

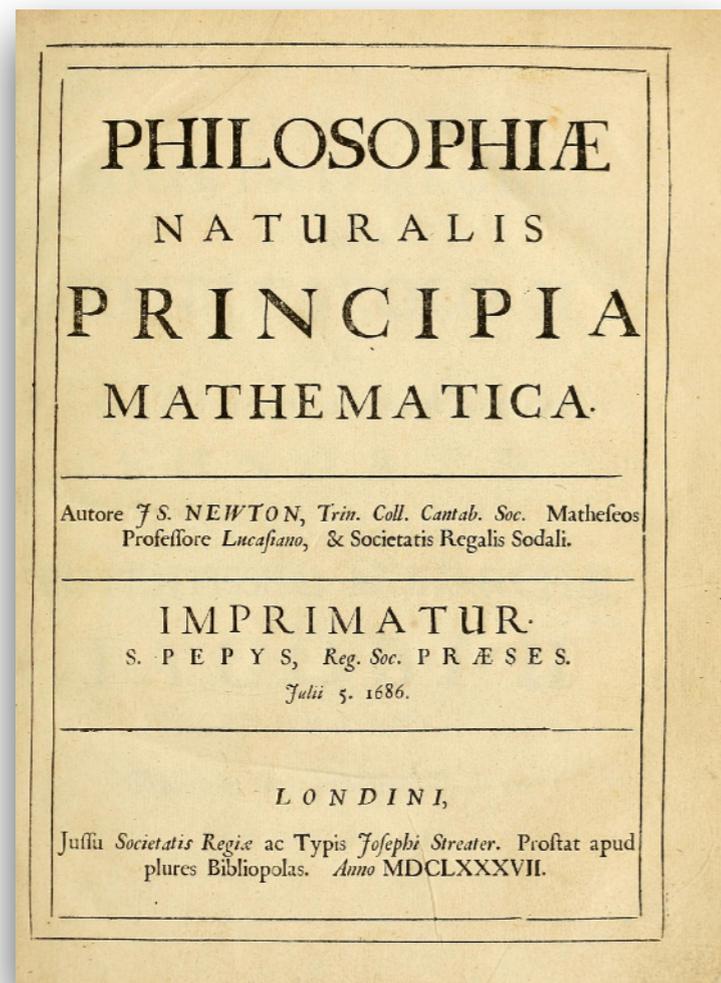
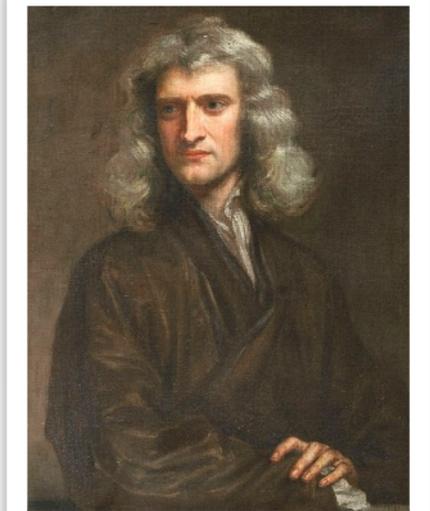
Vedere l'impossibile

La nascita della Meccanica Quantistica

Luigi Barletti - Rotary Club Mugello, 19 marzo 2025

Il panorama della Fisica a fine '800

Nel XVII secolo, iniziata da **Galileo** e portata a compimento da **Newton**, si ha la nascita della Fisica moderna.

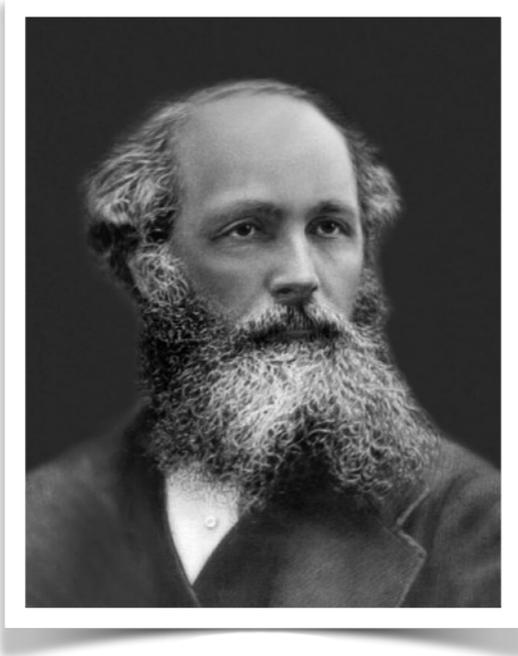
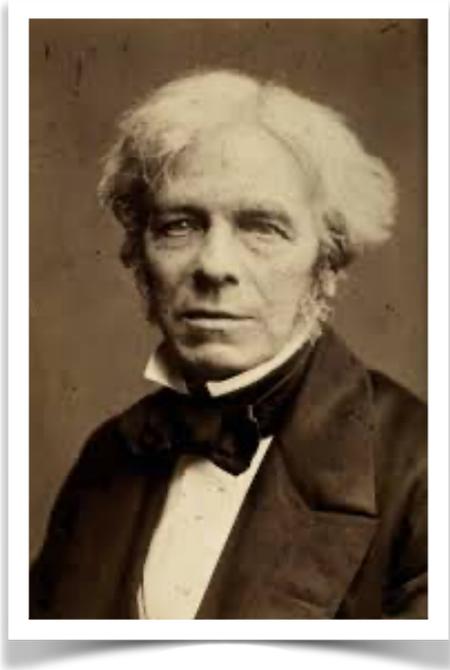


I "Principia" di Newton (1687)

Vengono comprese le leggi generali della **meccanica** e della **gravitazione**.

Il successo della teoria viene decretato con la spiegazione delle orbite dei pianeti: le leggi (sperimentali) di Keplero **vengono dedotte** da Newton a partire dalle leggi fondamentali della meccanica e della legge di gravitazione universale.

Il panorama della Fisica a fine '800



Nell'800 si aggiunge la teoria dei **fenomeni elettrici e magnetici**, iniziata con il lavoro di **Faraday** e portata a compimento da **Maxwell** nelle sue celebri **equazioni del campo elettromagnetico**.

Il maggiore successo della teoria consiste nella comprensione che **la luce è un'onda elettromagnetica**.



La fine della fisica?

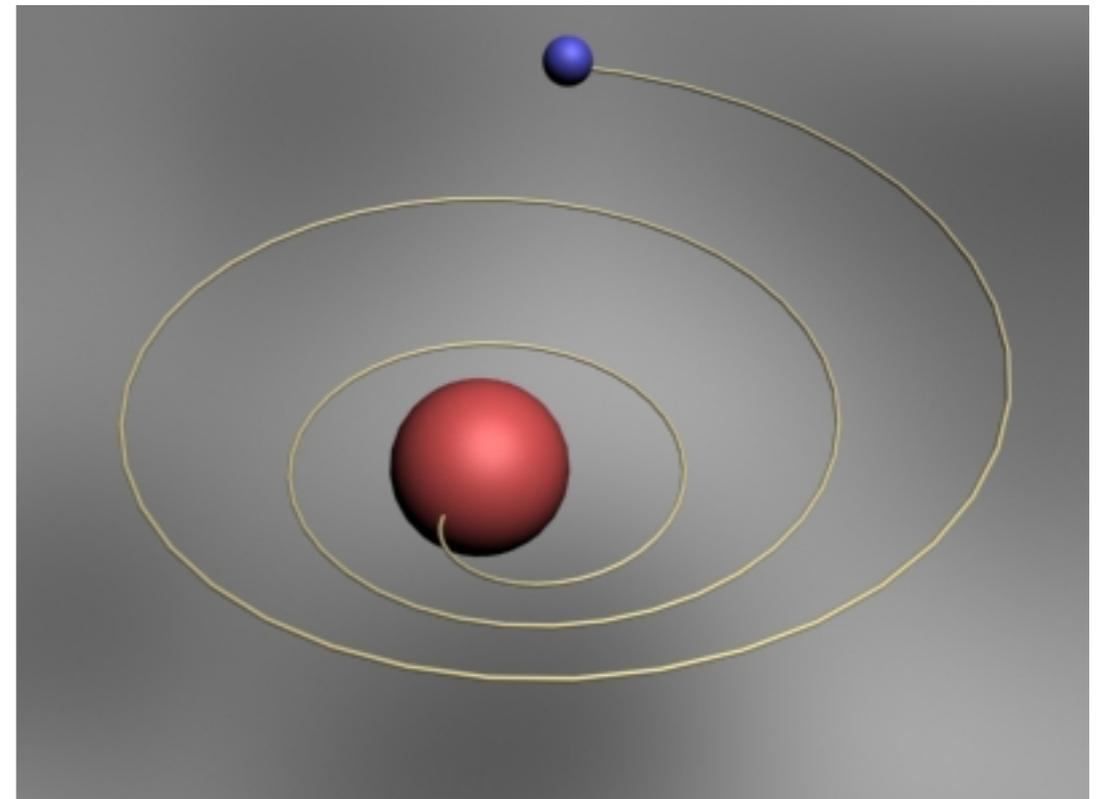
Il successo della teoria dell'elettromagnetismo, che si aggiungeva a quello della gravitazione, fece pensare molti che ormai si fosse in grado, almeno in linea di principio, di spiegare tutto: si trattava solamente di applicare le teorie ai vari sistemi fisici. Era la "fine della Fisica"?

In particolare, essendo già noto che **l'atomo** consisteva di un nucleo con carica positiva e di elettroni con carica negativa (e dunque soggetti a una forza attrattiva da parte del nucleo simile a quella gravitazionale) si pensò che l'atomo potesse essere spiegato come una specie di piccolo sistema planetario.

La fine della fisica?

Ma c'era **un problema**. Le stesse equazioni di Maxwell ci dicono che una carica in movimento perde energia irraggiando onde elettromagnetiche.

Questa perdita di energia farebbe progressivamente ridurre il raggio dell'orbita dell'elettrone fino a farlo collassare sul nucleo.



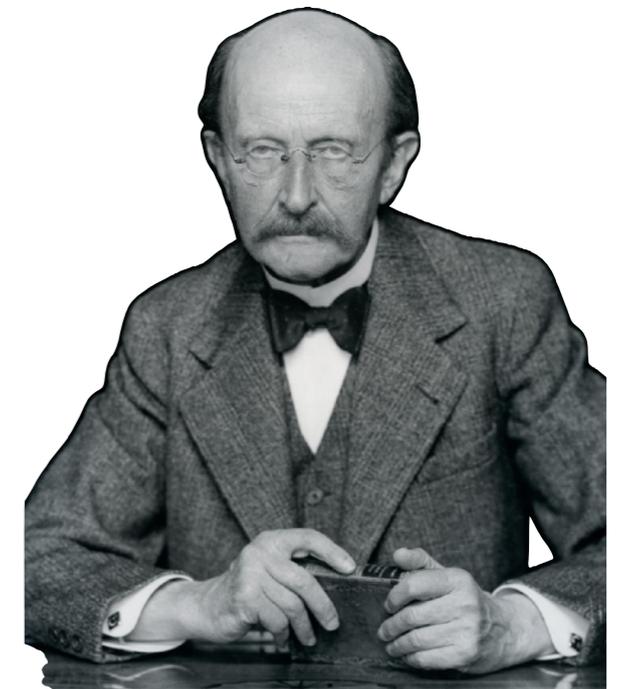
Evidentemente **le leggi note della Fisica non erano in grado di spiegare la natura dell'atomo.**

Non solo la Fisica non era vicina alla fine, ma i suoi sviluppi riservavano sorprese che nessuno poteva neanche immaginare.

La “Old quantum theory” - Max Planck

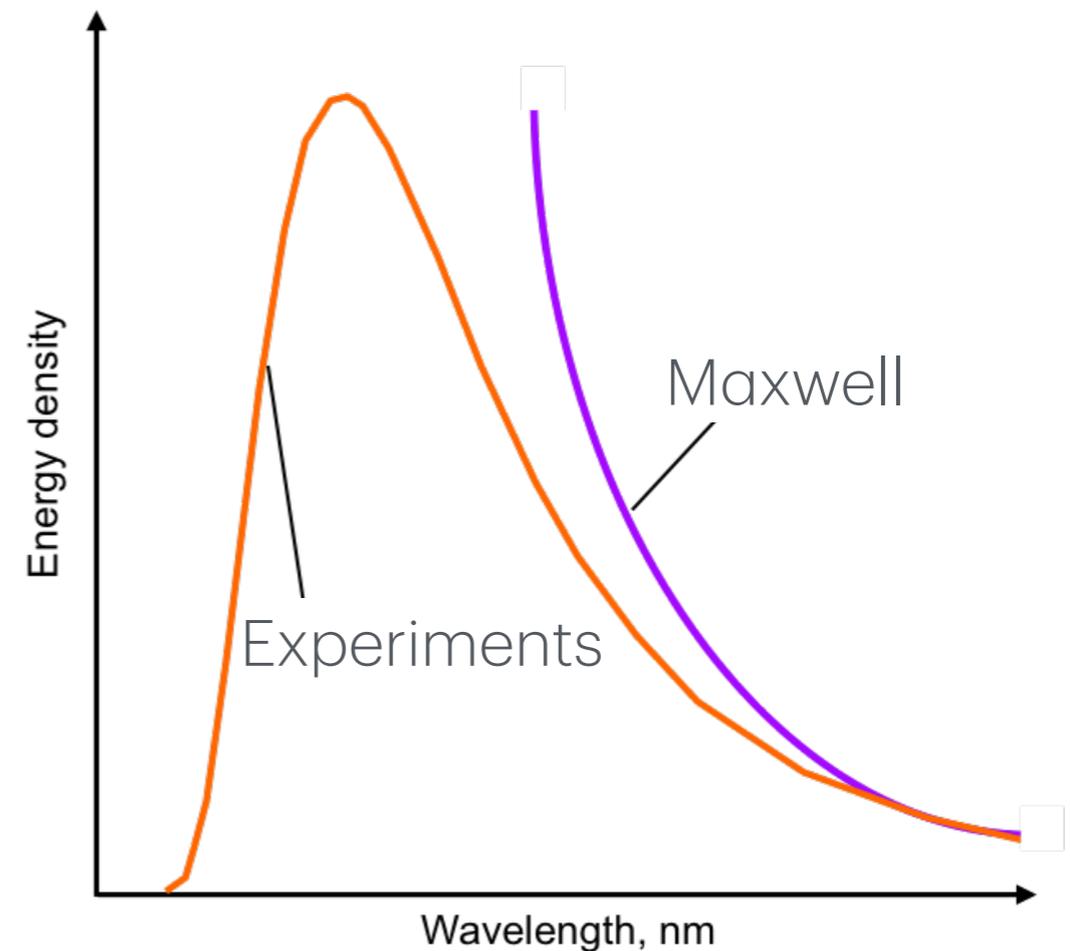
Il primo passo verso la nuova Fisica venne dallo studio di un problema che apparentemente niente aveva a che fare con gli atomi.

Nel 1900 **Max Planck** era un prominente fisico della Friedrich-Whilhelm Universität di Berlino. Studiava lo “spettro” luminoso dei corpi caldi (ricerca di interesse applicativo, motivata dal grande progetto di elettrificazione dell’illuminazione pubblica in Germania).



La “Old quantum theory” - Max Planck

Lo spettro luminoso, calcolato con le equazioni di Maxwell non coincideva con la curva ottenuta sperimentalmente.



Planck si accorse che **se si ipotizzava che l'energia non variasse in modo continuo ma per salti**, i calcoli teorici fornivano una curva che si sovrapponeva **perfettamente** a quella sperimentale.

La “Old quantum theory” - Max Planck

Data una certa frequenza luminosa f , l'ampiezza dei salti di energia che faceva tornare i conti era

$$\Delta E = hf$$

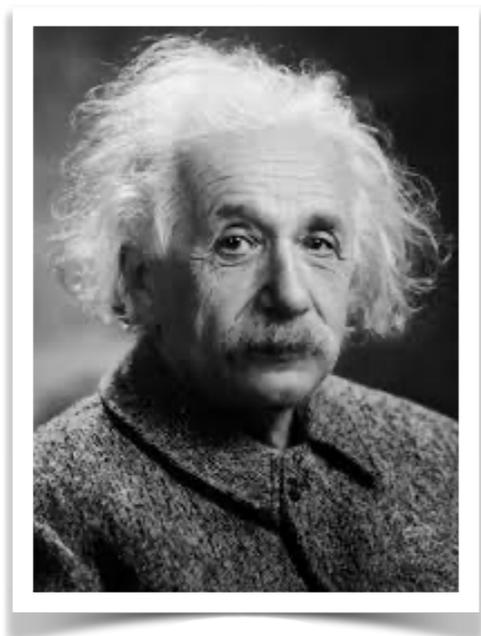
dove h è una costante (piccolissima! $h \approx 6.6 \times 10^{-34} Js$) che oggi viene chiamata **costante di Planck**.



Premio Nobel 1918

La “Old quantum theory” - Albert Einstein

Planck, sul momento e ancora per molti anni, considerò questa strana ipotesi come un **puro artificio matematico**, senza un apparente significato fisico.



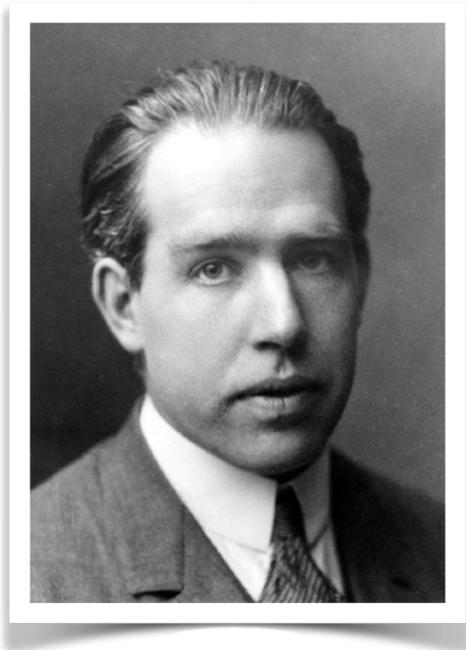
Einstein **prese sul serio l'ipotesi di Planck**, nel senso che provò a vedere se poteva essere utilizzata per spiegare altri fenomeni fisici.

Quando, nel 1905, provò ad applicarla all'**effetto fotoelettrico** (conversione della luce in corrente elettrica da parte di una superficie metallica), che fino ad allora nessun fisico era riuscito a interpretare, scoprì che l'ipotesi di Planck **spiegava il fenomeno** in modo semplice e completo.



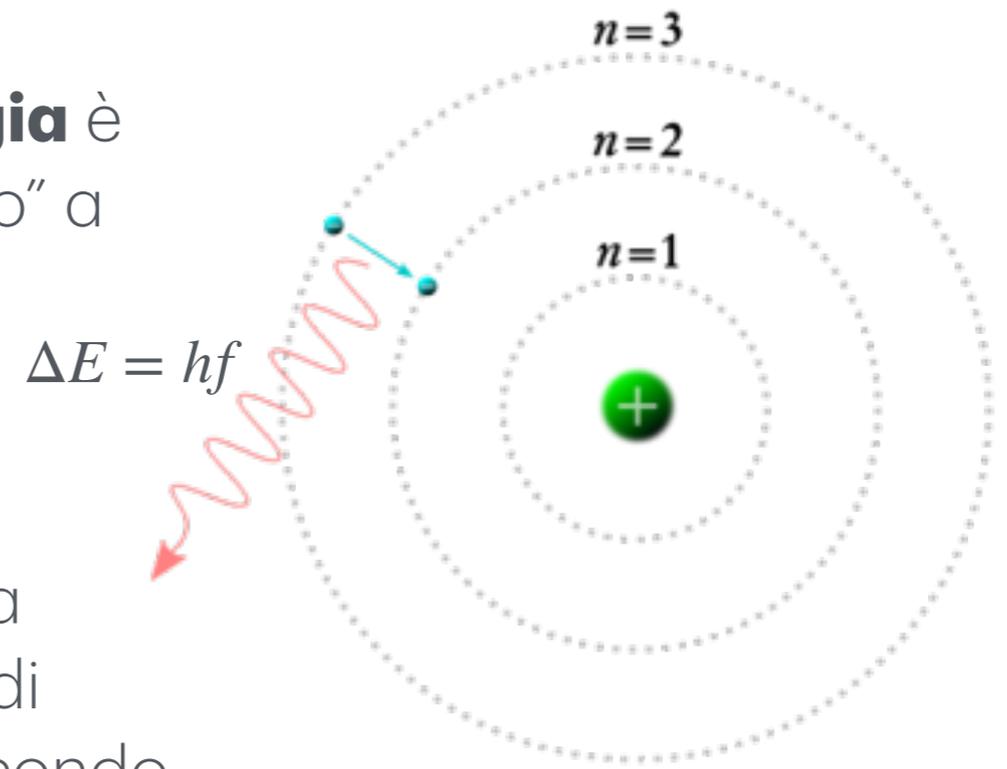
Premio Nobel 1921

La “Old quantum theory” - Niels Bohr

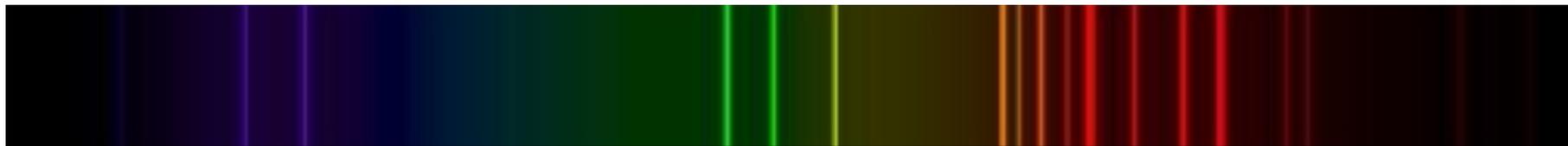


Nel 1913 Bohr **applicò l'ipotesi di Planck all'atomo**: se l'energia varia per quantità discrete, l'elettrone può stare su **orbite stabili** perché la sua energia non può diminuire in modo continuo.

La **quantizzazione dell'energia** è come uno “steccato energetico” a protezione dell'orbita.



Se inoltre si ipotizzava che, passando da un'orbita all'altra, l'elettrone emettesse un “quanto di luce” di frequenza corrispondente al salto energetico, secondo la relazione di Planck, si otteneva perfettamente lo **spettro** di emissione luminosa dell'atomo!



Premio Nobel 1922

Necessità di una nuova “Meccanica Quantistica”

La teoria di Bohr, poi perfezionata da Sommerfeld, supera brillantemente il problema del collasso dell'elettrone sul nucleo e spiega le righe di emissione luminosa de parte degli atomi (righe spettrali).

Ma l'ipotesi di quantizzazione dell'energia è un'ipotesi *ad hoc* innestata su una Fisica puramente classica.

Inoltre, la teoria di Bohr-Sommerfeld, che funziona bene per un atomo con un singolo elettrone, mostra discrepanze con i dati sperimentali per atomi con più elettroni.

Necessità di una nuova “Meccanica Quantistica”

Si sente che **manca una comprensione più profonda**. *Perché* l'energia è quantizzata? Come sono fatte le orbite? E, oltre alle frequenze, come si calcolano le intensità delle righe spettrali?

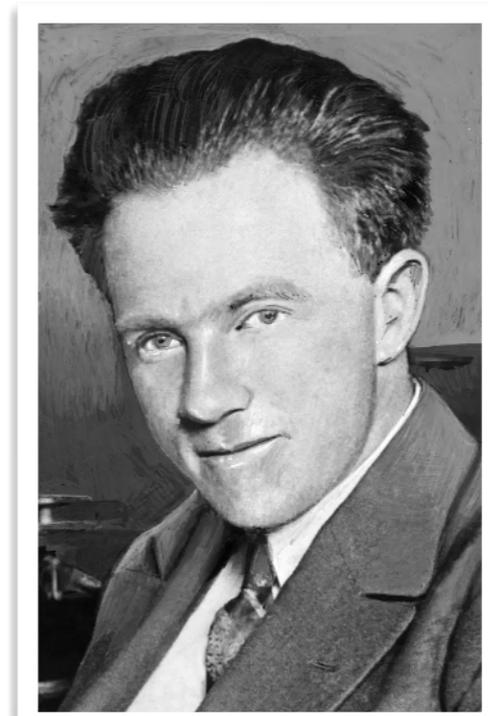
Ci doveva essere **qualcosa di radicalmente diverso** nella fisica, qualcosa che non era mai stato considerato fino a quel momento, perché non c'era **niente** nella meccanica classica che potesse spiegare i salti di energia.

Ma cosa?

Nascita della Meccanica Quantistica

Per anni, i più brillanti fisici cercarono di decifrare e di ordinare in modo coerente i messaggi che, nei loro laboratori, arrivavano dal mondo degli atomi.

Il primo che riuscì a gettare uno sguardo in questo mondo impossibile da osservare con i nostri sensi fu un giovanissimo fisico tedesco: **Werner Heisenberg**



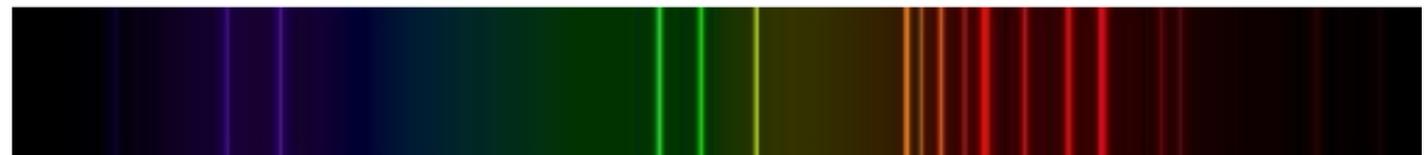
Heisenberg ha solo 23 anni quando nel 1924, appena laureato a Gottinga, si trasferisce a Copenhagen per lavorare nell'istituto diretto da Niels Bohr.

Nascita della Meccanica Quantistica

Heisenberg decide di affrontare il problema in modo **radicale**:
rinuncia a utilizzare i concetti della fisica classica per descrivere gli
oggetti atomici: non ipotizza che l'elettrone abbia un qualcosa di
simile a un'"orbita".

Non vuole fare **nessuna ipotesi non necessaria**,
vuole essere guidato solo dai
dati sperimentali. I dati sono
le righe spettrali emesse degli
atomi: è quello il canale
attraverso il quale il mondo
atomico ci invia il suo
messaggio.

Wavelength A	Spectrum	Energy Levels K	gA 10 ⁸ /sec	gf	Log gf
2776.69	Mg I	21870 - 57874	8.2	0.95	-0.02
2778.29	Mg I	21850 - 57833	6.9	0.80	-0.10
2779.83	Mg I	21911 - 57874	20.	2.3	0.36
2781.42	Mg I	21870 - 57813	6.9	0.80	-0.10
2782.97	Mg I	21911 - 57833	7.8	0.91	-0.04
2852.13	Mg I	0 - 35051	9.4	1.1	0.06
2942.11	Mg I	21911 - 55892	0.39	0.051	-1.29
3096.90	Mg I	21911 - 54192	2.4	0.35	-0.46
3332.15	Mg I	21870 - 51872	0.83	0.14	-0.86
3336.68	Mg I	21911 - 51872	1.2	0.21	-0.68
3829.35	Mg I	21850 - 47957	11.	2.4	0.38
3832.31	Mg I	21870 - 47957	23.	5.1	0.71
3838.26	Mg I	21911 - 47957	39.	8.6	0.93
4703.02	Mg I	35051 - 56308	2.3	0.75	-0.12
5167.34	Mg I	21850 - 41197	1.2	0.48	-0.32
5172.70	Mg I	21870 - 41197	3.5	1.4	0.15
5183.62	Mg I	21911 - 41197	6.4	2.6	0.41
5528.46	Mg I	35051 - 53135	1.6	0.75	-0.13
8806.79	Mg I	35051 - 46403	1.7	2.0	0.30



Nascita della Meccanica Quantistica

Werner soffre di allergia ai pollini e nel giugno del 1925 si reca in vacanza a **Helgoland**, l'isola senza alberi, nel mare del nord.



E' qui che Heisenberg ha l'intuizione fondamentale; è qui che, la notte del 7 giugno 1925, nasce la Meccanica Quantistica

[...] non dubitavo più, adesso della coerenza e della validità matematica della meccanica quantistica di nuovo tipo che i miei calcoli prospettavano. La mia prima impressione fu di sgomento: ebbi l'impressione di osservare, oltre la superficie dei fenomeni atomici, un livello più interno di misteriosa bellezza. [...] Ero troppo eccitato per andare a dormire e così uscii che appena albeggiava e mi arrampicai su un picco roccioso a strapiombo sul mare che da parecchi giorni desideravo scalare. Non incontrai particolari difficoltà e vidi sorgere il sole dalla vetta.

W. Heisenberg, "Fisica e oltre"

Nascita della Meccanica Quantistica

Cosa aveva scoperto Heisenberg?

Come abbiamo detto, egli aveva deciso di non fare ipotesi non necessarie, neanche quelli apparentemente più scontate.

Il suo ragionamento fu questo: siano X e P le quantità che descrivono la posizione e la velocità dell'elettrone. Nella fisica classica queste quantità sono numeri, ad esempio li possiamo sommare e moltiplicare.

Ma questa è un'ipotesi che ci arriva dal mondo classico, adesso non possiamo dare niente per scontato, dobbiamo lasciarci guidare esclusivamente dagli spettri atomici.

Nascita della Meccanica Quantistica

E Heisenberg scoprì che:

X e P si possono sommare

X e P si possono moltiplicare

Ma...

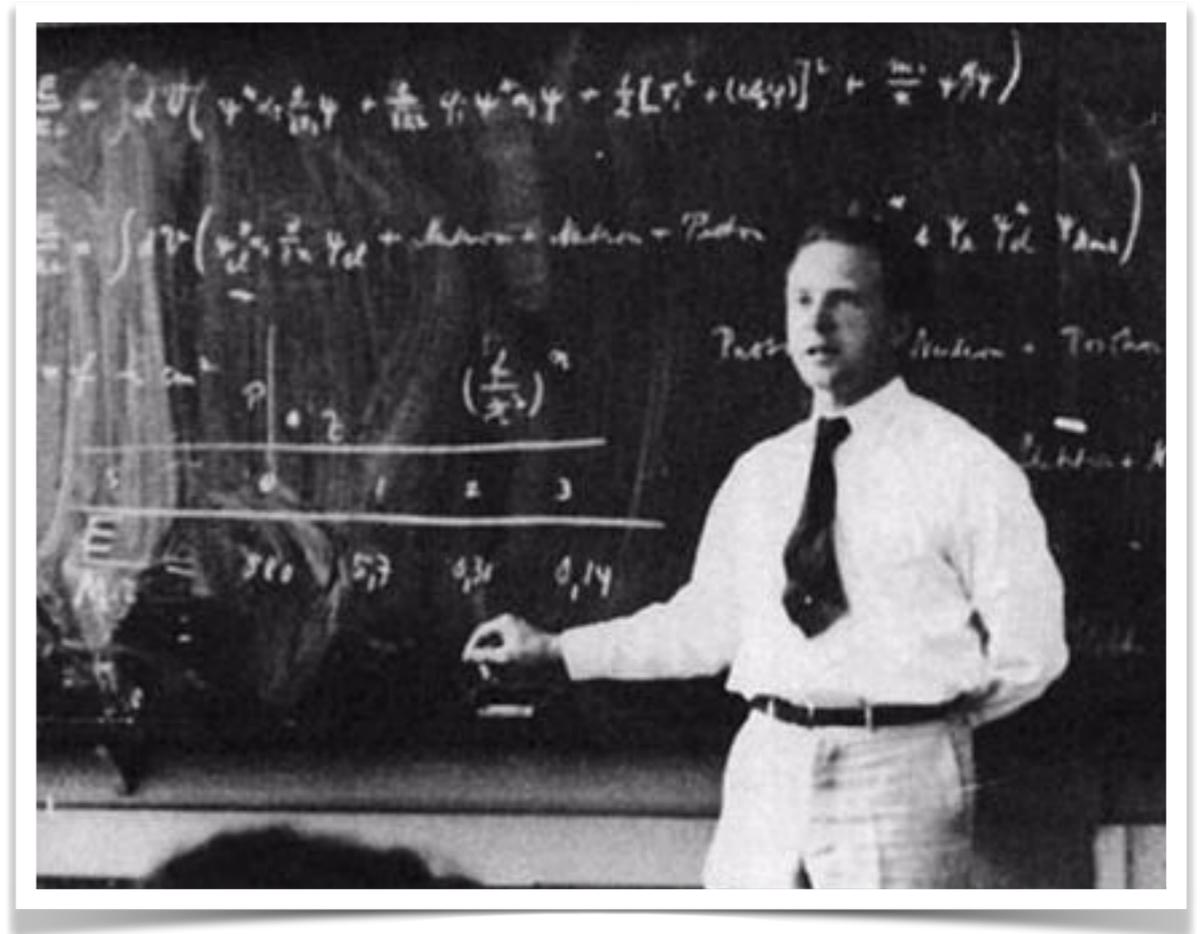
$$XP - PX = \frac{ih}{2\pi}$$

Le quantità che descrivono la natura non sono normali numeri ma oggetti matematici **non commutativi**, e questa non-commutatività si manifesta su scale dell'ordine della costante di Planck.

Nascita della Meccanica Quantistica

Da queste proprietà, con opportune deduzioni matematiche, segue **tutto**:

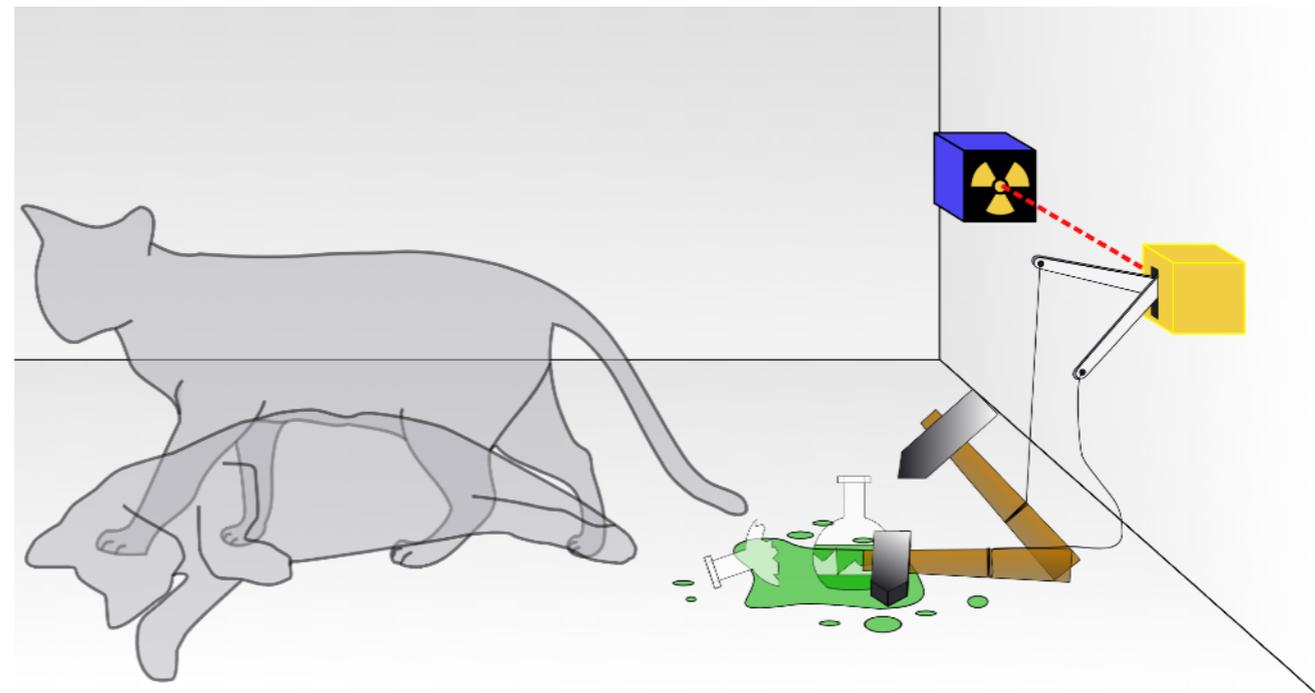
- la quantizzazione dell'energia
- la stabilità degli atomi
- le frequenze delle righe spettrali
- Il principio di indeterminazione
- la sovrapposizione degli stati quantici



Premio Nobel 1932

Alcune conseguenze: sovrapposizione degli stati

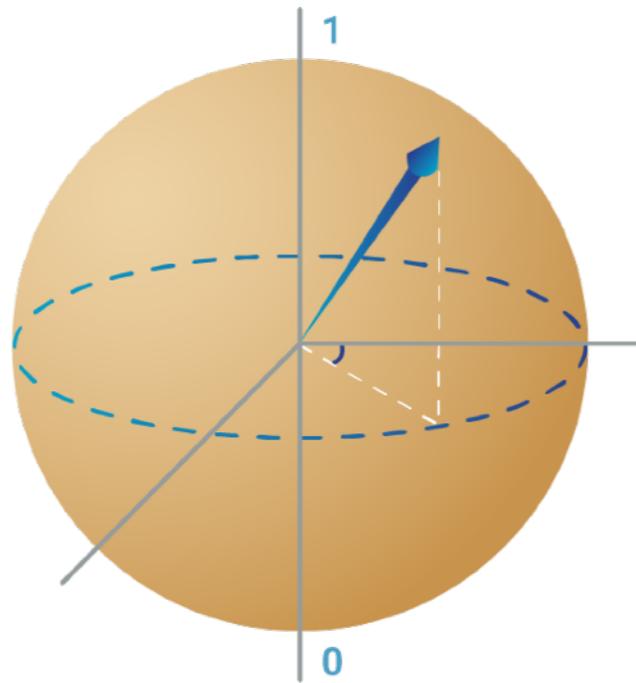
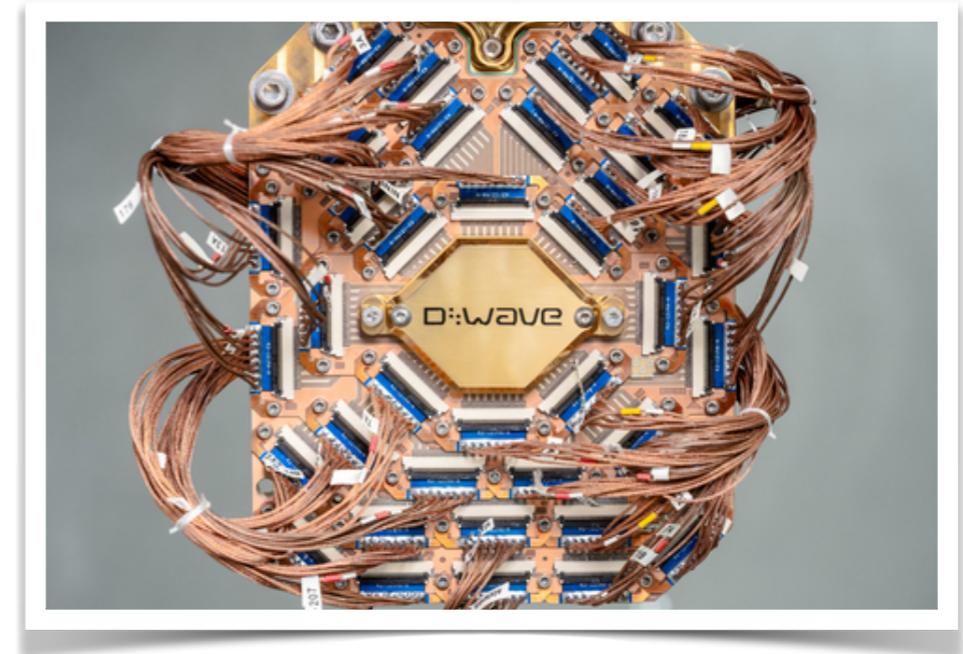
Una delle conseguenze più importanti della teoria è che ogni misurazione fisica ha un esito intrinsecamente **probabilistico**: ogni oggetto vive in una “**miscela e di stati**” e, quando si effettua una misura, **l'esperimento rivela soltanto uno di questi**, con una certa probabilità calcolabile.



Ad esempio, un elettrone, non “è in una posizione” ma è in una sovrapposizione di stati in ciascuno dei quali ha una posizione diversa. Quando si fa un esperimento per sapere dov'è, vediamo una sola di queste posizioni.

Alcune conseguenze: sovrapposizione degli stati

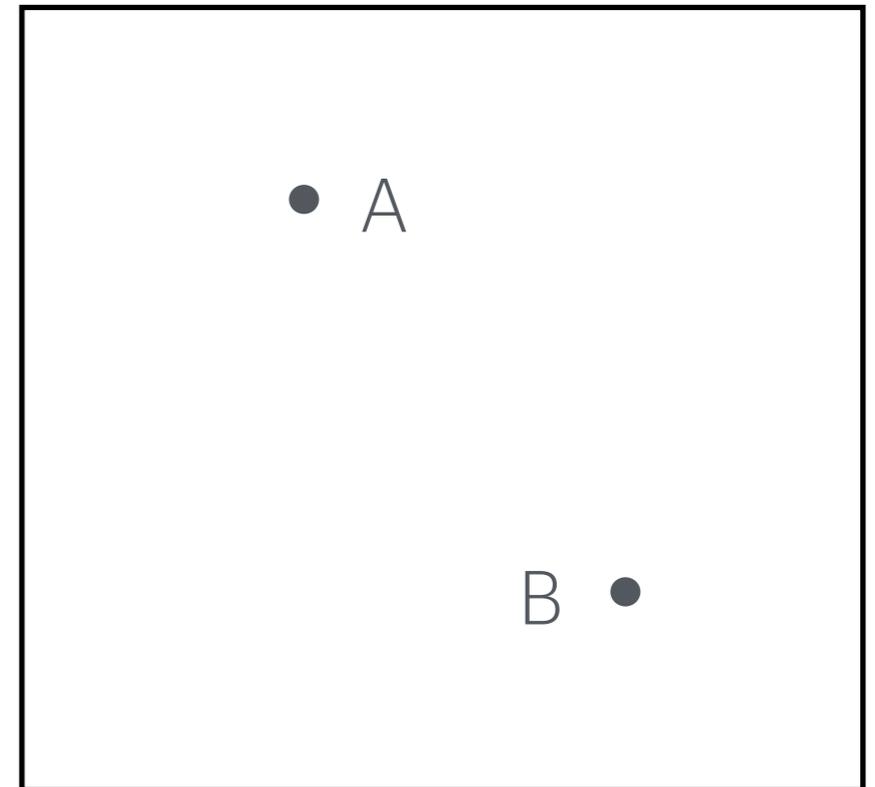
Questa proprietà dell'oggetto quantistico di essere una miscela di stati è alla base del **computer quantistico**.



Il "bit" classico è in uno solo dei due possibili stati (0 o 1); il "bit quantistico", o **qubit**, è **contemporaneamente in ogni possibile miscela di 0 e 1**.

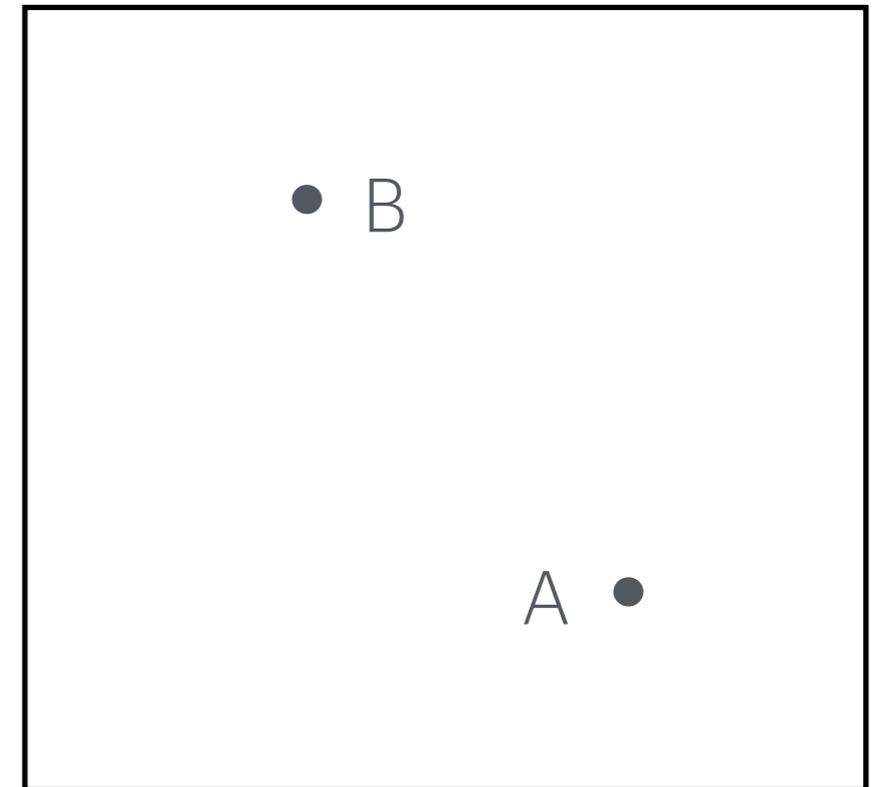
Alcune conseguenze: l'entanglement

Immaginiamo di avere due particelle identiche, A e B. Se con un esperimento troviamo una particella in una certa posizione, poiché sia A che B hanno una certa probabilità di trovarsi in diverse posizioni, **non c'è alcun modo** di sapere se abbiamo trovato la particella A o la particella B



Alcune conseguenze: l'*entanglement*

Immaginiamo di avere due particelle identiche, A e B. Se con un esperimento troviamo una particella in una certa posizione, poiché sia A che B hanno una certa probabilità di trovarsi in diverse posizioni, **non c'è alcun modo** di sapere se abbiamo trovato la particella A o la particella B

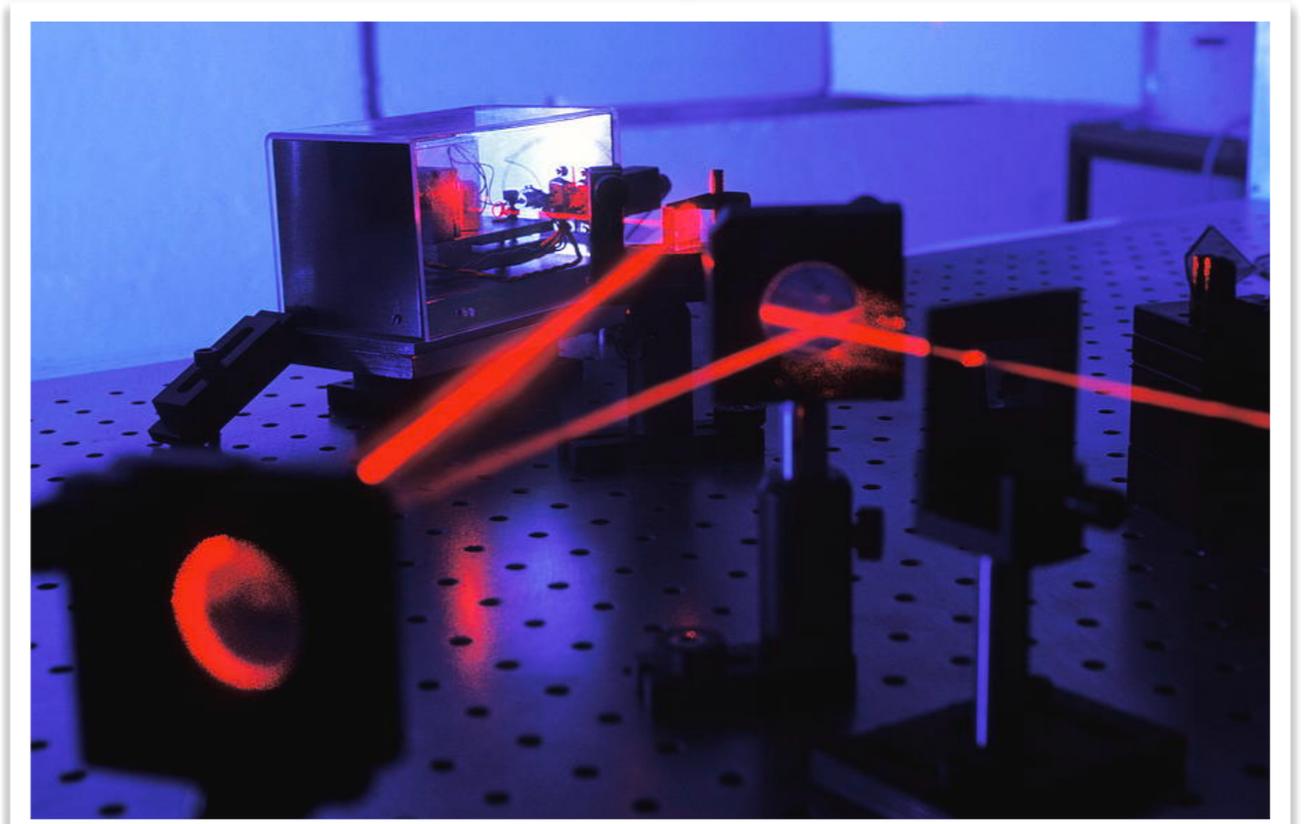


Dunque ciascuna particella perde la propria individualità: non esistono due particelle separate, esiste il **singolo oggetto** "due particelle". È il cosiddetto **entanglement** quantistico.

Alcune conseguenze: l'*entanglement*

Le due particelle, essendo un'unica entità, restano in qualche modo **legate anche a distanza**: la misura di una proprietà della particella A influenza la misura della stessa proprietà sulla particella B, anche quando A e B sono separate da enormi distanze.

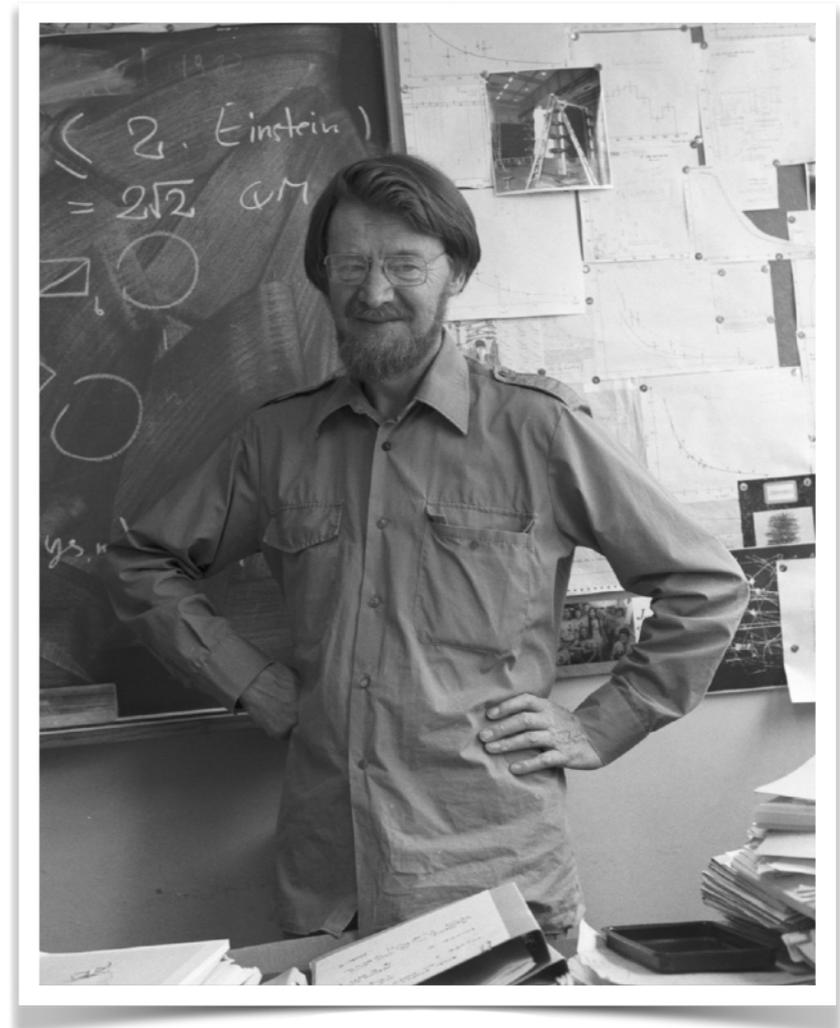
L'entanglement potrà essere sfruttato tecnologicamente per le **telecomunicazioni e la crittografia quantistica**.



Alcune conseguenze: l'entanglement

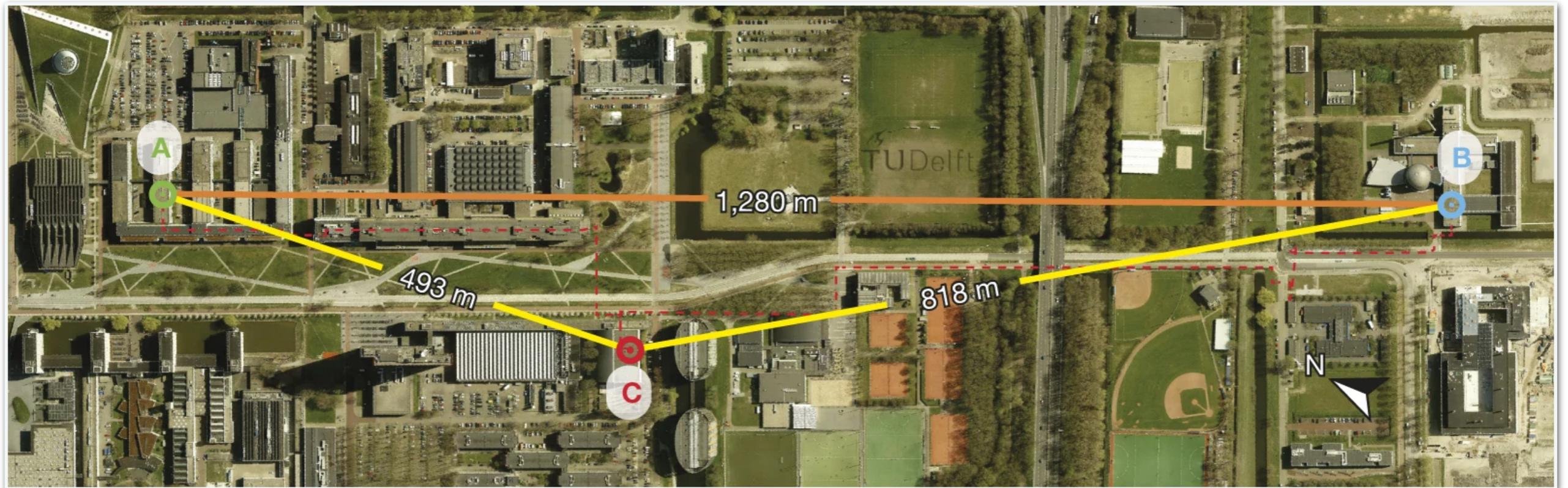
Einstein non accettò mai l'idea dell'entanglement, ritenendolo un'azione a distanza fisicamente impossibile, e per tutta la vita continuò a pensare che la MQ fosse una **teoria incompleta**.

Nel 1964 il fisico americano **John Bell** mostrò che se Einstein avesse avuto ragione, le misurazioni fisiche avrebbero dovuto soddisfare una proprietà matematica detta oggi **disuguaglianza di Bell**.



Alcune conseguenze: l'entanglement

La **violazione** della disuguaglianza di Bell e quindi la **validità della MQ** è stata verificata in diversi esperimenti a partire dagli anni '80.



Hensen et al., Nature, 2015

Applicazioni tecnologiche

Oltre a computazione, crittografia e telecomunicazioni quantistiche, che oggi sono solo ai primissimi passi, la MQ è alla base di tecnologie già consolidate e di **enorme** importanza.

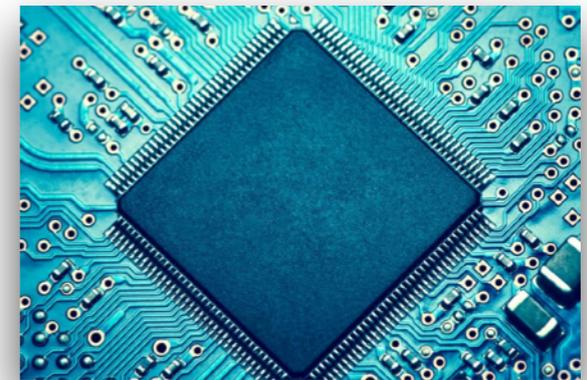
Laser



MR e PET



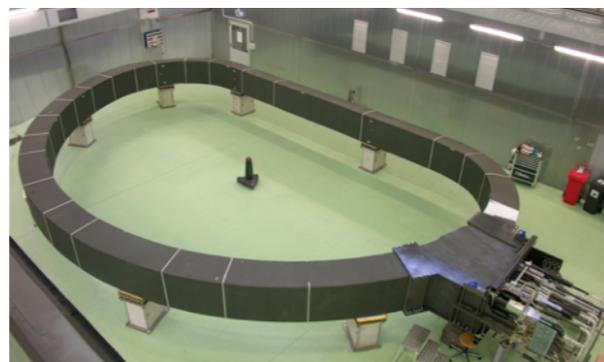
Micro-transistor



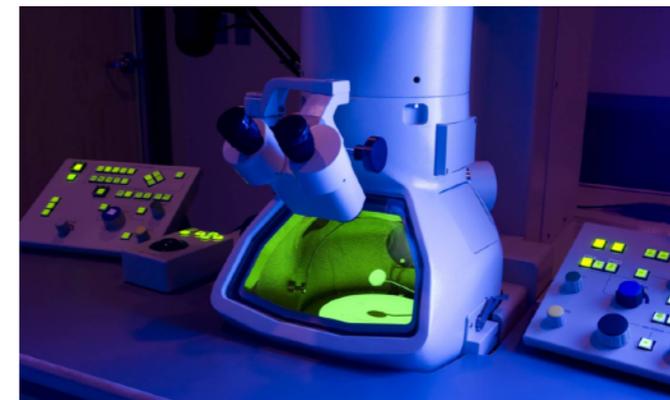
Orologio atomico



Superconduttori



Microscopio elettronico



Il problema dell'interpretazione

La teoria quantistica è tuttora la migliore teoria sulla natura delle cose.

E' una teoria che **funziona** alla perfezione.

Ma qual è il suo significato? Che cosa ci dice sull'essenza del mondo fisico? Com'è fatta la natura, secondo la MQ?

I fisici si divisero fin da subito: nacque il problema dell'**interpretazione** della Meccanica Quantistica, un problema che **non è ancora risolto**.



Il problema dell'interpretazione

L'interpretazione prevalente è la cosiddetta **interpretazione di Copenhagen**, introdotta e diffusa dalla scuola di Bohr.

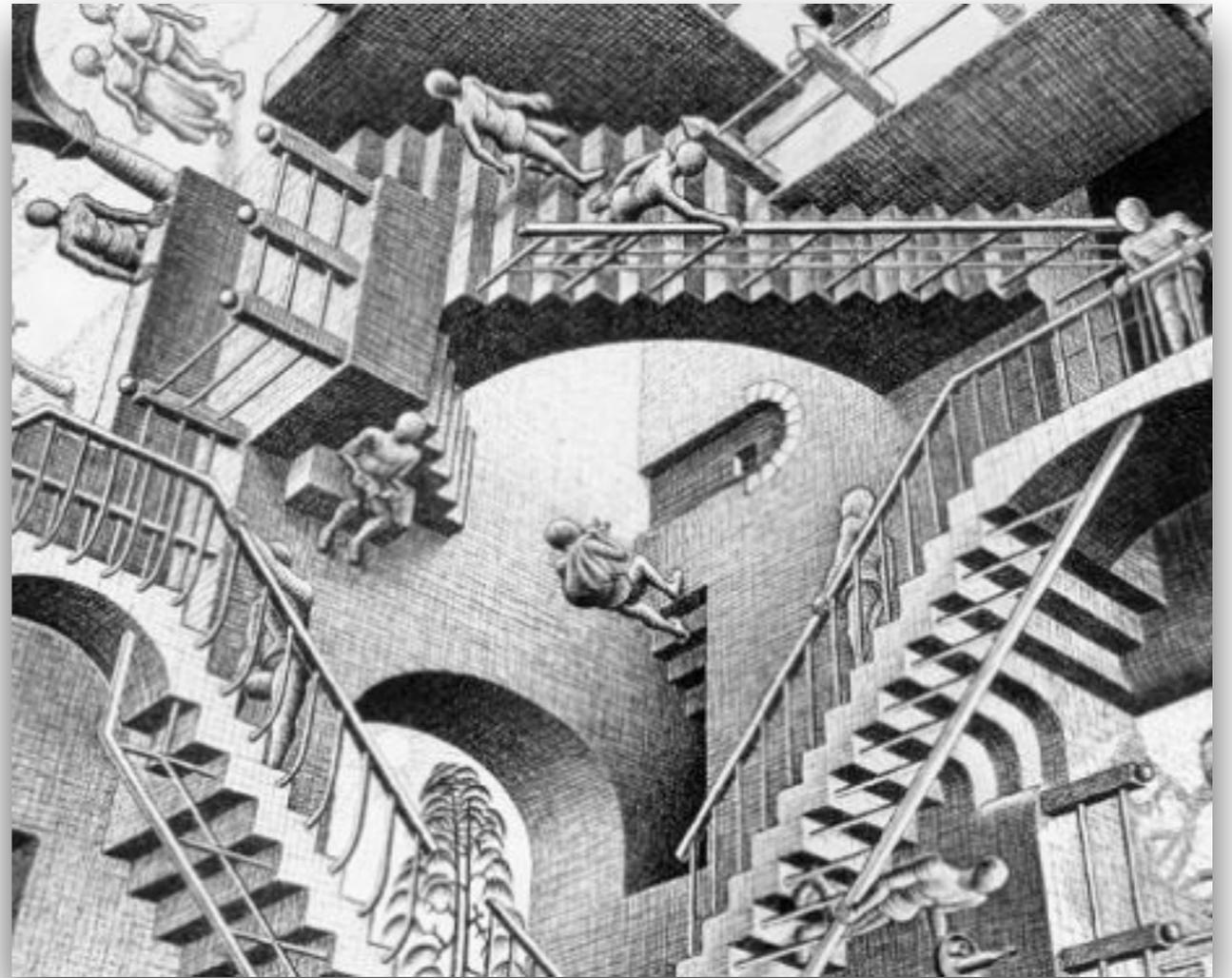
Quella di Copenhagen, più che un'interpretazione, è quasi una **rinuncia** a un'interpretazione: *la MQ è un insieme di regole matematiche che ci permettono di calcolare i possibili valori della misurazione di una quantità fisica e la probabilità di misurare ciascuno di questi valori.*

Questo punto di vista è riassunto in modo ironico, ma molto efficace, dalla famosa frase di D Mermin: *Zitto e calcola!*

Il problema dell'interpretazione

Diverse altre interpretazioni sono state proposte:

- interpretazione di Bohm
- interpretazione "a molti mondi"
- interpretazione "relazionale"
- ... e molte altre



ma, a ben vedere, il significato profondo della MQ resta ancora un mistero.

Il problema dell'interpretazione

Però, sicuramente, la MQ ci dice cosa la natura, alla scala atomica, **non è**.

Le particelle come nuclei ed elettroni, **non sono** minuscole “palline di materia”.

Non hanno una “posizione”, **non** hanno una “velocità”, **non** percorrono una “traiettoria”, almeno nel senso che diamo comunemente a queste parole.

Non hanno una localizzazione e neanche una “individualità”.

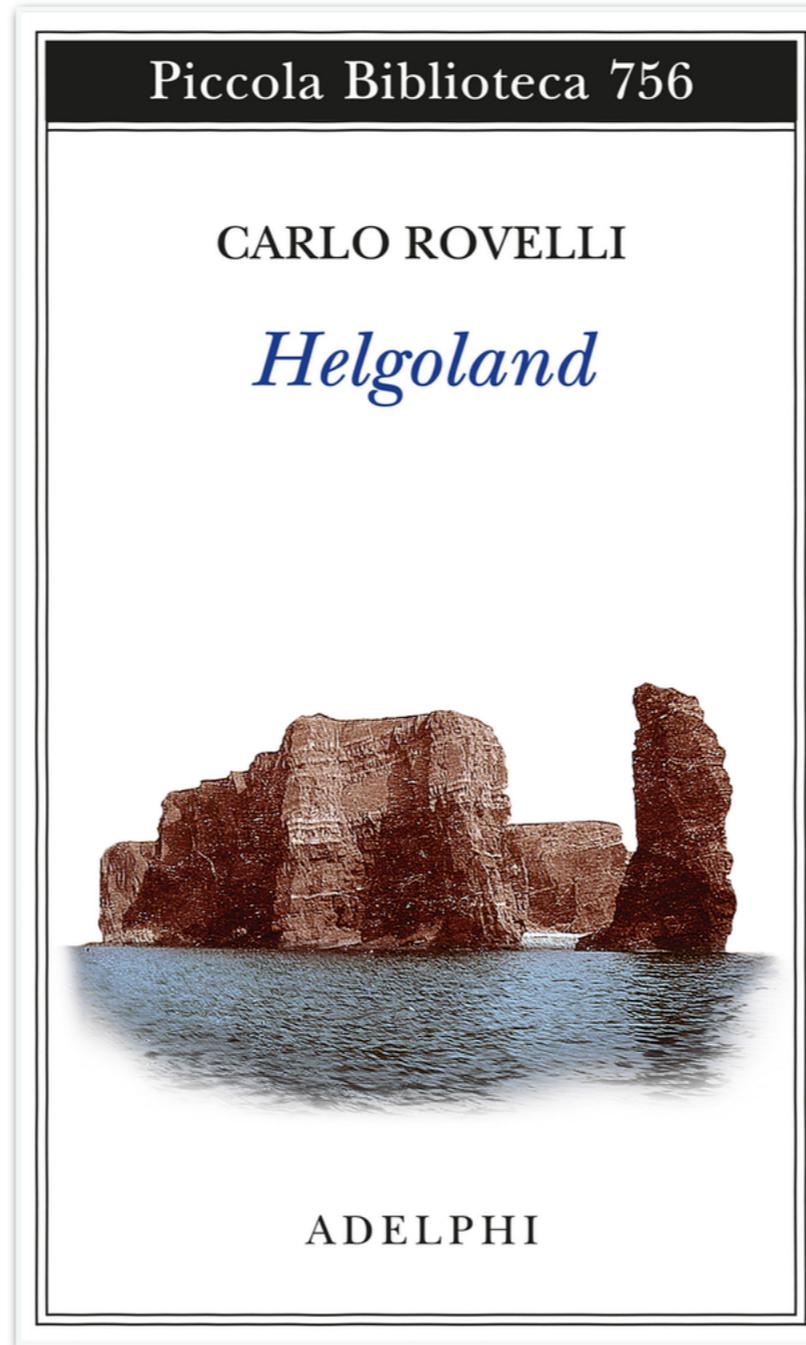
In un certo senso, **non esistono** finché non le osserviamo.

La realtà alla quale siamo abituati è un **fenomeno emergente** da una sottostante realtà che è molto difficile da “visualizzare” con nostri strumenti concettuali.

Ma giunti alla molecola chimica ci si trovò già nelle vicinanze di un abisso, spalancato assai più misteriosamente di quello tra natura organica e inorganica: vicino all'abisso tra materia e non-materia. Infatti la molecola si compone di atomi, e l'atomo non è più di gran lunga abbastanza grande da essere definito straordinariamente piccolo: è talmente piccolo, un ammasso così minuscolo, precoce e transitorio, di non-materia, di non ancora materia, di già simile alla materia, di energia, che non bisogna, già o ancora, pensarlo come materia, ma piuttosto come punto intermedio o limite fra la materia e la non-materia. Ed ecco porsi il problema di un'altra generazione spontanea, ben più enigmatica e fantastica di quella organica: la generazione spontanea della sostanza dalla non-sostanza.

T. Mann, "La montagna incantata"

Un consiglio per la lettura





Grazie per l'attenzione!