

Il linguaggio della ricerca



Area della
Ricerca di
Bologna

Progetto di Divulgazione Scientifica
promosso dal **Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)**
e dell'**Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF)**

www.bo.cnr.it/linguaggiodellaricerca/

OBIETTIVO del progetto LdR

Creazione di un **PRODOTTO INFORMATIVO SULL' ARGOMENTO** approfondito in questo incontro

in 2 lingue
Inglese-italiano

**PRESENTAZIONE
del Ricercatore**

Approccio
pubblicitario

**DEPLIANT o ALTRO
che illustra l'argomento
trattato**

Come realizzarlo? Usare un linguaggio semplice, ma scientificamente corretto, immagini, colori, disegni, titoli simpatici, etc...

CONCORSO



Fumetti

Articolo giornalistico
divulgativo

DEPLIANT

Siti web

Tipologie di prodotti

Filmati

Articolo
giornalistico
“specialistico”

Giornale

Poster

l'esperimento più bello della fisica

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

**Un'esperimento che ha rivoluzionato l'immagine intuitiva
della realtà fisica**

Giorgio Lulli

CNR – Istituto per la Microelettronica e i Microsistemi
Area della Ricerca CNR-INAF Bologna

settembre 2003

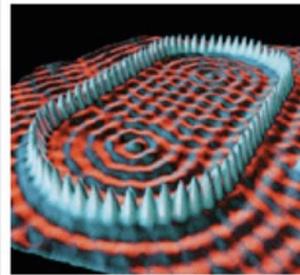
The most beautiful experiment...

May 2, 2002

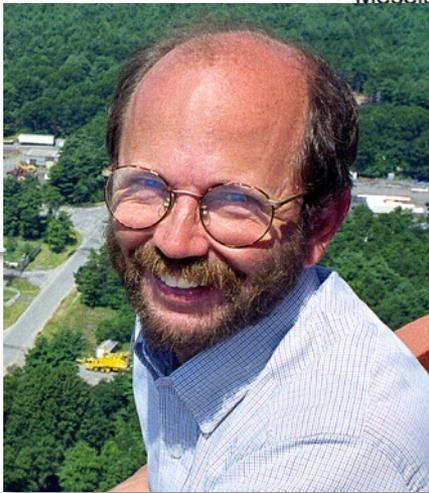
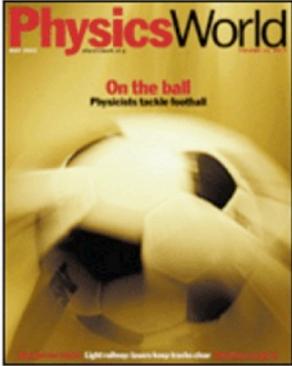
maggio 2003

What is the most beautiful experiment in physics? Robert P. Crease invites your suggestions.

In his new book *Meselson, Stahl, and the Replication of DNA*, science historian Frederic Holmes recounts the story of what one researcher called "the most beautiful experiment in biology". The so-called Meselson-Stahl experiment, which was carried out in 1957, confirmed that DNA replicates in the way predicted by the then recently discovered double-helix structure. When Holmes asked five researchers why this particular experiment was so beautiful, their answers included simplicity, precision, cleanness and strategic elegance.



Small wonder



physicsworld

Top 10 beautiful experiments

The list below shows the top 10 most frequently mentioned experiments by readers of *Physics World*.

- 1 Young's double-slit experiment applied to the interference of single electrons
- 2 Galileo's experiment on falling bodies (1600s)
- 3 Millikan's oil-drop experiment (1910s)
- 4 Newton's decomposition of sunlight with a prism (1665-1666)
- 5 Young's light-interference experiment (1801)
- 6 Cavendish's torsion-bar experiment (1798)
- 7 Eratosthenes' measurement of the Earth's circumference (3rd century BC)
- 8 Galileo's experiments with rolling balls down inclined planes (1600s)
- 9 Rutherford's discovery of the nucleus (1911)
- 10 Foucault's pendulum (1851)

Others experiments that were cited included:

- Archimedes' experiment on hydrostatics
- Roemer's observations of the speed of light
- Joule's paddle-wheel heat experiments
- Reynolds's pipe flow experiment
- Mach & Salcher's acoustic shock wave
- Michelson-Morley measurement of the



Giulio Pozzi

Pier Giorgio Merli

Gian Franco Missiroli



interferenza di elettroni (1976)



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

CRONACA

Sei "New York Times" la graduatoria di un pool di fisici: al primo posto l'esperimento sulla doppia natura della luce, l'aut



Il genio creativo della scienza ecco le dieci scoperte più belle



Il Resto del Carlino

BOLOGNA / Oscar della fisica a tre scienziati Più bravi di Newton

Un loro esperimento del 1974 è stato giudicato il più bello della storia

SCIENTIA / Premiati con l'oscar per il miglior esperimento realizzato nella storia della fisica Tre bolognesi battono Galileo



Libero / SCIENZA

L'opera realizzata a Bologna Scienziati italiani primi in una gara mondiale

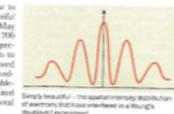
Un film sul Mistero dei misteri della fisica quantistica è il più votato da migliaia di docenti universitari

ANNALETTA BIANCHI
SCIENTIA
Nel 1974 Giorgio Merli, Gianfranco Missiroli e Giulio Pozzi, ricercatori del Laboratorio di Microscopia elettronica dell'università di Bologna, decisero di fare un esperimento che rendeva visibile qualcosa che la fisica più avanzata era venuta ormai a quasi dimenticare: il dualismo onda-particella. Già che lo parlavano a livello internazionale, come di elettroni per esempio, si comportano anche come onde e non solo come corpuscoli. È un concetto chiave della meccanica quantistica, e la base di tutti i risultati di quella disciplina. Per questo bisognerebbe riuscire almeno a osservare il comportamento di un singolo elettrone. Il vedere ciò che, in teoria, già si sa: l'elettrone si comporta in parte come un corpuscolo, in parte come un'onda. Sa che gli elettroni hanno, cioè, il loro lato. Ma sempre in gruppo, mai presi singolarmente. È lo studio di microscopia elettronica di successo, utilizzando un microscopio elettronico.

The most beautiful experiment

The most beautiful experiment in physics, according to a poll of Physics World readers, is the interference of single electrons in a Young's double slit. Robert P Crease reports

When I asked readers earlier this year to submit candidates for the "most beautiful experiment in physics" (Physics World May 2002), I was pleased to receive more than 300 replies. The responses covered a broad spectrum, ranging from actual experiments to thought experiments, and from proposed experiments in space, bioinspired and analog. However, one experiment - the double-slit experiment with electrons - was cited more often than any other, receiving a total of 23 votes.



La battaglia dell'elettrone

I tre scienziati Merli, Missiroli e Pozzi vedono ora riconosciuto il loro studio

L'INTERVISTA
L'oscar della fisica
"Il perenne fascino di semplicità e chiarezza"

Fisica, è di tre bolognesi l'esperimento più bello della ricerca

L'esperimento da Oscar di tre fisici bolognesi

TRE FISICI BESTIALI

Non l'ha fatto Galileo, né Newton o Young. L'esperimento più bello della storia di questa disciplina è frutto di un piccolo, finora anonimo, team bolognese. Che, nel 1974, rivelò la natura della luce. A decretarlo trent'anni dopo, osserva Armando Massaretti, è stata l'autorevole rivista «Physics World»

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*. Nel secolo scorso come esperimento "ideale" 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/>

l'esperimento più bello della fisica

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

Sommario

- **un po' di storia**
- **come funziona l'esperimento "mentale"**
- **dall'idea alla realizzazione pratica**
- **interpretazione**

all'inizio fu la ...

luce ?

corpuscoli

1675



onda

1690





1665

F. Grimaldi

.. da Bologna

PROPOSITIO I.

9

fracum reflit ad latera, & format lucidos illos tractus.

Sed neq; hoc sustineri potest, tum quia modica illa perspicuitas etiamsi concedatur, non est tamen dicenda æqualis in omnibus opacis, aut semiopacis, quæ in prædicto cono lucido inferuntur, & quæ omnia ex æquo efficiunt, seu determinant luminosos tractus iam dictos, qui, ut expositum fuit, sunt semper eiusdem magnitudinis, habentq; eandem intervalloꝝ mensuram, siue magis, siue minus perspicuum sit corpus illud imperfectè opacum, quod inferitur in cono lucido: tum quia refraçtio ad vnã tantummodo partem fieri potest, at lumen lucidas illas series formans fleçitur ad vtramque partem post opacum insertum cono, easq; pingit, tam supra lucidam basem, quam supra vmbra à prædicto opaco, vel semiopaco proiectam. Ergo lumen illud non est refraçtum.

Hactenus probata fuit Propositio per ea, quæ obseruata sunt circa series luminis principales, propè vmbra apparentes.

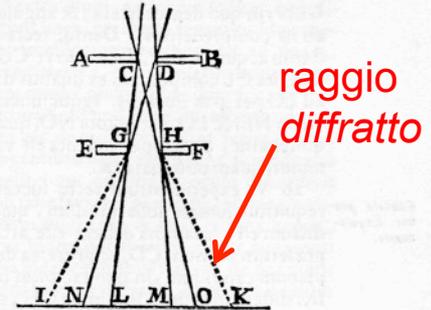
Lucidi tractus super vmbra capientes, ne ipsi quidem sunt à lumine Directo, neq; à Refraçto, vel Reflexo.

24. Probatum iam eadem Secunda Pars Propositionis similiter ex obseruatis circa lucidas series secundi generis, quæ scilicet super ipsa vmbra conspicuæ sunt modo, iam supra exposito à num. 14. Quia nimirum ne illæ quidem fieri possunt à lumine Directo, neq; à Refraçto, neq; à Reflexo, easdem prorsus ob causas, quæ pro primi generis seriebus allatæ fuerunt, vt consideranti statim patebit. Quin immò longitius abest, vt illæ dicantur pingi à lumine Directo, quia inter ipsas, & foramen luminis peritum intercedit in linea recta opacum illud, quod proicit vmbra, & consequenter non potest ex foramine illo dirigi radius ad eas in vmbra formandas. Non apparet præterea vllum corpus, quod vel reflectat versùs vmbra prædictam lumen illud, quo series illæ pinguntur. Ergo nullo ex dictis tribus modis propagationis lumen ad eas propagatur à foramine, quàmuis certum sit, eas de factò super vmbra formatas esse vi luminis per prædictum foramen ingredientis. Deniq; licet earum lumen sit valde remissum præ illo, quod efficit exteriores, ac præcipuas series lucidas; non tamen hinc fit vt earum lu-

men sit refraçtum, aut per aliquam reflexionem debilitatum: Sed remissio illa dicenda est aliunde oriri, vt postea explicabitur.

Experimentum secundum.

25. Aperto in fenestra lignea cubiculi bene obscurati foramine ferè digitalis crassitie, applicetur ei lamina opaca subtilis AB, per cuius foraminulũ arctissimum CD Solis lumen admittitur formabit se in conum: hic verò in magna distantia post



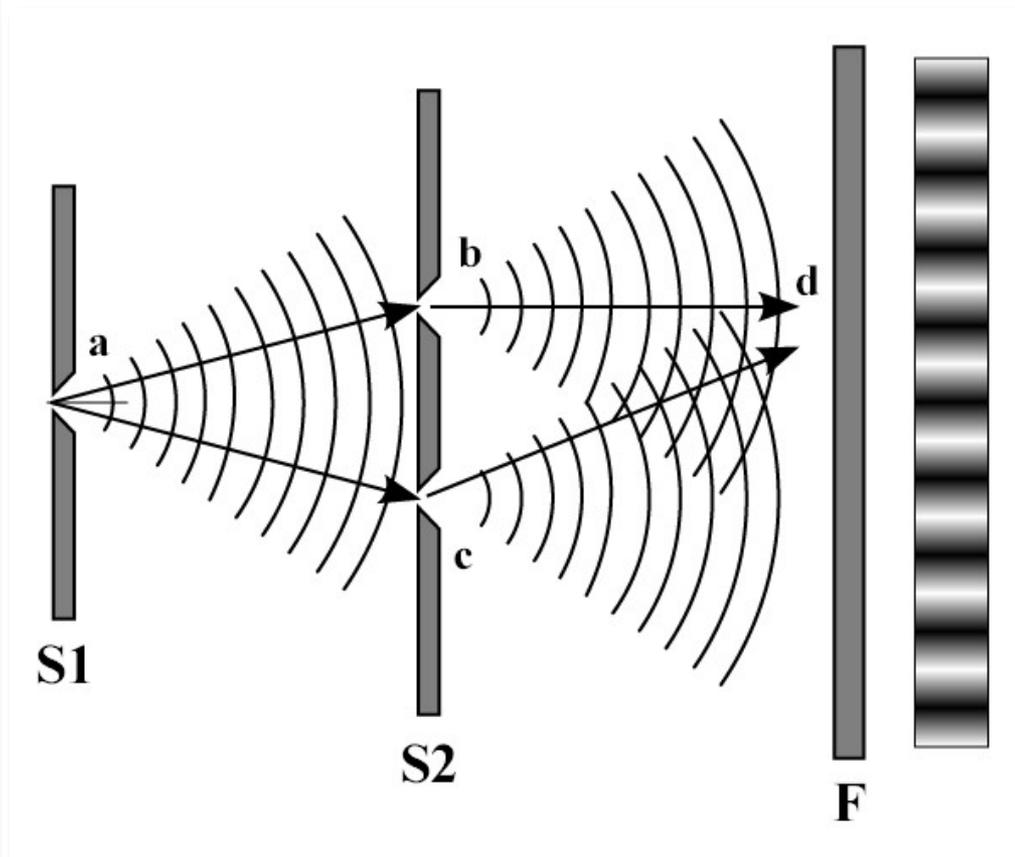
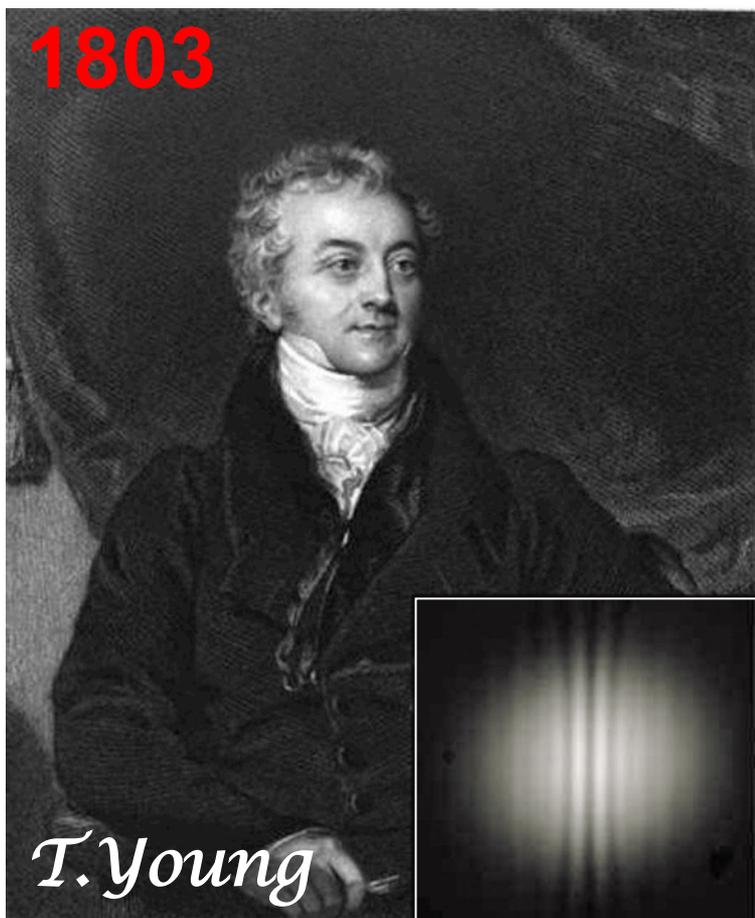
lamina AB ad rectos angulos secetur ab alia lamella EF, habente pariter foramen paruum GH, per quod excipiat aliquid de prædicto luminoso cono secto à lamina EF, utiq; in loco vbi eius basis valde superat amplitudinem foraminis GH, vt ita foramen hoc totum illustretur, seu lumine compleatur. Rursus ergo hoc ipsum lumen, quod ingreditur secundum foramen GH, formabitur, seu procedet formatum in conum, vel quasi conum, qui sectus orthogonaliter, ac terminatus ab aliquo plano mundo, & candido, exhibebit in illo suam basem lucidam IK notabiliter maiorem, quàm ferant radij per vtrumq; foramen rectâ transmissi, & non solum transeunt per extrema foraminum ad easdem partes spectantia, vt sunt radij CGL, & DHM; sed etiam ad partes contrarias, vt sunt radij DGN, & CHO.

Lumen per duo foramina inter se distantia transmissum, conueniens distantiam maiorem quam ferat eius diffusio directa.

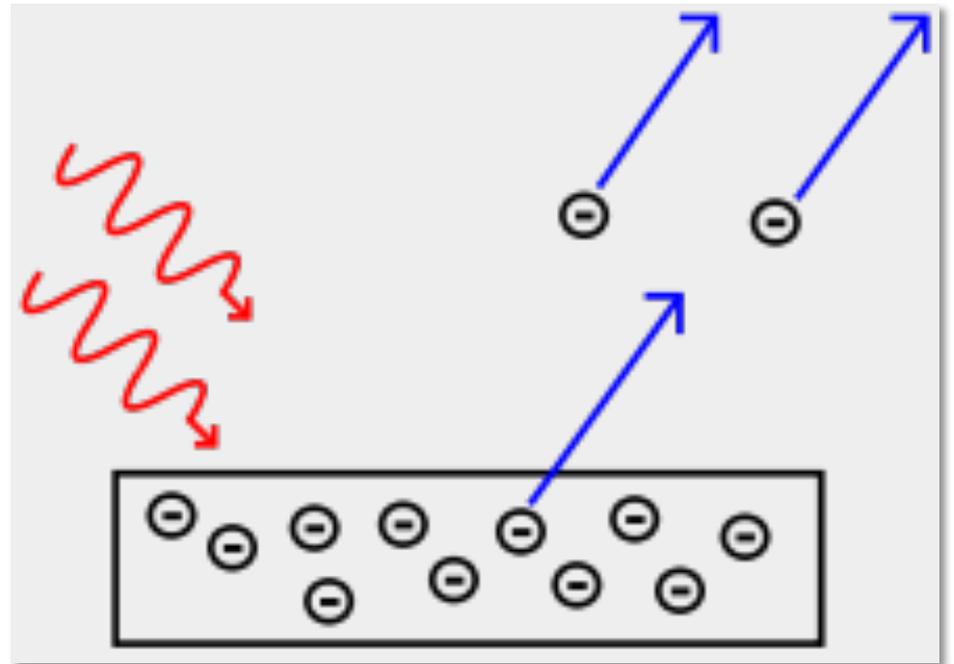
Id verò constitit manifestè repetito sæpius experimento, obseruando nimirum quanta de factò esset basis IK apparentis, & deduc-

Quomodo id certò à præhendatur.

L'esperienza della doppia fenditura di Young



interferenza → **luce = onda**

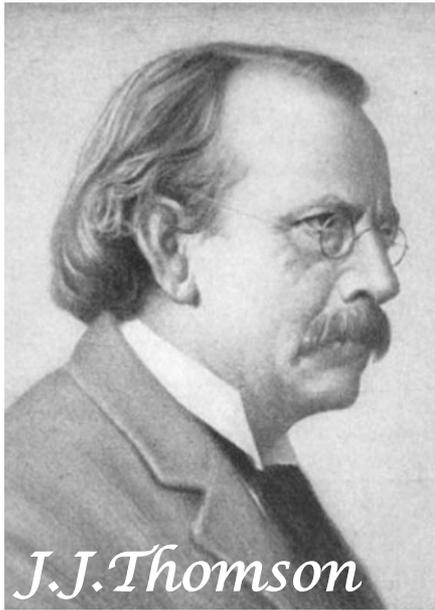


effetto fotoelettrico



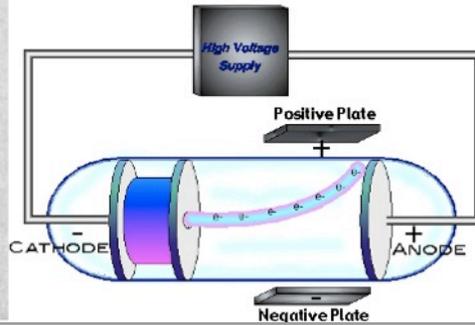
luce = particelle
(*quanti di luce o fotoni*)

elettroni?



1897

corpuscoli



$$\lambda = h/mv$$

onde !

1923

Lunghezza d'onda elettroni (De Broglie)

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

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

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

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

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

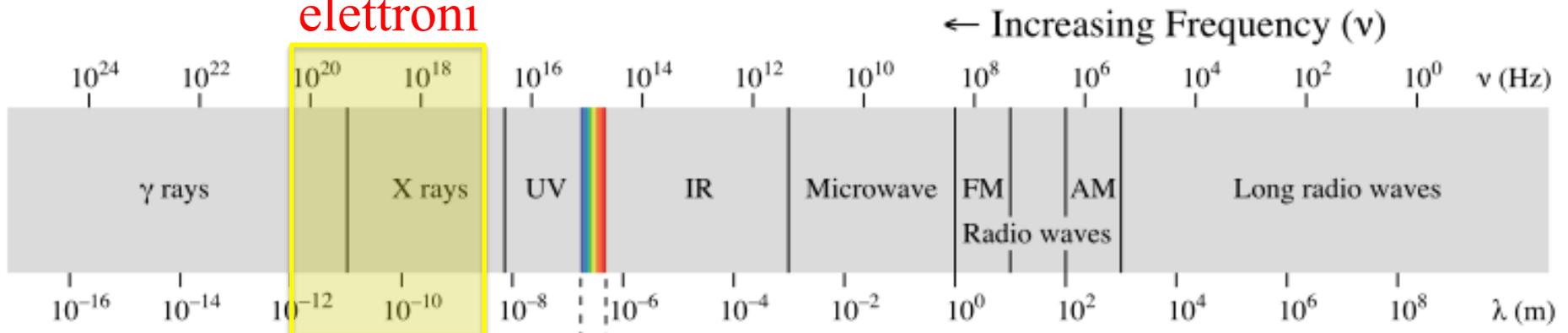
(relativistica)

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

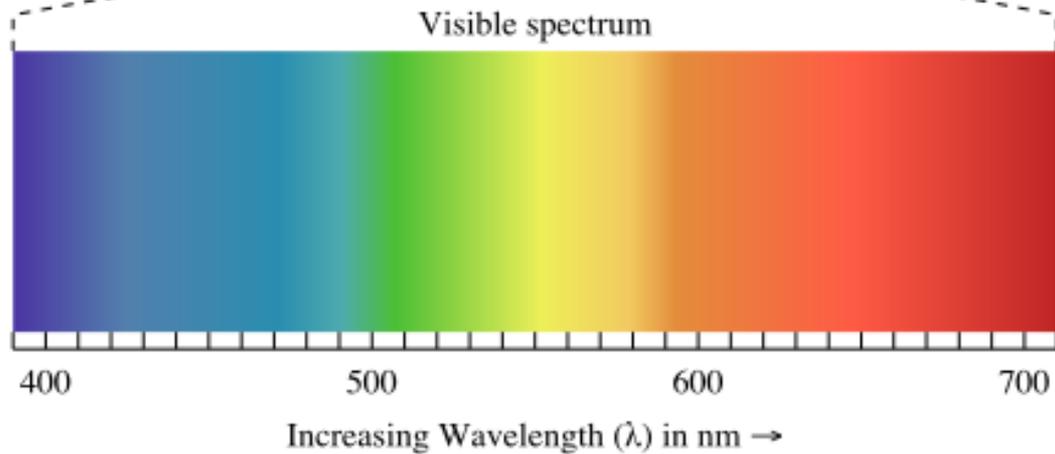
λ (nm) V (volt)

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

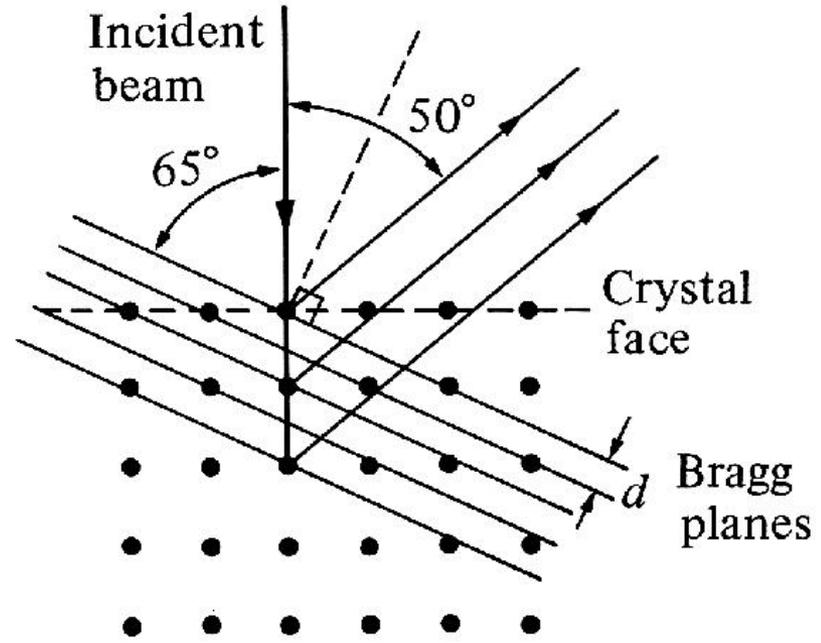
elettroni



Increasing Wavelength (λ) →



diffrazione elettroni



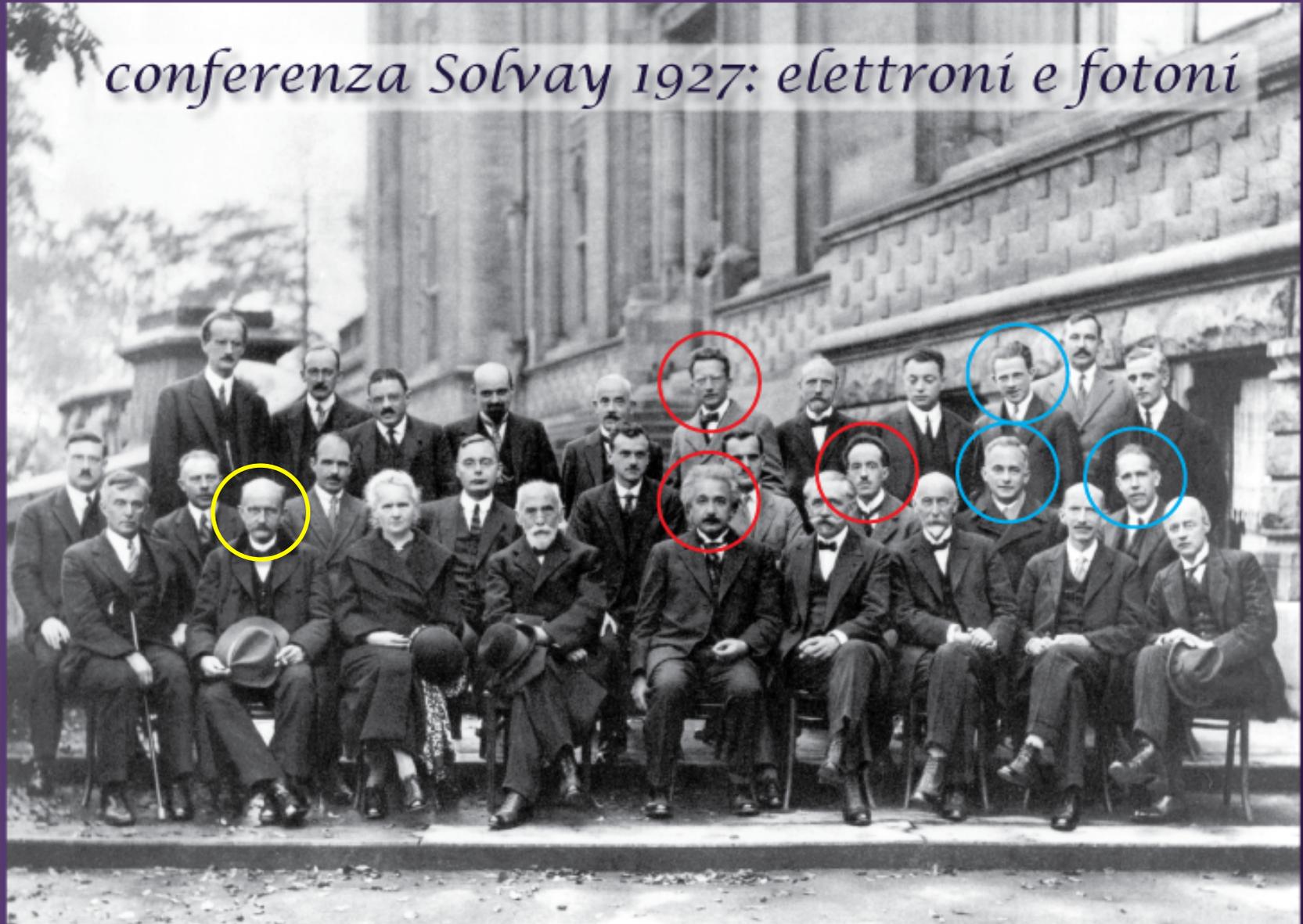
C. Davisson, D. Germer **1927**

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

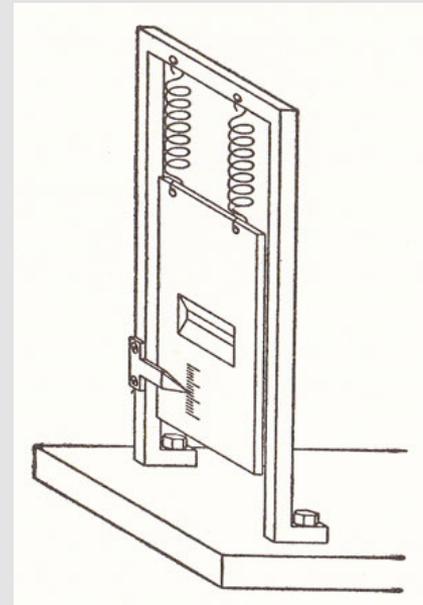
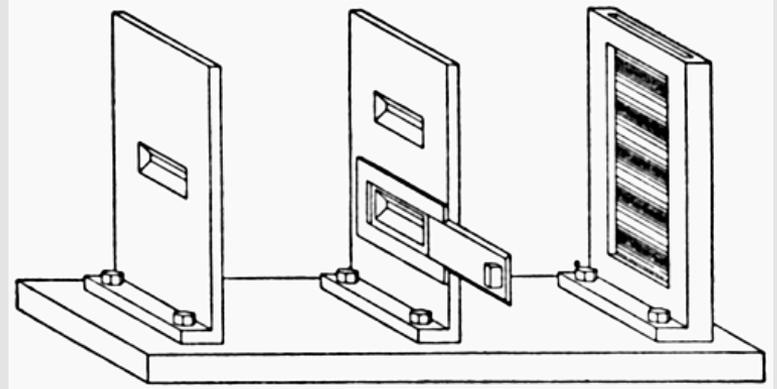
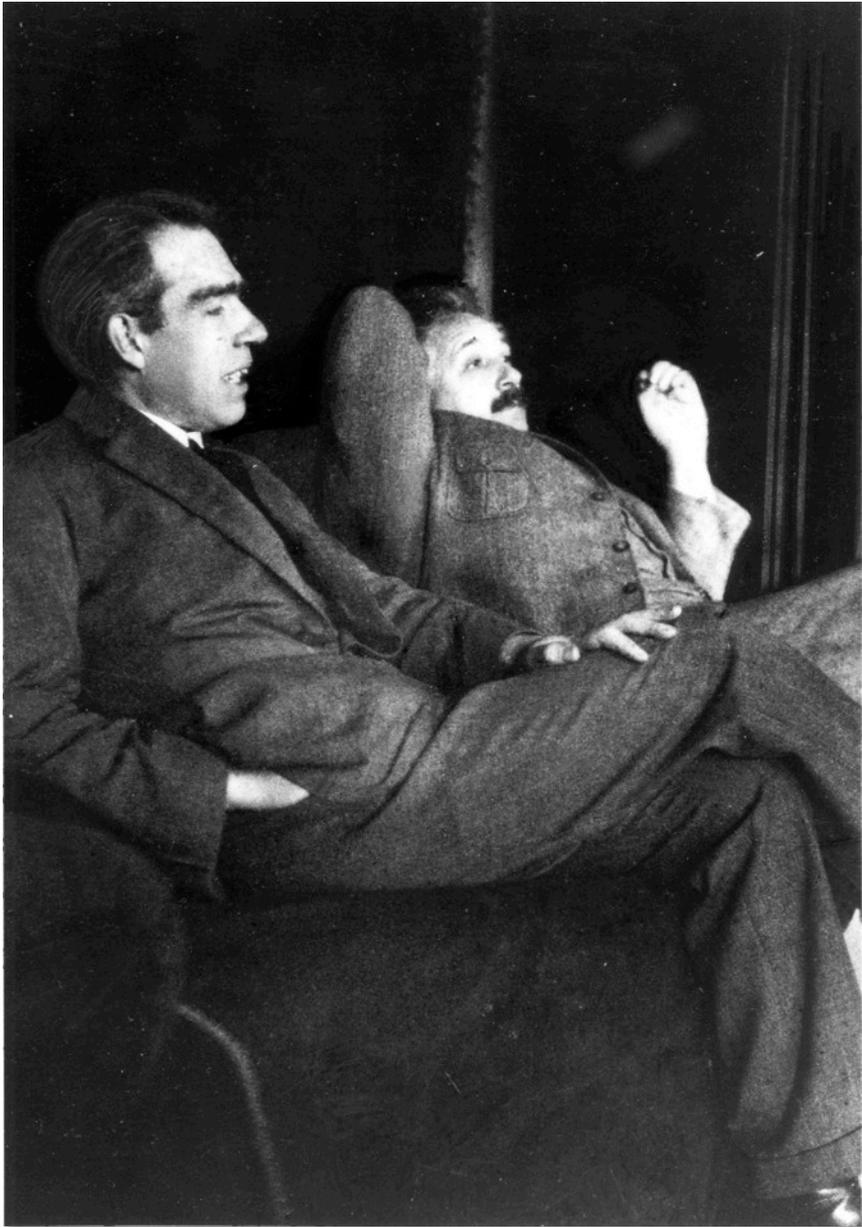
Distanza interplanare Nickel $d=0.091$ nm

Prima prova sperimentale del comportamento ondulatorio degli elettroni

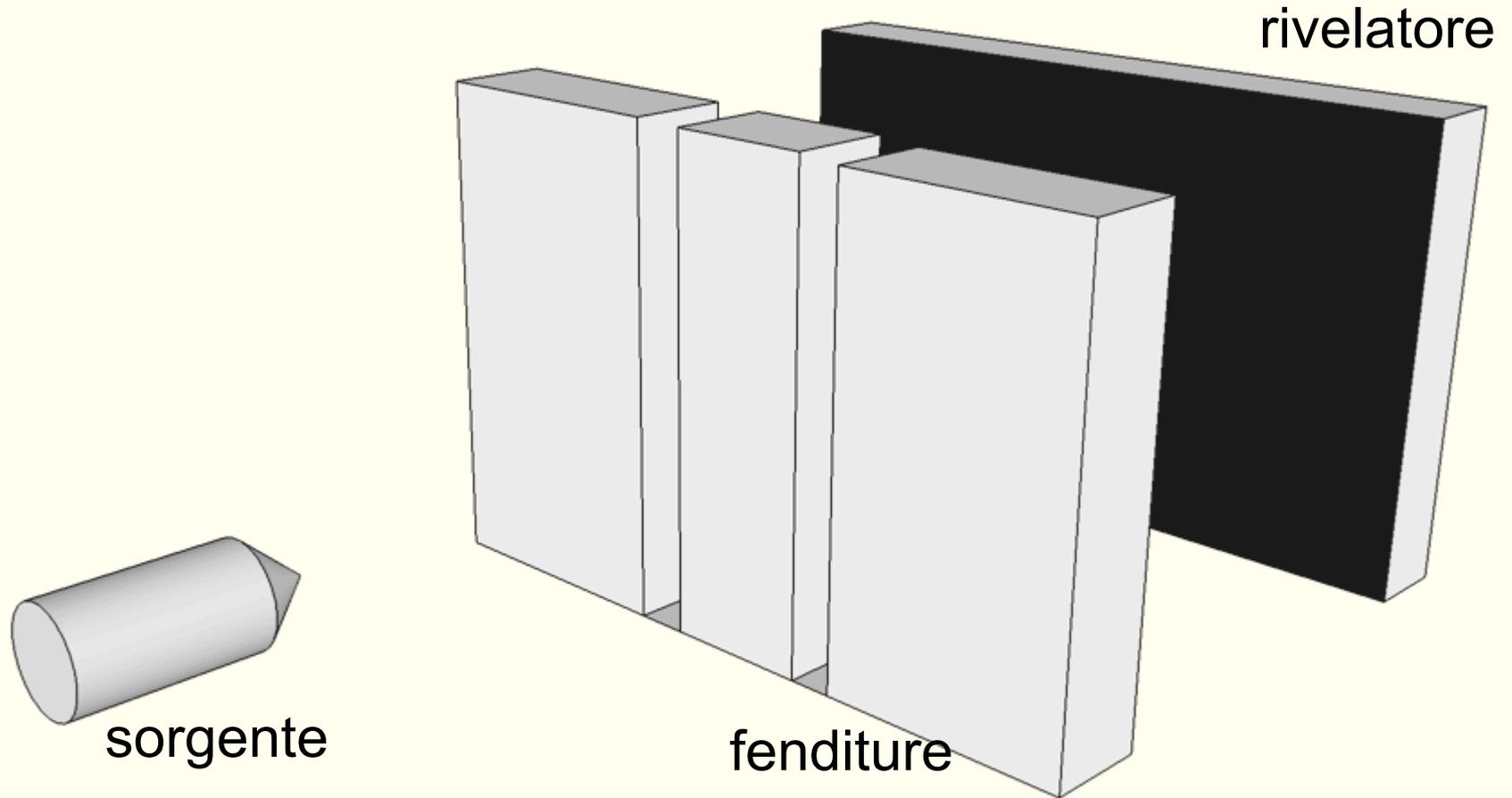
conferenza Solvay 1927: elettroni e fotoni



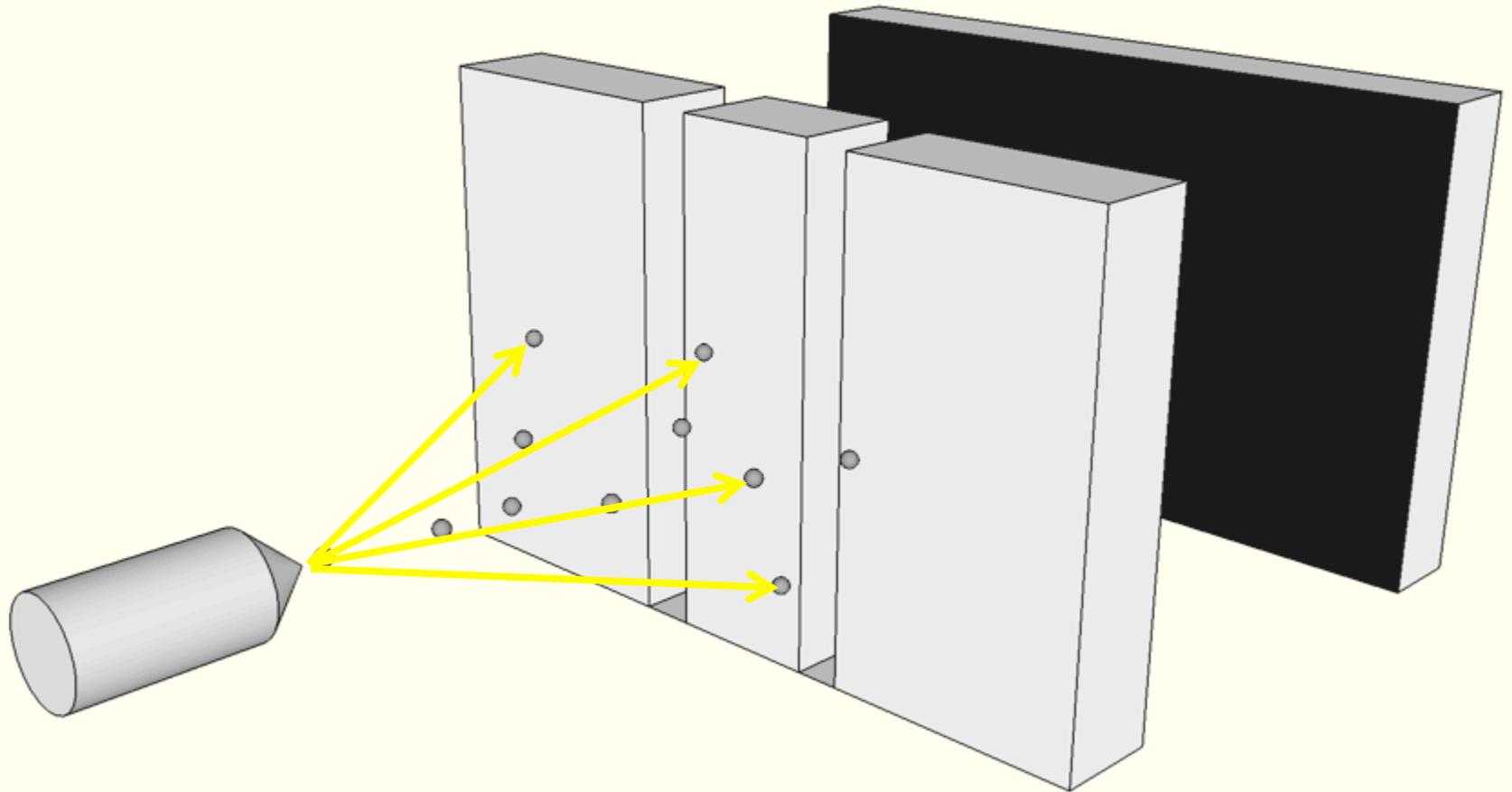
Einstein "inventa" l'esperimento più bello

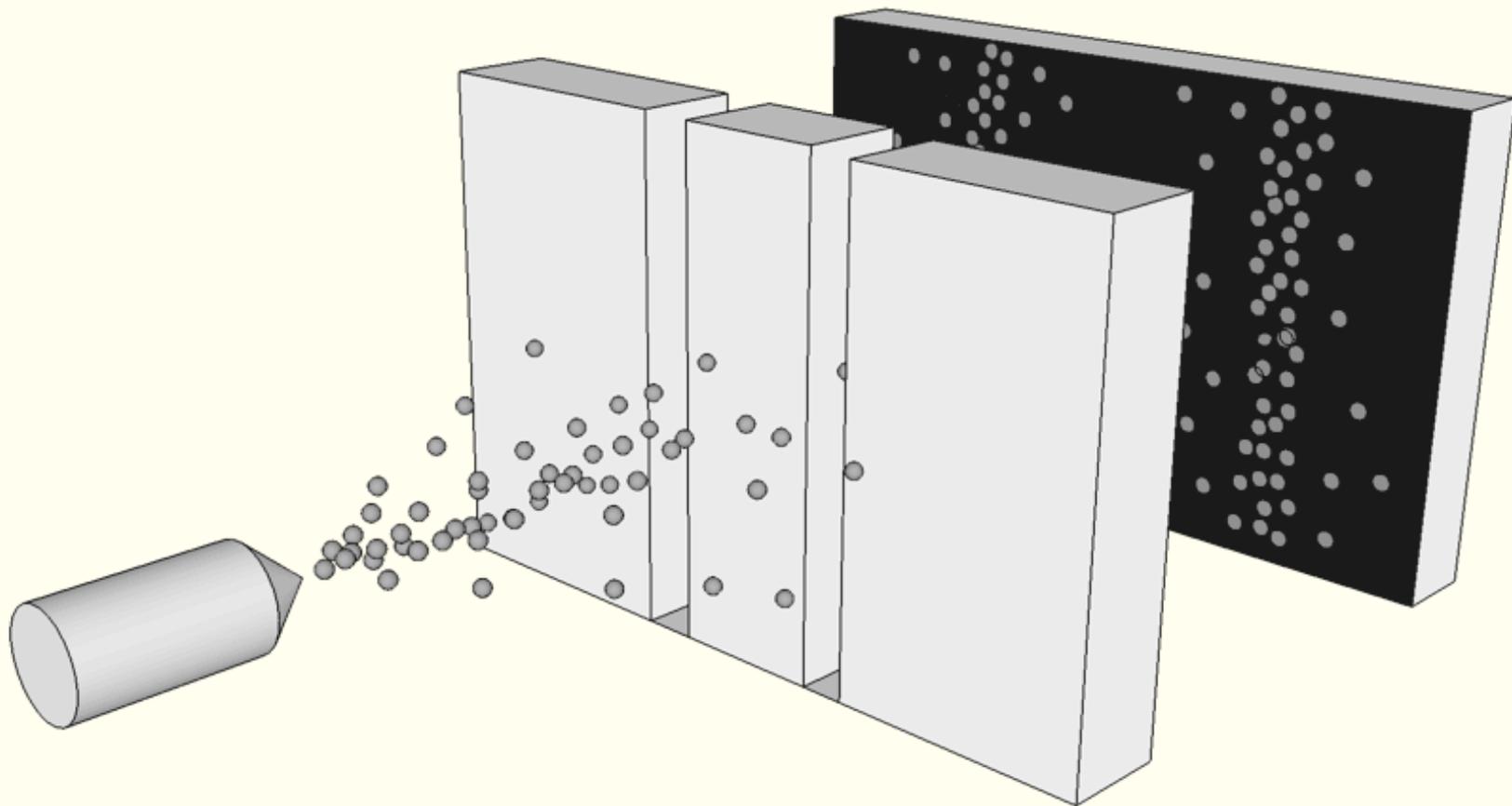


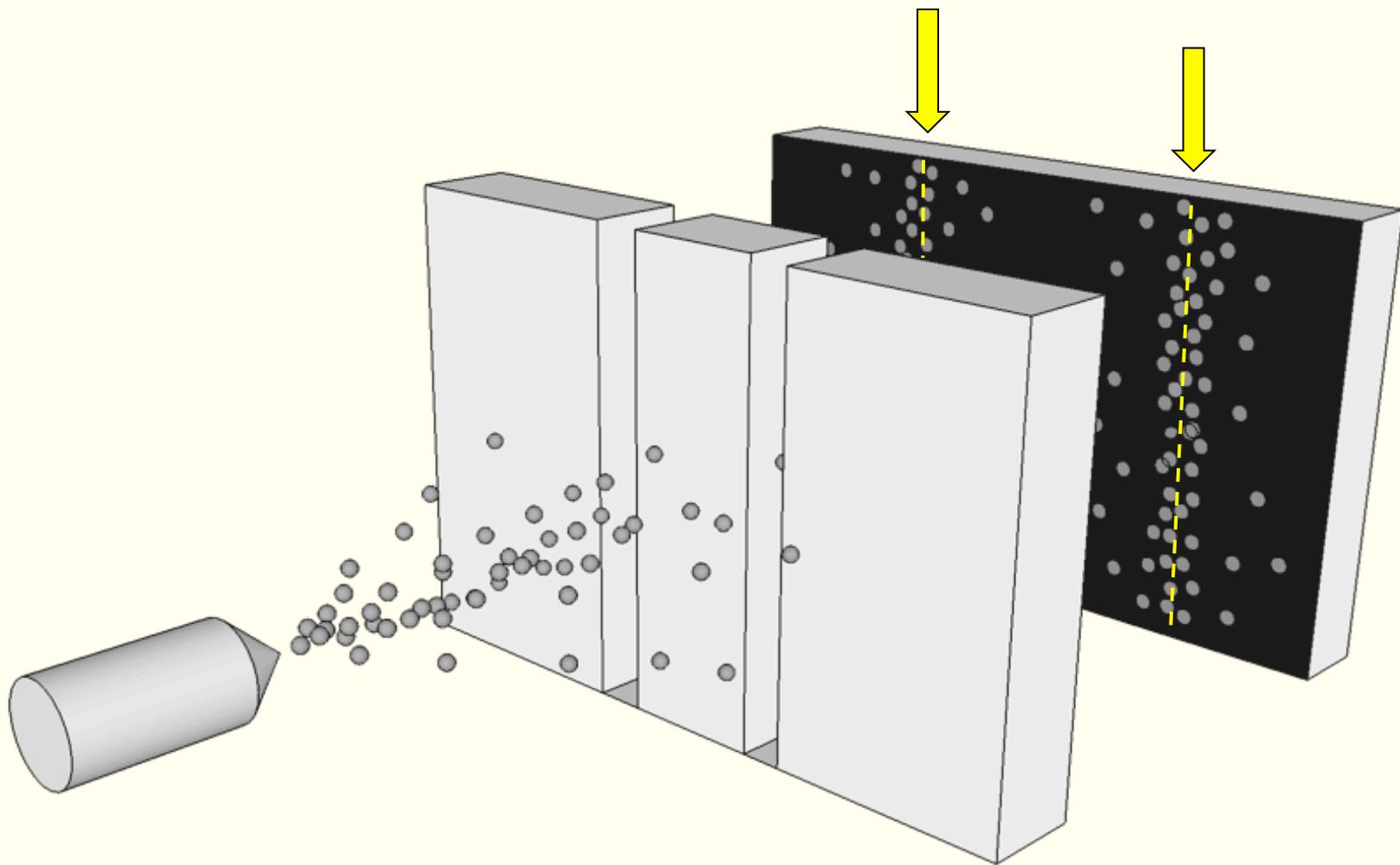
esperimento concettuale – *gedanken* experiment

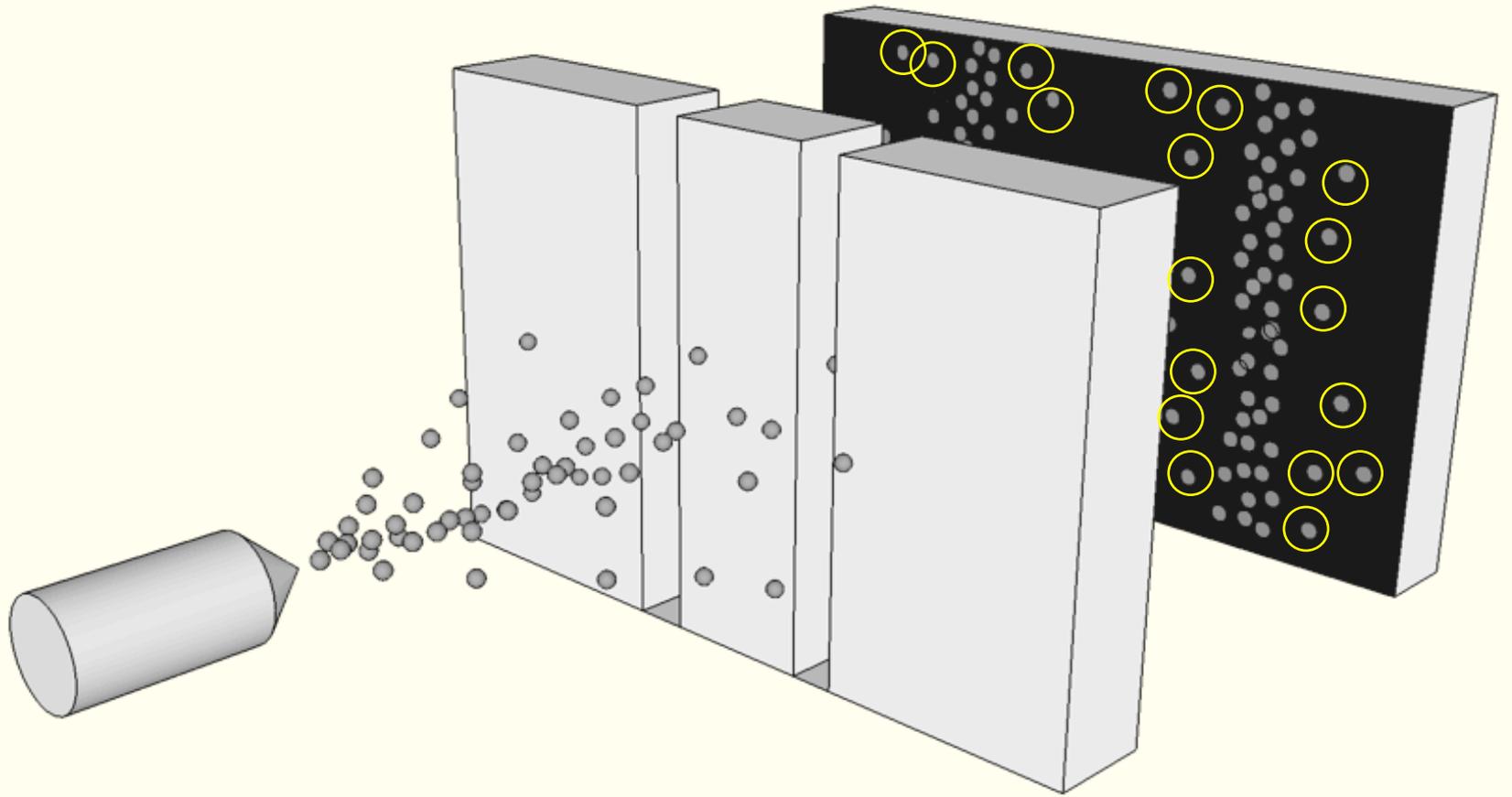


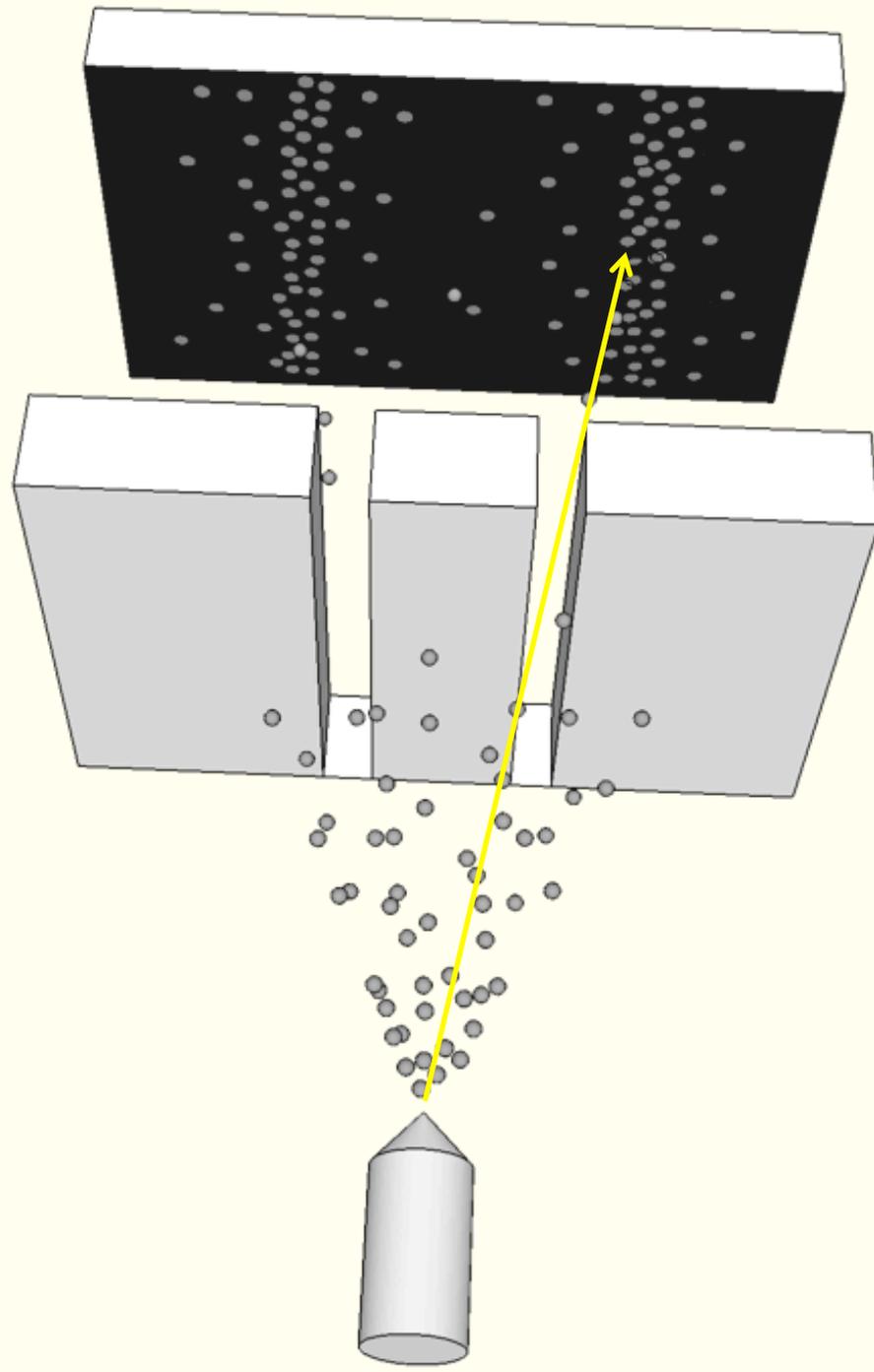
caso 1: proiettili, palline da tennis, ecc ...

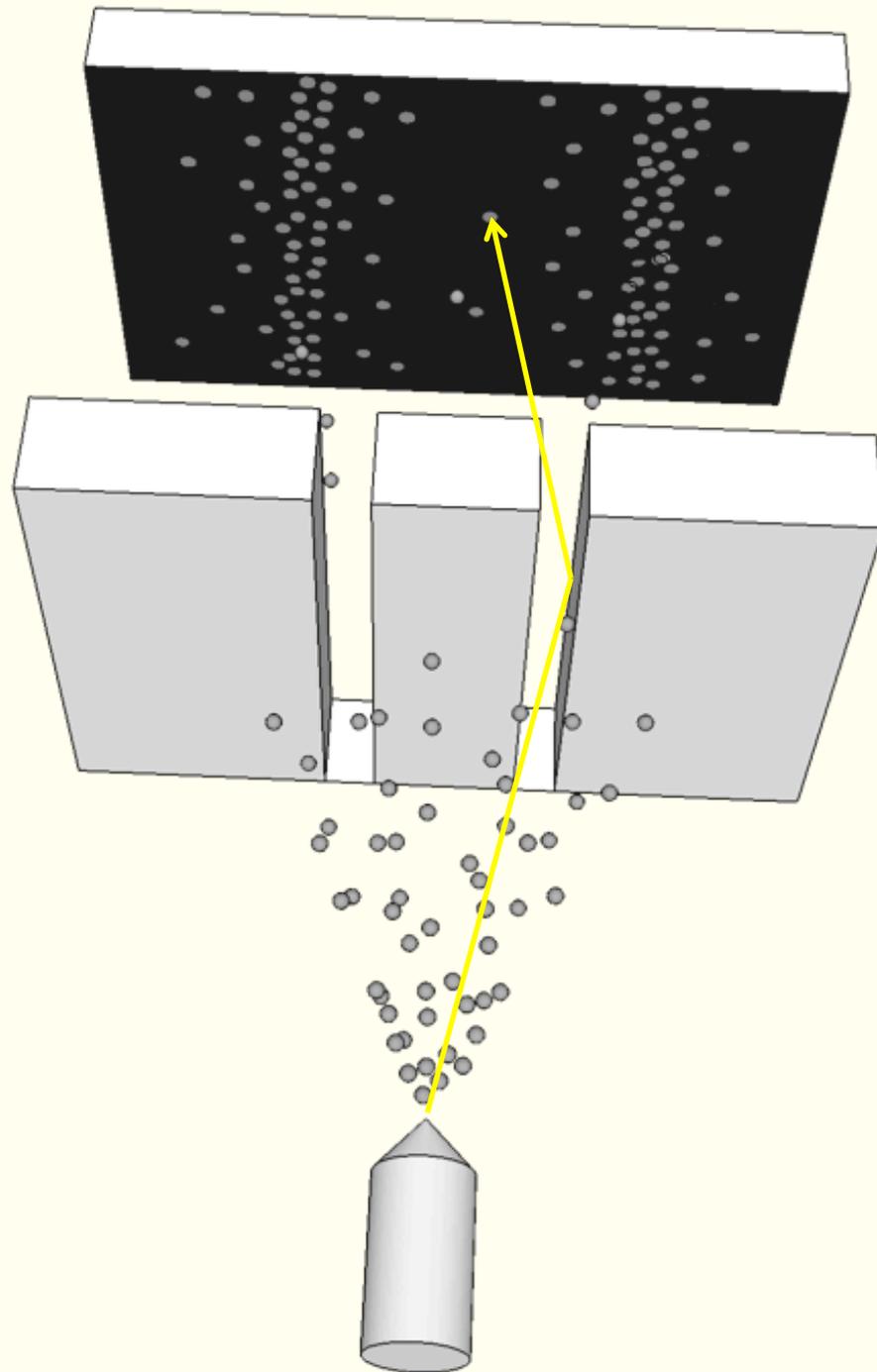




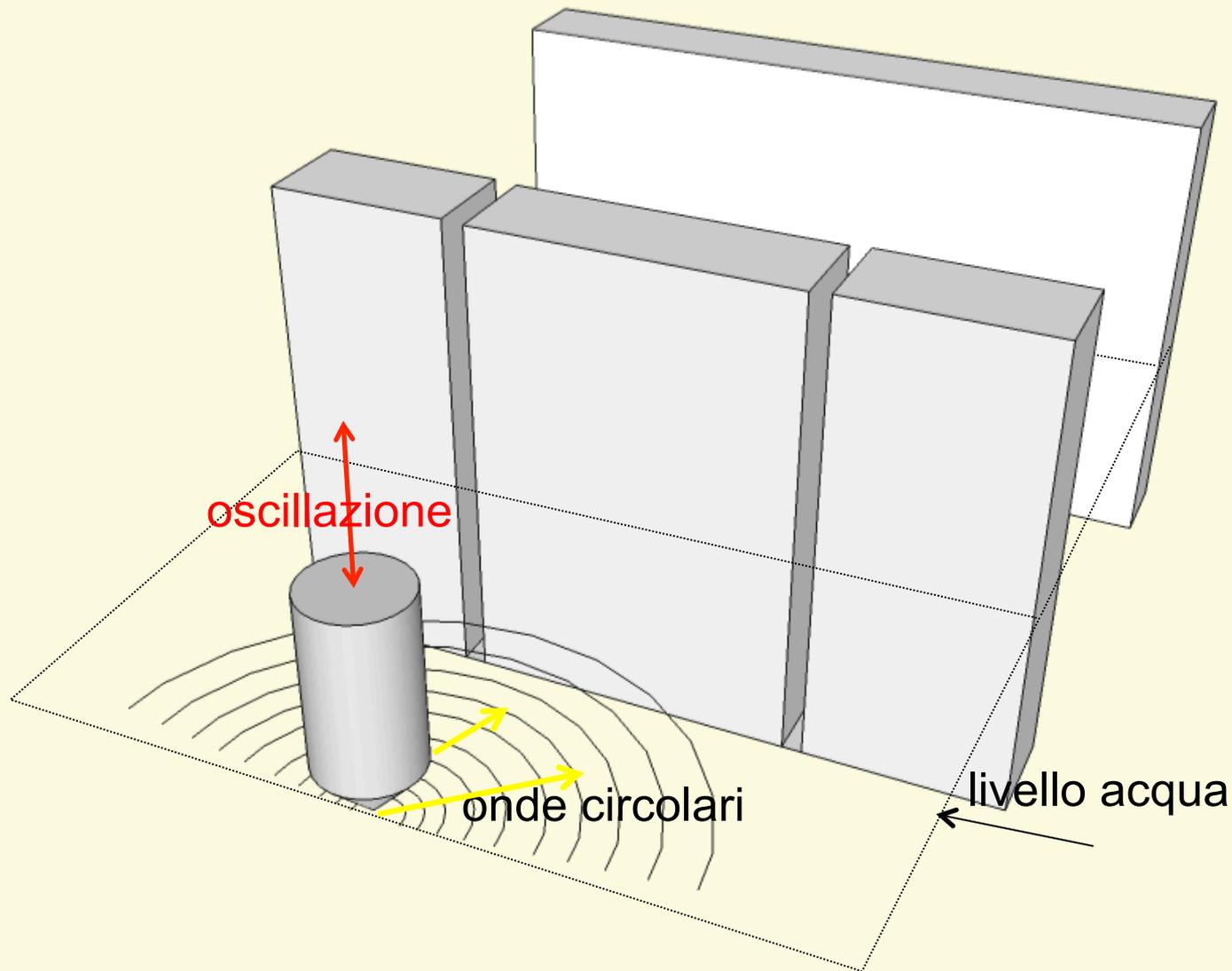


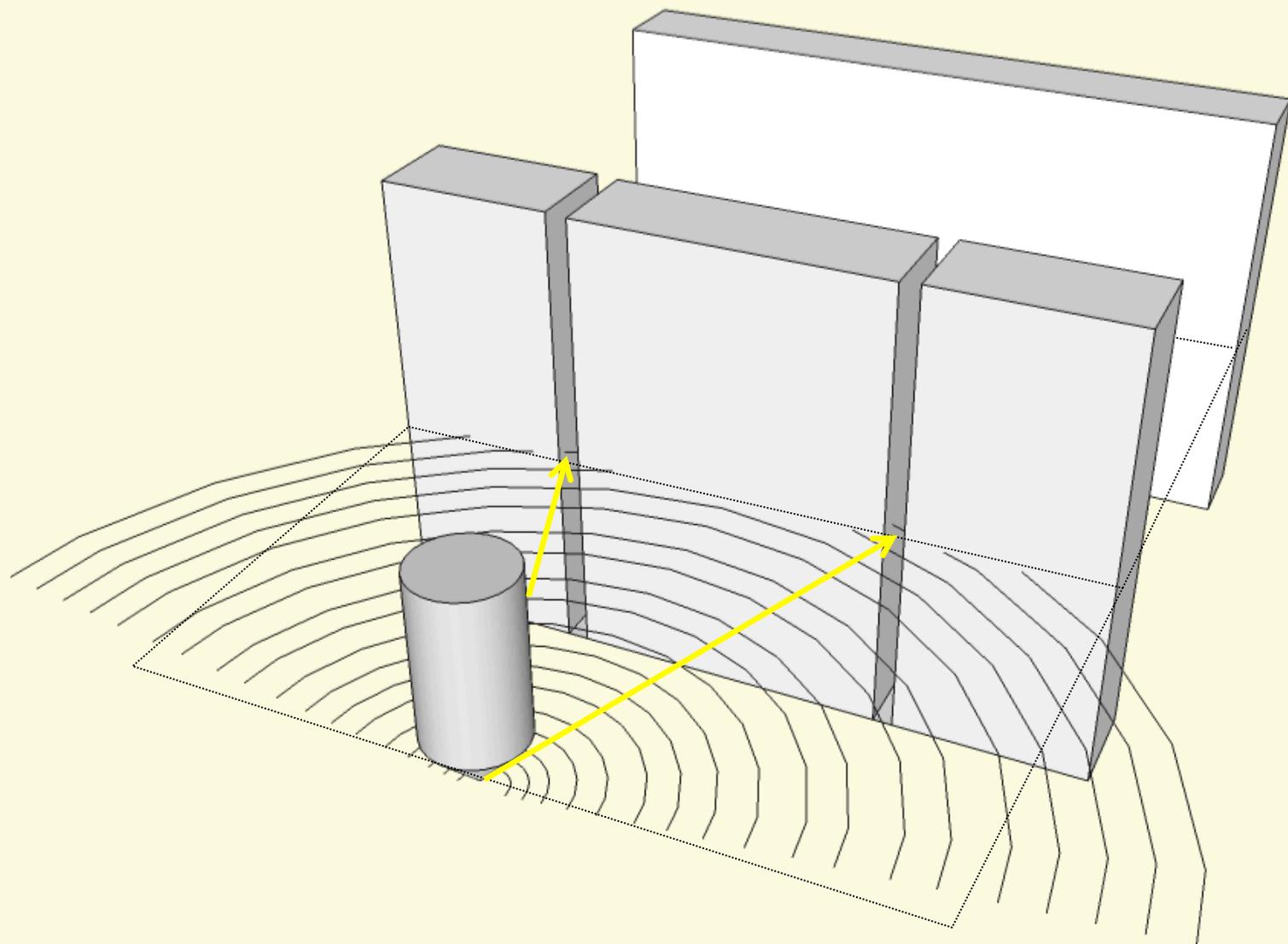


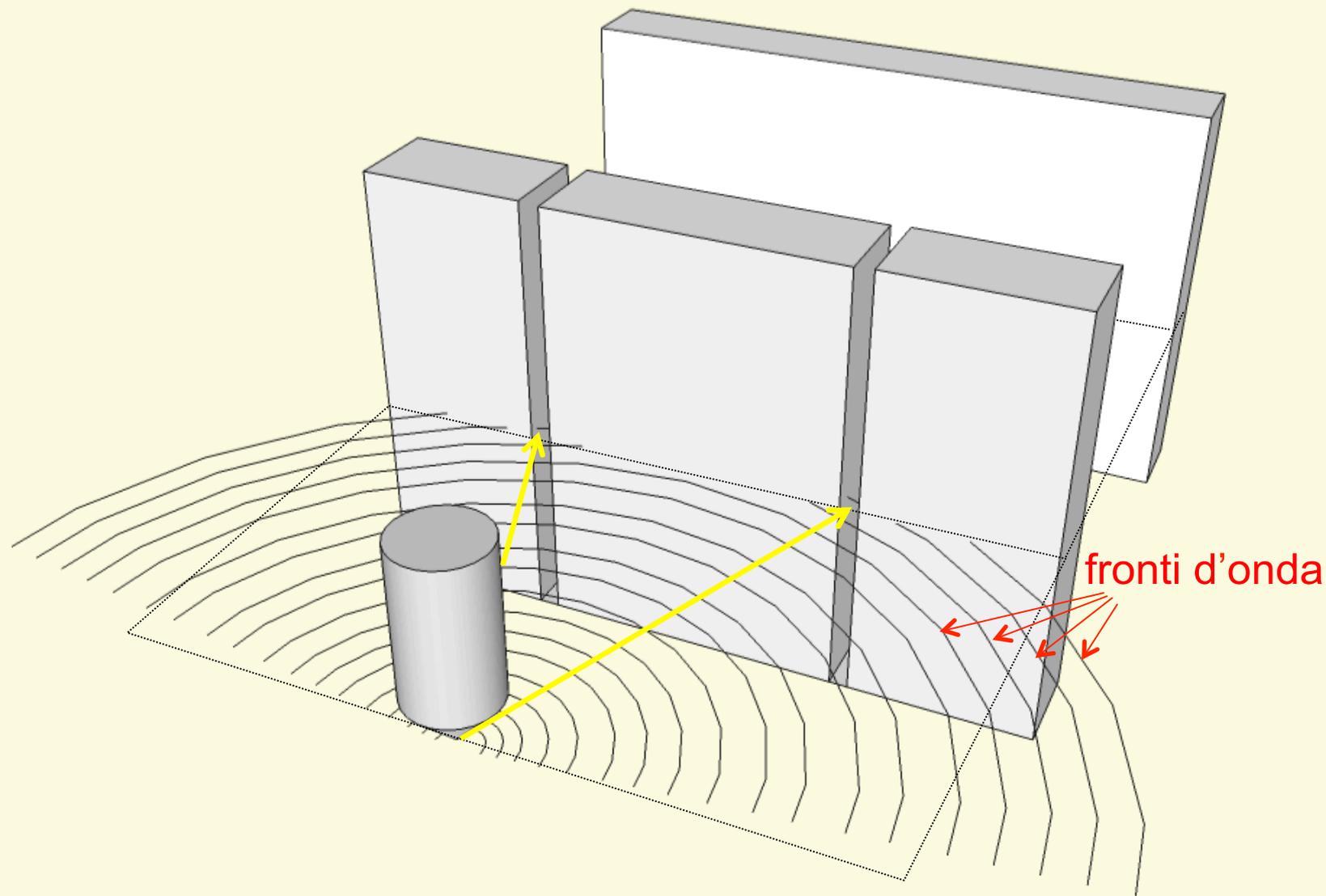




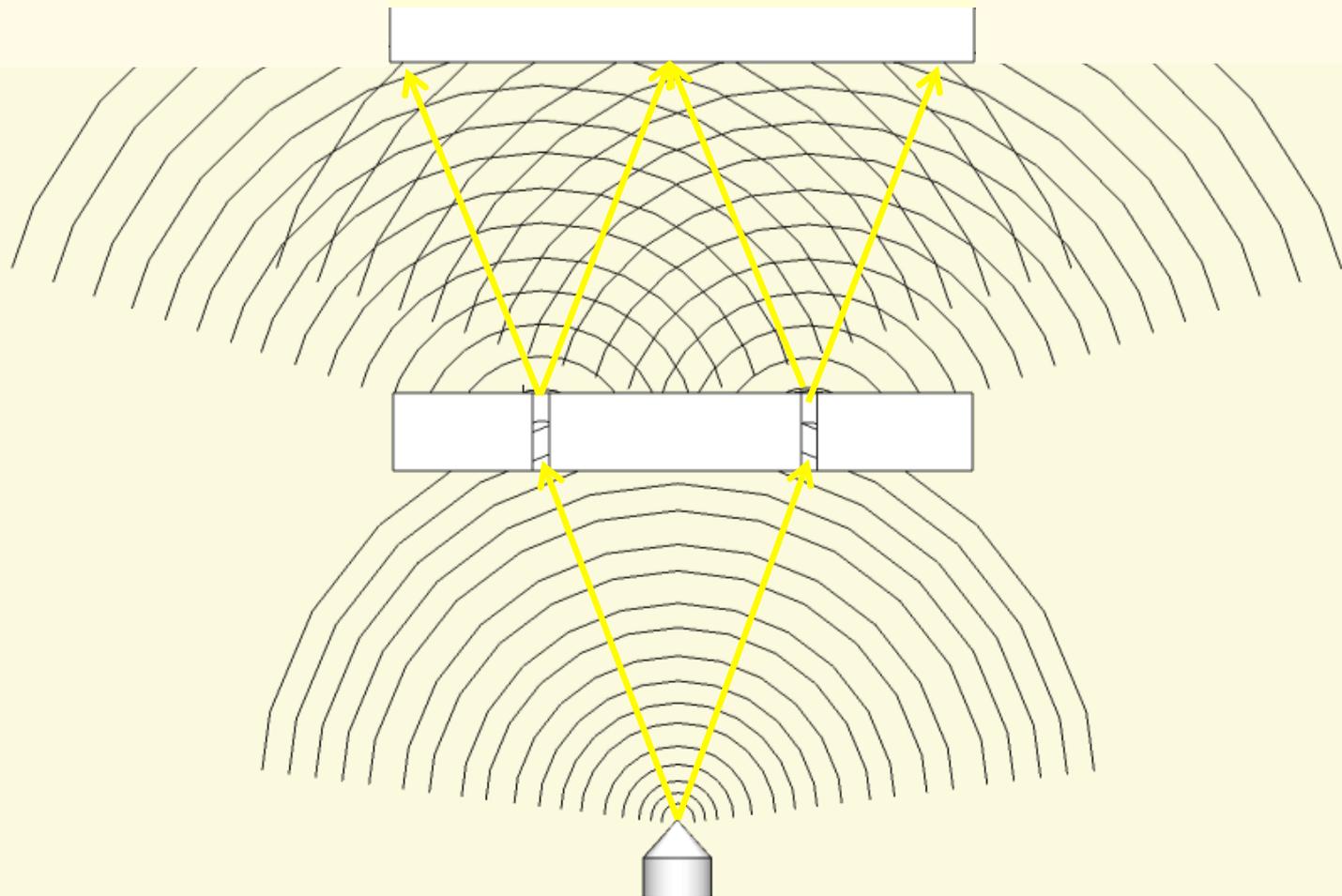
caso 2: onde sulla superficie dell'acqua





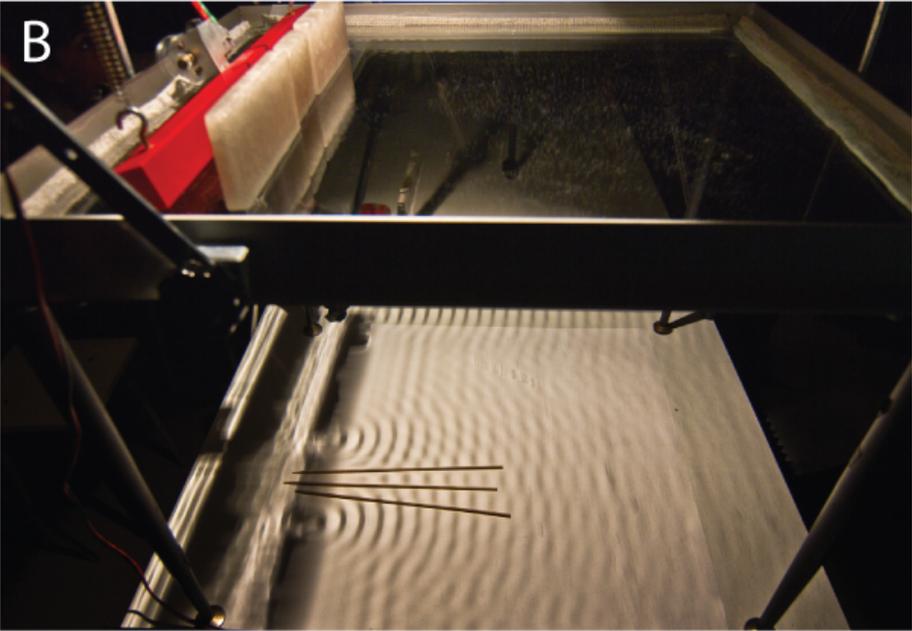
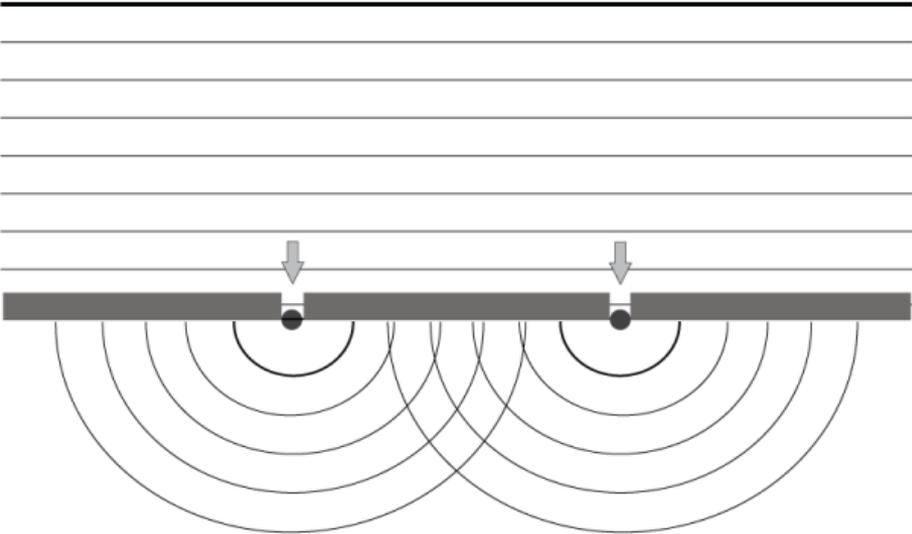


(per semplicità trascuriamo gli effetti di *riflessione* delle onde)



le fenditure dividono il fronte d'onda e generano due sorgenti secondarie con caratteristiche (*lunghezza d'onda* e *fase*) uguali a quelle dell'onda primaria

esempio: ondoscopio con sorgente primaria di onde rettilinee



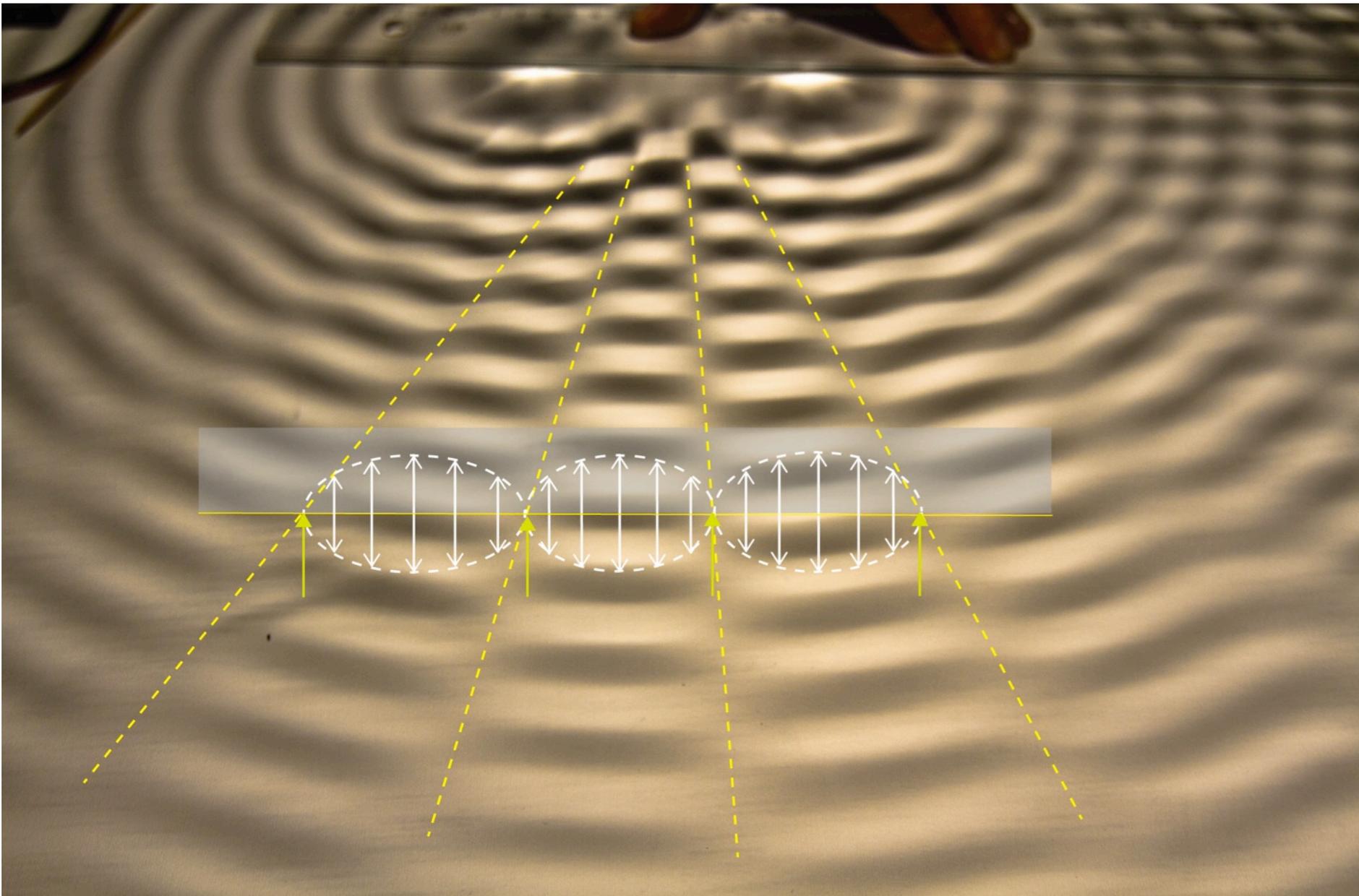
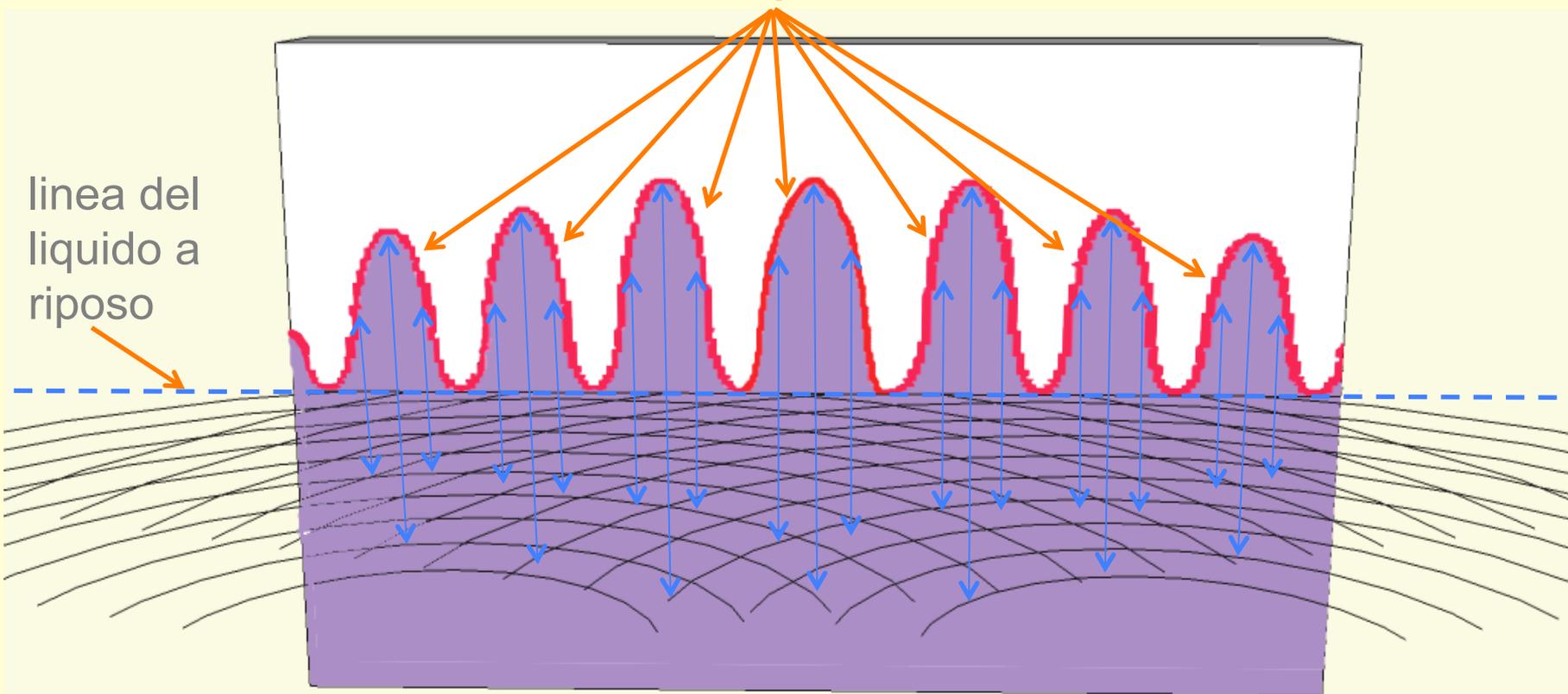


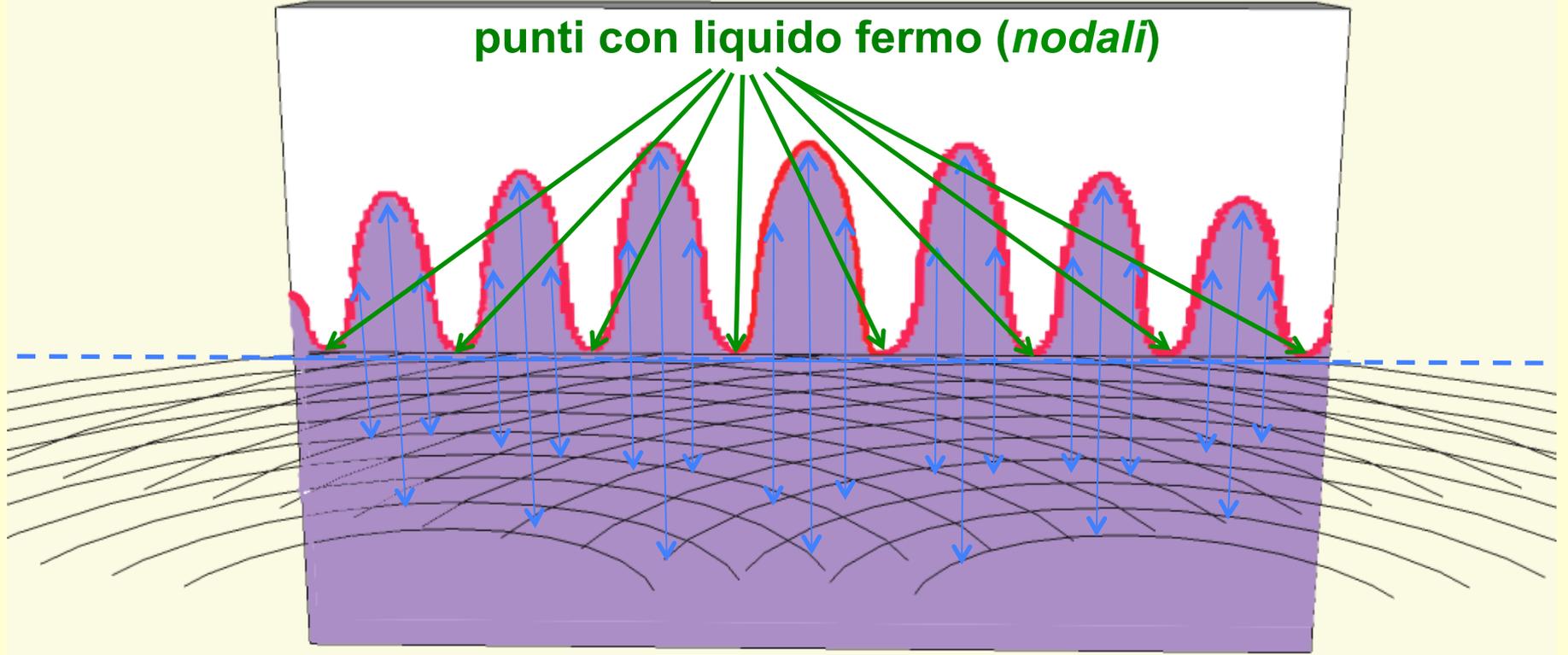
figura di *interferenza* prodotta sulla superficie dell'acqua

zone con liquido oscillante

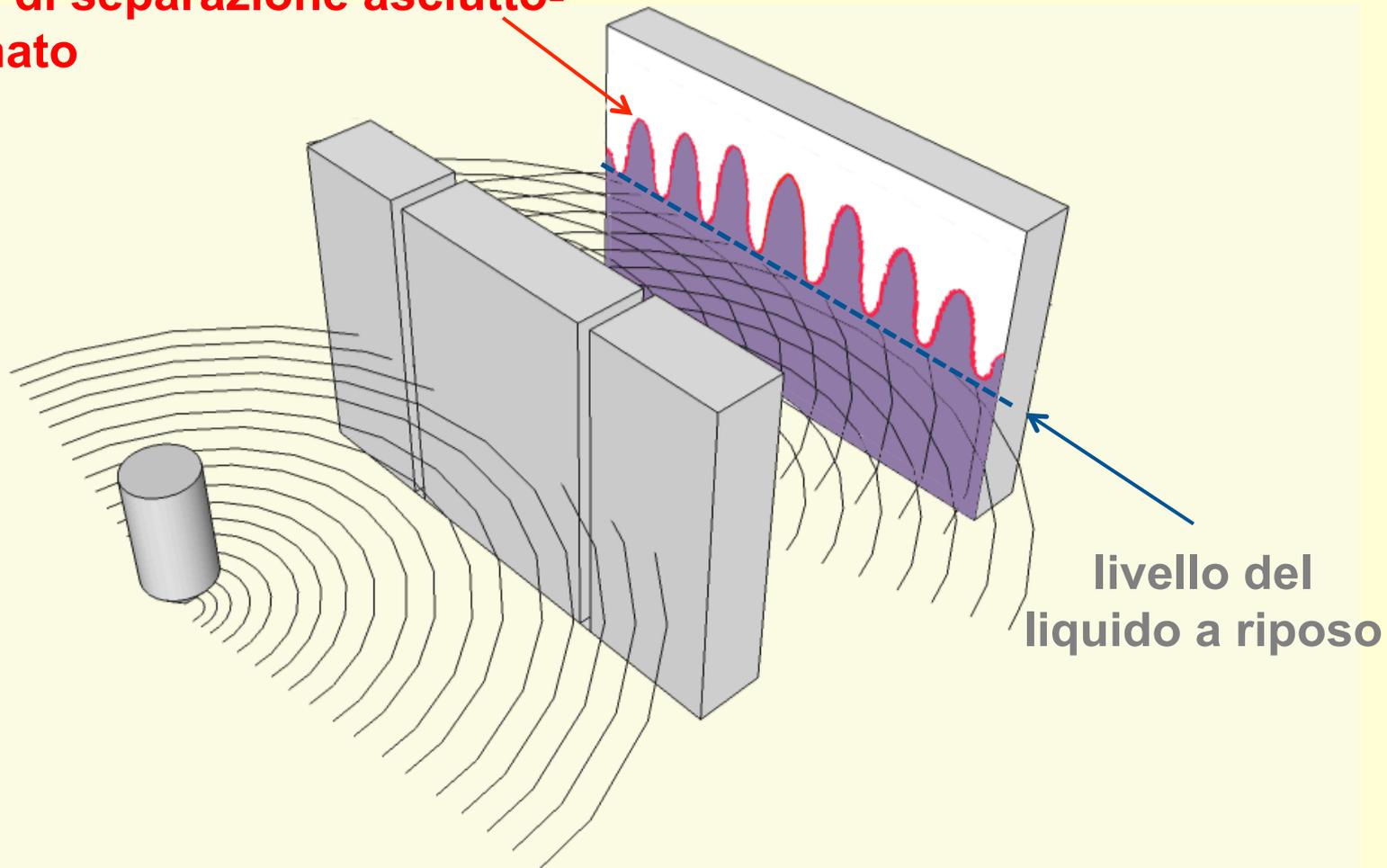


linea del
liquido a
riposo

punti con liquido fermo (*nodali*)



**linea di separazione asciutto-
bagnato**



**livello del
liquido a riposo**

frange di interferenza

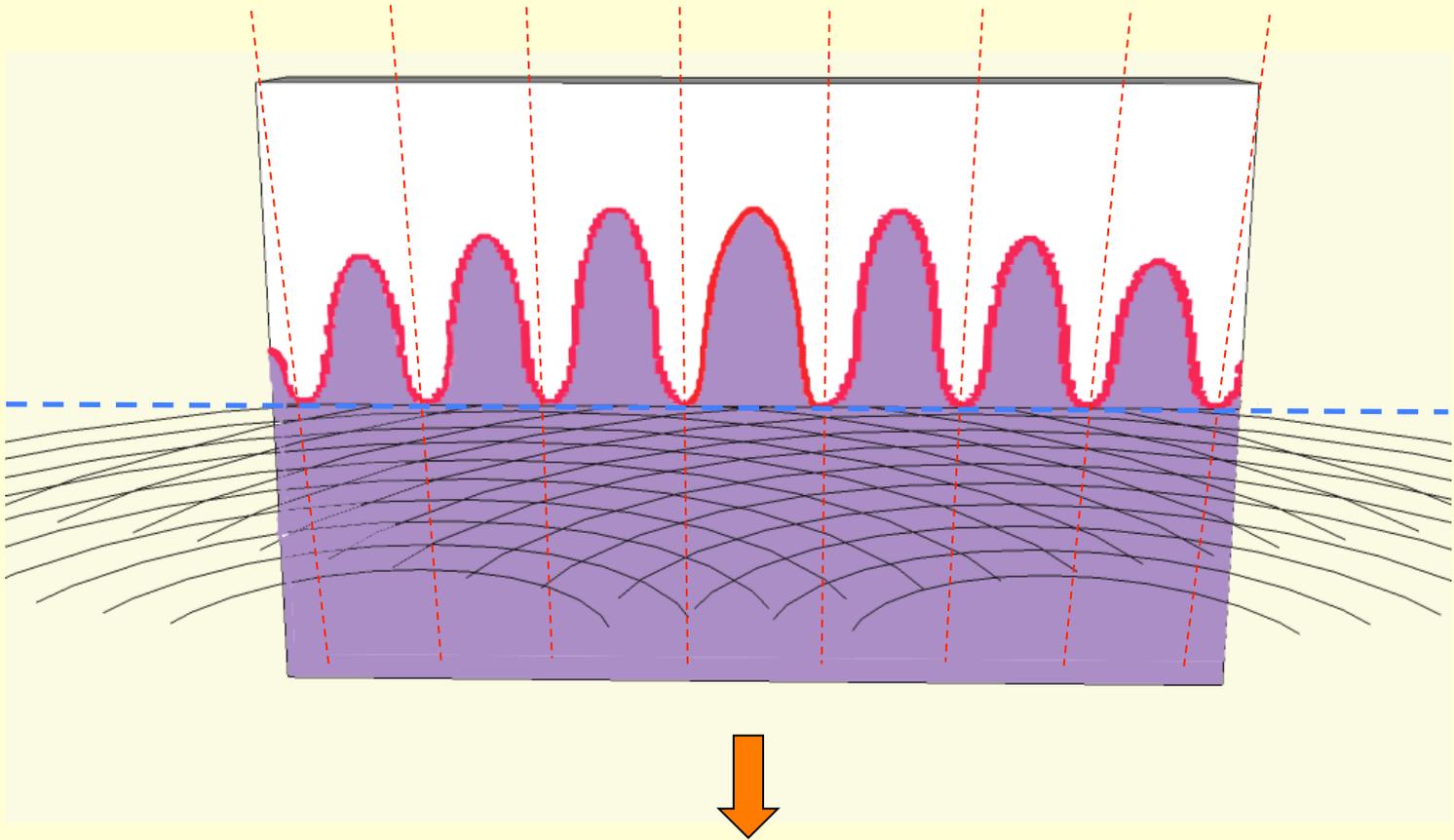
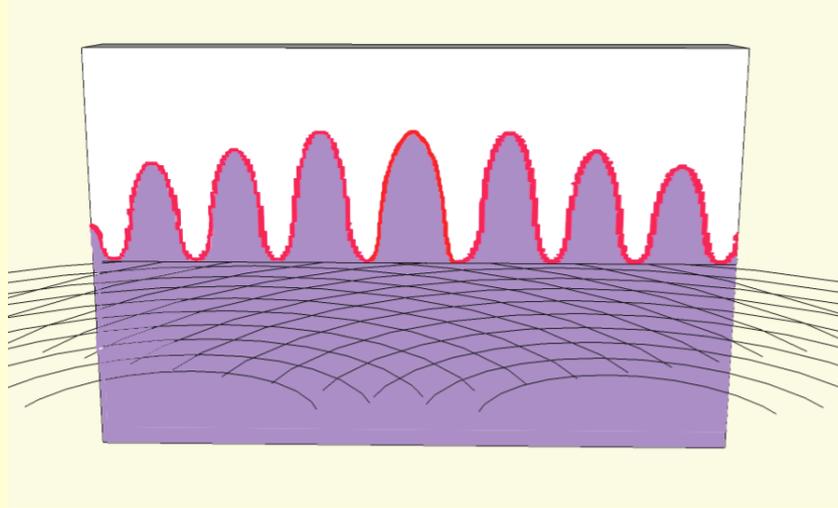
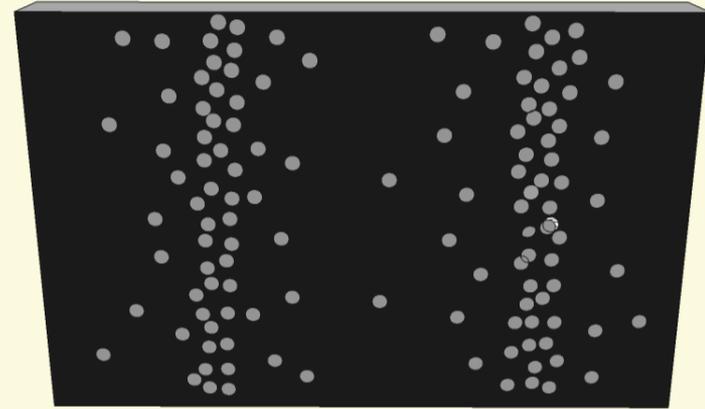


figura rappresentativa dell'*ampiezza* (A) di oscillazione

$$I \text{ (intensità)} \propto A^2$$

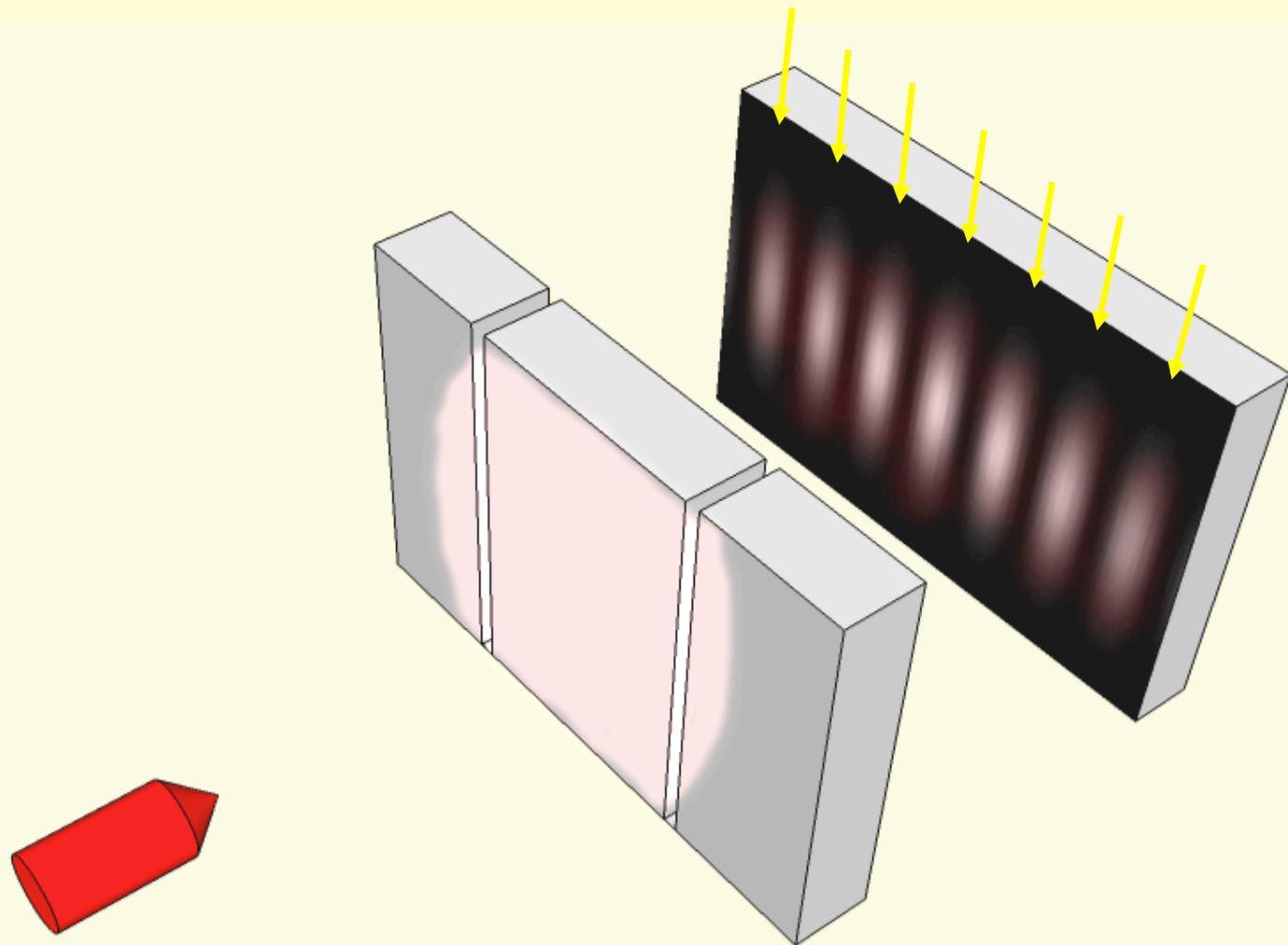


onde: frange di interferenza



particelle: due strisce

caso 3: fascio *intenso* di luce



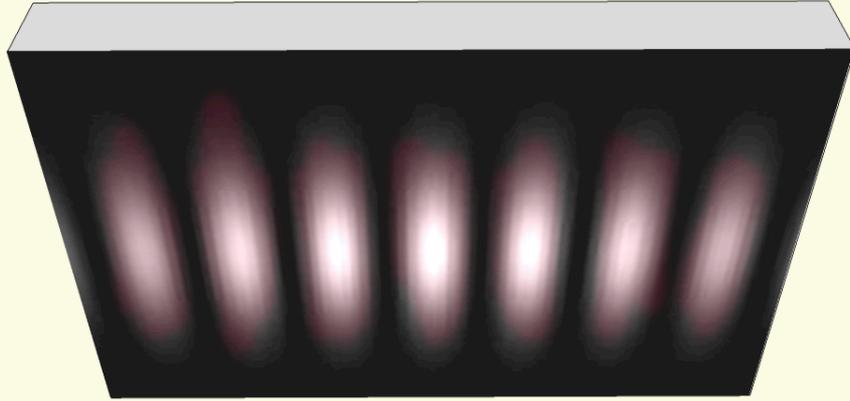


figura rappresentativa
dell'*intensità* dell'onda
luminosa

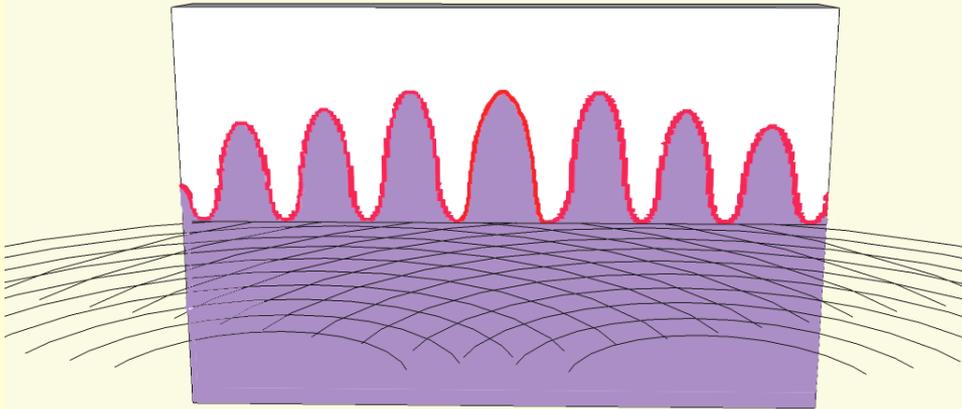
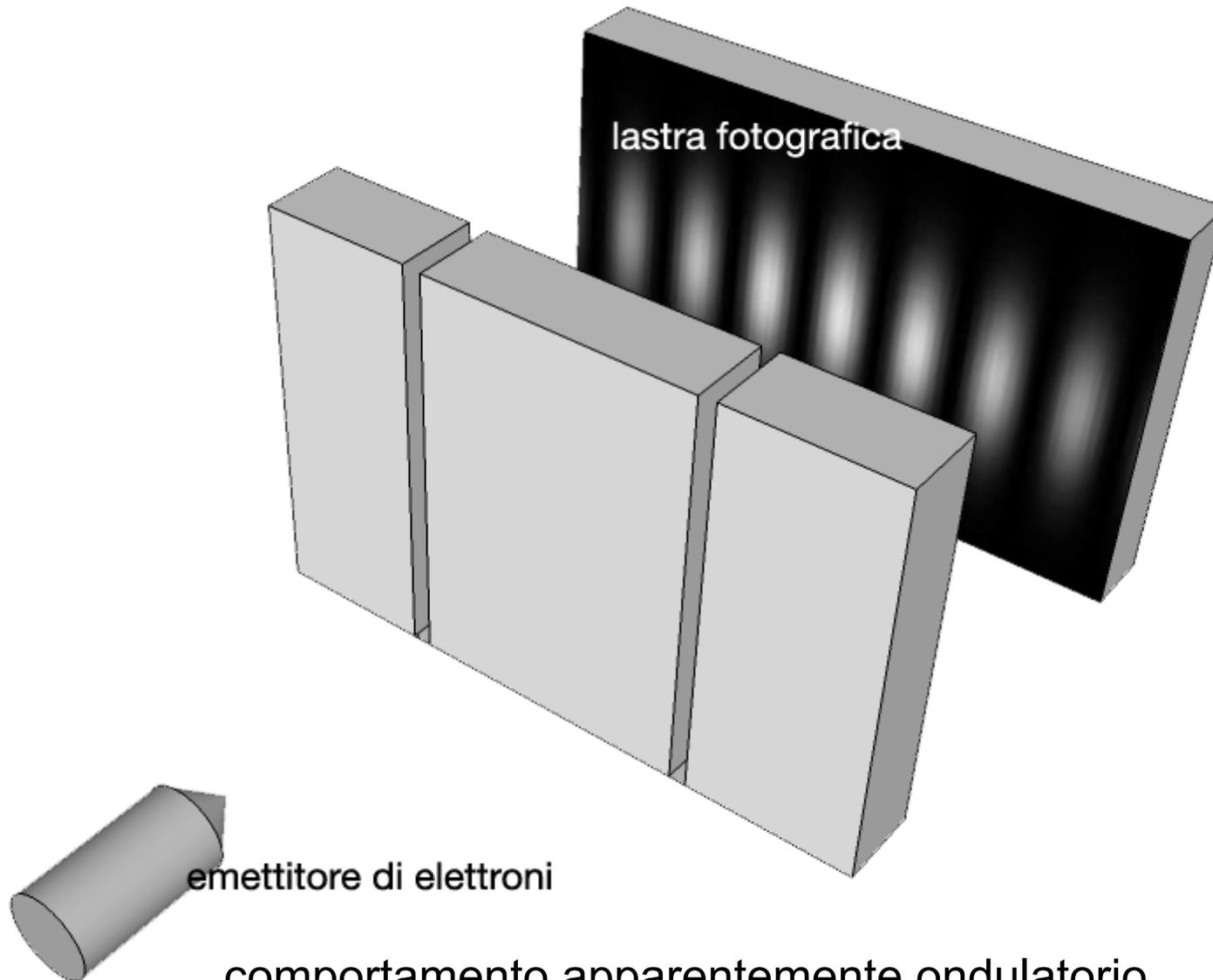


figura rappresentativa
dell'*ampiezza* dell'onda

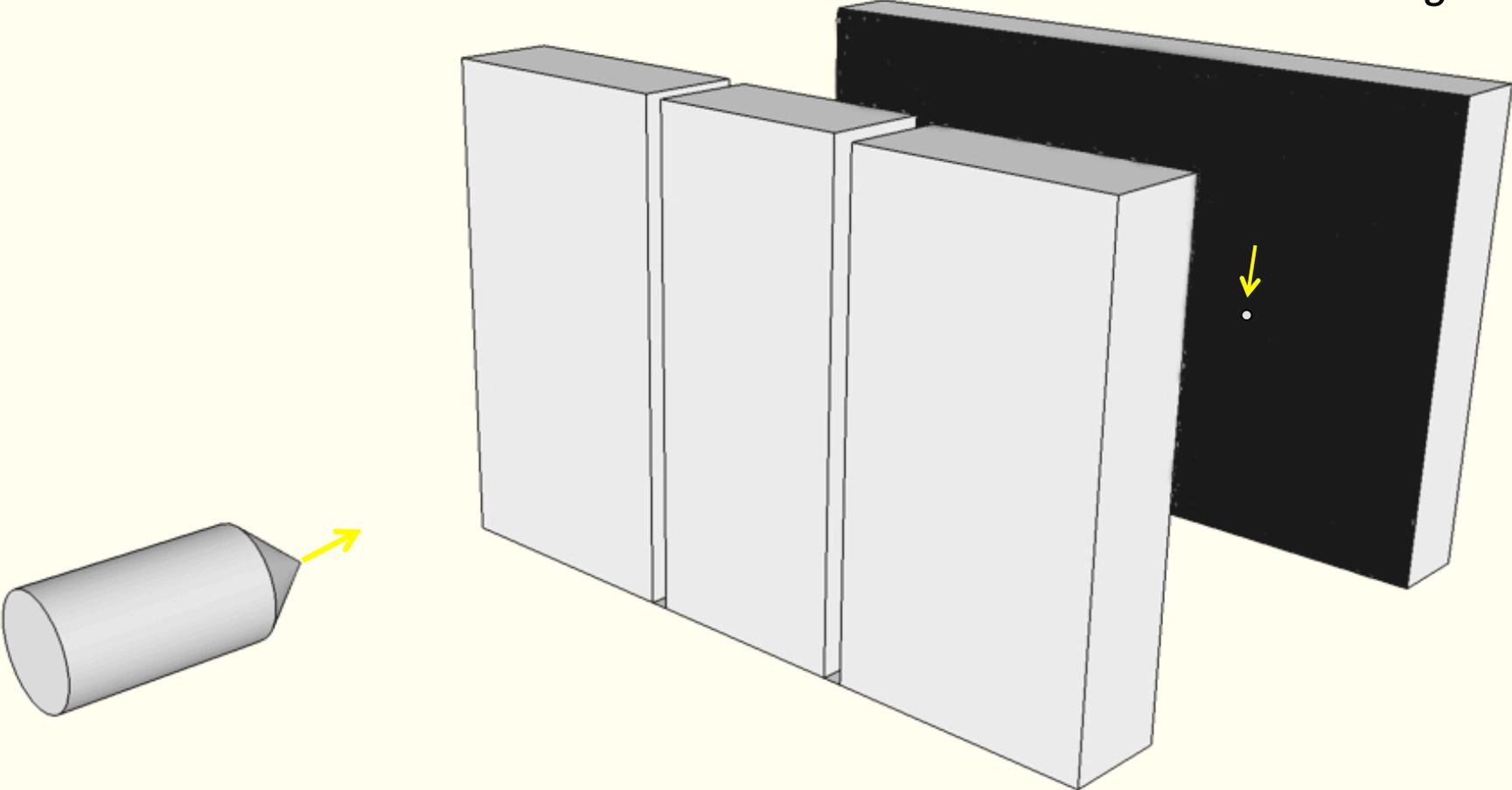
caso 4: fascio intenso di elettroni

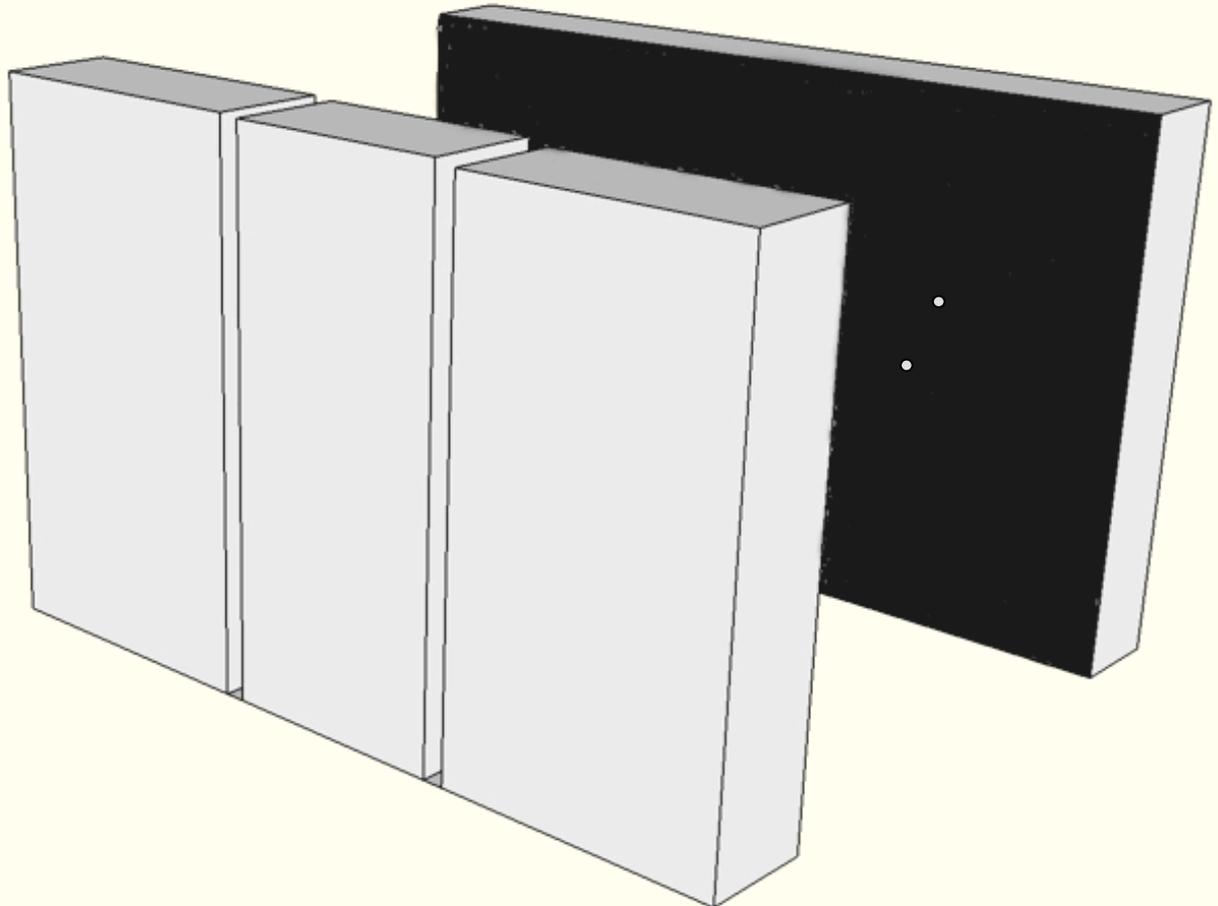
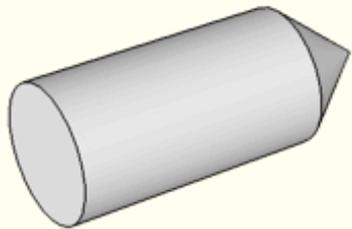


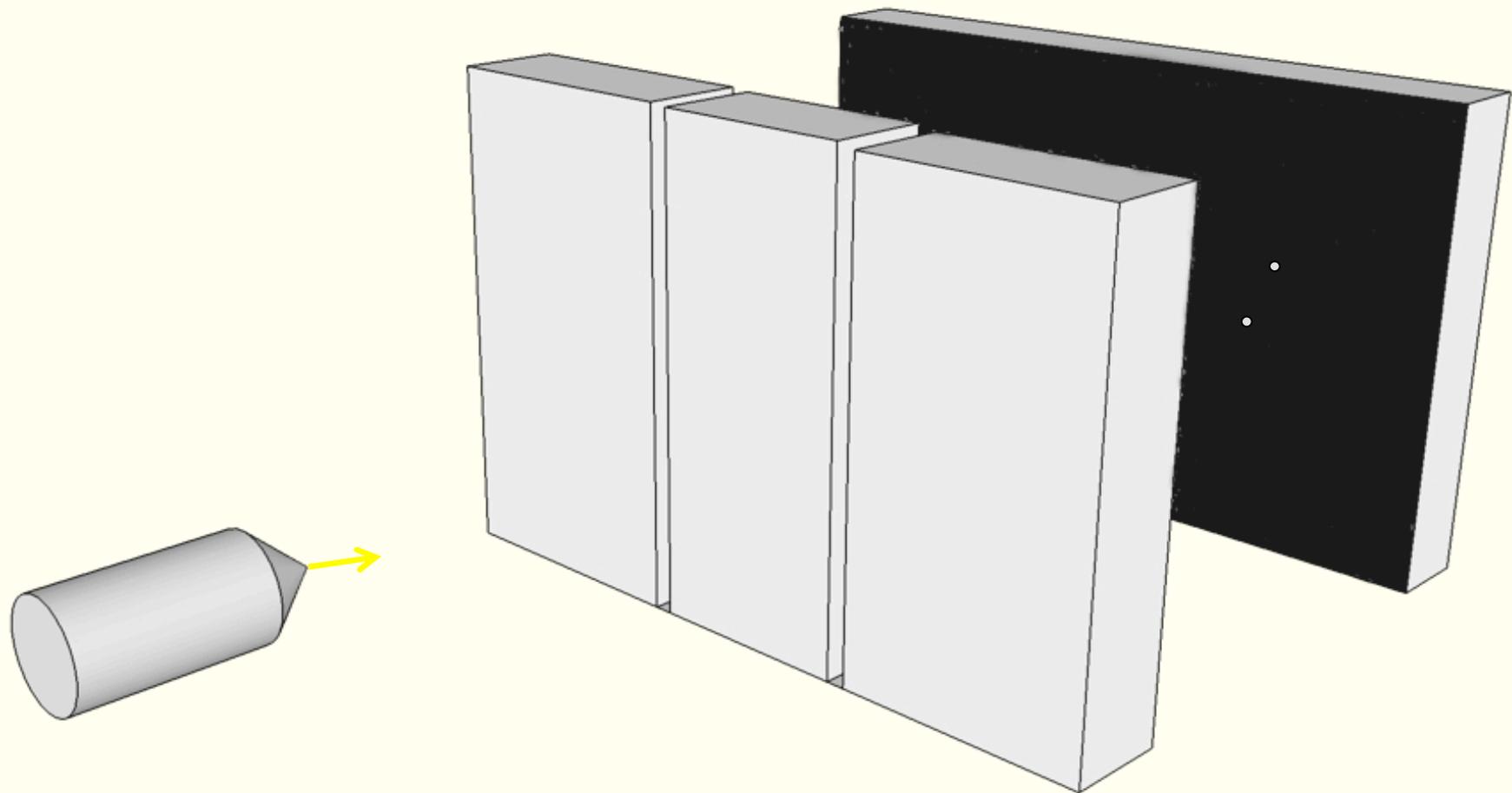
comportamento apparentemente ondulatorio ...
... dovuto forse a *mutue interazioni* tra elettroni?

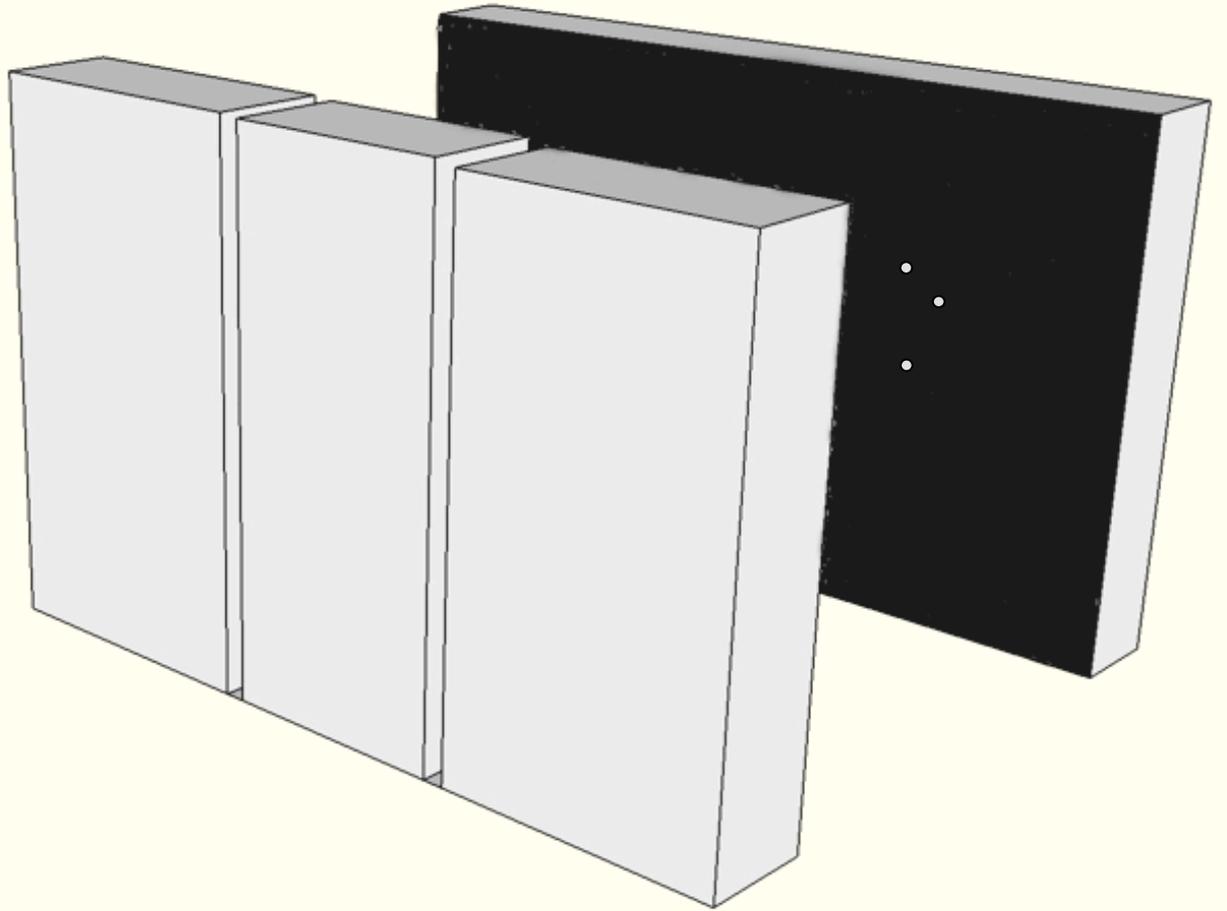
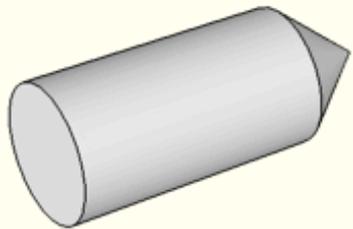
caso 5: fascio ultra-debole di elettroni (uno alla volta)

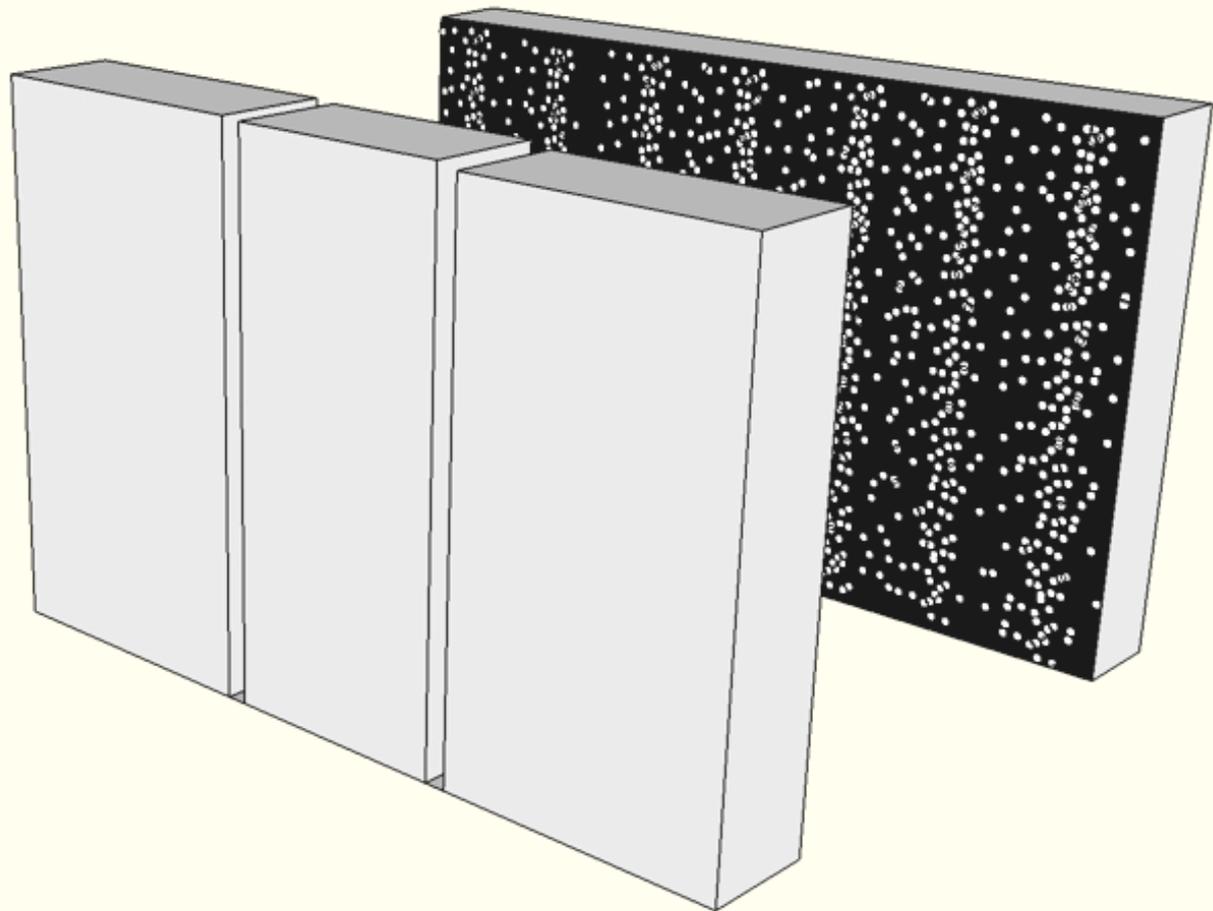
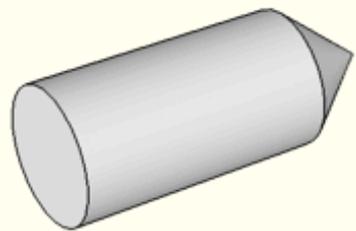
rivelatore di elettroni *singoli*

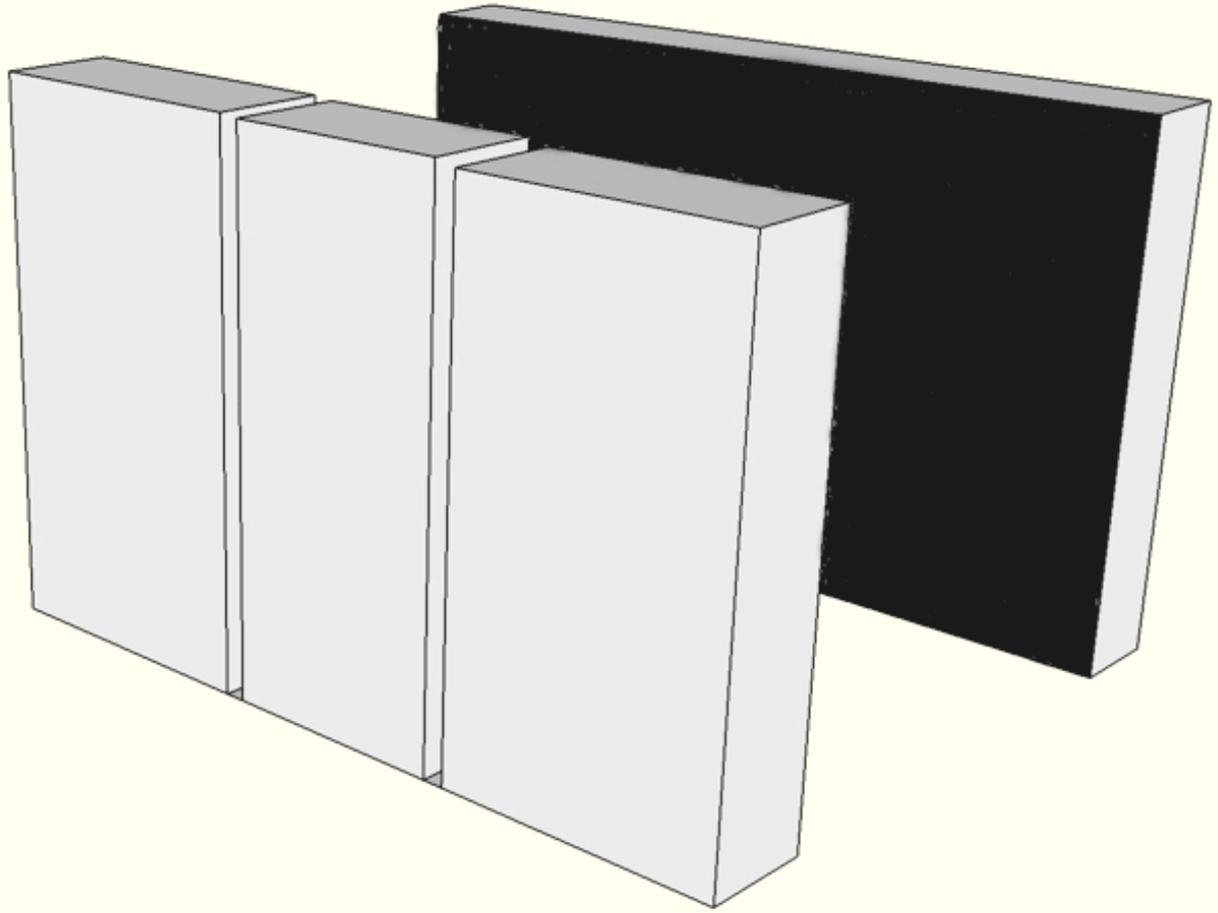
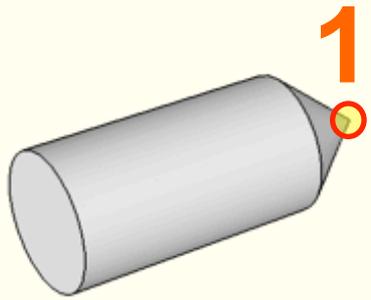


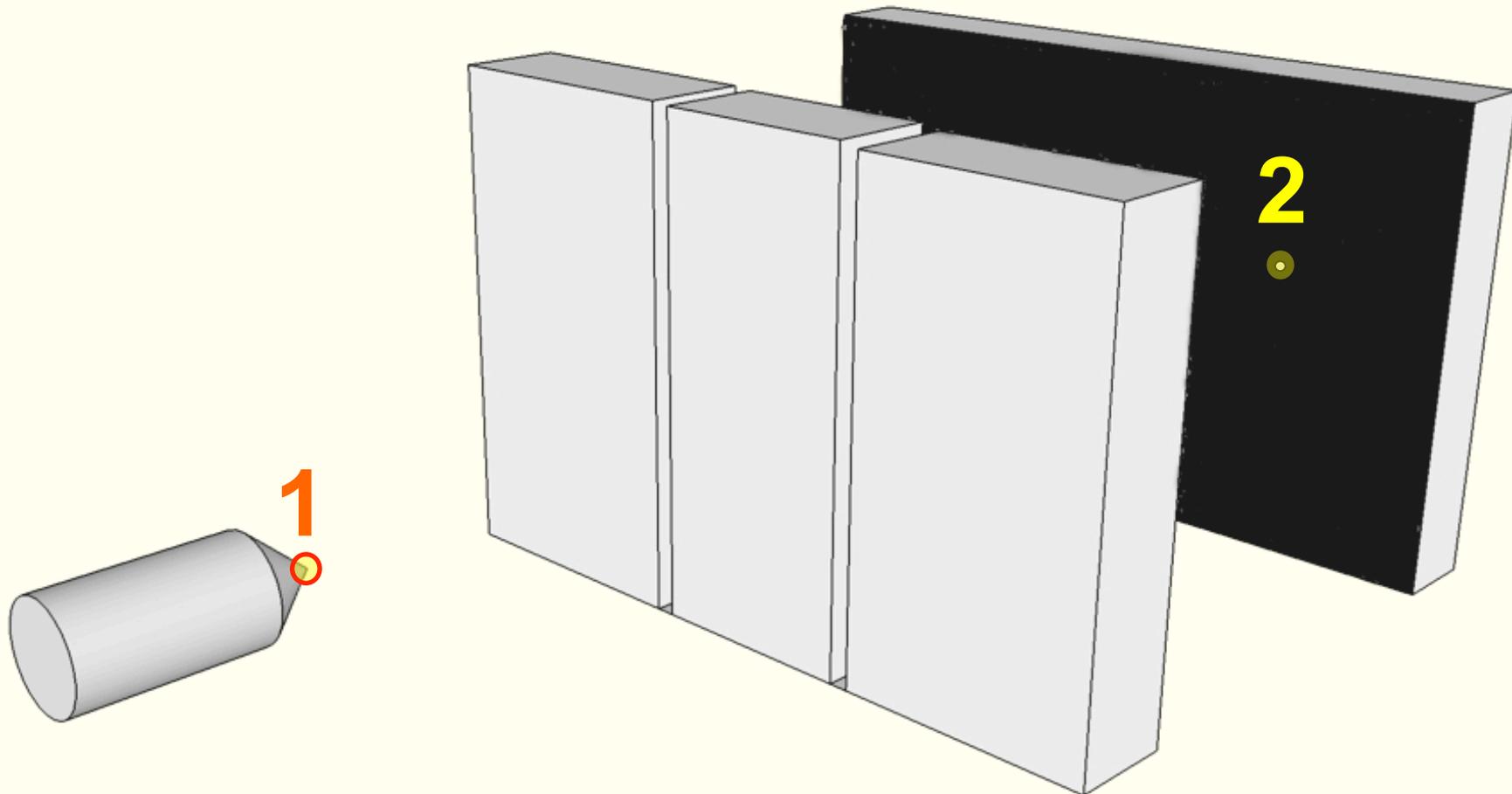




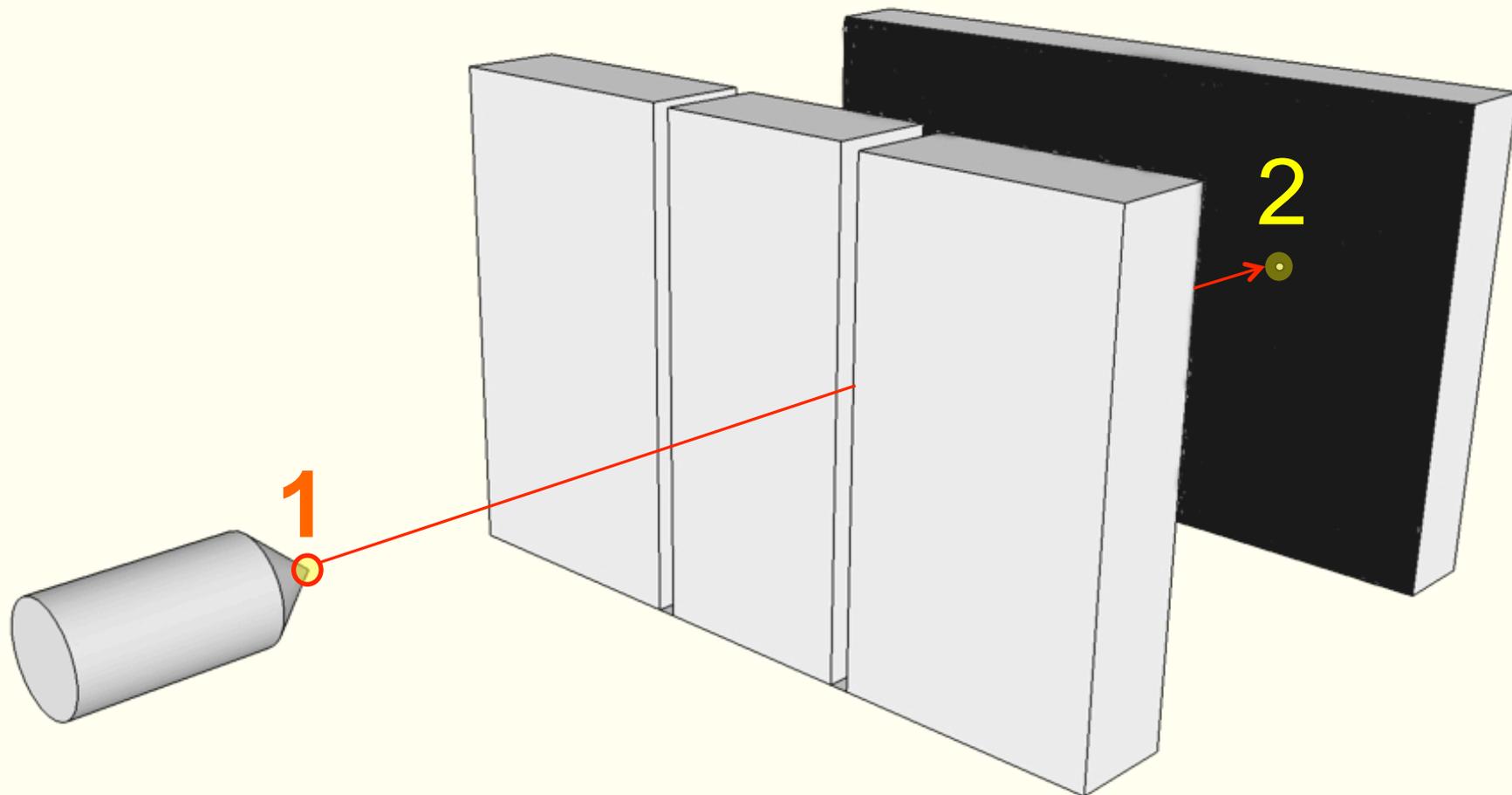




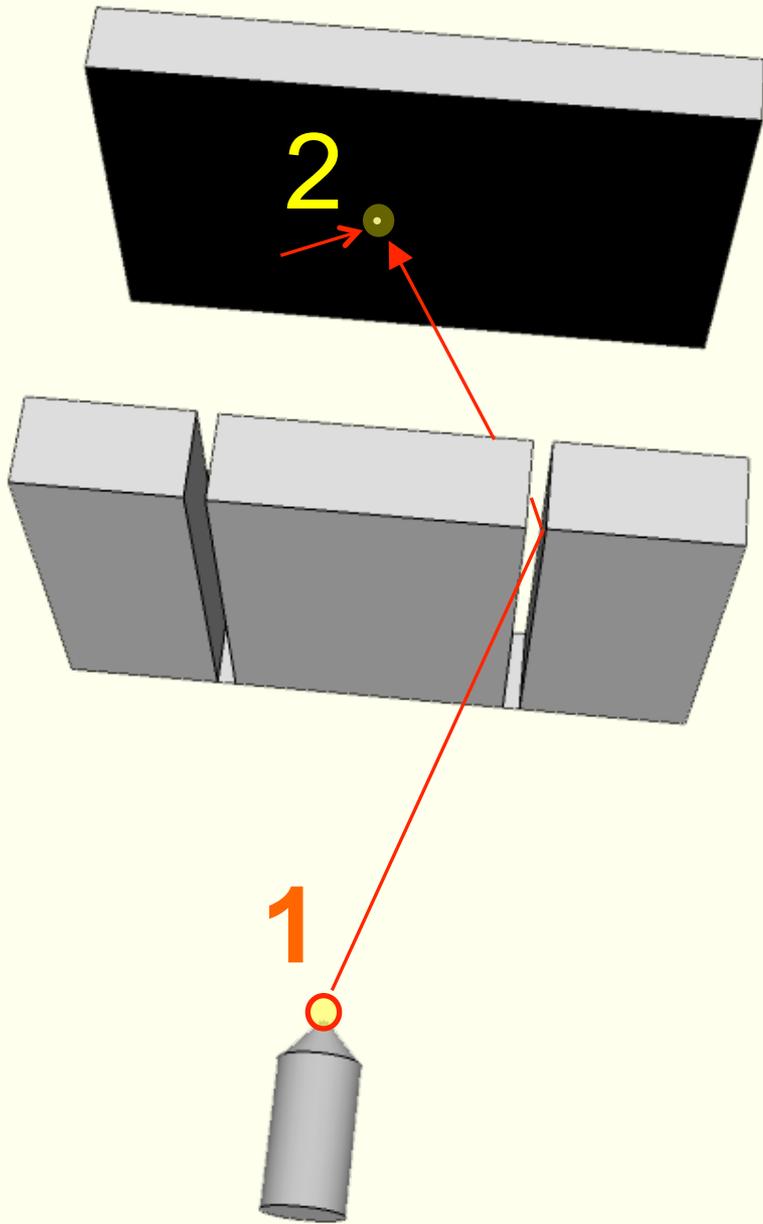


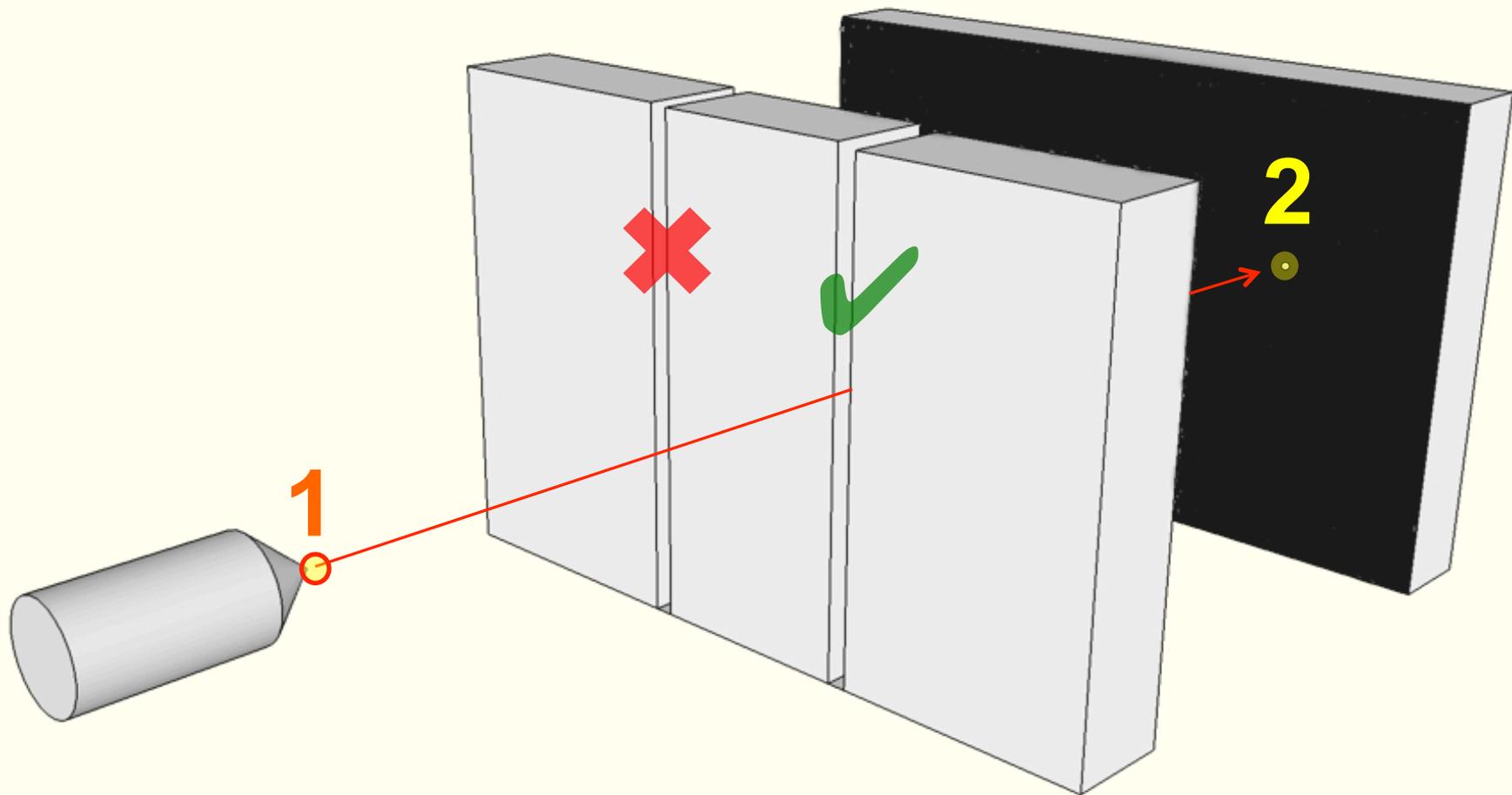


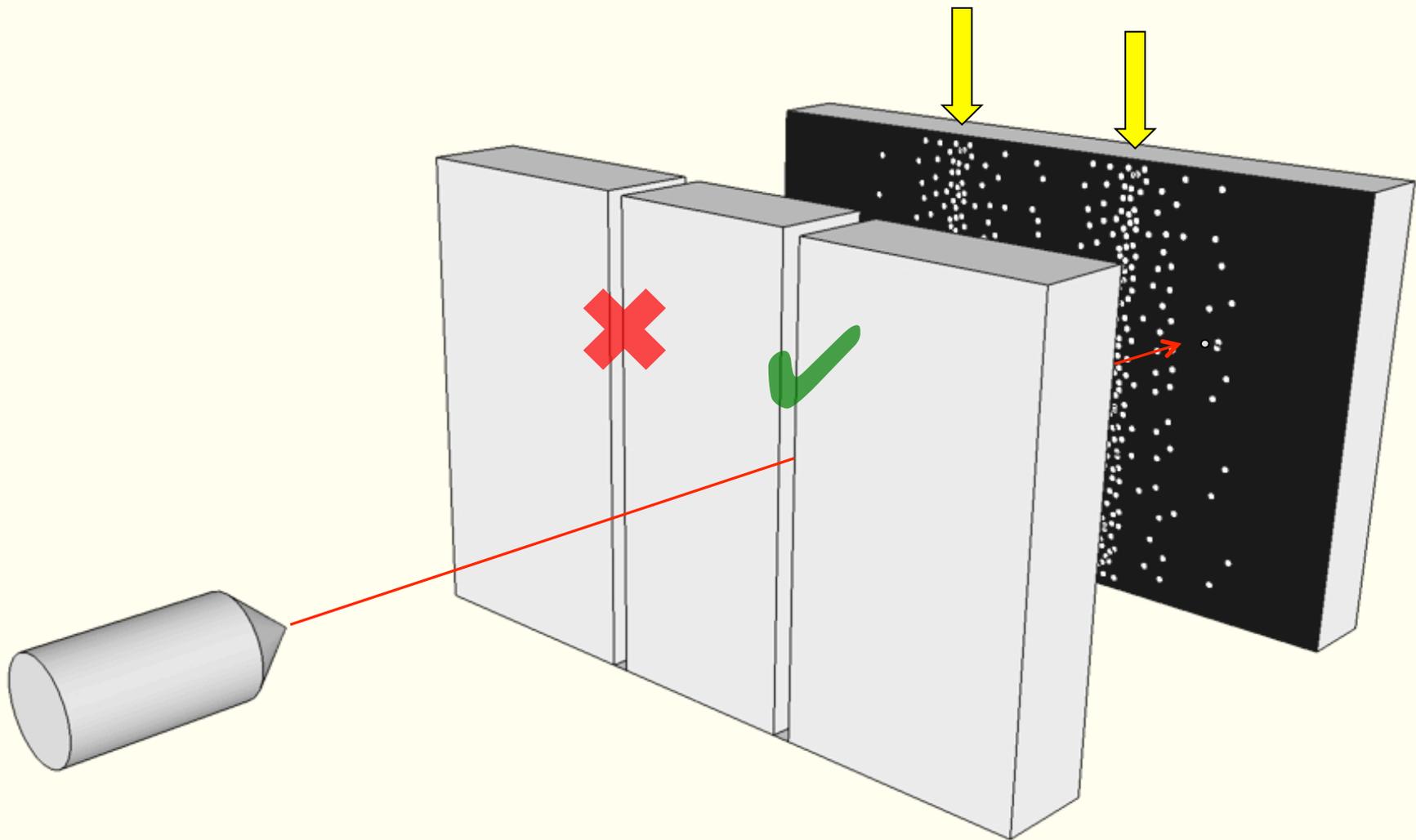
punti in cui conosciamo la posizione degli elettroni



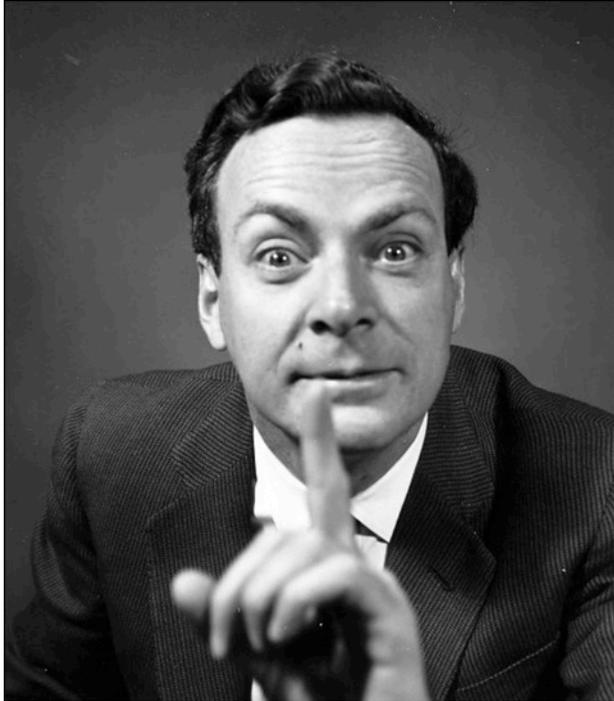
applicazione del concetto di *traiettoria*



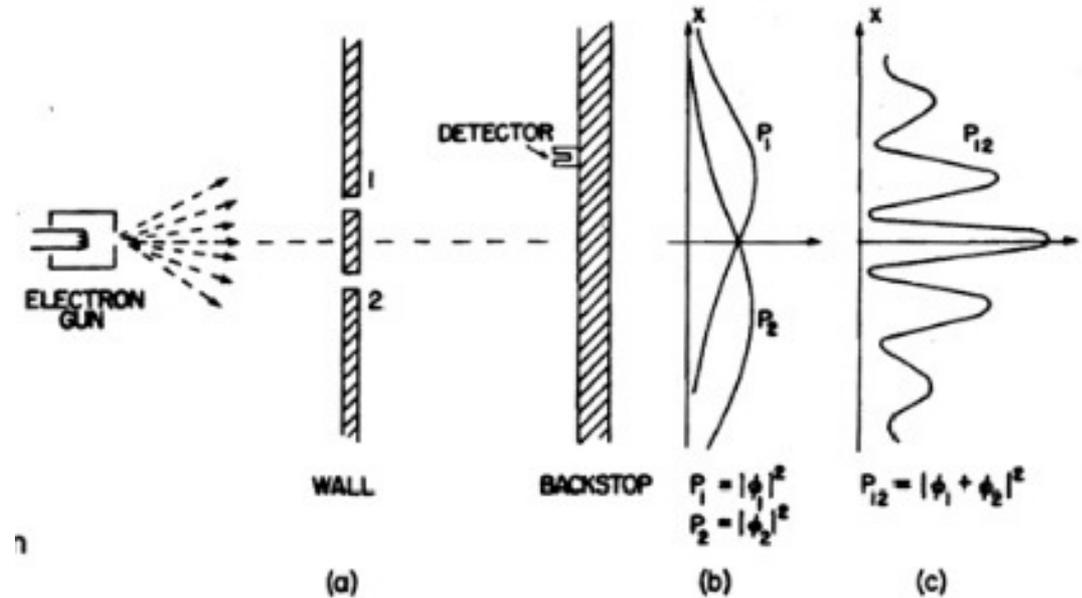




bello / impossibile ... (“...impossibly small”)

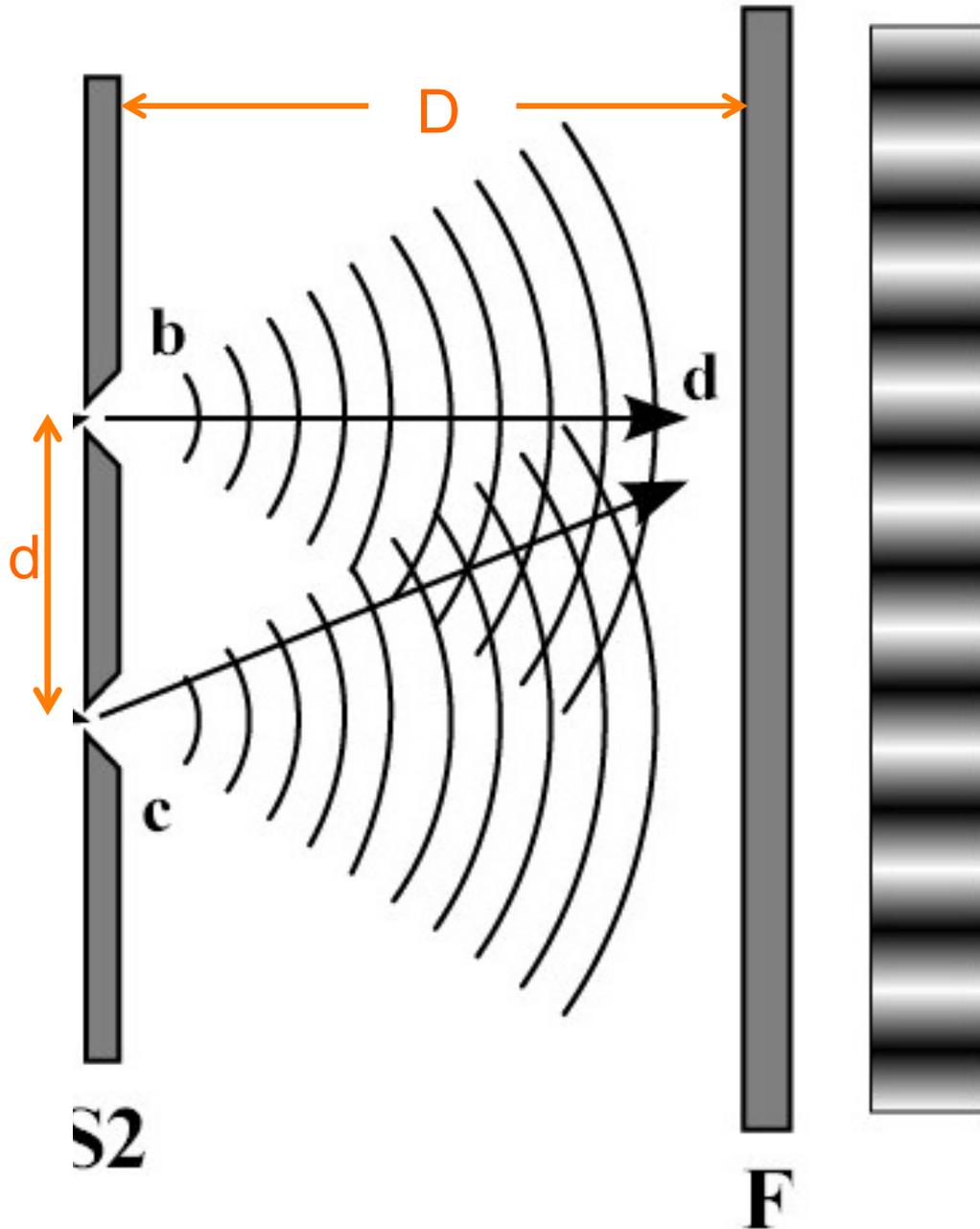


Richard Feynman (1918-1988)



“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) $\approx 0.1 \text{ mm}$

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



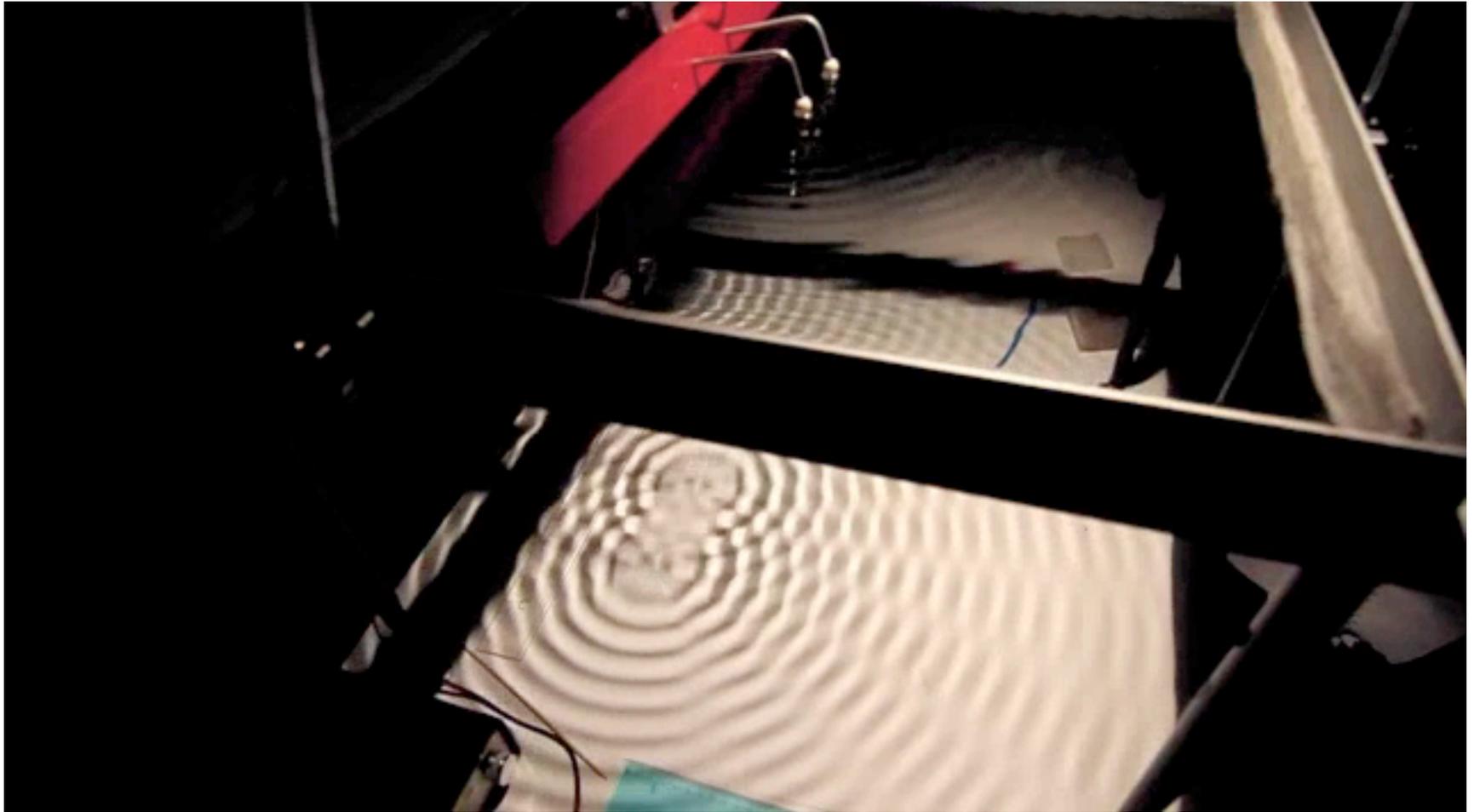
$$D = xd/\lambda \approx 150 \text{ m}$$

Il problema della *coerenza* delle sorgenti

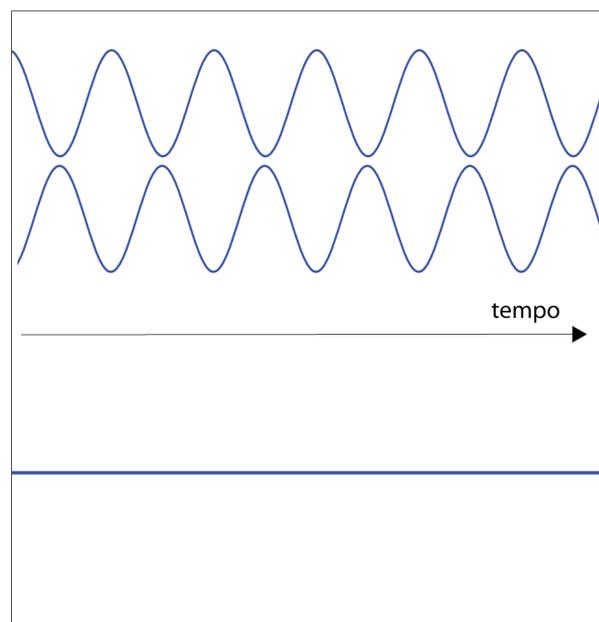
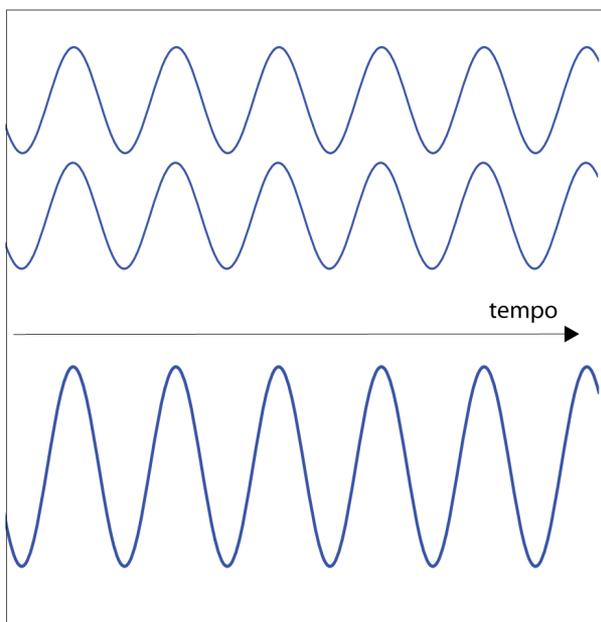
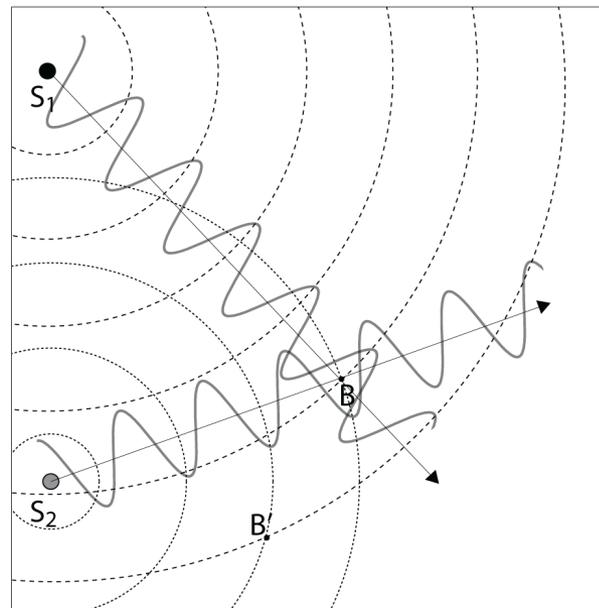
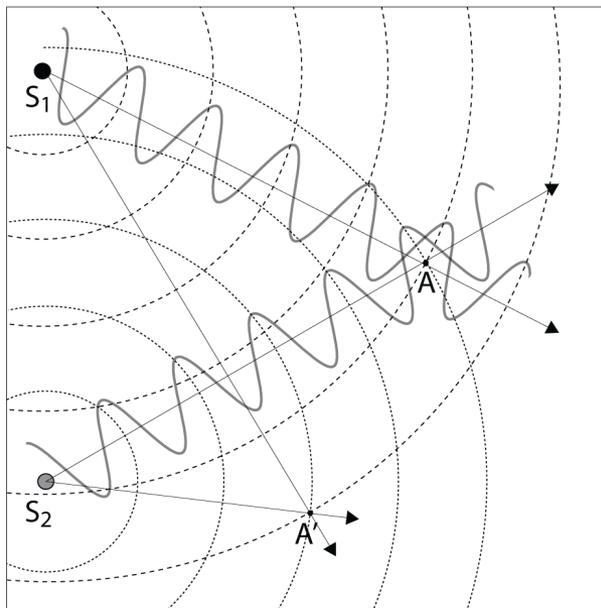
sorgenti *coerenti* = che emettono onde di uguale frequenza/lunghezza d'onda e con una *sincronizzazione* (*relazione di fase*) costante

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

Il problema della *coerenza* delle sorgenti



Interferenza di sorgenti coerenti puntiformi



Coerenza delle sorgenti di luce e elettroni

Per motivi legati ai meccanismi fisici di emissione, le sorgenti di luce (*laser* a parte) 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*)

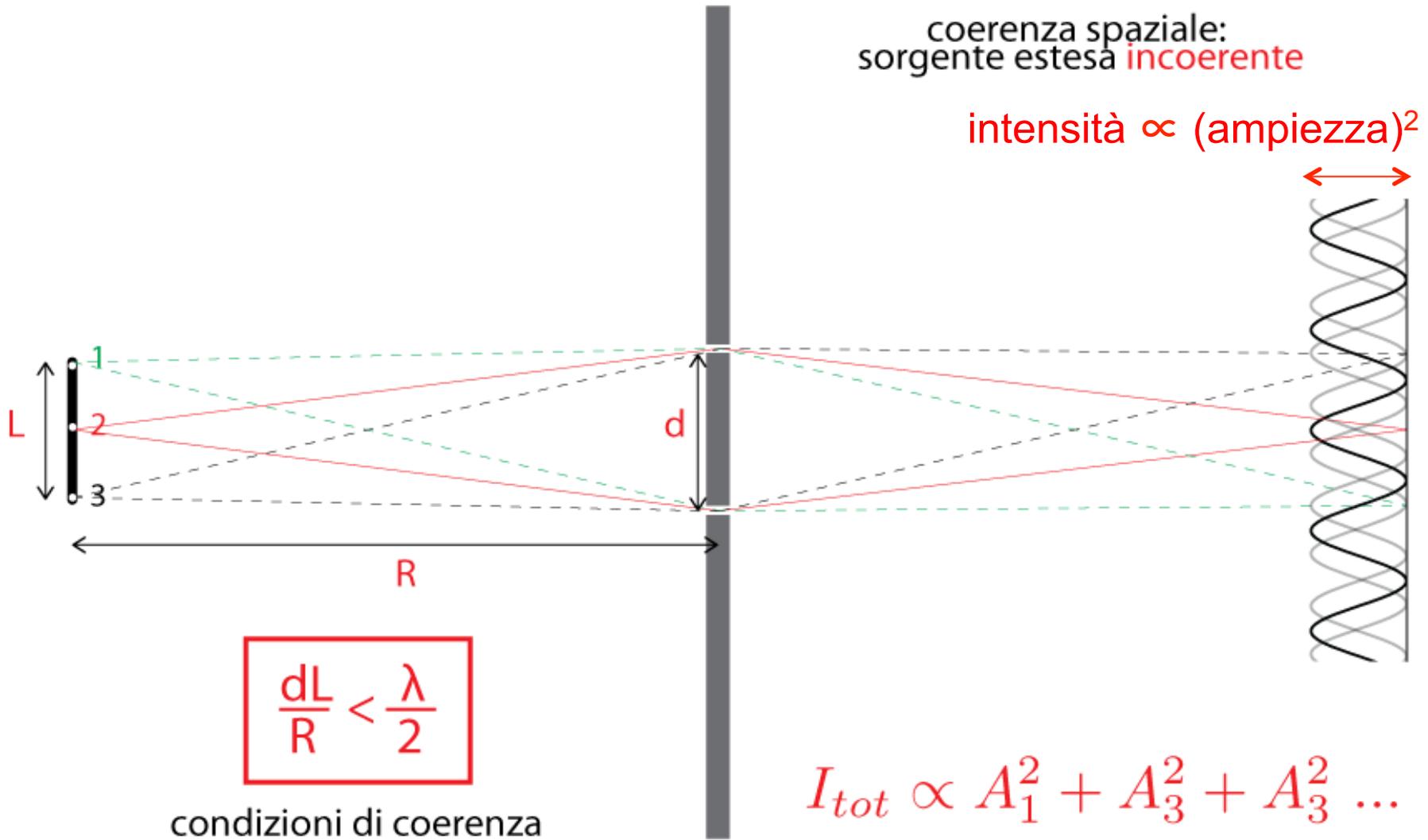
Coerenza delle sorgenti di luce e elettroni

Il problema della coerenza temporale si può trascurare nella maggior parte dei casi, e non ce ne preoccuperemo

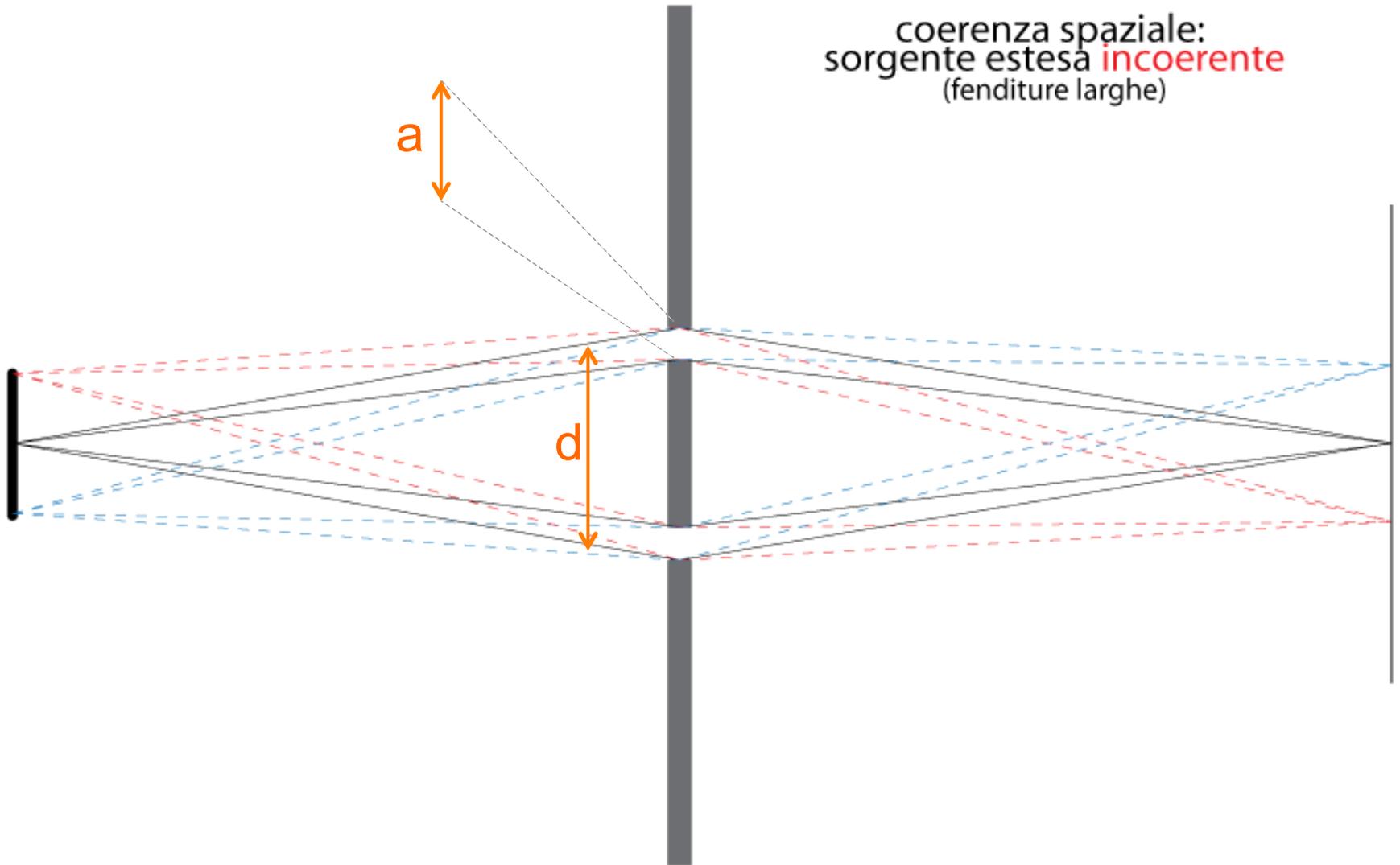
Dato che sorgenti distinte sono incoerenti, si sceglie di operare con una *sorgente singola* sdoppiandola con le due fenditure (*metodo di Young*)

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, una sorgente *estesa* può essere sufficientemente coerente da produrre frange di interferenza.



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

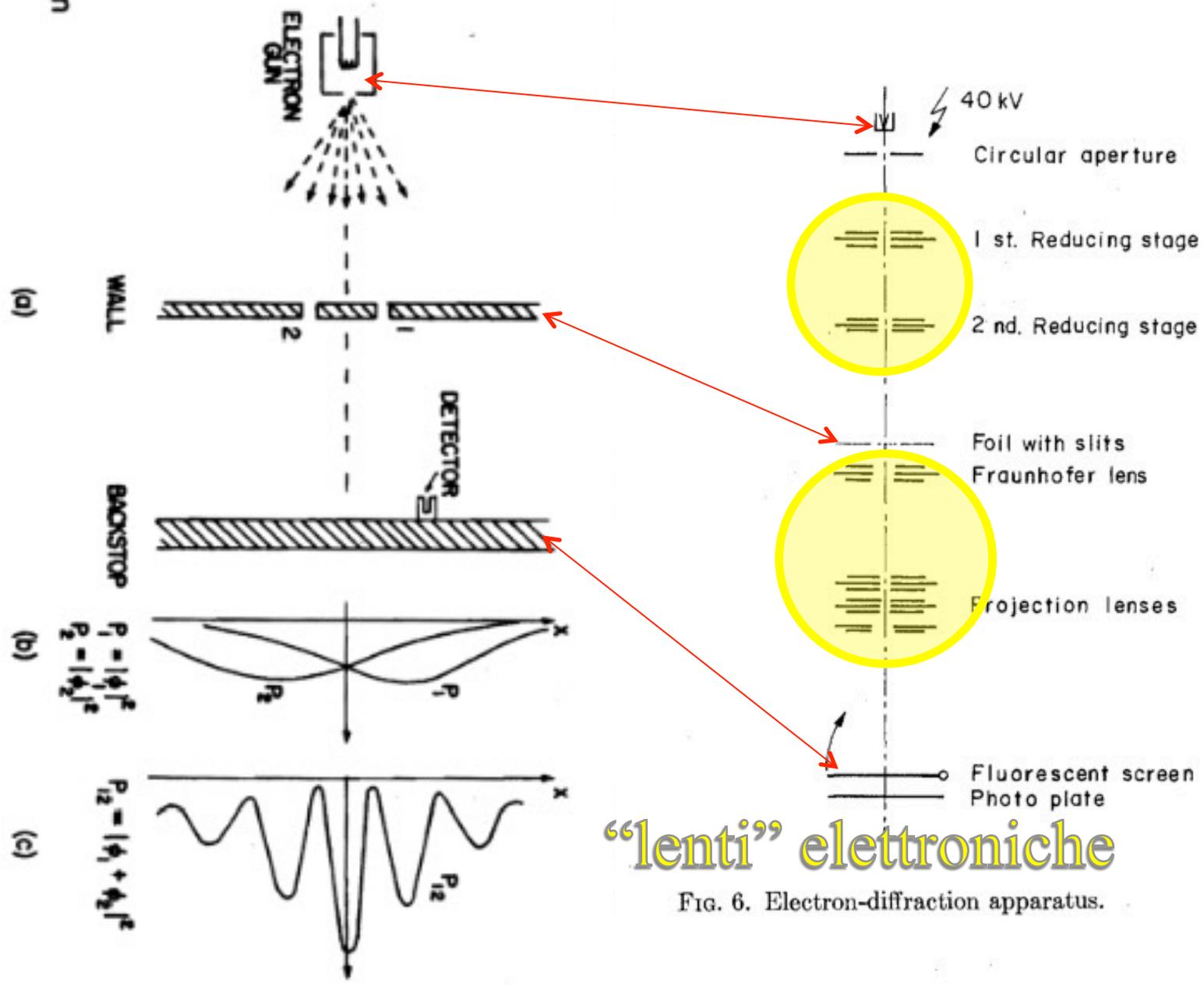
Esigenze di *visibilità delle frange* e di *coerenza* impongono una geometria in cui:

- dimensione sorgente primaria, larghezza 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 ...

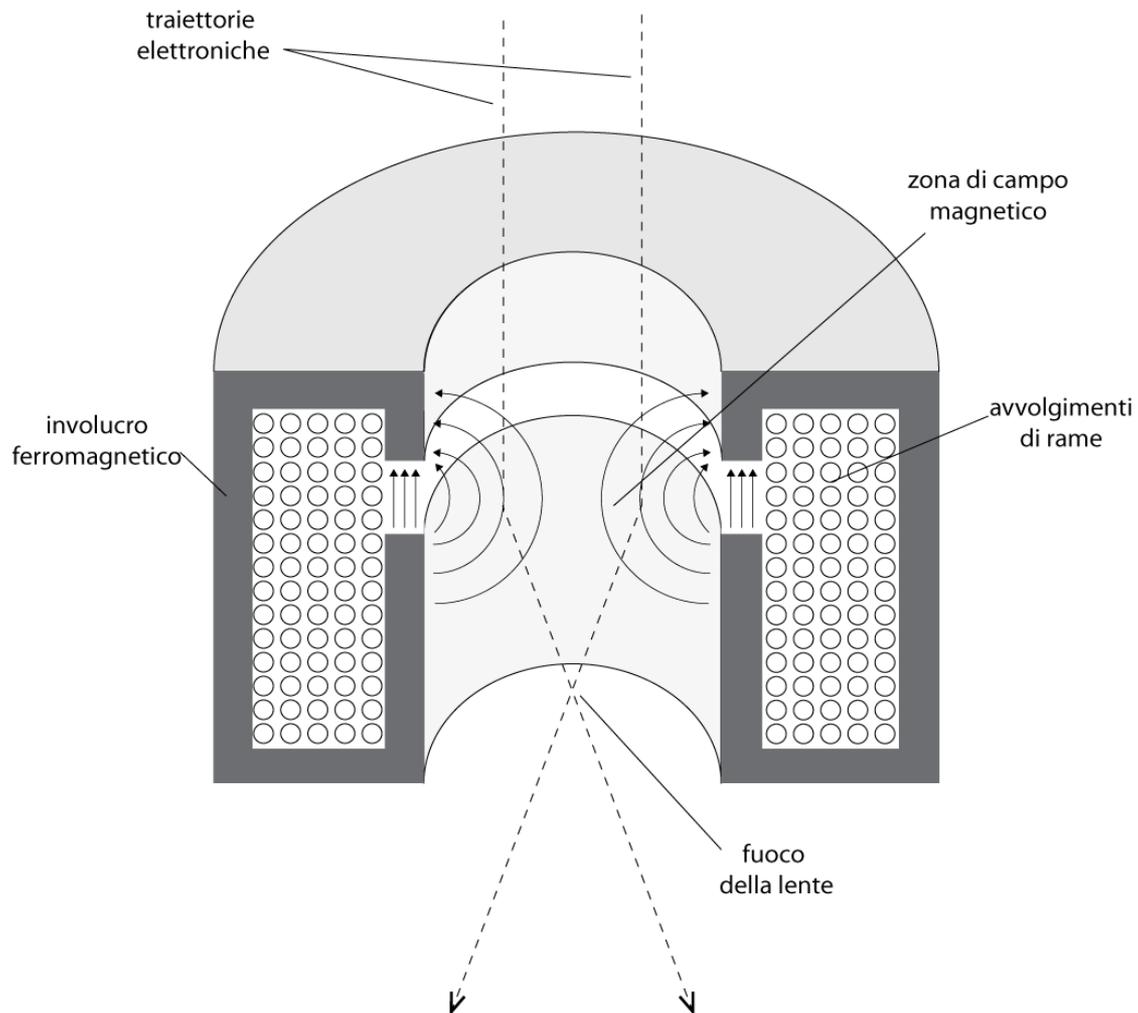


“lenti” elettroniche

FIG. 6. Electron-diffraction apparatus.

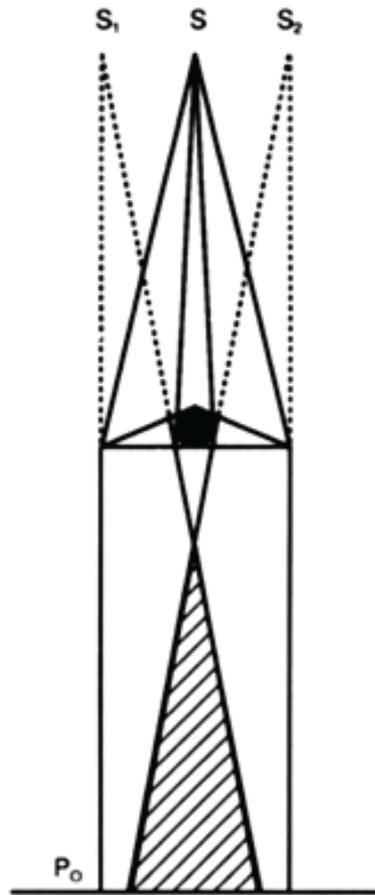
C. Jönsson (Univ. Tubinga) 1961

lente magnetica

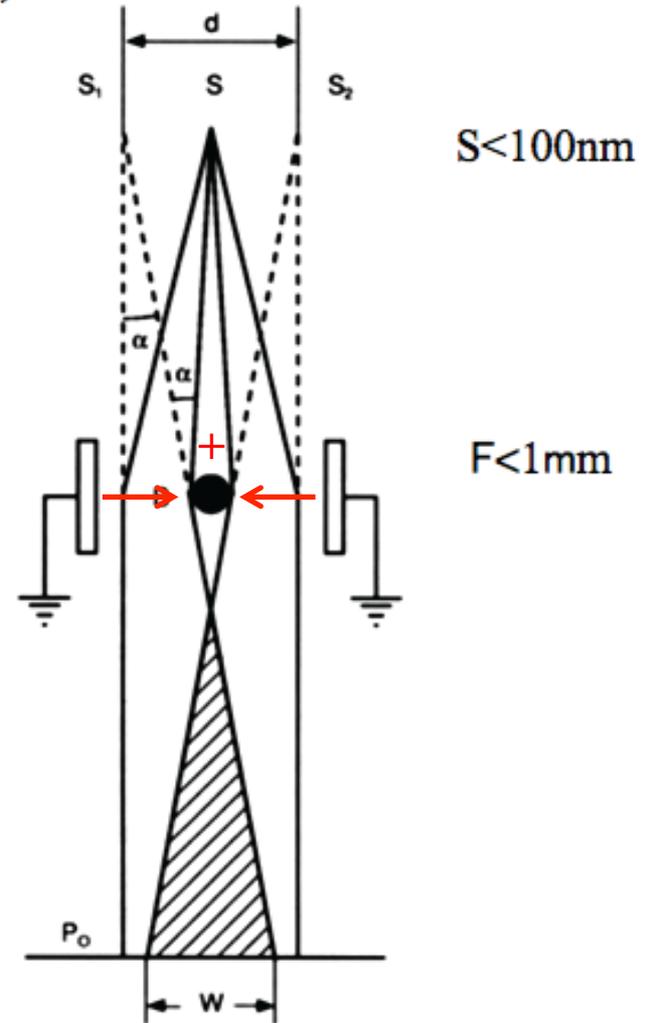


biprisma elettronico (Möllensted, Düker)

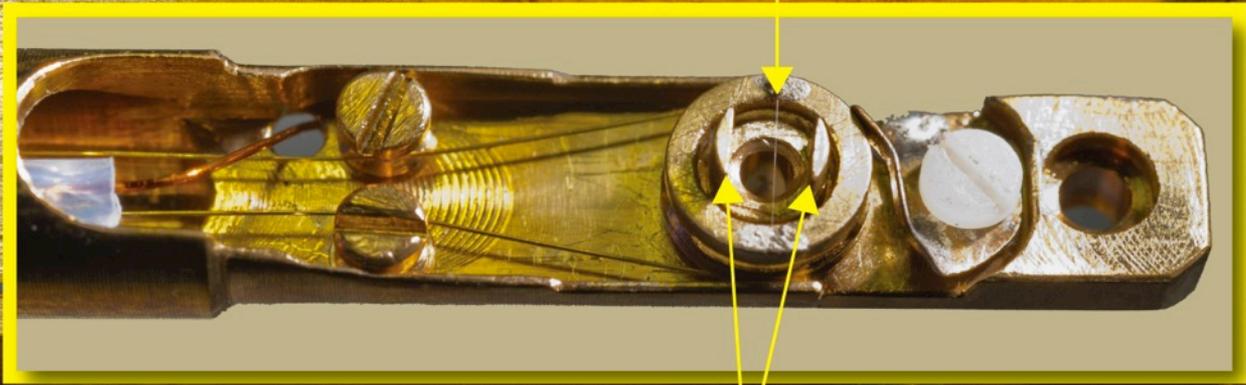
Tubinga (1955)



biprisma di Fresnel (luce)



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI FISICA
INV. N° 13661

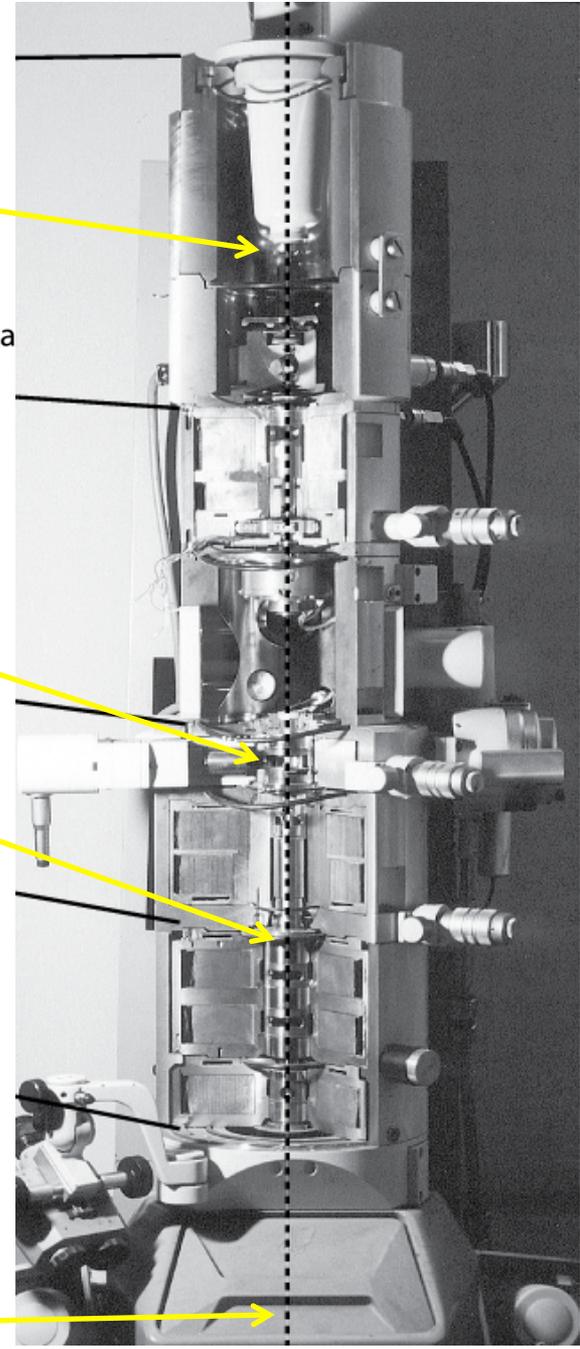
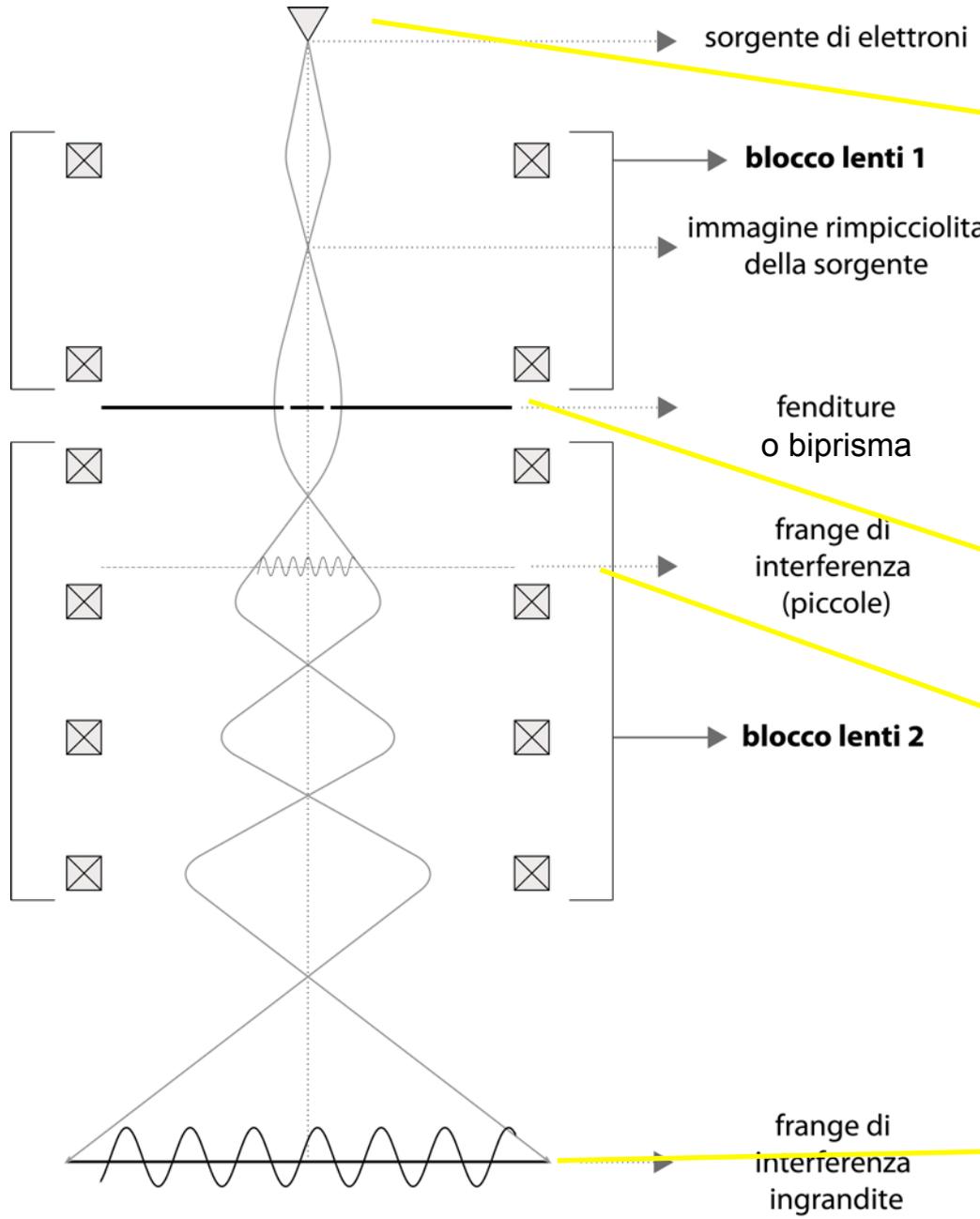


F

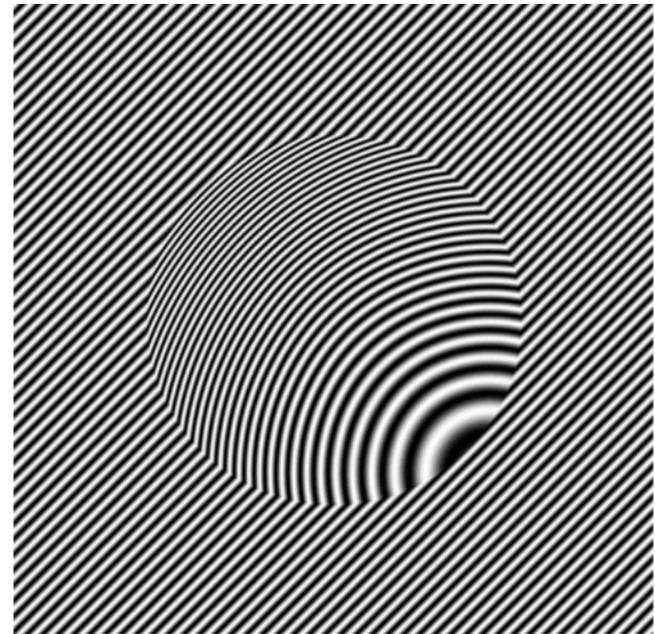
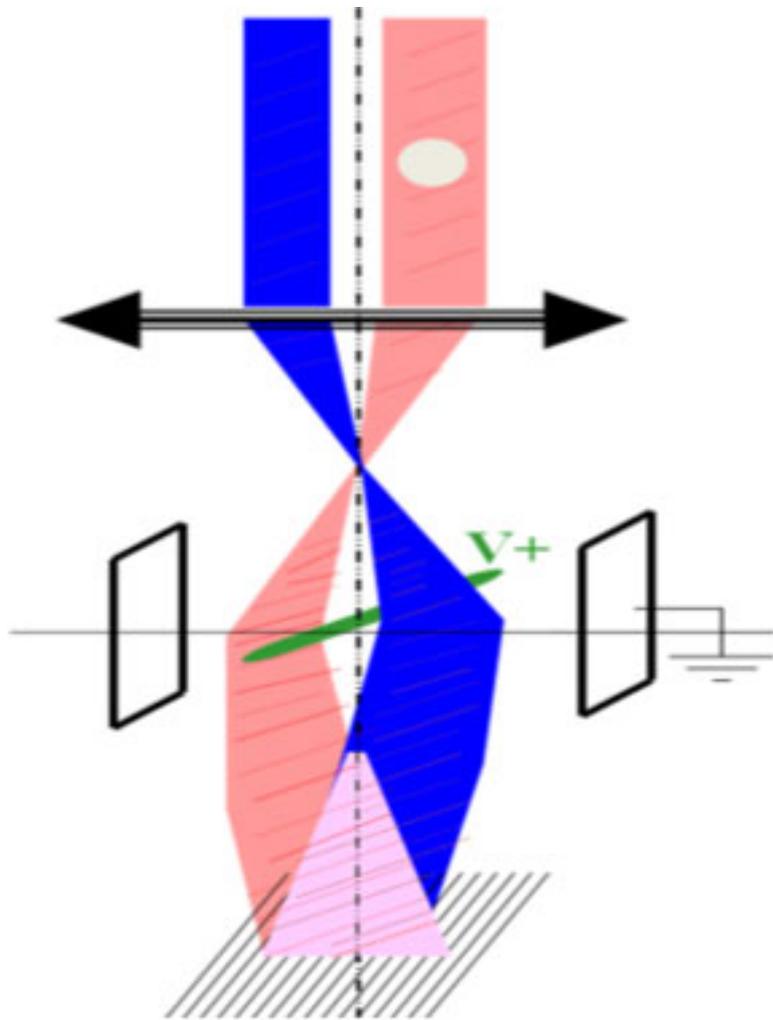
P







Excursus applicativo: l'olografia elettronica

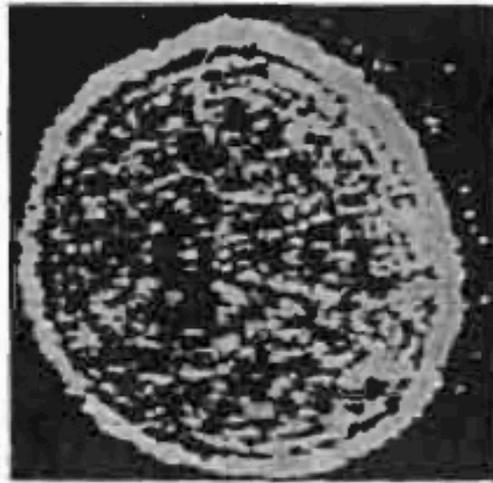


Interferogramma di una regione sferica di campo elettrico costante

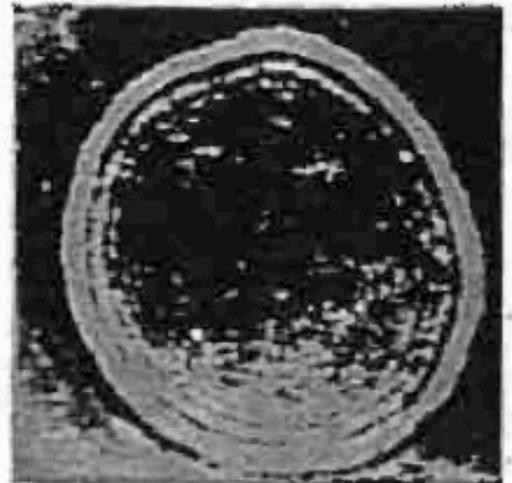
K.H. Hermann (Siemens) Intensificatore di immagine (1971)



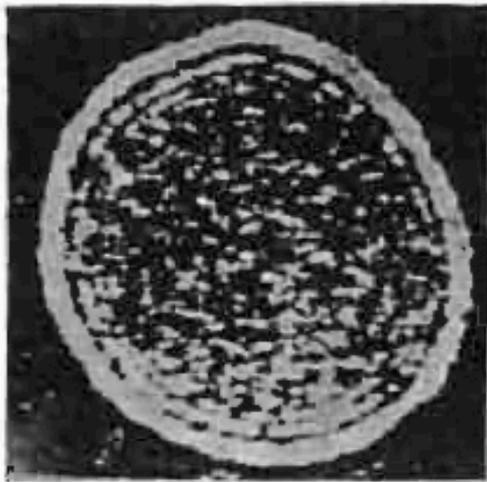
$\tau = 1/25 \text{ s}$



$\tau = 10 \text{ s}$



$\tau = 20 \text{ s}$

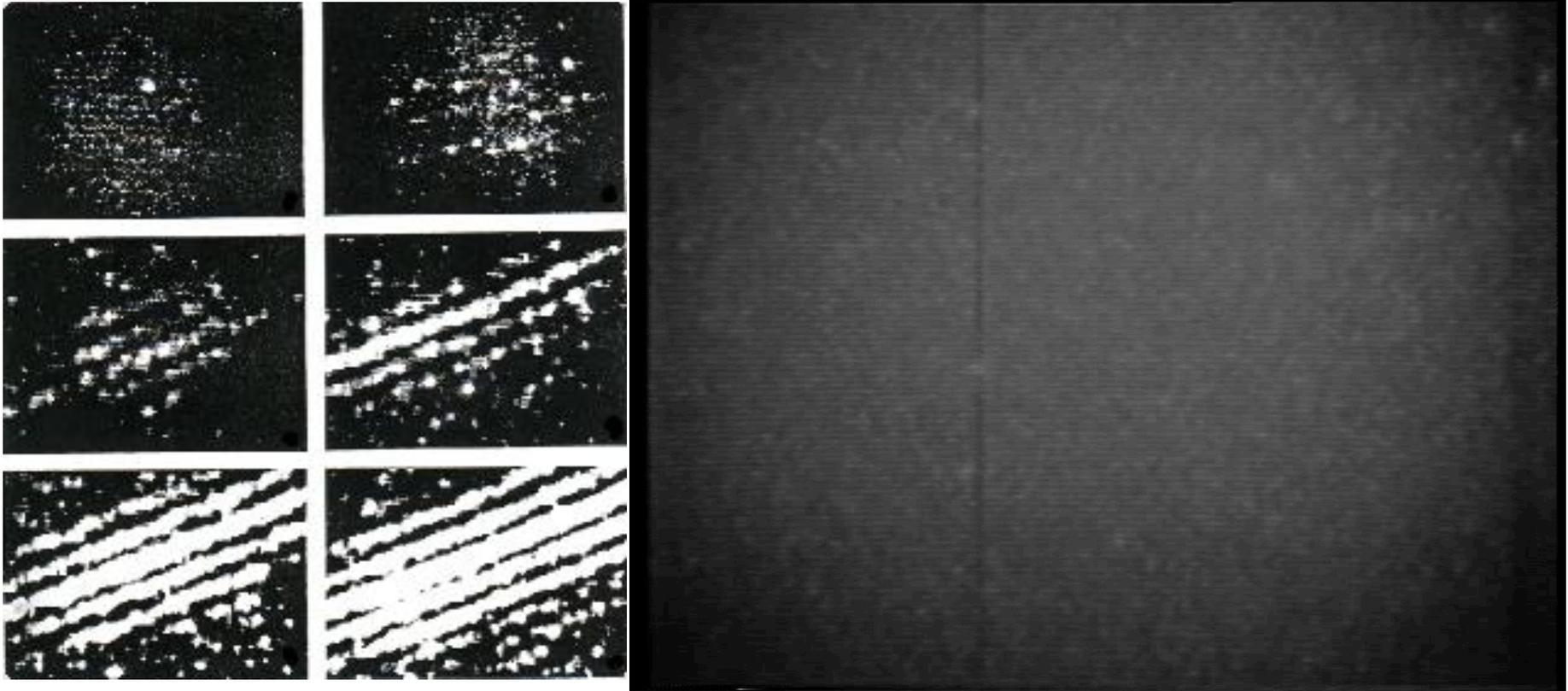


$\tau = 60 \text{ s}$



$\tau = 120 \text{ s}$

Esperimento Merli Missiroli Pozzi (1976)

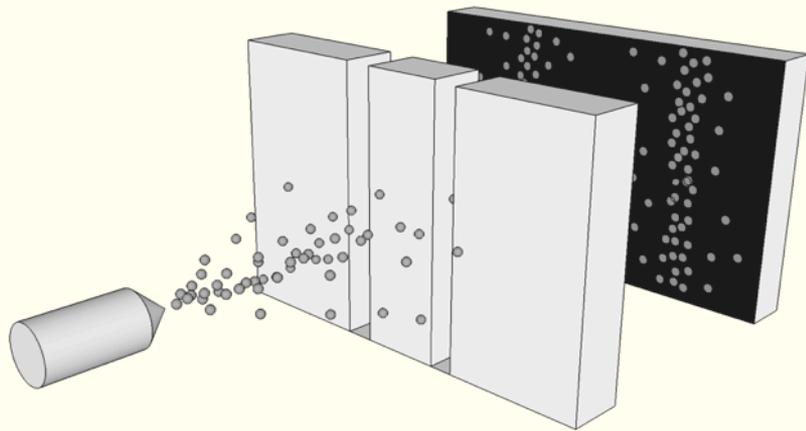


Il primo esperimento di interferenza in cui si visualizzano i singoli elettroni: l'esperimento più bello!

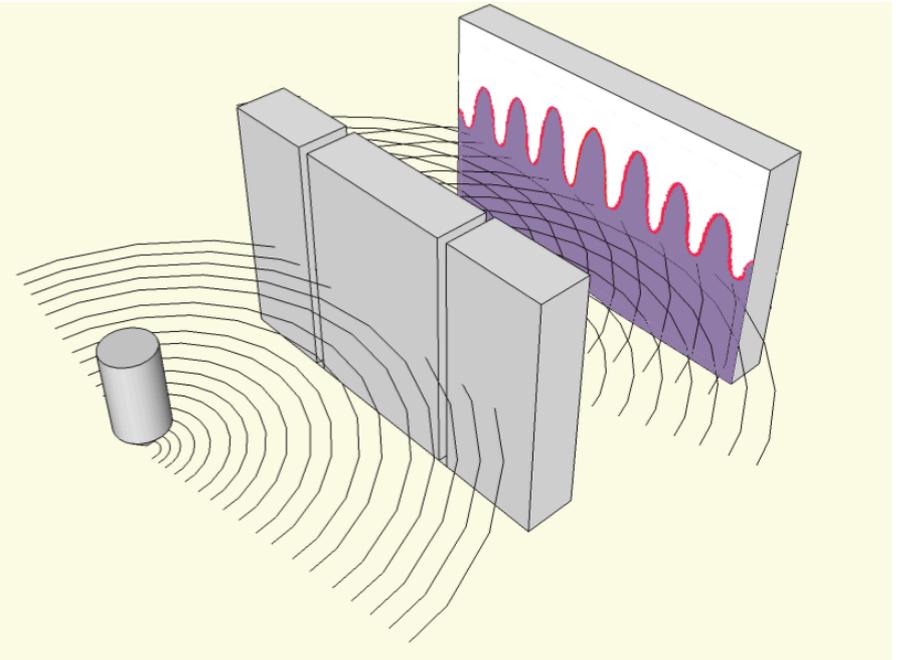
Interpretazione: criterio *metodologico*

tener separato:

- 1) ciò che vediamo con gli occhi o con gli strumenti di misura (*i fatti*)**
- 2) ciò che il pensiero elabora per spiegare quei fatti (*i modelli*)**

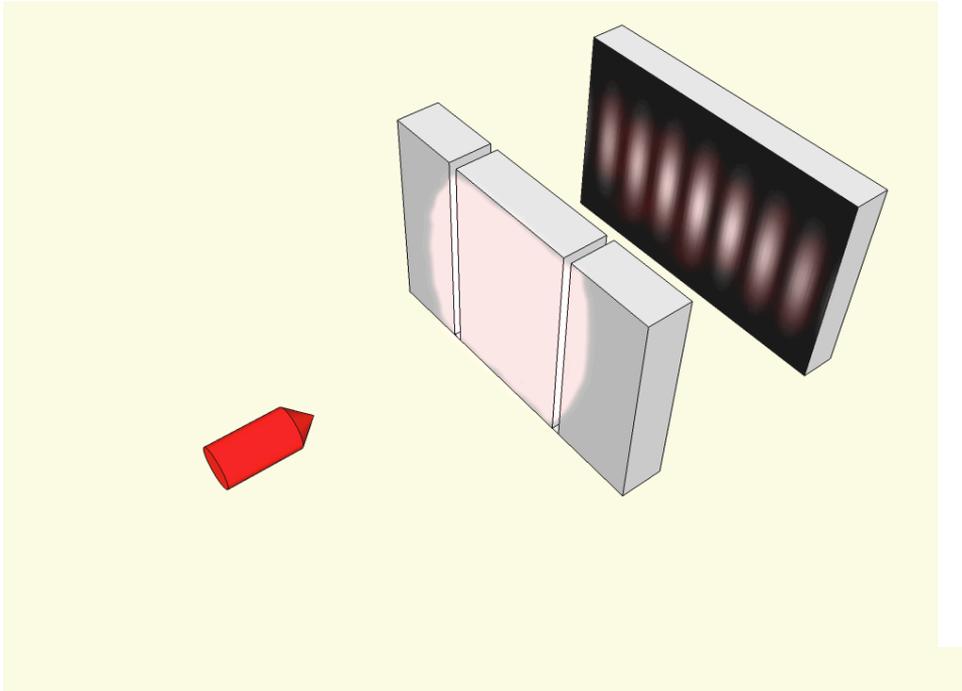


particelle

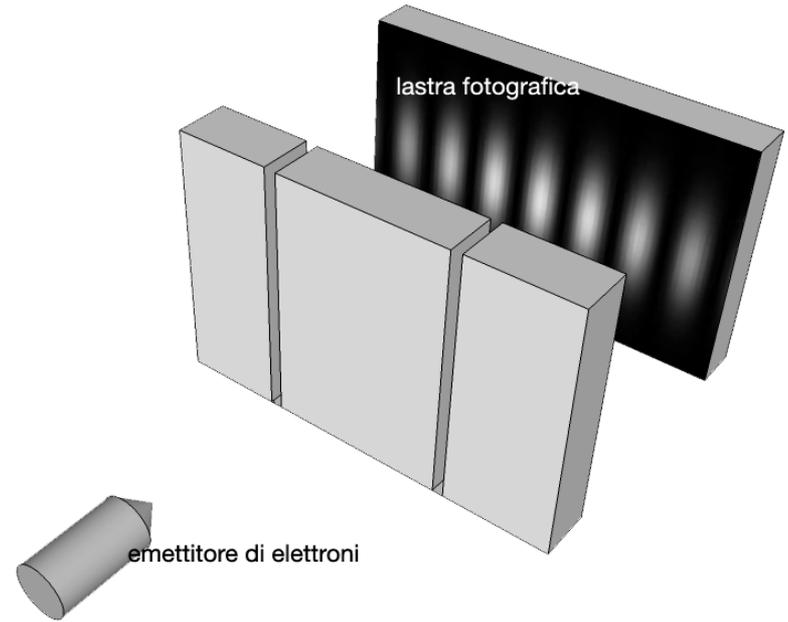


onde

si “vede” tutto

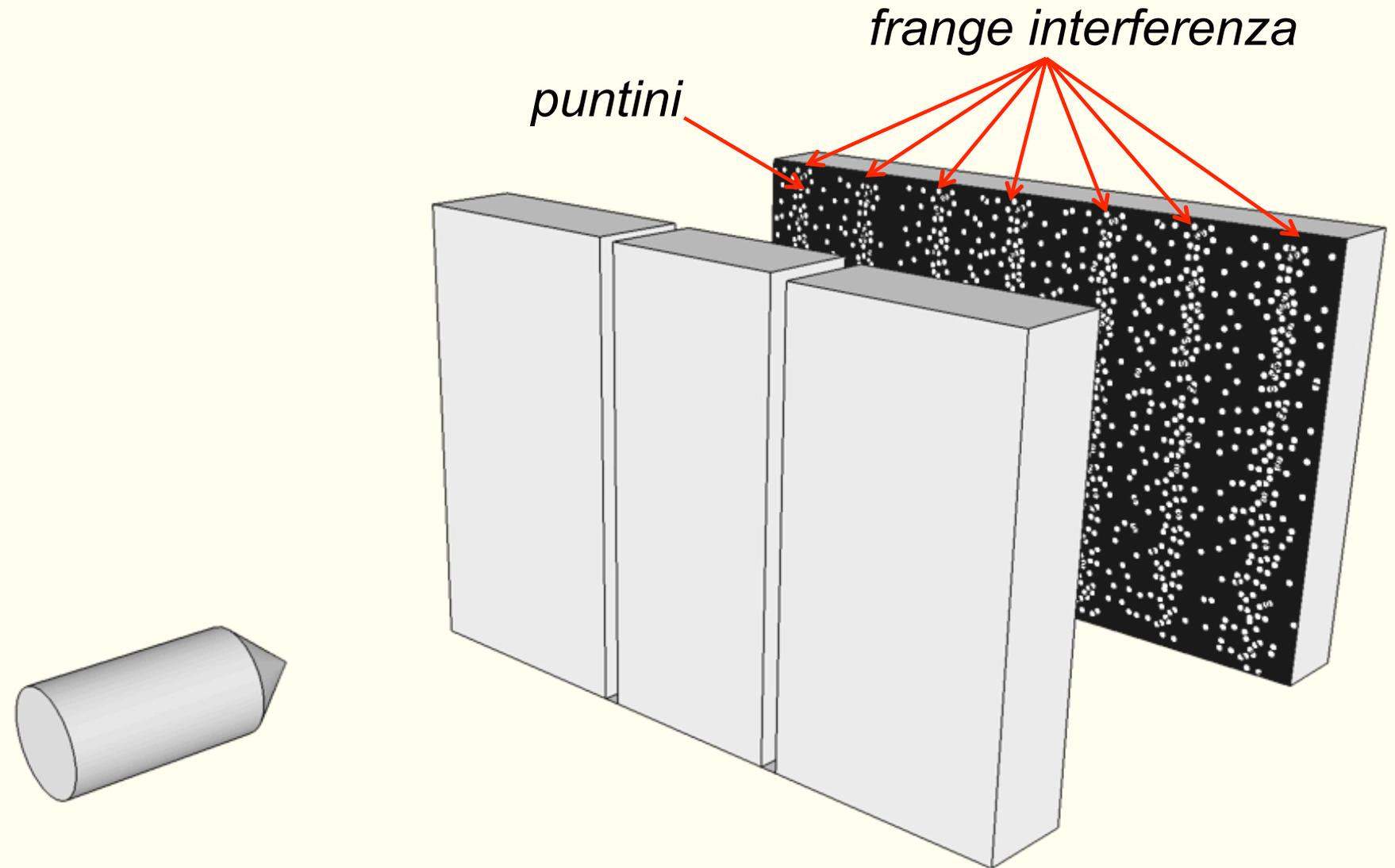


fascio intenso di luce



..... o di elettroni

non si “vedono” le onde, ma il modello ondulatorio
apparentemente funziona



modello ondulatorio / modello particellare ?

- *un solo elettrone/fotone per volta*
- *cosa interferisce con cosa?*

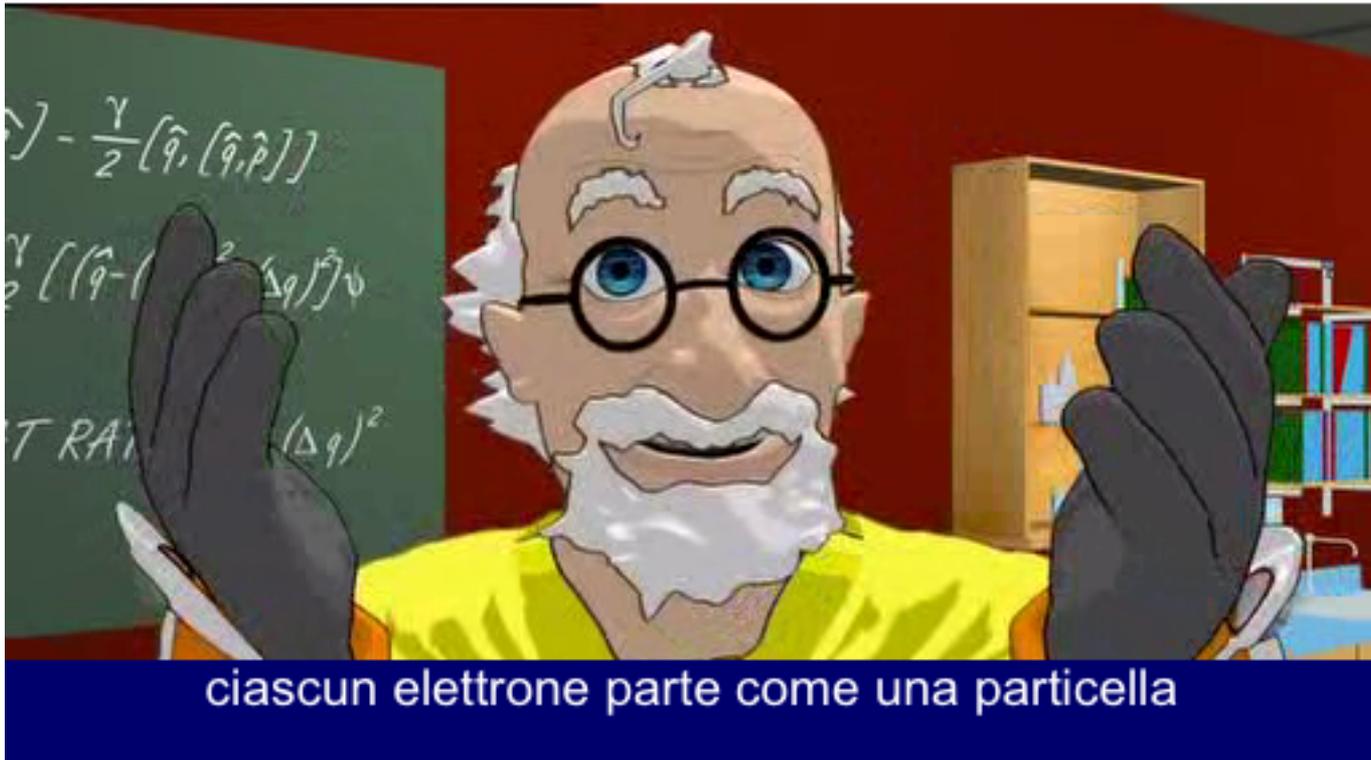


Paul M. Dirac:

*"ogni fotone [o elettrone]
interferisce con sè stesso"*

*I principi della meccanica quantistica
(Boringhieri, 1959) p.13*

Interpretazione “fantasiosa”: l'uno che si divide in due ...



Dr. Quantum (The infamous double slit experiment):

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

Interpretazione “tutto-onda”: E. Schrödinger

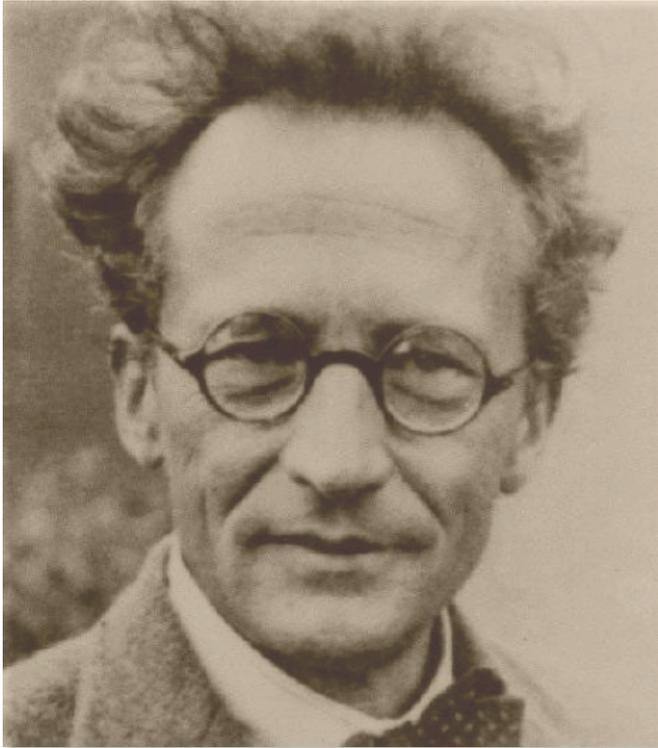
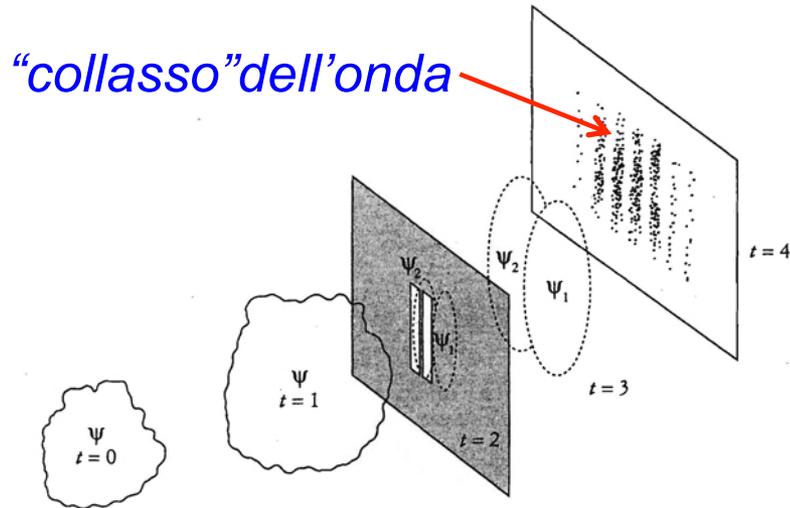


Figura 35.

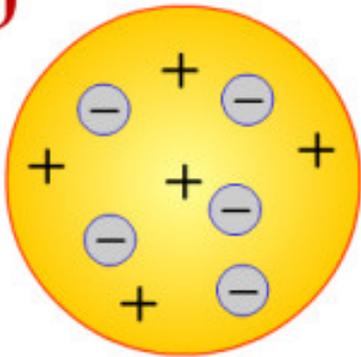
Una «nube» di funzione d'onda ψ che si avvicina a due fessure ($t = 0$ e $t = 1$), le attraversa, si divide in due ($t = 2$), si espande e si sovrappone ($t = 3$) e urta lo schermo ($t = 4$).



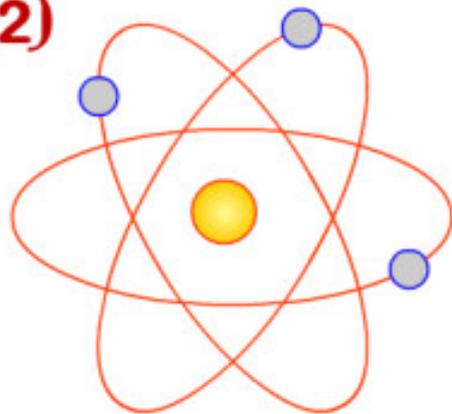
ψ = funzione d'onda

“Non si deve attribuire 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)

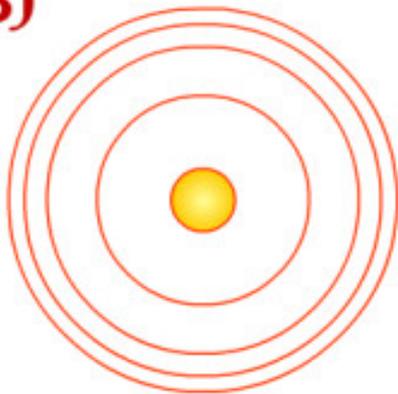
(1)



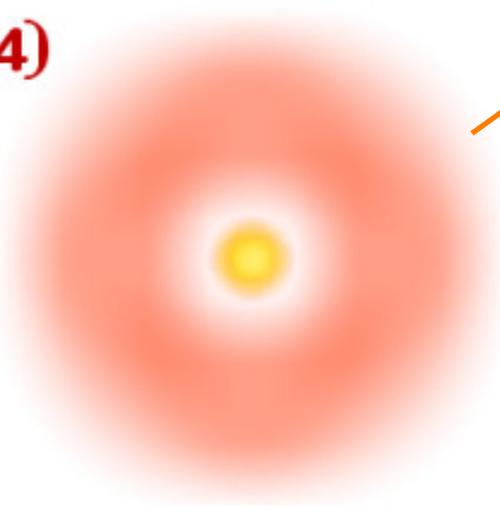
(2)



(3)



(4)



“nuvola” elettronica



Complementarità onda-particella: Niels Bohr



Niels Bohr

Ognuno dei due modelli (corpuscolare o ondulatorio) permette di spiegare soltanto una parte dei fatti. Per una descrizione completa sono necessari *entrambi*.

Sono perciò descrizioni parziali e *complementari*

Modello statistico-probabilistico: Born, Heisenberg



Max Born



Werner Heisenberg

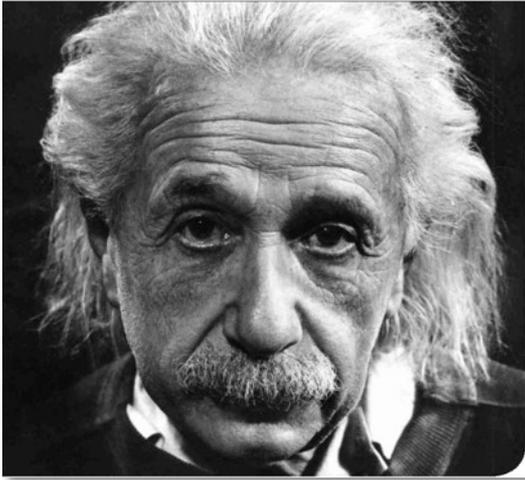
L'elettrone è una “*particella*”, il cui stato è descritto da una *funzione d'onda* - quella di Schrödinger - ma con significato non di onda reale, bensì di “*onda di probabilità*”. Questa non ci dice dove esso sia in un certo istante, ma solo qual'è la *probabilità* che si trovi da qualche parte. La probabilità diventa certezza solo quando si effettua una *misura*. Ma, effettuando la misura della posizione, si introduce una *indeterminazione* nella velocità e quindi si perde la possibilità di prevedere con certezza il moto successivo.



“There is no quantum world... it is wrong to think that the task of physics is to find out how Nature *is*. Physics concerns *what we can say* about Nature.”



“But the atoms or the elementary particles are not real; they form a world of *potentialities* or *possibilities* rather than one of things and facts.”



Se le “stranezze” della meccanica quantistica non vi convincono del tutto, consolatevi, siete in buona compagnia ...

Some physicists, among them myself, cannot believe that we must abandon, actually and forever, the idea of direct representation of physical reality in space and time; or that we must accept the view that events in nature are analogous to a game of chance . Probably never before has a theory been evolved which has given a key to the interpretation and calculation of such a heterogeneous group of phenomena of experience as has quantum theory. In spite of this, however, I believe that the theory is apt to beguile us into error in our search for a uniform basis for physics, because, in my belief, it is an incomplete representation of real things, although it is the only one which can be built out of the fundamental concepts of force and material points (quantum corrections to classical mechanics). The incompleteness of the representation leads necessarily to the statistical nature (incompleteness) of the laws. (**Albert Einstein**, on Quantum Physics, 1954)

“vedere” di più: esperimento *which way?*



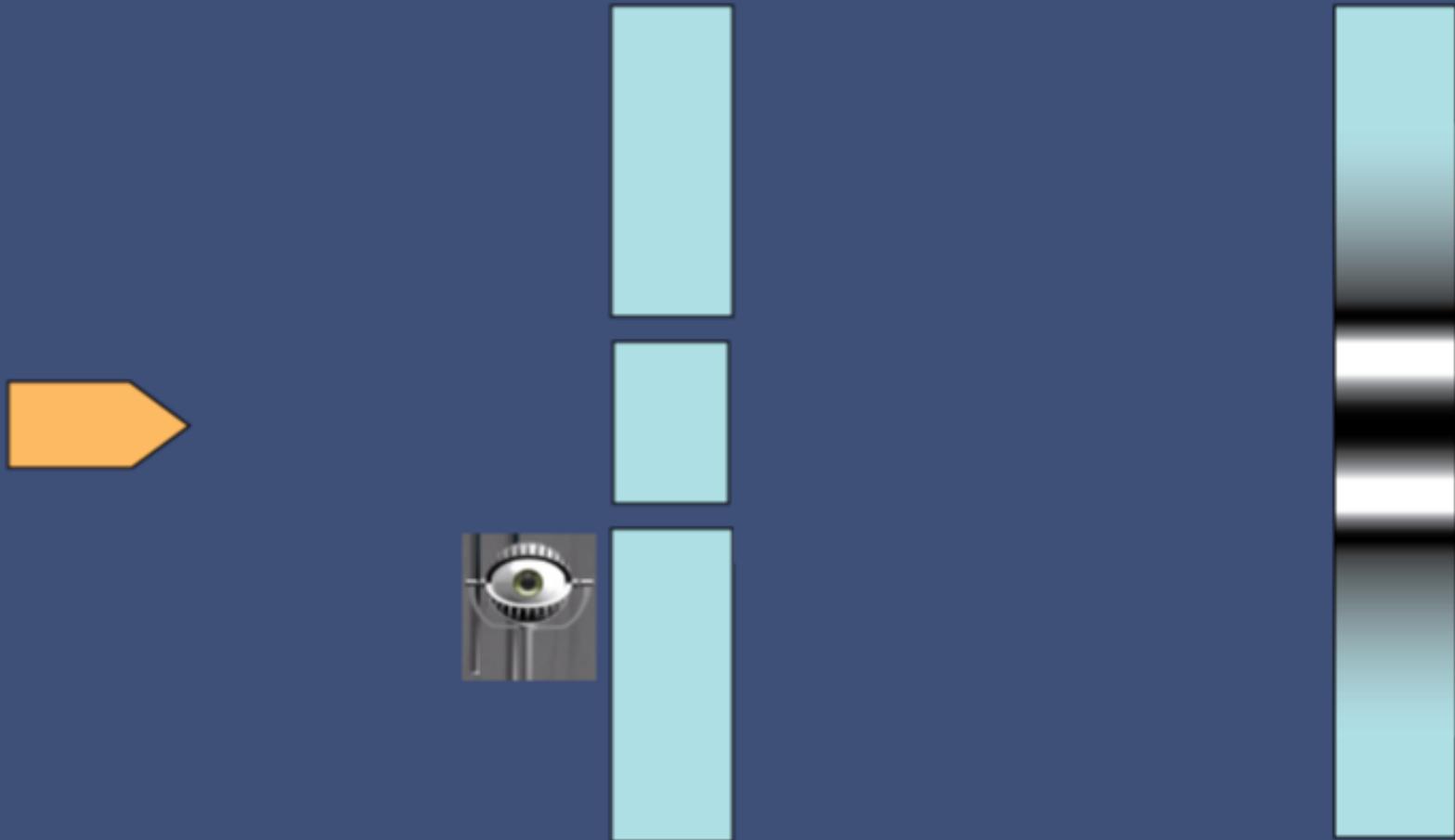
“vedere” di più: esperimento *which way?*



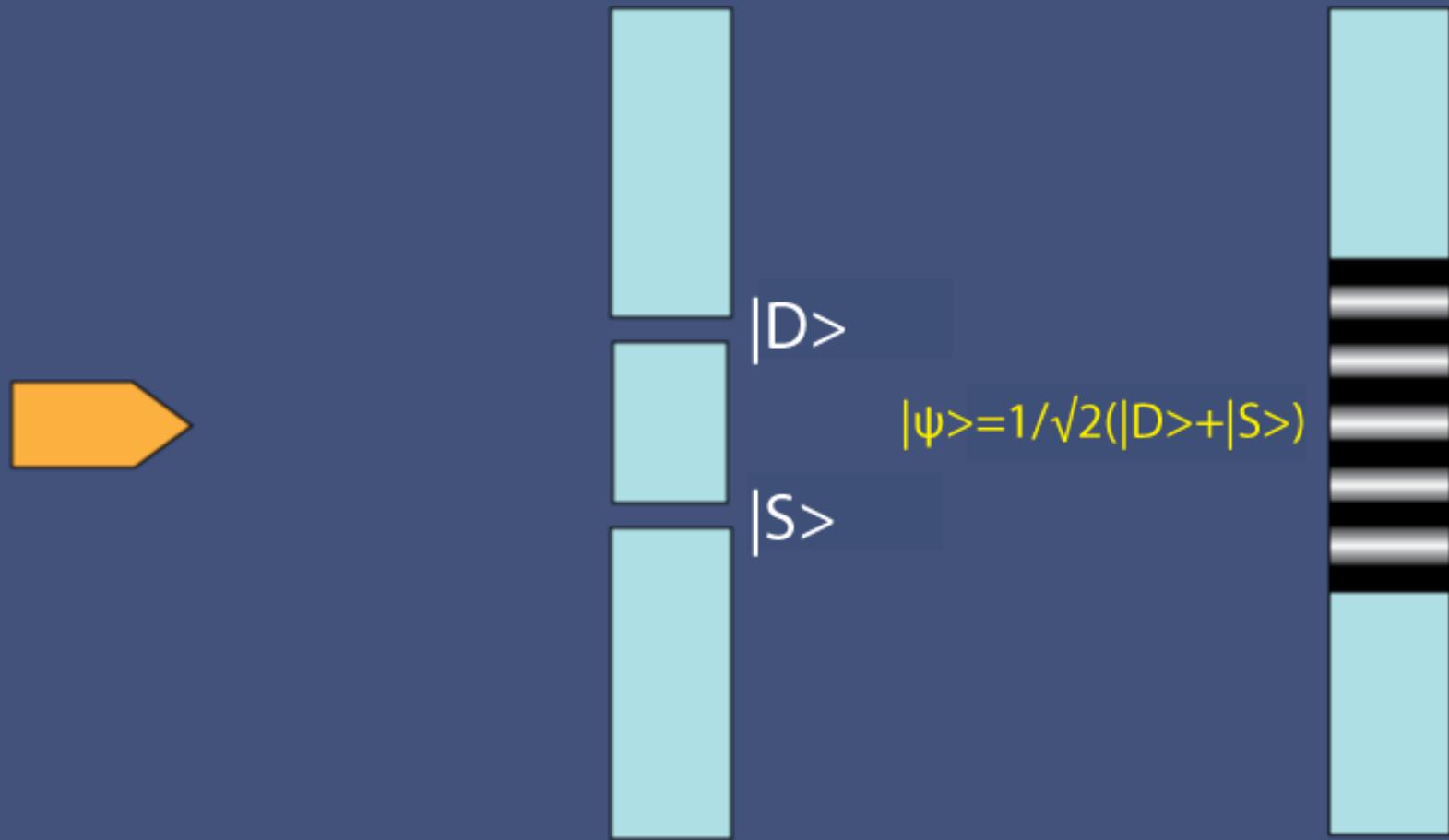
?



“vedere” di più: esperimento *which way?*



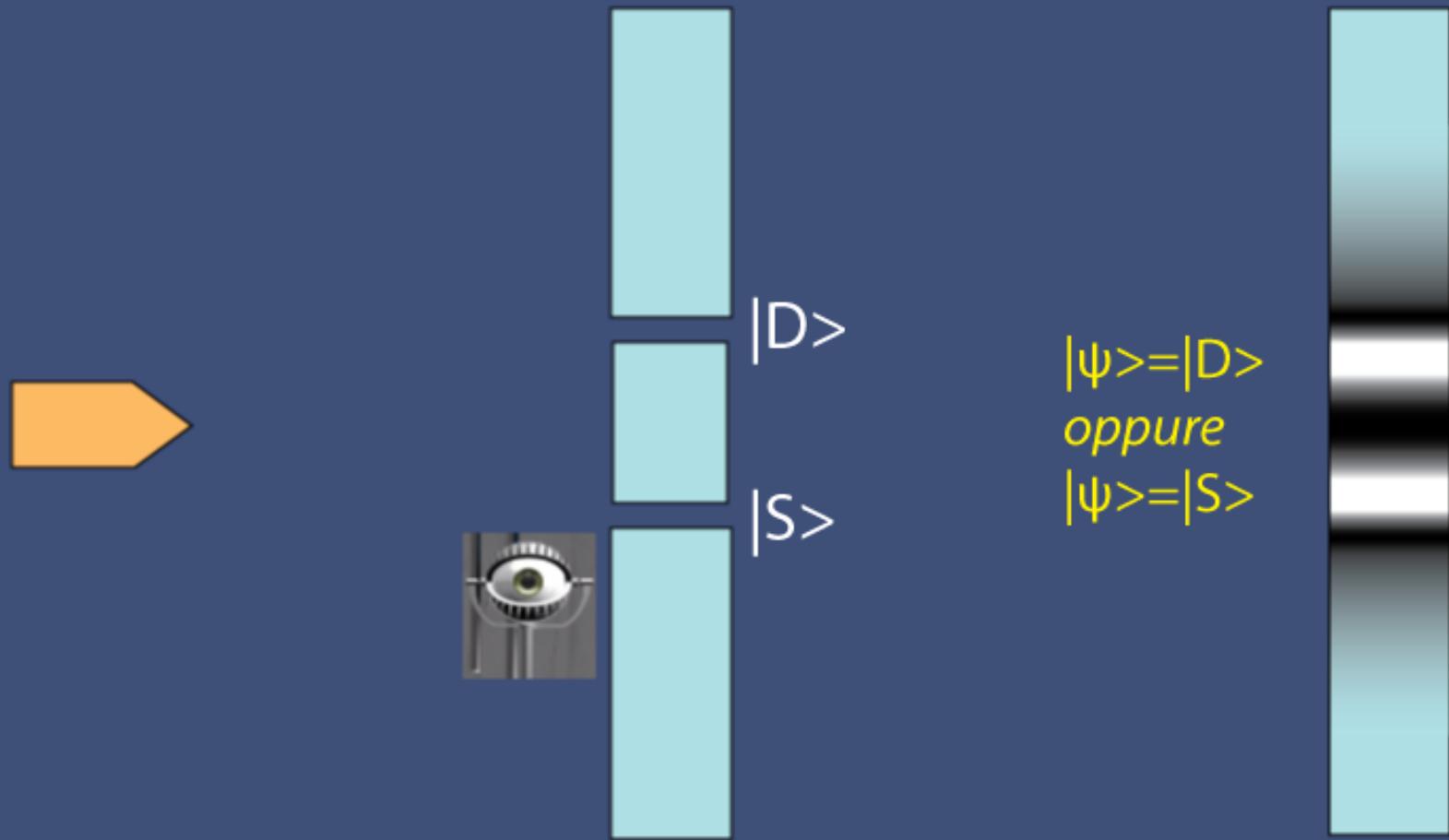
senza informazione "which way?"



$$||\psi\rangle|^2 = 1/2(|D\rangle + |S\rangle)^2$$

interferenza

con informazione "which way?"



$|\psi\rangle = |D\rangle$
oppure
 $|\psi\rangle = |S\rangle$

$$||\psi\rangle|^2 = 1/2[(|D\rangle)^2 + (|S\rangle)^2]$$

no interferenza

appare esserci una interdipendenza tra l'oggetto microscopico, il modo che esso ha di rivelarsi, le sue proprietà ... e l'apparato sperimentale che abbiamo predisposto per studiarlo

“osservare” significa necessariamente interagire con l'oggetto della osservazione (dove l'interazione non deve essere intesa semplicemente nel modo classico di “perturbazione” o “disturbo”) modificandone la realtà ...

Interpretazione: esempi (non esaustivi) ...



The challenge of quantum reality:

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

In sintesi

L'esperimento più bello impone di ripensare in modo critico ad alcune peculiarità della fisica classica:

- il concetto di *traiettoria*, basato su un particolare principio di causalità (*il determinismo classico*);
- il modello classico (così come il formalismo classico) di oggetto, basato su un principio di *non contraddizione*;
- la modellizzazione classica dell'oggetto, basata sulla possibilità di "proiettare" le costruzioni simboliche in uno "stesso spazio" (isomorfo a quello ordinario) (permettendo la *visualizzabilità*);
- l'assunzione della *separabilità* tra le misure relative alle proprietà degli oggetti e l'apparato di misura;

l'esperimento più bello della fisica

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

Materiale per l'approfondimento

Vedere pagina sito web

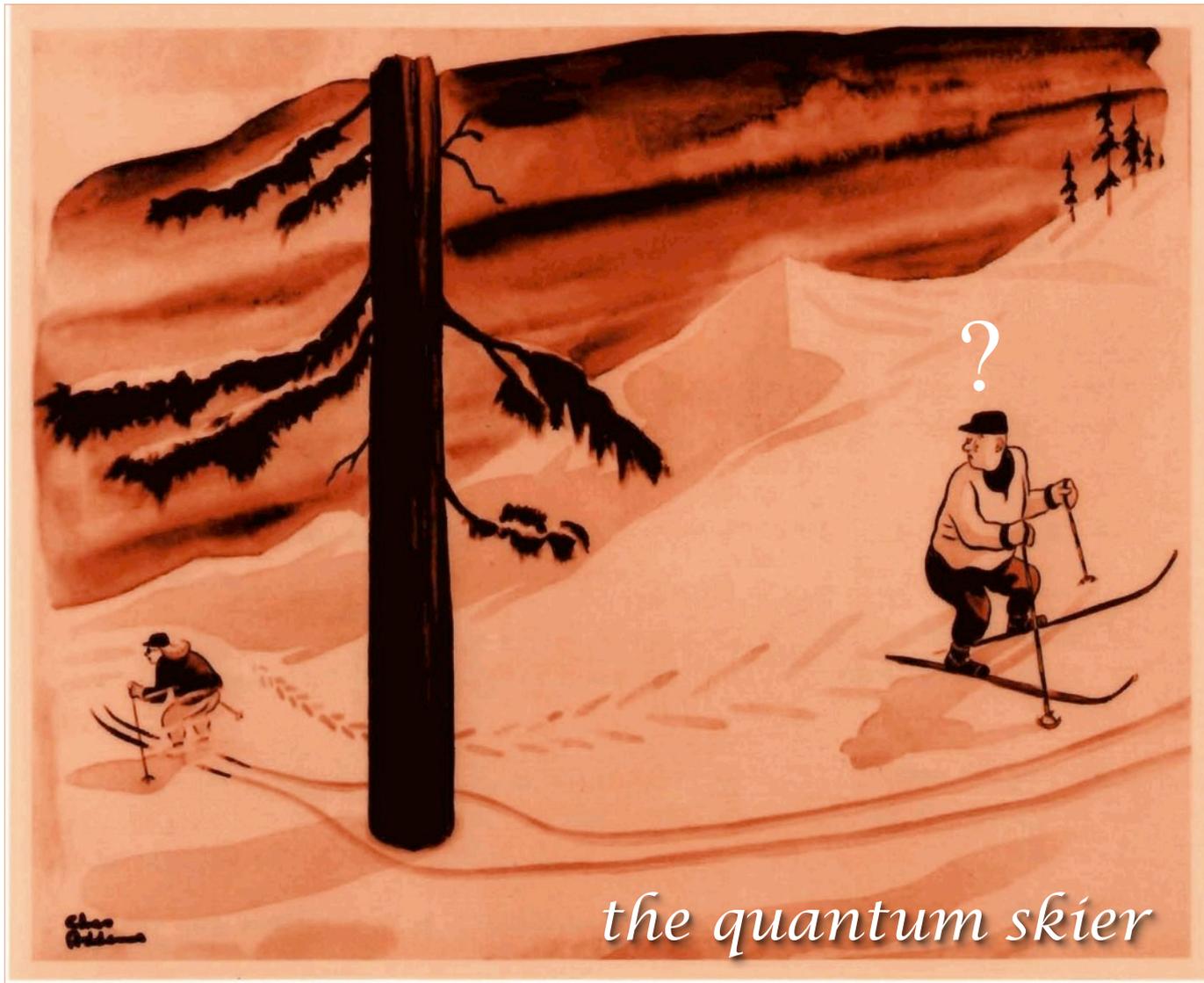
<http://l-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/didattica/materialeldr.html>

Riferimenti vari (articoli, libri, web...)

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

Per dubbi, chiarimenti, ecc. contattatemi via e-mail

lulli@bo.imm.cnr.it



Grazie a tutti per la pazienza e l'attenzione !