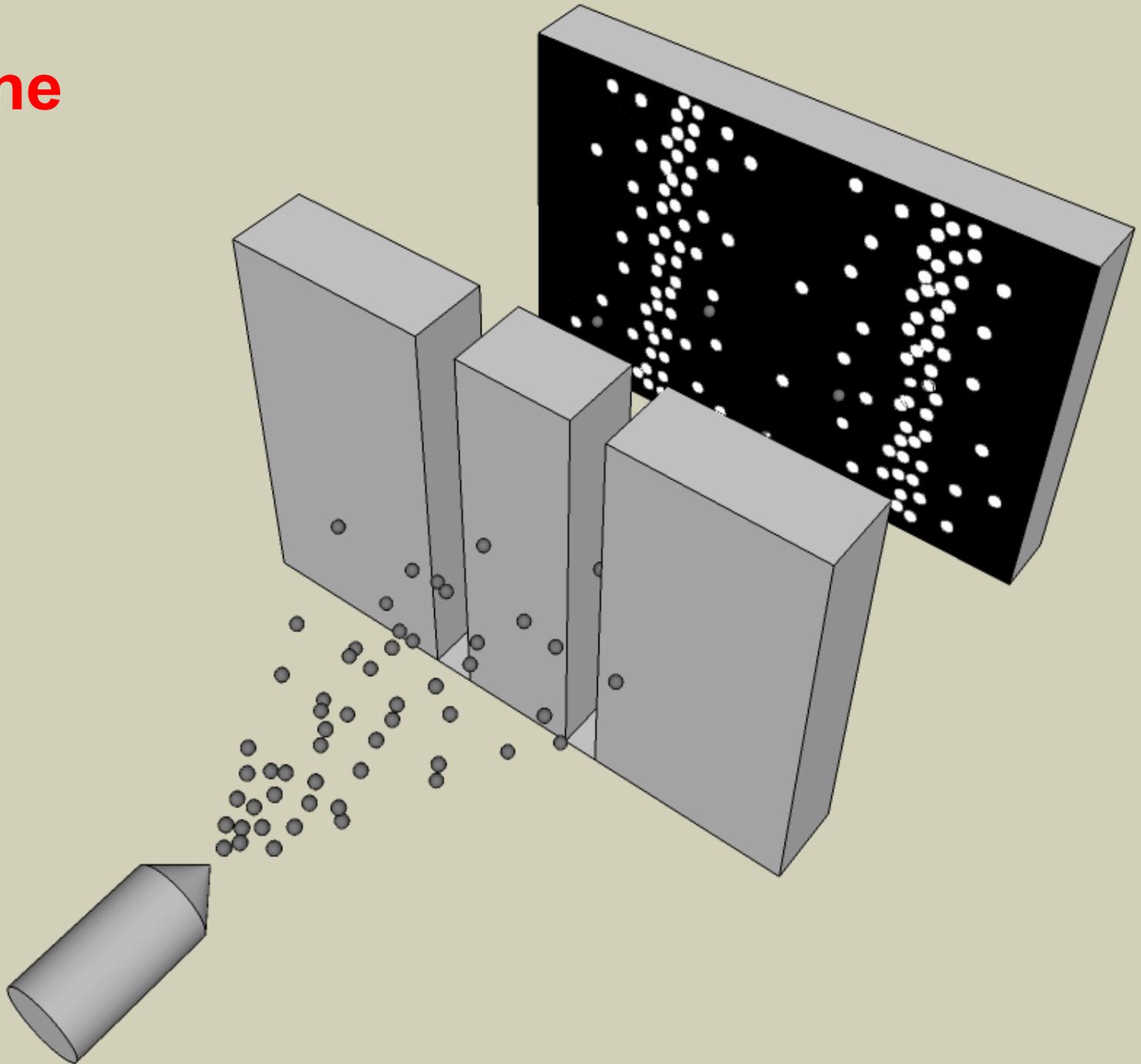
# **L'esperimento più bello e i suoi misteri**

*Olivia Levrini*

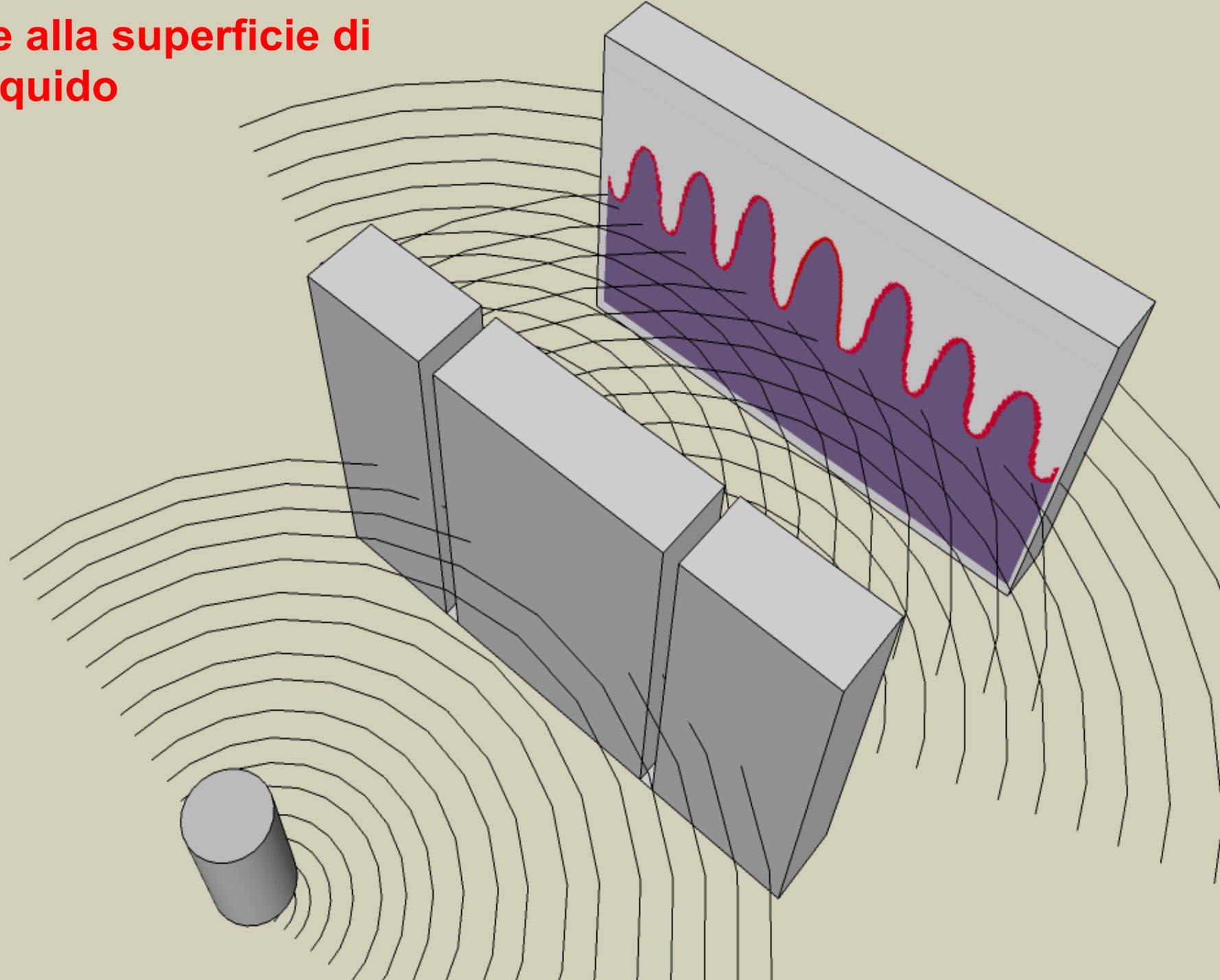
**Analisi delle situazioni considerate  
nel filmato con un criterio:**

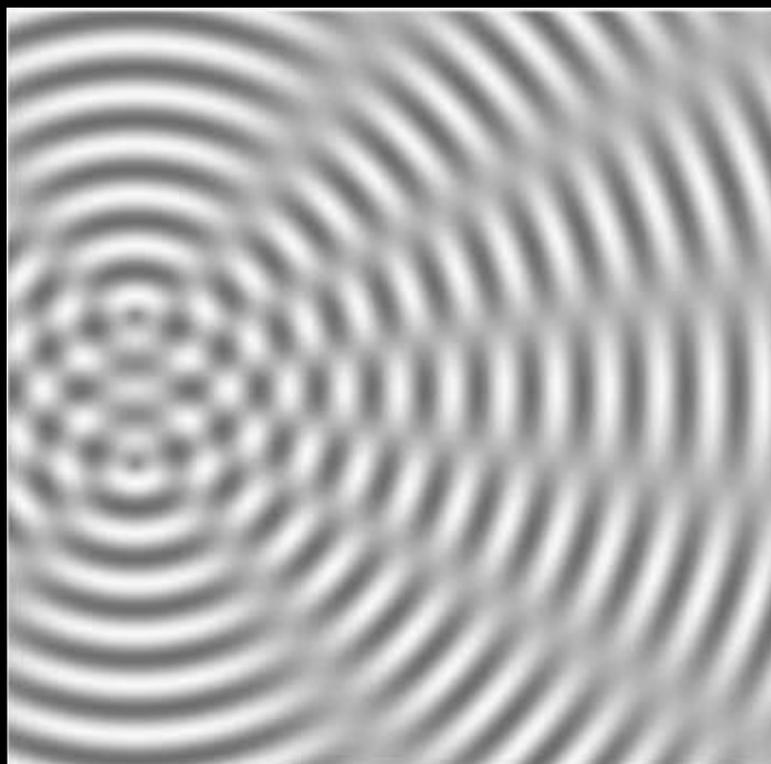
***tener sotto controllo che cosa  
vediamo (i fatti) e che cosa, invece,  
immaginiamo (che cosa ricostruiamo  
col pensiero)***

**palline**

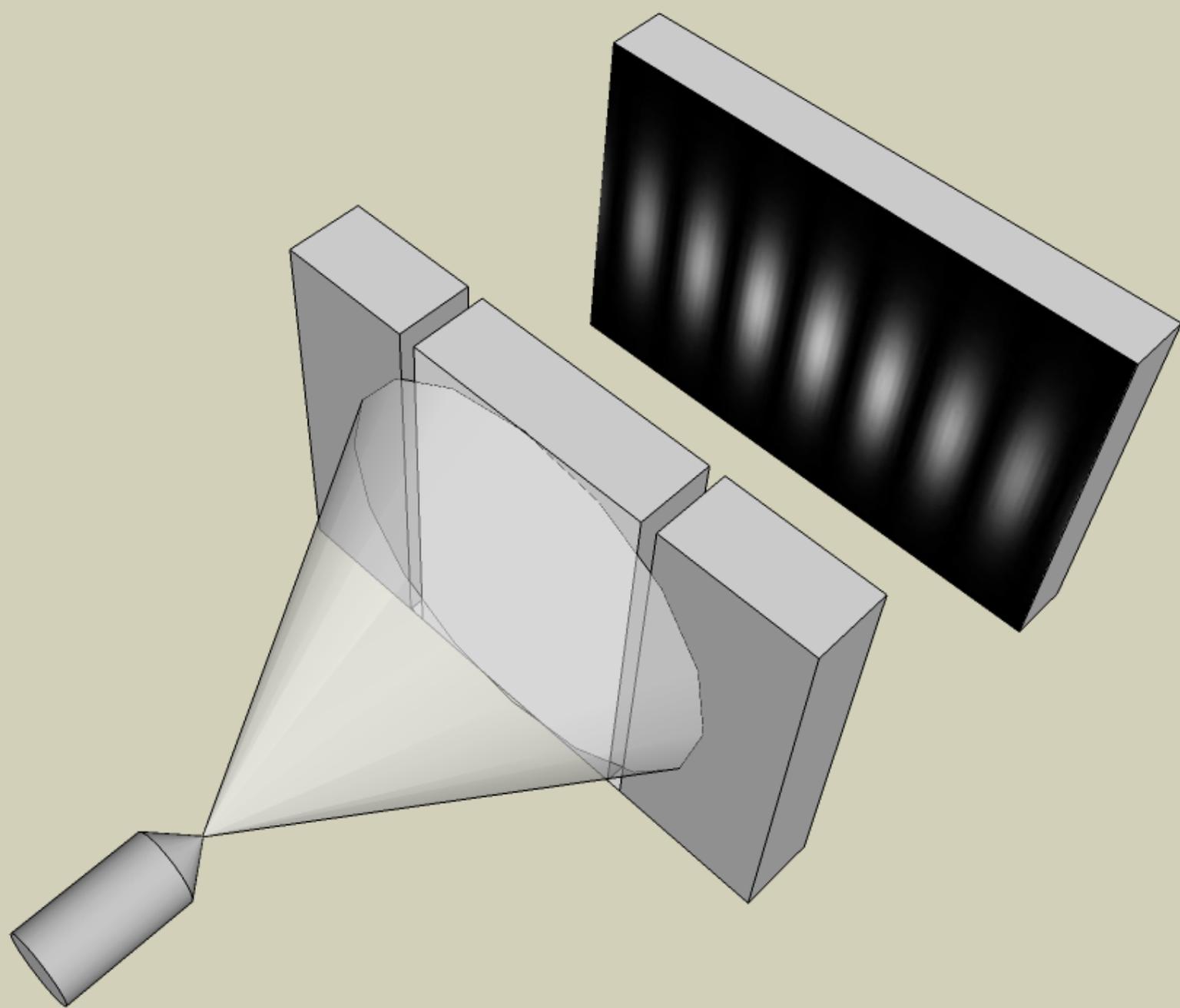


# onde alla superficie di un liquido

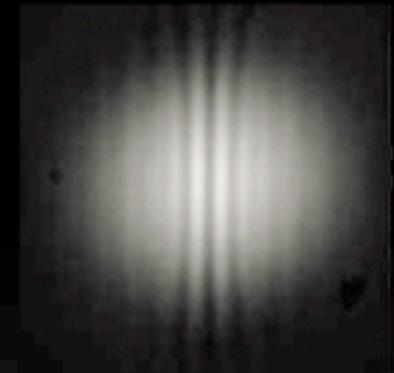




# Luce



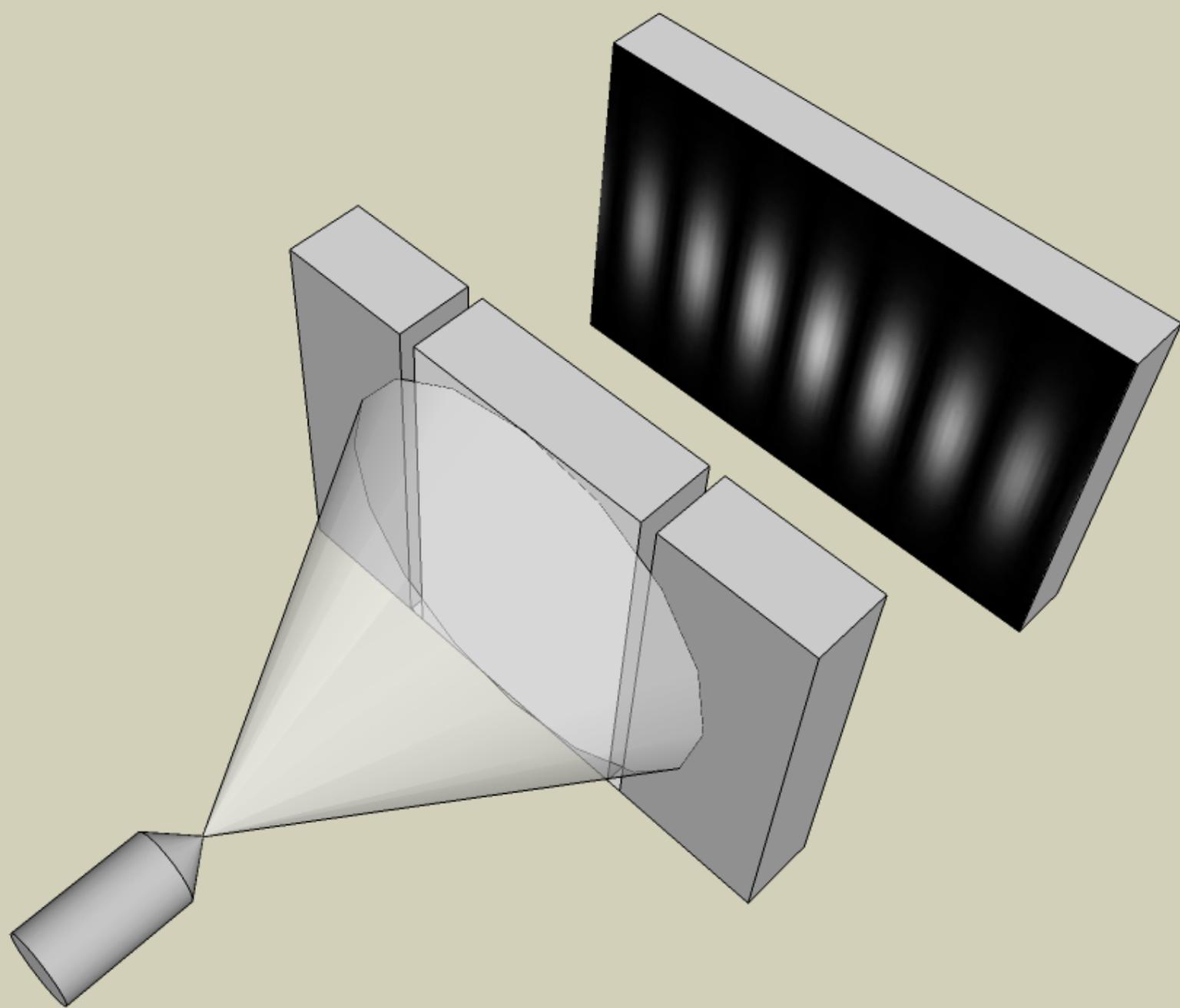
interferenza  
della luce  
(1803)



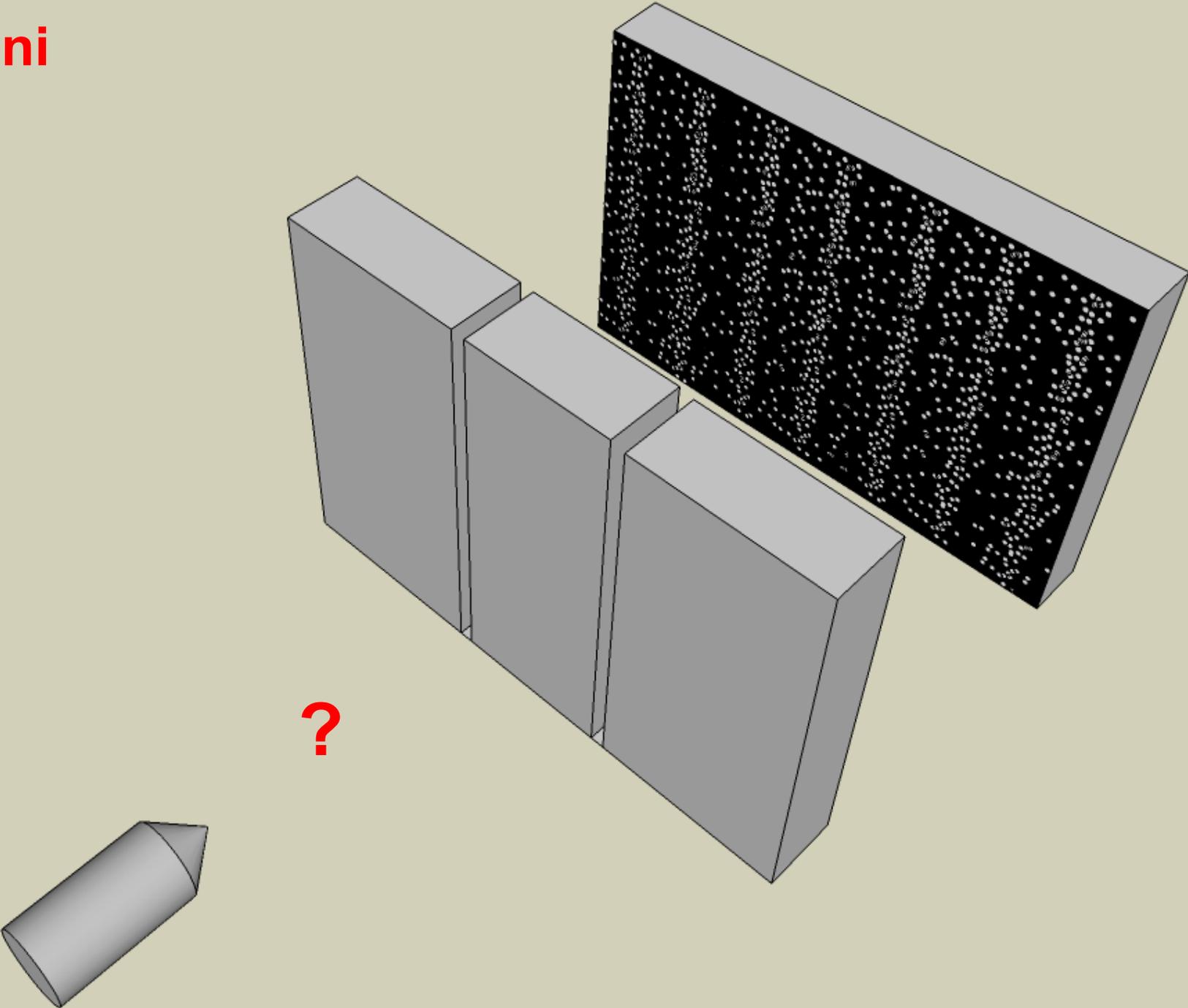
*Thomas Young (1773-1829)*

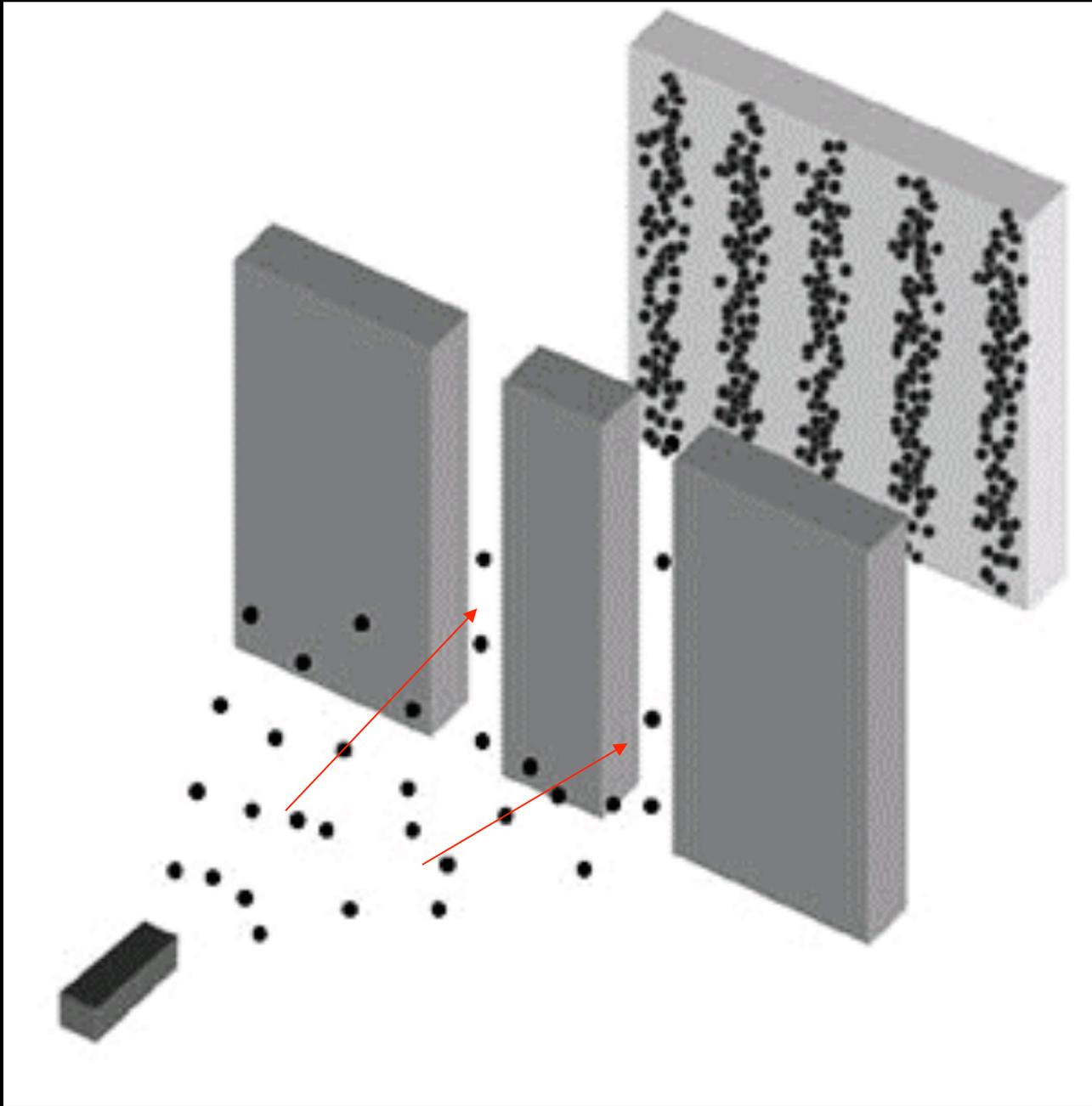
5

# Luce



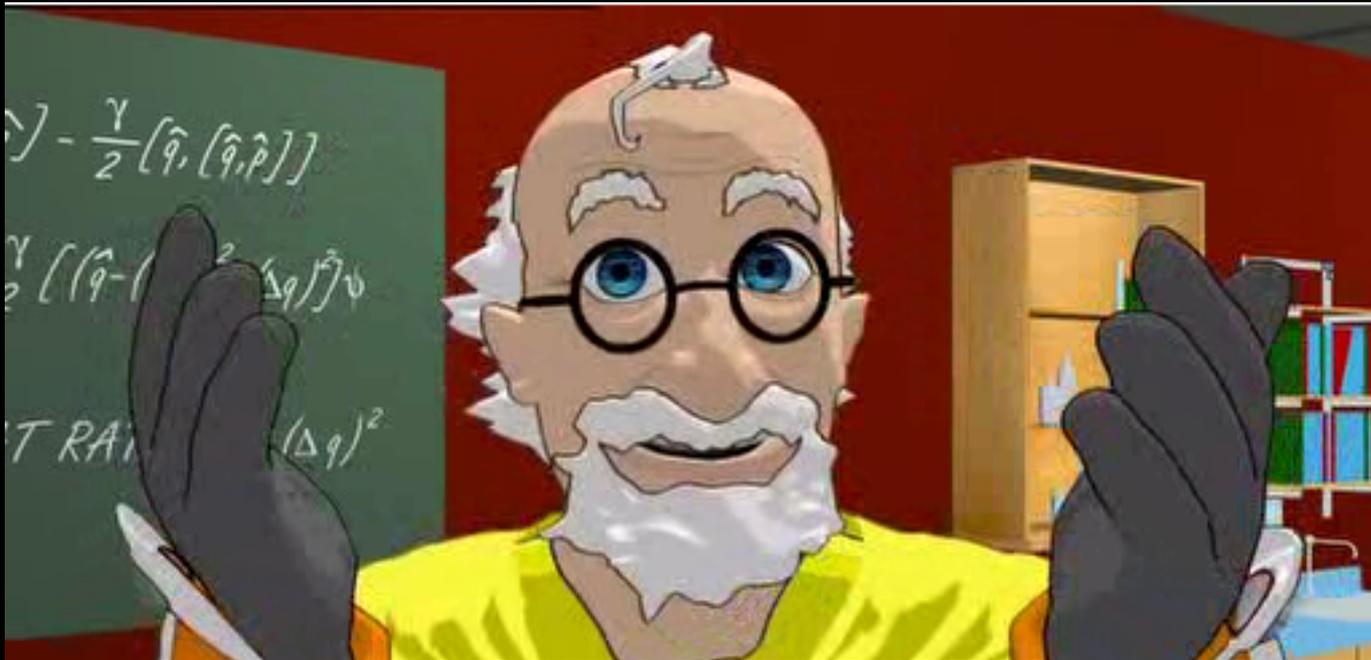
# Elettroni





# I conclusione



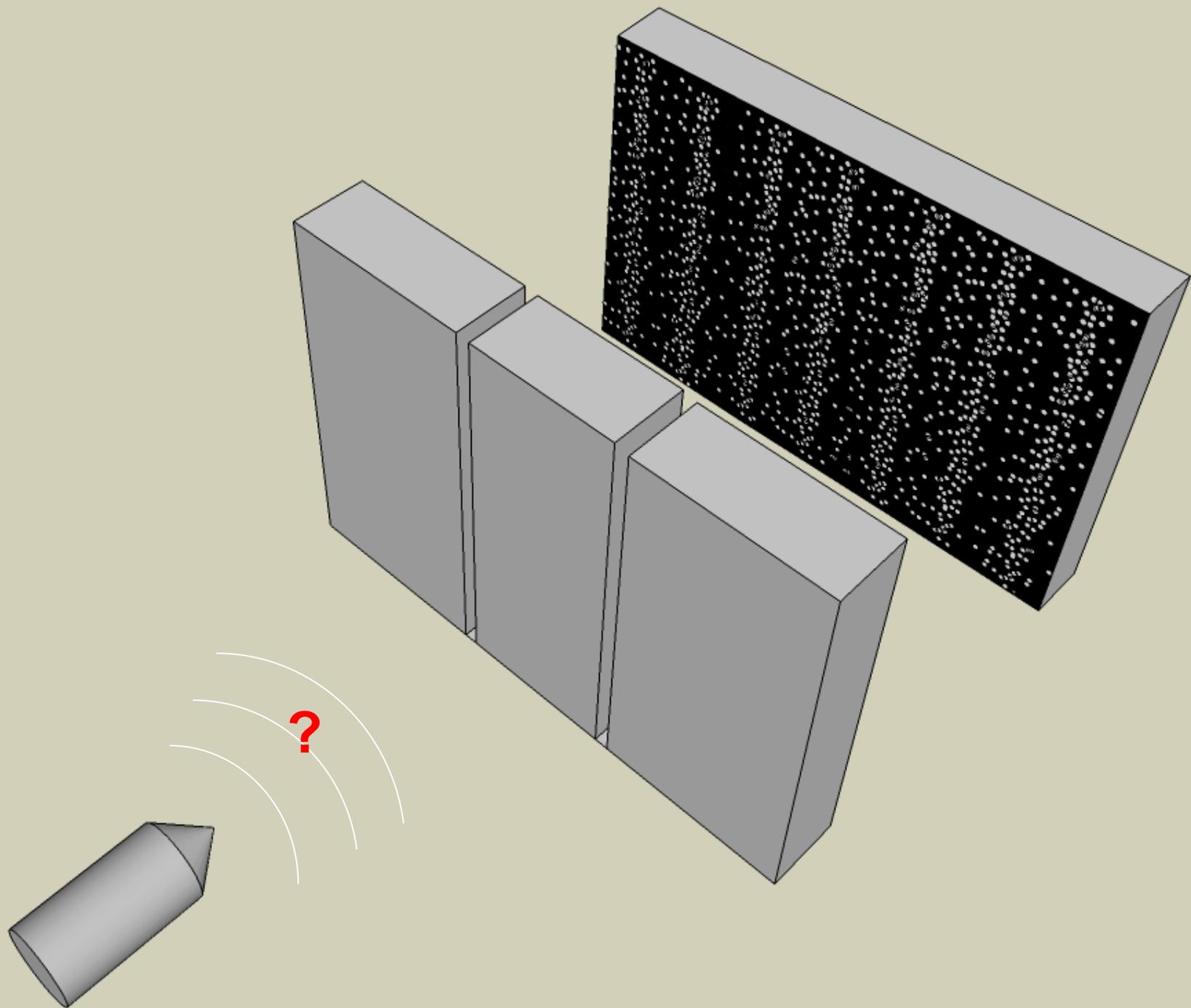


ciascun elettrone parte come una particella

***“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)***



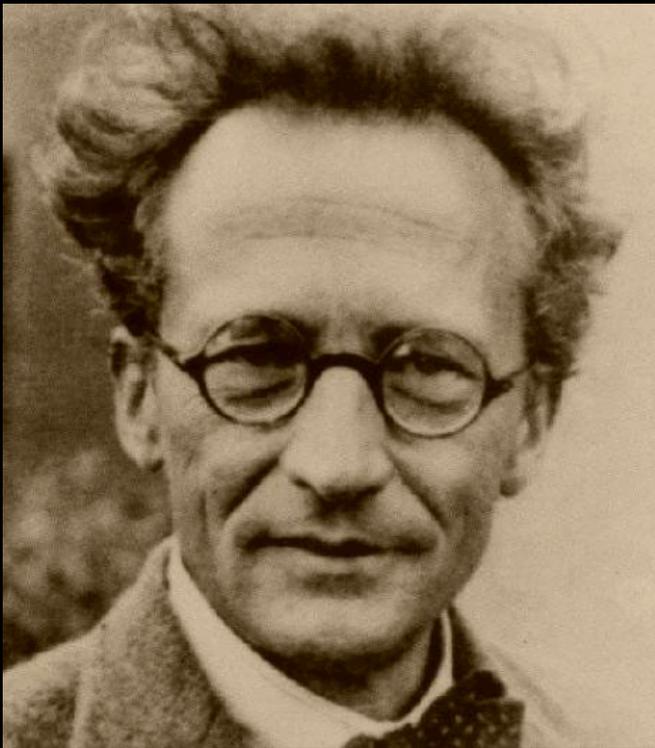
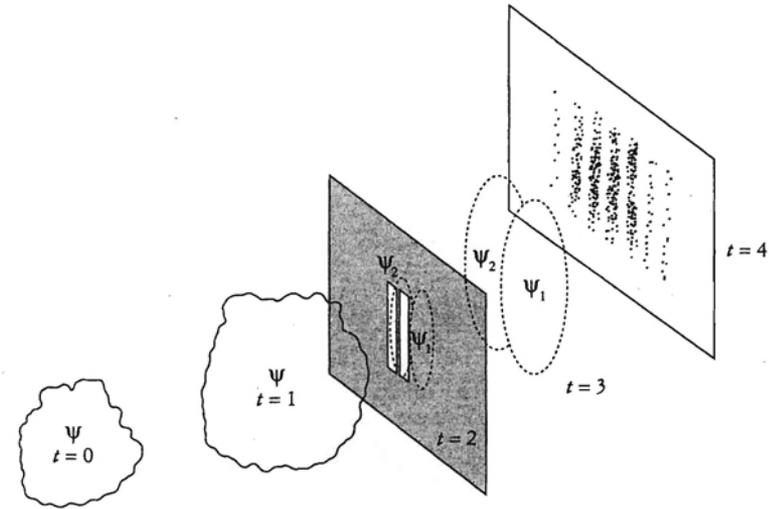
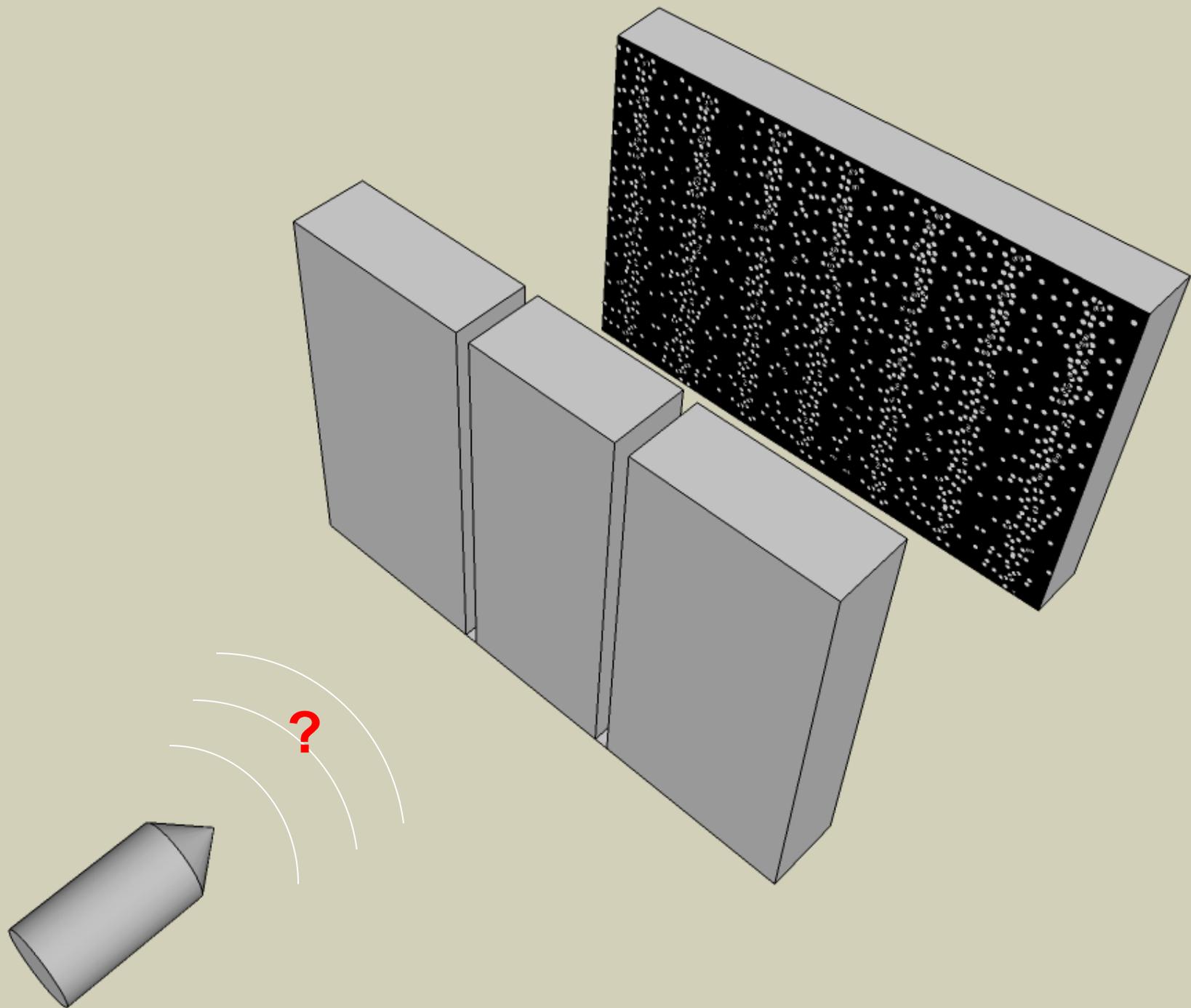


Figura 35.

Una «nube» di funzione d'onda  $\psi$  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**



***Contraria sunt complementa.***

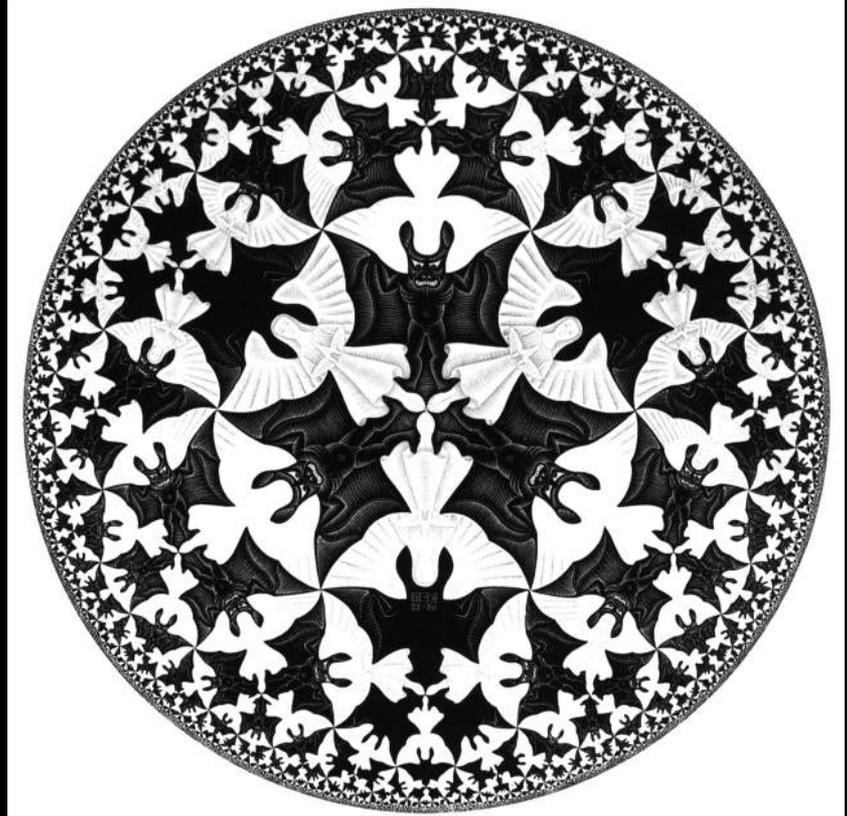
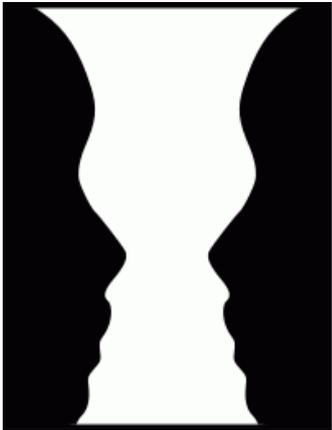
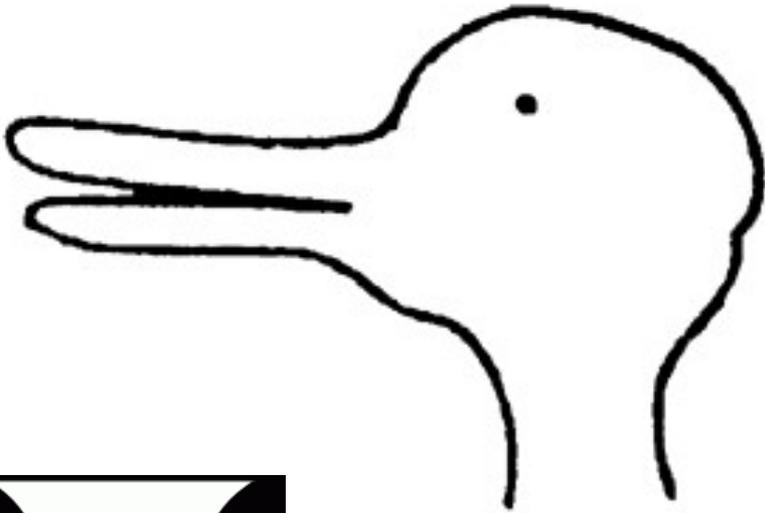


**Niels Bohr**

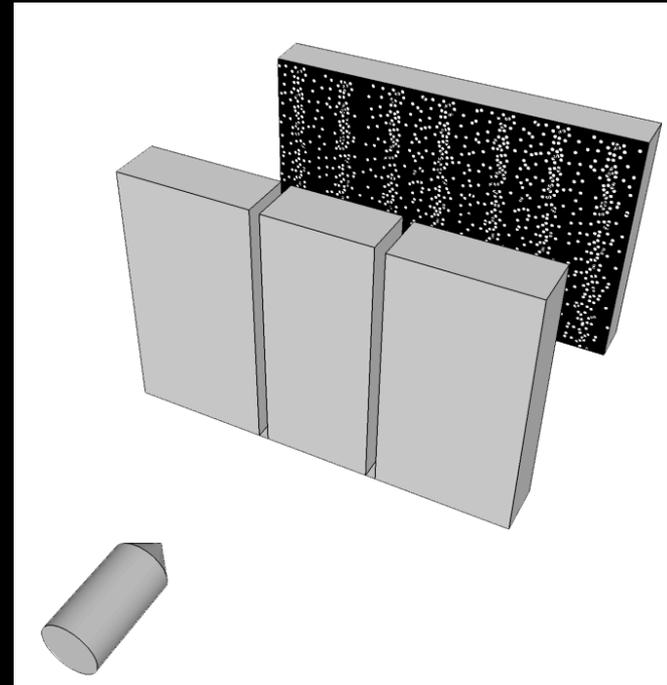
*Stando così le cose, l'attribuzione di qualità fisiche tradizionali agli oggetti atomici implica un **elemento essenziale di ambiguità**, come si vede immediatamente nella contraddizione relativa alle proprietà corpuscolari e ondulatorie degli elettroni e dei fotoni, in cui ci troviamo di fronte a immagini contrastanti, ognuna delle quali si riferisce a un aspetto essenziale dei dati sperimentali.*

*(Discussione con Einstein sui problemi epistemologici della fisica atomica, 1949, in Autobiografia scientifica, pp. 113- 114)*

**ambiguità**



### 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)



**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.”***

# La fisica 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 assiomi che lo regolano e lo conciliano con la realtà;
- Questa teoria spiega la realtà microscopica ma la spiega “a modo suo”...

## **“a modo suo”**

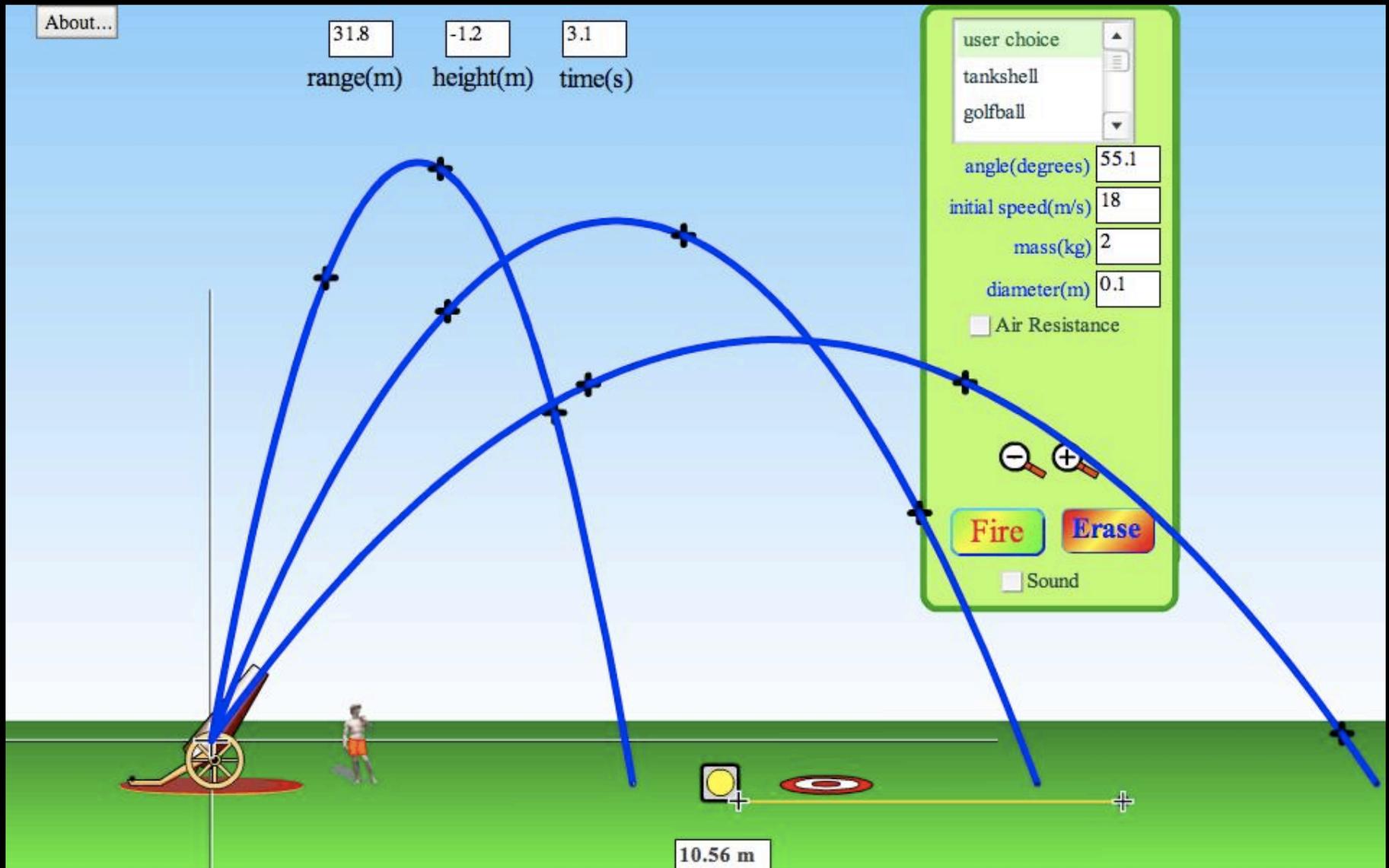
**la teoria funziona perfettamente: ha permesso di fare previsioni precisissime**

***ma***

**Impone di avere “nuovi occhi” per interpretare ciò che accade, anche perché assorbe dentro di sé 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

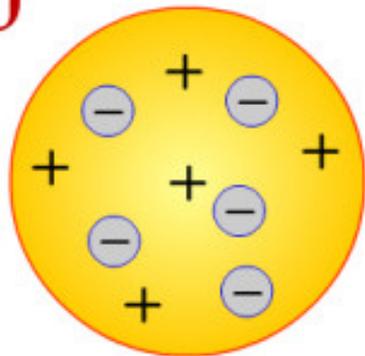
Le condizioni iniziali (posizione e velocità)  
non sono determinabili simultaneamente:

*nota una, l'altra è INTRINSECAMENTE  
i n d e t e r m i n a t a ( n o t a s o l o  
“probabilisticamente”)*

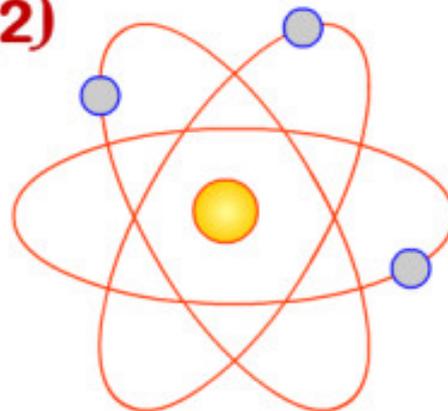
**PROBABILITA' NON-EPISTEMICA**

# Rappresentabilità dei fenomeni nello spaziotempo

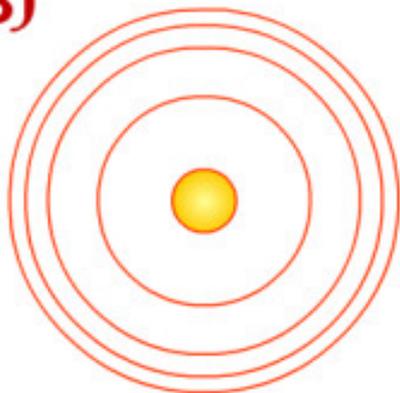
(1)



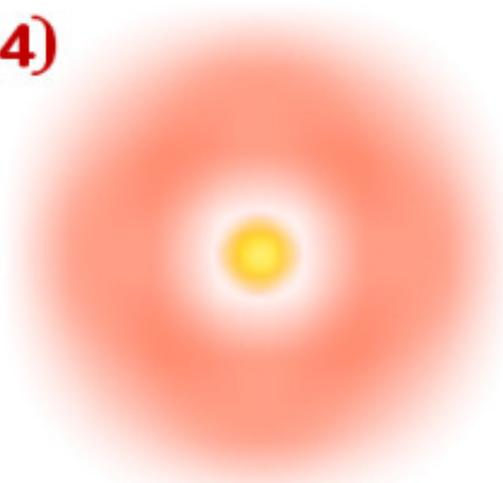
(2)



(3)



(4)



**Principio di non contraddizione**

***"A è anche non-A" è falsa***

***o mitologica...***



***“Non è affatto sorprendente che il nostro linguaggio sia incapace di descrivere i processi che avvengono negli atomi, visto che ce lo siamo inventati per descrivere le esperienze della vita quotidiana e queste RIGUARDANO OGGETTI DI GRANDI DIMENSIONI. Per di più, è molto difficile modificare il nostro linguaggio in modo tale da renderlo adatto a descrivere i processi atomici, visto che le parole possono solo descrivere cose di cui possiamo formarci immagini mentali; e anche questa è una capacità che ci viene dall’esperienza quotidiana. Per fortuna la matematica non ha queste limitazioni ed è possibile inventare uno schema matematico – la teoria quantistica – che sembra del tutto adatta alla trattazione dei processi atomici; per quel che riguarda la visualizzazione, quindi, ci dobbiamo accontentare di due analogie incomplete – l’immagine ondulatoria e quella corpuscolare.” (W. Heisenberg)***

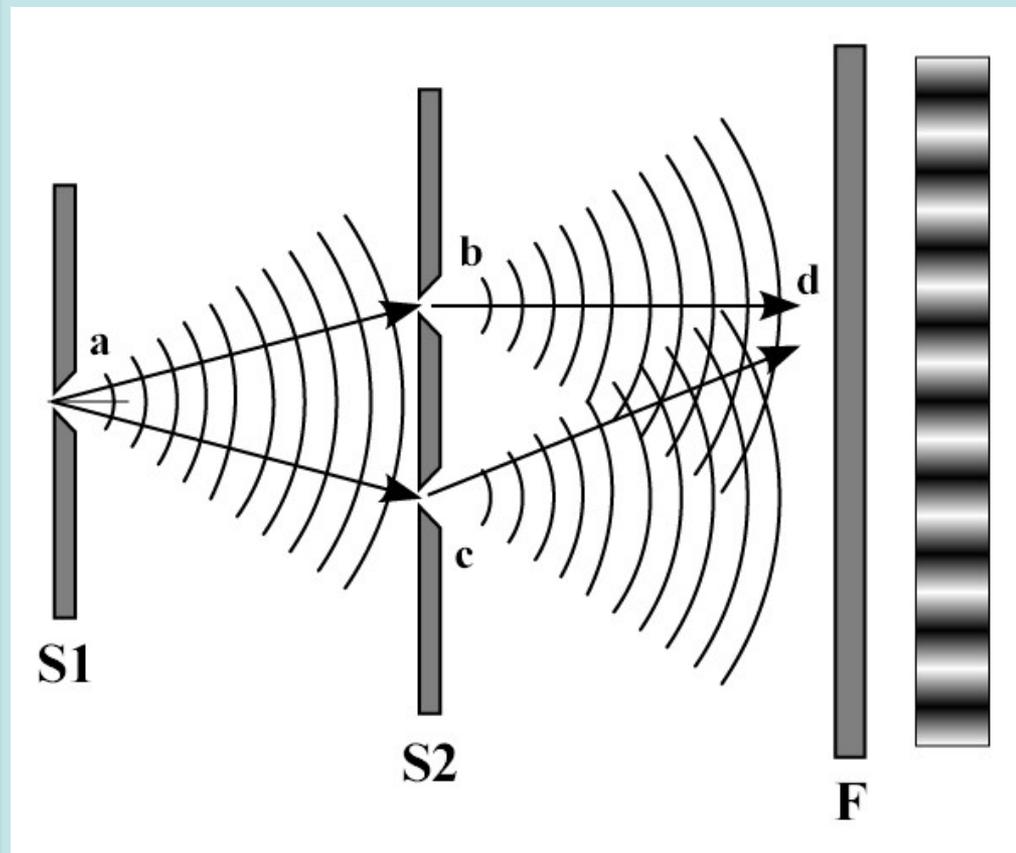
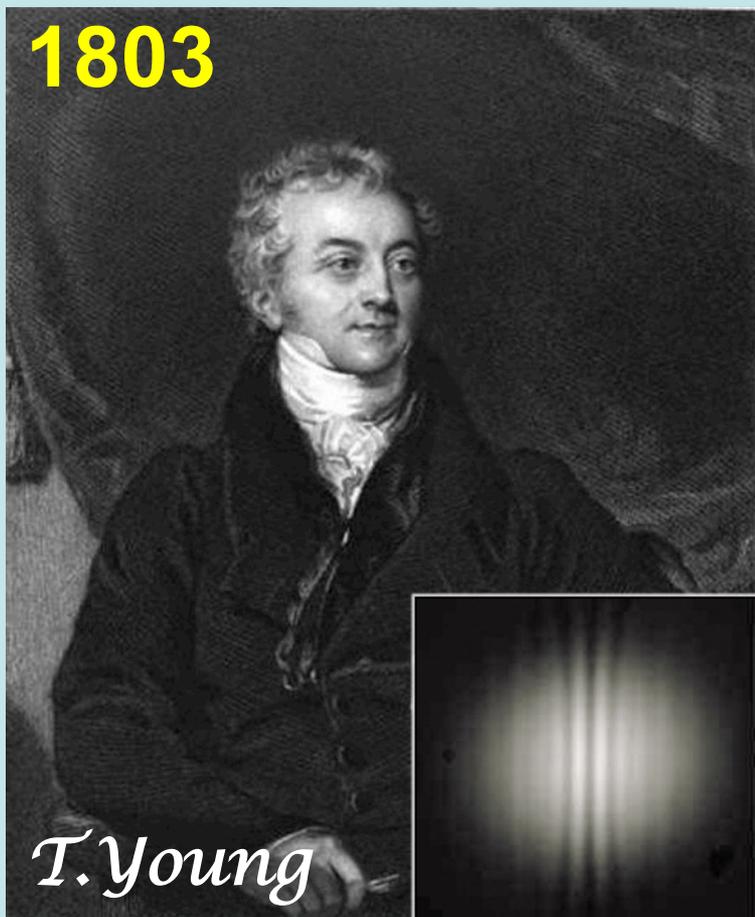
**....lo vedrete negli incontri 4- 5!**

**L'esperimento più bello: dalla mente al  
laboratorio**

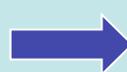
*Giorgio Lulli*

# L'esperienza della doppia fenditura di Young

1803

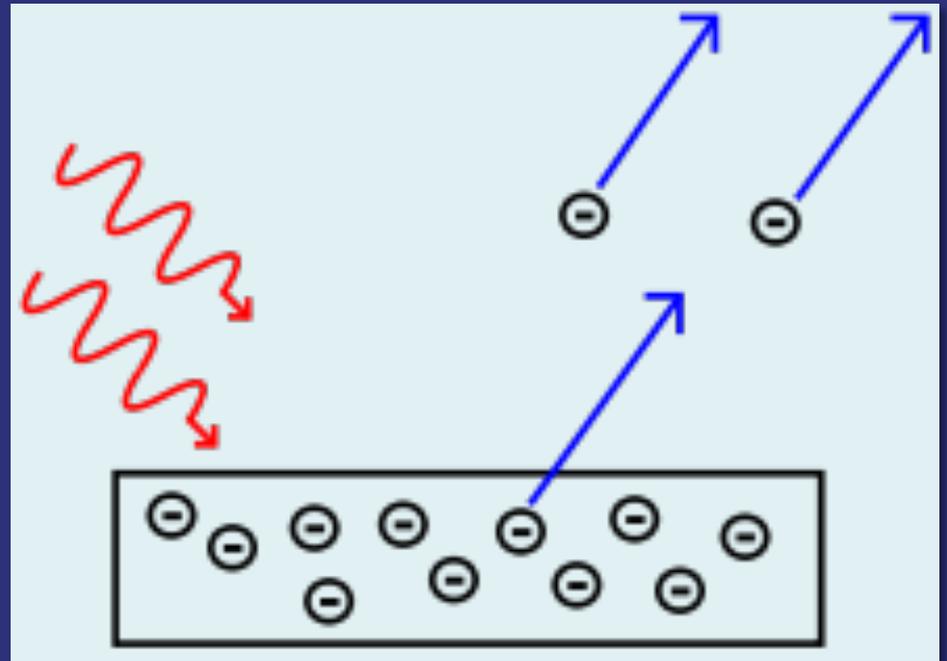


interferenza



luce = onda

1905



effetto fotoelettrico →

**luce = particelle**

(*quanti di luce o fotoni*)  $E = h\nu$

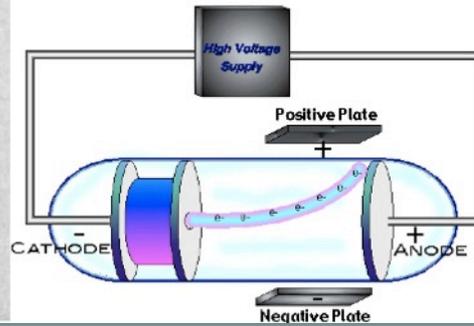
# elettroni?



*J.J. Thomson*

**1897**

**corpuscoli**



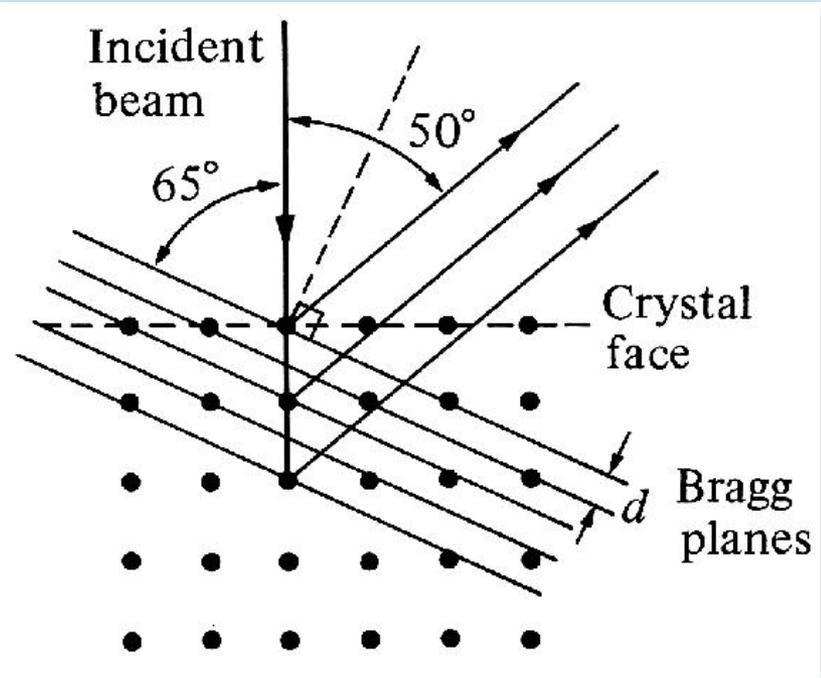
*L. De Broglie*

$$\lambda = h/mv$$

**onde !**

**1923**

# diffrazione elettroni



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

Distanza interplanare Nickel  $d=0.091$  nm

**L'esperimento di Davisson e Germer fu la prima dimostrazione sperimentale del comportamento ondulatorio degli elettroni**

# Lunghezza d'onda elettroni: relazione di 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)***

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

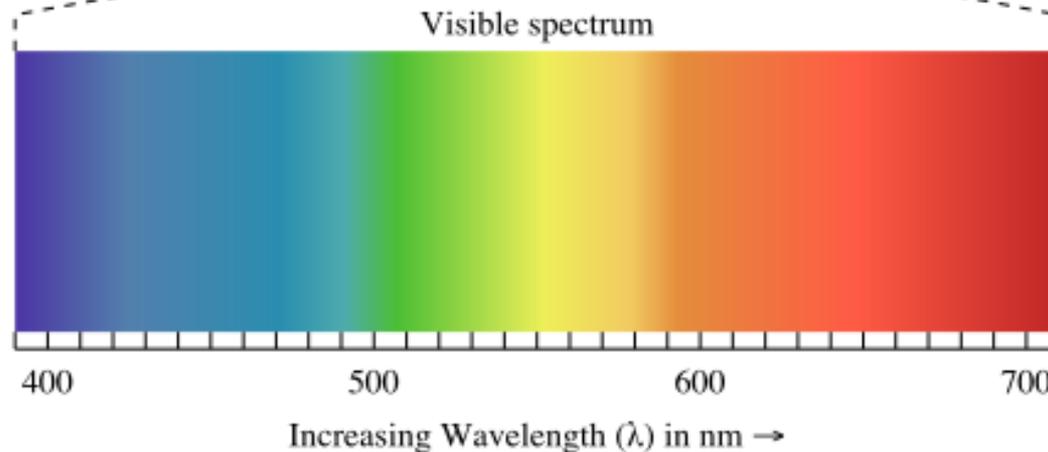
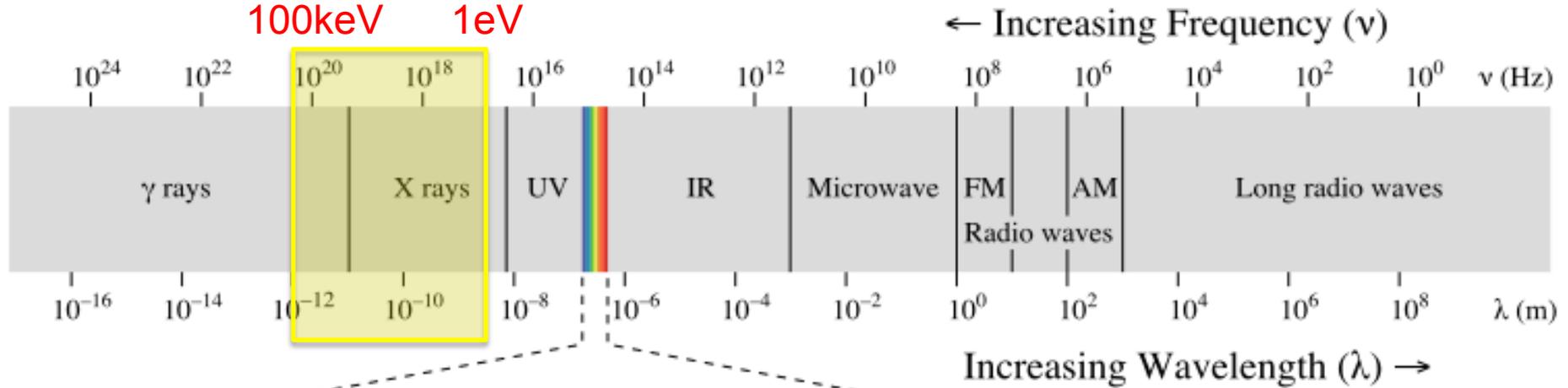
**$\lambda$  (nm) V (volt)**

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

# Lunghezza d'onda elettroni: confronto con spettro EM

elettroni

100keV    1eV



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

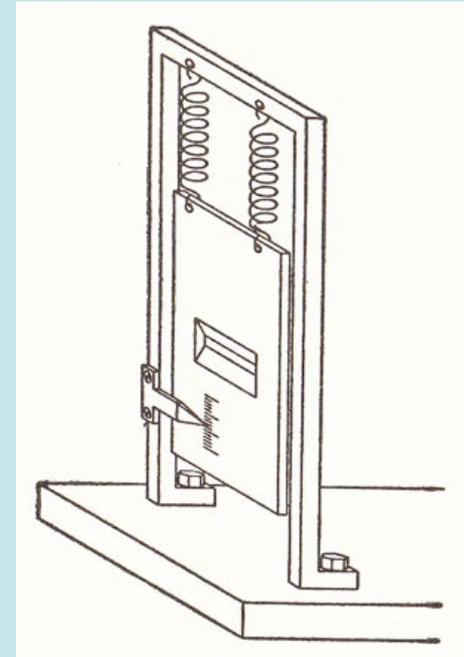
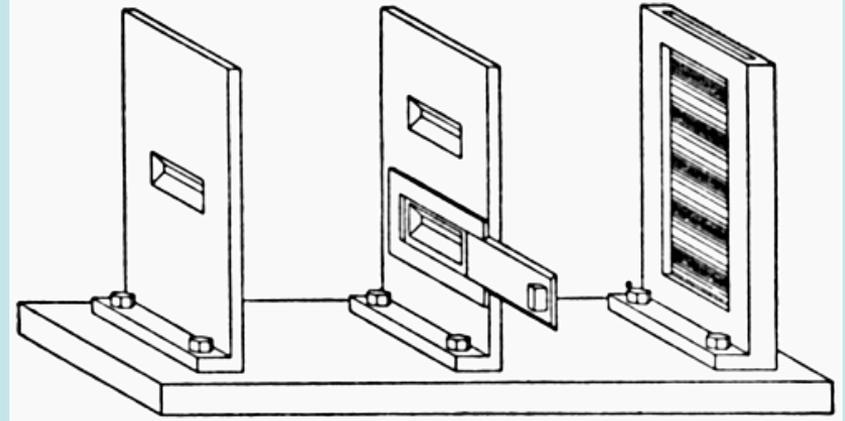
Questa fu una delle scoperte più sorprendenti della **fisica quantistica**, la teoria che si sviluppò nei primi 30 anni del 1900 per spiegare i fenomeni del mondo microscopico, non comprensibili con la fisica classica del 1800.

Questa proprietà di luce, elettroni, ma anche di **atomi** e perfino **molecole** ... viene definita (un po' impropriamente) come

**dualismo ondulatorio-corpusco**lare

Congresso Solvay **1927**:  
Einstein inventa l'esperimento  
più bello, versione *gedanken*  
(mentale\*)

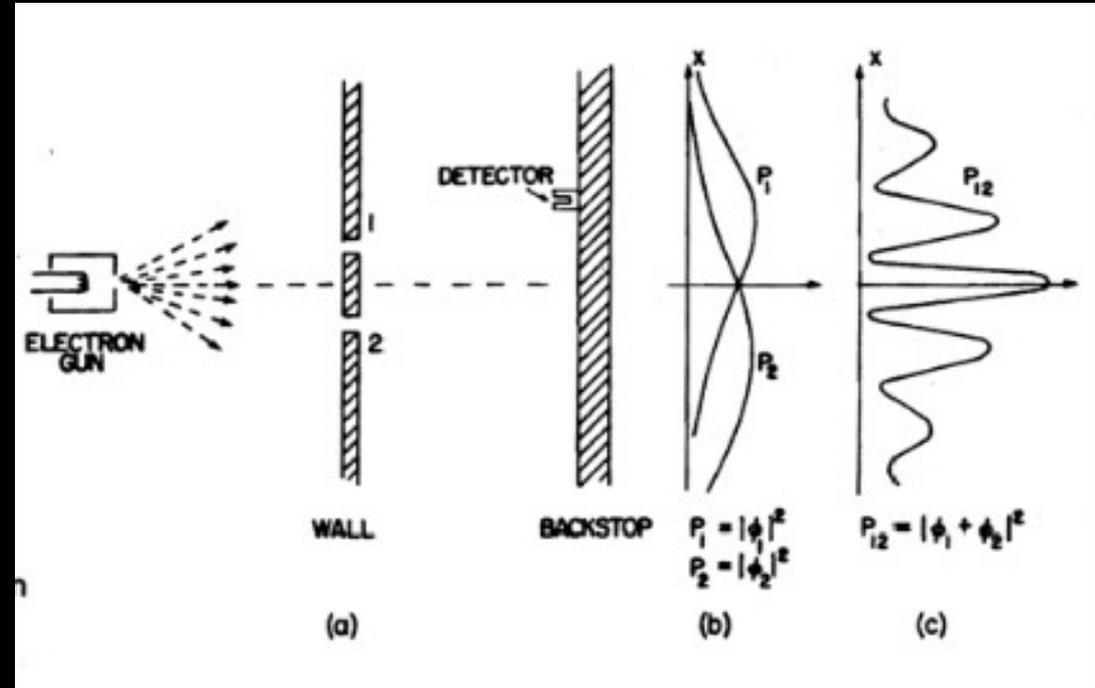
\* Un *esperimento mentale* o *esperimento concettuale* (in tedesco ***Gedankenexperiment***, è un esperimento che non si intende realizzare praticamente, ma viene solo immaginato: i suoi risultati non vengono quindi misurati, ma calcolati teoricamente in base alle leggi della fisica.



# Feynman 1963: bello e .. impossibile (“....*impossibly small*”)



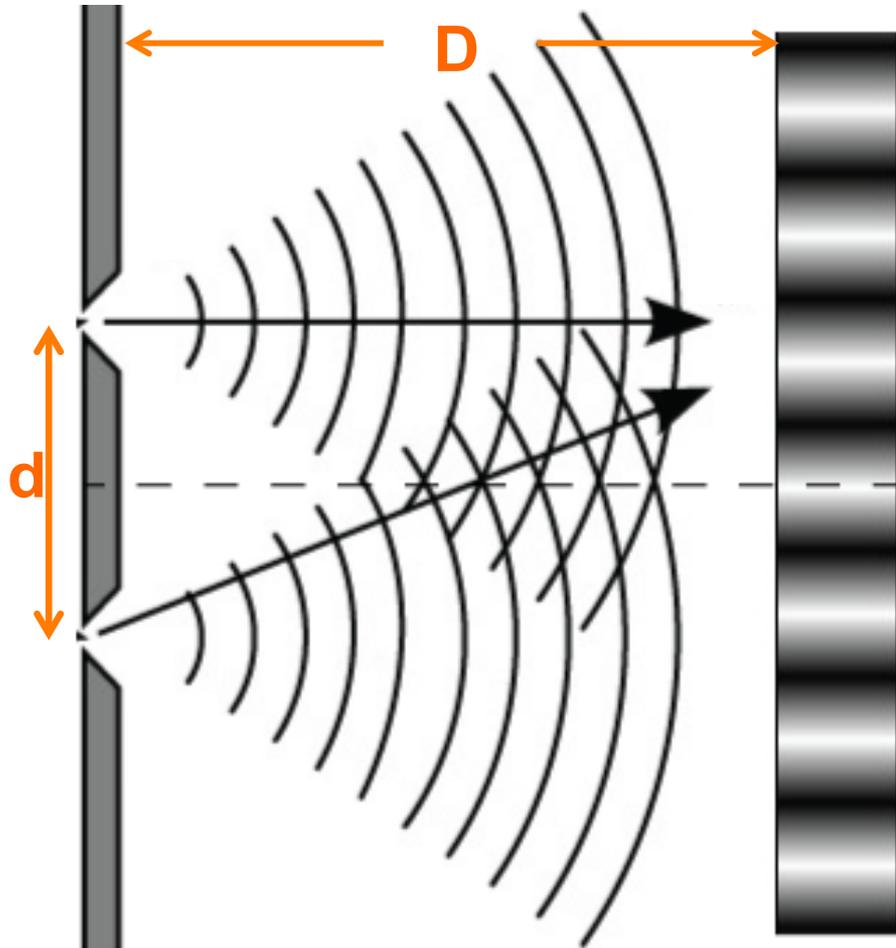
Richard Feynman (1918-1988)



“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.

# Problema tecnico 1: visibilità delle frange



$$x = \lambda D / d$$

$$\lambda_{\text{elettroni}}(100\text{keV}) = 0.0034 \text{ nm}$$

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

$$D = x d / \lambda$$

d	D
5 nm	1,5 m
50 nm	15 m
<b>500 nm</b>	<b>150 m</b>



# Interferenza con neutroni termici (Zeilinger et al. 1988)

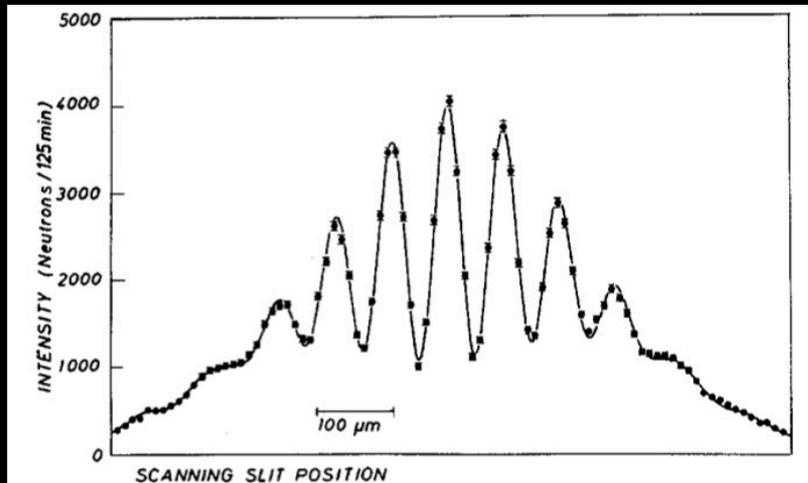
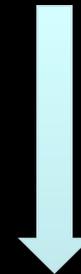


FIG. 1. A double-slit diffraction pattern measured with very cold neutrons with a wavelength of 2 nm corresponding to a velocity of  $200 \text{ ms}^{-1}$ . The two slits were  $22 \mu\text{m}$  and  $23 \mu\text{m}$  wide, respectively, separated by a distance of  $104 \mu\text{m}$ . The resulting diffraction angles were only of the order of  $10 \mu\text{rad}$ , hence the observation plane was located 5 m downstream from the double slit in order to resolve the interference pattern. (For experimental details see Zeilinger *et al.*, 1988.) The solid line represents first-principles prediction from quantum mechanics, including all features of the experimental apparatus. For example, the fact that the modulation of the interference pattern was not perfect can fully be understood on the basis that a broad wavelength band had to be used for intensity reasons and the experiment was not operated in the Fraunhofer regime.

$$\lambda = 2 \times 10^{-9} \text{ m } (\nu = 200 \text{ ms}^{-1})$$

$$\text{distanza tra fenditure } d = 144 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\text{distanza fenditure rivelatore } D = 5 \text{ m}$$



$$\text{distanza tra i massimi di interferenza}$$

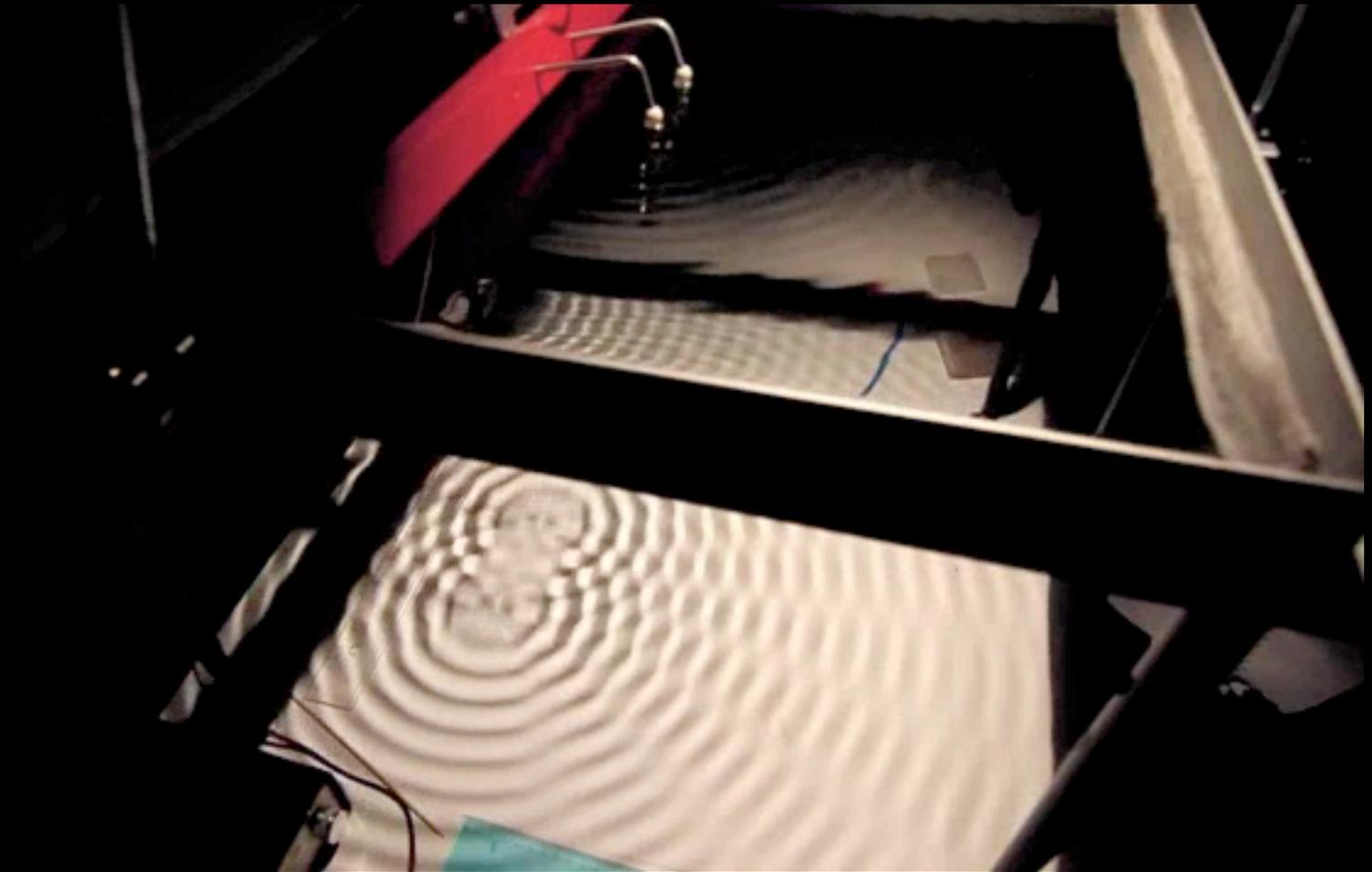
$$x = \lambda D / d = 100 \times 10^{-6} \text{ m}$$

## Problema tecnico 2: *coerenza* delle sorgenti

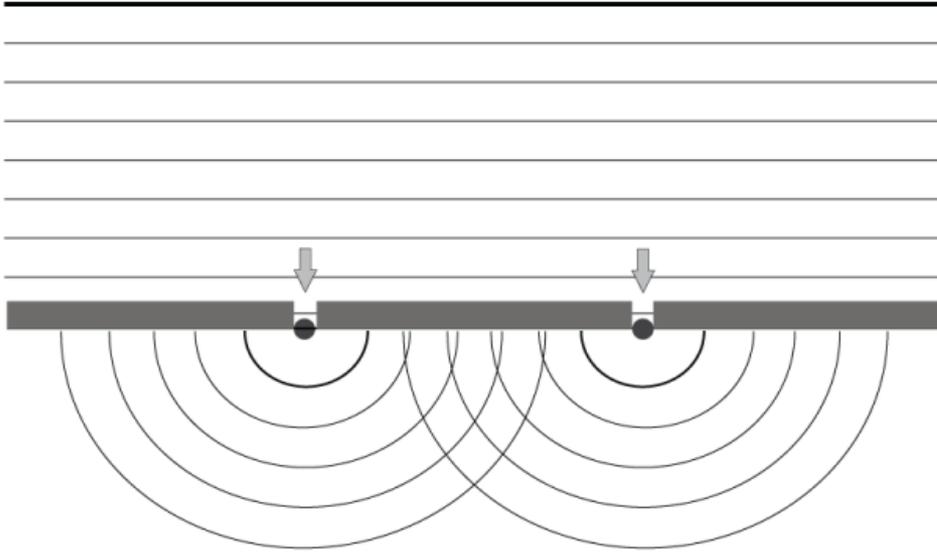
sono coerenti due (o più) sorgenti che emettono onde di uguale frequenza / lunghezza d'onda e con una *sincronizzazione (relazione di fase)* costante

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

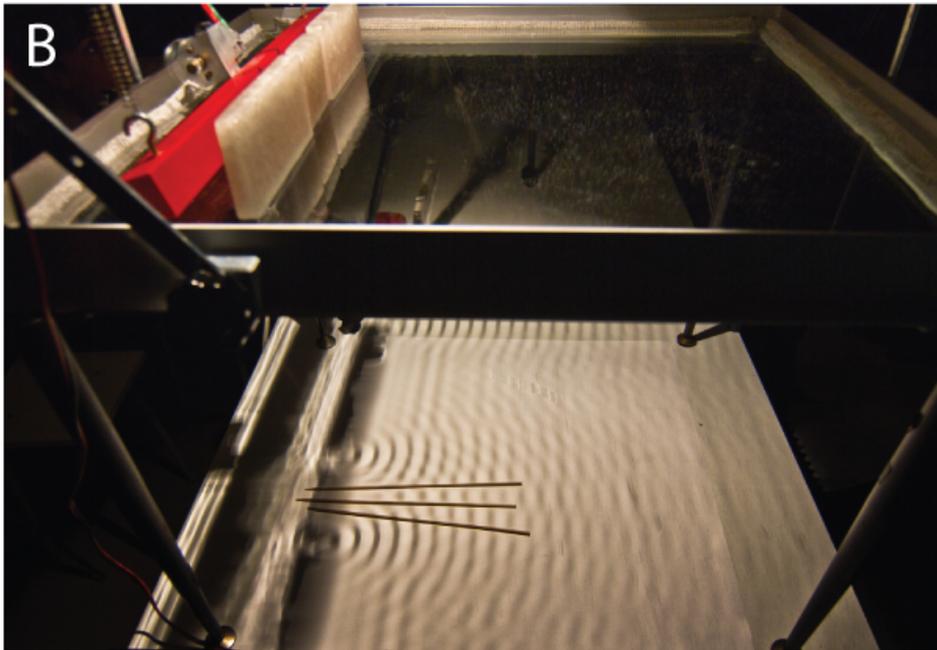
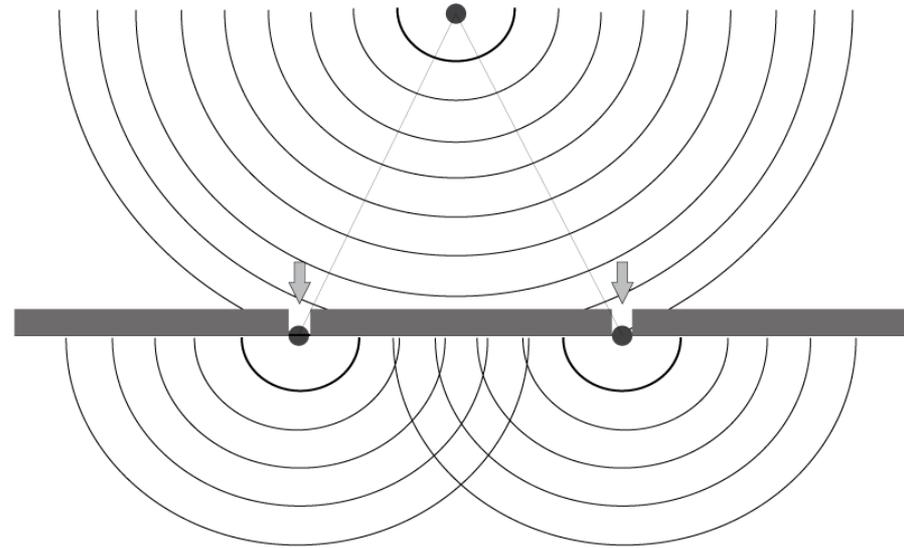
## Coerenza delle onde nell'ondoscopio



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

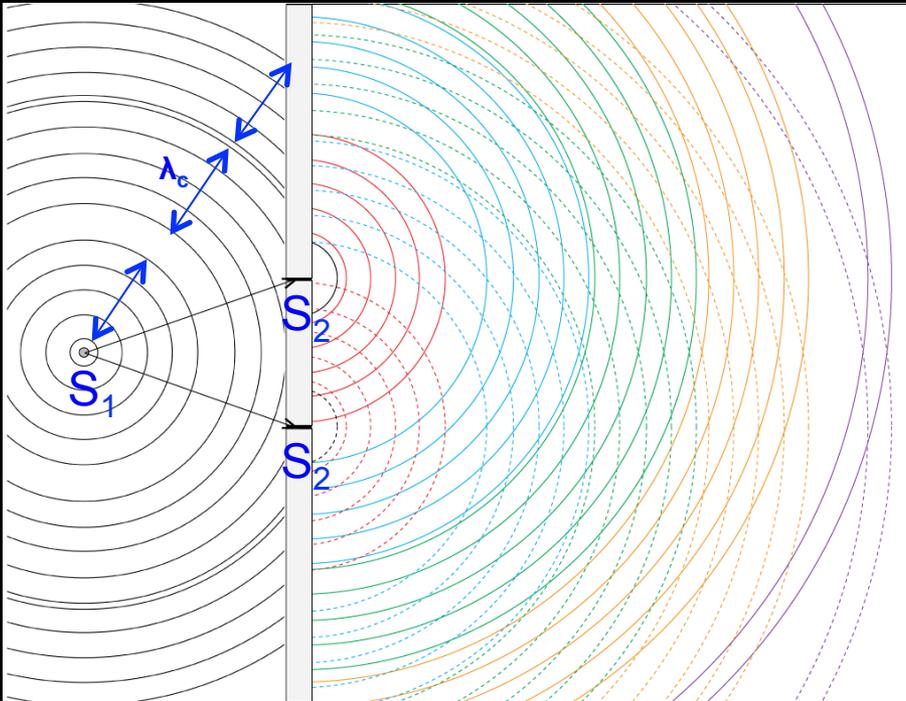
Per motivi legati ai meccanismi fisici di emissione, le sorgenti di luce ed elettroni non sono di solito coerenti.

### Problemi:

- la frequenza (lunghezza d'onda) non è unica, nè costante nel tempo (non vengono emessi treni continui monofrequenza-energia, ma “pacchetti” di onde di frequenze differenti – 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*)

## Metodo di Young (divisione del fronte d'onda)

Dato che sorgenti distinte sono normalmente incoerenti, si opera con una sola sorgente primaria ( $S_1$ ), “sdoppiandola” con le due fenditure (*metodo di Young*)



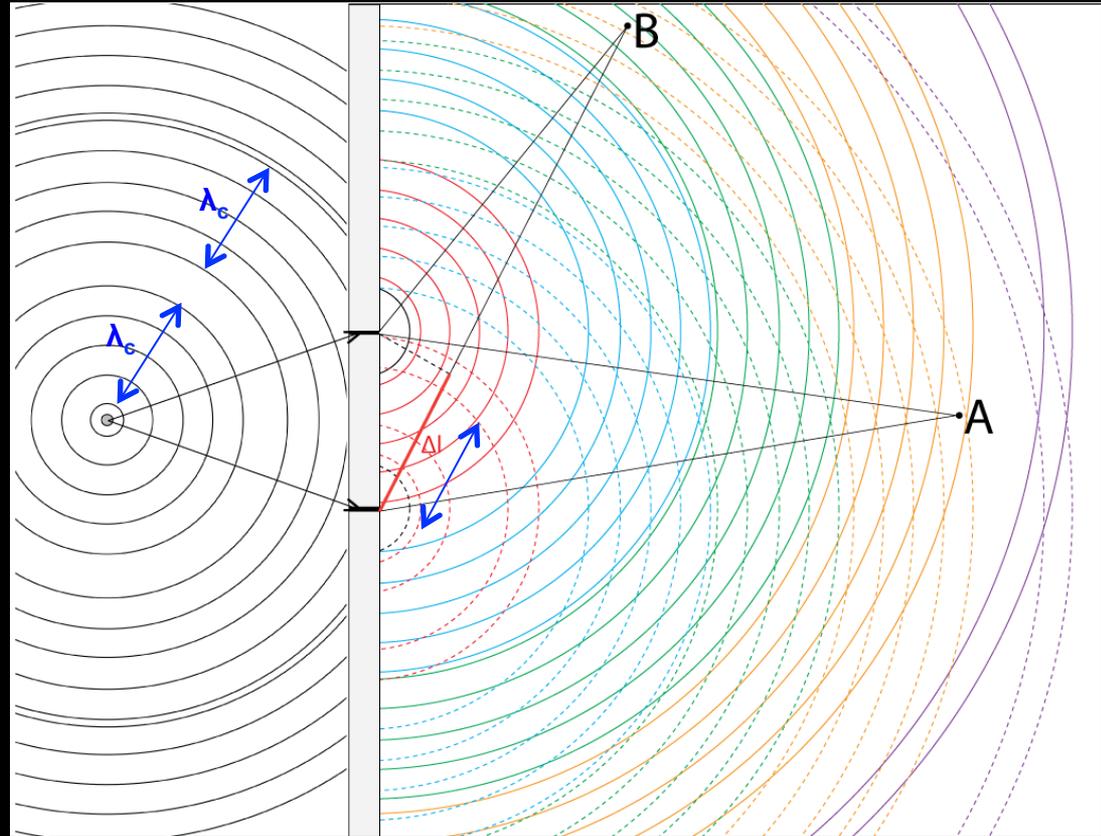
Esempio: sorgente puntiforme *quasi-coerente* con *lunghezza di coerenza*  $\lambda_c$ .

Le fenditure diventano sorgenti secondarie ( $S_2$ ) che emettono onde in fase tra loro.

Ciò non elimina il problema della coerenza temporale ...

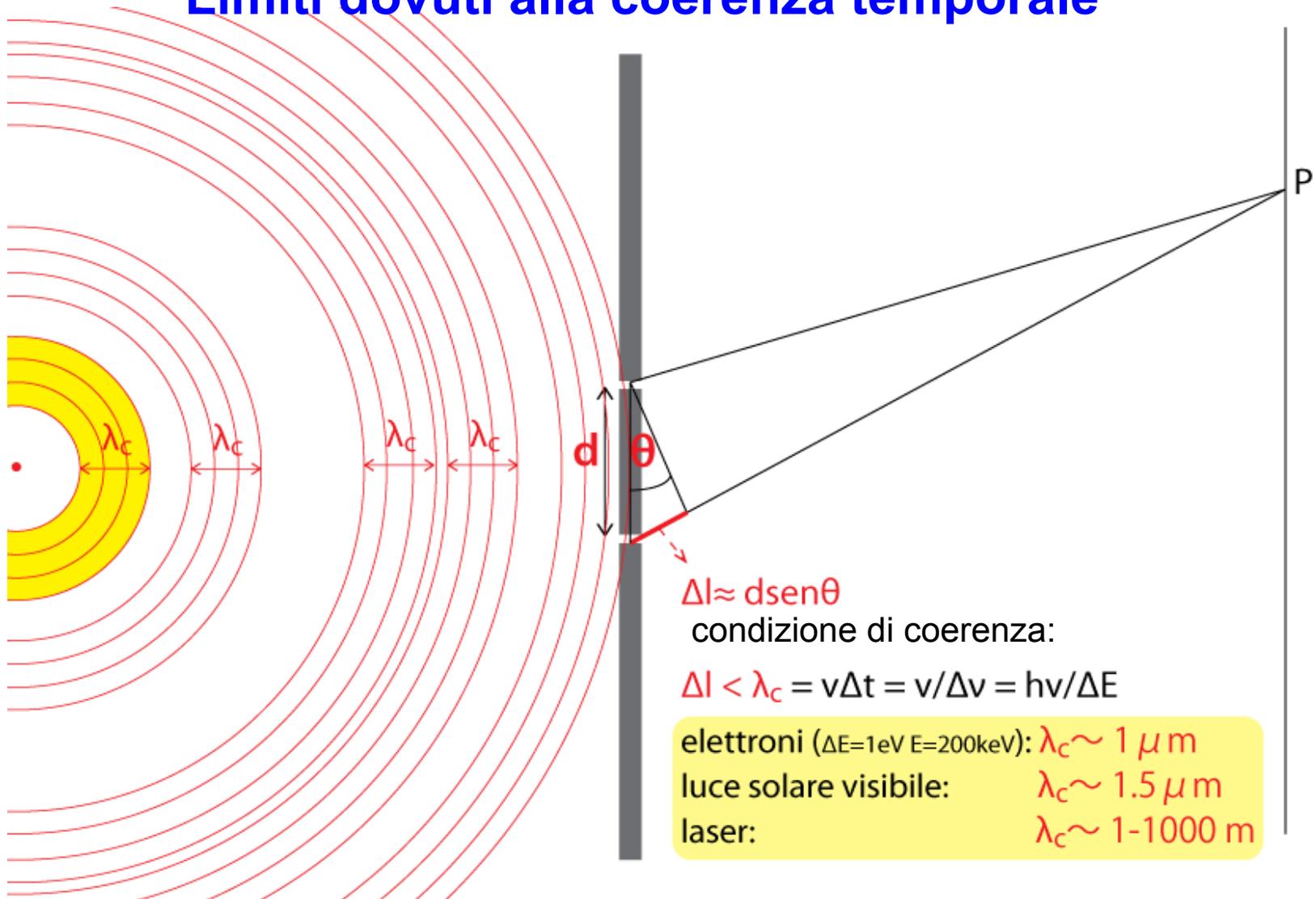
## Limiti dovuti alla coerenza temporale

La sovrapposizione di pacchetti di onde con relazione di fase costante si ha solo nei punti per i quali le distanze dalle due fenditure differiscono meno di  $\lambda_c$  ...



... che sono i punti della figura in cui ad ogni istante si sovrappongono pacchetti di onde dello stesso colore

## Limiti dovuti alla coerenza temporale



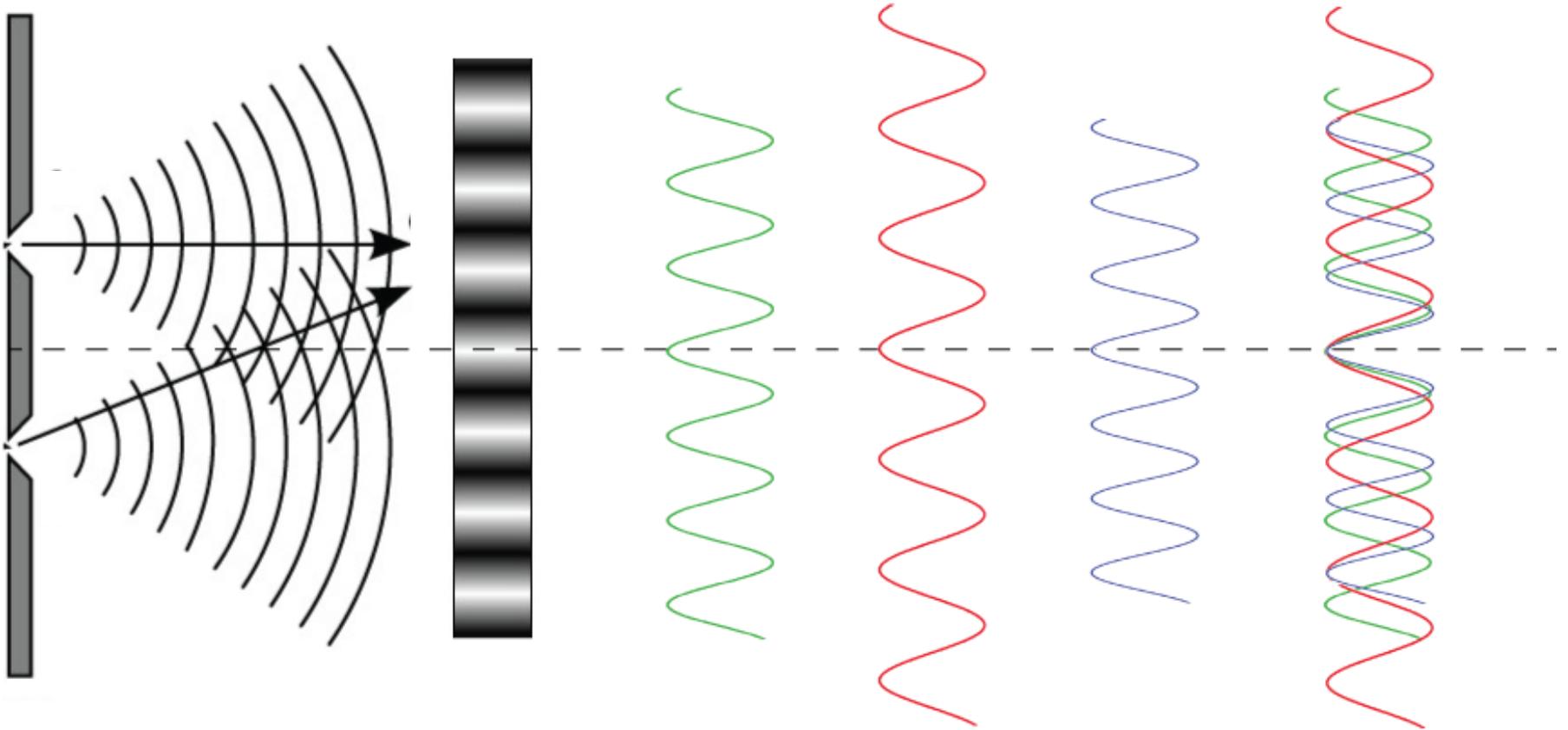
condizione sullo schermo per osservare l' $m$ -esimo massimo

$$\Delta l = m \lambda$$

numero di frange visibili da una parte e dall'altra del massimo centrale

$$m \sim \lambda_c / \lambda$$

## Caso sorgente policromatica (es: luce bianca)



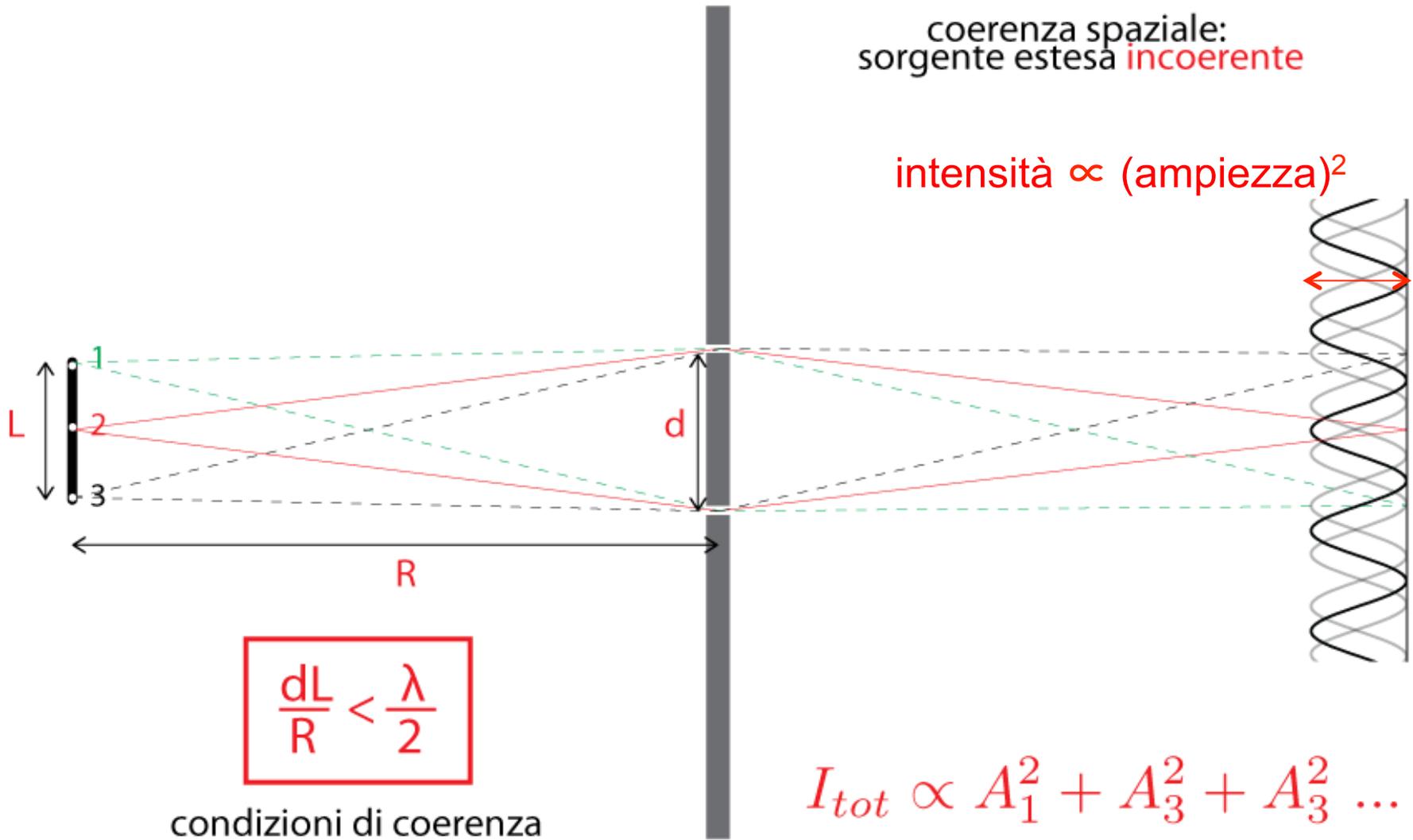
spaziatura tra le frange  $x = \lambda D/d$   dipende dal colore

## Coerenza spaziale di una sorgente estesa

Ma  $S_1$  ha una estensione *finita*, e punti diversi di essa emettono onde che non hanno tra loro una relazione di fase costante.

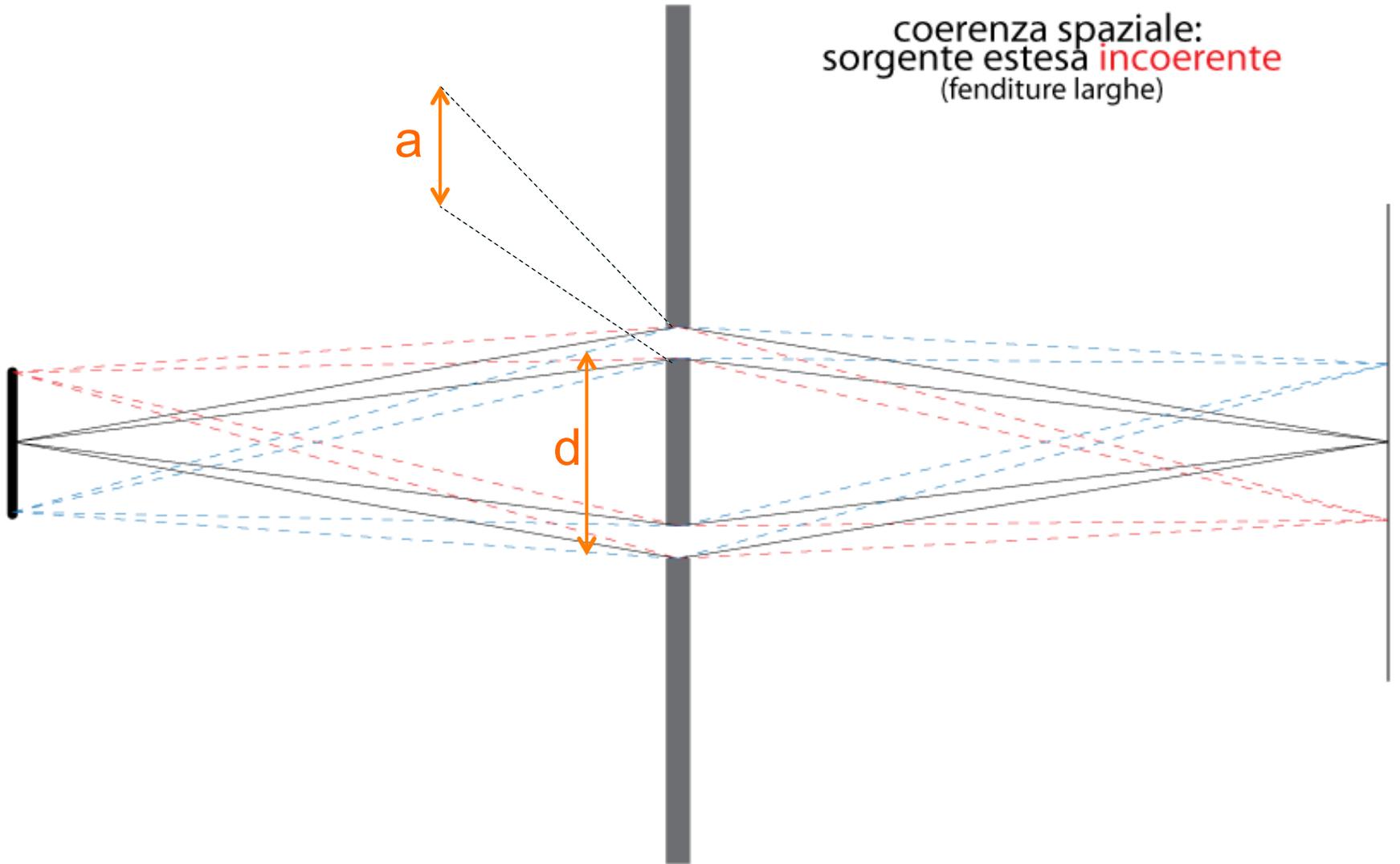
Nonostante ciò, se certe condizioni geometriche sono soddisfatte, una sorgente non puntiforme può illuminare in modo coerente le due fenditure, in modo che le due sorgenti secondarie  $S_2$  risultino coerenti

Una considerazione intuitiva a riguardo, è che una qualsiasi sorgente (di luce o di elettroni) si può trattare come puntiforme se, indipendentemente dalle sue dimensioni reali, viene vista sufficientemente da lontano.



Questa condizione garantisce che le due fenditure siano illuminate in modo coerente

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



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

## Riassunto

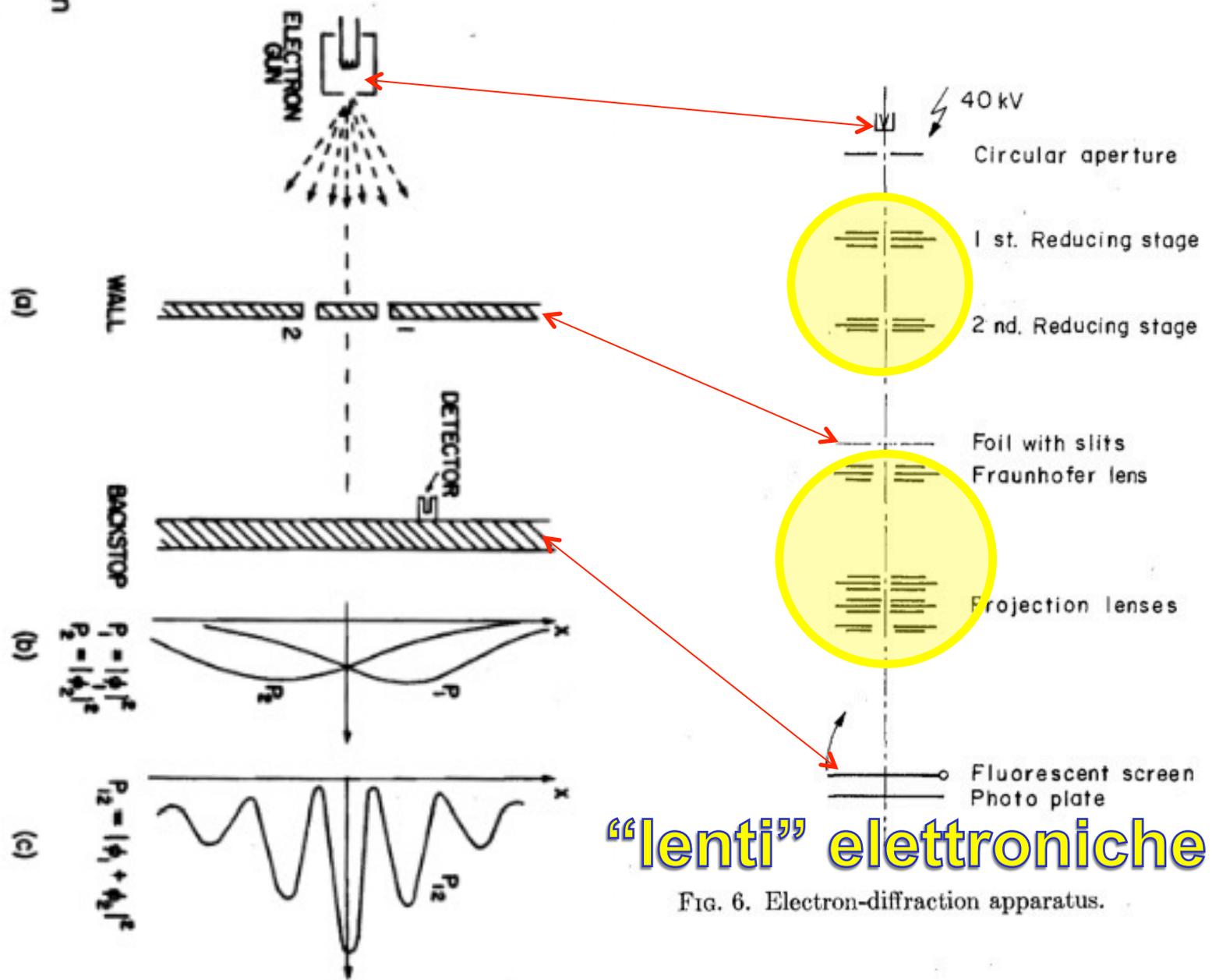
Esigenze di *visibilità* delle frange e di *coerenza* impongono una geometria in cui:

- 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 (fino a centinaia di metri!)

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

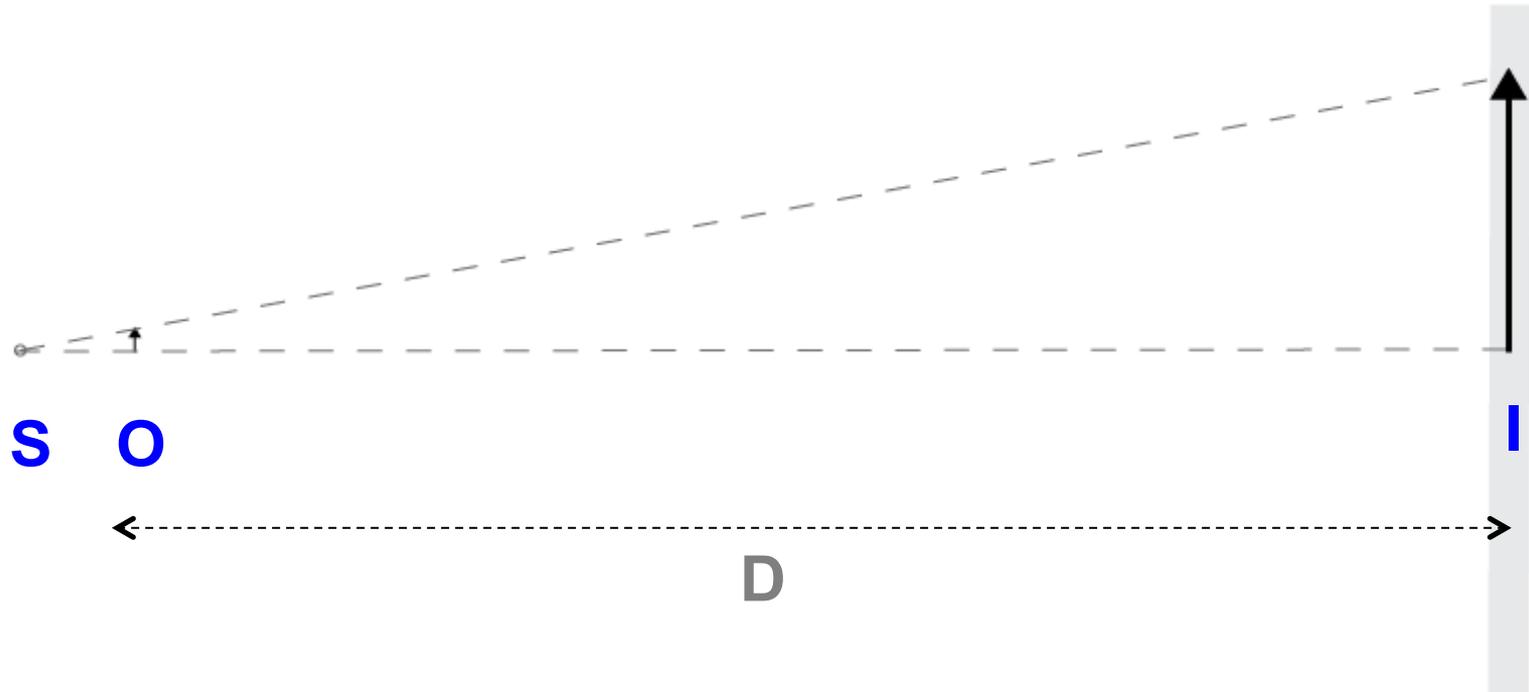


# “lenti” elettroniche

FIG. 6. Electron-diffraction apparatus.

C. Jönsson (Univ. Tubinga) 1961

# Effetto di una lente



proiezione geometrica da sorgente puntiforme

# Effetto di una lente

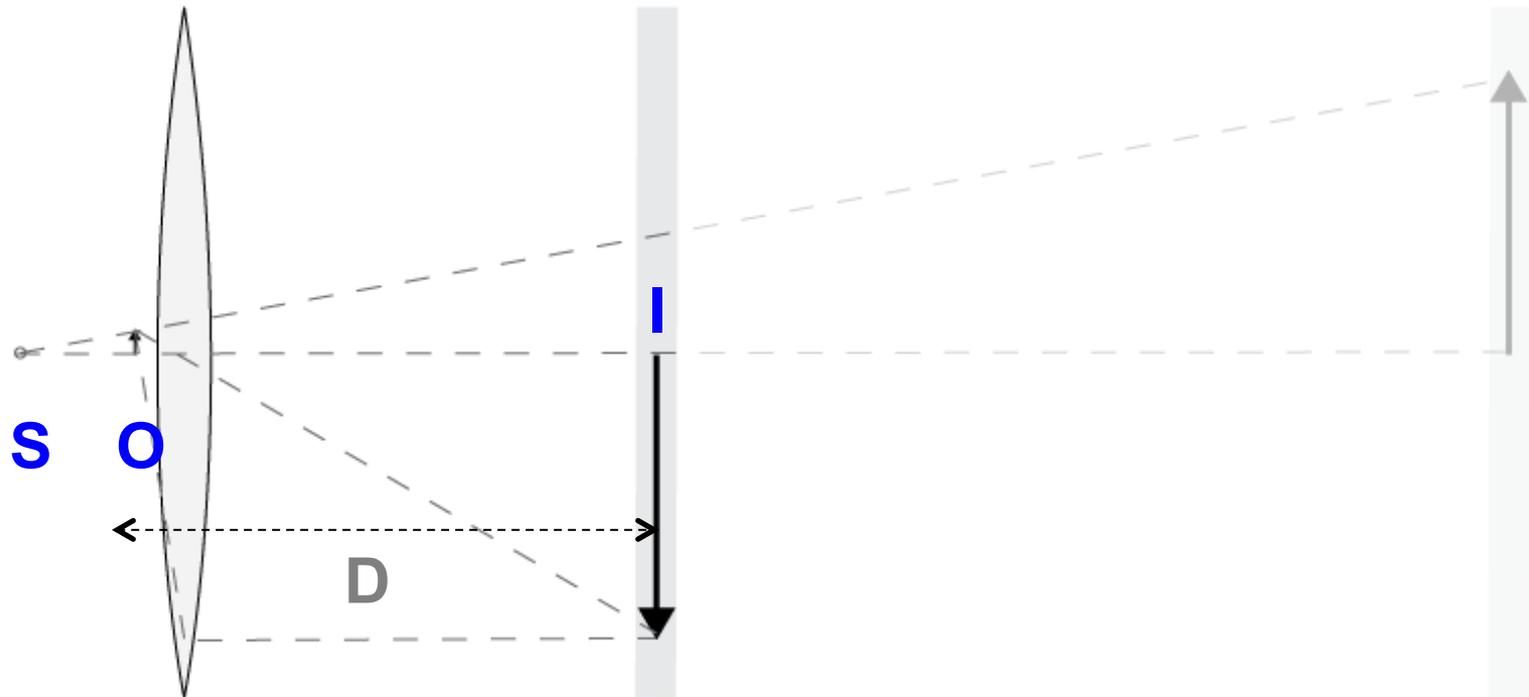
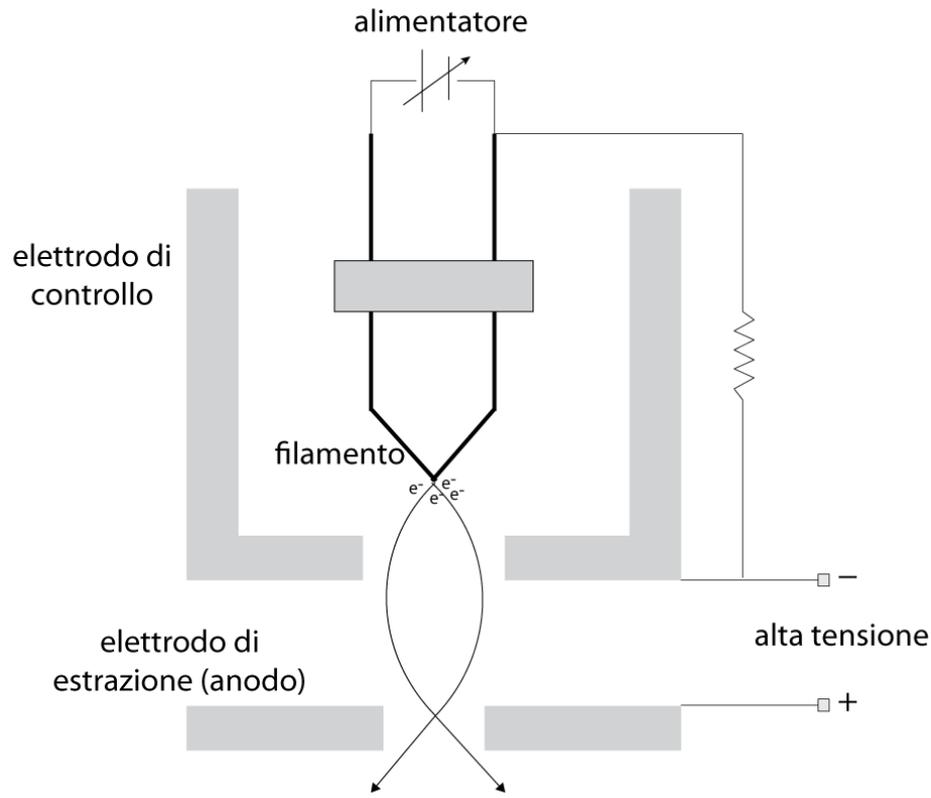


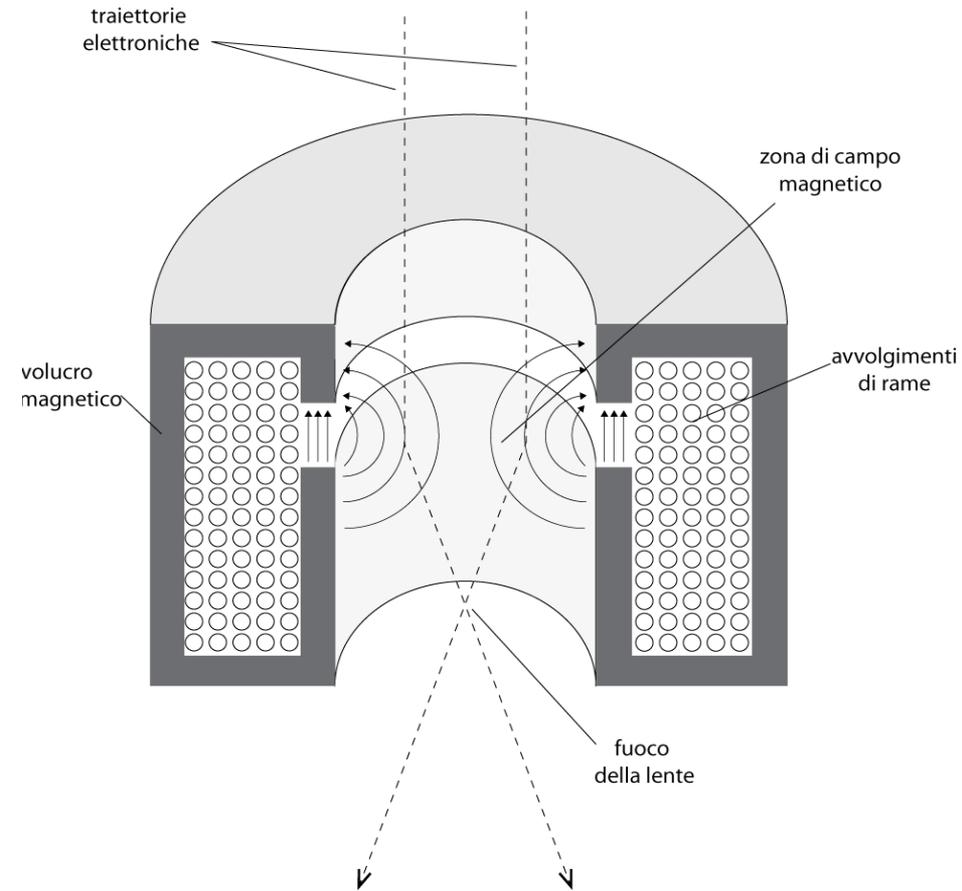
immagine delle stesse dimensioni del caso precedente, ma molto più vicina all'oggetto (e ribaltata ...)

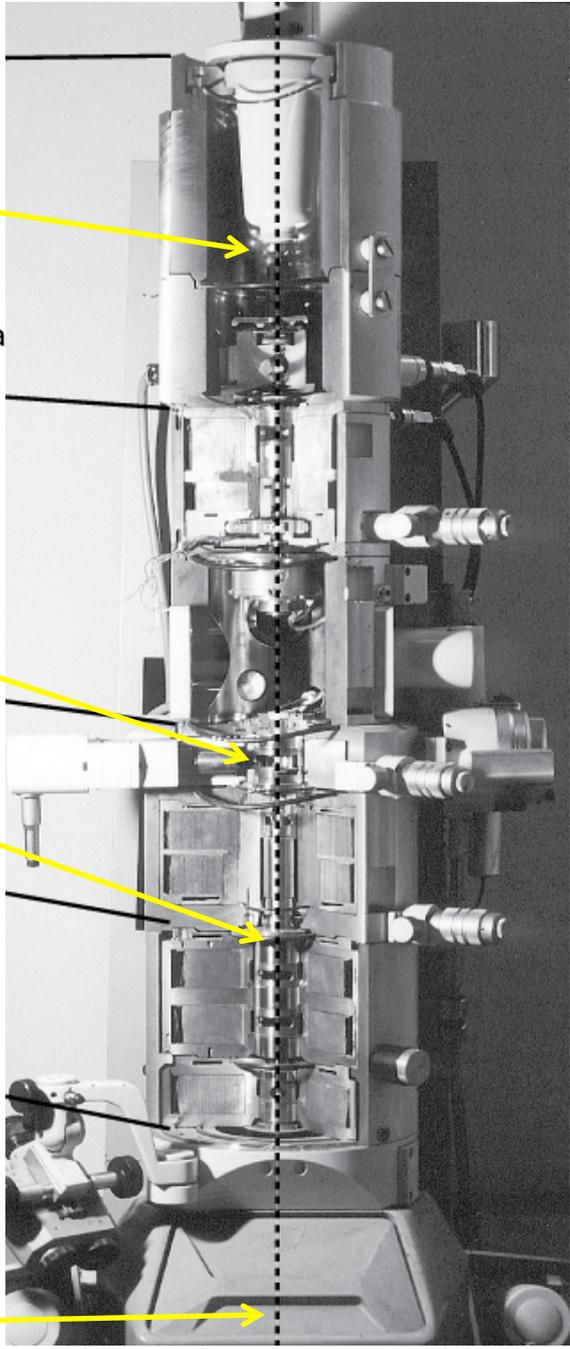
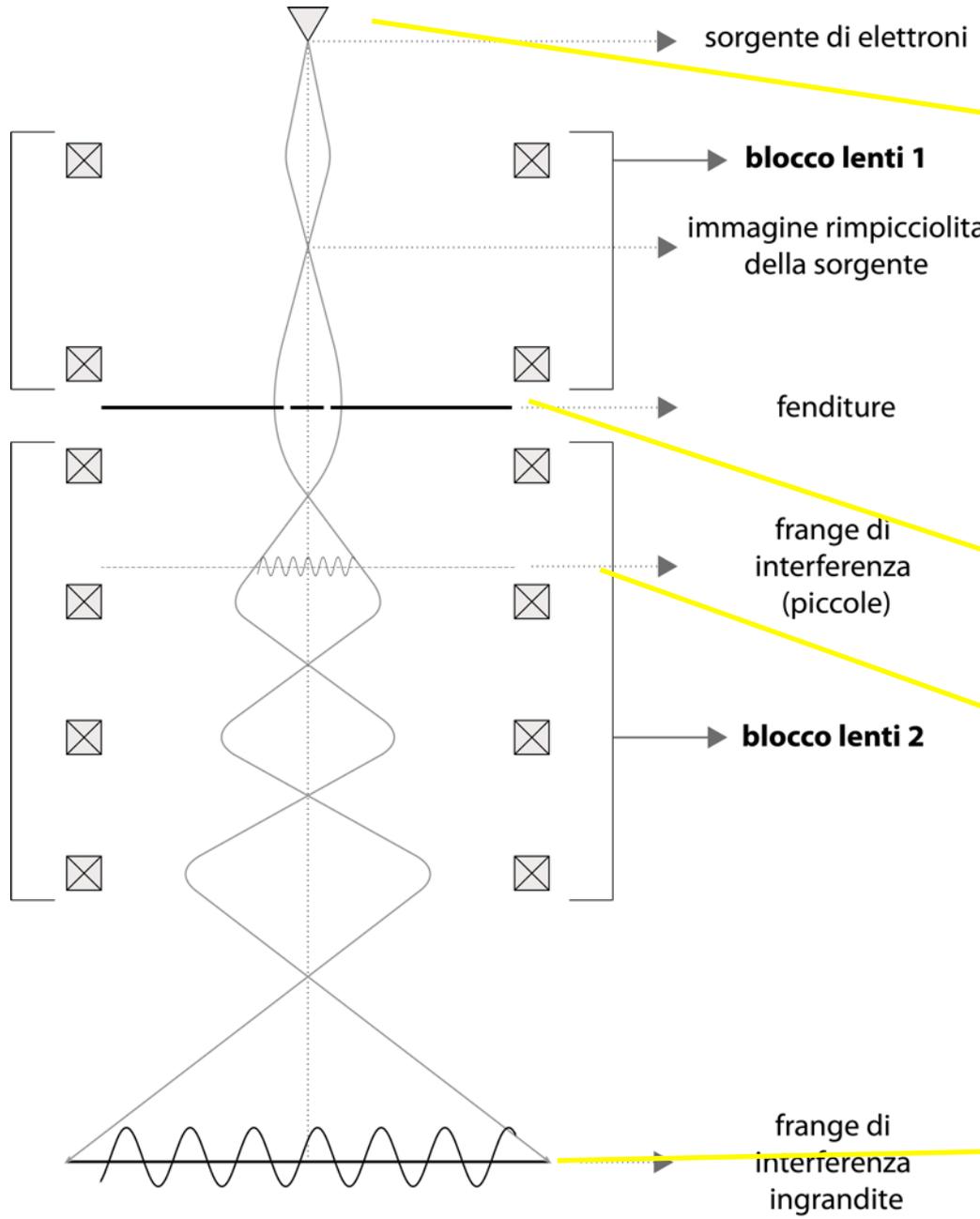
# Interferenza di elettroni nel *microscopio elettronico*

## sorgente di elettroni



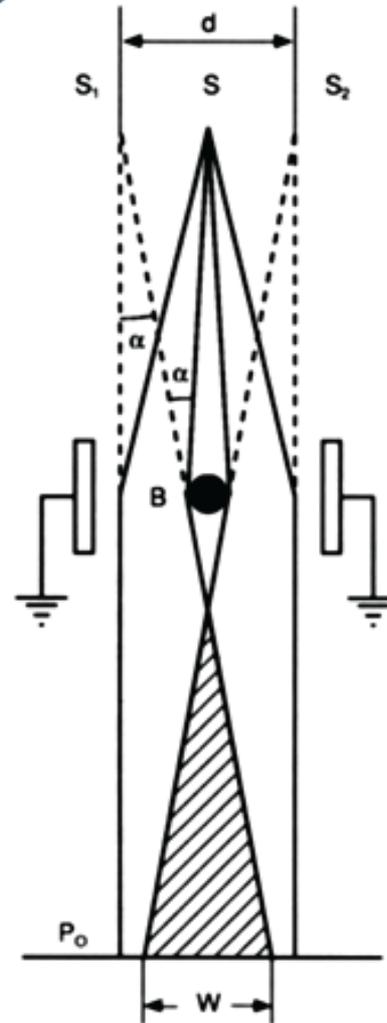
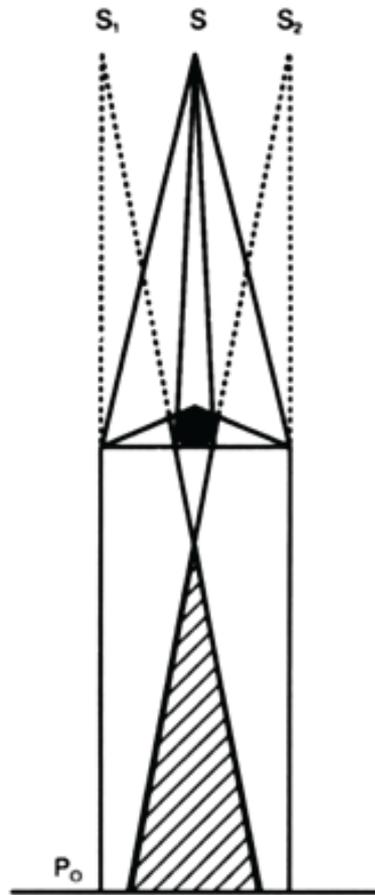
## lente magnetica





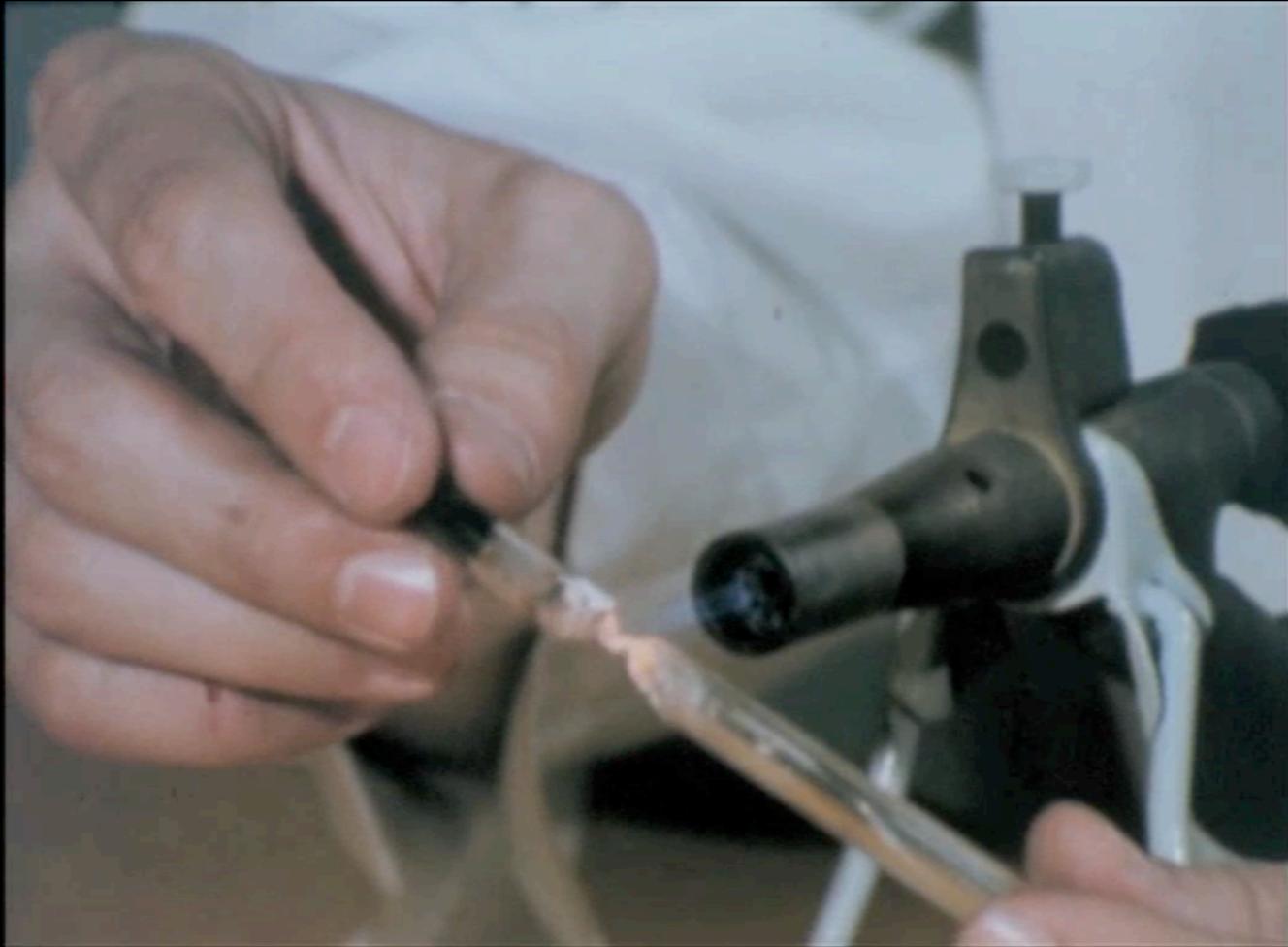
# biprisma elettronico (Möllensted, Düker)

*Tubinga (1955)*



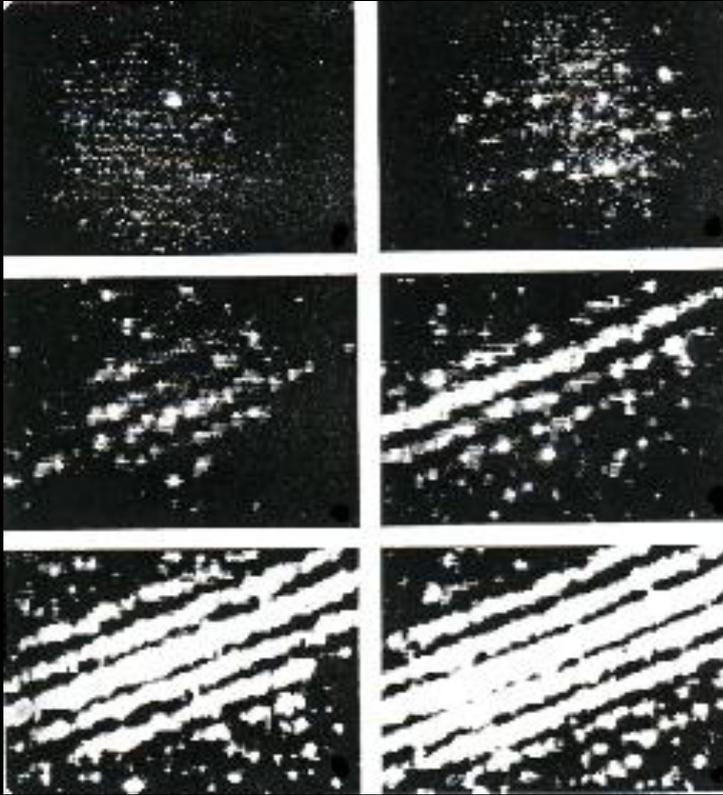
$S < 100\text{nm}$

biprisma di Fresnel (luce)



Da "Interferenza di elettroni" (1976)

## Esperimento MMP: l'interferenza di elettroni singoli (1976)



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

**Grazie per l'attenzione !**