

# Newton, Einstein e Bohr: teorie a confronto

GABRIELE TARTERO, LAURA STRAMBINI, MARTINA DECENSI,  
SAMUELE VOLTAN, ALESSANDRO DUICO, MICHELE BELOTTI

Classi VA-LS e VB-LS, Liceo Scientifico Statale C. Donegani, Via C. Donegani 3 — 23100 Sondrio

Video: “Per un pugno di quanti” • <https://youtu.be/oaiT6mco5s>

## Sommario

*Scopo di questa ricerca è evidenziare, proponendo tre esempi, le incompatibilità che sussistono tra le principali teorie sviluppate nella storia della fisica: meccanica classica, relatività generale e meccanica quantistica.*

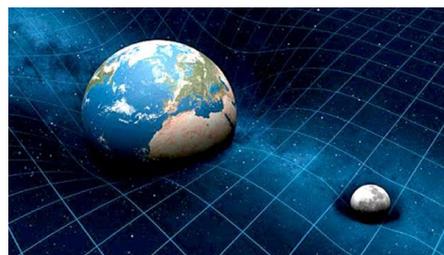
### I. INTRODUZIONE

SUL finire del XIX secolo cominciarono ad essere osservati diversi fenomeni fisici non più interpretabili tramite il modello deterministico di Newton, che forniva previsioni errate quando applicato ai nuovi ambiti di ricerca (come lo spettro di emissione del corpo nero e l'interpretazione dell'effetto fotoelettrico). Tutti i tentativi di modifica del paradigma scientifico classico, valido sin dal Seicento, si rivelarono fallimentari e nacque così l'esigenza di una rifondazione della fisica su nuove basi [2]; lo sforzo di ricerca si risolse in due nuove teorie, la relatività generale (sviluppata esclusivamente da Albert Einstein) e la meccanica quantistica (elaborata principalmente dai fisici della cosiddetta “scuola di Copenaghen”, guidata da Niels Bohr).

Questi due modelli, riguardanti rispettivamente i fenomeni macroscopici e quelli microscopici (scale atomiche e subatomiche), risolvono le contraddizioni insite nel paradigma newtoniano, ma nonostante questo essi non si trovano in accordo tra loro; infatti il carattere fortemente controintuitivo della meccanica quantistica, fondata su assunti apparentemente paradossali, contrasta non solo con il modello classico, ancorato ad una percezione intuitiva della realtà, ma anche con quello relativistico, che Einstein strenuamente oppose alla concezione probabilistica della fisica di Bohr e Heisenberg [1].

Nelle tre sezioni seguenti verranno quindi presentate alcune questioni che vengono interpretate diversamente dalle teorie qui in esame: nelle prime due si evidenzieranno i limiti della concezione classica confrontata con quella relativistica e quantistica, mentre nella terza si tratterà un celebre esperimento mentale proposto da Einstein a Bohr come tentativo di confutazione della natura probabilistica della fisica delle particelle.

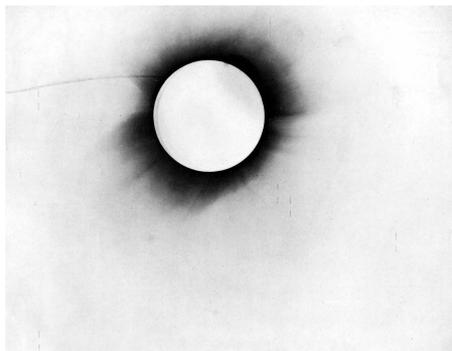
### II. SPAZIO, TEMPO E GRAVITAZIONE



**Figura 1:** Schematizzazione tridimensionale della curvatura dello spazio-tempo causata dalla presenza di masse.

Meccanica classica e relatività si differenziano profondamente riguardo alla concezione della natura di spazio e tempo e al loro ruolo nelle attrazioni gravitazionali.

Newton, coerentemente con la scuola empirista inglese, considerava lo spazio e il tempo come i “contenitori” entro i quali si svolgono i



**Figura 2:** Fotografia scattata dall'astrofisico inglese Arthur Eddington nel 1919 che provò la deflessione della traiettoria della luce in presenza di una curvatura dello spazio-tempo.

fenomeni fisici osservabili sperimentalmente; essi erano di conseguenza ritenuti grandezze assolute, ovvero non legate tra loro e non influenzate né dall'esperienza presa in esame, né dal sistema di riferimento scelto: la durata di un evento così come la distanza tra due punti erano infatti considerati indipendenti dalla posizione e dal moto dell'osservatore. La gravitazione, l'unica forza che secondo Newton governava l'universo, veniva così interpretata come un'interazione istantanea tra masse avente luogo in determinate coordinate spaziali e temporali.

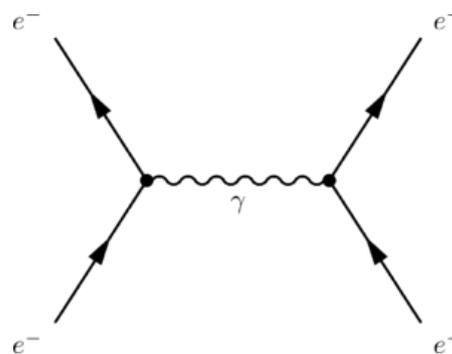
La scoperta dell'invarianza della velocità della luce, predetta da Maxwell e verificata sperimentalmente da Michelson e Morley sul finire dell'Ottocento, rese però inadeguata questa concezione; il lavoro di Einstein, pubblicato per la prima volta nel 1905 (teoria della relatività ristretta) e terminato nel 1915 (teoria della relatività generale) risolse infine le contraddizioni presenti nella meccanica newtoniana, rivoluzionando così i principi su cui essa era fondata.

Il paradigma einsteiniano, infatti, abbandonò l'idea del tempo come grandezza assoluta, legandolo invece alla velocità dell'osservatore, e analogamente modificò la concezione della distanza tra due punti; introdusse così una nuova grandezza, lo spazio-tempo, rendendo questi due concetti interdipendenti e relativi. Lo spazio-tempo, il nuovo "palcoscenico" della natura, non venne però più considerato "inerte" come il suo predecessore, bensì si trasformò nella causa dell'interazione gravita-

zionale: Einstein eliminò infatti l'idea di una forza gravitazionale, sostituendola con quella della curvatura del tessuto quadridimensionale dello spazio-tempo, causata dalla presenza di un corpo dotato di massa. L'attrazione tra masse risulta quindi causata non da una forza istantanea di natura non precisata, bensì dalla curvatura intrinseca dello spazio-tempo su cui si muovono i corpi, seguendo le traiettorie più brevi [1, 5].

Questa teoria ricevette la prima conferma sperimentale nel 1919, quando durante un'eclissi furono avvistate delle stelle situate dietro al Sole (quindi invisibili secondo il modello classico): la luce di queste stelle aveva infatti potuto raggiungere l'osservatore seguendo la traiettoria curvilinea creata dalla deformazione spazio-temporale causata dalla presenza della massa solare [5].

### III. TRAIETTORIA E PROBABILITÀ



**Figura 3:** Un particolare diagramma di Feynman che illustra un possibile percorso seguito da un elettrone per spostarsi tra due punti nello spazio e nel tempo.

La fisica classica possiede un carattere prettamente deterministico: date le condizioni iniziali di un sistema, il modello di Newton permette in linea teorica di calcolarne con il massimo grado di precisione il suo sviluppo futuro; l'introduzione della probabilità è resa necessaria esclusivamente dall'impossibilità, da parte di un osservatore, di conoscere con esattezza tutte le variabili in gioco.

La fisica quantistica è, invece, intrinsecamente probabilistica: l'osservazione dei fenomeni su scala atomica e subatomica ha infatti costretto la scienza ad abbandonare la pro-

spettiva di prevedere con esattezza il risultato di un singolo esperimento, limitandosi a fornire la probabilità che esso si concluda con un determinato esito. La meccanica delle particelle può quindi prevedere efficacemente solo la distribuzione statistica dei risultati di un esperimento ripetuto numerose volte, non potendo però garantire con certezza l'esito di nessuna delle diverse prove.

Questa caratteristica, che sembra essere peculiare alla natura e non legata ai limiti dei mezzi tecnici umani, ha così prodotto una profonda modifica del concetto classico di traiettoria: la meccanica newtoniana permette infatti di stabilire esattamente il percorso seguito da una particella, se sono note la sua posizione iniziale e finale e le forze agenti su di essa; la fisica quantistica, invece, associa ad ogni possibile traiettoria che congiunge il punto di partenza con quello di arrivo una particolare probabilità; in questo modo, la probabilità totale che una particella si muova da un punto ad un altro è data dalla somma delle probabilità associate agli infiniti percorsi possibili (che spesso includono anche la trasformazione temporanea di una particella in altre particelle subatomiche). L'espressione matematica di tale somma fu ricavata sul finire degli anni Quaranta dal fisico americano Richard Feynman, il quale la associò a dei diagrammi schematici che oggi portano il suo nome [1, 4, 3].

L'abbandono della prospettiva deterministica ha così portato ad un forte ripensamento sulle possibilità offerte della scienza, rivelando però contemporaneamente una inaspettata caratteristica della natura, molto lontana dall'intuitivo modello newtoniano.

#### IV. LA "SCATOLA PIENA DI LUCE"

La relatività generale e la meccanica quantistica, pur essendosi rivelate entrambe molto efficaci nei rispettivi ambiti di ricerca, presentano però una profonda incompatibilità, che costituisce attualmente uno dei principali problemi aperti della fisica. Lo scontro tra queste due teorie si concretizzò storicamente nel dibattito che coinvolse Albert Einstein e Niels Bohr nel corso del VI Congresso di Solvay del 1930.

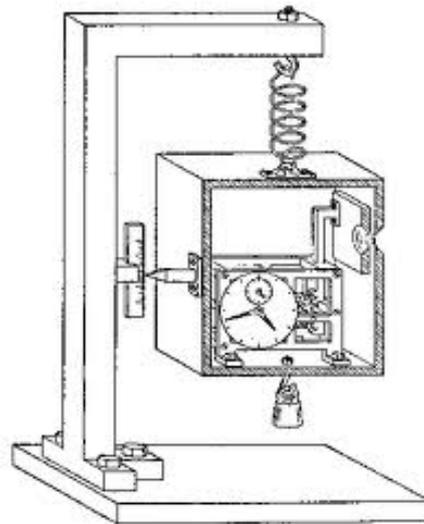


Figura 4: Rappresentazione grafica della scatola di luce.

Il nucleo di tale discussione riguardava la fondatezza di uno dei cardini del modello quantistico, il principio di indeterminazione: esso costituisce la formulazione teorica della natura probabilistica della fisica atomica e afferma che la precisione con cui è nota la posizione di una particella è inversamente proporzionale all'accuratezza con cui può essere calcolata la sua quantità di moto nello stesso istante (esiste una formulazione analogica che include energia e intervallo di tempo); in altre parole, pone un limite al carattere predittivo della scienza.

Einstein, rifiutandosi di accettare tale concezione, propose quindi all'amico Bohr, nei giorni del Congresso, una serie di esperimenti ideali (cioè non realizzabili nella realtà), volti a confutare le basi della teoria quantistica; uno dei più famosi tra essi è quello che riguarda una "scatola piena di luce": questo esperimento mentale prevede l'impiego di un volume chiuso contenente radiazione elettromagnetica (la "scatola piena di luce", appunto), appesa ad una molla e contenente un orologio collegato ad un meccanismo in grado di aprire un foro in una delle pareti ad un istante prefissato, consentendo il rilascio di un solo fotone (particella luminosa) [7]. L'apparato permette di misurare il conseguente aumento dell'altezza della scatola da terra (dovuto alla contrazione della molla) e quindi la sua

diminuzione di massa: si può perciò calcolare, tramite l'equazione di Einstein, la massa e l'energia del fotone fuoriuscito. La durata del rilascio viene determinata con precisione limitata esclusivamente dalle caratteristiche meccaniche dell'orologio (e non da leggi naturali), ed è quindi possibile la misura di due grandezze coniugate (l'energia del fotone e l'intervallo di tempo ad essa associato) senza alcuna incertezza, contrastando il principio di indeterminazione.

Così, terminata la sua spiegazione, Einstein affermò fieramente: "Non posso credere nemmeno per un attimo che Dio giochi a dadi!"

Bohr, inizialmente sconvolto da questa argomentazione apparentemente inattaccabile, riuscì però a fornire la corretta chiave di lettura dell'esperimento utilizzando proprio la teoria della relatività generale: essa infatti prevede che la posizione di un orologio all'interno di un campo gravitazionale influenzi la velocità con cui scorre il tempo. Per conoscere l'energia del fotone fuoriuscito, è necessario pesare la scatola prima e dopo l'istante del rilascio, e ciò implica misurarne la variazione di quantità di moto; in questo modo si introduce però un'incertezza sulla sua posizione verticale (per via della formulazione originaria del principio di indeterminazione) e, di conseguenza, non è più possibile determinare con precisione la velocità delle lancette dell'orologio inserito al suo interno. Al contrario, se si misurasse con precisione l'altezza raggiunta dalla scatola per conoscere la durata esatta del rilascio, si introdurrebbe un'incertezza sulla variazione della sua quantità di moto che impedirebbe di calcolare l'energia del fotone [6]: le fondamenta della meccanica quantistica risultano così confermate.

"Smettila di dire a Dio che cosa fare con i suoi dadi!", poté quindi controbattere Bohr.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Fritjof Capra. *Il Tao della Fisica*. Adelphi, 1989.
- [2] Albert Einstein and Leopold Infeld. *L'evoluzione della Fisica*. Bollati Boringhieri, 2011.
- [3] Richard P Feynman. *QED. La strana teoria della luce e della materia*. Adelphi, 2010.
- [4] Robert Gilmore. *Alice nel paese dei quanti. Le avventure della Fisica*. Raffaello Cortina, 1996.
- [5] Stephen W Hawking. *Dal Big Bang ai buchi neri. Breve storia del tempo*. BUR, 2015.
- [6] R.E. Peierls. *Surprises in Theoretical Physics*. Princeton series in physics. Princeton University Press, 1979.
- [7] Carlo Rovelli. *Sette brevi lezioni di Fisica*. Adelphi, 2014.