

Conseguenze filosofiche della meccanica quantistica

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Karwasz

*Professore di fisica sperimentale, laureato in economia
Università Nicolao Copernico, Torun, Polonia
Cattedra della Didattica di Fisica*

dydaktyka.fizyka.umk.pl

https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/1100

https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/

dydaktyka.fizyka.umk.pl

Browser tabs: Photopea | Online Photo Editor, PWMar13leader.indd, Consequenze filosofiche della Meccanica Quantistica, R⁶ (PDF) How the Different Interpretations of Quantum Mechanics...

Address bar: dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=Consequenze%20filosofiche%20della%20Meccanica%20Quantistica

Navigation links: Szukaj na stronie, Ostatnio dodane, Strona Wydziału, FIAT LUX

Menu items: Przegląd prasy, Dla nauczycieli, Dla młodzieży, Przyroda, Video-fizyka, Fizyka współczesna, Projekt FCHGo, Innowacyjna fizyka, Projekt E⁴

Left sidebar:

- Najnowsze wykłady: Filozofia przyrody
- Wykłady:
 - Wykłady dla szkół
 - Budowa i podstawowe właściwości materiałów
 - Dydaktyka Fizyki (I)
 - Dydaktyka kognitywistyczna
 - Elektromagnetyzm
 - Fizyka Ogólna dla AIR
 - Fizyka i Chemia Atmosfery
 - Fizyka współczesna
 - Innovative methods of didactics
 - Relacje nauka - wiara

Main content:

Strona główna

Pokaż Edytuj

Wpis *Consequenze filosofiche della Meccanica Quantistica* (Page) został zaktualizowany.

Consequenze filosofiche della Meccanica Quantistica

30 APRILE 2025 16:30 – 18:00

Prof. GRZEGORZ KARWASZ (Università Niccolò Copernico di Torun). Online – il link per l'incontro verrà inviato agli iscritti
Iscrizione entro l'28 aprile 2025 ore 18 (per il link chiedere prof. G. Karwasz)

CONSEQUENZE FILOSOFICHE DELLA MECCANICA QUANTISTICA

La fisica del XX secolo portò due rivoluzioni epistemiche: la teoria della relatività di Einstein (1905) pose i limiti sul nostro conoscere dell'Universo a grandi distanze, la meccanica quantistica (1925) sulle nostre possibilità di conoscere lo stato del microcosmo. In cent'anni ci siamo culturalmente

Right sidebar:

- styczeń 2022
- Fizyka i zabawki

System tray: 9°C, Parzials. sereno, 08:05, 30/04/2025

Abstract

CONSEGUENZE FILOSOFICHE DELLA MECCANICA QUANTISTICA

La fisica del XX secolo portò due rivoluzioni epistemiche: la teoria della relatività di Einstein (1905) pose i limiti sul nostro conoscere dell'Universo a grandi distanze, la meccanica quantistica (1925) sulle nostre possibilità di conoscere lo stato del microcosmo. In cent'anni ci siamo culturalmente abituati a questa situazione d'incertezza. Anzi, il principio d'indeterminazione di Heisenberg viene richiamato in diversi articoli non solo di fisica, ma di filosofia e persino di teologia. Non sempre in modo sensato.

Sembra, però, che tra poco dovremo affrontare altre sfide. Il cosiddetto paradosso di Einstein-Podolsky-Rosen (1935), confermato con il premio Nobel per i lavori sperimentali di Aspect, Clauser e Zeilinger (2022), lega i microstati di due oggetti (per esempio fotoni) a qualsiasi distanza. Dai lavori teorici arriva un risultato inquietante: tra libero arbitrio, principio di causalità e località di eventi dobbiamo abbandonarne uno di tre. A voi l'ardua scelta!

Outline

- 0. Motivazione: God of gaps
- 1. Nicolao Copernico, Galileo Galilei, Albert Einstein
- 2. Filosofia – la scienza più alta
- 3. Meccanica Quantistica
- 4. Conseguenze filosofiche della MQ

Freccia del tempo

Determinismo

Causalità

Heisenberg's principle and God of gaps

THEOLOGY AND THE HEISENBERG UNCERTAINTY PRINCIPLE

Christopher Mooney (Fairfield University) presented a paper entitled "Theology and the Heisenberg Uncertainty Principle." The paper was divided into three sections that dealt with (a) the substance of the principle, (b) its meaning for science, and (c) its meaning for theology. Following the presentation participants engaged the speaker with probing questions and additional insights.

A problem arose, however, when scientists tried to measure with precision the location and velocity (direction and speed) of subatomic particles. Unlike what happens in the macroworld, the measuring process itself creates a disturbance so that a total fix on the whereabouts and dynamism of quanta is not possible. In 1927 Werner Heisenberg summed up the state of affairs in his famous uncertainty principle which states: the more accurately one knows by repeated experiment the position of any subatomic particle, the less accurately one knows its velocity, and vice versa. The quantum state of a subatomic particle (its position and velocity) can thus never be known or predicted with certainty.

Lizabeth Johnson, Fordham University, CTSA Proceedings, 47-1992

<https://ejournals.bc.edu/index.php/ctsa/article/download/3763/3337/6771>

E cosa c'è di più bello del cielo...?

„Nebulosa” di Barnard (costellazione di Orione)



De Revolutionibus (1453)



Fra i molti e vari studi delle lettere e delle arti, di cui si nutrono le menti degli uomini, penso si debbano particolarmente abbracciare - e coltivare con il massimo amore - quelli che si occupano degli argomenti più belli e più degni di essere conosciuti. Quelli, cioè, che trattano delle divine rivoluzioni del mondo e del corso, delle grandezze, delle distanze, del levarsi e del tramontare degli astri e delle cause degli altri fenomeni celesti, e che, infine, ne spiegano tutto quanto l'ordinamento.

Che cosa c'è, infatti, di più bello del cielo che contiene appunto tutte le cose belle? Il che del resto indicano gli stessi nomi Caelum e Mundus, questo riferendosi alla purezza e all'ornamento, quello alla cesellatura. La maggior parte dei filosofi, proprio per la sua eccezionale bellezza, l'ha chiamato Dio visibile.

1473 (Toruń)
-1543 (Frauenborg)

https://www.saveriocantone.net/profcantone/fisica/pdf/copernico_DE_RIVOLUTIONIBUS_sottolineato.pdf

Nicolao Copernico, *Opere*, UTET, 1979

Toruń – città medioevale (*1227)



Ordine religioso tedesco (di crociati)

Toruń – città della cattedrali



Chiesa S.S. Giovanni



Chiesa SS. Maria
(Ascensione)



Chiesa S. Giacomo

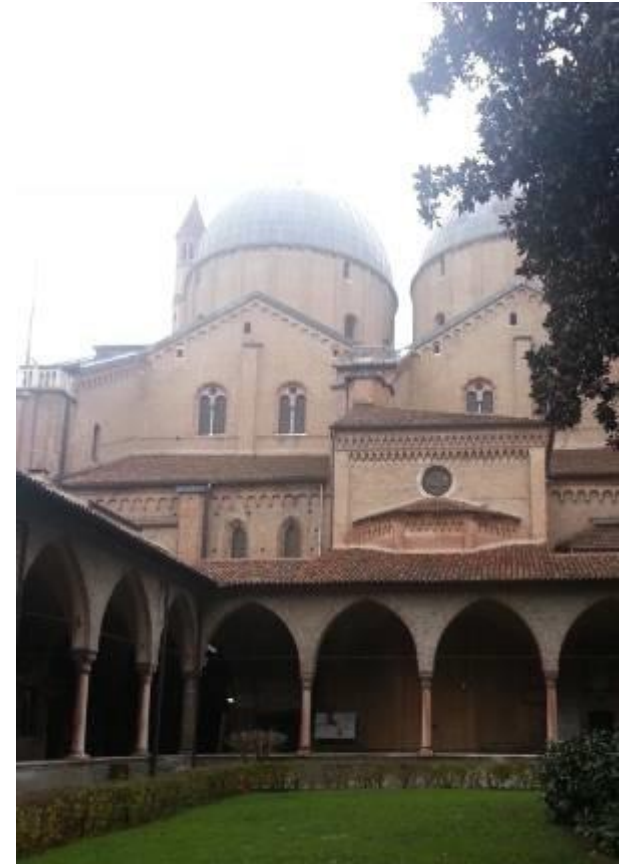
Nicolao Copernico – un bravo (?) studente



Cracovia (1492-1496)
Cattedrale SS. Maria



Bologna (1496-1500)
Torre degli Asinelli



Padova (1501-1503)
Basilica di S. Antonio

Il sistema Copernicano: i pianeti girano attorno il Sole

Mercurio: - 1 orbita in 90 giorni

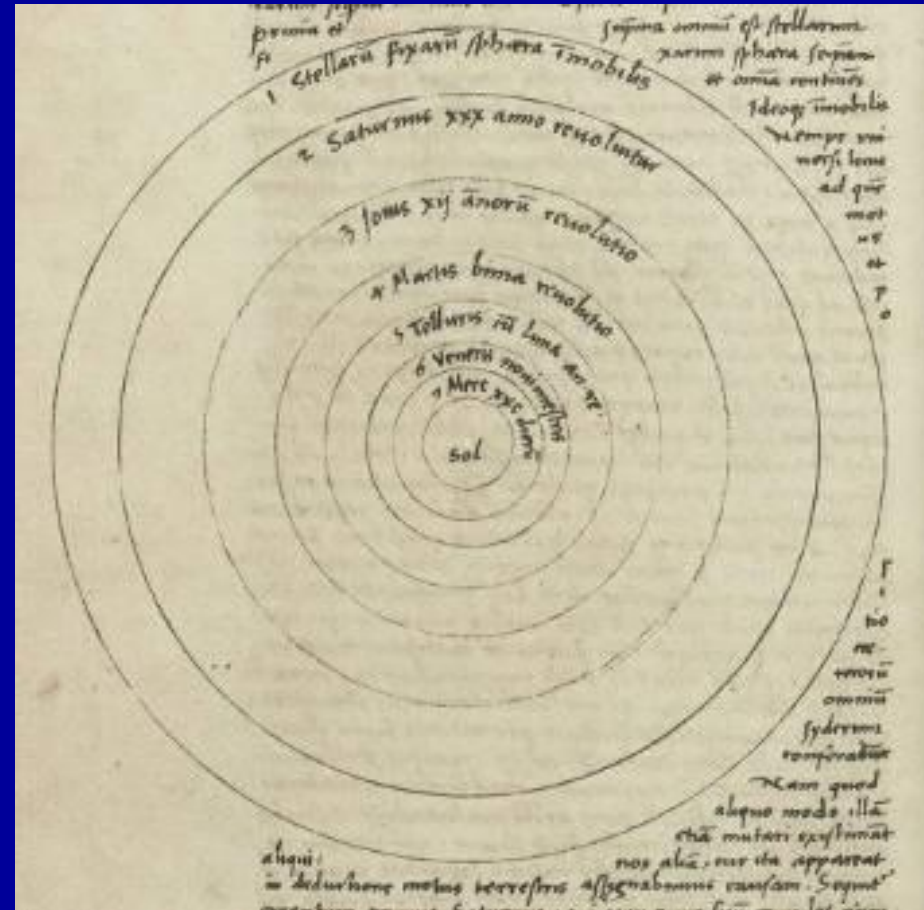
Venere: - 1 orbita in 9 mesi

Terra: 1 orbita in 1 anno

Marte: - 1 orbita in 2 anni

Giove: 1 orbita in 11 anni

Saturno: 1 orbita in 30 anni





Roger Bacon (1267): „Riforma del calendario”

Parlerò ora di un problema che dovrebbe diventare dovere della Chiesa risolvere, che introduce pericolo e caos e non dovrebbe più essere tollerato. Quello a cui aspiro è migliorare il calendario che la Chiesa usa.

E poiché il vero equinozio si sta spostando costantemente, così che circa l'anno 1481 sarà il V Idi Martii (5 marzo), e così spostandosi ulteriormente nella direzione verso l'inizio di marzo e oltre marzo ... è necessario che la Pasqua sia all'inizio di marzo o a febbraio. E questo è assolutamente impossibile, perché [...] il vero inizio della Quaresima dei Quaranta Giorni andrà avanti, e così, nel tempo reale della Quaresima, i cristiani mangeranno carne, che è la più assurda.

Queste cose sono terribili in se stesse, e tanto più sono estremamente stupide e degne di ridicolo, perché probabilmente **è stato il diavolo stesso** a far sì che ciò accadesse alla Chiesa a causa della sua ignoranza e negligenza.

(Roger Bacon, *Opera Maius*, 1267, p. 451)



Il principio della relatività

Perché non diremo che questo fenomeno della rivoluzione quotidiana è qualcosa di evidente nei cieli, e una realtà sulla terra, e che è proprio come si esprimeva Enea quando Virgilio dice: «Cia allontaniamo dal porto, e terre e città retrocedono»? [1]

Infatti, quando una nave naviga su un mare calmo, vedono tutto ciò che è fuori come se si muovesse come i movimenti di una nave, e viceversa pensano di essere fermi con tutto ciò che è con loro.

Lo stesso può senza dubbio valere per il moto della terra, e dare l'impressione che il mondo intero stia ruotando.

[1] Ci allontaniamo dal porto, e terre e città retrocedono

https://ilcrepuscolo.altervista.org/php5/index.php?title=Biblioteca:Virgilio,_Eneide,_Libro_III

Il capolavoro dell'Essere Migliore

Abbiamo così trovato in quest'ordine un ordine sorprendente del mondo, e una relazione stabilita e armonizzata tra il movimento e la dimensione delle sfere, che è altrimenti impossibile scoprire.

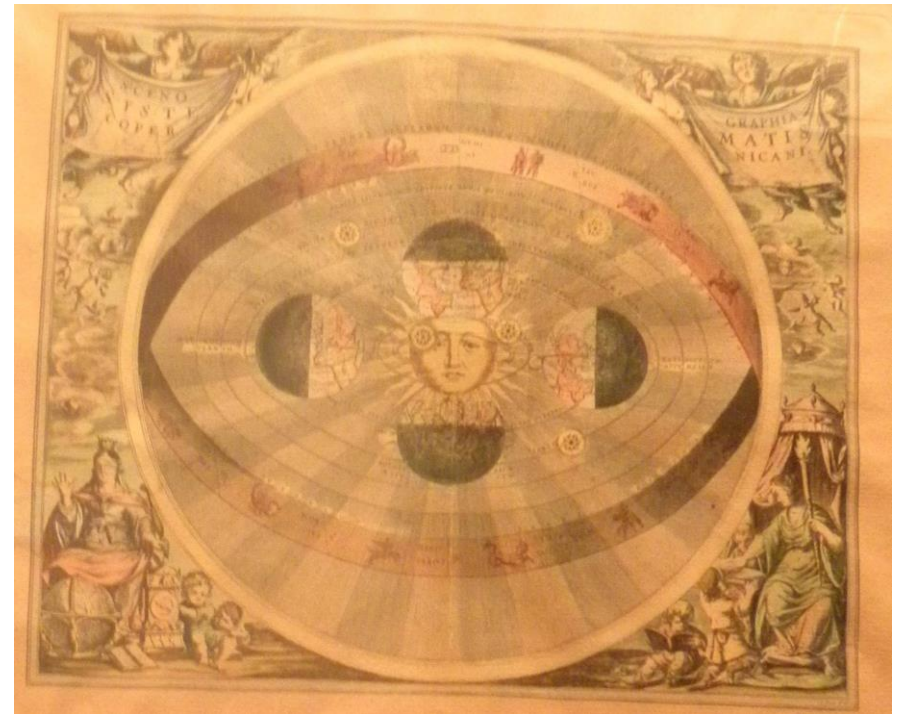
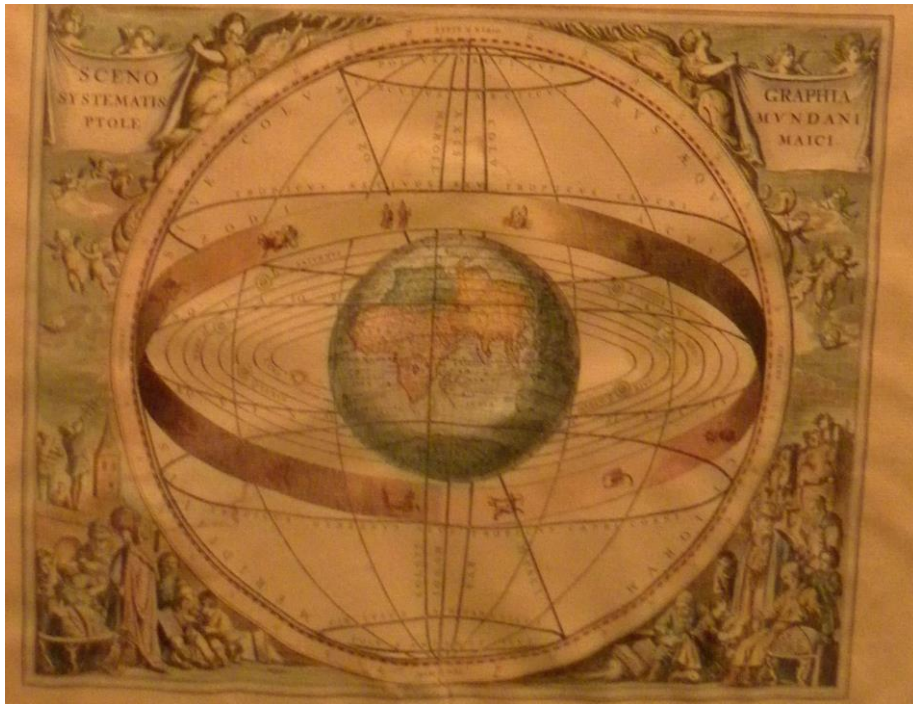
Per il fatto che anche dal più alto dei pianeti, cioè da Saturno, è ancora estremamente lontano dalla sfera delle stelle fisse, siamo convinti dalle loro luci tremolanti. Questa è la caratteristica che più li distingue dai pianeti, ed è anche, come dovrebbe essere, la più grande differenza tra corpi in movimento e stazionari.

In effetti, è il capolavoro divino del Migliore e del più Grande Essere! (p.23)

I dialogo su due sistemi più grandi del mondo (Galileo)



<https://dribbble.com/shots/5780069-Doodle-for-Nicolaus-Copernicus>



Castello Brianza, 17.06.2011, photo Maria Karwasz

Padre della scienza moderna

Galileo Galilei

From Wikipedia, the free encyclopedia

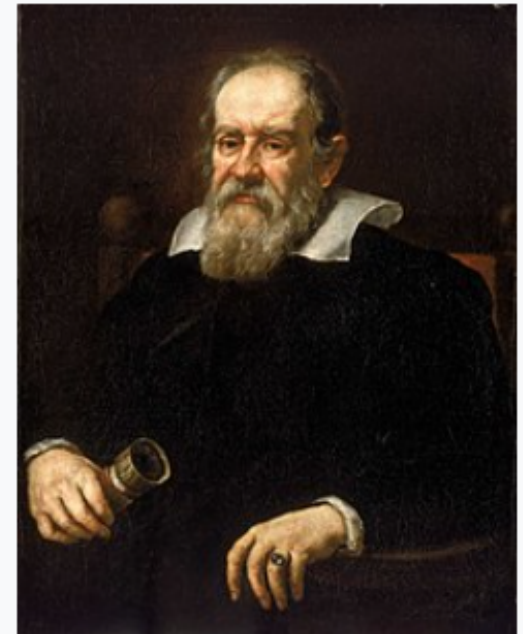
"Galileo" redirects here. For other uses, see [Galileo \(disambiguation\)](#) and [Galileo Galilei \(disambiguation\)](#).

Galileo di Vincenzo Bonaiuti de' Galilei (15 February 1564 – 8 January 1642) was an Italian astronomer, physicist and engineer, sometimes described as a polymath. Commonly referred to as **Galileo**, his name was pronounced /ˌɡælɪˈleɪ.oʊ ˌɡælɪˈleɪ.i/ (*GAL-ih-LAY-oh GAL-ih-LAY-ee*, Italian: [ɡaliˈlɛːo ɡaliˈlɛi]). He was born in the city of Pisa, then part of the Duchy of Florence.^[4] Galileo has been called the "father" of observational astronomy,^[5] modern physics,^{[6][7]} the scientific method,^[8] and modern science.^[9]

Galileo studied speed and velocity, gravity and free fall, the principle of relativity, inertia, projectile motion and also worked in applied science and technology, describing the properties of pendulums and "hydrostatic balances". He invented the thermoscope and various military compasses, and used the telescope for scientific observations of celestial objects. His contributions to observational astronomy include telescopic confirmation of the phases of Venus, observation of the four largest satellites of Jupiter, observation of Saturn's rings, and analysis of lunar craters and sunspots.

Galileo's championing of Copernican heliocentrism (Earth rotating daily and revolving

Galileo Galilei



1636 portrait by Justus Sustermans

Born

Galileo di Vincenzo Bonaiuti

1564

Principio di relatività

- «Rinserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animalletti volanti: siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; suspendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vada versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca che sia posto a basso; e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animalletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza. [..]
- Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia mentre il vascello sta fermo non debbano succedere così: fate muovere la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur di moto uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti; né da alcuno di quelli potrete comprendere se la nave cammina, o pure sta ferma.»

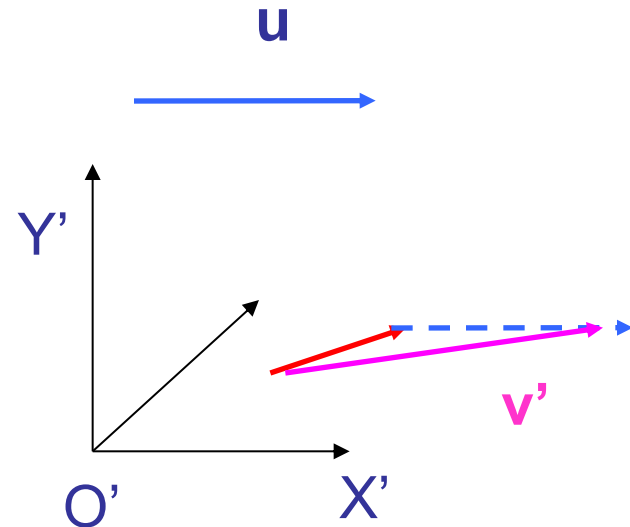
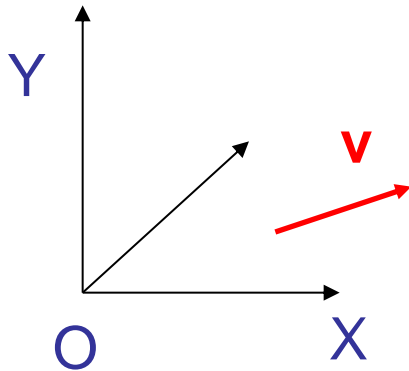
Dialoghi sopra due massimi sistemi del mondo

«Ci allontaniamo dal porto, e terre e città retrocedono» (*Eneide*, III, 72)

https://it.wikipedia.org/wiki/Relativit%C3%A0_galileiana

Le trasformazioni di Galileo

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v} + \mathbf{u}$$



Tutti (?) gli osservatori che si muovono a velocità costante sono equivalenti

Maxwell's equations (~1865)



James Clerk Maxwell.

God said:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho / \epsilon_0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{I} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

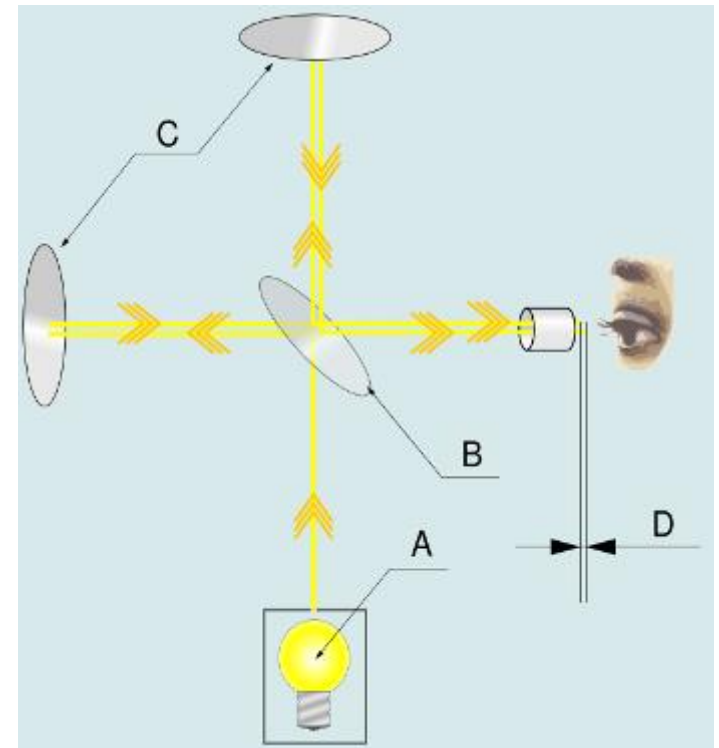
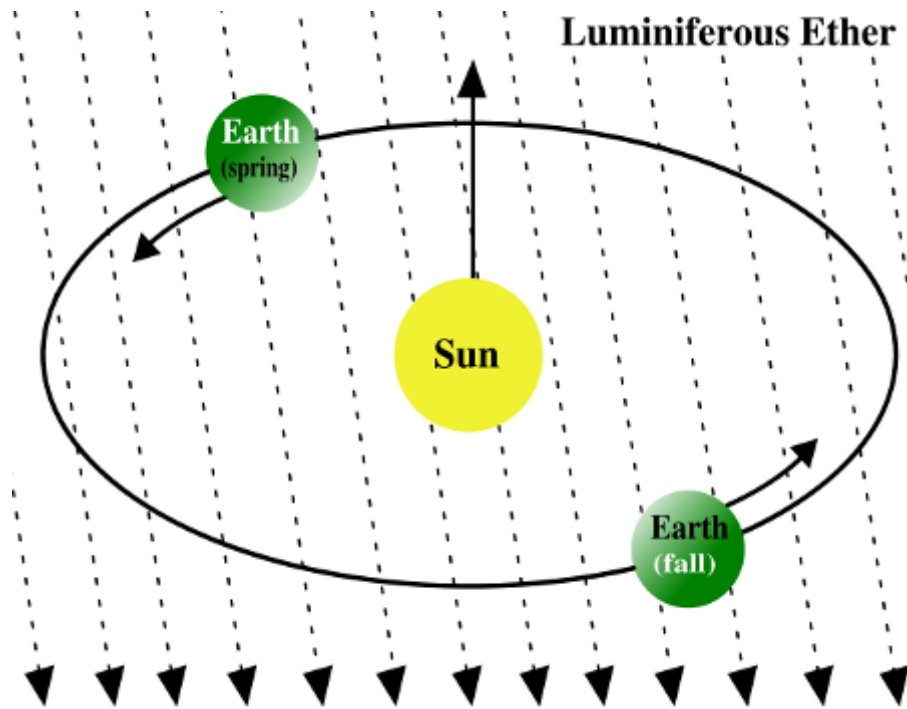
and there was light!

Abraham Michelson – esperimento sul moto della Terra (Potsdam, 1881)



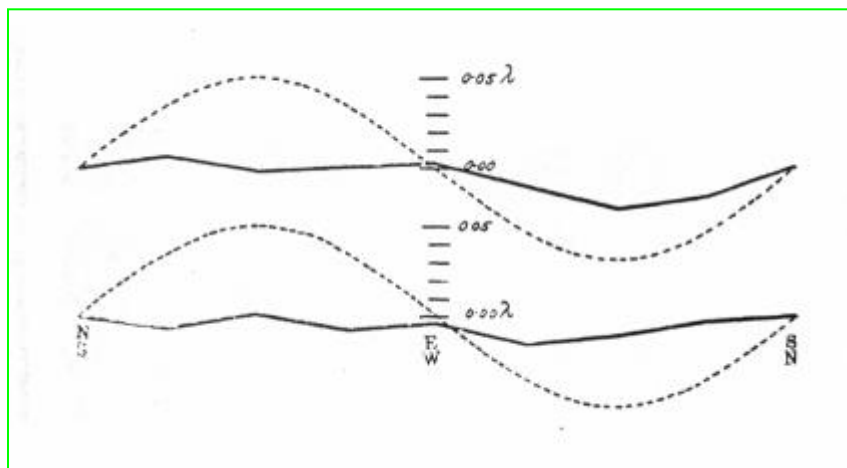
Nato a Strzelno (50 km da Toruń) nel 1852,
si è trasferito con i genitori negli Stati Uniti quando aveva 3 anni.
Primo premio Nobel americano (1907)

Abraham Michelson – come cambia la velocità della Terra in un anno?



La velocità della Terra in orbita è di 30 km/s. La velocità della luce è di 300.000 km/s. Possiamo misurarla in base all'interferenza della luce.

Abraham Michelson & Morley (1887 Cleveland): La Terra non si muove!



Risultato:

Nulla velocità di orbita, entro 0,1 dai valori attesi

? La Terra non si muove

? Non c'è etere

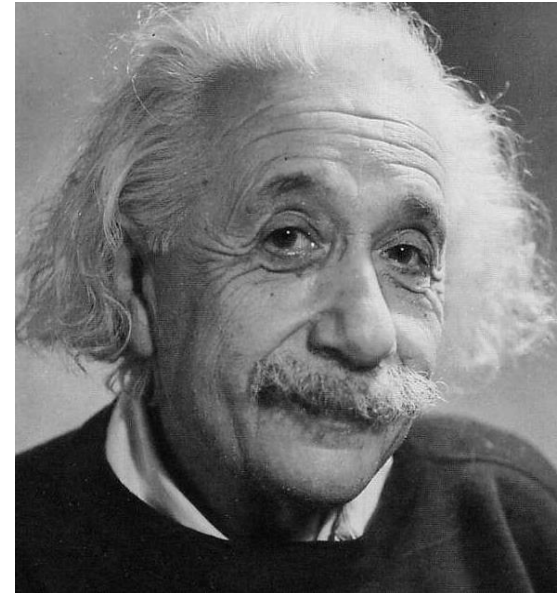
? C'è qualcosa di sbagliato nella velocità della luce

On electrodynamics of moving bodies (Albert Einstein, June 1905)

3. *Zur Elektrodynamik bewegter Körper;* *von A. Einstein.*

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“



Come si trasformano le leggi di Maxwell in un sistema di riferimento in moto (uniforme)?

Einstein, Settembre 1905: "La massa di un corpo dipende dalla sua energia?"

- La velocità della luce è costante, indipendentemente dalla quiete o dal movimento
- La velocità della luce è **il limite** con cui possiamo trasportare le informazioni
- **Possiamo a volontà trasformare l'energia in massa**

13. *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?
von A. Einstein.*

Die Resultate einer jüngst in diesen Annalen von mir publizierten elektrodynamischen Untersuchung¹⁾ führen zu einer sehr interessanten Folgerung, die hier abgeleitet werden soll.

Unter Vernachlässigung von Größen vierter und höherer Ordnung können wir setzen:

$$K_0 - K_1 = \frac{L}{V^2} \frac{v^2}{2}.$$

$$E=mc^2$$

Aus dieser Gleichung folgt unmittelbar:

Gibt ein Körper die Energie L in Form von Strahlung ab, so verkleinert sich seine Masse um L/V^2 . Hierbei ist es

(Eingegangen 27. September 1905.)

Filo-sofia: la scienza più alta

- Da quando esiste la scienza, c'è stato uno sforzo costante per andare oltre le considerazioni parziali e per abbracciare in un'unica scienza tutto ciò che esiste; Si cerca costantemente di costruire una scienza che dia una visione del mondo accanto alle scienze speciali: questa scienza è stata ed è chiamata filosofia.
- È una scienza il cui campo d'azione è quindi il più ampio e il più generale di tutte le scienze.
- È la scienza di ciò che è più importante e prezioso per l'umanità.
- C'è stato un periodo in cui la natura era oggetto di filosofia, perché non si prestava attenzione a nessun fenomeno se non a quelli naturali. Ci sono stati periodi in cui il suo argomento principale erano le norme morali, Dio e l'anima, perché solo il loro studio sembrava essere importante per l'umanità".

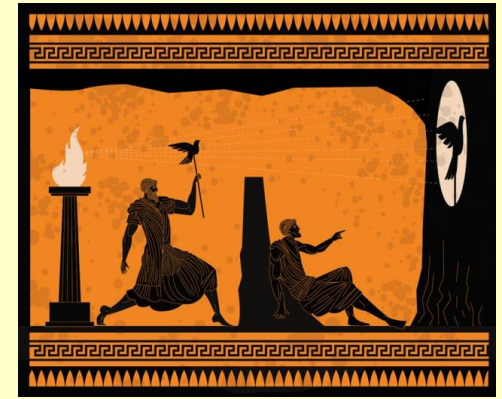
In secoli successivi, dalla filosofia si sono separate le scienze particolari, dando impressione di essere uniche vere, verificabili, veritiere. Ma la filosofia torna, costantemente, ponendo domande fondamentali quasi ad ogni «tornante» delle scienze, specie di fisica (GK)

Wl. Tatarkiewicz, Storia della filosofia, Varsavia, 1937, vol. 1., p. 13.

Robert P Crease still worries that physicists don't realize why the humanities are so important

Robert Crease, This is the critical point, Physics Today, May 2020, <https://physicsworld.com/a/this-is-the-critical-point/>

Platone: il mondo delle ombre



Platone si chiede quale sia l'*oggetto* proprio della scienza.

Quale la realtà fotografata dal sapere? Infatti, a meno di ridurre la scienza a fantasia o vaneggiamento della mente, si dovrà per forza ammettere l'esistenza di un suo contenuto specifico.

Ovviamente, non possono costituire oggetti della scienza le cose del mondo, apprese dai sensi, che sono mutevoli e imperfette, e quindi dominio di quella corrispondente forma di conoscenza mutevole ed imperfetta che Platone chiamava opinione (*doxa*).

Oggetto proprio della scienza, secondo Platone, non possono essere che le *idee*. [...]

Per Platone l'idea indica invece una entità immutabile e perfette, che esiste per suo conto – il filosofo ne parla come di una *ousia*, ossia come una sostanza o realtà autonoma. (p. 201)

Nicola Abbagnano, Giovanni Fornero, *Protagonisti e testi delle filosofie*, Paravia, Torino, 1996 Vol 1

Kant: i due mondi della *scienza*

Kant comincia con lo stabilire la distinzione tra conoscenza sensibile e conoscenza intellettuale. La prima, che è dovuta alla *ricettività* (o passività) del soggetto, ha per oggetto il *fenomeno*, cioè la cosa come appare nella sua relazione al soggetto.

La seconda, che è una *facoltà* del soggetto, ha per oggetto la cosa così com'essa è, nella sua natura intelligibile, cioè come *noumeno*. Nella conoscenza sensibile si deve distinguere la materia dalla forma. [...] La conoscenza sensibile, anteriormente all'uso dell'intelletto logico, si chiama *apparenza*; e la conoscenza riflessiva che nasce dal confronto, fatto dall'intelletto, di molteplici apparenze, si chiama *esperienza*. [...] Gli oggetti dell'esperienza sono i fenomeni.

Quanto alla conoscenza intellettuale, Kant ritiene ancora che essa, pur nell'ambito di una serie di *limiti*, abbia la possibilità di cogliere le cose *uti sunt*, ossia come sono nel loro ordine intellegibile (i «noumeni»), a differenza della sensibilità, che le percepisce *uti apparent*, come appaio (i «fenomeni») (p. 670)

Come Copernico, per spiegare i moti celesti, aveva ribaltato i rapporti fra lo spettatore e le stelle, e quindi fra la terra e il sole, così Kant, per spiegare la scienza, ribalta i rapporti fra soggetto ed oggetto, affermando che non è la mente che si modella passivamente sulla realtà, bensì la realtà che si modella sulle forme a priori attraverso cui le percepiamo (p. 676)

Abagnano, *op cit.*,

La nascita della Meccanica Quantistica

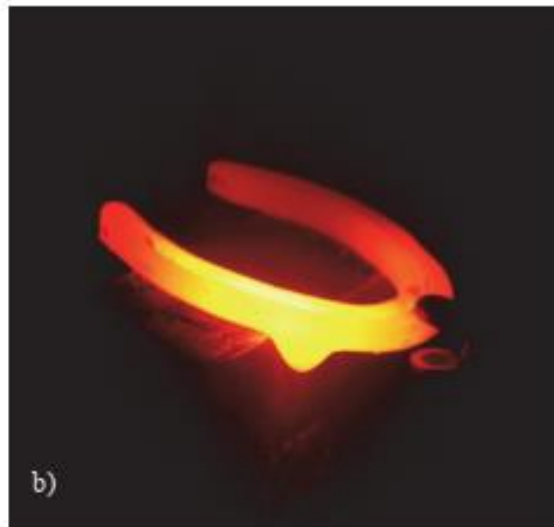
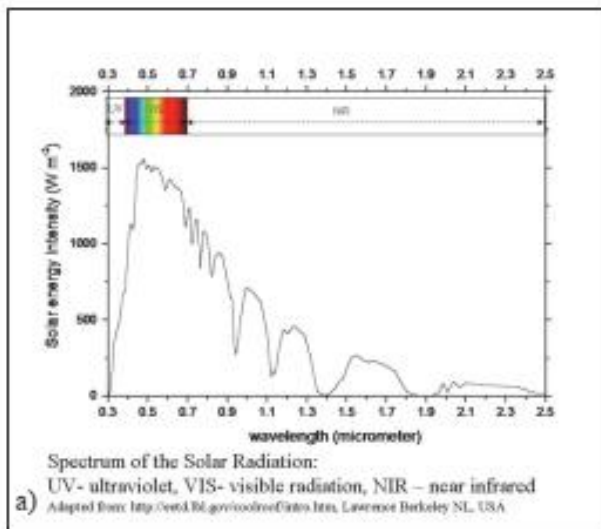
Giovedì, 14.12.1900, ore 16:30, Berlino, Accademia Prussiana di Scienze

Da dove derivano i colori dell'arcobaleno?

Per spiegarlo Planck ha proposto un modello di *corpo nero* (una scatola, con una fenditura attraverso quale esce la luce), a temperatura T

Ma il modello non funzionava: bisognava assumere, che la vibrazioni EM all'interno della scatola sono quantizzate $E = h\nu$ (dove ν è la frequenza).

Per ragioni geometriche, certe frequenze non sono possibili.

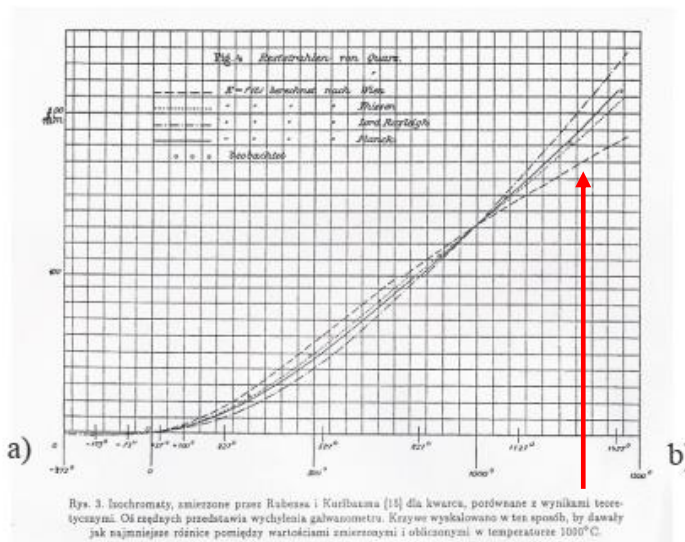


$$u_\nu(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

Fot. 2.5. Obserwacje leżące u podstaw rewolucji Plancka: a) widmo Słońca po przejściu przez atmosferę Ziemi; 40% energii przypada na podczerwień; b) kolory rozgrzanej podkowy

«La fisica è completa»

Il Quadro di fisica è ormai completo. Rimane da limare qualche cifra decimale
(? Lord Kelvin ? Abraham Michelson)



6. Über einen
die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes
betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;
von A. Einstein.

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwell'schen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwell'schen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderablen Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderablen Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während nicht die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahles nach der Maxwell'schen Theorie (oder Allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) den Lichts auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

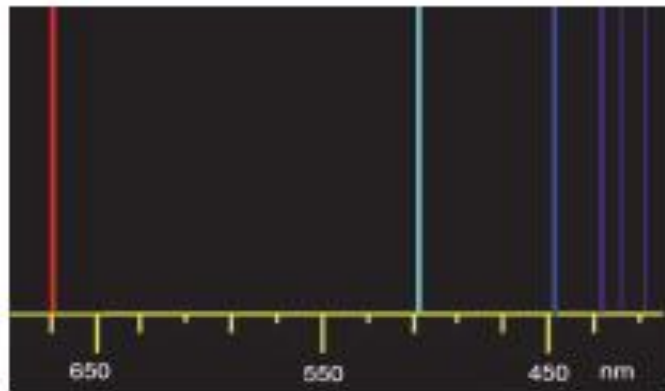
Ryc. 2.7. Dwie prace, które leżą u podstaw fizyki kwantowej: **a)** praca Plancka nt. widma ciała doskonale czarnego (Annalen der Physik, vol. 4, p. 553, 1901r.) – wykres przedstawia różne teorie porównane z danymi doświadczalnymi¹⁴; **b)** fragment pracy A. Einsteina nt. efektu fotoelektrycznego – niemożliwe było wyjaśnienie tego zjawiska bez założenia, że atomy pochłaniają energię światła w postaci ściśle określonych porcji, zależnych jedynie od koloru światła; porcje te nazywamy fotonami.

Opisujemy to prostym wzorem,

$$E = h \cdot \nu \quad (2.8)$$

L'emissione infrarossa del corpo nero: dati sperimentali e varie teorie
Tutta la rivoluzione è avvenuta per questa piccola differenza

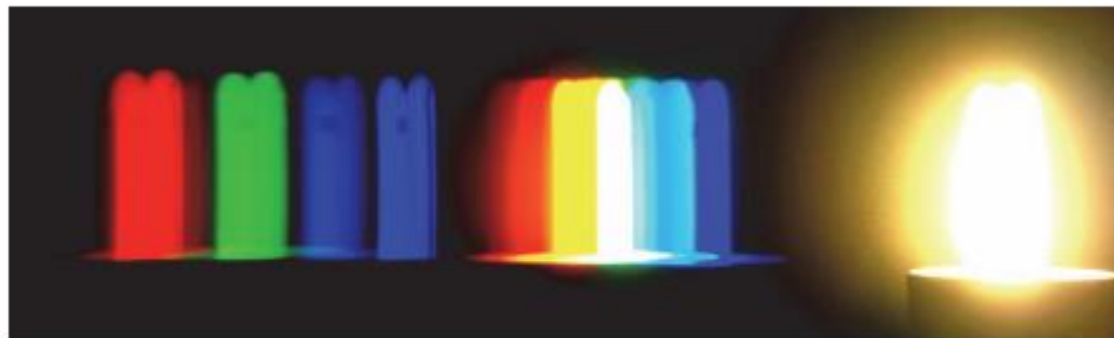
La luce è quantificata



a)

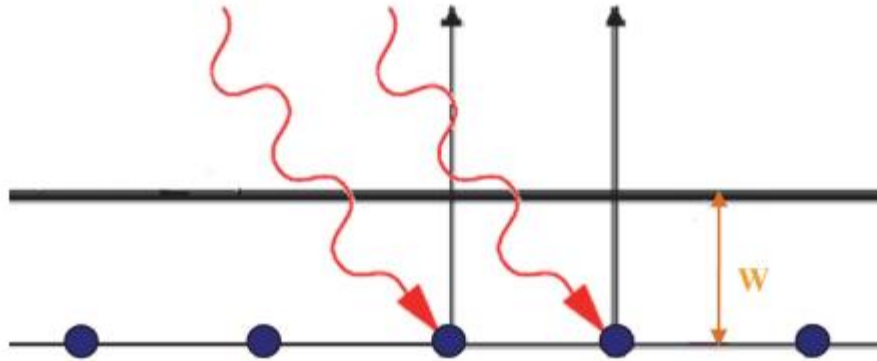


b)

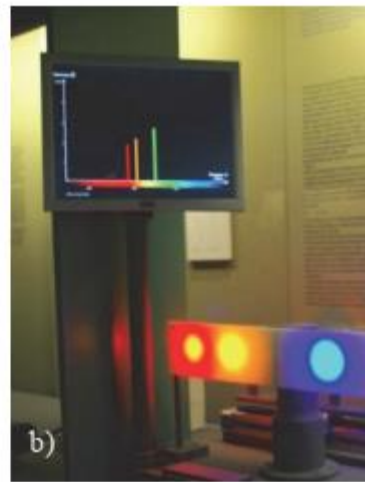


Fot. 2.18. Widmo żarówki energooszczędnej, uzyskane za pomocą siatki dyfrakcyjnej; ma ono charakter dyskretny – oddzielnych linii a brakuje np. koloru żółtego, pomarańczowego i fioletowego. Na tym zdjęciu obraz żarówki rozdziela się wyraźnie na poszczególne kolory składowe dopiero w drugim rzędzie dyfrakcji (foto KS).

Effetto fotoelettrico: la luce è una particella



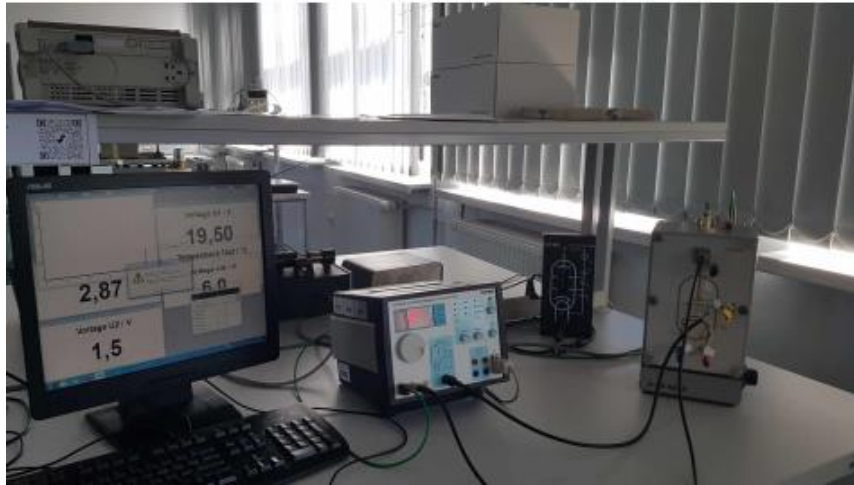
Ryc. 2.10. Schemat zjawiska fotoelektrycznego.



Fot. 2.11. Współczesna wersja doświadczenia fotoelektrycznego Lenarda (Muzeum Nauki w Monachium): **a)** światło o różnych długościach fali (czyli różnych kolorach) wyrzuca elektrony z płytki metalowej, zamkniętej w opróżnionej z powietrza szklanej bańki zaś woltomierz mierzy energię wyrzucanych elektronów; **b)** komputer wykreśla energię elektronów w zależności od częstotliwości fali światła (czyli od odwrotności długości fali) – wykres jest liniowy, zgodnie ze wzorem Einsteina, równanie (2.11). Foto GK.

Potenziali fotowoltaici
Diodo verde 1,5 V
Diodo rosso 1,04 V
0,8 V si perde sulla
giunzione *n-p*

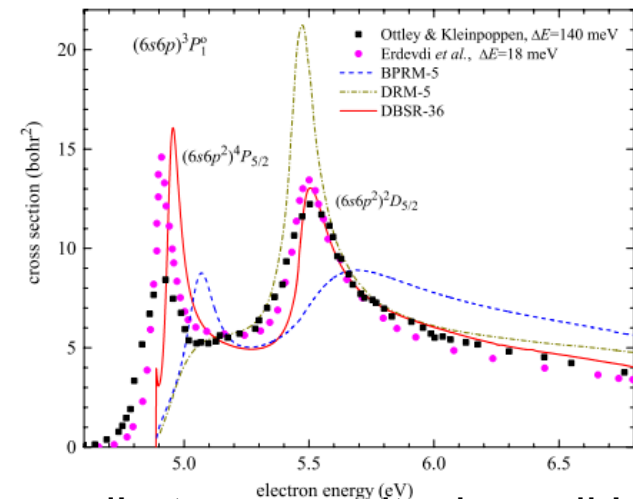
Esperimento di Franck-Hertz



Dipendenza I-V per Ne
(B. Jezierska, 2025)

prądu w zależności od napięcia U_1 dla neonu przy ustalonych

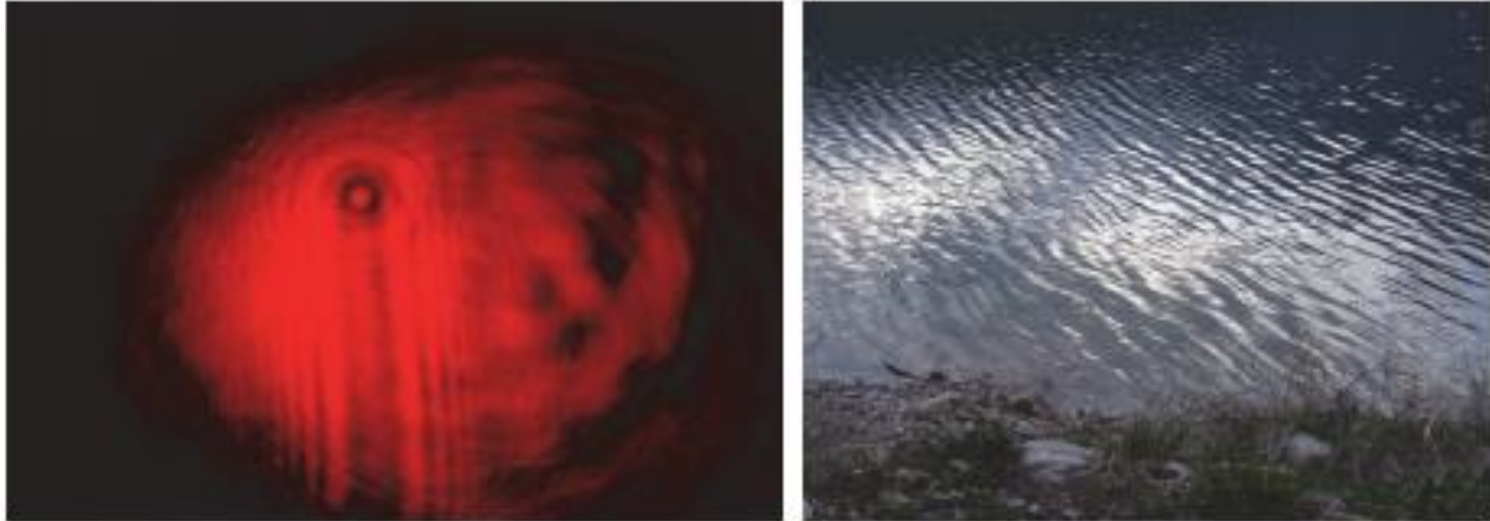
La perdita d'energia è quantificata.



Sezione d'urto per eccitazione di Hg
O Zatsarinny, K. Bartschat, PRA (2009)

Dualità: la luce è un'onda

Na przeszkodach, jak kółek w jeziorze, fala ugina się i zmienia kierunek rozchodzenia się. Mówimy o zjawisku dyfrakcji³⁵. Zjawisko ugięcia światła na mini-łepku szpilki pokazujemy na fot. 2.25.

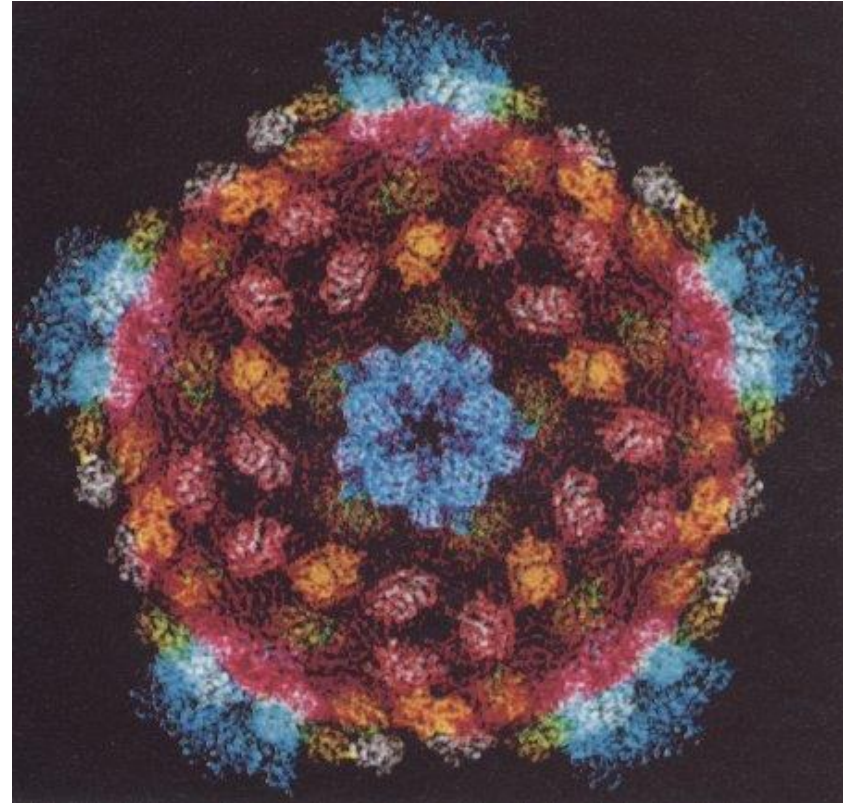
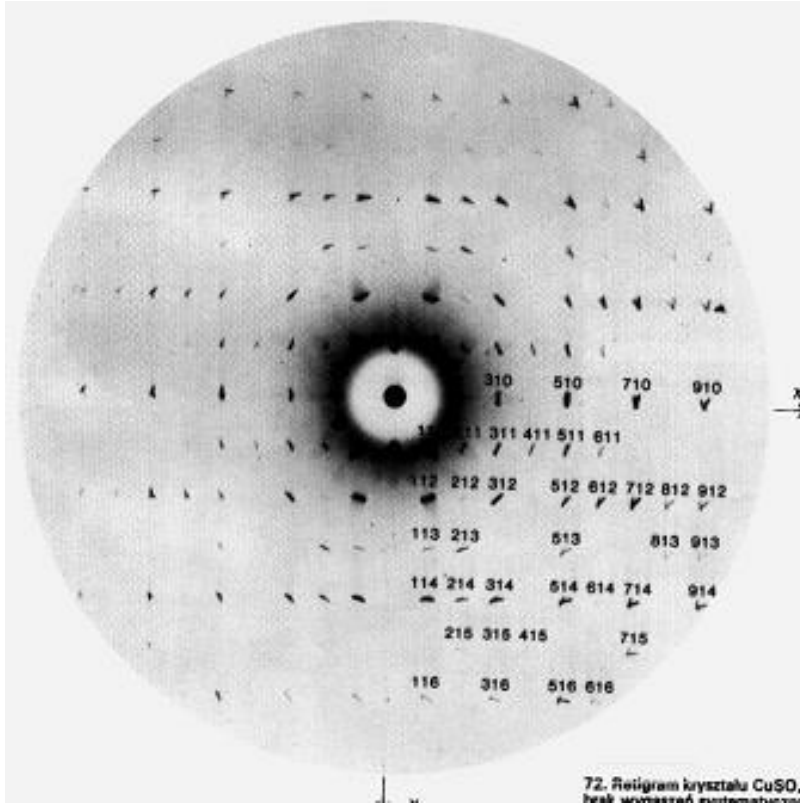


Fot. 2.25. Ugięcie wiązki światła lasera na łepku szpilki (foto KS) i fal na wodzie (foto MK)

Diffrazione della luce sulla spilla

Lago di Terlago (TN): foto Maria Karwasz

Dualità: raggi X sono onde



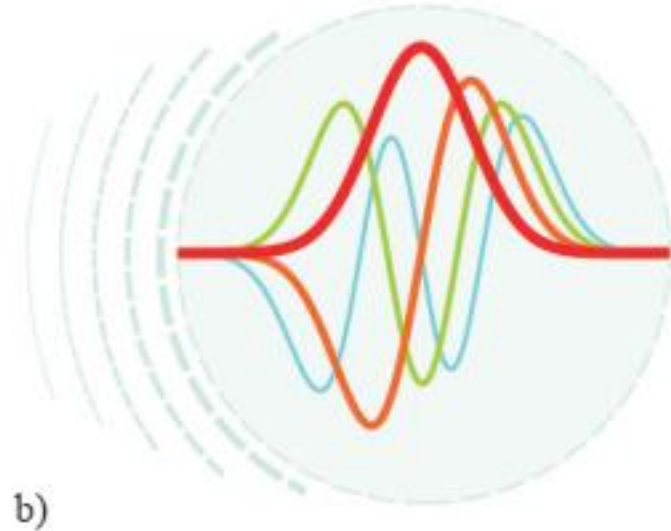
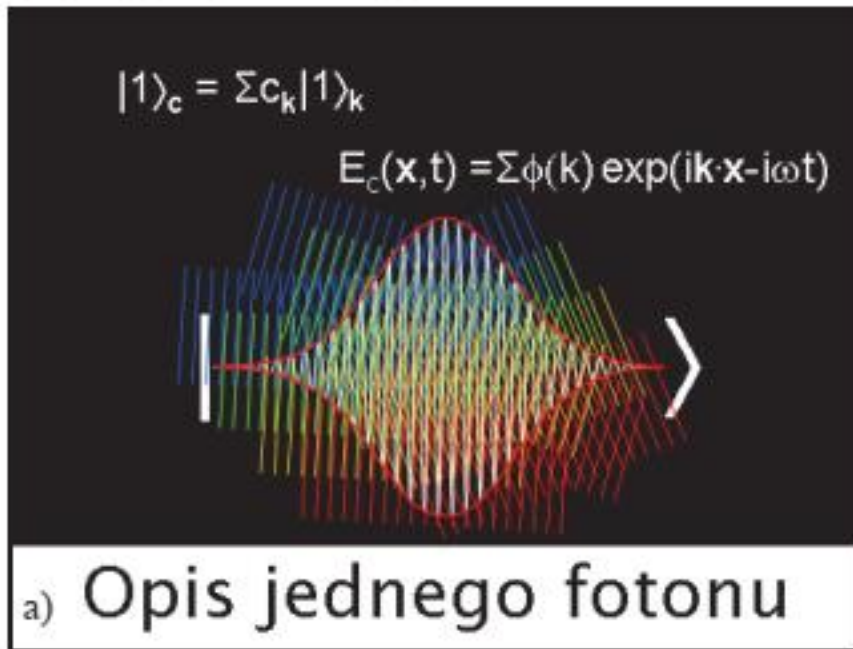
Diffrazione di raggi X
Struttura di un virus

https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/dna.html
<https://www.nature.com/articles/43403>

Un singolo quanto di luce

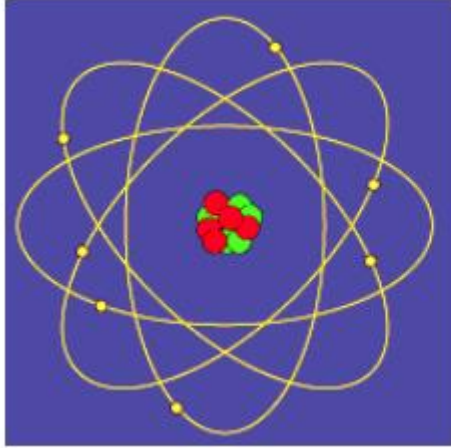
Dla ciekawych

Ale jak pogodzić dwoistą naturę światła w sposób fizyczny? Pokazali to młodzi doktoranci w Instytucie Fizyki UMK w 2007 roku. Fala (Maxwella) opisująca jeden kwant światła, to taki pojedynczy impuls, zob. ryc. 2.15.



Ryc. 2.15. a) „Pomiar kształtu pojedynczego fotonu metodą „rzutu na kota”, wykład ZDF UMK, 2008
b) obwiednia pojedynczego fotonu („Źródła fotonów w łączności kwantowej”, W. Wasilewski²²).

Forse anche un elettrone è un onda?



Caffeteria Gay Lussac a Parigi

Luise, VII conte de Broglie (laureato in storia), dottorato in fisica (1924):
se la luce sono *lichquanten*, magari anche un elettrone è un onda?

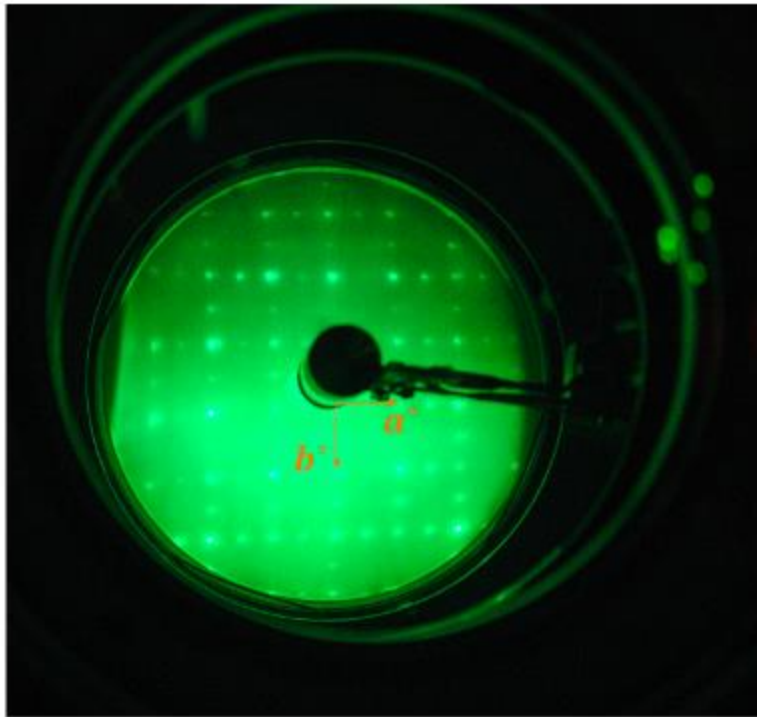
$$\lambda = h/p$$

L'idea non piacque ai fisici, ma ad Albert Einstein – sì.
Quattro anni dopo fu verificata con l'esperimento di diffrazione di elettroni.

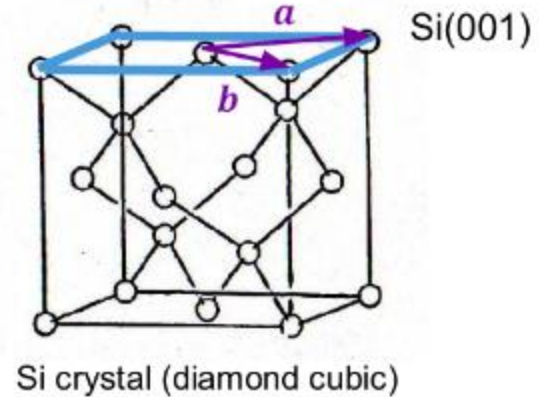
A questo punto: il modello di Bohr è semplice un'onda circolare e stazionaria?

Dualità: elettrone è un'onda

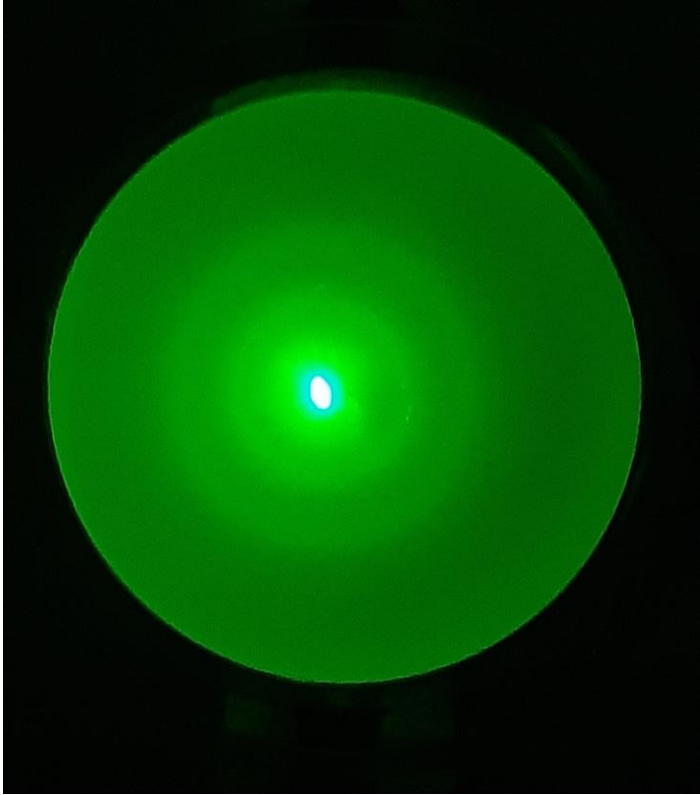
Describe & explain the low-energy electron diffraction (LEED) below



Si(001) clean surface



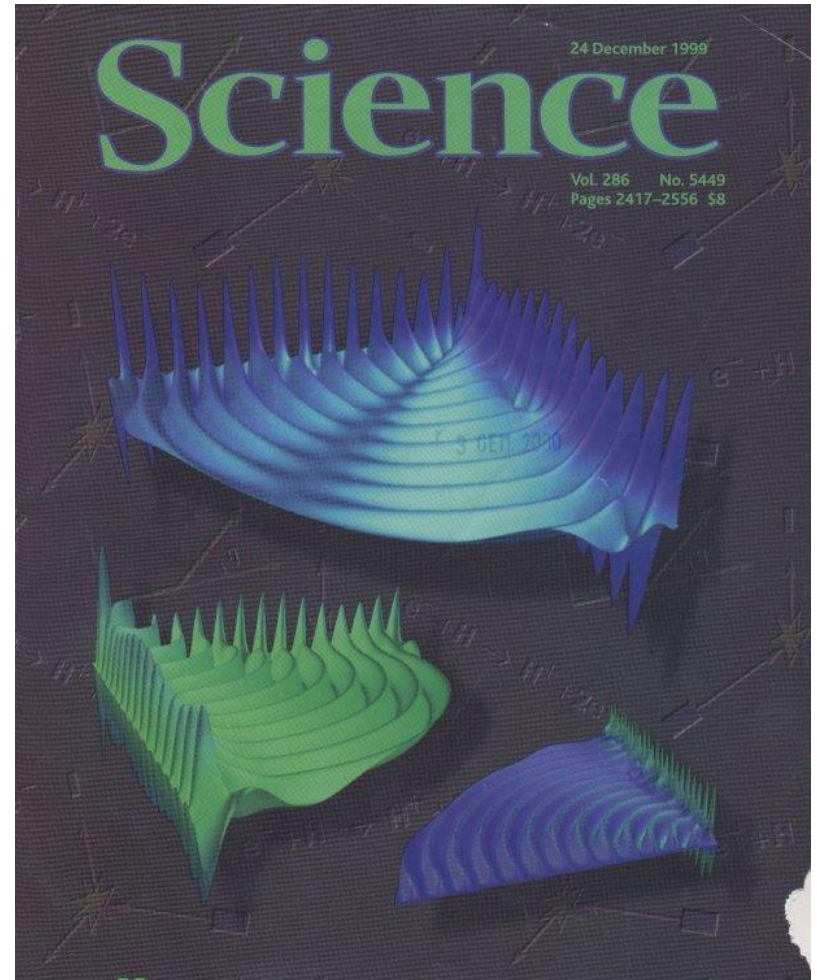
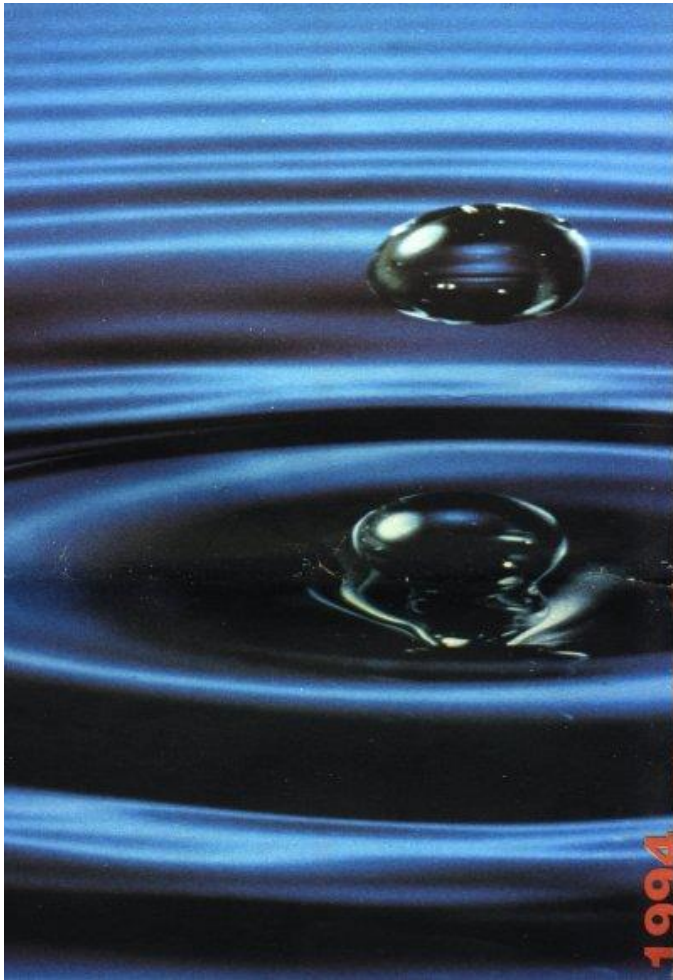
Dualità: elettrone è un'onda



Diffrazione di elettroni (2 keV) sul cristallo di Nickel (UMK student lab)

<https://www.tmj4.com/news/local-news/eye-to-the-sky-did-you-see-the-sun-halo>

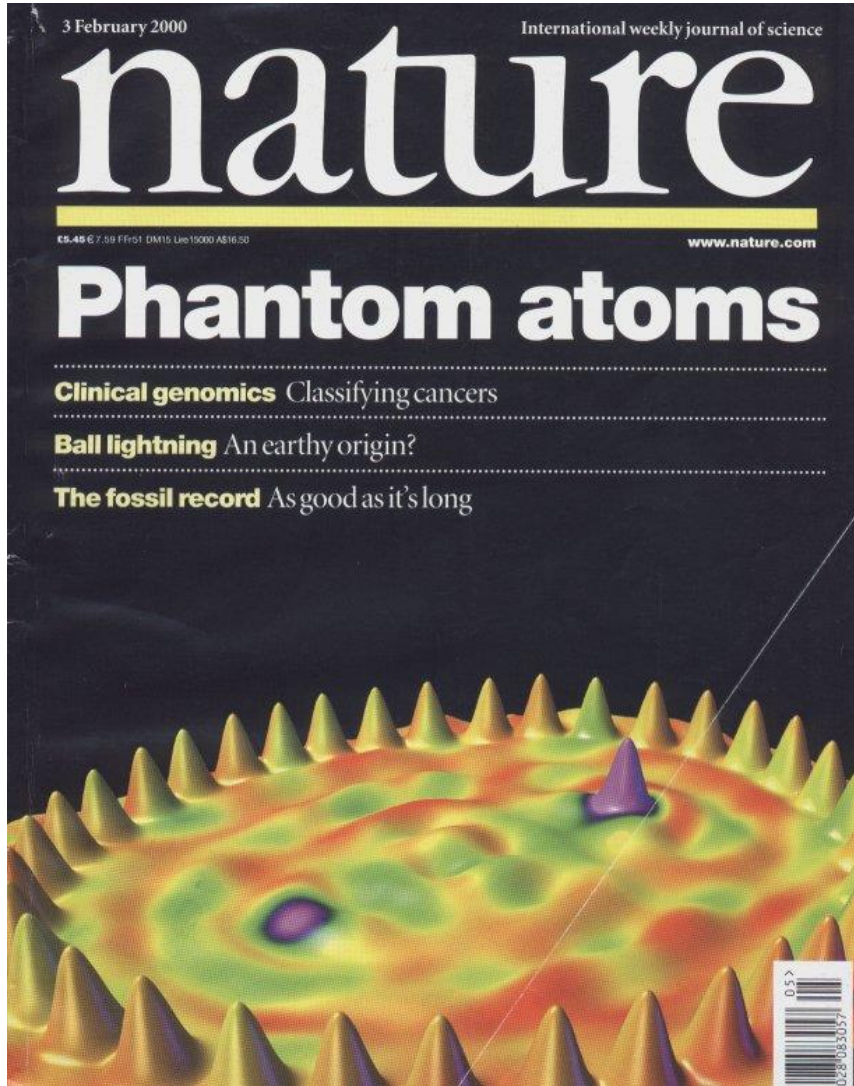
Dualità: un elettrone è un'onda



Propagazione di un elettrone dopo la ionizzazione dell'atomo d'idrogeno

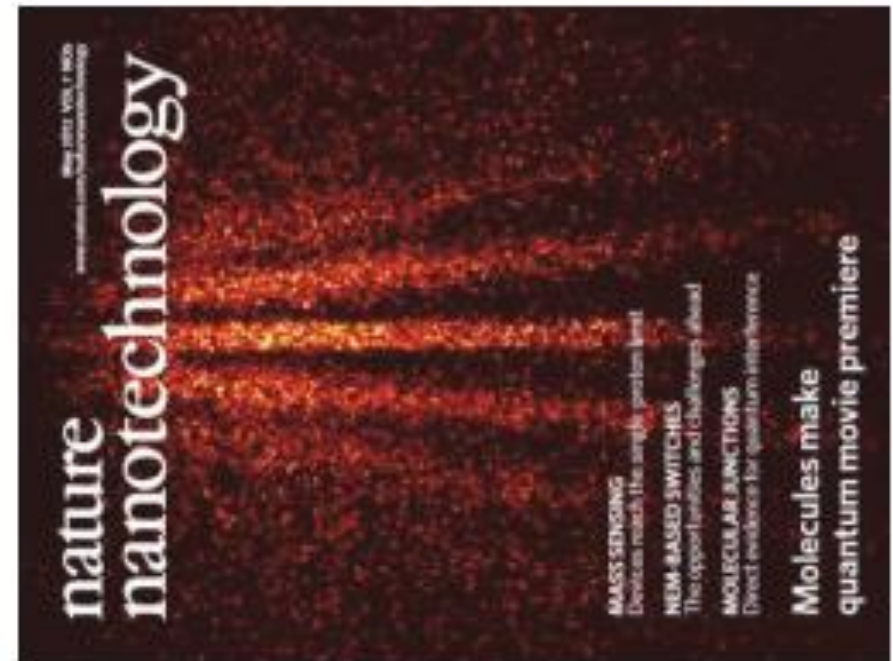
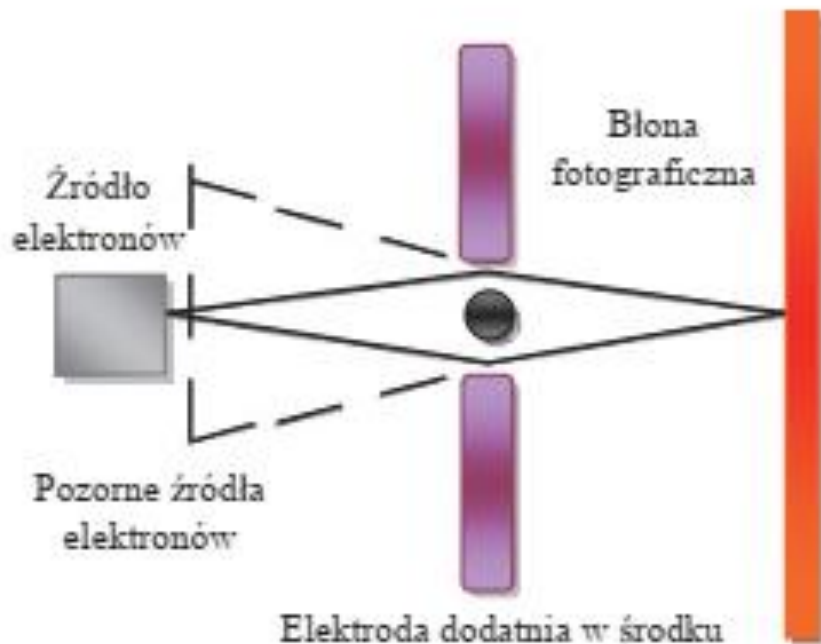
https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/dna.html

Dualità: la luce è un'onda



https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/dna.html

Dualità: anche atomi sono onde

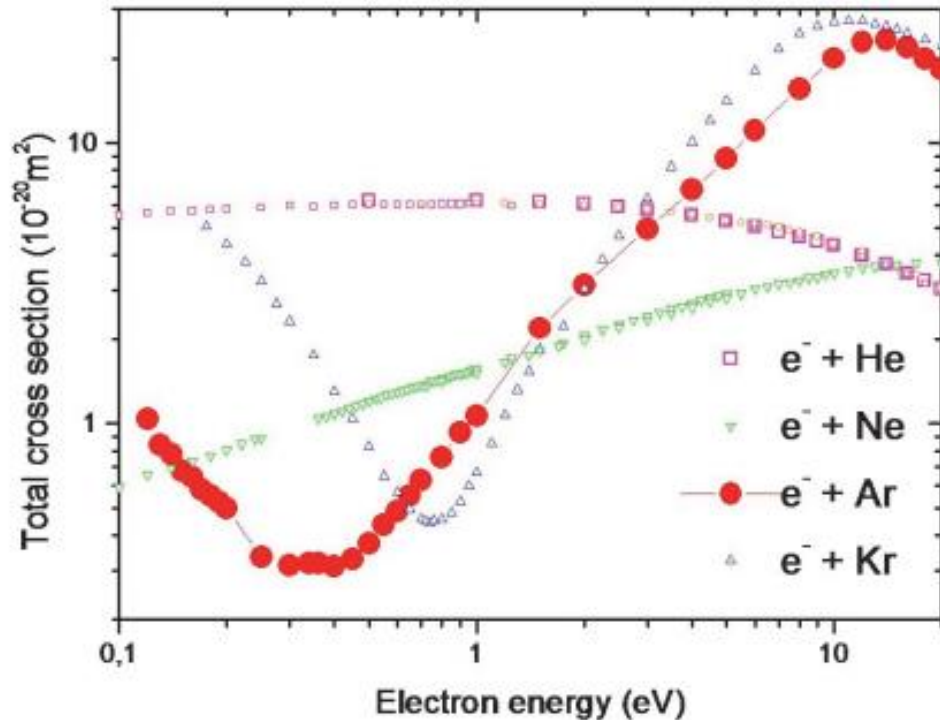


Rys. 2.29. a) Schemat układu do obserwacji interferencji elektronów (lub atomów) pochodzących z dwóch pozornych źródeł elektronów; b) prążki obserwowane w interferencji drobin ftalocyjaniny (Uniwersytet w Wiedniu, 2012, na zdjęciu okładka czasopisma „Nature”)

Diffrazione ed interferenza del fascio di ftalocianina (Università Vienna)

GK, *op. cit.*

Collisioni elettroniche

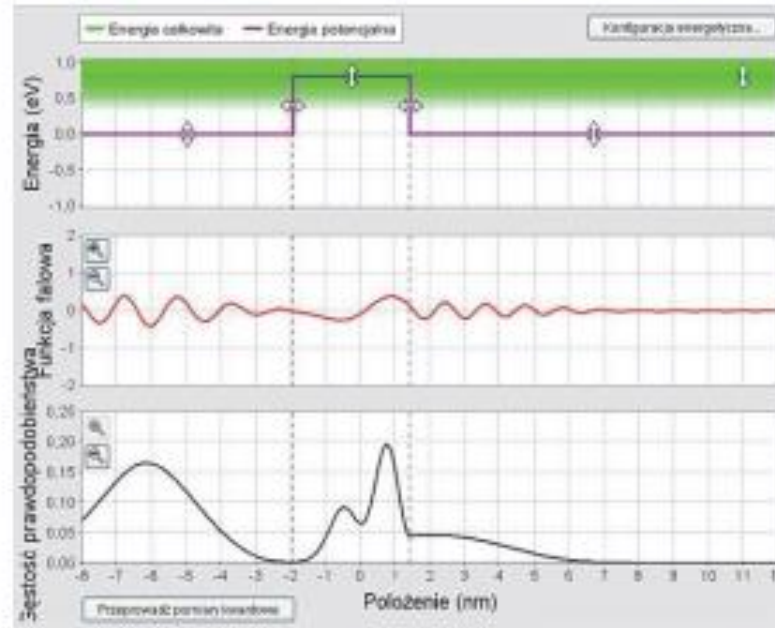


Rys. 2.26. Całkowite przekroje czynne na rozpraszanie elektronów w gazach szlachetnych: prawdopodobieństwo przejścia elektronów przez zbiornik z gazem (analiza³⁶ i pomiary autora na Politechnice Gdańskiej). W helu przekrój czynny maleje ze wzrostem energii elektronów, tak jak się tego można spodziewać z fizyki klasycznej; w argonie około energii 0,3-0,5 eV (i kryptonie około 0,7-0,8 eV) przekrój czynny ma głębokie minimum - gaz staje się dla elektronów przezroczysty; efekt ten, odkryty na Politechnice w Gdańsku przez C. Ramsauera ma zasadnicze znaczenie dla kwantowego obrazu świata (rys. GK).

Diffusione di elettroni in gas nobili: argon, krypton e xenon diventano trasparenti per elettroni ad energia circa 0,3 eV. L'effetto scoperto da Ramsauer (pubblicato 1919 a Danzica, non spiegabile con la meccanica quantistica di Planck. Misure GKt.

Elettroni attraversano la barriera

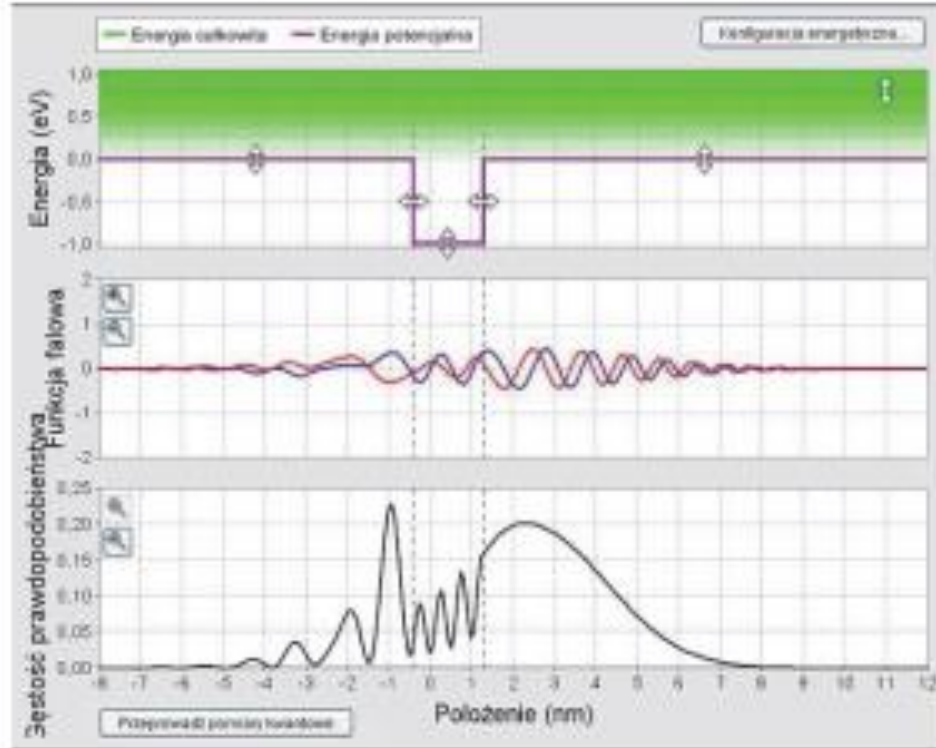
Aby zilustrować „działanie” równania Schrödingera, na rysunku 2.30 pokazujemy przemieszczanie się w przestrzeni tzw. paczki falowej. Paczka ta w momencie startu jest dość dobrze określona w przestrzeni; w miarę upływu czasu, niezależnie czy paczka ta wędruje czy stoi, rozmywa się w przestrzeni. Podkreślimy, że to nie elektron jako cząstka rozmywa się w przestrzeni, ale nasza wiedza o jego położeniu staje się coraz mniej pewna.



Ryc. 2.30. Fala pada na dość szeroką barierę potencjału. Amplitudę fali opisuje czarna krzywa. Część fali „grzęźnie” w barierze, ale większa część się odbiła. Część uwieczniona w barierze powoli wypływa na drugą stronę: to nie kawałek elektronu, ale prawdopodobieństwo wyniku naszego pomiaru⁴⁰.

Un elettrone (ma nel modello – pacchetto d’onda) attraversa una barriera di potenziale. Nonostante che dal punto di vista classico, l’elettrone dovrebbe essere respinto, in meccanica quantistica esiste una certa *probabilità* di trasmissione. Modello: phet.colorado.edu

Elettroni attraversano la barriera

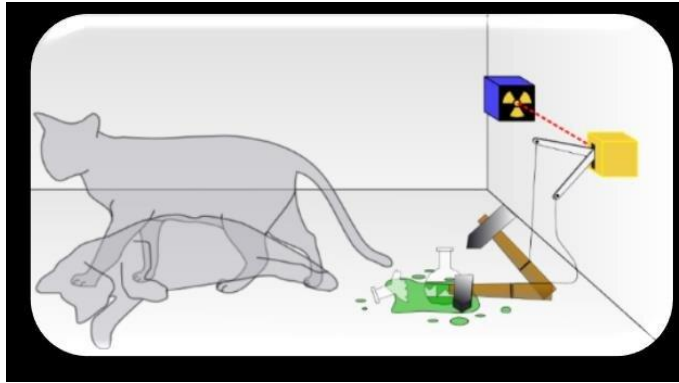


Ryc. 2.31. Fala pada na dość szeroką studnię potencjału. Amplitudę fali opisuje krzywa czarna. Część fali "grzęźnie" w studni, ale większa część przechodzi dalej. Część uwięziona w studni interferuje z falą padającą. Przedstawiony rysunek to zdjęcie dynamicznego obrazu. Źródło: Uniwersytet w Colorado⁴².

Nello stesso modello, l'elettrone viene per un attimo di tempo *intrappolato* dentro un pozzo di potenziale. Le simulazioni sono molto didattiche!

Modello: phet.colorado.edu

Il gatto di Schrödinger



Principio di sovrapposizione:

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Psi^+ + \Psi^-)$$

vivo e nello stesso tempo morto

Ma aprendo la scatola: è solo vivo o solo morto

Fisici teorici parlano del *collasso* della funzione d'onda.

GK parla della *proiezione* dello «stato in se» sul piano della nostra osservazione, cioè dell'esperimento impostato dallo scienziato. Il mondo non è isolato



Onda o particella?

è la mente che si modella passivamente sulla realtà, bensì la realtà che si modella sulle forme a priori attraverso cui le percepiamo

Dipende, che cosa vogliamo provare:

- elettrone è un'onda? Sì!
- elettrone è una particella? Sì!

Dipende dalla «proiezione»

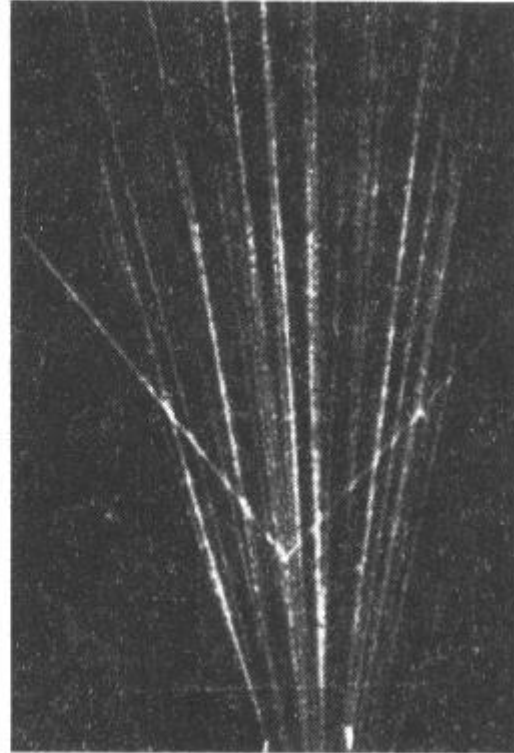
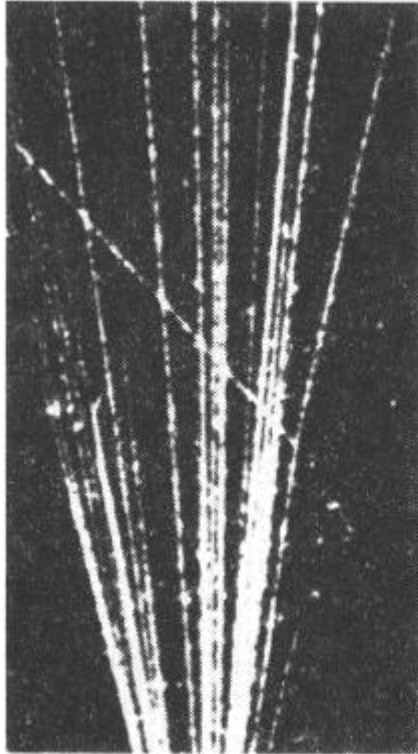


«Collasso della funzione d'onda»?

No! Piuttosto la riduzione della «idea pura» alla realtà *reale* (misurabile)

Il gatto di Schrödinger è vivo e morto (come la sovrapposizione delle due funzioni d'onda) solo fino che non lo vogliamo verificare. Per verificare, dobbiamo mandare (almeno) un fotone. A questo punto, la funzione d'onda contiene anche un fotone, e «collassa» a uno di due stati esclusivi: vivo **ex-or** morto

Heisenberg: percorso di un elettrone?



$$\Delta x \Delta p \geq \hbar \quad (?)$$

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2 \quad (?)$$

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/4 \quad (?)$$

Due grandezze che non *commutano*, per es. l'energia e il tempo
Bisogna scegliere che cosa vogliamo sapere.

Il principio d'indeterminazione

Poiché le nostre conversazioni si trascinavano spesso fino a tarda notte e, nonostante molti mesi di sforzi, non portavano a un risultato soddisfacente, cadevamo in uno stato di esaurimento, che a volte causava tensioni dovute alle diverse linee di pensiero. Così Bohr decise di andare in vacanza sciistica in Norvegia nel febbraio del 1927, e io fui molto contento di poter riflettere da solo a Copenaghen su questi problemi irrimediabilmente difficili.

Ora ho concentrato i miei sforzi interamente sulla questione di come descrivere matematicamente il percorso di un elettrone in una camera di nebbia in meccanica quantistica. Quando, una delle prime sere, incontrai difficoltà insormontabili, mi resi conto che forse avevamo sbagliato la questione. Ma cosa c'è di sbagliato? Il percorso dell'elettrone nella camera di nebbia esisteva, poteva essere osservato. C'era anche uno schema matematico per la meccanica quantistica, ed era troppo convincente per consentire ulteriori cambiamenti. Deve essere stato possibile, contro ogni apparenza, creare una connessione. Forse era circa la mezzanotte di quella stessa sera quando improvvisamente mi ricordai di una conversazione con Einstein e di ciò che aveva detto: "Solo la teoria decide ciò che può essere osservato". Mi è diventato chiaro che qui dovevo cercare la chiave del cancello che era rimasto chiuso per così tanto tempo. Così andai a fare una passeggiata notturna a Fälldpark per pensare alle conseguenze dell'osservazione di Einstein.

Dopotutto, abbiamo sempre detto semplicemente: il percorso dell'elettrone nella camera di nebbia può essere osservato. Ma forse è davvero osservato qualcosa in meno. Forse si può percepire solo una sequenza discreta di posizioni dell'elettrone definite in modo impreciso. In realtà, si possono vedere solo singole goccioline d'acqua nella camera, che devono essere molto più grandi di un elettrone.

Dov'è l'elettrone?

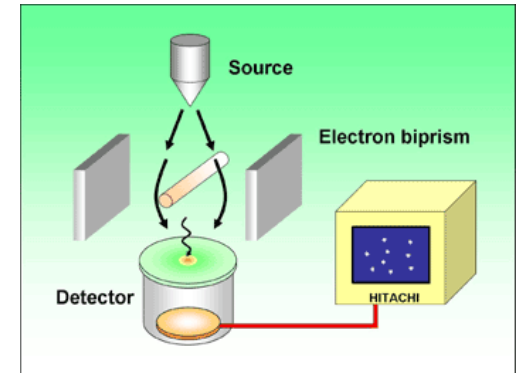
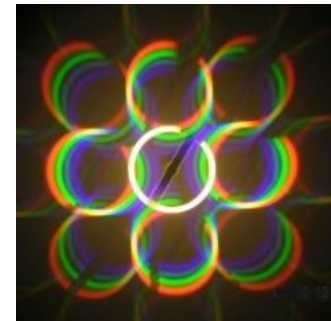


Immagine di interferenza, come le frange di luce osservate in un reticolo di diffrazione.
Gli elettroni, cioè le particelle, si comportano come la luce, cioè come le onde?
O un elettrone è un'onda? **Cosa significa "è"?**

https://www.youtube.com/watch?v=PangoHa_B6c

<https://www.hitachi.com/rd/research/materials/quantum/doubleslit/index.html>

<https://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki/files/optyka/okulary.html>



Funzione d'onda

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

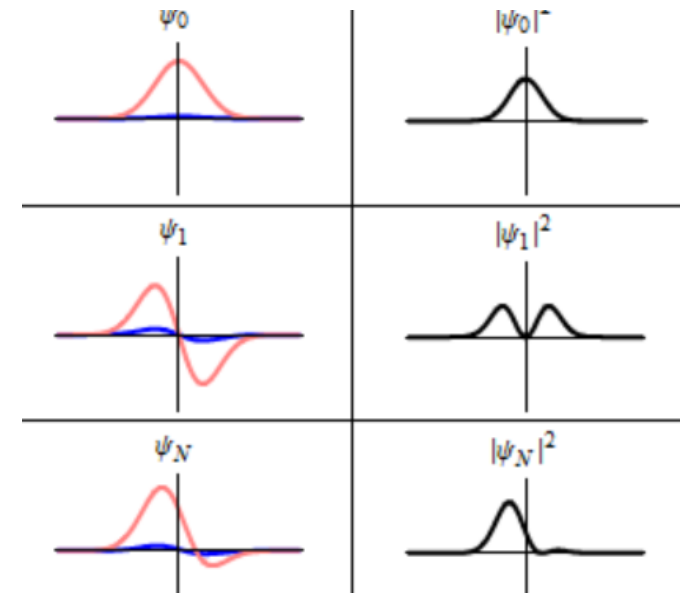
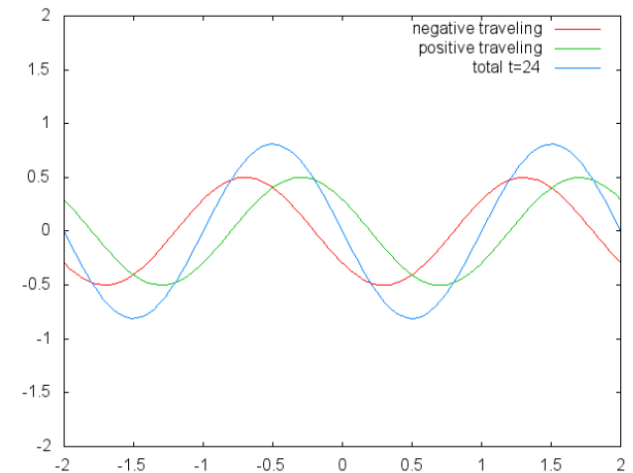
Soluzione:

$u(x, t) = A \sin(\omega t - kx)$, dove A l'ampiezza d'onda, ω – frequenza, $\omega = 2\pi/T$, dove T – il periodo, k – vettore d'onda, $k = 2\pi/\lambda$, con λ – lunghezza d'onda

Equazione di Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] \Psi(x, t)$$

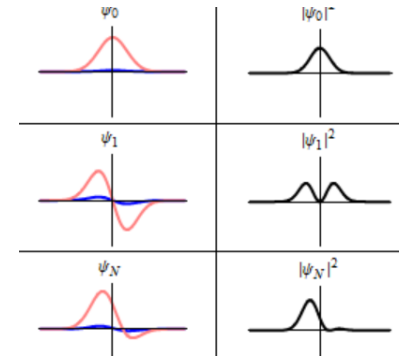
$\Psi(x, t)$ – funzione d'onda: il quadrato del suo modulo è la probabilità di trovare l'elettrone nel posto x nel momento t , i – unità immaginaria, h – costante di Planck



https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_equation

https://en.wikipedia.org/wiki/Schrodinger_equation

Domanda sbagliata



Posizione dell'elettrone?

Fisico sperimentale: misuriamolo! Mandiamo un fotone e vediamo dove torna

Fisico teorico: si inserisce *un operatore* di posizione \mathbf{x} : $\langle x \rangle = \int \Psi^* \mathbf{x} \Psi dx$

In altre parole, secondo l'equazione di Schrödinger, non sappiamo dove si trova attualmente un elettrone; conosciamo solo la probabilità che *se misuriamo* la sua posizione, il risultato (possibile) sarà descritto dall'equazione di Schrödinger. Ma la probabilità è una distribuzione dei risultati, con un gran numero di misure.

L'equazione di Schrödinger *non descrive* l'elettrone, ma fornisce solo un possibile risultato della misurazione (fatte) della sua posizione (credits: Prof. Lev Pitaevski)

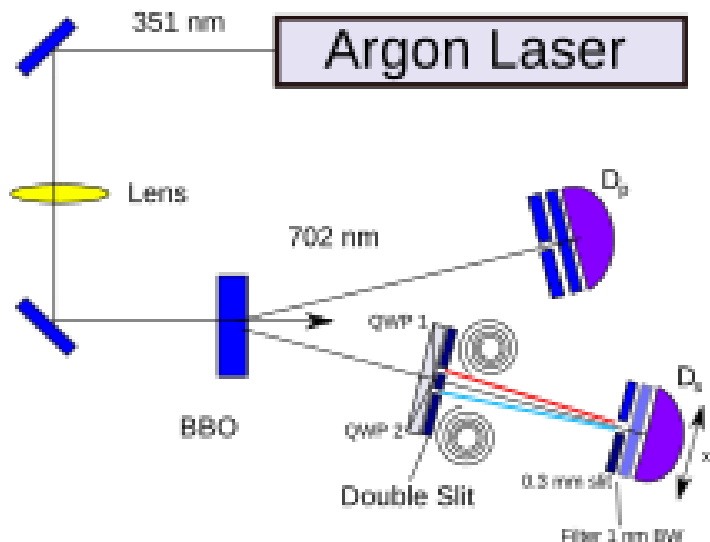
E qual è il motivo per cui l'elettrone "sceglie" un certo percorso? La domanda è posta in modo errato. L'equazione di Schrodinger ci dà solo una probabilità.

In altre parole, la natura si "difende", per non fornirci informazioni complete

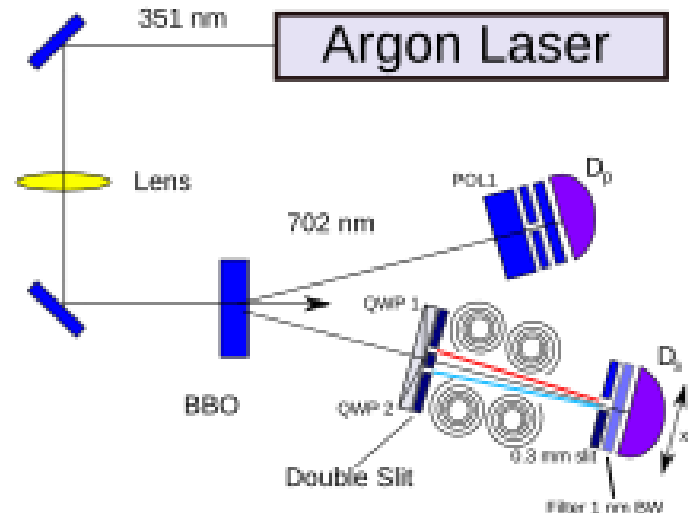
Quantum eraser

Possiamo sapere attraverso quale fenditura è passato l'elettrone, se lo illuminiamo con dei fotoni. Ma a questo punto *scompare* l'immagine d'interferenza.

Se *rinunciamo* a questa informazione, l'immagine ricompare. L'effetto si chiama il «quantum eraser».



Walborn, Cunha, Padua, and Monken, Double slit quantum eraser experiment with polarizer (POL1) removed. In this configuration contrary polarizations prevent interference at D_s .



Walborn, Cunha, Padua, and Monken, Double slit quantum eraser experiment with polarizer (POL1) present. In this configuration, interference is detected at D_s .

https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_eraser_experiment

Paradosso EPR (1935)

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

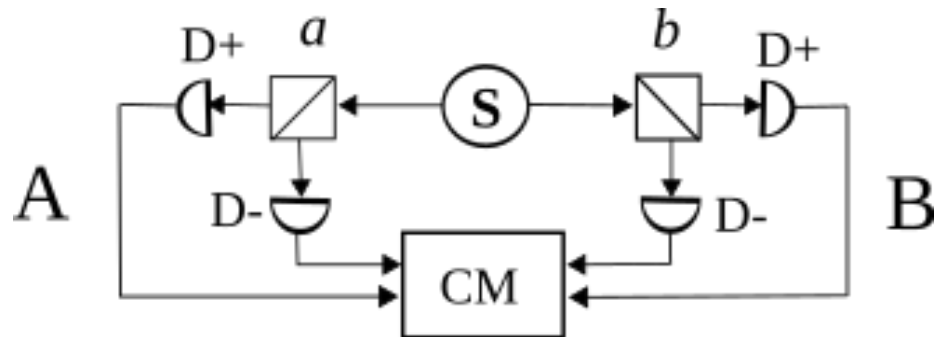
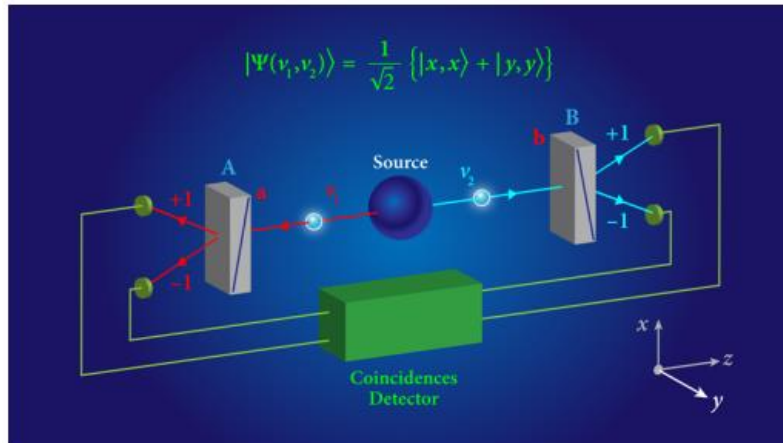
VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

Se due stati quantici rimangono correlati (intrecciati, *entangled*) anche a grandi distanze, e la misura su uno stato influenza lo stato lontano, allora avviene una interazione *sporca* (spooky) che viola la relatività ristretta? "spukhafte Fernwirkung"



Einstein voleva provare, che la descrizione quantistica non è completa. Ma come supposizioni intrinseche ha assunto: 1) realismo (una misura corrisponde alla realtà fisica), 2) la causalità (le cose non avvengo senza la causa), 3) la località (fenomeni avvengono in un determinato posto dello spazio-tempo), 4) il libero arbitrio dello sperimentatore. D'avvero tengono tutte le supposizioni?

Alain Aspect, *Closing the Door on Einstein and Bohr's Quantum Debate*, <https://physics.aps.org/articles/v8/123>

Realismo, località, completezza

«L'entanglement è una delle proprietà della meccanica quantistica che portarono Einstein e altri a metterne in discussione i principi. Nel 1935 lo stesso Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen, formularono il celebre "paradosso EPR" (dalle iniziali dei tre scienziati), un esperimento mentale che metteva in evidenza, appunto come paradossale, il fenomeno dell'entanglement. Esso nacque dall'assunzione di tre ipotesi: [principio di realtà](#), [principio di località](#) e [completezza](#) della meccanica quantistica. Perché il paradosso venisse risolto era necessario che cadesse una delle tre ipotesi, ma considerando le prime due sicuramente vere, in quanto evidenti, gli autori giunsero alla conclusione che la meccanica quantistica è incompleta (contiene cioè [variabili nascoste](#)).»

«In filosofia il **realismo** è la convinzione che esista una realtà indipendentemente dai nostri schemi concettuali, dalle nostre pratiche linguistiche, dalle nostre credenze.»

«In fisica, il **principio di località** afferma che oggetti distanti non possono avere influenza istantanea l'uno sull'altro: un oggetto è influenzato direttamente solo dalle sue immediate vicinanze.»

«Nella logica matematica il concetto di **completezza** esprime il fatto che un insieme di assiomi è sufficiente a dimostrare tutte le verità di una teoria e quindi a decidere della verità o falsità di qualunque enunciato formulabile nel linguaggio della teoria.»

https://it.wikipedia.org/wiki/Entanglement_quantistico

D'accordo di non essere d'accordo (2013)

Agreeing to disagree

A recent poll has highlighted physicists' differing views over the interpretation of fundamental aspects of quantum theory, but **Maximilian Schlosshauer** argues that it might not be so bad

"If all this damned quantum jumping were really to stay," Erwin Schrödinger complained to his colleague Niels Bohr in 1926, "I should be sorry I ever got involved with quantum theory." Schrödinger, like Bohr, was a founding father of quantum theory, which had just turned our view of the world upside down. But he was not alone in his discomfort. Albert Einstein, too, spent years arguing with Bohr over whether atomic events are fundamentally random or if quantum theory really is all we can say about physical reality. Indeed, he once wrote that the theory reminded him of "the system of delusions of an exceedingly intelligent paranoiac".

Today quantum theory underlies all modern technology: from transistors, light-emitting diodes and photovoltaics, to nuclear power, magnetic-resonance imag-



God does not play dice Einstein disagreed that at a quantum level the universe is random.

**Quantum physics
has moved from
philosophy to
concrete action**

**Lo stato quantistico esiste prima
della misura?**

Le risposte furono 50/50

not tell us when it will actually decay – the individual event, when it happens, seems to come out of nowhere. Einstein could not accept the idea of a universe in which events truly randomly fall out one way or the other, famously declaring that "God doesn't play dice." But Einstein's reservations didn't seem to faze our respondents. A two-thirds majority declared Einstein's view wrong and randomness a fundamental concept in nature, and half thought that the randomness we see in quantum phenomena is indeed fundamental and irreducible: that there is no "hidden hand" – no gambling God – governing these events.

The challenge ahead

So what can we learn from our poll? One thing is clear: quantum physics has moved from philosophical debates to concrete action. Quantum-information science, hailed by an overwhelming majority as a breath of fresh air, is being put to use in looking at old problems from a new angle. It has helped us not only to get a better understanding of what we can do with quantum theory, but also to find new ways of understanding the theory itself. Various new interpretations based around quantum information have popped up in the last decade, and our poll shows them rivalling the

Certezze quantistiche?



Quantum frontiers

Dopo cent'anni? Peggio ancora!

Ma: Today quantum theory underlies all modern technology: from transistors, light-emitting diodes and photovoltaics, to nuclear power, magnetic-resonance imaging, lasers and atomic clocks. It is a seemingly inexhaustible source of new ideas and applications. Quantum-information science, for example, is a fresh take on information processing, and promises computers faster than anything we could currently imagine

Physics World March 2013

Freccia del tempo?

«Per poter prevedere (nel senso di calcolo della probabilità) il risultato della misurazione ripetuta, con il risultato della prima misura conosciuto, bisogna considerare la funzione d'onda $\varphi_n(q)$ dello stato che si è formato come il risultato della prima misura e la funzione d'onda $\Psi_n(q)$ dello stato che ci interessa e che si forma come il risultato della seconda misura. [...]

Vediamo che in meccanica quantistica il processo di misura ha un carattere doppio – esegue i ruoli diversi per gli eventi passati e futuri. Per il passato – verifica la probabilità di diversi risultati previsti in base delle misure effettuate. Per il futuro – crea uno stato nuovo. Nella stessa natura del processo di misura è inserita una forte irreversibilità.

Questa irreversibilità ha un significato importante, anzi – essenziale. Come vedremo le equazioni fondamentali della meccanica quantistica hanno simmetria in rispetto inversione della freccia del tempo; in questo senso meccanica quantistica non si diversifica dalla meccanica classica. Però, l'irreversibilità del processo di misura comporta ai fenomeni quantistici la disequaglianza fisica delle due direzioni del freccia del tempo, i.e. induce la differenza tra il futuro e il passato.»

In altre parole: l'azione del fisico (di un umano) cambia la freccia del tempo.

L.D. Landau, E.M. Lifszyc, *Meccanica quantistica*, PWN Warszawa 1979, p. 34.

Ockham (1287-1347) : fine della scolastica

"Guglielmo di Ockham è l'ultimo grande studioso della Scolastica, e allo stesso tempo il primo filosofo dei tempi moderni".

La metafisica di Ockham inizia a basarsi sull'empirismo, includendo la grammatica come manifestazione della logica del pensiero. Egli formula il principio di "economia" degli esseri.

Sul tema della sostanza, tanto caro ad Aristotele, Ockham afferma che possiamo conoscere solo le sue manifestazioni esterne.

"Metteva in discussione il principio su cui si basava principalmente il ragionamento della teologia: il principio di causalità nella sua forma tradizionale, derivato da Aristotele. E così facendo, chiuse la strada maestra alle prove teologiche. [...] per esempio, è impossibile provare l'unità di Dio, perché si può indiscutibilmente pensare che ci sono molti mondi, e che ognuno ha il suo creatore.

Ockham discute il concetto di "causa", sottolineando che causa ed effetto sono due fenomeni separati. Questa discussione apre la strada a Hume. (p. 693)

[1] N. Abbagnano & G. Fornero, *Protagonisti e testi della filosofia*, Paravia, Torino, 1996, vol. I

Traduzione polacco ↔ Microsoft

David Hume (1711-1776): Fondamento empirico della relazione causale

Prende avvio la celebre analisi della causalità, che fa di Hume uno dei grandi critici della tradizione metafisica. La trattazione ha dato e continua a dare molto filo da torcere a filosofi ed epistemologi, tanto che il problema qui considerato anche ai nostri giorni tutt'altro che risolto. I brani sono tratti da Trattato sulla natura umana, cit. pp.86-90, 91-92. 100-06

Diamo uno sguardo a due di quegli oggetti che chiamiamo causa ed effetto [...] al fine di trovare quell'impressione che produce un'idea così prodigiosa. Vedo subito che non devo cercarla in nessuna delle particolari *qualità* degli oggetti. [...] L'idea di causalità deve derivare da qualche *relazione* esistente tra gli oggetti. In primo luogo 'devono essere *contigui*, e che niente potrebbe agire su altro se tra essi ci fosse il minimo intervallo di tempo e di spazio. [...] consiste nella *priorità* di tempo della causa sull'effetto.

Relazione di contiguità e di successione sono essenziali.

Nicola Abbagnano, Giovanni Fornero, *Protagonisti e testi delle filosofie*, Paravia, Torino, 1996, vol. II, p. 526-7






GK: La causalità è la legge più importante, non solo del mondo materiale

- Tutta la scienza moderna critica le idee di Hume: la credenza nel principio di causalità è la base e la motivazione di tutta la ricerca. "Non riesco letteralmente a vedere la relazione causa-effetto tra la zanzara sul mio braccio e il prurito che segue la sua partenza. Ma il mio ragionamento di causa ed effetto si basa su una convinzione forte e fondamentale", scrive Patricia Churchland [2016] in *How Biology Influence Philosophy*.
- "Dimostrare" la causalità è un compito difficile, o più precisamente, impossibile. Per altri aspetti, è sufficiente dimostrare l'esistenza di un esempio, diciamo un unicorno, per dimostrare che esistono. Normalmente, è più difficile mostrare l'inesistenza degli unicorni, perché dovresti guardare l'intero globo. Nel caso del nesso di causalità, è necessario trovare un evento che si è verificato senza causa. La domanda è sempre la stessa: non c'è stata alcuna causa, o semplicemente non siamo in grado di identificare la causa.

Causalità ontologica o solo epistemica?

G. Karwasz, *Between physics and metaphysics – on determinism, arrow of time and causality*, *Philosophy and Cosmology*, vol. 24 (2020) 15-24.

Violations of locality and free choice are equivalent resources in Bell experiments

Paweł Blasiak^{a,b,1} , Emmanuel M. Pothos^b , James M. Yearsley^b , Christoph Gallus^c , and Ewa Borsuk^a 

^aDivision of Theoretical Physics, Institute of Nuclear Physics Polish Academy of Sciences, PL-31342 Krakow, Poland; ^bPsychology Department, City, University of London, London EC1V 0HB, United Kingdom; and ^cTHM Business School, Technische Hochschule Mittelhessen, D-35390 Giessen, Germany

Edited by Anthony Leggett, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, IL, and approved March 11, 2021 (received for review October 1, 2020)

Bell inequalities rest on three fundamental assumptions: realism, locality, and free choice, which lead to nontrivial constraints on correlations in very simple experiments. If we retain realism, then violation of the inequalities implies that at least one of the remaining two assumptions must fail, which can have profound consequences for the causal explanation of the experiment. We investigate the extent to which a given assumption needs to be relaxed for the other to hold at all costs, based on the observation that a violation need not occur on every experimental trial, even when describing correlations violating Bell inequalities. How often this needs to be the case determines the degree of, respectively, locality or free choice in the observed experimental behavior. Despite their disparate character, we show that both assumptions are equally costly. Namely, the resources required to explain the experimental statistics (measured by the frequency of causal interventions of either sort) are exactly the same. Furthermore, we compute such defined measures of locality and free choice for any nonsignaling statistics in a Bell experiment with binary settings, showing that it is directly related to the amount of violation of the so-called Clauser–Horne–Shimony–Holt inequalities. This result is theory independent as it refers directly to the experimental statistics. Additionally, we show how the local fraction results for quantum-mechanical frameworks with infinite number of settings translate into analogous statements for the measure of free choice we introduce. Thus, concerning statistics, causal explanations resorting to either locality or free choice violations are fully interchangeable.

Surprisingly, nature violates Bell inequalities (8–15), which means that if the standard causal (or realist) picture is to be maintained at least one of the remaining two assumptions, that is locality or free choice, has to fail. It turns out that rejecting just one of those two assumptions is always enough to explain the observed correlations, while maintaining consistency with the causal structure imposed by the other. Either option poses a challenge to deep-rooted intuitions about reality, with a full range of viable positions open to serious philosophical dispute (16–18). Notably, quantum theory in its operational formulation does not provide any clue regarding the causal structure at work, leaving such questions to the domain of interpretation. It is therefore interesting to ask about the extent to which a given assumption needs to be relaxed, if we insist on upholding the other one (while always maintaining realism). In this paper, we seek to compare the cost of locality and free choice on an equal footing, without any preconceived conceptual biases. As a basis for comparison we choose to measure the weight of a given assumption in terms of the following question: *How often can a given assumption, i.e., locality or free choice, be retained, while safeguarding the other assumption, in order to fully reproduce some given experimental statistics within a standard causal (or realist) approach?*

This question presumes that a Bell experiment is performed trial-by-trial and the observed statistics can be explained in the standard causal model (or hidden variable) framework (1–7, 19–21), which subsumes realism. It means that the remaining two assumptions of locality and free choice translate into conditional independence between certain variables in the model,

Between Physics and Metaphysics — on Determinism, Arrow of Time and Causality

Il mondo *potrebbe* essere totalmente deterministico, ma non lo sapremo mai.

Grzegorz P. Karwasz

La freccia del tempo *potrebbe* andare indietro, ma sarebbe molto costoso.

Doctor of Science (Physics), Professor, Didactics of Physics Division,
Head of Faculty of Physics, Astronomy and Applied Informatics,
University Nicolaus Copernicus

La legge superiore delle nature sembra di essere la *causalità* (!).

Philosophy and Cosmology, Volume 24, 2020: 15-28.

<https://doi.org/10.29202/phil-cosm/24/2>

Contemporary physics, with two Einstein's theories (called "relativity" what can be interpreted erroneously) and with Heisenberg's principle of indeterminacy (better: "lack of epistemic determinism") are frequently interpreted as a removal of the causality from physics. We argue that this is wrong. There are no indications in physics, either classical or quantum, that physical laws are indeterministic, on the ontological level. On the other hand, both classical and quantum physics are, practically, indeterministic on the epistemic level: there are no means for us to predict the detailed future of the world. Additionally, essentially all physical principles, including the arrow of time and the conservation of energy could be, hypothetically, violated (with some exceptions in the world of heavier quarks, and probably, the cosmological arrow of time). However, in contrast to Hume's skepticism, we have no experimental evidence that the causality can be removed or even "hung on" in any case. The text contains some didactical-like issues, as well.

Keywords: Quantum mechanics, determinism, causality, classical physics

Conclusioni (I): rivoluzioni scientifiche

- Storia di Copernico, Galileo, Copernico mostra, che le rivoluzioni scientifiche vengono fatte sulla *richiesta* sociale
- In caso di Copernico il motivo era la necessità della riforma del calendario (ecclesiastico)
- Oltre la necessità serve un *giovane* (26 anni Einstein, 27 anni Copernico) genio, che non guarda le «autorità» tradizionali (vedi caso del giovane Galileo)
- Serve anche un buon **insegnante** (Domenico Novara) con cui il giovane(Copernico) può lavorare

Conclusioni (II): materia e forma

- Con $E=mc^2$ perde il senso «è costituito di». Un protone si trasforma in un neutrone e viceversa: basta fornire l'energia.
- Ma i processi vengono *regolati* dalle formule matematiche, cosiddette matrici di Cabbibo-Kobauashi-Maskawa
- Le matrici sono reali o sono delle *idee*?
- Perde il senso anche «si trova a»: non si trova, ma *potrebbe* trovarsi se venisse fatto un *opportuno* esperimento.
- Risuona qua la distinzione di Aristotele tra *l'attuale* e il *potenziale* .

Conclusioni (III): causalità

- Ockham, probabilmente un po' per dispetto, al fine di confutare le "prove" di Tommaso per l'esistenza di Dio, mise in discussione il ragionamento: causa → effetto, essenziale nella "Fisica" di Aristotele.
- La negazione delle relazioni di causa-effetto sarebbe la fine della scienza, per non parlare delle conseguenze devastanti per l'etica.
- A dispetto di Hume, la fisica odierna ha confutato molti concetti "certi", come lo spazio-tempo vuoto o la località degli eventi. Ma non la causalità.
- GK pone anche la causalità come legge fondamentale della natura, ovviamente, essendo un'affermazione metafisica, cioè impossibile da dimostrare
- GK estende anche il principio di causalità al mondo immateriale, cioè oltre i confini del tempo e dello spazio (!)

Conclusioni IV: epistemiche*

Le due rivoluzioni della fisica del inizio del XX secolo hanno *spodestato* tanti di termini fisici/ filosofici/ di buon senso:

- Il carattere assoluto dello spazio e dello tempo, avvicinandoli alla concezione del Kant, che sono *forme* di nostro conoscere, cioè individuali
- La certezza della fisica classica nel suo ottimistico determinismo epistemico
- Le certezze nella distinzioni tra le forme della materia (onda vs. particella)
- Ha ribaltato *l'oggettività* (immutabilità) del mondo fisico, rendendolo soggetto alla variazione a causa dell'azione cognitiva del uomo
- Persino la *località* di eventi potrebbe essere «sacrificata» per poter mantenere il libero arbitrio umano
- **L'unica certezza (intuizione) che si salva sembra esserci solo la causalità:** niente succede per caso, e anzi – non sappiamo mai, che cosa possono causare le nostre (buone e cattive) azioni

Conclusioni (V): filosofiche, cioè esistenziali

L'uomo **influenza** il mondo, compreso la freccia del tempo:

- per esempio, tramite la irreversibilità della misura quantistica (Landau)
- non parlando della irreversibilità del uomo come entità biologica (e mentale)

L'uomo vorrebbe **dominare** il mondo, ma non riesce:

- non per mancanza della sua voglia di onnipotenza
- ma per ben precisi limiti della sua scienza (onniscienza), posti dalle due rivoluzioni del XX secolo: la **meccanica quantistica** e teoria di **relatività**

La fisica del XX secolo ci insegna **umiltà** scientifica: Lev Pitaevski «D'avvero dobbiamo sapere tutto?»

«La meccanica quantistica aspetta ancora il suo Copernico»
(Andrzej Raczynski, 2024)

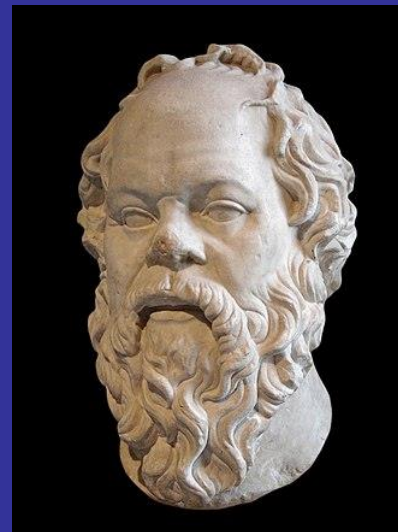
Che cosa porterà il XXI secolo: senza dubbio, rivoluzioni ancora più sorprendenti

«Ai posterì l'ardua sentenza.» (Alessandro Manzoni, *Il Cinque Maggio*, 1821)

I limiti del nostro sapere

La Terra, per quanto sia grande la sfera, nient'è rispetto alla grandezza del cielo, di cui limiti non sappiamo, e probabilmente saper neanche *non possiamo* ...

Nicolaus Copernicus, *De revolutionibus*, Norimberga, 1543



So, che non so niente
(Socrate 470-399 a.C)

Grazie per la Vs infinita pazienza!

Bibliografia

- P.T. Mathews, *Introduction to Quantum Mechanics*, McGraw, New York, 1963
- L.D: Landau, E.M. Lifshitz, *Short Course of Theoretical Physics*, Mosca, 1972
- Jean-Jacques Greffet, *Physique*, Ecole Centrale Paris, 1ere Année, 2003-2004
- [Lev D. Landau](#), [Evgenij M. Lifshitz](#), *Fisica Teorica 3. Meccanica quantistica. Teoria non relativistica*, Editori Riuniti Univ. Press, 1982
- James Walker, *3 Dialogo con la Fisica*, Pearson Education, 2018
- Antonio Cafaro, Aldo Ferilli, *Nuova Fisica per licei scientifici*, vol3, Le Monnier 2001.
- Leonard Susskind, Art Friedman, *Meccanica quantistica. Il minimo indispensabile per fare (buona) fisica*. Raffaello Cortina, Milano, 2015.
- Sredniawa, *Mechanika kwantowa*, PWN 1980
- Werner Heisenberg, *Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik*, Carl Hauser, München, 1977
- Gian Carlo Ghirardi, *Un'occhiata alle carte di Dio. Gli interrogativi che la scienza moderna pone all'uomo*, Il Saggiatore, Milano 2009
- https://it.wikipedia.org/wiki/Teorema_di_Bell