



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Einstein e Bohr, scontro tra giganti su alcuni pilastri della fisica moderna

Seminario INFN, 5.5.2020

Olivia Levrini

Dipartimento di Fisica e Astronomia



Albert Einstein
(Ulm 1879 - Princeton 1955)



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Albert Einstein (1879-1955)



“ I grandi scienziati del Novecento ”
Rai educational



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

”Attraverso la lettura di libri di scienza popolare mi ero convinto ben presto che molte delle storie che raccontava la bibbia non potevano essere vere. La conseguenza fu che divenni un accesissimo sostenitore del ***libero pensiero***, accomunando alla mia nuova fede l’impressione che i giovani fossero coscientemente ingannati dallo stato con insegnamenti bugiardi; e fu una impressione sconvolgente. Da questa esperienza trassi un atteggiamento di sospetto contro ogni genere di autorità, e di scetticismo verso le convinzioni particolari dei diversi ambienti sociali: e questo atteggiamento non mi ha più abbandonato, anche se poi, per una più profonda comprensione delle connessioni causali, abbia perso un po’ della sua asprezza primitiva.”

(A. Einstein, 1949, “Autobiografia Scientifica”)



**“E’ più facile distruggere un atomo di un
pregiudizio”**

Libertà esterna:

libertà di espressione e di istruzione e deve essere garantita dalla legge

Libertà interna:

*libertà dello spirito e del pensiero che si contrappone al **pregiudizio autoritario***



Pregiudizi autoritari vs. pregiudizi metafisici

“Un rapido sguardo allo sviluppo effettivo ci insegna che i grandi passi in avanti nella conoscenza scientifica sono nati solo in piccola parte in questo modo [induttivo]. Poiché se un ricercatore intraprendesse il proprio lavoro senza alcuna **idea preconcetta**, come potrebbe selezionare quei fatti dal vasto mare dell’esperienza, e per di più, quelli abbastanza semplici da far venire alla luce solo le connessioni legittime? Io stesso ho elaborato la relatività partendo da **pregiudizi metafisici**”

(Einstein in P. Frank, “Einstein: his life and times” Knopf, 1947)



- Fiducia nell'intima ***unità della natura*** e nella necessità inderogabile di creare una teoria unificata capace di coglierla per intero
- Fiducia nell'idea del ***continuum*** e in un ***principio di causalità*** forte basato sulla continuità spaziotemporale dei processi
- Fiducia nella ***spiegazione formale della realtà*** naturale attraverso la matematica
- Fiducia nel principio di ***semplicità, economia e necessità logica***
- Fiducia nella ***simmetria*** delle leggi fisiche

Tratto da Greco, P. (2008). "Einstein. Vita e opere del padre della relatività. Alphatest.



“Sull’elettrodinamica dei corpi in movimento” (1905), uno dei “razzi fiammeggianti che gettano luce sulla fisica” (de Broglie)



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Il mondo visto dall'ufficio brevetti di Berna



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

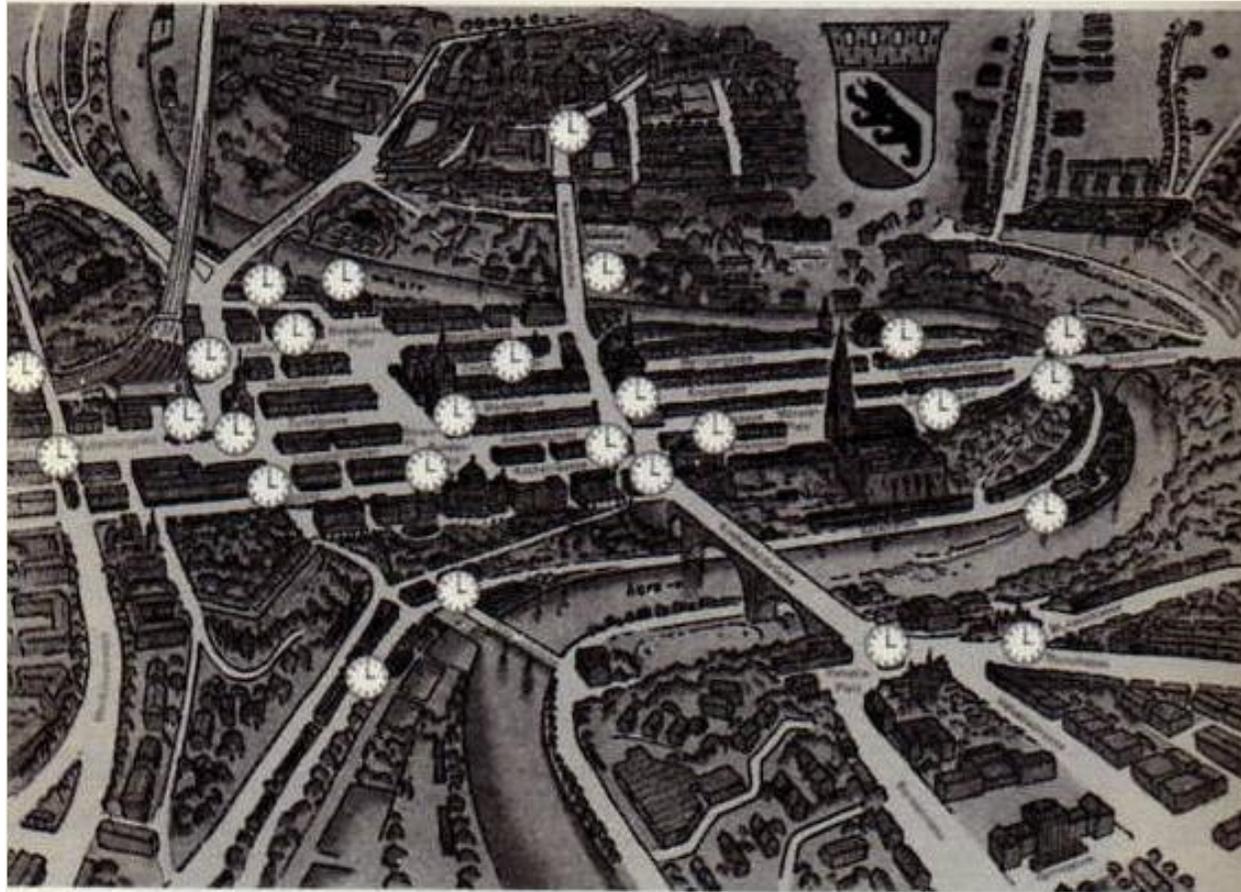
Favarger, 1900, all'Esposizione Universale di Parigi:

“Non dovete vagare a lungo per Parigi per notare numerosi orologi, sia pubblici sia privati, in disaccordo tra loro - qual è quello che mente di più? Di fatto, anche se a mentire è uno solo di essi, sospettiamo della sincerità di tutti. La gente acquisterà sicurezza solo quando tutti i singoli orologi segneranno, all'unanimità, la stessa ora, nello stesso istante [...].

I sistemi non automatici, i più primitivi e tuttavia i più diffusi, sono la causa diretta dell'**anarchia del tempo** cui dobbiamo sottrarci.”



Berna: una città orgogliosa della sua rete di orologi elettro-coordinati



La materializzazione del tempo

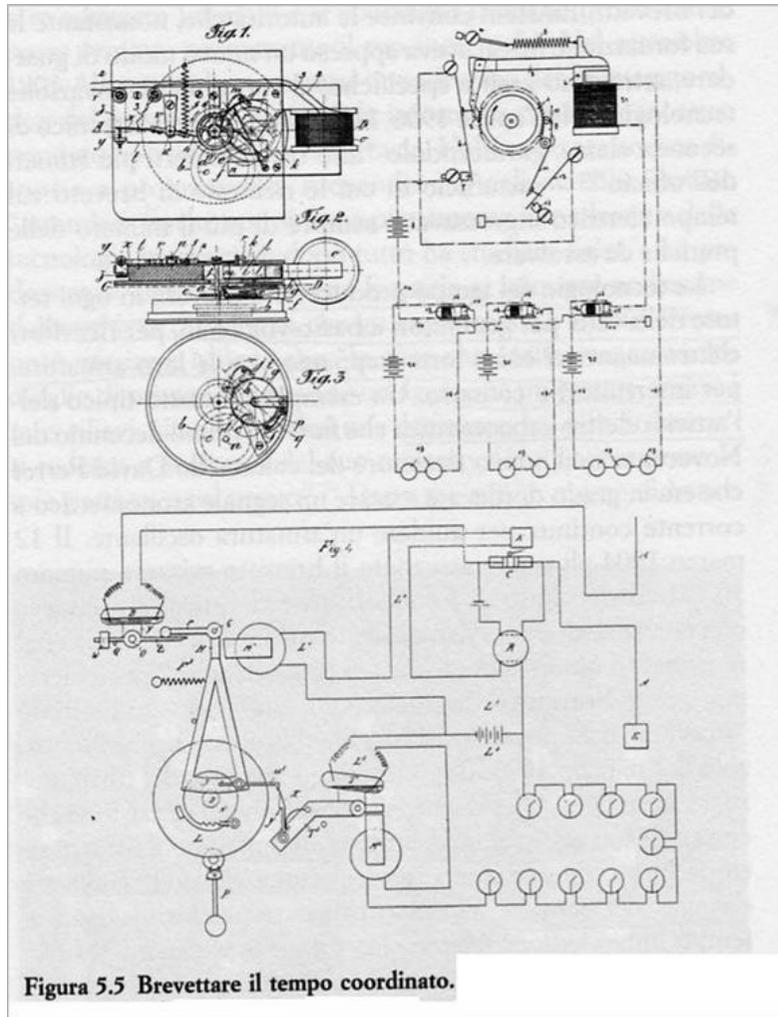


Figura 5.5 Brevettare il tempo coordinato.

“Era un mondo in cui non vi era più spazio per il tempo assoluto, teologico, di Newton; il suo posto era ora occupato da una *procedura*.”

(Galison P., “Gli orologi di Einstein, le mappe di Poincaré”, 2003)



“Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento” (1905)



Da “PARTE CINEMATICA” (Einstein, 1905)

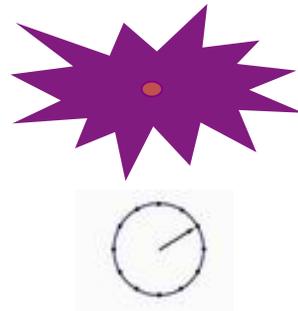
“Definizione di simultaneità

[...]

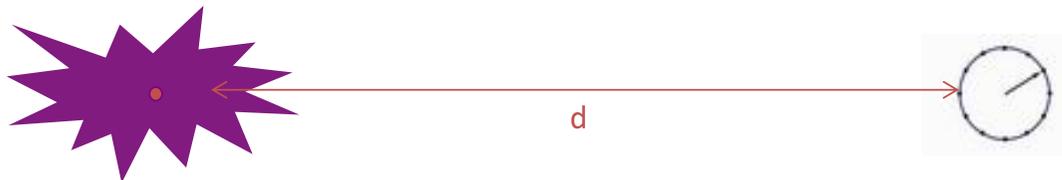
Se vogliamo descrivere il moto di un punto materiale, dobbiamo dare i valori delle sue coordinate in funzione del tempo. Tuttavia, si tenga presente che una descrizione matematica di questo tipo ha significato fisico solo se è già chiaro che cosa si intende per “tempo”. Non dobbiamo dimenticare che tutti i nostri giudizi in cui interviene il tempo sono sempre giudizi su eventi simultanei. Se, per esempio, dico che “il treno arriva qui alle 7 in in punto”, ciò significa, in pratica, che “il posizionamento della lancetta delle ore del mio orologio sul 7 e l’arrivo del treno sono eventi simultanei”.



Il tempo di un evento



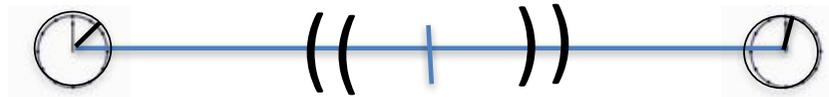
Il tempo di un evento distante nello spazio



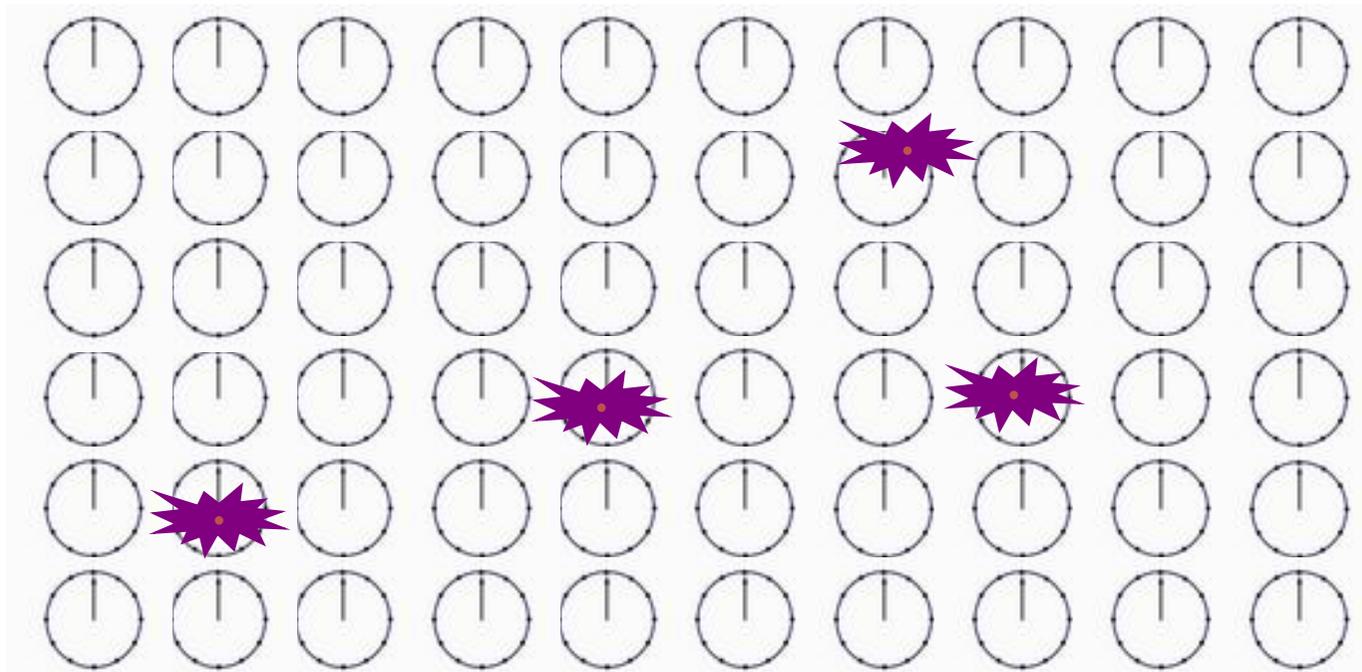
$$\Delta t \geq d/c$$



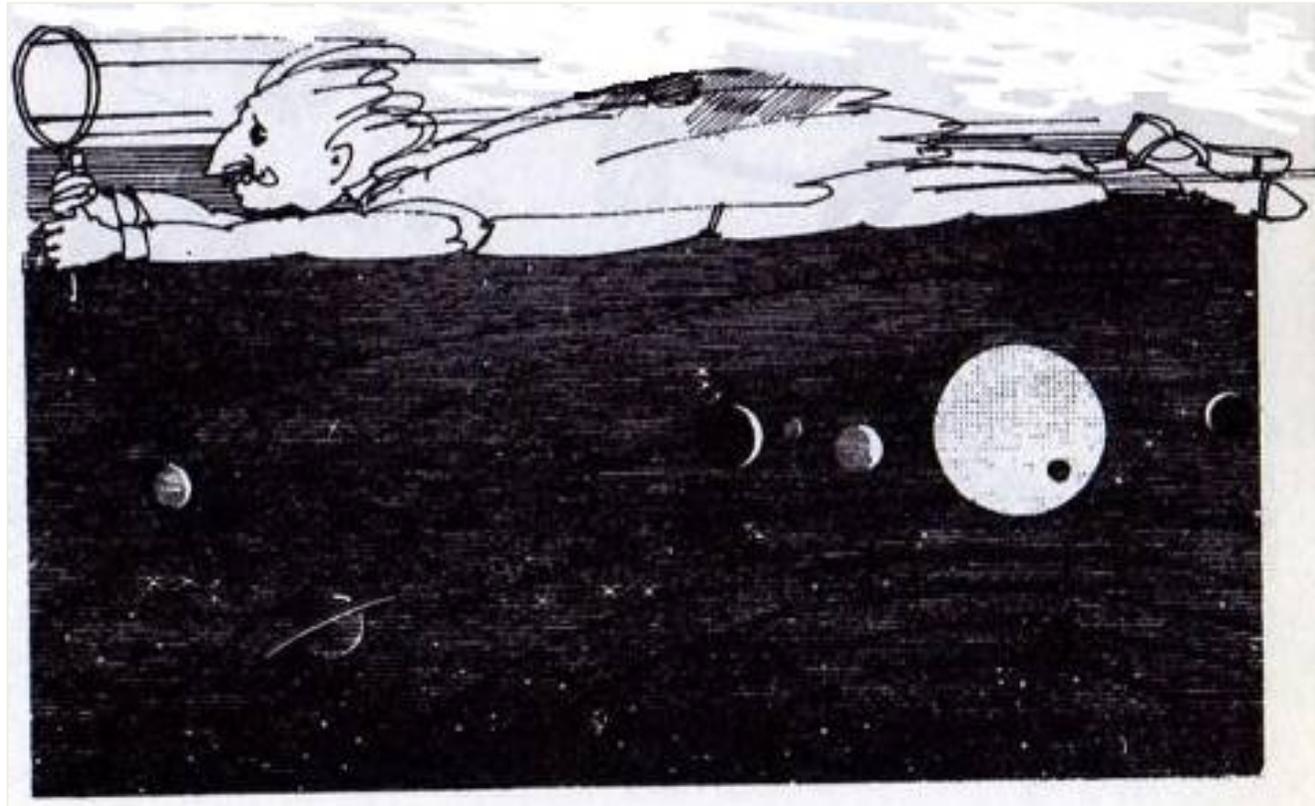
Il procedimento di sincronizzazione degli orologi e la costruzione del reticolo di orologi sincronizzato



La costruzione del reticolo di orologi sincronizzato come modo pratico per valutare il tempo di eventi lontani nello spazio



Com' è il mondo visto alla velocità della luce?



“Ma come trovare un tale principio universale [come quelli della termodinamica]? Un tale principio risultò, dopo dieci anni di riflessione, dal **paradosso in cui mi ero imbattuto già all’età di sedici** anni: se inseguissi un raggio di luce con la velocità c (velocità della luce nel vuoto), osserverei un tale raggio di luce come un campo elettromagnetico spazialmente **oscillante in quiete**. Tuttavia una cosa simile pare non verificarsi né in base all’esperienza né secondo le equazioni di Maxwell. Fin dal principio mi sembrò intuitivamente chiaro che, giudicato un tale punto di osservazione, **tutto doveva accadere secondo le stesse leggi valide per un osservatore che fosse in quiete relativamente alla Terra**. Come farebbe altrimenti il primo osservatore a sapere, o a poter constatare, che si trova in uno stato di rapido e uniforme movimento? E’ chiaro che in questo paradosso è già contenuto il **germe della teoria speciale della relatività**.

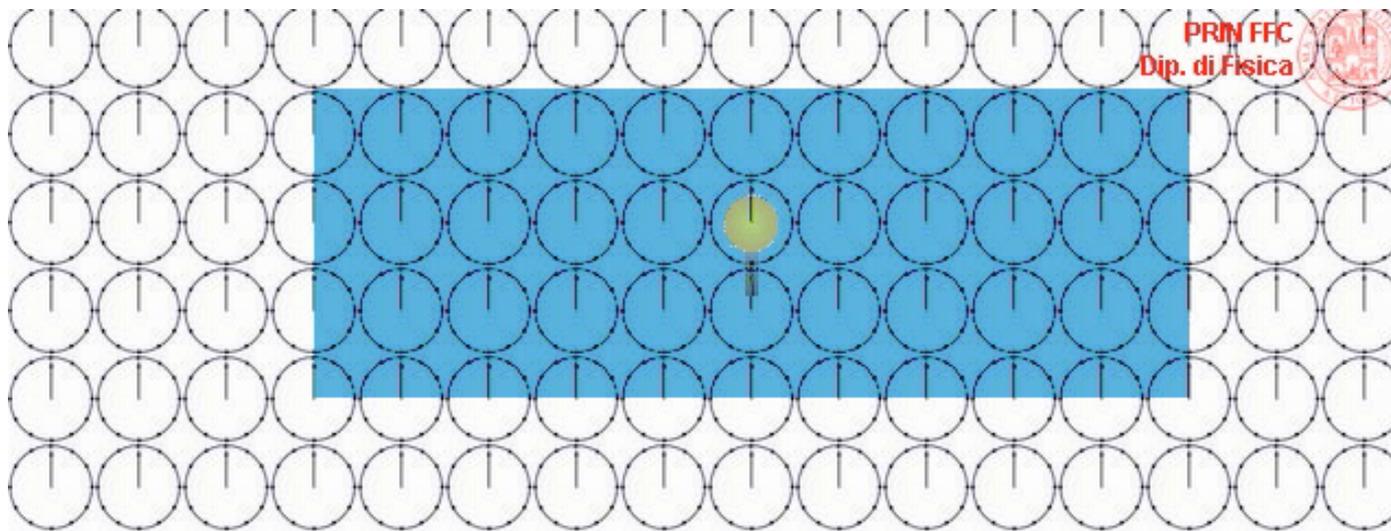
(Einstein A., “Autobiografia scientifica”, 1949)



I postulati della relatività ristretta

- a) Tutte le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali
- b) La luce si propaga nel vuoto sempre con la stessa velocità (circa 300000 km/s), indipendentemente dal moto della sorgente o dell'osservatore.

La relatività della simultaneità



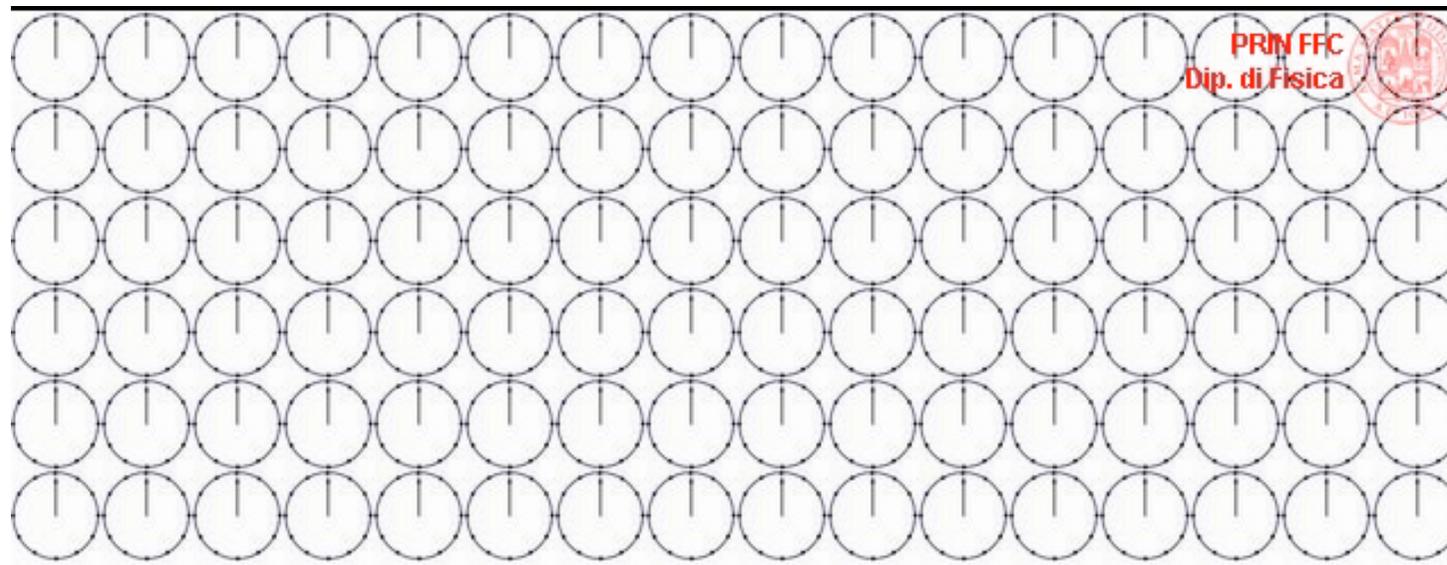
accendi

(animazioni di M. Recchi, Prin FFC, Dip. Fisica, Bologna)



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

La relatività della simultaneità



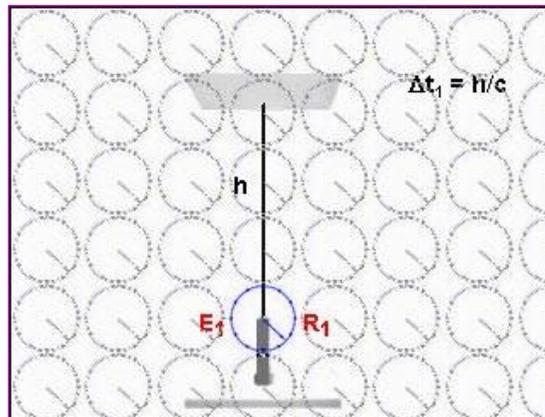
(animazioni di M. Recchi, Prin FFC, Dip. Fisica, Bologna)



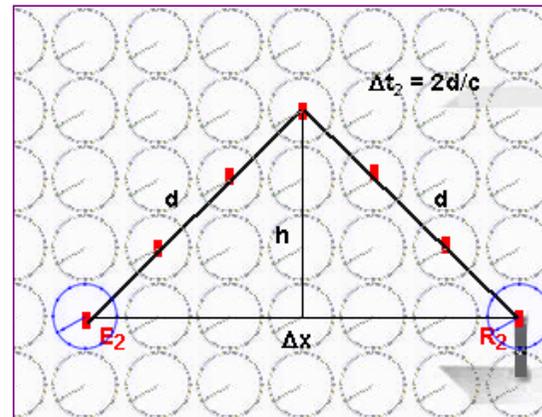
ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

La dilatazione dei tempi

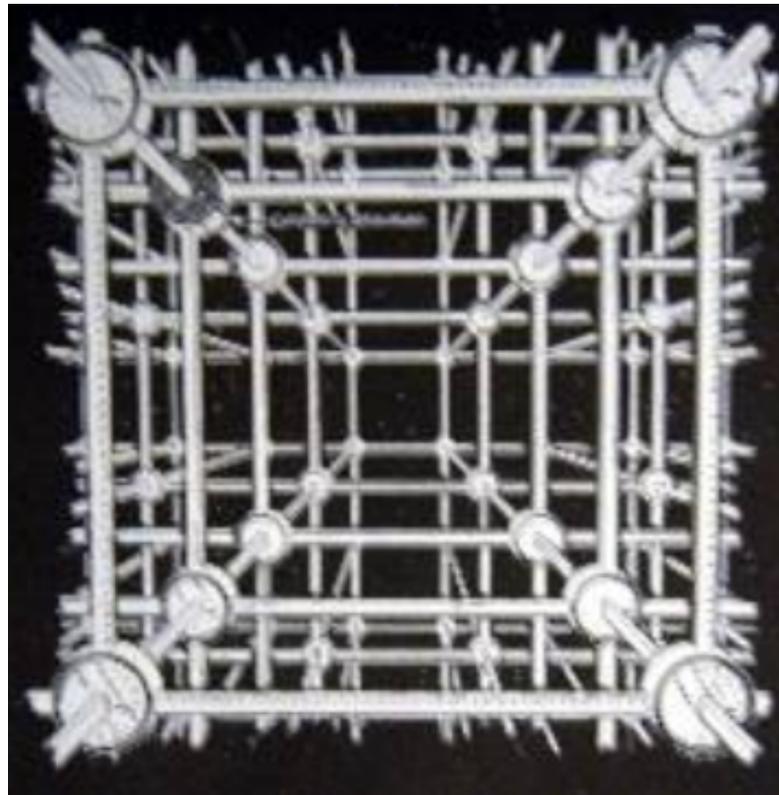
In quiete



In moto



**Ancora sul reticolo di orologi sincronizzati:
perché tanta cura (ossessione)?**



Far discendere dall'Olimpo dell'a-priori...

“Son convinto che i filosofi hanno avuto un'influenza dannosa sul progresso del pensiero scientifico, trasportando certi concetti fondamentali dal dominio dell'empirismo, dove essi erano sottoposti al nostro controllo, alle altezze intangibili dell'a-priori.

Ciò è particolarmente vero per i nostri concetti di tempo e di spazio, che i fisici sono stati obbligati dai fatti **a far discendere dall'Olimpo dell'a-priori per adattarli e renderli servibili.**”

(Einstein, “Il significato della relatività”, 1922)



La portata rivoluzionaria della relatività (alcuni aspetti)

- La perdita di un punto di vista privilegiato (il principio di relatività)
- L'irrompere del tempo nello spazio e l'intreccio spazio-temporale
- La riapertura del dibattito sulla natura di spazio e tempo (come "contenitori" o come "relazioni"?)





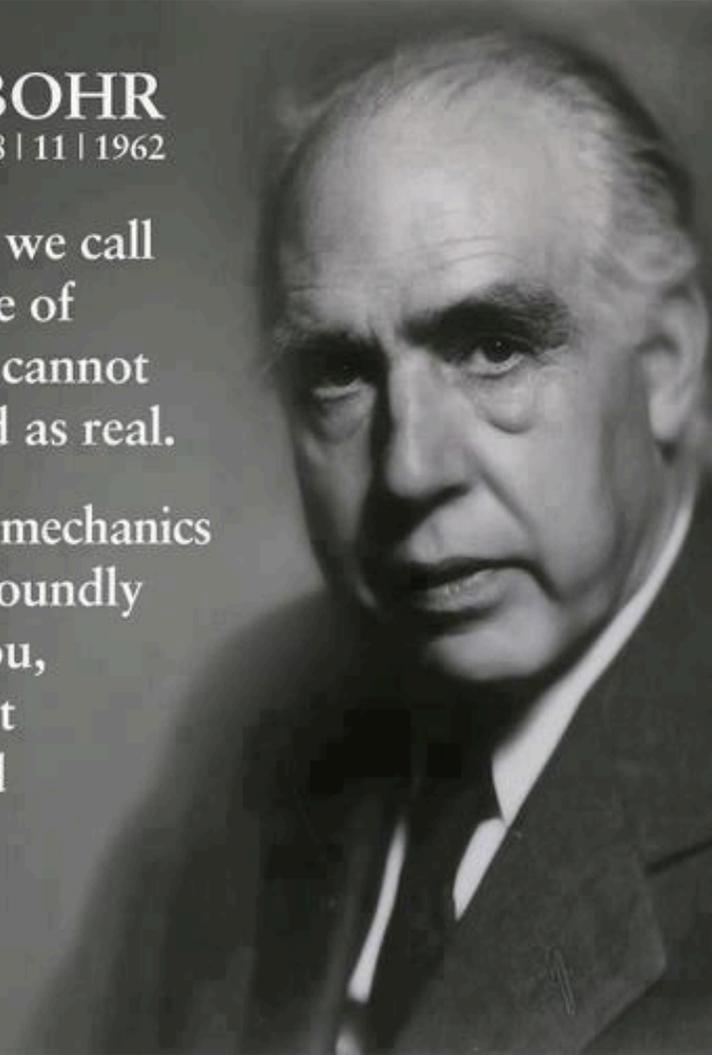
Les Femmes d'Alger,
Pablo Picasso, 1907 (Paris)
MoMA New York.

NIELS BOHR

7 | 10 | 1885 – 18 | 11 | 1962

Everything we call
real is made of
things that cannot
be regarded as real.

If quantum mechanics
hasn't profoundly
shocked you,
you haven't
understood
it yet.



Niels Bohr (Copenhagen 1885-1962)

1913: Natura facit saltus

1927: Contraria sunt complementa



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Manchester, 12 giugno 1912

Lettera al fratello Harald

“Un paio di giorni fa ho avuto una piccola idea utile per la comprensione dell’assorbimento dei raggi alfa (è andata così: un giovane matematico di qui, C. G. Darwin – nipote del vero Darwin – ha appena pubblicato una teoria in merito a questo problema, e io ho pensato che non solo non era del tutto corretta dal punto di vista matematico – sebbene l’errore fosse piccolo – ma che era decisamente insoddisfacente nella concezione di fondo, e ho elaborato una piccola teoria in proposito, che, anche se non è granché, può forse fare un po’ di luce su **certi fatti connessi alla struttura degli atomi**). Ho in mente di pubblicare molto presto un piccolo articolo su questo argomento.”



Una piccola idea su una piccola teoria, che non è granché, da pubblicare in un piccolo articolo...

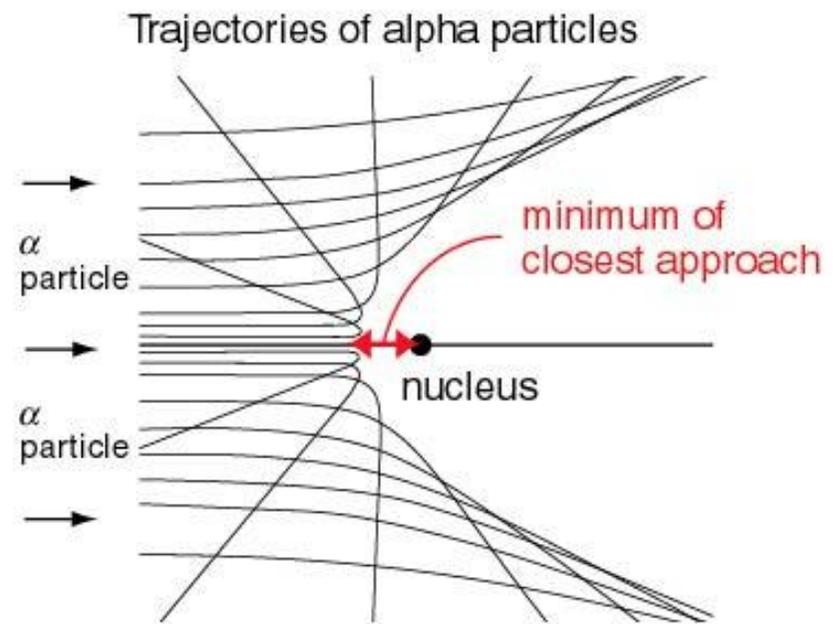
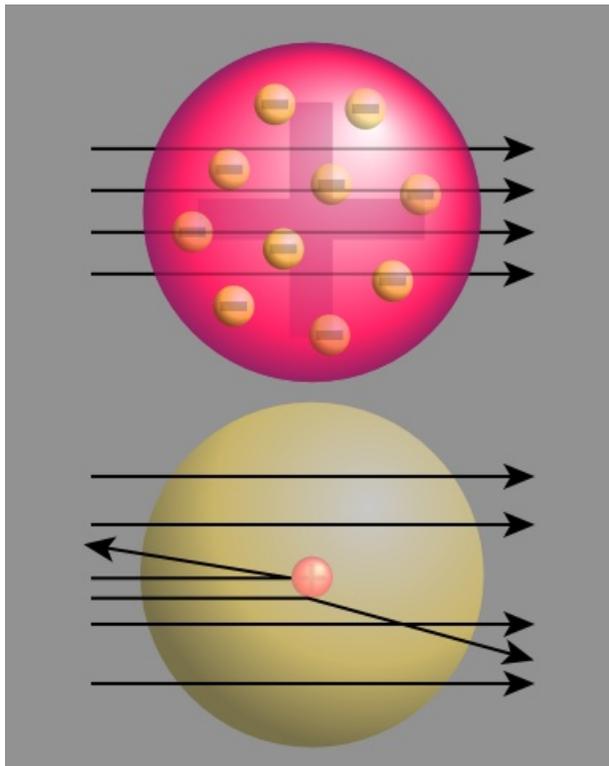
...una trilogia di 71 pagine, pubblicata 1 anno dopo la lettera al fratello:

“On the Constitution of Atoms and Molecules”, Philosophical Magazine, Serie 6, Vol 26, Luglio-Novembre 1913, 1-25; 476-502, 857-875.

Per “SISTEMARE IL MALANDATO ATOMO NUCLEARE DI RUTHERFORD e TRASFORMARLO NELL’ATOMO QUANTISTICO”
(Kumar, 2008)



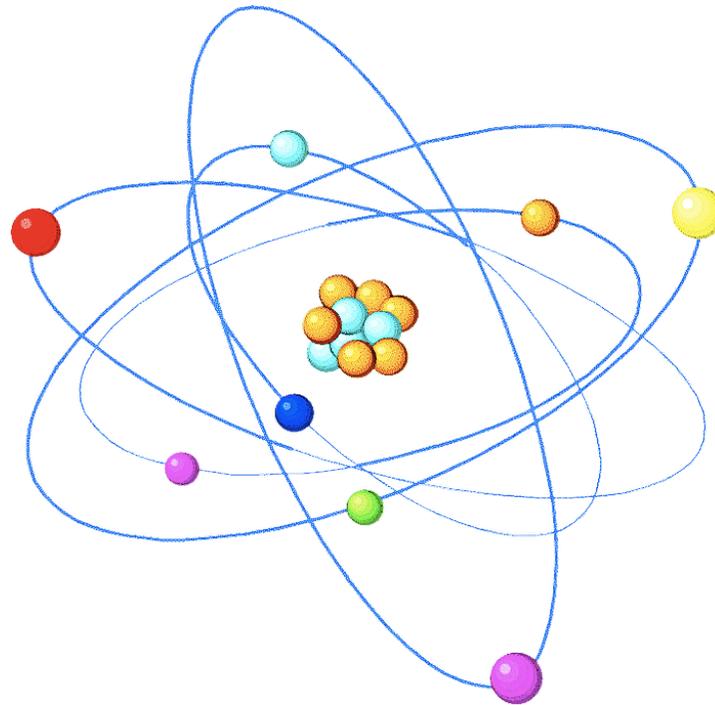
L'atomo di Rutherford (1911)



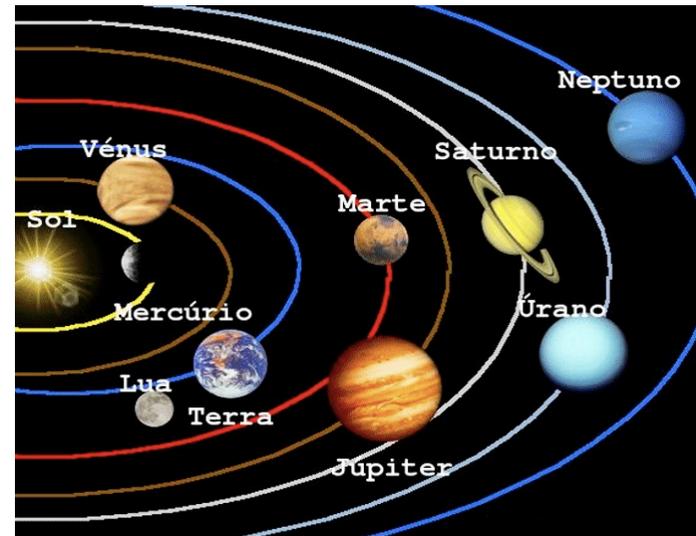
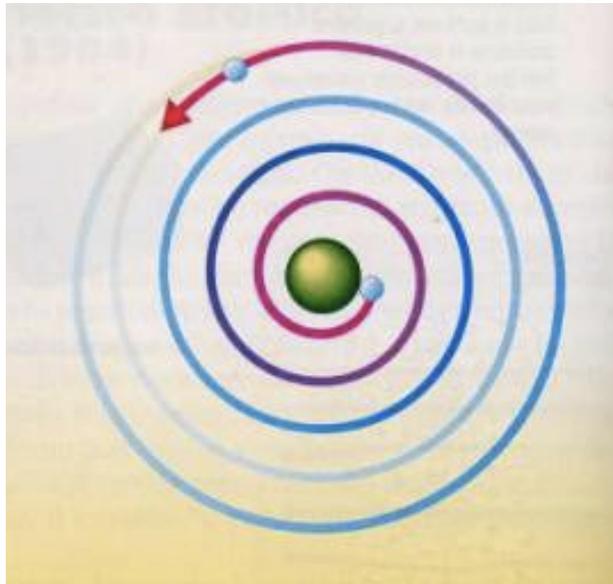
Un "nucleo nudo"



Un “classico” modello planetario, benché elegante, semplicemente non poteva funzionare



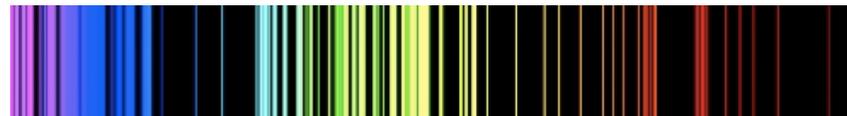
Il problema della stabilità e della struttura



I “fatti” sul tappeto di cui tener conto



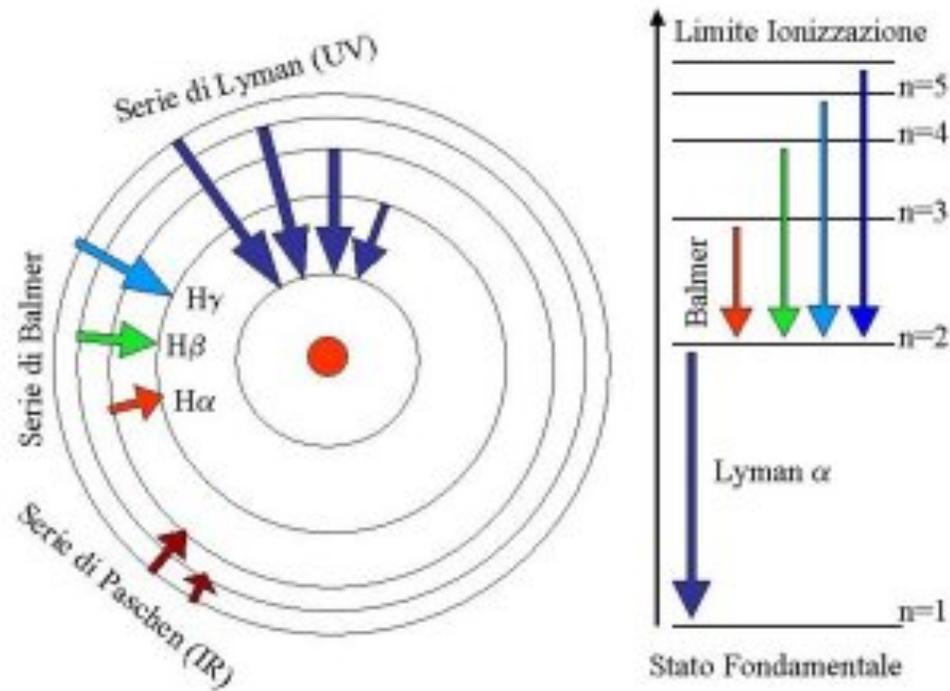
La “firma” dell’azoto



La “firma” del ferro



L'atomo di Bohr (per l'idrogeno) e il suo valore euristico



Natura facit saltus...



La continuità dei processi

“natura non operator per saltum”

uno dei dogmi centrali della descrizione fisica



Tratto da C. Tarsitani, “Il dilemma onda-corpuscolo”, Loescher, 1983

“Già nella famosa polemica tra newtoniani e leibniziani, agli esordi della rivoluzione scientifica, Johann Bernoulli rimproverava all'ipotesi newtoniana dell'esistenza degli atomi come pezzi di materia indivisibili e perfettamente solidi, il fatto che essa era in netta contraddizione con la «Legge di Continuità», ossia con il principio universale in base al quale *natura non operatur per saltum*, «tutto ciò che avviene lo fa per gradi infinitesimi» e «nulla passa da un estremo all'altro senza percorrere tutti i gradi intermedi». Infatti qualsiasi processo di urto tra atomi «duri» e indeformabili (un atomo per definizione non ha parti e quindi non può subire deformazioni) implica una brusca variazione di direzione e di velocità, o addirittura un arresto istantaneo del moto. E perché, secondo i leibniziani, **la Legge di Continuità non poteva essere violata?** Perché un processo discontinuo renderebbe del tutto inconcepibile la **connessione causale** tra lo stato iniziale e lo stato finale: «non essendoci un legame necessario tra i due stati [...] nessuna ragione potrebbe determinare la produzione di una cosa anziché di un'altra».”



Potenzialità del modello di Bohr...

- Risolveva i problemi di stabilità insiti nel modello di Rutherford;
- Interpretava le righe degli spettri;
- Permetteva di ricavare, per l'atomo d'idrogeno, valori molto accurati per le dimensioni dell'atomo;
- Permetteva di introdurre il "*Principio di corrispondenza*".

...e suo limiti

- Richiedeva aggiustamenti su aggiustamenti per interpretare gli spettri di atomi via via più complessi;
- Non aveva alcuna base teorica (modello euristico)...



La meccanica quantistica come teoria

L'Istituto di Fisica Teorica di Copenaghen (1921)



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

La meccanica quantistica come teoria

- teoria formulata negli anni 30 (intorno al 1927), grazie al contributo di molti fisici, Planck, Bohr, De Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Pauli, Jordan, Born, Dirac e altri... e anche grazie allo “speciale” contributo dato da Einstein (e le sue critiche acute);
- oggi è accettata: esistono un formalismo ed assiomi (von Neumann, 1932) che lo regolano e lo conciliano con la realtà (la teoria più corroborata di sempre);
- questo formalismo spiega la realtà microscopica ma la spiega “a modo suo”...



“a modo suo”

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

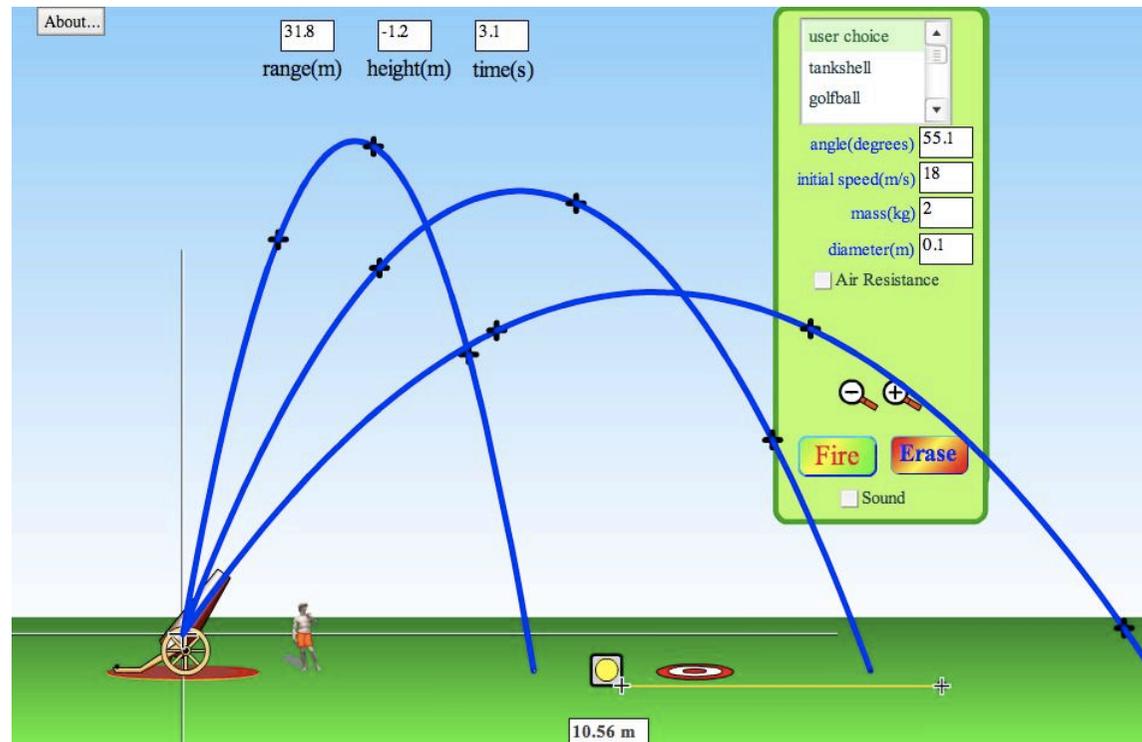
ma

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

- il principio di causalità classica basato sul determinismo newtoniano;
- la rappresentabilità dei fenomeni nello spaziotempo;
- il principio di non-contraddizione (un oggetto o è una cosa o un'altra);
-



Il principio di causalità classica basato sul determinismo newtoniano



La relazione (ex-principio) di indeterminazione

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

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

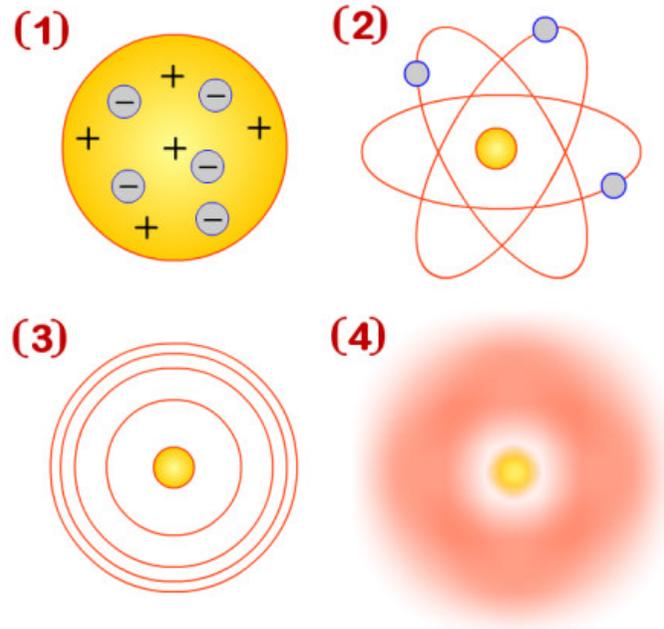
Apparentemente...

“[...] 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)



Rappresentabilità dei fenomeni nello spaziotempo ordinario



Principio di non contraddizione

"A è anche non-A" è falsa

o mitologica...



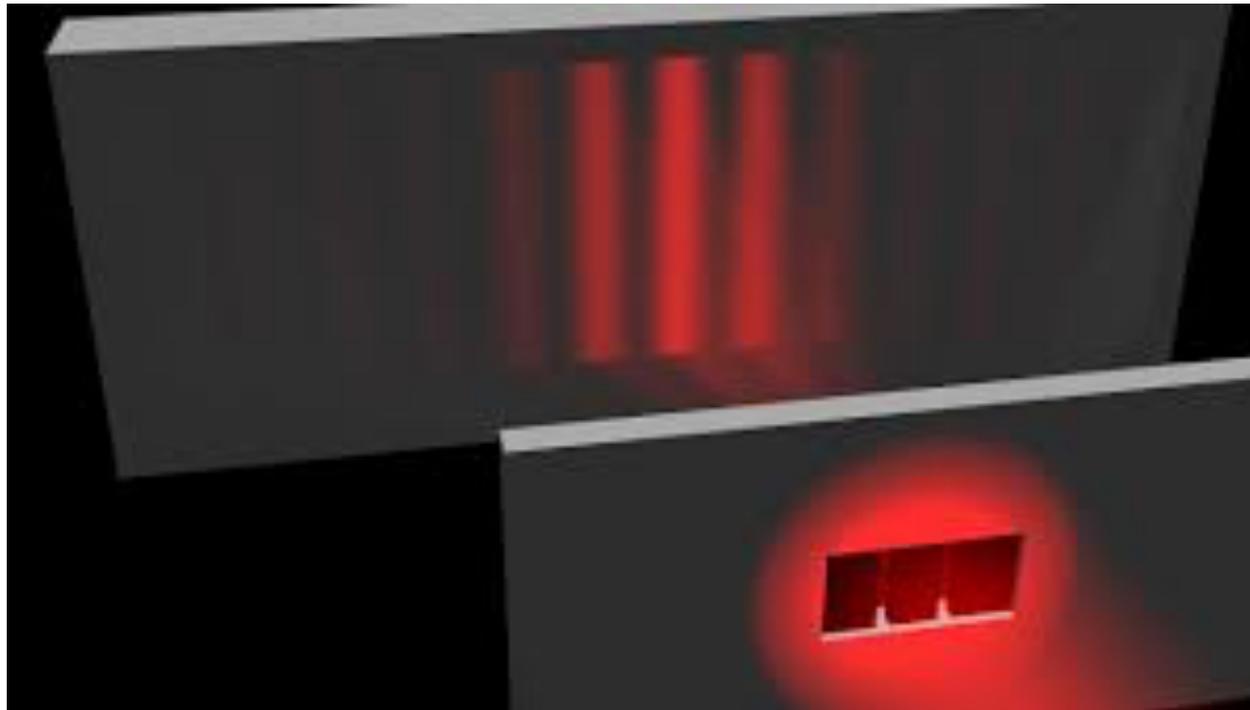
COMPLEMENTARITA' e la forma di DUALISMO ONDA-CORPUSCOLO

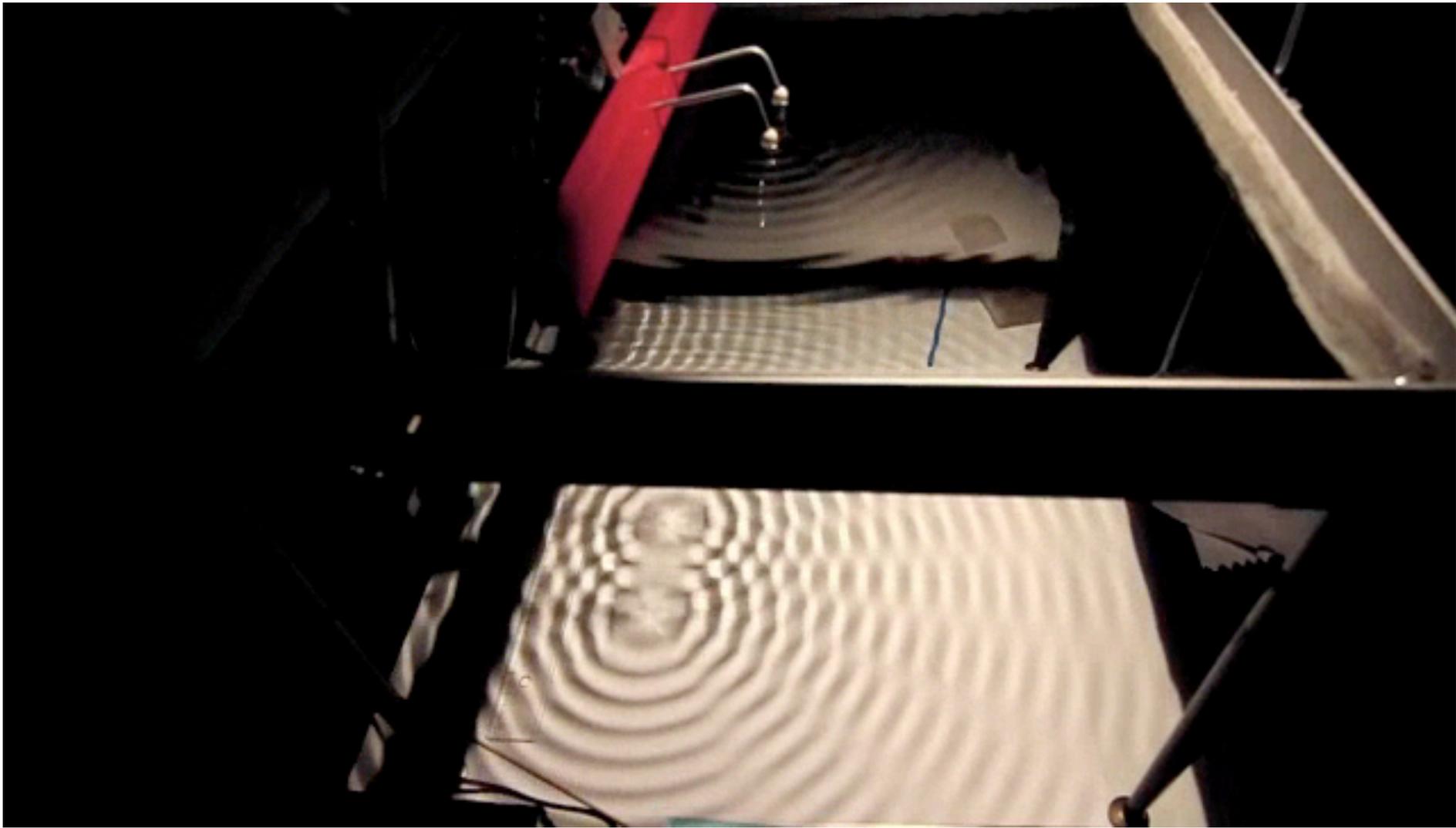


Il dualismo onda-particella

Introdotta da Einstein nel 1905, a proposito della relazione di Planck sul corpo nero (e sull'effetto fotoelettrico)

LA LUCE MOSTRA COMPORTAMENTI ONDULATORI....

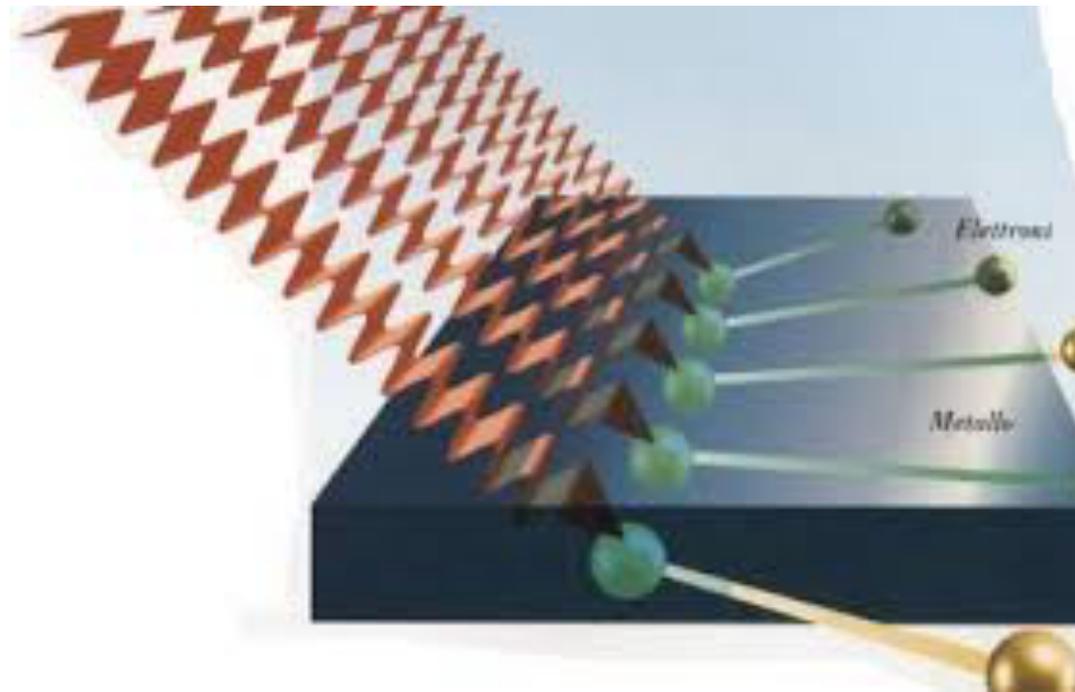




Il dualismo onda-particella

Introdotta da Einstein nel 1905, a proposito della relazione di Planck sul corpo nero (e **sull'effetto fotoelettrico**)

LA LUCE MOSTRA COMPORTAMENTI ONDULATORI... **E CORPUSCOLARI**



Il dualismo onda-particella (*)

Il dualismo onda-particella è stato, fin da subito, esplorato in tutte le sue possibili accezioni:

- una forma è manifestazione dell'altra (Schrödinger e Born);
- sia onda sia particella (De Broglie, Bohm);
- a volte l'una, a volte l'altra (un po', un po') (Bohr, Pauli).
- la fisica deve occuparsi di *perché* conosce e di *come* conosce (epistemologia e metodologia) e abbandonare ogni pretesa di dire come è fatto il mondo (ontologia) (Heisenberg e Jordan);

(*) Introzzi G. (2010). Il dualismo onda/particella: analisi storica e recenti interpretazioni. Atti Acc. Rov. Agiati, a. 260, 2010, ser. VIII, vol. X, B: 5-18.



Il dualismo onda-particella (*)

Il dualismo onda-particella è stato, fin da subito, esplorato in tutte le sue possibili accezioni:

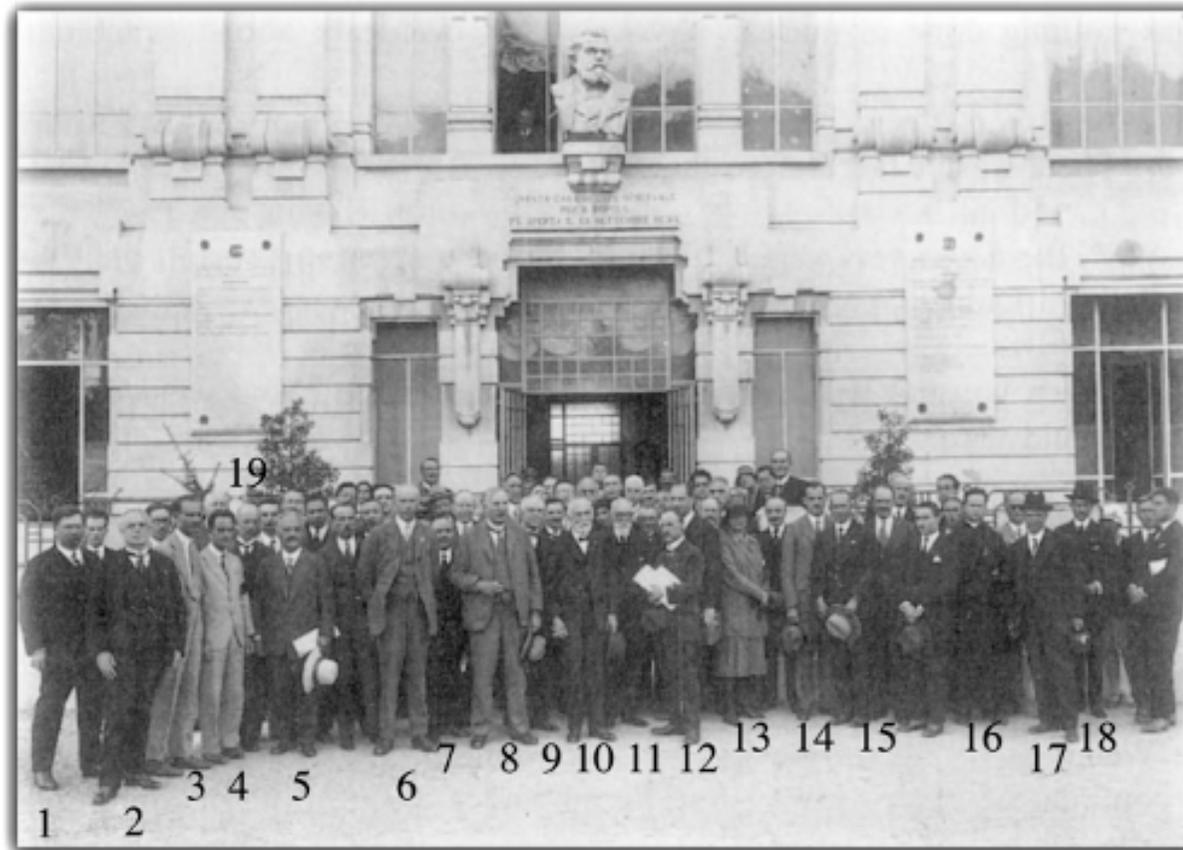
- una forma è manifestazione dell'altra (Schrödinger e Born);
- sia onda sia particella (De Broglie, Bohm);
- **a volte l'una, a volte l'altra (un po', un po') (Bohr, Pauli).**
- la fisica deve occuparsi di *perché* conosce e di *come* conosce (epistemologia e metodologia) e abbandonare ogni pretesa di dire come è fatto il mondo (ontologia) (Heisenberg e Jordan);

(*) Introzzi G. (2010). Il dualismo onda/particella: analisi storica e recenti interpretazioni. Atti Acc. Rov. Agiati, a. 260, 2010, ser. VIII, vol. X, B: 5-18.



Congresso di Como, settembre 1927

“Mai esprimersi in maniera più chiara dei propri pensieri”



il Congresso di Solvay 1927 è famoso, anche, per il celeberrimo dialogo Bohr-Einstein

“I lavori ripresero il 28 pomeriggio: ripresero con una sessione di discussione generale introdotta da Lorentz con l'intento di far concentrare l'attenzione sulle questioni della causalità, del determinismo e della probabilità: **Non si potrebbe mantenere il determinismo facendone un articolo di fede? E' indispensabile elevare l'indeterminismo a principio?**”. Poi Lorentz invitò Bohr a intervenire. Bohr illustrò la sua convinzione che il dualismo onda-particella fosse una caratteristica intrinseca della natura, spiegabile soltanto nel quadro della complementarità, e che la **complementarità stesse alla base del principio di indeterminazione** che portava alla luce i limiti di applicabilità dei concetti classici.”

(Kumar, Quantum, 2008)



Più tardi Bohr avrebbe espresso così la sua posizione: “Non vi è un mondo quantistico. Vi è solo una descrizione astratta in termini di fisica quantistica. E’ sbagliato pensare che il compito della fisica sia scoprire come è la natura. La fisica si occupa di ciò che possiamo dire della natura... Da cosa dipendiamo noi umani? Dipendiamo dalle nostre parole. Il nostro compito è comunicare esperienze e idee ad altri. *Siamo sospesi nel linguaggio*”.

(da Pais, Ritratti di scienziati geniali, 2012)



Suspended IN LANGUAGE

Niels Bohr's life,
discoveries, and the
century he shaped

Jim Ottaviani
and
Leland Purvis



with
Jay Hosler
Roger Langridge
Steve Leialoha
Linda Medley
Jeff Parker



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

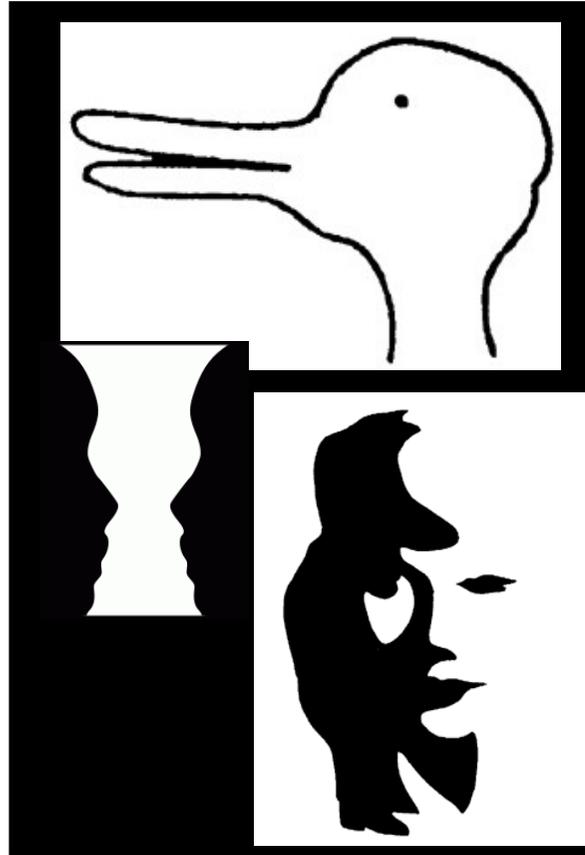


Niels Bohr

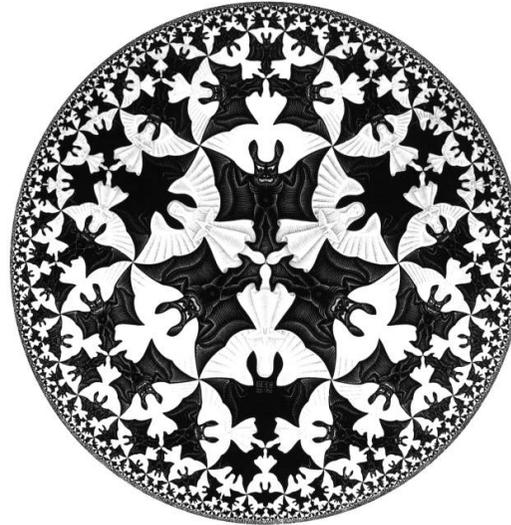
I dati ottenuti in **condizioni sperimentali diverse [ponendo l'attenzione a diverse fenomenologie]** non si possono racchiudere in una singola immagine, ma debbono essere considerati complementari. Stando così le cose, l'attribuzione di qualità fisiche tradizionali agli oggetti atomici implica un elemento 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.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Dopo l'intervento di Bohr e altri tre che seguirono, Einstein chiese la parola:

“Pur essendo consapevole di non aver sufficientemente approfondito l'essenza della meccanica quantistica, voglio nondimeno presentare qui qualche osservazione”.

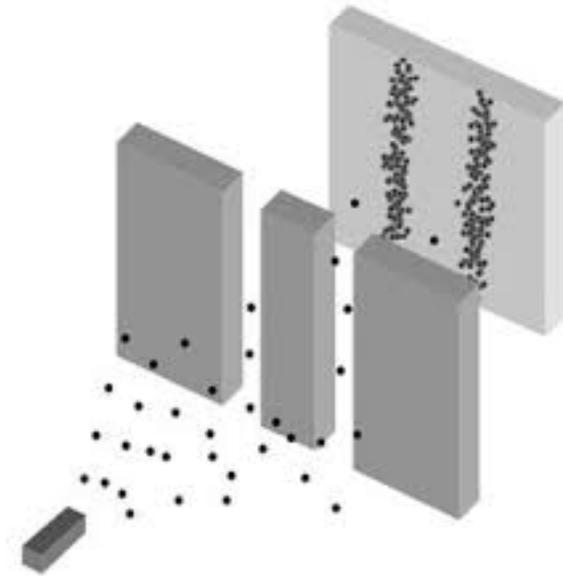
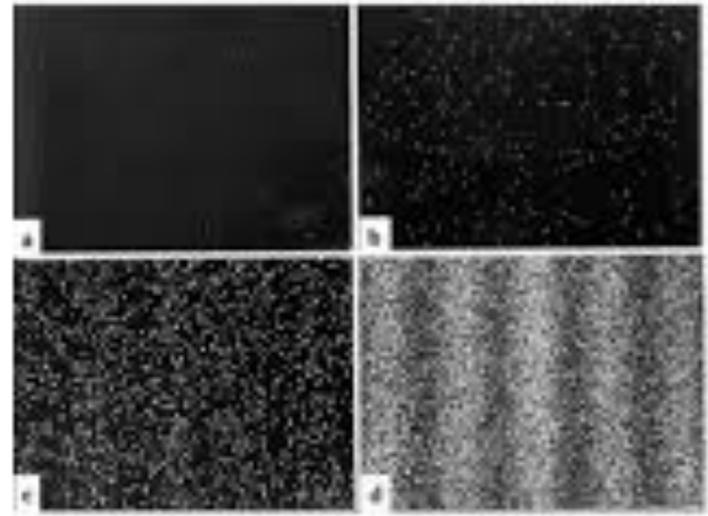
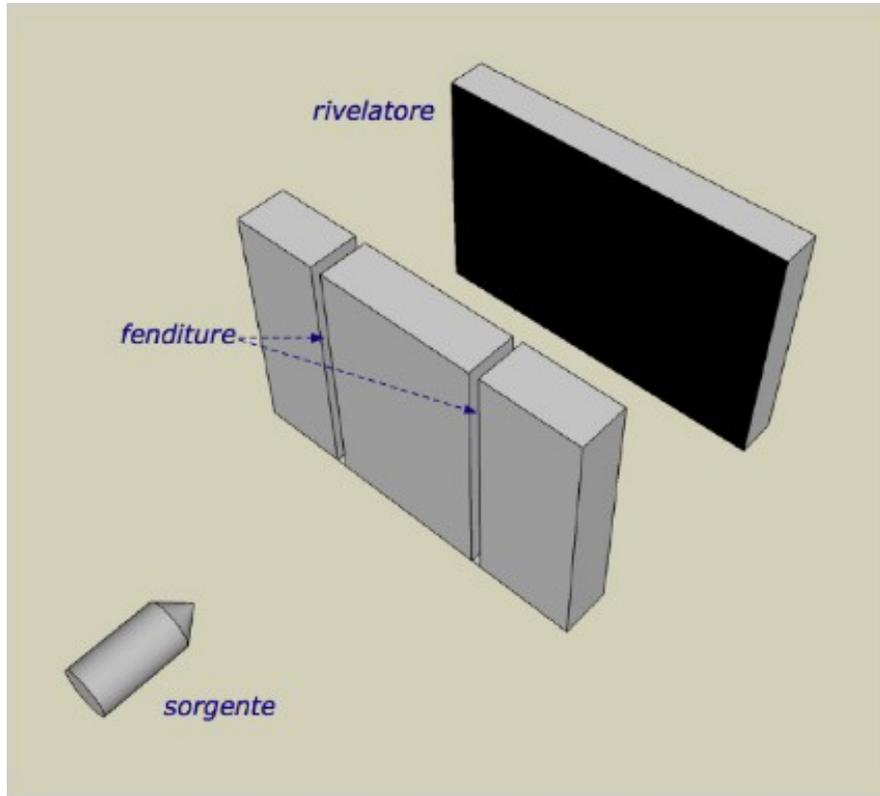
Einstein sapeva che spettava a lui l'onere di mostrare l'incoerenza, l'inconsistenza della interpretazione di Copenaghen e...

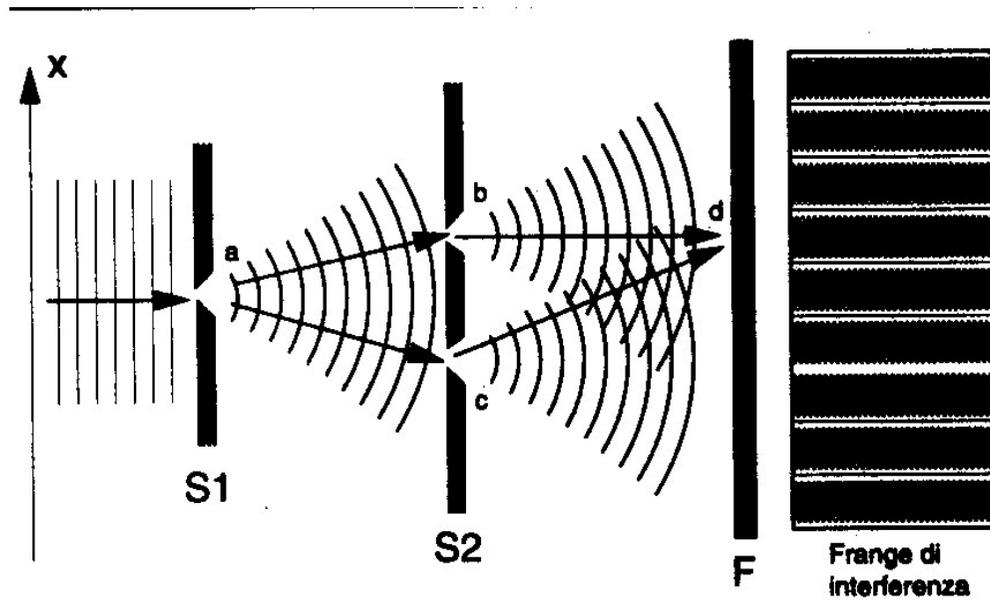
...Propose un esperimento mentale



L'ESPERIMENTO MENTALE DI INTERFERENZA DI SINGOLA PARTICELLA



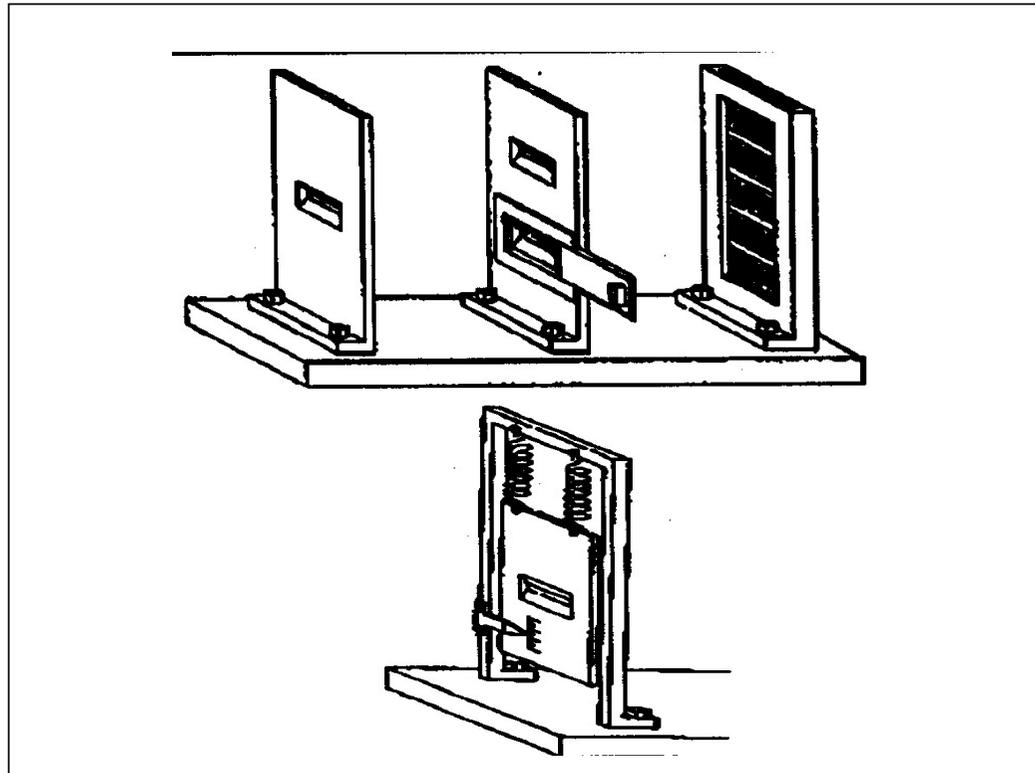


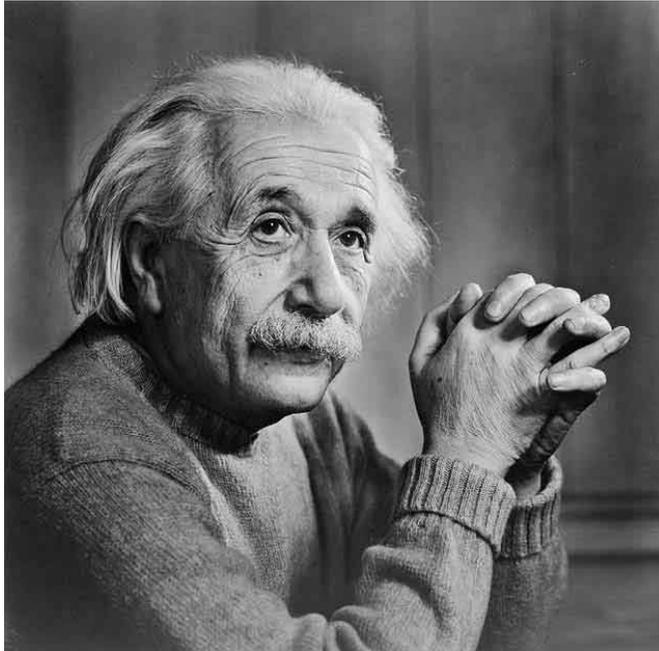


L'idea di Einstein: è possibile, invece, avere E conoscenza della traiettoria E figura di interferenza...



Risposta di Bohr.... E la sua “vittoria”: **la MQ diventa teoria**





La meccanica quantistica è degna di ogni rispetto, ma una voce interiore mi dice che non è ancora la soluzione giusta. È una teoria che ci dice molte cose, ma non ci fa penetrare più a fondo il segreto del Gran Vecchio. In ogni caso sono convinto che Dio non gioca a dadi con il mondo.”

Albert Einstein



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

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

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



Pais «Sottile è il Signore...»



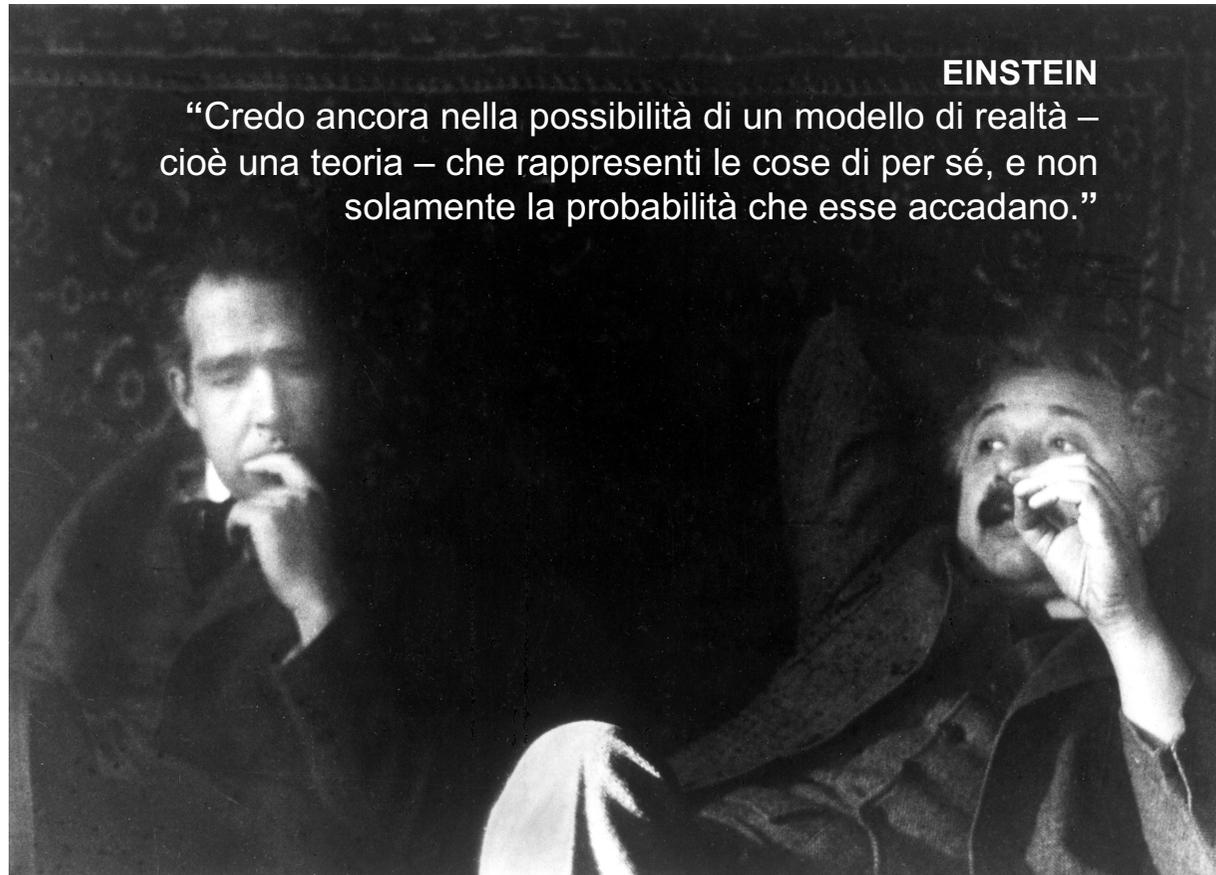
Bollati Boringhieri



Abraham Pais
**IL DANESE
TRANQUILLO**

Niels Bohr
un fisico e il suo tempo
1885-1962

Bollati Boringhieri



EINSTEIN

“Credo ancora nella possibilità di un modello di realtà –
cioè una teoria – che rappresenti le cose di per sé, e non
solamente la probabilità che esse accadano.”



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA



Galla Rivin
Jafur
20/10 1937

A. Cotton Raman W. Kleinberg R. Hofmann

E, oggi, la complementarità???



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Per i fisici che non rinunciano ad interrogarsi su quale descrizione del mondo la fisica abbia costruito...

...il dualismo onda-corpuscolo va superato una volta per tutte,
come un residuo interpretativo **goffo e inappropriato**

“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



Il dualismo onda-particella (*)

Introdotta da Einstein nel 1909 (a proposito della relazione di Planck sul corpo nero);

Esplorato in tutte le sue possibili eccezioni:

- una forma è manifestazione dell'altra (Schrödinger e Born);
- sia onda sia particella (De Broglie, Bohm);
- a volte l'una, a volte l'altra (un po', un po') (Bohr, Pauli);
- NE' L'UNA NE' L'ALTRA!

(*) Introzzi G. (2010). Il dualismo onda/particella: analisi storica e recenti interpretazioni. *Atti Acc. Rov. Agiati*, a. 260, 2010, ser. VIII, vol. X, B: 5-18.



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



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA





ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Fabrizio Silei

L'INVENZIONE DELL'ORNITORINCO

favola della creazione per evoluzionisti ironici e creazionisti convinti




Artebambini



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

L'ornitorinco è senz'altro l'animale più misterioso del pianeta, per più di un secolo ha fatto litigare gli studiosi. Uccello? Pesce? Rettile o mammifero?

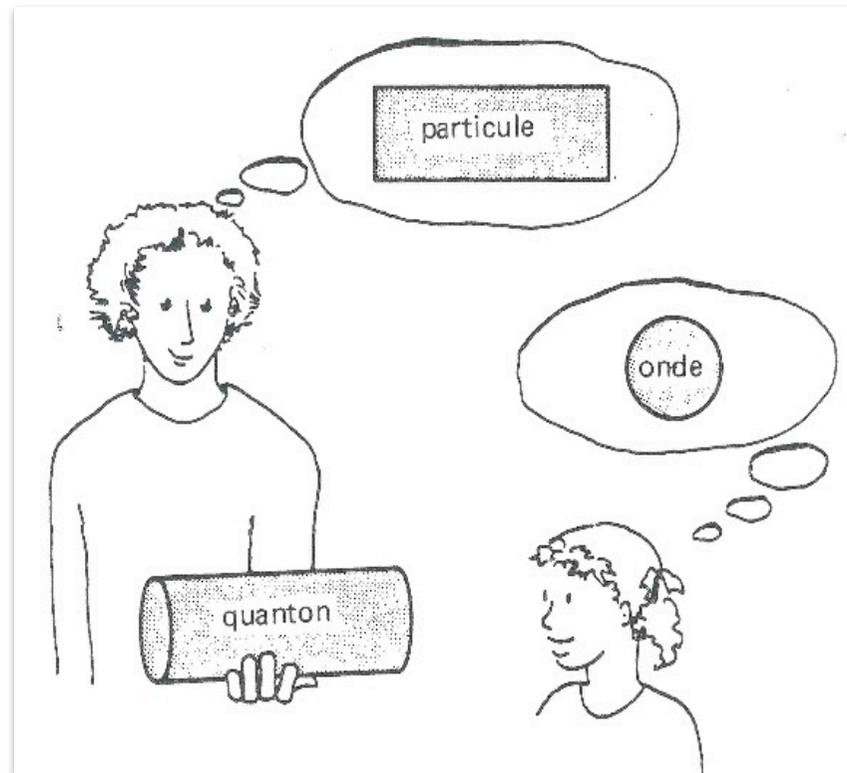
Alla fine hanno dovuto inventare per lui un'altra famiglia perché l'ornitorinco è diverso da tutti: becca da anatra, pelliccia da talpa, coda da castoro e zampe da coccodrillo dotate di uno sperone che secerne veleno. Come se non bastasse l'ornitorinco nuota come un pesce, fa le uova, ma allatta i suoi piccoli.

In questo giocofaba creativo si svela finalmente il segreto della sua natura invitando i bambini a giocare come angioletti dispettosi alla Genesi, costruendo con il cartone i propri animali impossibili.



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Da “QUANTIQUE rudiments”, Lévy-Leblond, Balibar 1984



L'estensione della fenomenologia e l'emergere della “specificità zoologica”

“Quantum objects are completely crazy. But, at least, they are all crazy in the same way”

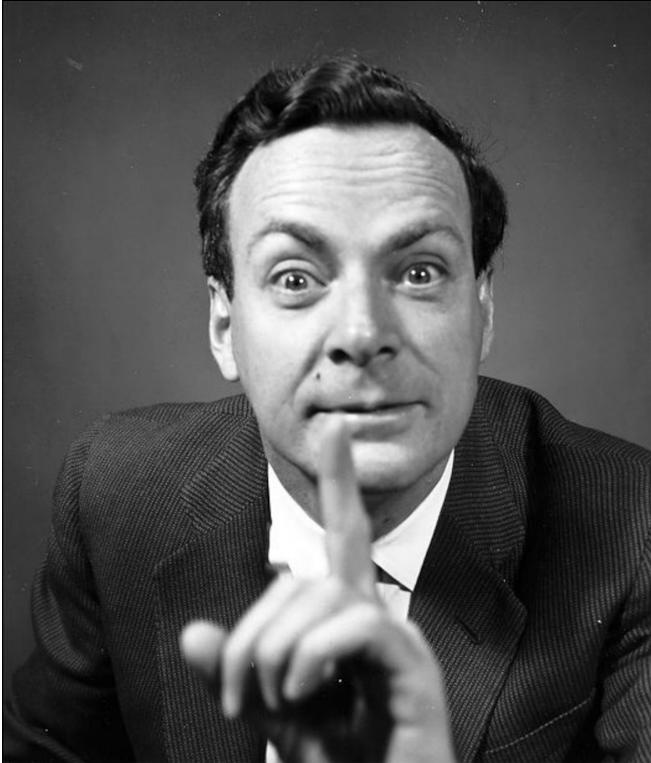
(Lévy-Leblond & Balibar,
parafrasando Feynman)



**Ultima nota:
La storia più bella di tutte... per me.**



Sull'esperimento mentale di interferenza di elettroni singoli

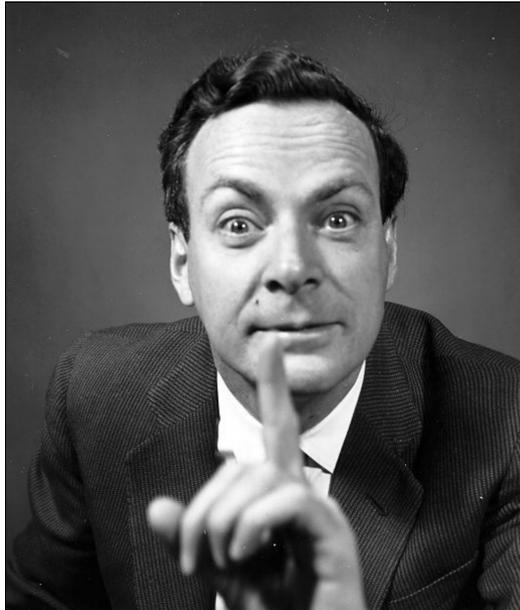


Richard Feynman (1918-1988)

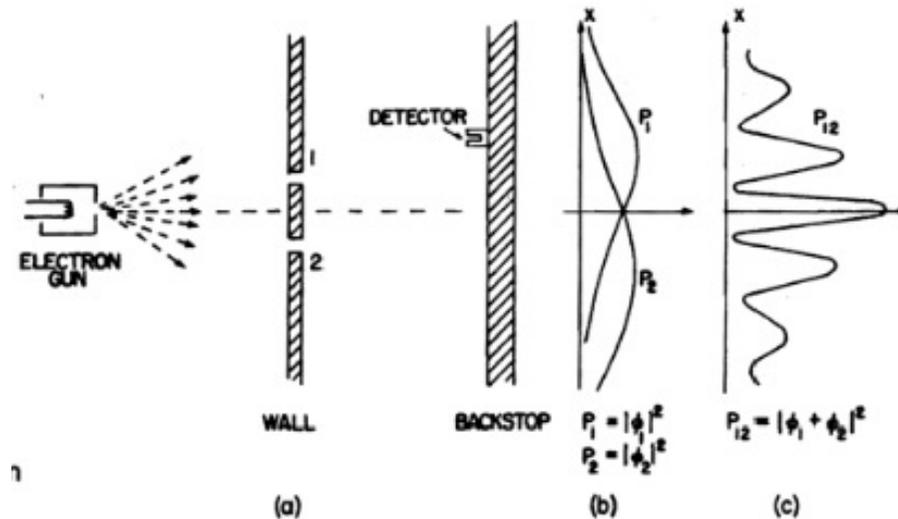
“Decidemmo di esaminare un fenomeno che è impossibile, assolutamente impossibile spiegare in modo classico, e che sta al cuore della meccanica quantistica. In realtà contiene l'unico mistero. [...] Nel raccontarvelo dovremo raccontarvi delle peculiarità fondamentali di tutta la meccanica quantistica.” (1963)



LA SFIDA: bello / impossibile ...



Richard Feynman
(1918-1988)



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 perché è facile ragionarci su. Noi sappiamo quali sono i risultati che *si otterrebbero*, perché *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.

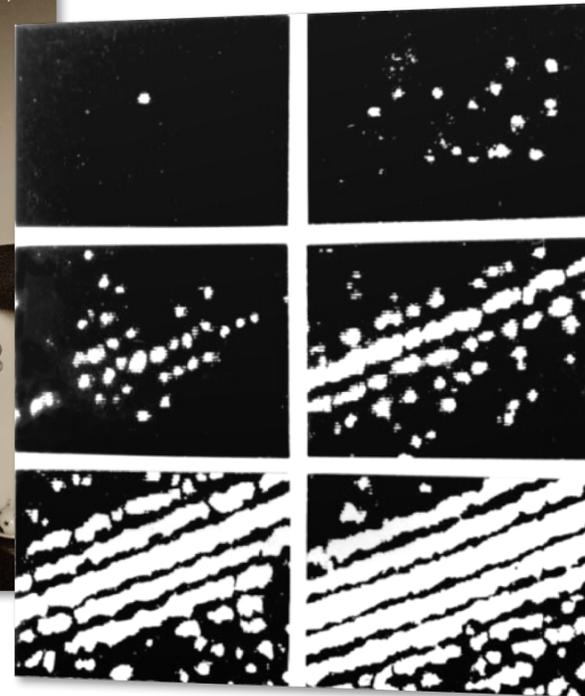


2003 ©Pino Guidalotti



(1) Dipartimento di Fisica Università - Bologna
(2) CNR LAMEL (oggi IMM) - Bologna

1974-1976



P.G.Merli, G.F.Missiroli, G.Pozzi *On the statistical aspects of electron interference phenomena* Am. J. Phys. 44, 306 (1976)

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

On the statistical aspect of electron interference phenomena

P. G. Merli
CNR-LAMEL, Bologna, Italy

G. F. Missiroli and G. Pozzi
CNR-GNSM, Istituto di Fisica, Laboratorio Microscopia Elettronica, Bologna, Italy
(Received 29 May 1974; revised 17 October 1974)

In a recent paper,¹ hereafter called I, two of the present authors have described how to perform—for instructional purposes—an experiment on electron interference by using a standard electron microscope.

In this short note we wish to show in a very impressive way that the complete interference pattern we registered on the photographic plate is really the sum of many independent events, each due to the interaction between a single electron and the interference apparatus. This was deduced in I with a simple and realistic calculation based on the main assumption that electrons were emitted at a constant rate from the gun filament. In the present case this result is shown not from a calculation but from direct observation. In fact, the experiment performed in I has been repeated on a Siemens Elmiskop 101 equipped with a TV image intensifier.^{2,3}

With regard to the formerly described setup, the Möllenstedt and Düker electron biprism⁴ has been now inserted at the level of the selector aperture plane. The objective lens acts in this case as third condenser lens, thus increasing the coherence and versatility of the illuminating system, whereas the fringes are magnified on the final screen by means of the two projector lenses (cf. Fig. 4 in I). If the coherence condition is satisfied, it is possible to register on a photographic plate an interference fringe pattern with spacing above 300 μm as shown in Fig. 1(f). The exposure time of the photographic plate lies in a range between 10 and 100 sec. By the same electron optical conditions, however, the TV image intensifier allows the observation of the interference pattern directly on the monitor by means of the electrons stored in the SEC target of the TV tube^{2,3} in a time of about 0.1 sec.

Figure 1(f), together with Figs. 1(a)–1(e), was filmed directly from the TV monitor. We note that the image on the screen was clearly visible, as in normal TV

transmission, and that by varying the biprism potential we could follow, without difficulty, all the diffraction and interference phenomena described in I.

However, the most interesting performance that such a device offers is connected to the direct observation of the statistical process of fringe formation. It can easily be seen that, at low current density, the image is built up from the statistically distributed light flashes of individual electrons, as is shown in the sequence of Figs. 1(a)–(f) registered at different current densities on the final screen.

The same result can be reached in another way that didactically is more illuminating in concept. In fact, we

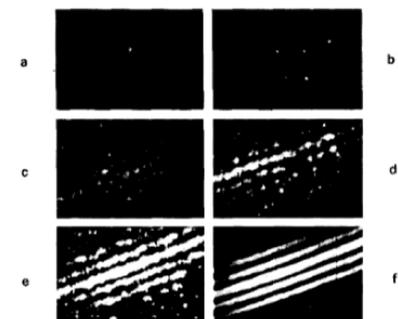


Fig. 1. (a–f) Electron interference fringe patterns filmed from a TV monitor at increasing current densities.

can operate with a very low electron current density which corresponds, on the average, to one or a few electrons arriving on the final screen in 0.04 sec [see Fig. 1(a)]. This is the lowest storage time available with the TV tube. While the electron optical conditions are kept constant, the storage time, which plays the same role as the exposure time of the photographic plate, can be increased step-by-step up to values of minutes. It can be verified that the image is gradually "filled" by the electrons until the shot noise vanishes completely.

We believe these results will be of great help to students by demonstrating to them, in an experimental form, the wave behavior of electrons and their statistical interpretation. Moreover, the whole apparatus is particularly valuable for student demonstrations in that the image can be directly seen by a large number of viewers and can possibly be recorded on video tape.

Acknowledgments. The authors are grateful to Professor Angelo and Professor Aurelio Bairati of the Istituto di Anatomia Umana of Milan for their kind permission to work with an electron microscope equipped with an image intensifier, to Dr. G. Boninsegna of the Siemens Italia S.p.A. for his technical assistance, and to Dr. L. Moretini for his cinematographic assistance.

¹O. Donati, G. F. Missiroli, and G. Pozzi, *Am. J. Phys.* **41**, 639 (1973).

²K. H. Herrmann, D. Krahl, A. Kübler, and V. Rindfleisch, *Siemens Rev.* **36**, 6 (1969).

³K. H. Herrmann, D. Krahl, A. Kübler, R. H. Müller, and V. Rindfleisch, in *Electron Microscopy in Material Science*, edited by U. Valdiè (Academic, New York, 1971), pp. 237–272.

⁴G. Möllenstedt and H. Düker, *Naturwissenschaften* **42**, 41 (1954).

L'esperimento più bello

R. Crease



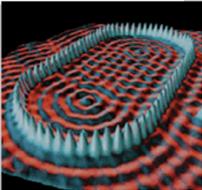
CRITICAL POINT physicsworld

May 2, 2002

The most beautiful experiment...

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 importance.



Small wonder

COMMENT: CRITICAL POINT

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

- 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)

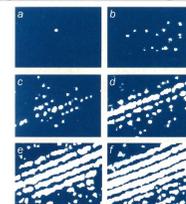
COMMENT: LETTERS

Letters to the editor can be sent by post to *Physics World*, Drac House, Temple Back, Bristol BS1 6BE, UK, by e-mail to pwid@iop.org or by fax to +44 (0)117 925 1942. Please include your address and a daytime telephone number. We reserve the right to edit letters.

The double-slit experiment with single electrons

The article "A brief history of the double-slit experiment" (September 2002 p15; correction October p17) describes how Claes Jonsson of the University of Tübingen performed the first double-slit interference experiment with electrons in 1961. It then goes on to say: "The next milestone—an experiment in which there was just one electron in the apparatus at any one time—was reached by Akira Tonomura and co-workers at Hitachi in 1989 when they observed the build-up of the fringe pattern with a very weak electron source and an electron biprism (*Am. J. Phys.* **57** 117-120)."

In fact, I believe that the first double-slit experiment with single electrons was performed by Pier Giorgio Merli, Gianfranco Missiroli and Giulio Pozzi in Bologna in 1974—some 15 years before the Hitachi experiment. Moreover, the Bologna experiment was performed under very difficult experimental conditions: the intrinsic coherence of the thermionic electron source used by the Bologna group was much lower than that of the field-emission source in the Hitachi experiment. The Bologna experiment is reported in a



A series of images filmed directly from a TV monitor as the electron current density is increased (a-f). The integration time remains constant at 0.04 s. As there is only one electron in the apparatus at a given time, the images show how an interference pattern can be built up from single electron events. This can be seen more clearly in the film "Electron Interference" (www.lamel.bo.cn.it/educational/educational.html).

Siemens Elmiskop IA and then used for didactic (*Am. J. Phys.* **41** 639-644) and research experiments (*J. Microscopy* **18** 103-108). We used the Elmiskop 101 for many experiments, such as the observation of the electrostatic field associated with p-n junctions (*J. Microscopy* **21** 11-20). During this period we learned that Professors Angelo and Aurelio Bairati at the

experiments have not been performed and perhaps cannot be performed to continue." (G. Gilson 1989 *Am. J. Phys.* **57** 680). Three of the seven papers that Gilson refers to were from our group in Bologna.

The main subject of our 1976 paper and the 1989 paper from the Hitachi group are the same: the single-electron build-up of the interference pattern and the statistical aspect of the phenomena. Obviously the electron-detection system used by the Hitachi group in 1989 was more sophisticated than the one we used in 1974. However, the sentence on page 118 of the paper by Tonomura *et al.*, which states that in our film we "showed the electron arrival in each frame without recording the cumulative arrivals", is not correct. This can be seen by watching the film and looking at figure 1 of our 1976 paper (a version of which is shown here).

Finally, it is also worth noting that the first double-slit experiment with single electrons was actually a by-product of research into the practical applications of electron interferometry.

Pier Giorgio Merli
LAMEL, CNR Bologna, Italy
merli@loto.lamel.bo.cn.it

Giulio Pozzi
Department of Physics, University of Bologna
giulio.pozzi@unibo.it
Gianfranco Missiroli
Department of Physics, University of Bologna
fmissiroli@unibo.it

Physics World – Maggio-Settembre 2002



APQEO | GOVERNO REGIONALE DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA
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 della due fenditure realizzato è come guardare uno eclissi totale di sole per la prima volta.

- Allison Campbell (St. Andrew University)

www.apqeoonline.com/education

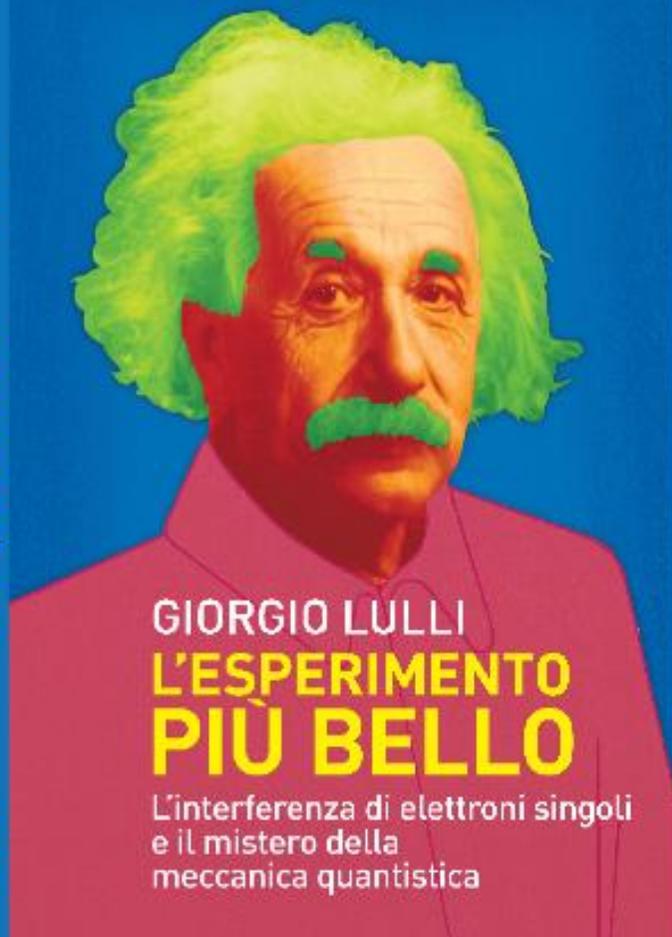
euro 15,00



GIORGIO LULLI
L'ESPERIMENTO PIÙ BELLO

APQEO

APQEO | GOVERNO REGIONALE DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Grazie per la vostra attenzione!



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Olivia Levrini

Dipartimento di Fisica e Astronomia

olivia.levrini2@unibo.it

www.unibo.it