L'ESPERIMENTO PIU' BELLO DELLA FISICA

Introduzione al corso

Olivia Levrini, DIFA, UNIBO
Giorgio Lulli, CNR-IMM, Bologna

Persone coinvolte e Programma del Corso

Lezione 1: Introduzione all'esperimento di interferenza di elettroni singoli: dal dialogo Bohr-Einstein alla realizzazione dell'esperimento (Olivia Levrini, Giorgio Lulli)

Lezione 2: Laboratorio sull'interferenza delle onde alla superficie di un liquido e sull'interferenza della luce (Barbara Pecori)

Lezione 3: Esperimenti sul comportamento ondulatorio degli elettroni con un microscopio elettronico (Giorgio Matteucci)

Lezione 4: La "Quantistica": Dall'esperimento più bello all'esplorazione di nuove fenomenologie (Giorgio Lulli, Vittorio Monzoni)

Lezione 5: La "Quantistica": un nuovo capitolo della fisica (Elisa Ercolessi, Vittorio Monzoni)

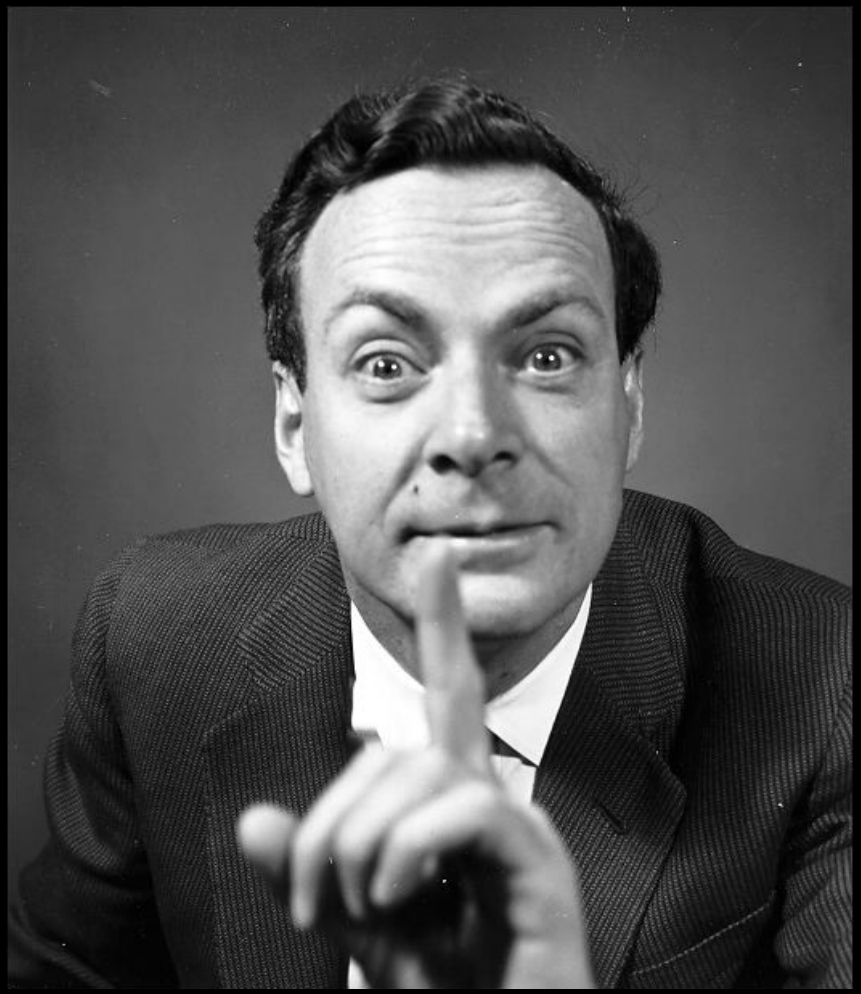
Lezione 6: Entanglement e applicazioni della fisica quantistica (crittografia, teletrasporto e computer quantistici) (Eugenio Bertozzi)

DI CHE ESPERIMENTO SI TRATTA?

…PERCHE' SI DICE CHE E' IL "PIÙ BELLO"?

L’esperimento della doppia fenditura di Young con elettroni

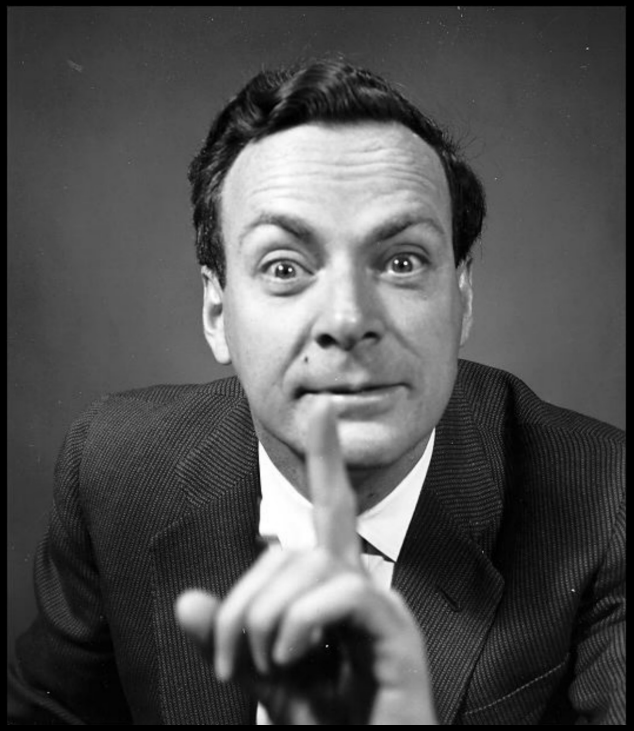
Da “The Fabric of Cosmos pt. 3 *Quantum Leap*” (**Brian Greene**)

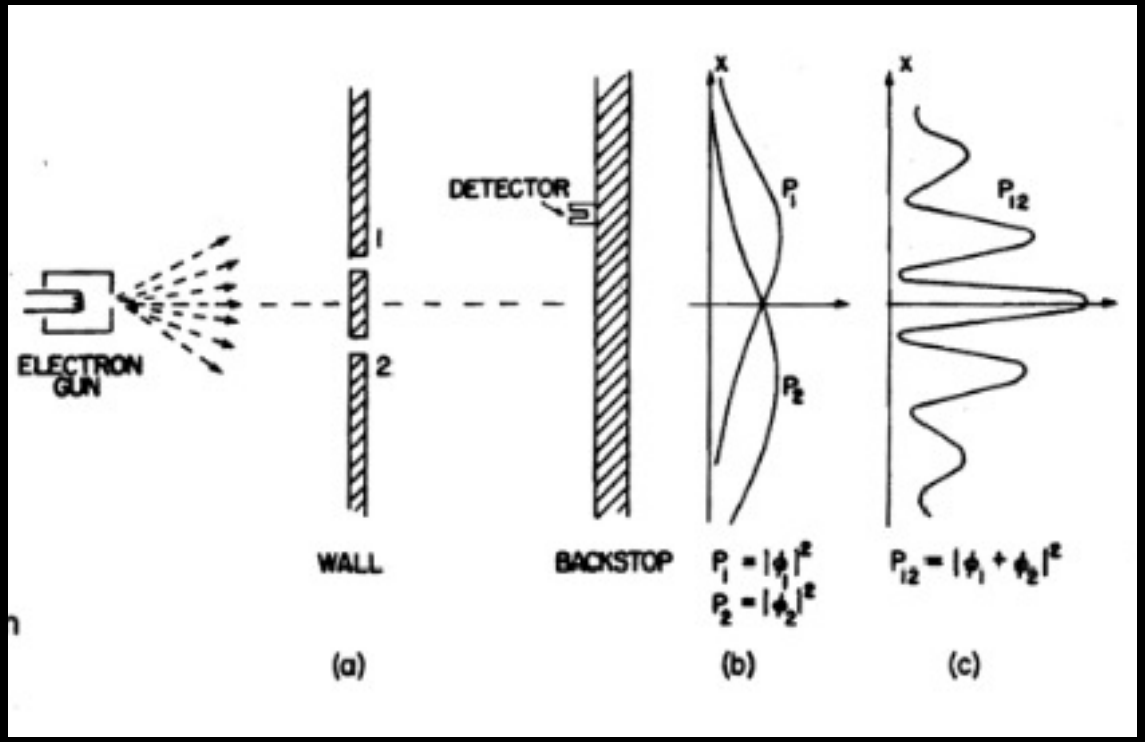


Richard Feynman
(1918-1988)

"Decidemmo di esaminare un fenomeno [l'interferenza di elettroni singoli] che è impossibile, assolutamente impossibile spiegare in modo classico, e che sta al cuore della meccanica quantistica. In realtà contiene l'unico mistero."

1963: Feynman: bello, ma ... "***impossibly small***"

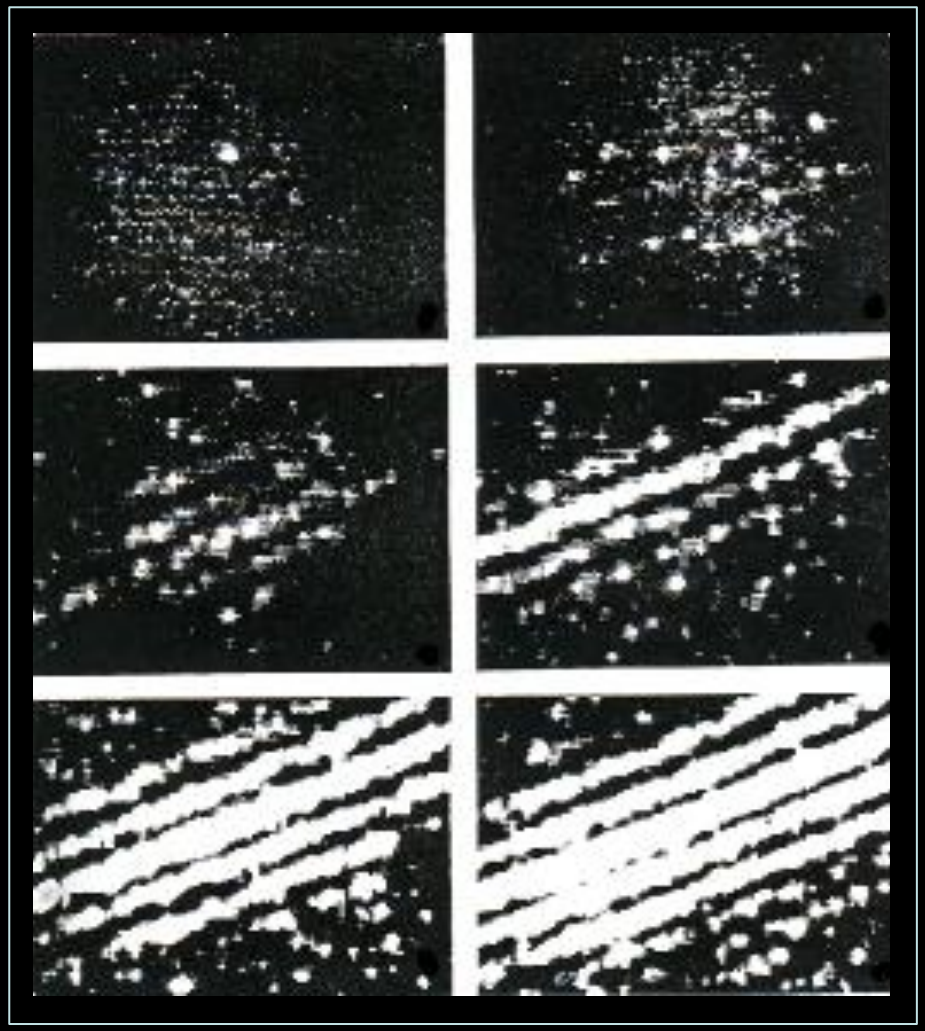




... perché?

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.

L'esperimento di Merli-Missiroli-Pozzi (1974-76)



P. G. Merli, G. F. Missiroli, G. Pozzi, "On the statistical aspect of electron interference phenomena", *American Journal of Physics*, 44, 3, 306-307 (1976)

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**".

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 [illegible] secolo scorso come 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 difficolta' tecniche. Nel 1976 un gruppo di ricercatori italiani (**Pier Giorgio Merli**, **Gian Franco Missiroli** e **Giulio Pozzi**) superando

(2009)

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

Ministero dell'Istruzione, 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

interferenza di elettroni - l'esperimento più bello

grafonio design ©giorgio lulli 2011

DVD

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

(2011)

APOGEO
L'avventura della ricerca

GIORGIO LULLI

L'ESPERIMENTO PIÙ BELLO

L'interferenza di elettroni singoli e il mistero della meccanica quantistica

Interferenza di elettroni singoli: è stato giudicato "l'esperimento più bello" nella storia della fisica.
Albert Einstein l'aveva immaginato per primo; Richard Feynman l'aveva ritenuto "impossibile".
Poi un giorno tre ricercatori di Bologna lo hanno realizzato, permettendoci di vedere con i nostri occhi il mistero fondamentale che sta al cuore della meccanica quantistica.
Questo libro è il racconto della loro straordinaria avventura scientifica.

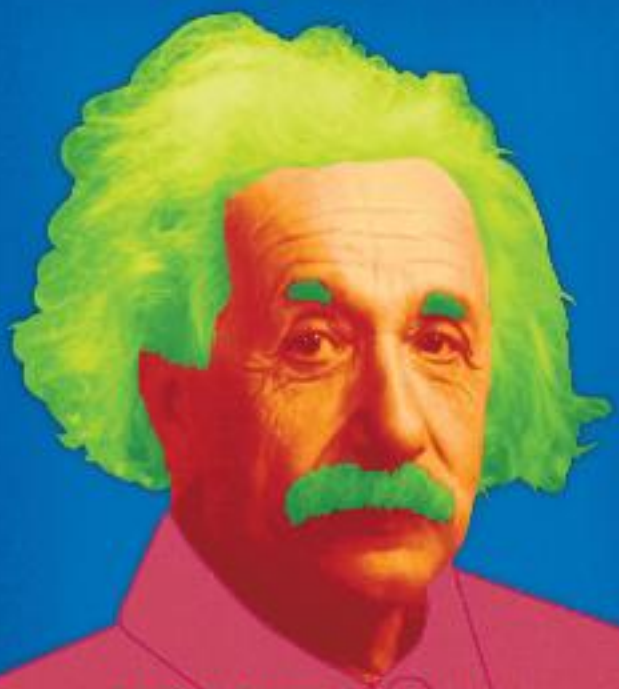
Vedere l'esperimento delle due fenditure realizzato è come guardare uno eclissi totale di sole per la prima volta.

– Allison Campbell (St. Andrew University)

www.apogeonline.com/education

euro 15.00

GIORGIO LULLI L'ESPERIMENTO PIÙ BELLO APOGEO



APOGEO

GIORGIO LULLI

L'ESPERIMENTO PIÙ BELLO

L'interferenza di elettroni singoli e il mistero della meccanica quantistica

(2013)

Struttura del Corso

FILO 1

Lezione 2: Laboratorio sull'interferenza delle onde alla superficie di un liquido e sull'interferenza della luce (Barbara Pecori)

Lezione 3: Esperimenti sul comportamento ondulatorio degli elettroni con un microscopio elettronico (Giorgio Matteucci)

FILO 2

Lezione 4: La "Quantistica": Dall'esperimento più bello a nuove fenomenologie (Giorgio Lulli, Vittorio Monzoni)

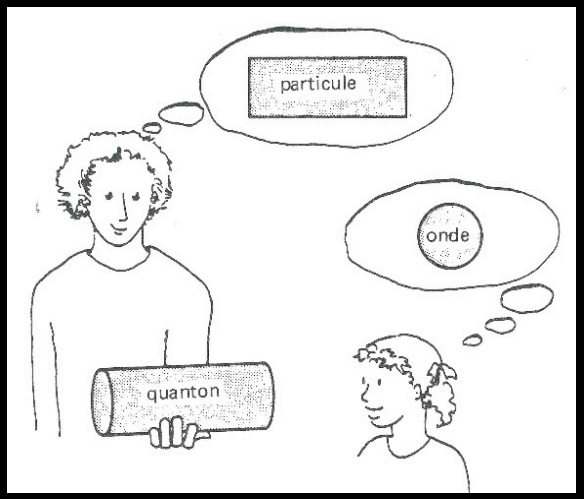
Lezione 5: La "Quantistica": un nuovo capitolo della fisica (Elisa Ercolessi, Vittorio Monzoni)

Lezione 6: Entanglement e applicazioni della fisica quantistica (crittografia, teletrasporto e computer quantistici) (Eugenio Bertozzi)

FILO 1
La sfida sperimentale

- Come è stato possibile realizzare un esperimento che Feynman riteneva *impossibile*?
- Quali problemi tecnici sono stati risolti per portarlo a termine?

FILO 2
La sfida concettuale



- Come è possibile spiegare un fenomeno che appare tanto misterioso?
- Qual è l'essenza del fenomeno e quale logica sta dietro a tutto questo?

FILO 1
la sfida sperimentale

- Come è stato possibile realizzare un esperimento che Feynman riteneva *impossibile*?
- Quali problemi tecnici sono stati risolti per portarlo a termine?

LE TAPPE

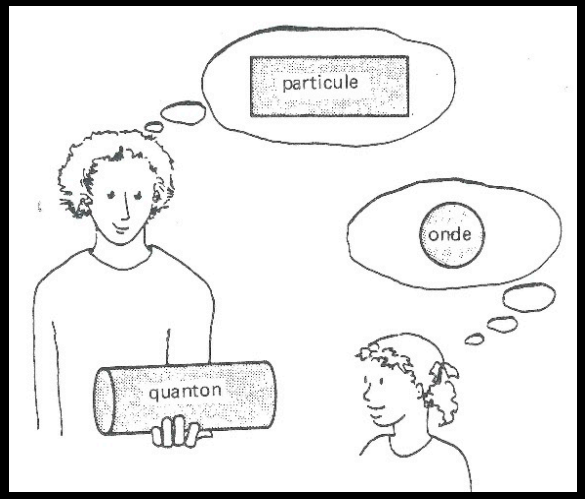
Lezione 2

- Quali sono le condizioni fisiche e geometriche che permettono di osservare un fenomeno di interferenza?
- Perché con onde meccaniche e con la luce tali condizioni si possono realizzare (più o meno facilmente), mentre con gli elettroni diventa problematico?

Lezione 3

- Come è stato possibile realizzare l'esperimento?
- Quali problemi tecnici si sono dovuti affrontare e come sono stati risolti?
- Che cos'è e perché l'utilizzo di un microscopio elettronico ha permesso la realizzazione dell'esperimento?
- Che tipo di creatività ci è voluto? Quali sono state le idee "brillanti"?
- Con le tecnologie di oggi cosa si può fare?

FILO 2
La sfida concettuale



- Come è possibile spiegare un fenomeno che appare tanto misterioso?
- Qual è l'essenza del fenomeno e quale logica sta dietro a tutto questo?

LE TAPPE

Lezione 4

- Dall'EBP a nuove fenomenologie: Quali aspetti fenomenologici rivelano con semplicità un'essenza "genuinamente" quantistica?

Lezione 5

- Quale nuova logica è possibile costruire per spiegare e interpretare ciò che si osserva?

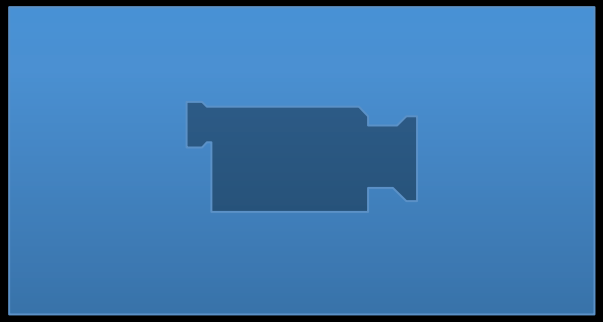
Lezione 6

- Quali estensioni e implicazioni ha questa nuova logica?

Introduzione al Filo 1:
Visione del DOCUMENTARIO con “consegna”

Quali elementi dà il film per rispondere alle domande portanti del filo 1?

(Come è stato possibile realizzare un esperimento che Feynman riteneva impossibile? Quali problemi tecnici sono stati risolti per portarlo a termine?)



play movie

storia in breve dell'esperimento più bello della fisica

Una versione recente (2011), tecnologicamente avanzata dell'esperimento, con le fenditure al posto del biprisma e un rivelatore di elettroni singoli a memoria veloce (**lez. 3 Prof. Matteucci**) .

$\lambda = h/mv$

1927

C. Davisson

Elettroni (54

Distanza inte

rivelatore di elettroni

elettroni incidenti

C. Jönsson (Univ. Tubinga) 1961

1961

1963: Feynman: bello, ma ***impossibile*** (*"...impossibly small"*)

Richard Feynman (1918-19

"Decidemmo di esaminare
che è impossibile, ass
impossibile spiegare in mod
che sta al cuore della
quantistica. In realtà cont
mistero. [...] Nel raccontarv
raccontarvi delle peculiarità
di tutta la meccanica quantist

K.H. Hermann (Siemens) Intensificatore di immagine (1971)

1974

(1) Dipart

(2) CNR

maggio 2002

PhysicsWorld

The most beautiful experiment...

May 2, 2002

What is the most beautiful experiment in physics? Robert P

settembre 2002

Top 10 beautiful experiments

The list below shows the top 10 most

FENDITURE

330nm.

1550nm.

2011

larghezza 100nm

E-Beam 5.00 kV | Spot 3 | Mag 80.0 kX | FWD 5.004 | Tilt -0.0° | Det TLD-S | 1 µm | 9pA,80kX,0.05x1.5,1.7" parallel

Charge neutralization (optional)

Ga+

Gas Assisted Etching or Selective Deposition (optional)

Una versione recente (2011), tecnologicamente avanzata dell'esperimento, con le fenditure al posto del biprisma e un rivelatore di elettroni singoli a memoria veloce (**lez. 3 Prof. Matteucci**) .

Lunghezza d'onda elettroni

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v}$$

***h*: costante di Planck**

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

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

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

(relativistica)

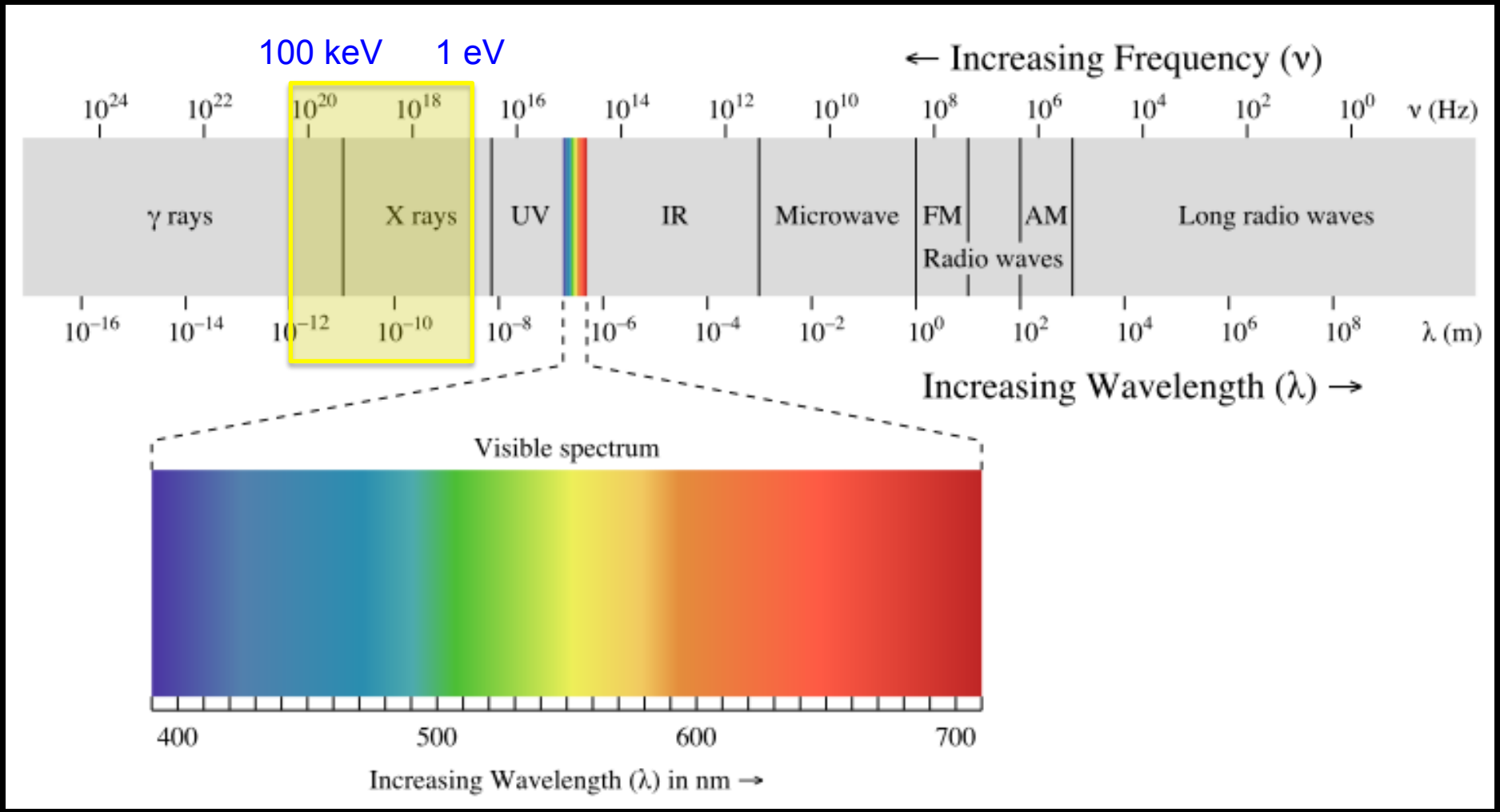
$$\lambda = \frac{12.66}{(1 + 0.9788 \times 10^{-6} V) V^{1/2}}$$

V (volt) → λ (nm)

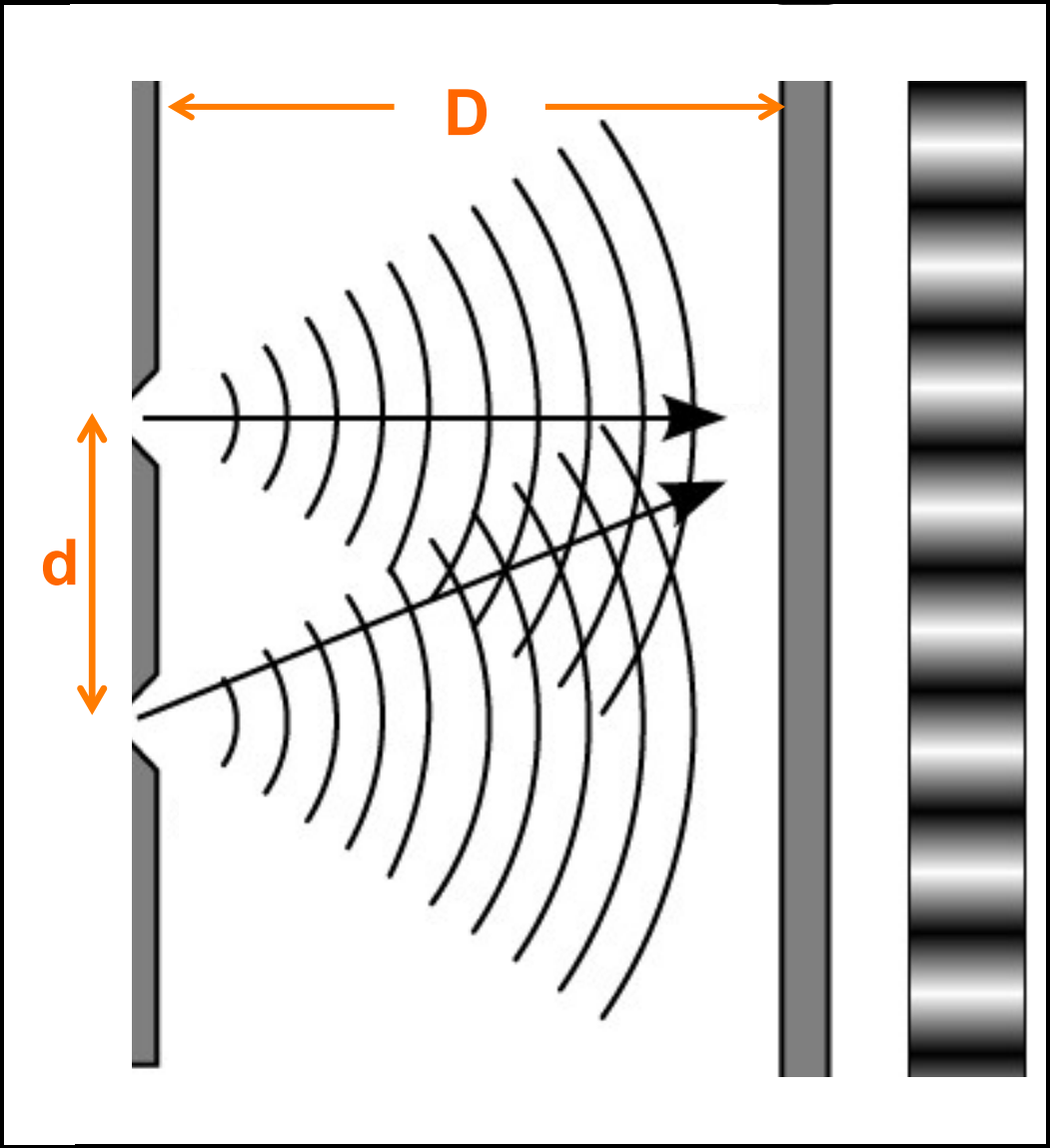
tensione accelerazione (volt)	lunghezza d'onda	
1	**1.266 nm**	1.266×10^{-9} m
100	**0.1266 nm**	1.266×10^{-10} m
100000	**0.0037 nm**	3.7×10^{-12} m

Lunghezza d'onda elettroni

elettroni $\lambda_{el} \sim 10^{-3} - 10^{-5}\ \lambda_{light}$



Il problema della *visibilità* delle frange



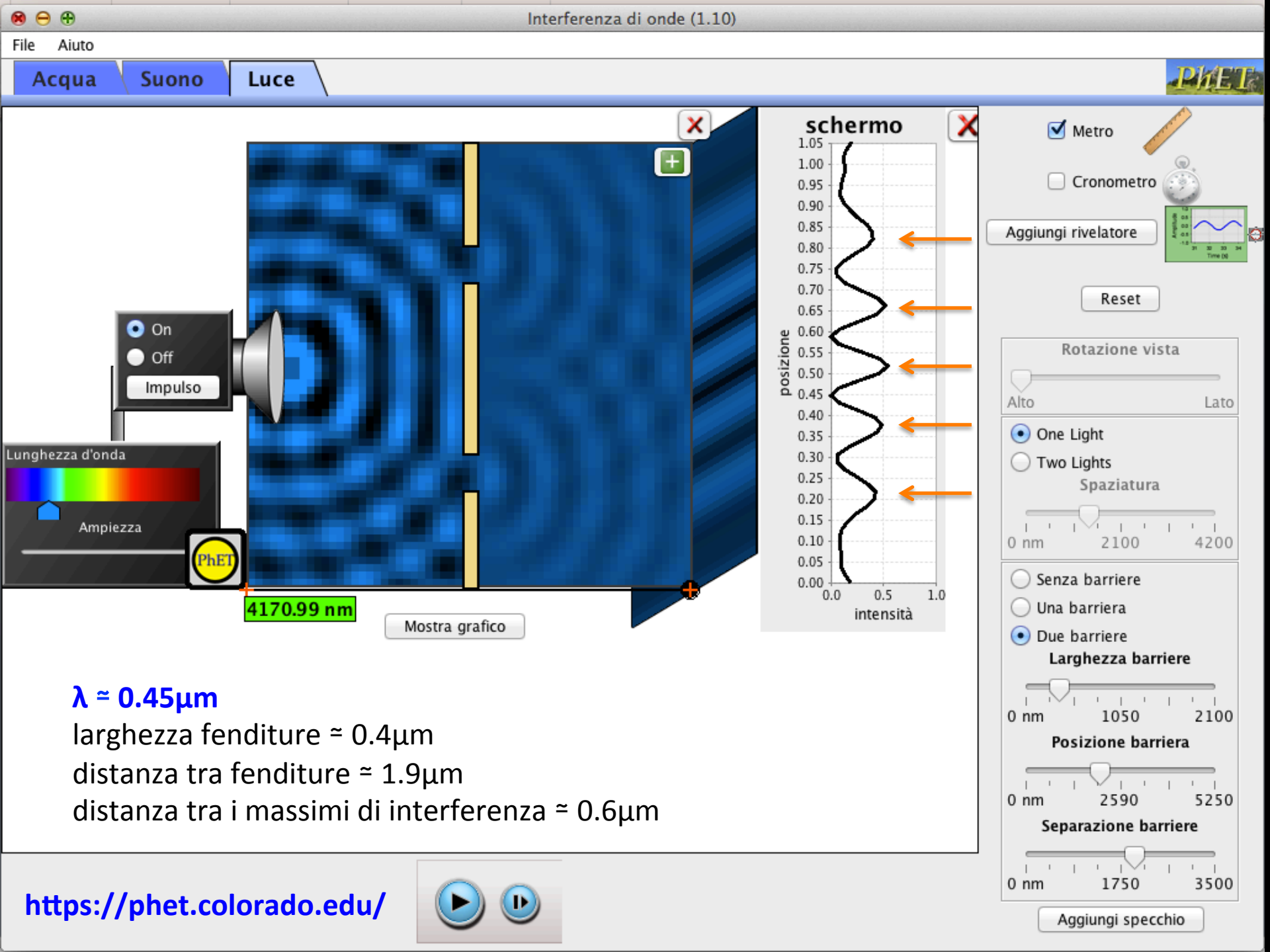
$x \simeq \lambda D/d$ (d<<D)

x (potere risolutivo occhio) ≈ **0.1 mm**

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

d ~ **300 nm** (0.3 μm)

D = xd/λ ≈ 100 m



λ ≃ 0.45µm

larghezza fenditure ≃ 0.4µm

distanza tra fenditure ≃ 1.9µm

distanza tra i massimi di interferenza ≃ 0.6µm

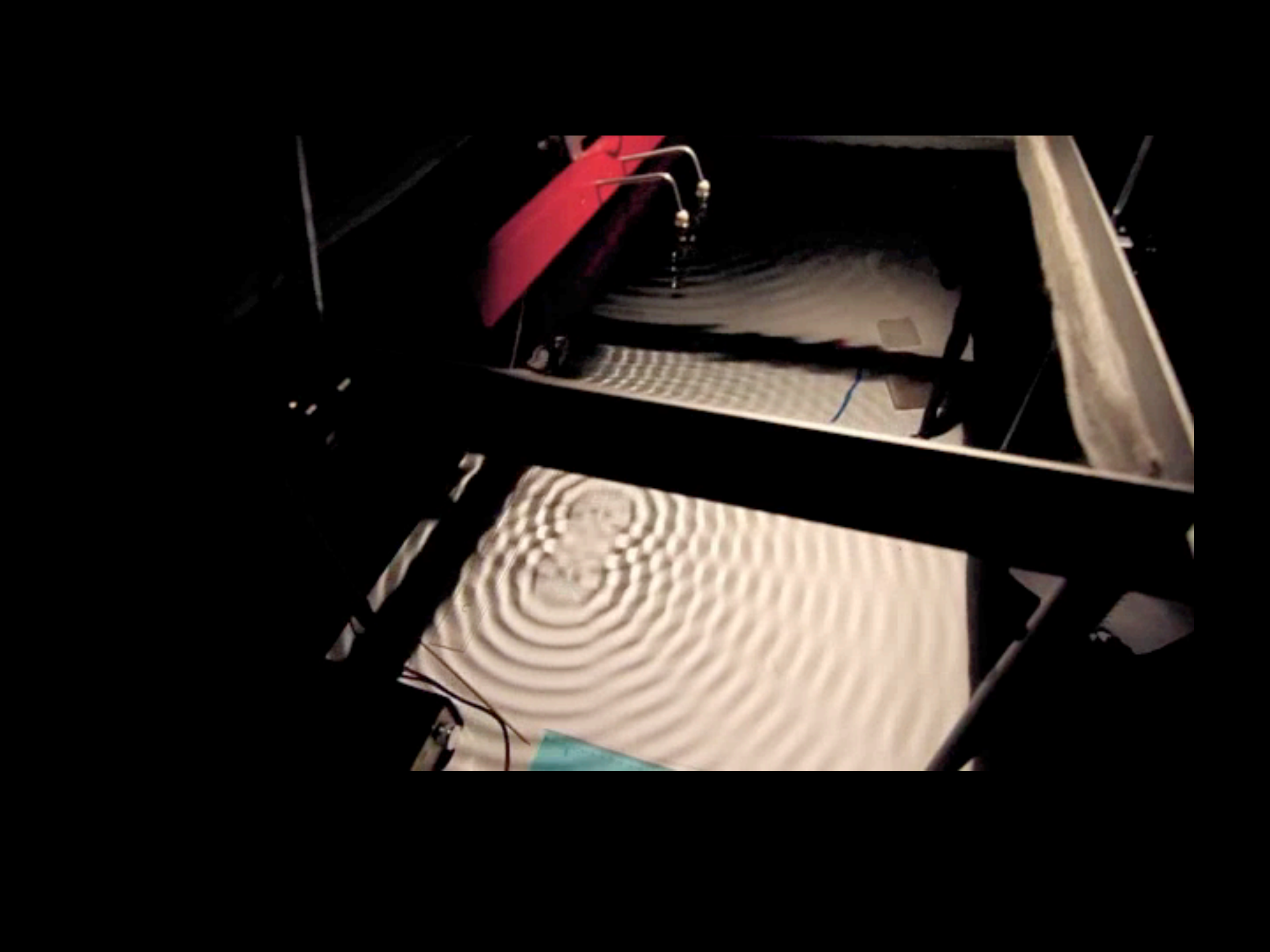
https://phet.colorado.edu/

Il problema della *coerenza* delle sorgenti

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

sorgenti ***coerenti*** = che emettono onde di uguale frequenza/lunghezza d'onda e *sincronizzate* tra loro *(con differenza di fase costante)*

facile ottenerle negli esperimenti con le onde in acqua, molto meno per sorgenti standard di luce o di elettroni



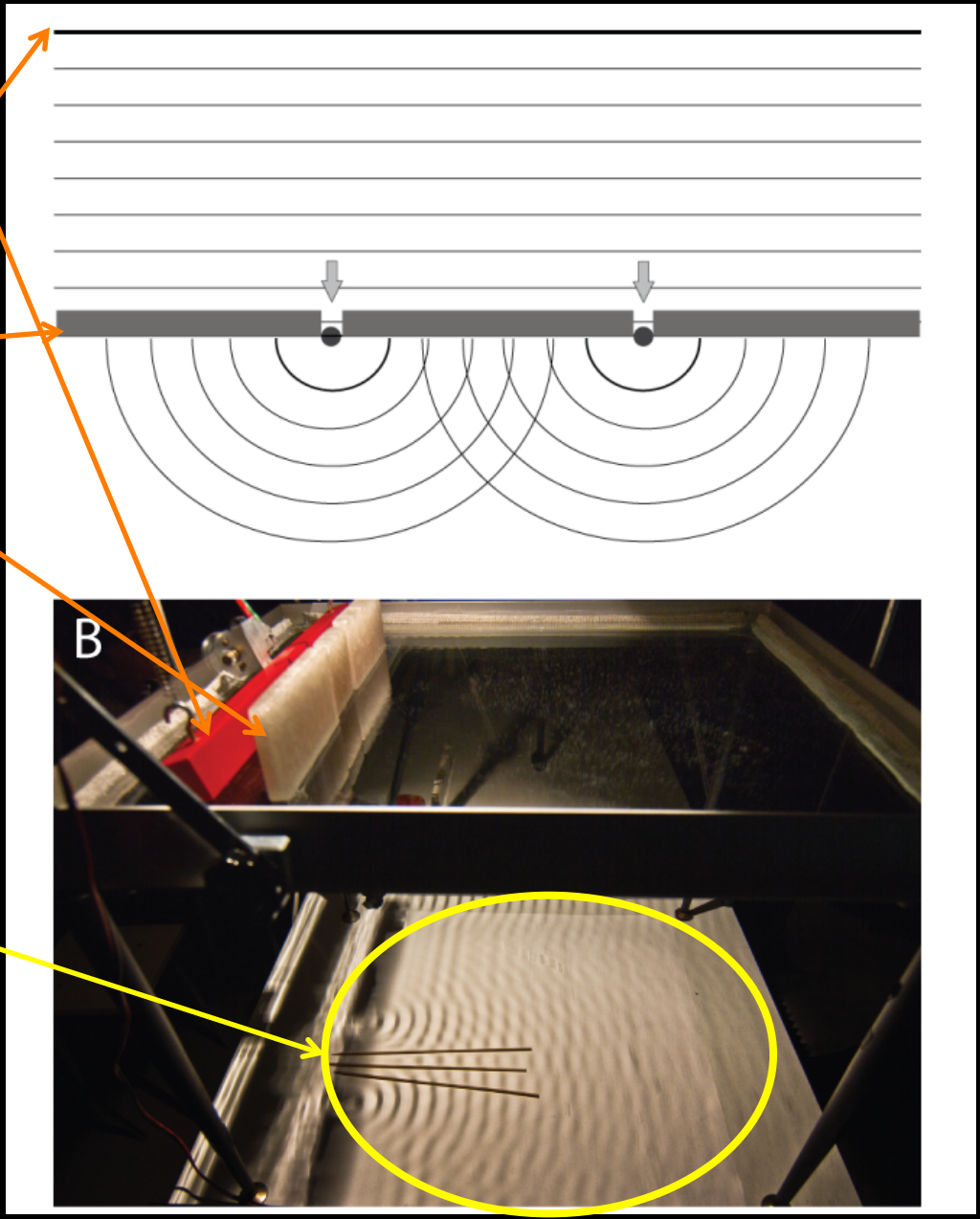
L'esperimento delle due fenditure con l'ondoscopio

Sorgente di onde rettilinee

Fenditure

Nella regione dopo le fenditure si osserva una situazione identica a quella vista prima

.. ma perchè complicare le cose con le 2 fenditure?



Coerenza delle sorgenti di elettroni

Per motivi legati ai meccanismi fisici di emissione, le sorgenti di elettroni (come quelle tradizionali di luce) *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***)

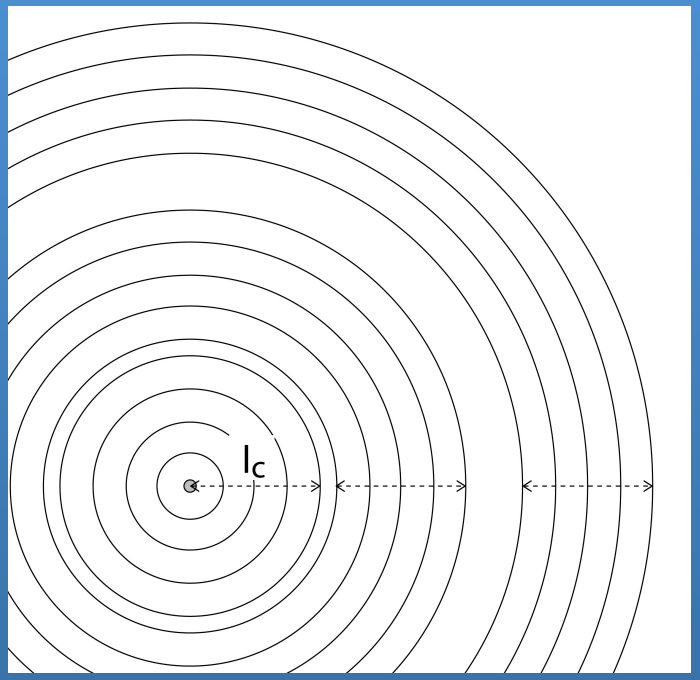
- l'emissione è un processo *statistico* (casuale); sorgenti diverse, ma anche punti diversi di una unica sorgente estesa, emettono in modo scorrelato, ovvero con differenza di fase variabile (problema della ***coerenza spaziale***)

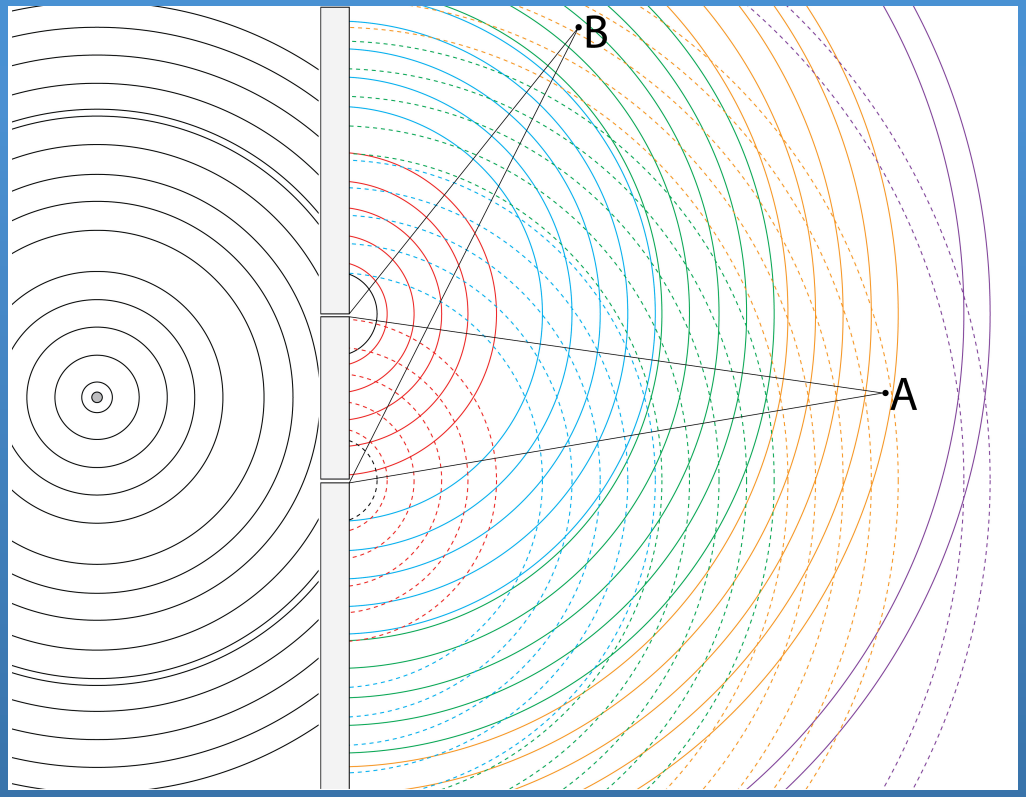
Coerenza delle sorgenti di luce e elettroni

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

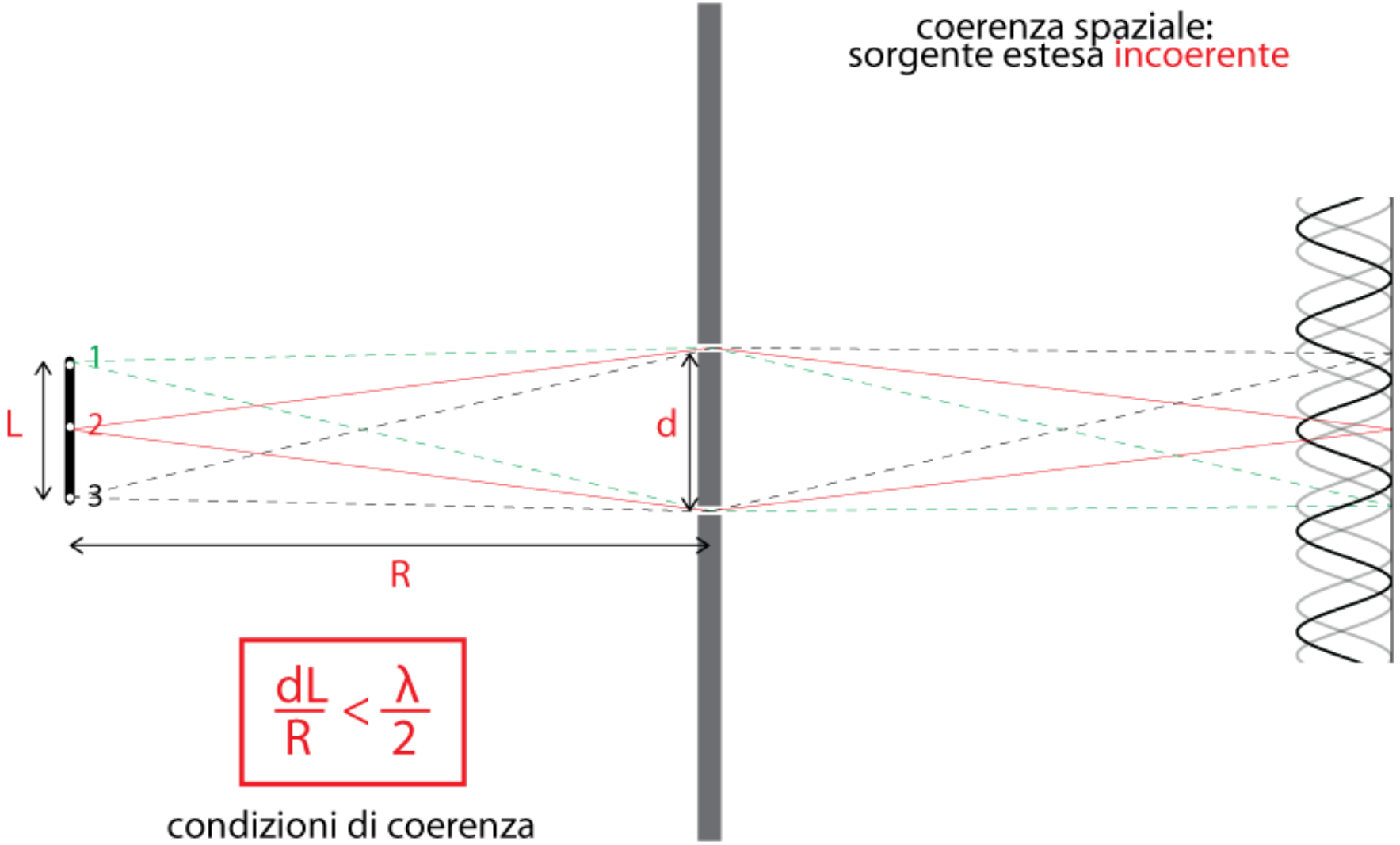
Coerenza temporale

(sorgente puntiforme quasi-monocromatica)



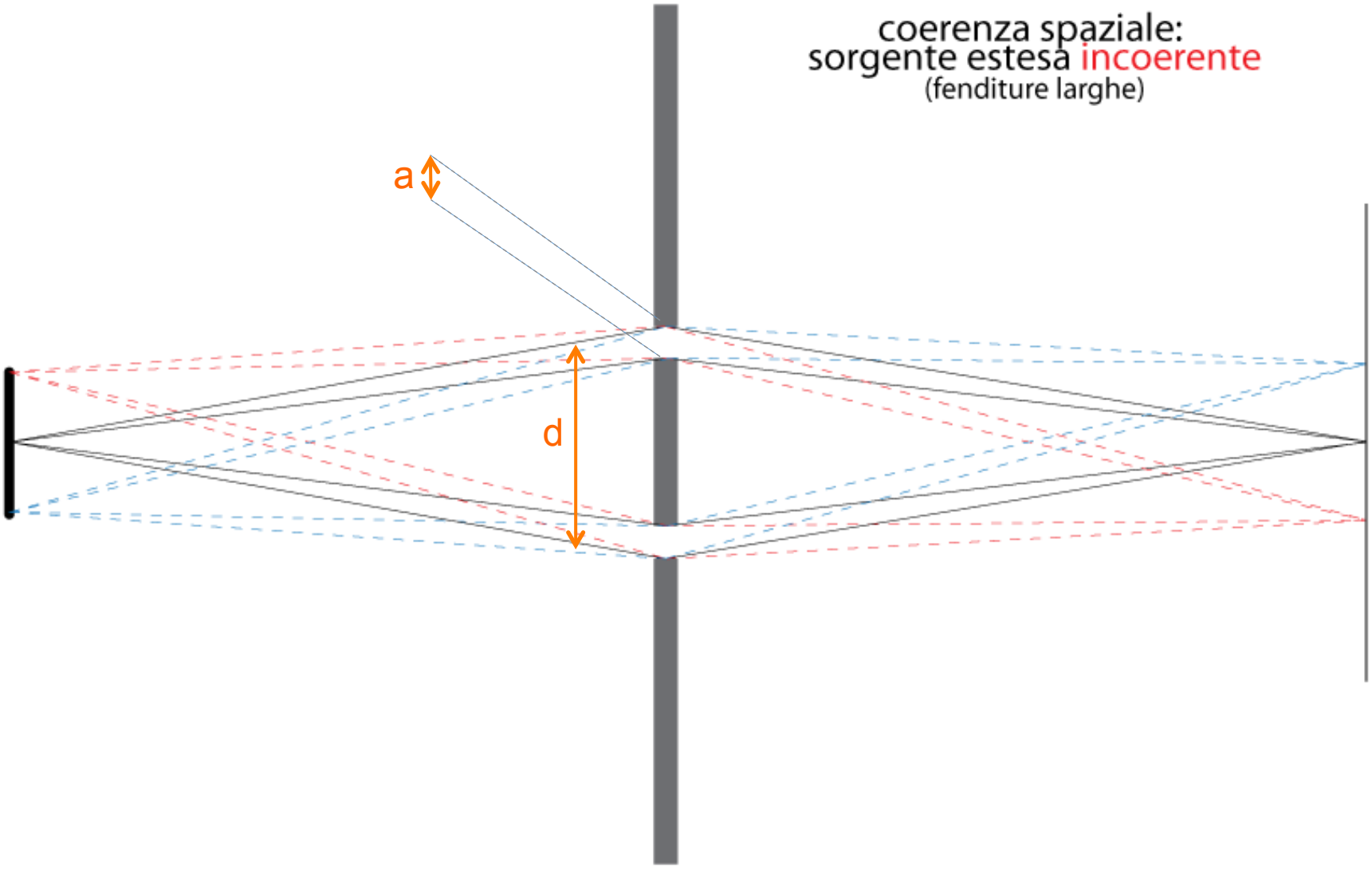


coerenza spaziale:
sorgente estesa incoerente



$$\frac{dL}{R} < \frac{\lambda}{2}$$

condizioni di coerenza



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

In sintesi

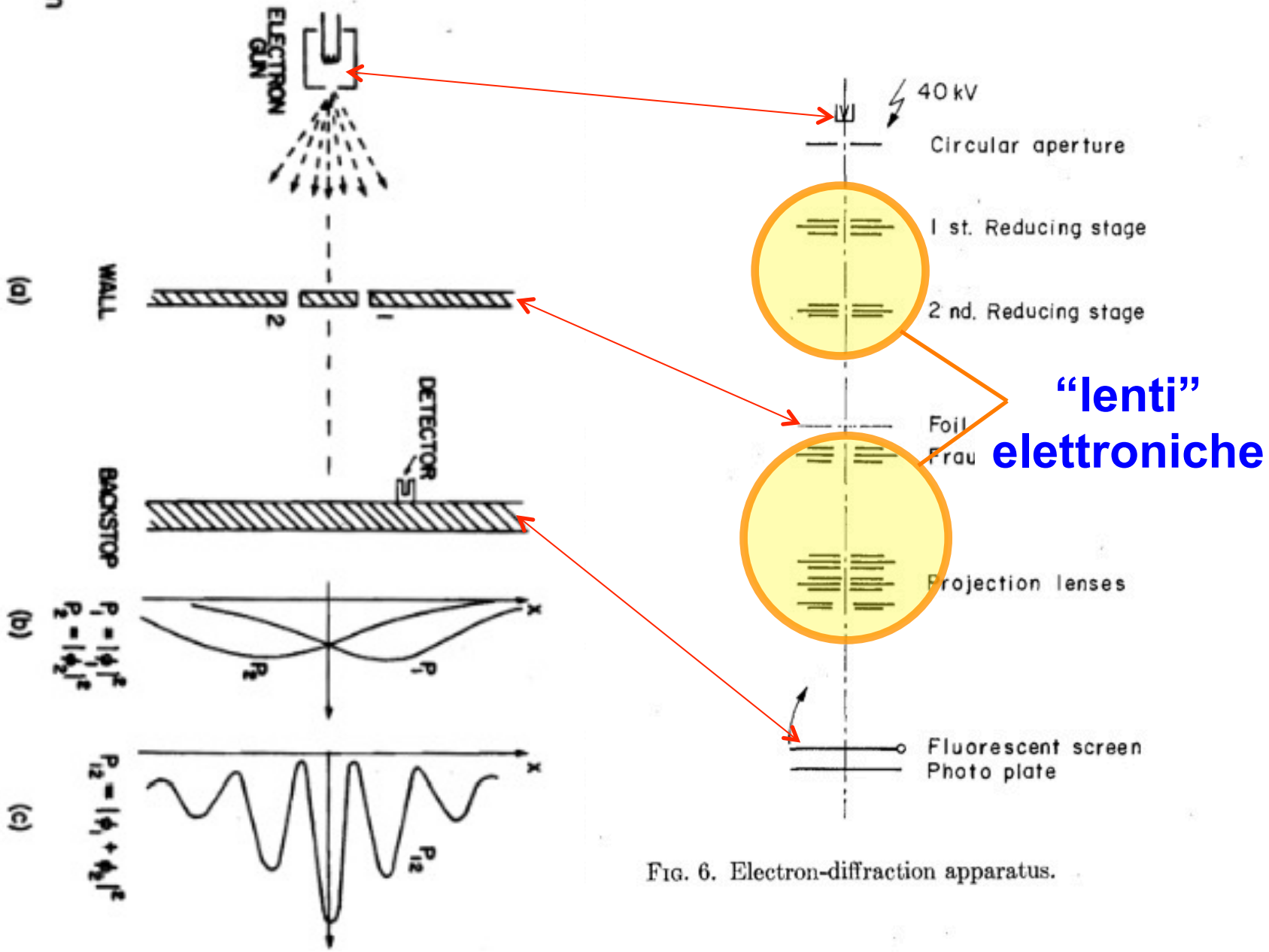
Esigenze di *visibilità delle frange* e di *coerenza* imporrebbero una geometria in cui:

- dimensione sorgente primaria, larghezza fenditure, distanza tra le fenditure sono 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 ...

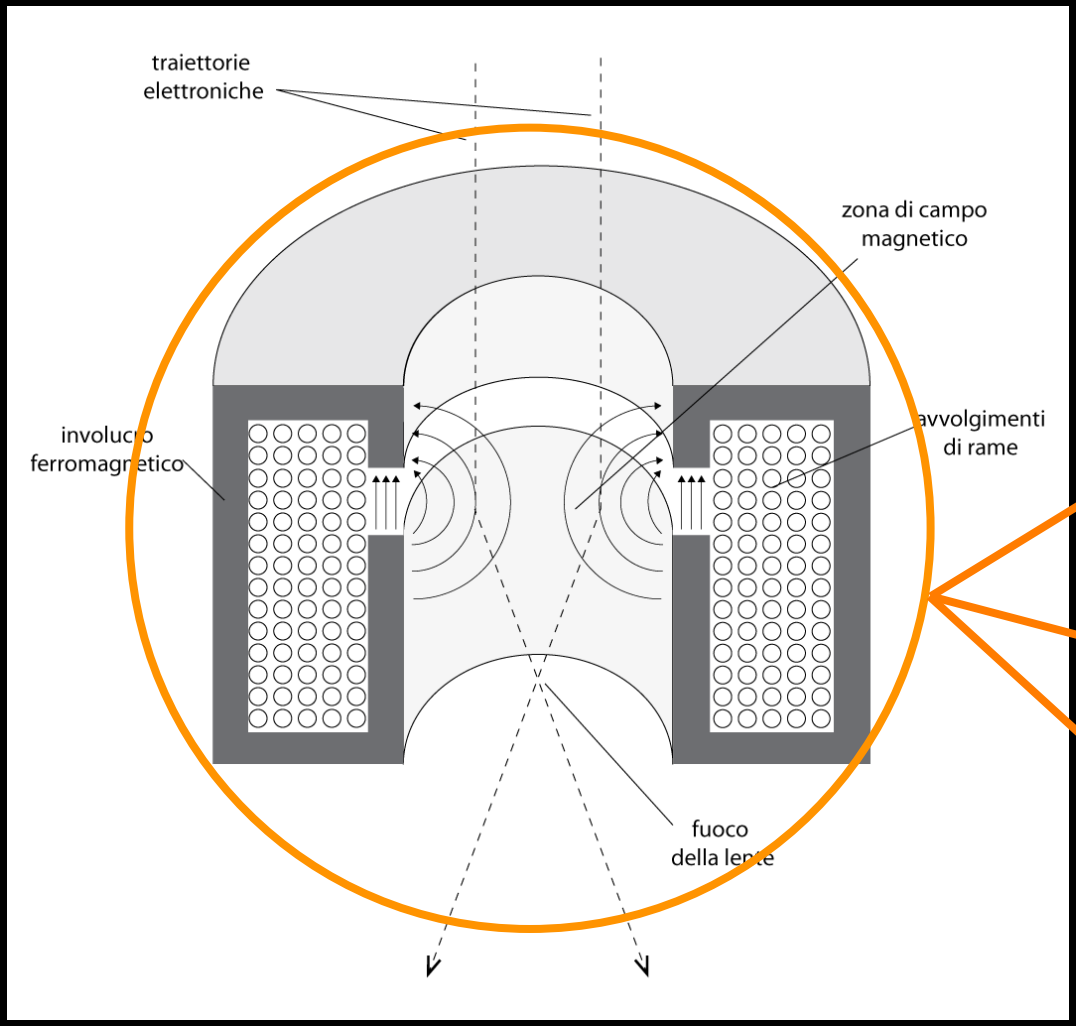


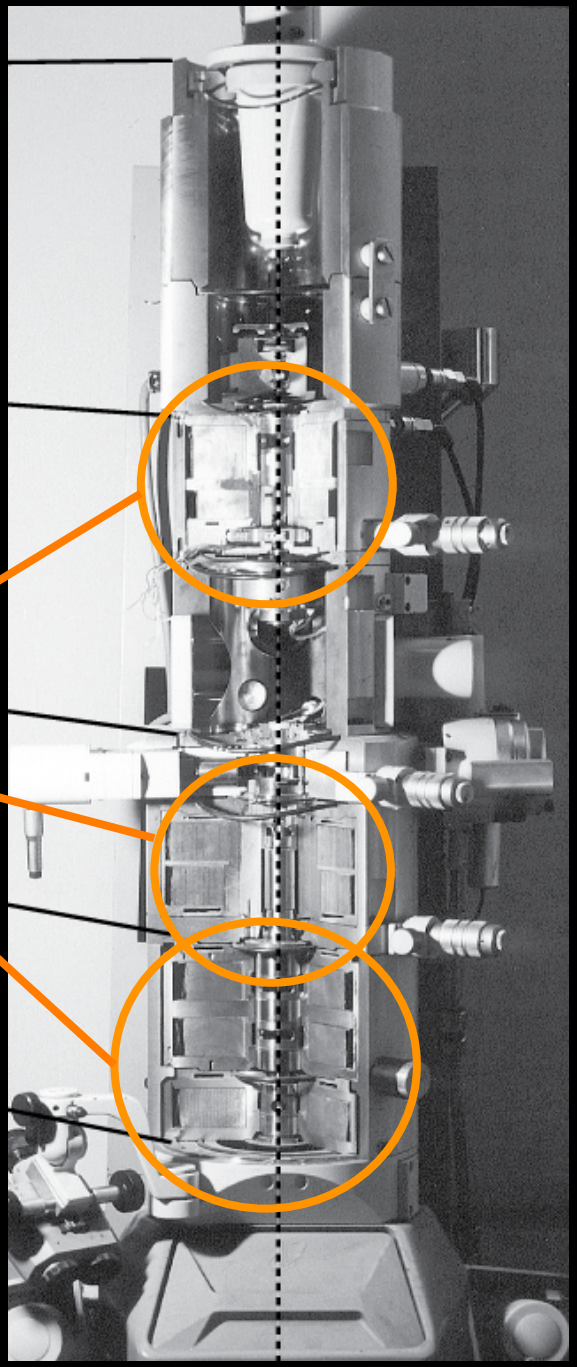
"lenti" elettroniche

FIG. 6. Electron-diffraction apparatus.

C. Jönsson (Univ. Tubinga) 1961

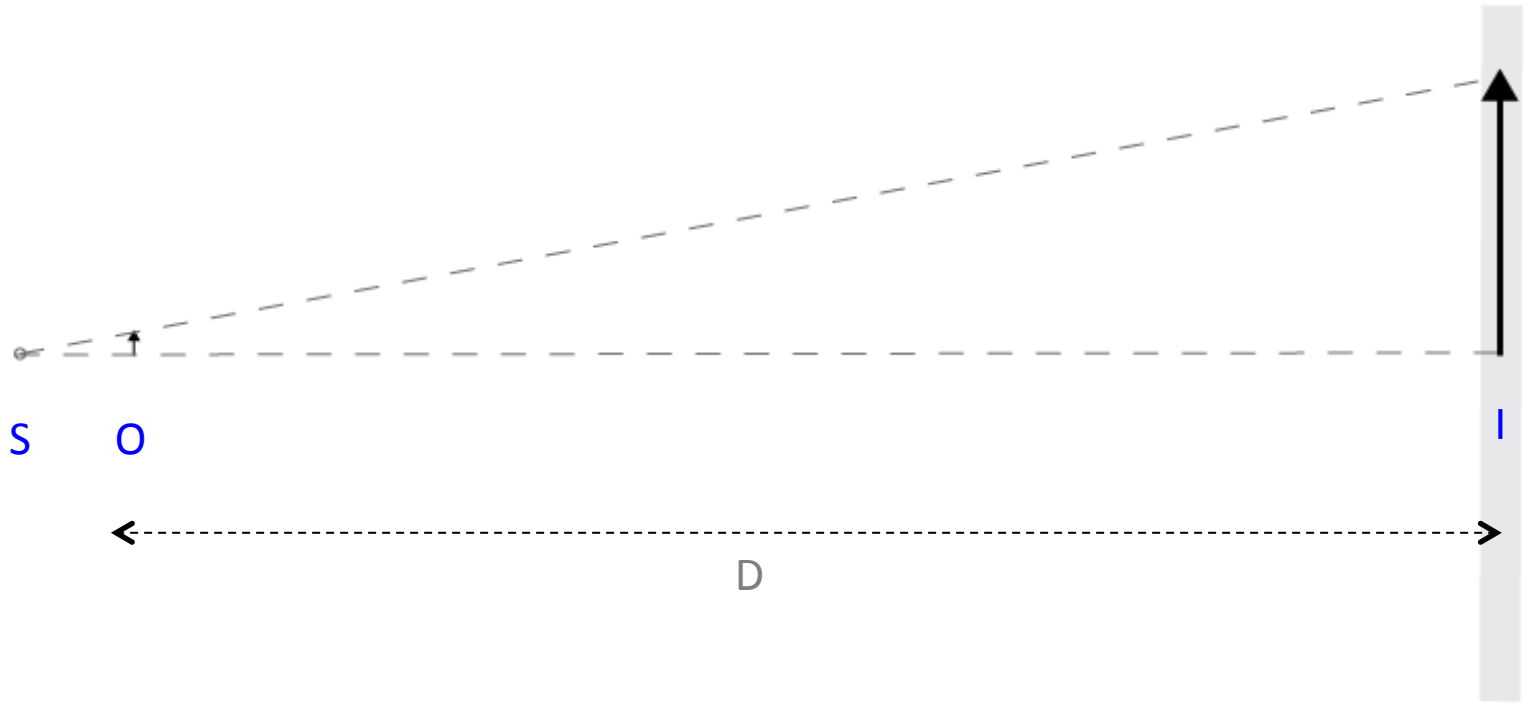
lente elettro-magnetica per elettroni





il costituente fondamentale del *microscopio elettronico (in trasmissione)*

Effetto di una lente



proiezione geometrica da sorgente puntiforme

Effetto di una lente

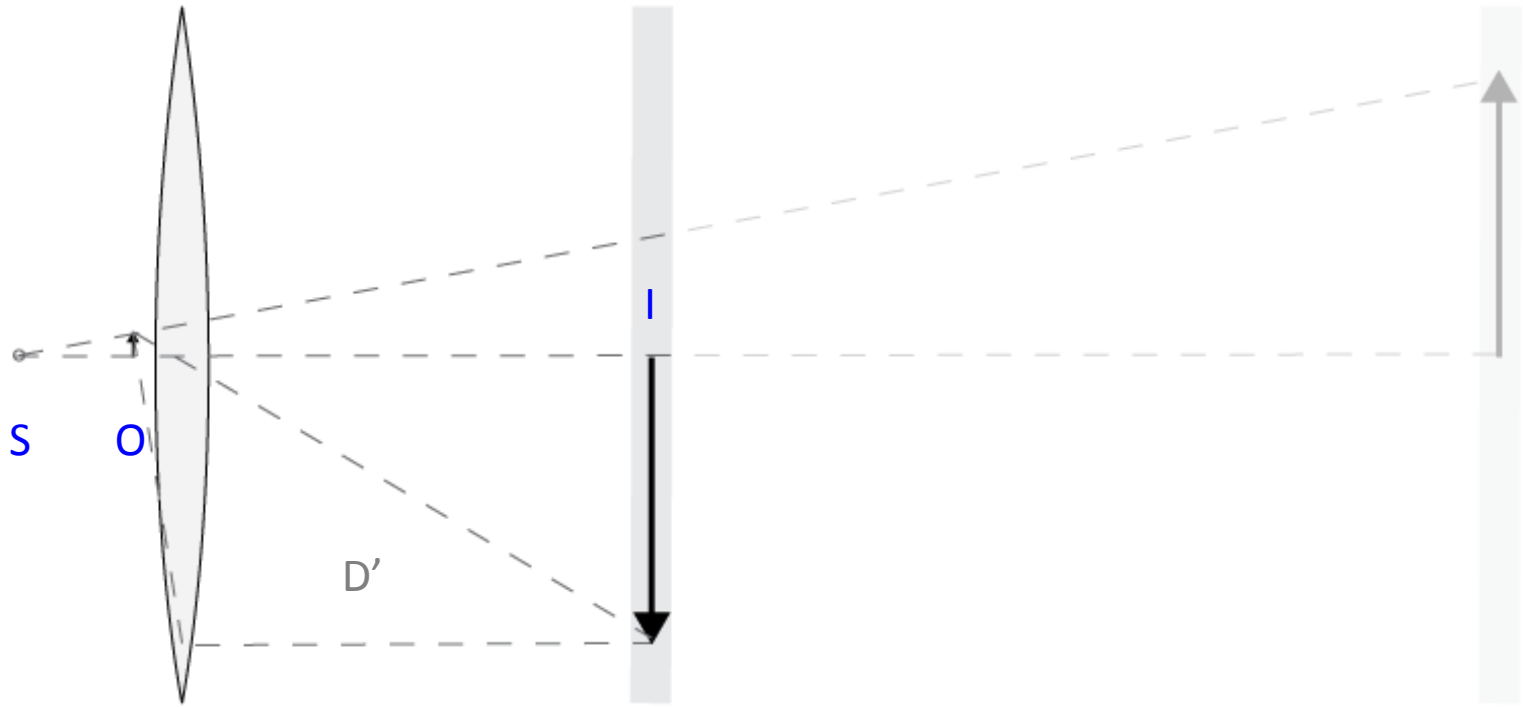
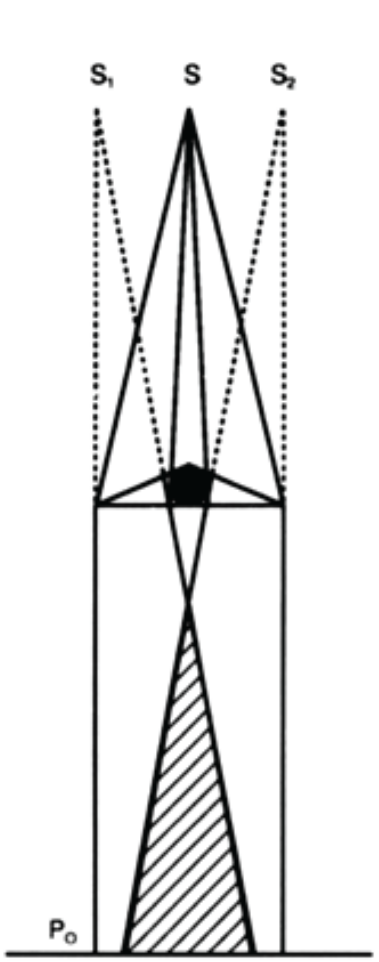
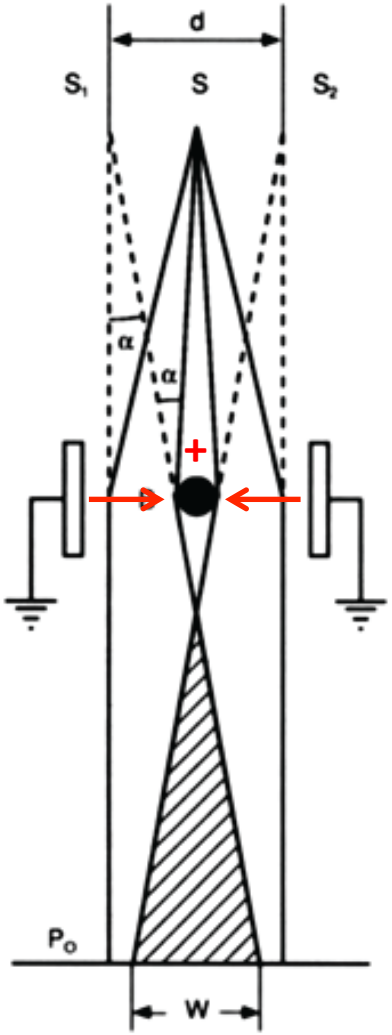


immagine delle stesse dimensioni del caso precedente, ma molto più vicina all’oggetto (e ribaltata ...)

biprisma elettronico (Möllensted, Düker)

Tubinga (1955)

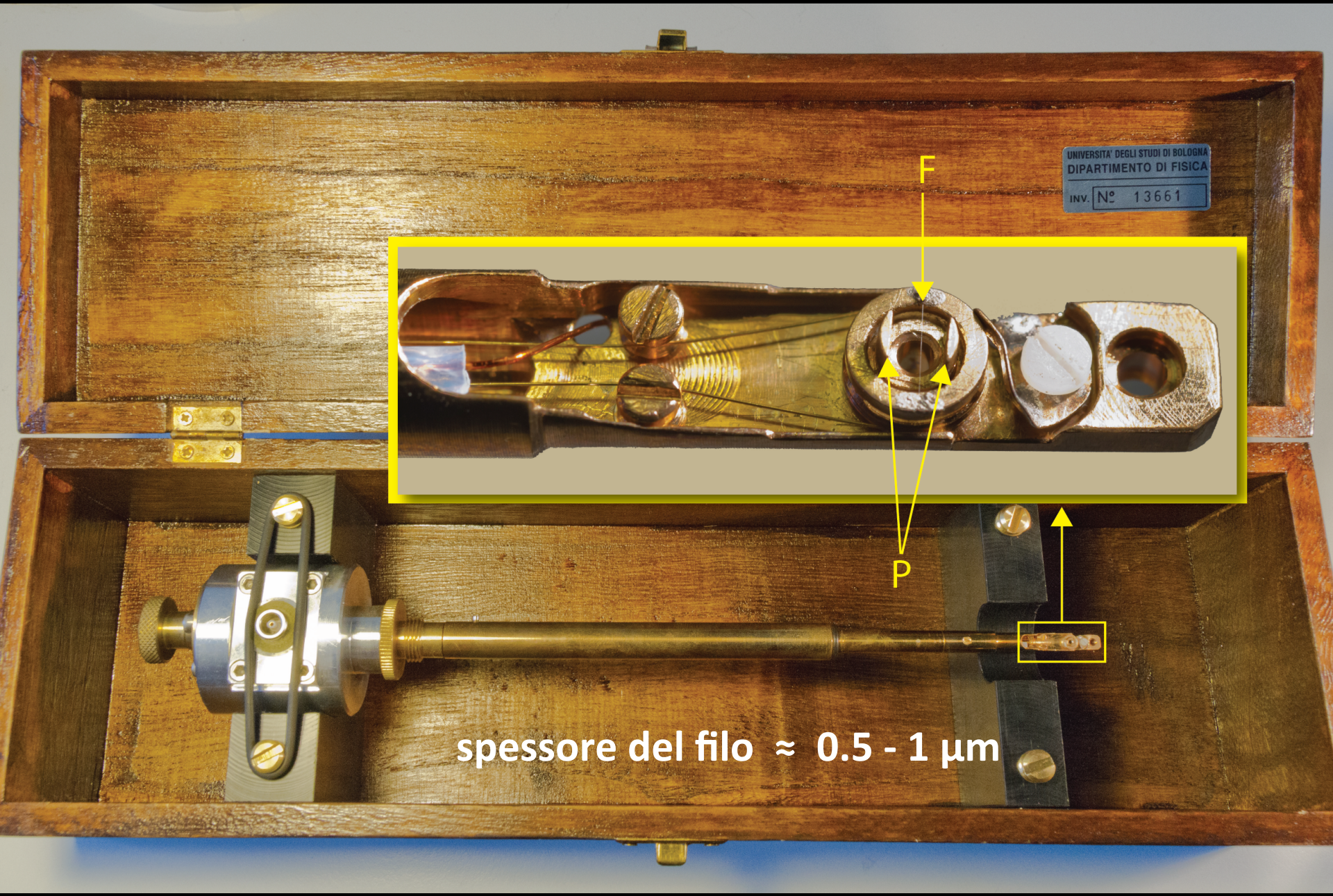




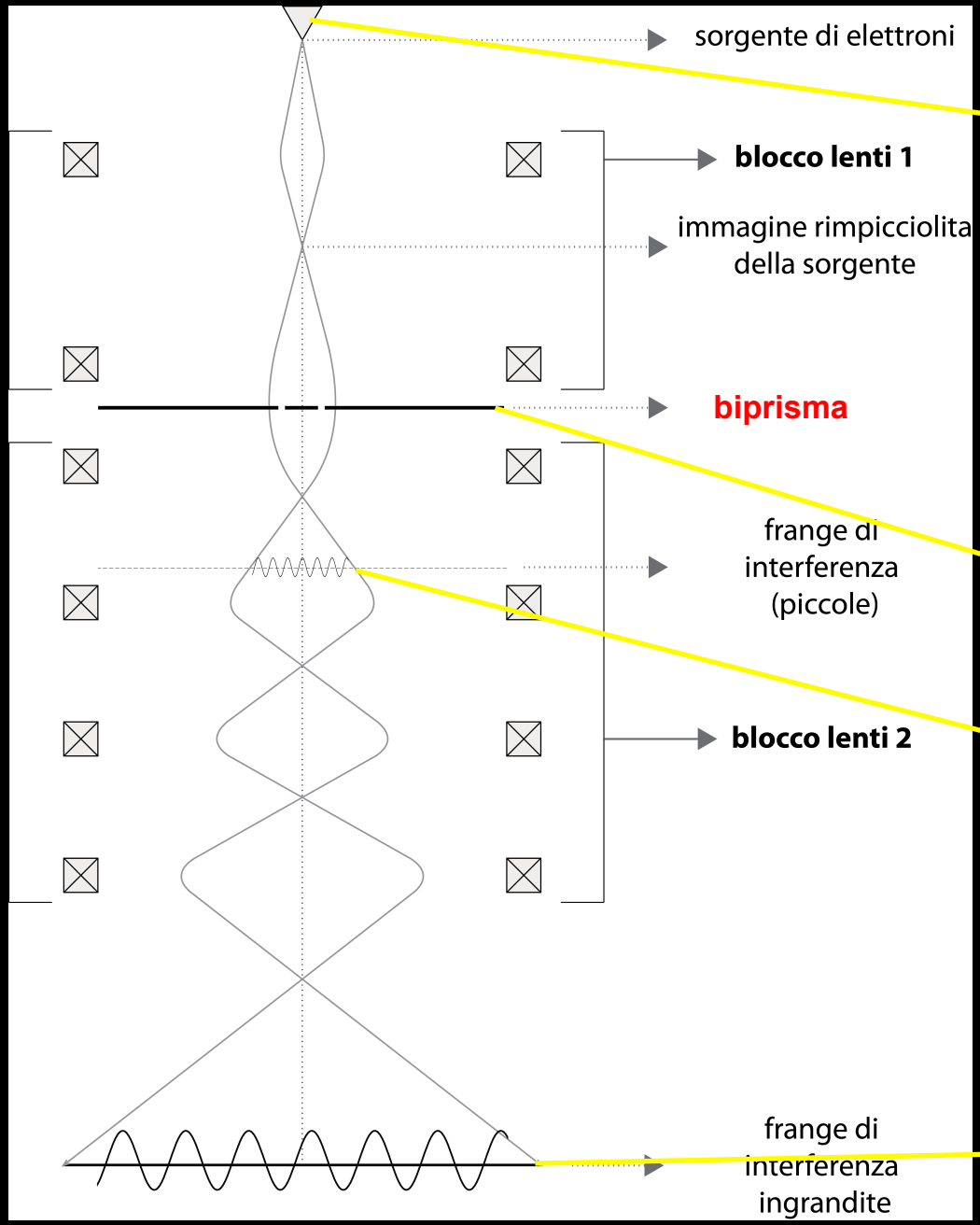
S<100nm

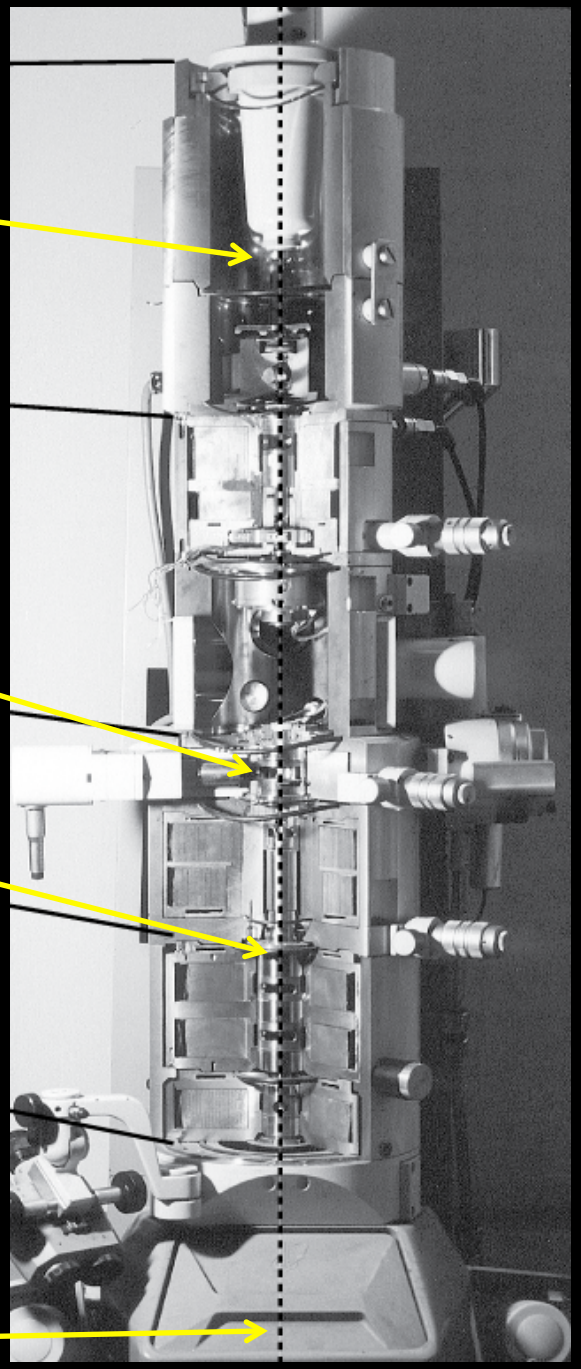
F<1mm

biprisma di Fresnel (luce)


UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI FISICA
INV. N° 13661
F
P
spessore del filo ≈ 0.5 - 1 µm

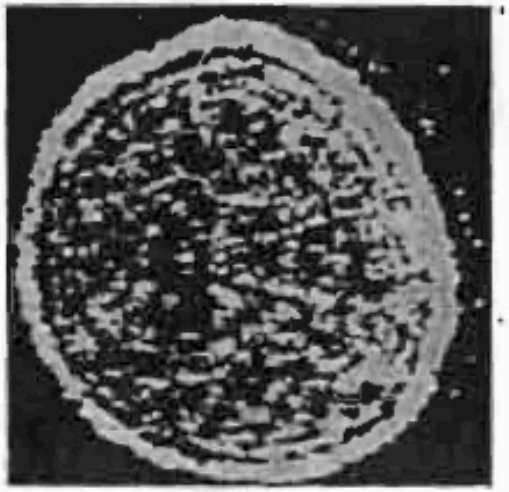
Interferenza di elettroni nel microscopio elettronico



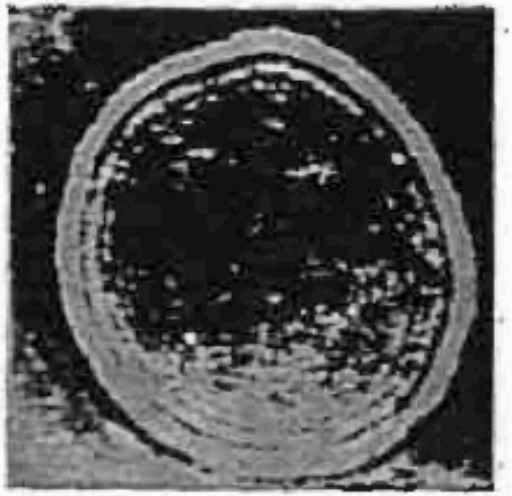


K.H. Hermann (Siemens) Intensificatore di immagine (1971)

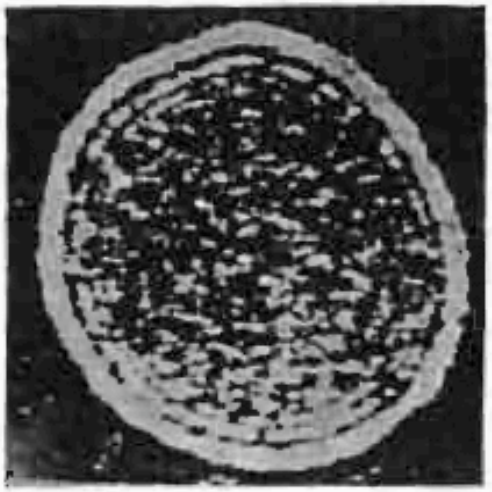
τ = 1/25 s



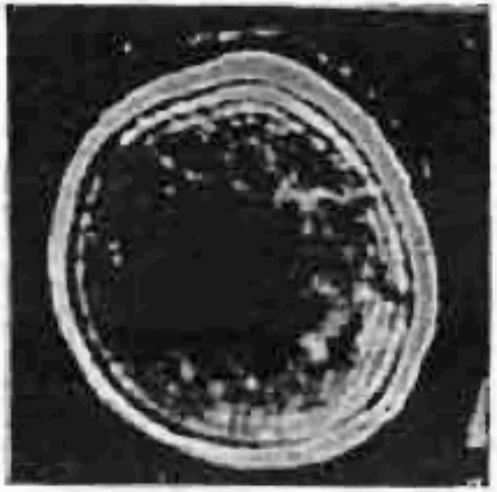
τ = 10 s



τ = 20 s



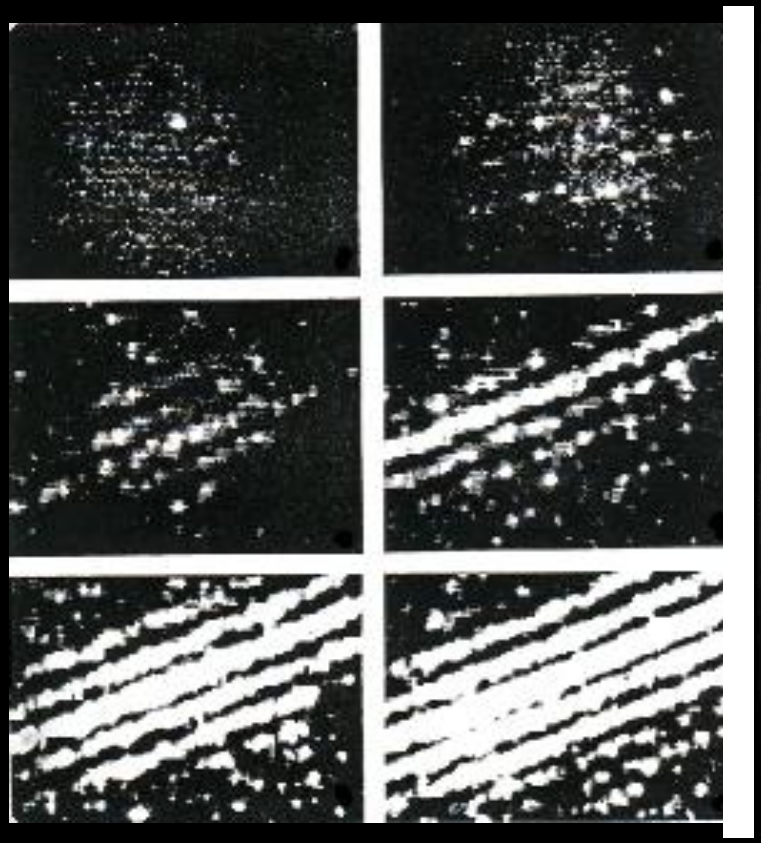
τ = 60 s

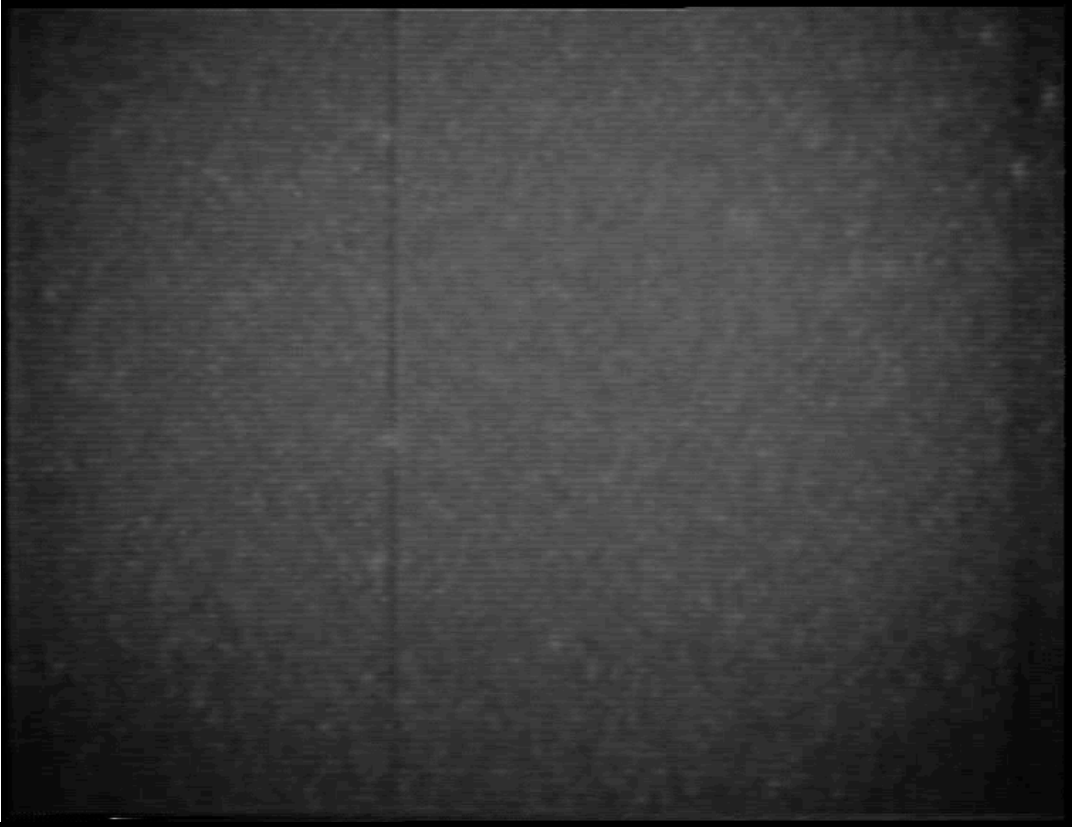


τ = 120 s

Il primo rivelatore di elettroni singoli

Esperimento Merli Missiroli Pozzi (1976)

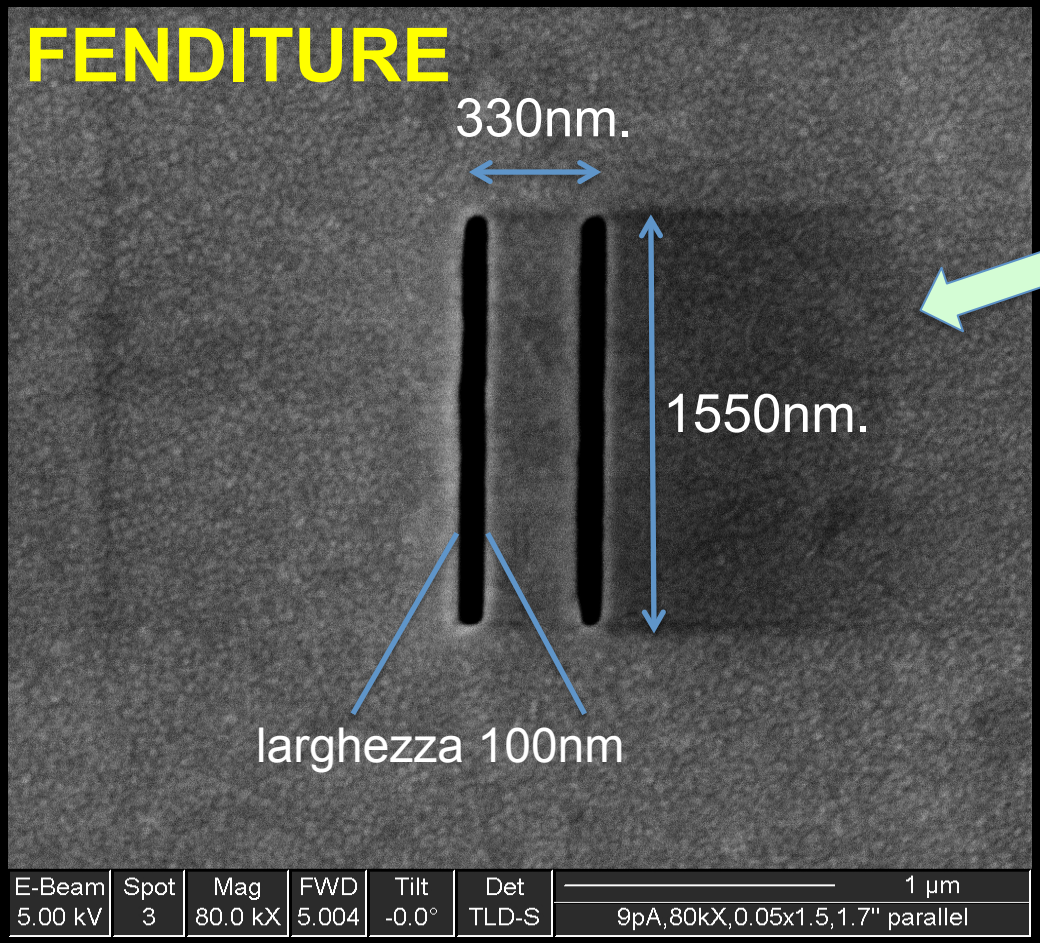


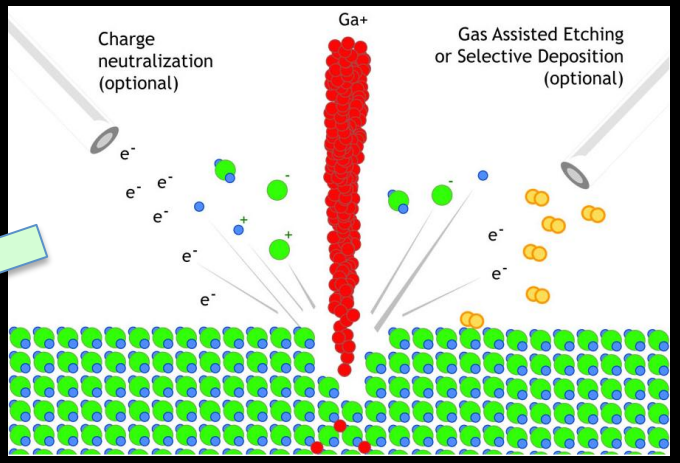


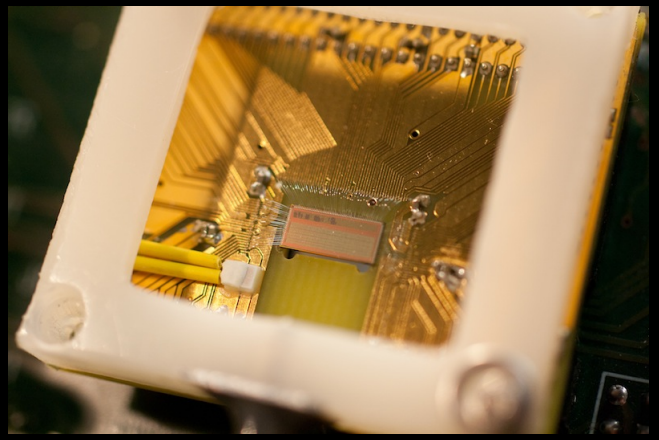
microscopio elettronico + biprisma + rivelatore elettroni singoli

Il primo esperimento di interferenza in cui si visualizzano i singoli elettroni: l'esperimento più bello! *(Physics World 2002)*

Il primo esperimento di interferenza di elettroni singoli con 2 fenditure







Una realizzazione recente (2011) dell'esperimento, con le **fenditure** al posto del biprisma e un rivelatore di elettroni singoli a memoria veloce (**lez. 3 Prof. Matteucci**) .

Introduzione al
Filo 2 – La sfida concettuale

ovvero

come la fenomenologia impone di liberarsi progressivamente da immagini e categorie di pensiero che sembrano ovvie…
…e di costruirsene delle nuove.

La DINAMICA del RAGIONAMENTO

1. Individuazione, nell'EPB, di alcuni limiti (confini) del "pensare classico", ovvero individuazione di alcune situazioni emblematiche in cui il "pensare classico" *non* arriva (**apertura dello spazio del problema**).

2. Allargamento della fenomenologia (analisi di altri esperimenti con altri oggetti) per mettere a fuoco aspetti/comportamenti sempre più trasversali (sugli oggetti) e sempre più "genuinamente quantistici" (inspiegabili con la fisica classica) (**costruzione e definizione del problema**).

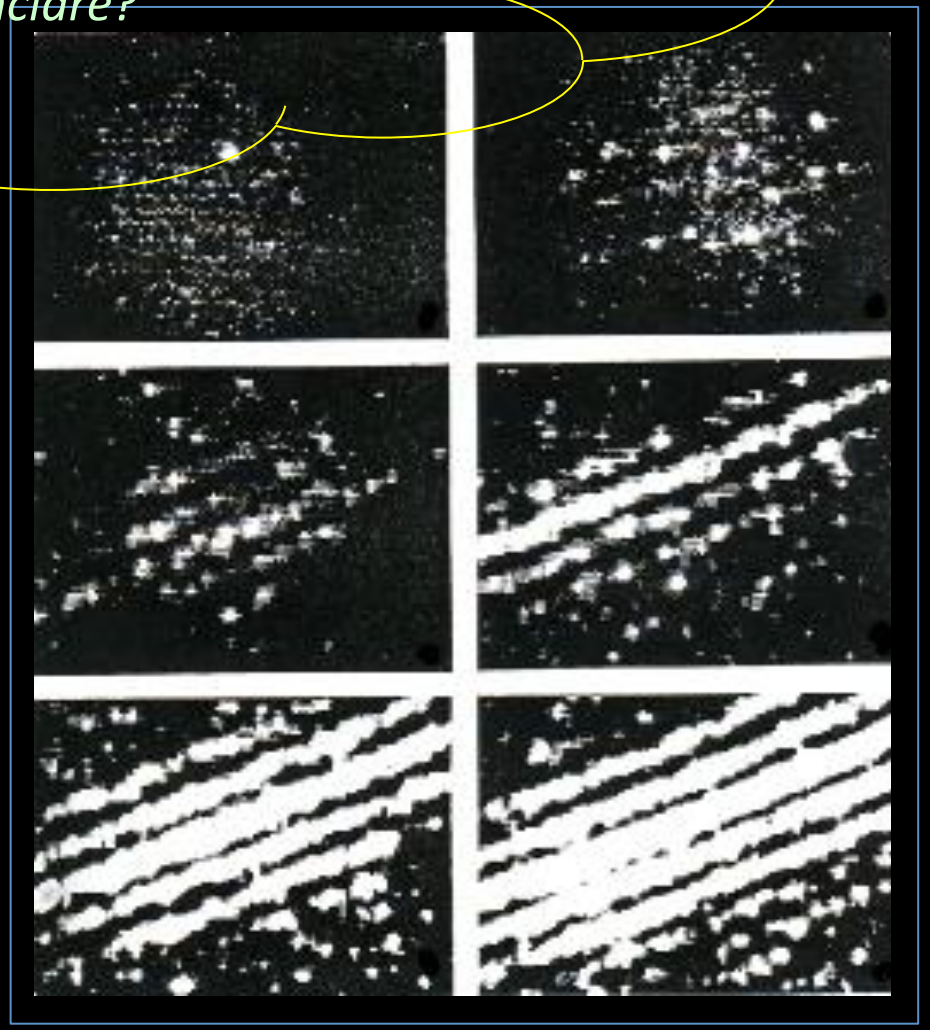
3. La ricerca di nuove forme di regolarità, di categorie di pensiero e di strumenti razionali per spiegare ciò che si osserva (**costruzione di una "teoria" che spieghi, interpreti la fenomenologia**)

N.B. La dinamica di “ripulitura” concettuale, terminologica e immaginativa come tipica della fisica…

“No new idea, whatever its domain, is born fully grown. Initial formulations of novel conceptions, being still tributary to the old views they are to replace, of necessity are awkward and inappropriate. Any scientific theory, following its inception, then has to undergo a recasting process through which its notions are clarified and its terms improved.”

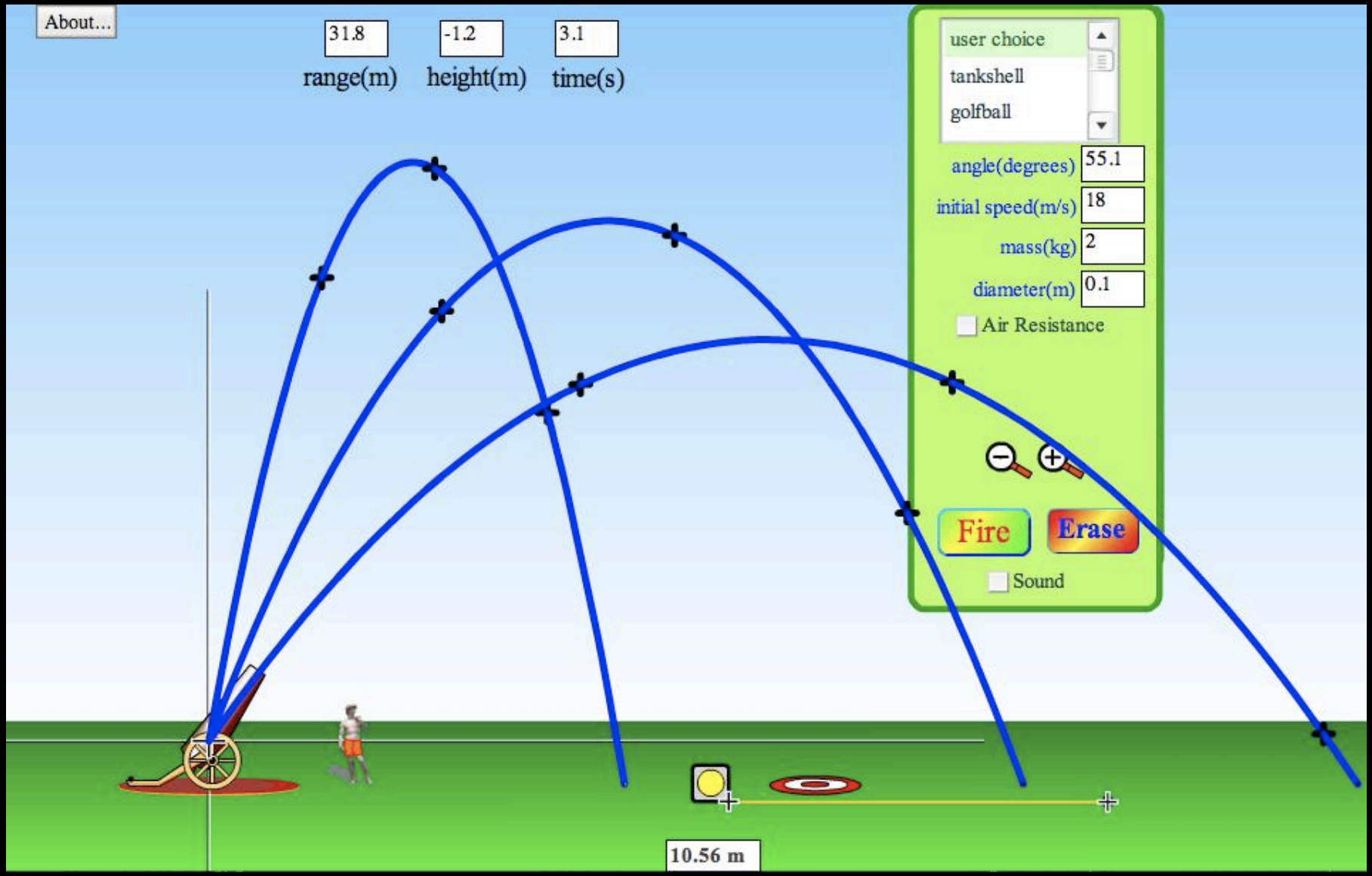
JEAN-MARC LÉVY-LEBLOND, On the Nature of Quantons, 2003, *Science & Education*

Quali aspetti, qui osservabili, "non sono spiegabili" con criteri classici?
A cosa dobbiamo rinunciare?



Come interpretate queste vignette?

Sull'"ovvio" concetto di traiettoria…



La “relazione” di indeterminazione

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

“h tagliato”= $1{,}054 \times 10^{-34}$ Js

Apparentemente…

“[…] una formuletta - in sé piuttosto arida e arcana - che abbiamo imparato a recitare sui libri di Liceo, dal nome fastidiosamente indimenticabile: il principio di indeterminazione di Heisenberg.”

(M. Cattaneo, Heisenberg e la rivoluzione quantistica, I grandi della scienza, Le Scienze, 2000, ripubblicato luglio 2013)

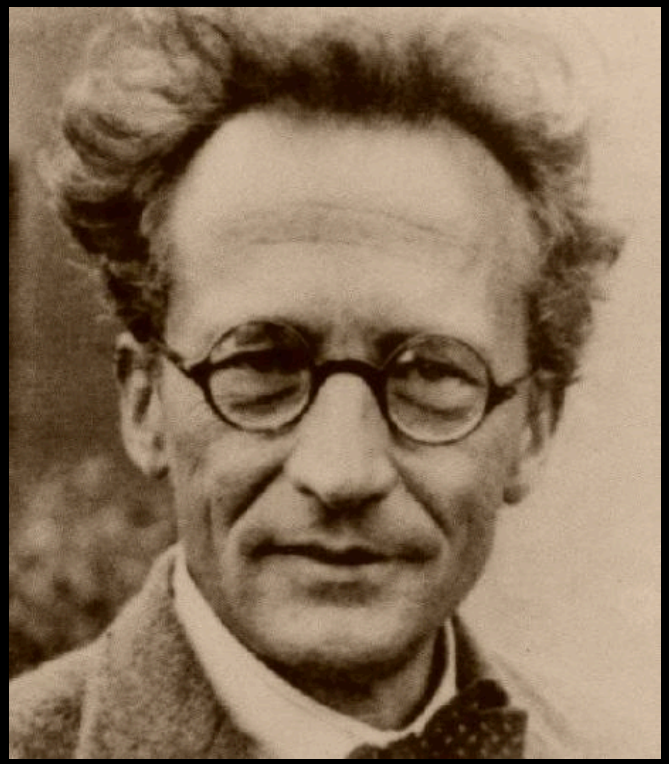
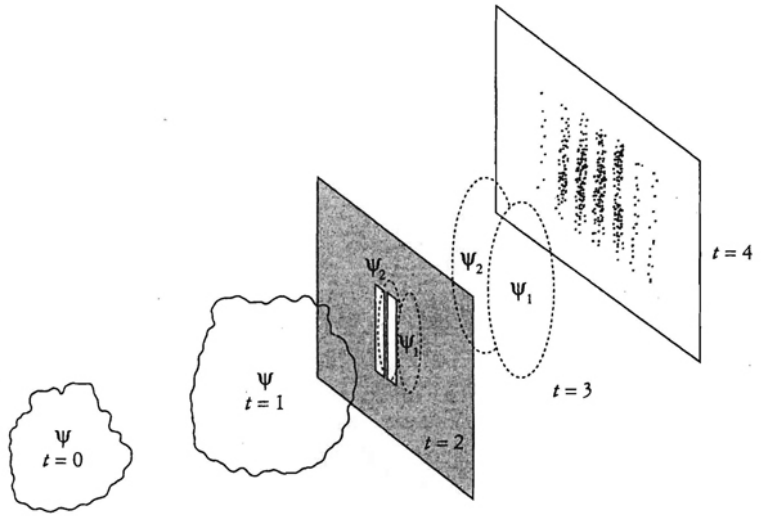


Figura 35.

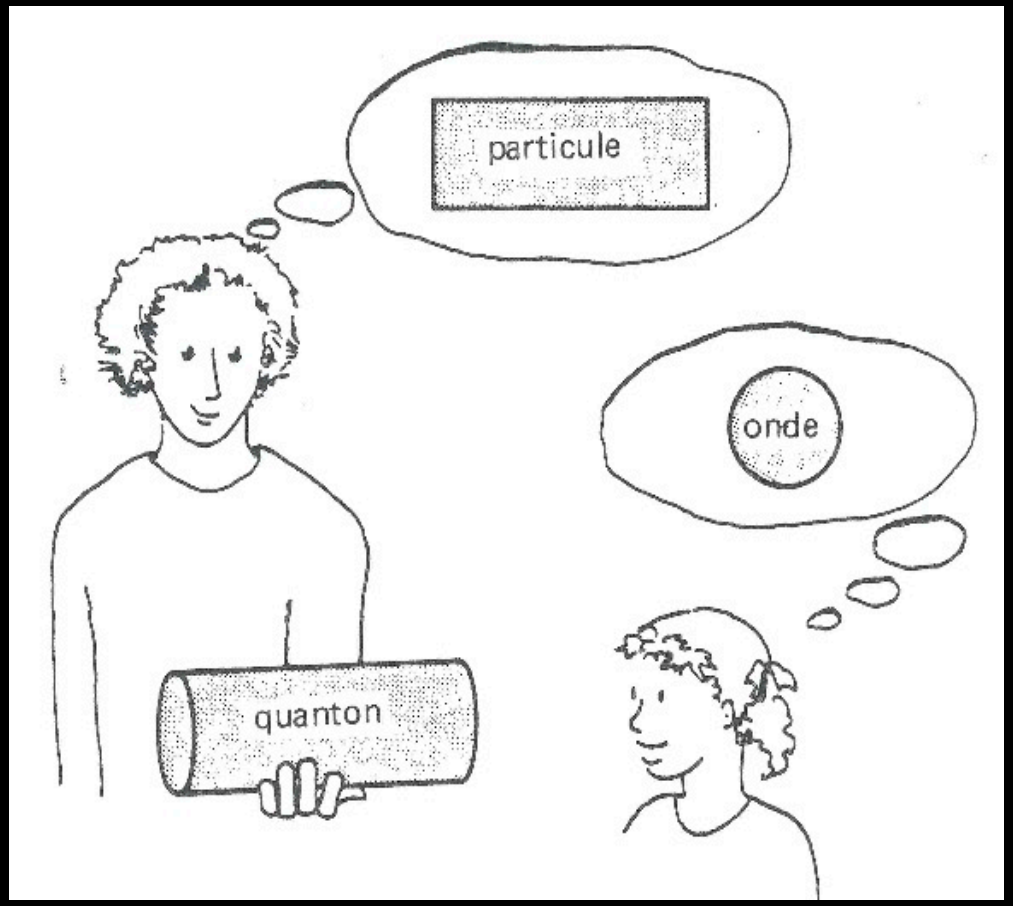
Una «nube» di funzione d'onda ψ che si avvicina a due fessure ($t = 0$ e $t = 1$), le attraversa, si divide in due ($t = 2$), si espande e si sovrappone ($t = 3$) e urta lo schermo ($t = 4$).



"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)**

Di che onda si tratta????

Osservando la figura di Levy-Leblond e pensando all'ESP,
come interpretate la figura stessa? Cosa vi dice?
(lavoro di gruppo)



Neither Waves, Nor Particles, but Quantons!

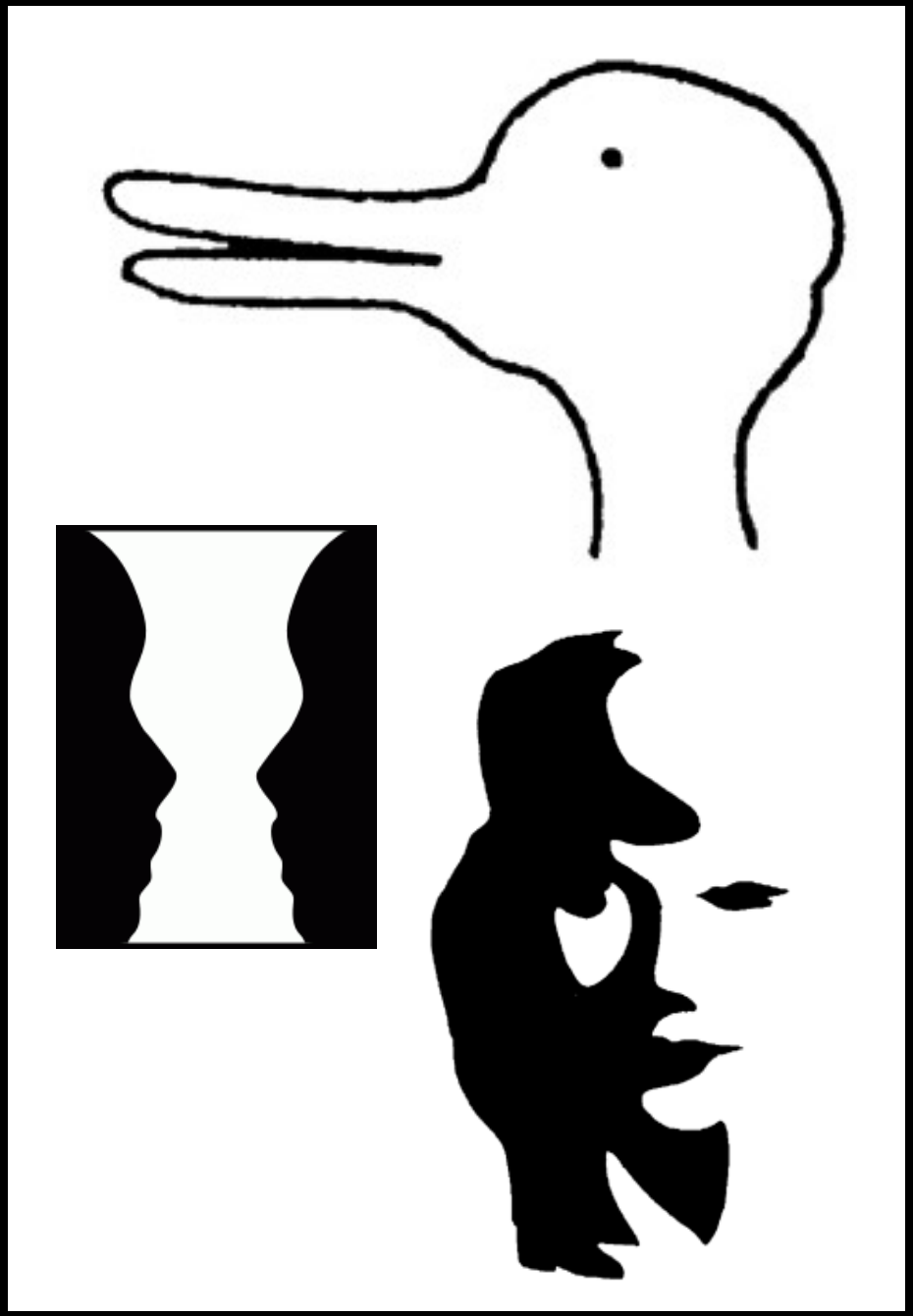
That the true nature of quantum objects has long been **misunderstood** is proved by their still all too common description in terms of an alleged "wave-particle duality". It must be remarked first of all that this formulation is at best **ambiguous**. For it may be understood as meaning either that a quantum object is at once a wave and a particle, or that it is sometimes a wave and sometimes a particle. Neither one of these interpretations in fact make sense. **"Wave" and "particle" are not things but concepts**, and incompatible ones; as such, they definitely cannot characterise the same entity. While it is true that quantum objects may in some cases look like waves, and in other cases like particles, it is truer still that in most situations, particularly the ones explored by the elaborate modern experiments, they resemble neither one nor the other. **The situation here is reminiscent of that encountered by the first explorers of Australia**, when they discovered strange animals dwelling in brooks. Viewed from the forefront, they exhibited a duckbill and webbed feet, while, seen from behind, they showed a furry body and tail. They were then dubbed "duckmoles". It was later discovered that this "duck-mole duality" was of limited validity, and that the zoological specificity of these beasts deserved a proper naming, which was chosen as "platypus". Bunge's proposal to call them **"quantons"**, building on the common terminology (electrons, photons, nucleons, etc.) and extending it to a common categorisation, is most to the point, and it is to be hoped that this terminology gradually gains ground.

JEAN-MARC LÉVY-LEBLOND, On the Nature of Quantons, 2003, *Science & Education*

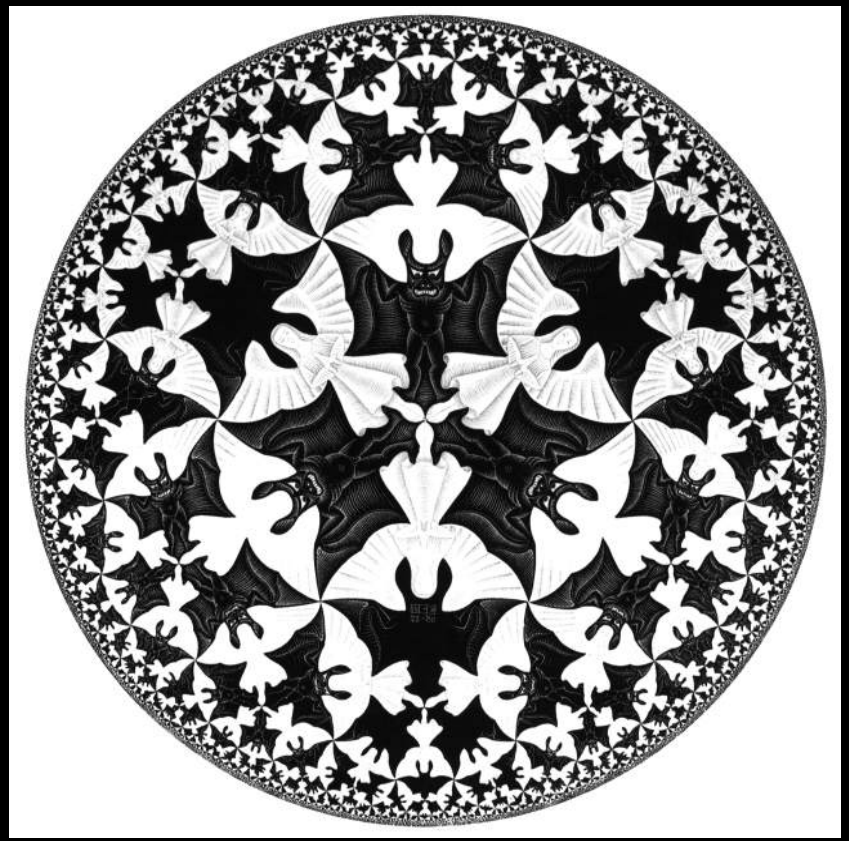
Niels Bohr

*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)



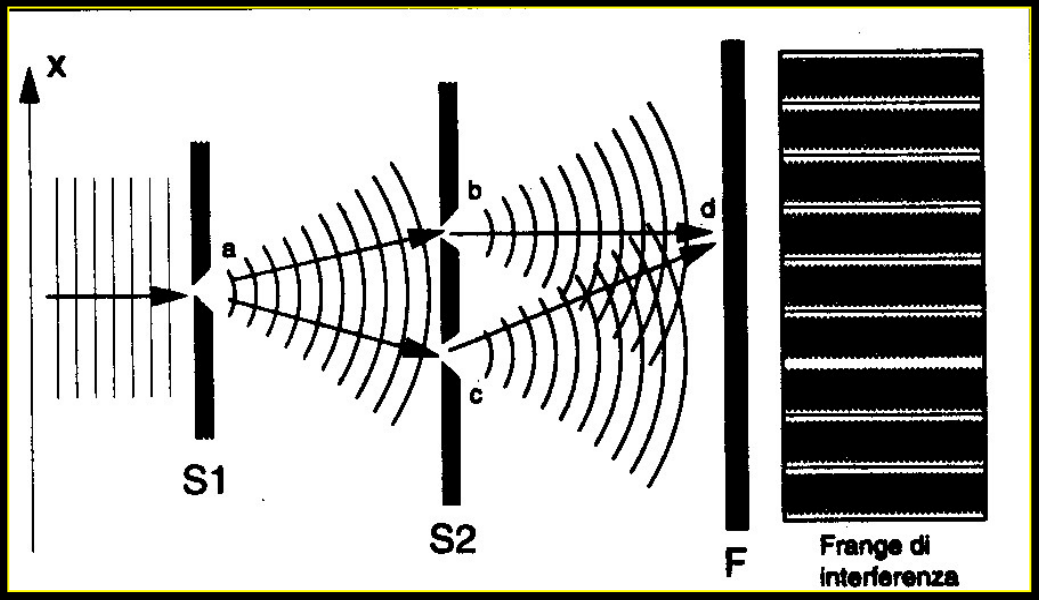
ambiguità



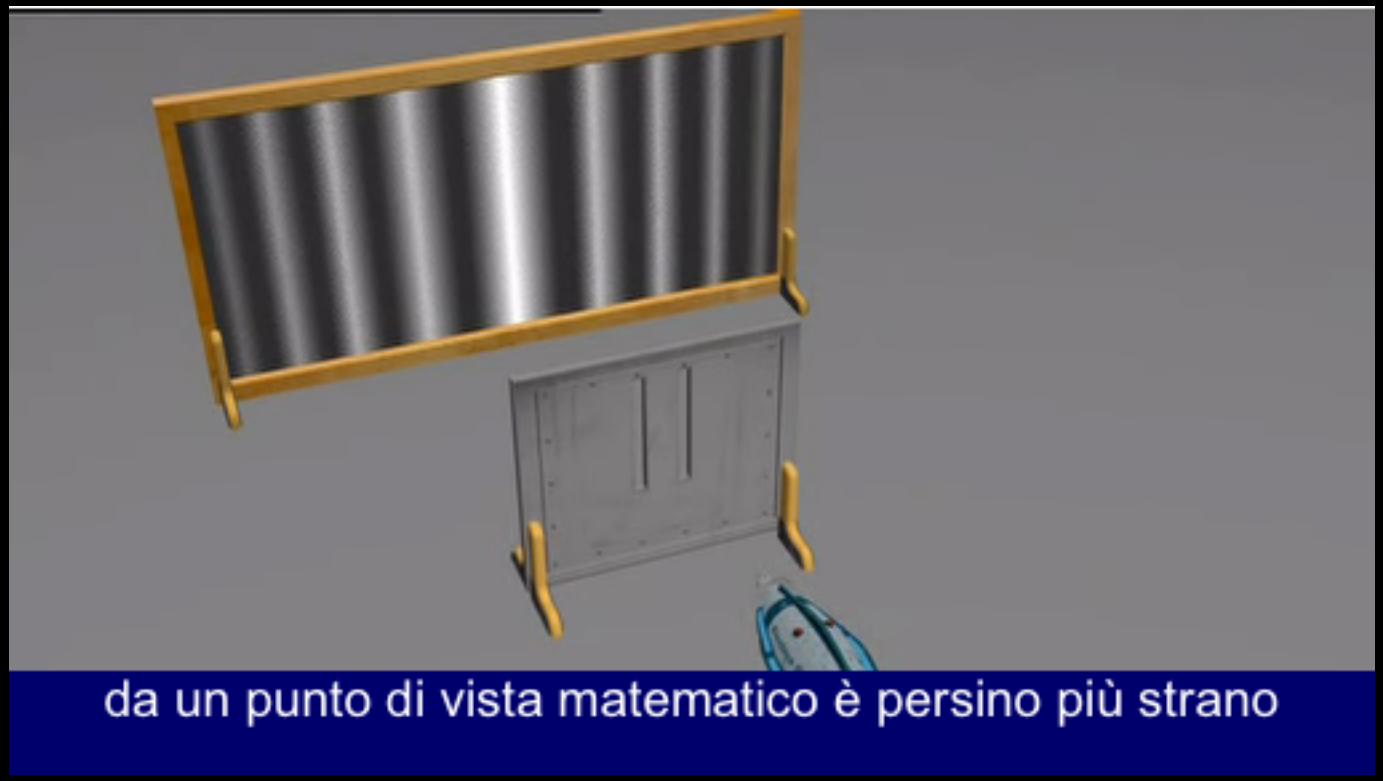
Contraria sunt complementa.

L’estensione della fenomenologia:

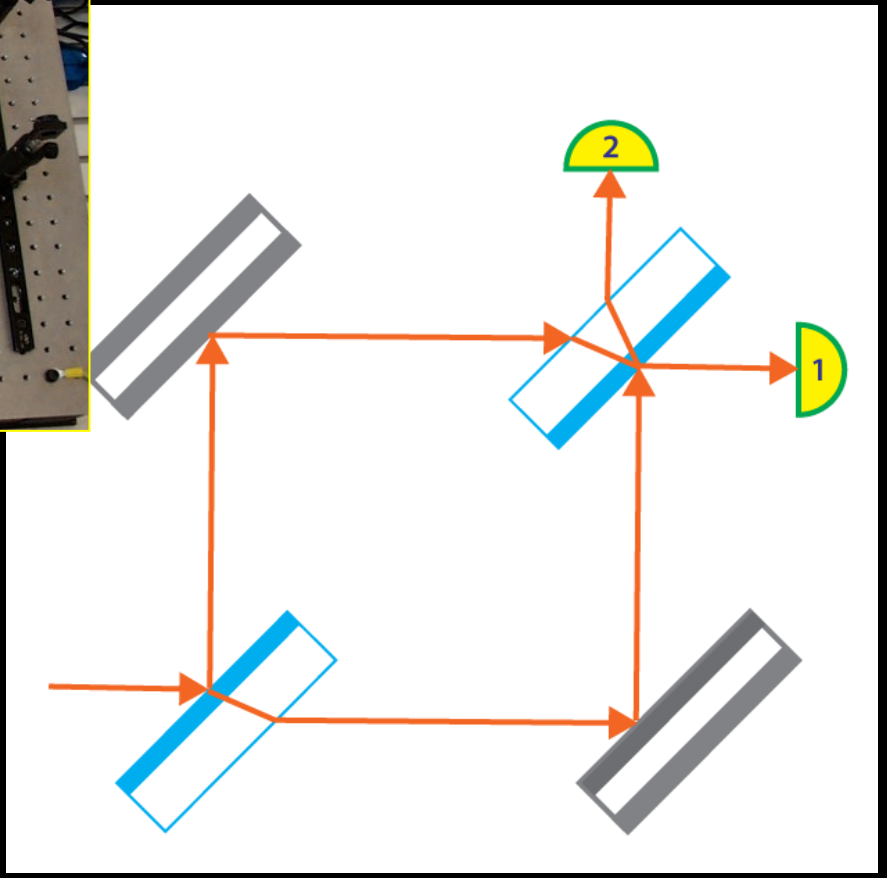
1. ESPERIMENTI WHICH-PATH (o which-way)



Dr. Quantum



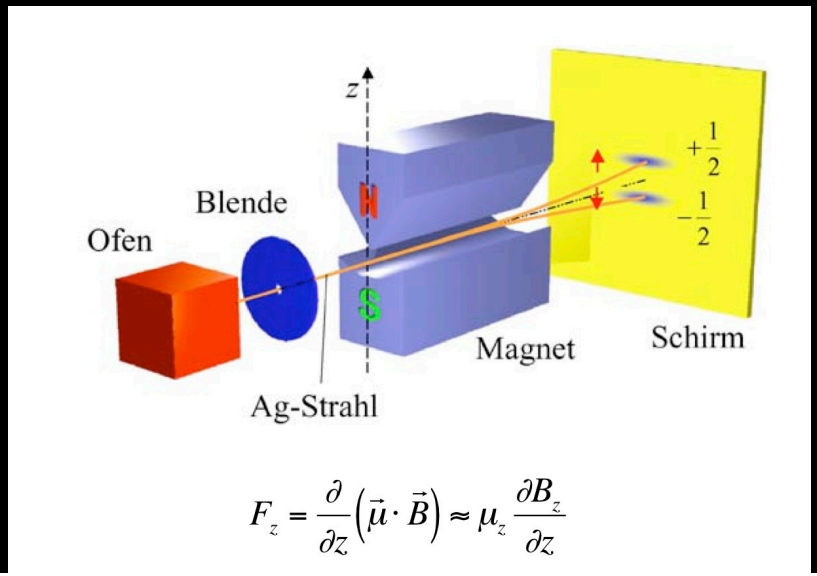
Analizzando la struttura concettuale di esperimenti con fotoni…



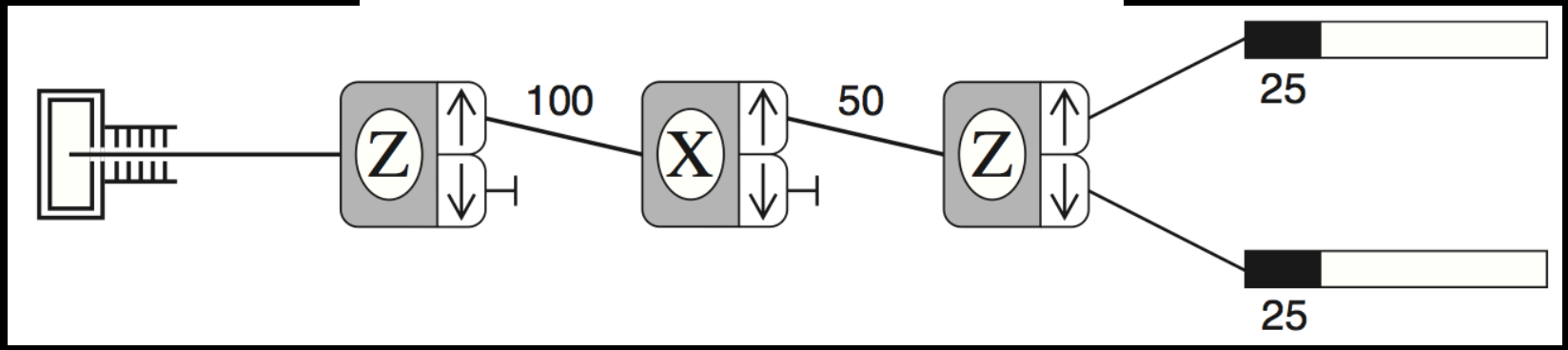
…analizzerete questo fenomeno "GENUINAMENTE QUANTISTICO" e inizierete a costruire nuovi concetti (stato, sovrapposizione, ampiezza di probabilità…) per poterlo interpretare.

L’estensione della fenomenologia:

2. ESPERIMENTI STERN E GERLACH con atomi d’argento



$$F_z = \frac{\partial}{\partial z}\left(\vec{\mu}\cdot\vec{B}\right) \approx \mu_z \frac{\partial B_z}{\partial z}$$



PROLOGO: I calzini di Erwin*

“Erwin aveva una collezione di calzini molto semplice – bianchi o neri, per andare a scuola o per giocare a pallone, corti o lunghi a seconda che li portasse coi pantaloni o con pantaloncini.
Erwin teneva i calzini in due cassetti. In uno teneva i calzini bianchi e nell’altro quelli neri. Riteneva di poter capire se erano lunghi e corti semplicemente toccandoli.
Sfortunatamente questo modo di organizzare i calzini non funzionava. Ogni volta che dal cassetto “dei calzini bianchi”, estraeva due calze lunghe o due calze corte, c’era una probabilità del 50% che ognuno dei due fosse nero o bianco. I risultati dal cassetto “nero” erano gli stessi. I calzini sembravano aver dimenticato la proprietà che Erwin aveva determinato precedentemente di essere bianchi o neri.
Erwin quindi decise di organizzare i calzini nei cassetti a seconda della lunghezza. C’era in cassetto dei calzini lunghi e quello dei calzini corti.
Quando però da uno dei due cassetti andava a prendere due calze bianche o due calze nere, la probabilità che ognuna di esse fosse lunga o corta era del 50%. Avevano “dimenticato” la proprietà di essere lunghi o corti.”

***liberamente tratto da McIntyre, Manogue, Tate “Paradigms in Physics: Quantum Mechanics”, Oregon State University**

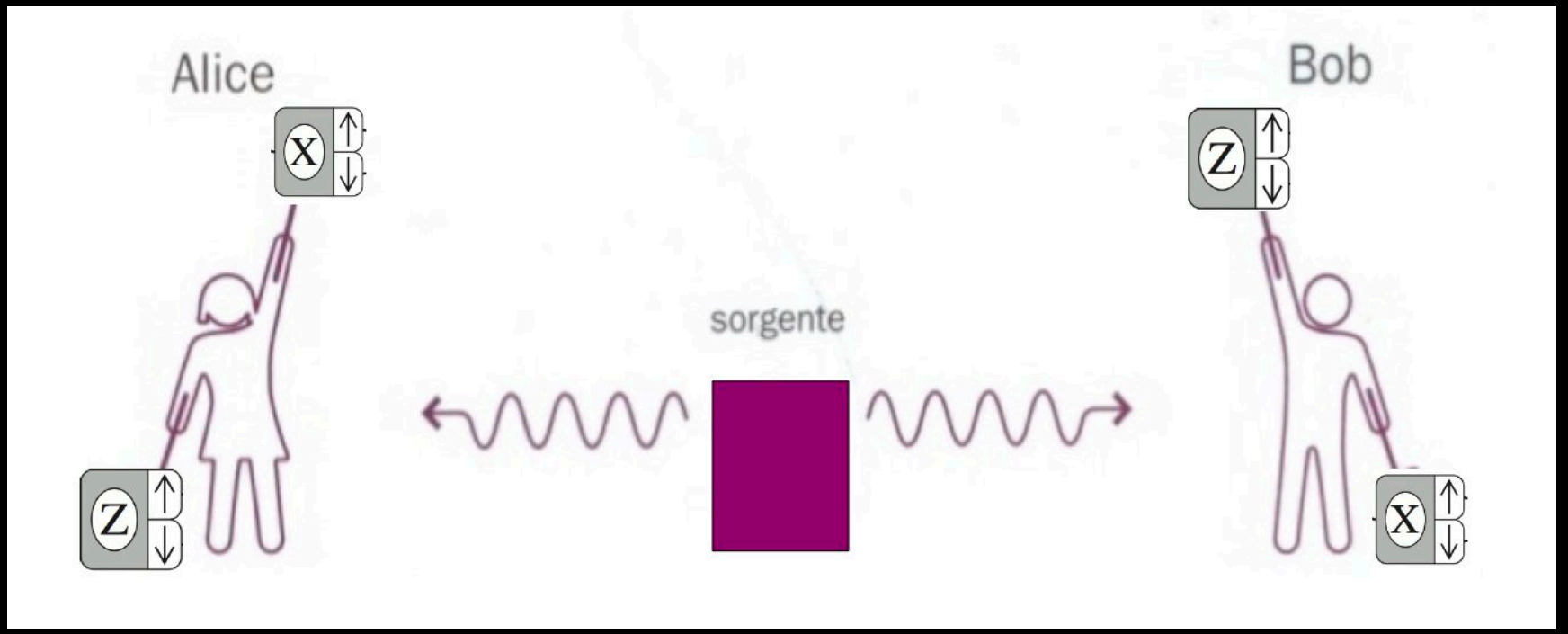
Consegna per riflettere sul filo 2:
ANALISI DEL RACCONTO SUI CALZINI DI ERWIN

Come rappresentereste la logica e la struttura del ragionamento che sta dietro al racconto?

Consegna per la fine del corso: Provate a scrivere un racconto, un fumetto, a fare un video in cui si racconti una storia che abbia la stessa logica e dia lo stesso messaggio del racconto dei calzini, ma senza parlare di calzini.

L’estensione della fenomenologia:

3. APPLICAZIONI DELLA FISICA QUANTISTICA (crittografia, teletrasporto e quantum computing)



Il concetto di ENTANGLEMENT…