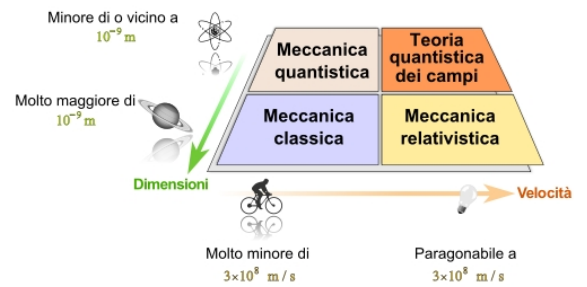
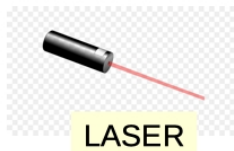
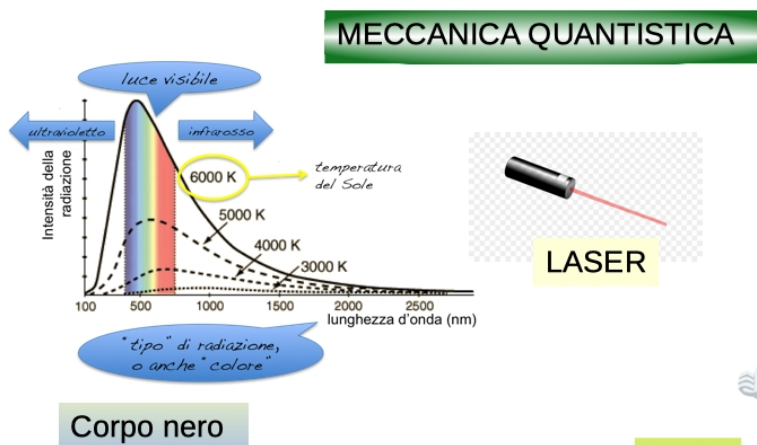
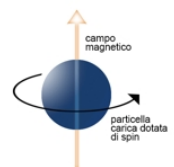
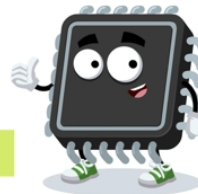


QUANTUM



Computer quantistico

CHIP



INTRODUZIONE	3
LA NASCITA DEL “QUANTO”	3
IL CORPO NERO E MAX PLANCK	3
IL CORPO NERO	5
L’EFFETTO FOTOELETTRICO	8
L’ELETTRONE	9
L’EFFETTO FOTOELETTRICO	10
LA NATURA DELLA LUCE-ONDA-CORPUSCOLO	12
TERMODINAMICA	14
I PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA	15
II PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA	15
ATOMO DAL GRECO ATOMOS: INDIVISIBILE	18
L’ERA FILOSOFICA	18
L’ERA SCIENTIFICA MODERNA	18
EFFETTO COMPTON (ARTHUR COMPTON 1892 – 1962)	25
IL DUALISMO ONDA-CORPUSCOLO	27
IL PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE	30
ERWIN SCHOEDINGER E LA SUA EQUAZIONE	32
PAUL A.M. DIRAC (ENTANGLEMENT)	35
$(\partial + m) \psi = 0$	35
UN MARE DI ANTIMATERIA	37
LO SPIN DELL’ELETTRONE	41
LA SCOPERTA DELLO SPIN	41
PARADOSSO DI SCHRÖDINGER, IL GATTO NELLA SCATOLA È VIVO O MORTO? LA RISPOSTA VI SPIAZZERÀ (SOVRAPPOSIZIONE DI DUE STATI)	42
LA MECCANICA QUANTISTICA PER IMMAGINI	45
AVVIO AL COMPUTER QUANTISTICO	51

QUANTUM

Breve compendio di meccanica quantistica

Introduzione

La nuova frontiera dell'informatica è senz'altro il qubit, o bit quantistico. Prima di affrontarlo direttamente è opportuno scrivere un breve compendio di meccanica quantistica. Tutti sanno che è un argomento ostico, anche a detta degli scienziati che l'hanno affrontata e che a tutt'oggi dicono che con la meccanica quantistica ci si può lavorare e produrre ottimi risultati tecnici, ma capirla a fondo è ancora un problema.....

La nascita del “quanto”

Il corpo nero e Max Planck

Ed eccoci alla partenza! Voglio spiegare e divulgare di uno degli argomenti più spettacolari e importanti di questo secolo: il quantum computing, ovvero il computer quantistico e cercare di dare una spiegazione semplice e divulgativa dei misteri della meccanica quantistici.

La Quantum Computing cambierà qualsiasi cosa e il futuro di qualunque persona sarà molto diverso prima di quello che potete aspettarvi!

How Google's Quantum Computer Could Change the World!

Questo ultra-powerful (straordinaria potenza) può cambiare ogni cosa dalla scienza, alla medicina, alla national security – assumendo che funzioni!

The ultra-powerful machine has the poentential to disrrupt everything from a science and medicine to national security – aasuming it works!

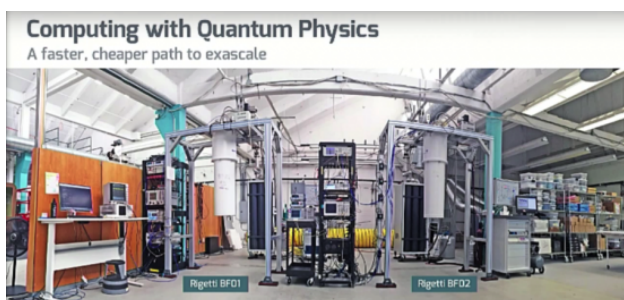
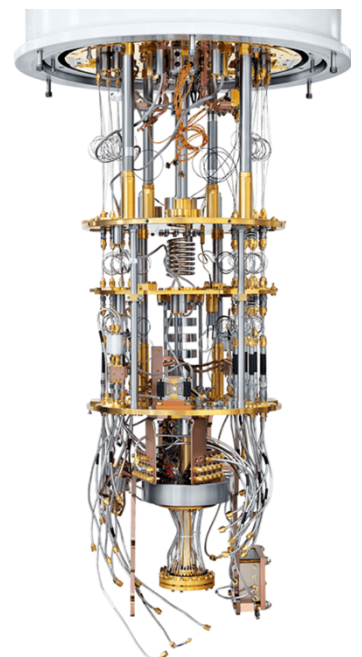


Figura 1 Computer quantistici della Rigetti



La sfida mentale e tecnologica è immane! È necessario per capire la sfida, partire da una timeline sulla Meccanica Quantistica con aneddoti e affermazioni dei protagonisti che non siano legati solo alle formule e al grandioso lavoro matematico, comprensibile solo a pochi eletti.

È una impresa improba e difficile come disse il grande Richard Feynman, fisico premio Nobel. Fece questa strana affermazione e se per lui era così figuriamoci per noi semplici mortali dotati di un intelletto normale:

La natura non è classica, dannazione, e se vuoi fare una simulazione della natura, faresti meglio a renderla meccanica quantistica, e per fortuna è un problema meraviglioso, perché non sembra così facile.

“Nature isn’t classical, dammit, and if you want to make a simulation of Nature, you’d better make it quantum mechanical, and by golly it’s a wonderful problem, because it doesn’t look so easy.”

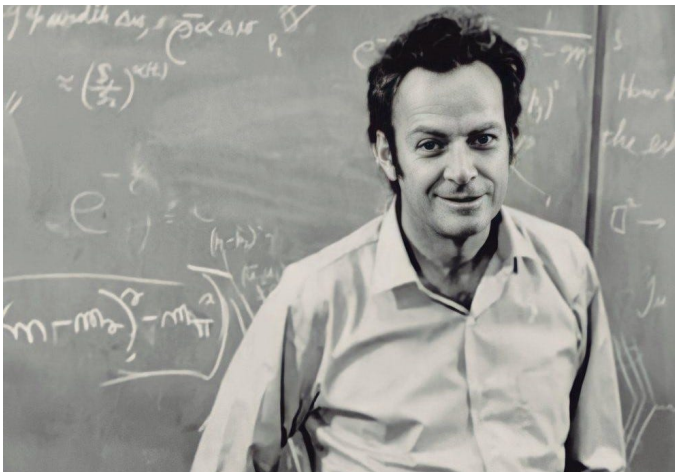


Figura 2 Il fisico premio Nobel Richard Feynman

È la prima volta che in un articolo scientifico viene usata la parola “dannazione” (dammit) questo solo per indicare quanto difficile e complesso è il mondo della meccanica quantistica. Di seguito riporto tre dichiarazioni dei principali fisici protagonisti di questa avventura iniziata nel 1905! **Il quanto visto come particella!!!!**

- Max Planck
In poche parole, ciò che feci può essere descritto semplicemente come un atto di disperazione!
- Albert Einstein
Era come se ci fosse mancata la terra sotto i piedi, e in vista non vi fosse nessun punto fermo su cui poter costruire.
- Niels Bohr
Infatti chi non rimane sconvolto quando si imbatte per la prima volta nella teoria quantistica non può averla assolutamente compresa!

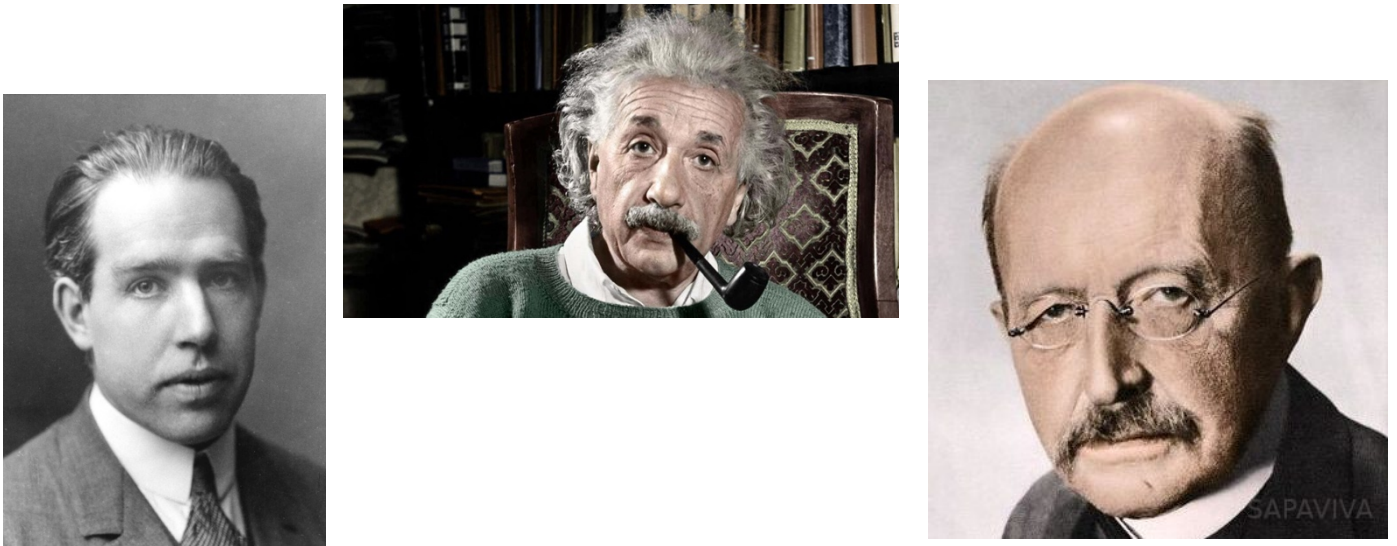
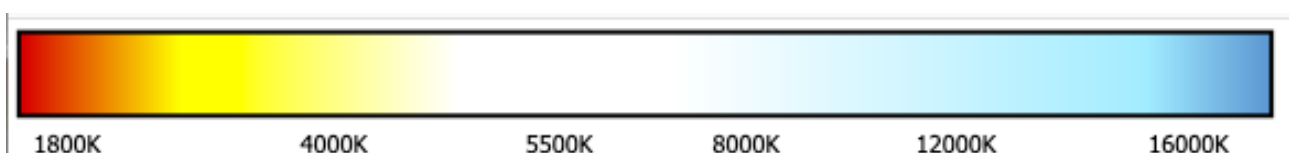


Figura 3 Nell'ordine: Niels Bohr, Albert Einstein, Max Planck. Tre grandi scienziati precursori della meccanica quantistica.

L'epoca storica nella quale questi tre grandi scienziati iniziarono i loro studi è il primissimo Novecento. In quel periodo non era ancora stata formulata la teoria atomica, l'esistenza degli elettroni era stata appena codificata, ma delle altre particelle elementari non si sapeva nulla, la tavola periodica degli elementi non era stata completata e non si conoscevano i raggi X. Siamo nel dicembre del 1900 quando all'età di 42 anni Max Planck scoprì l'equazione che descriveva la distribuzione della radiazione (di natura elettromagnetica) emessa da un corpo nero.

Il Corpo Nero

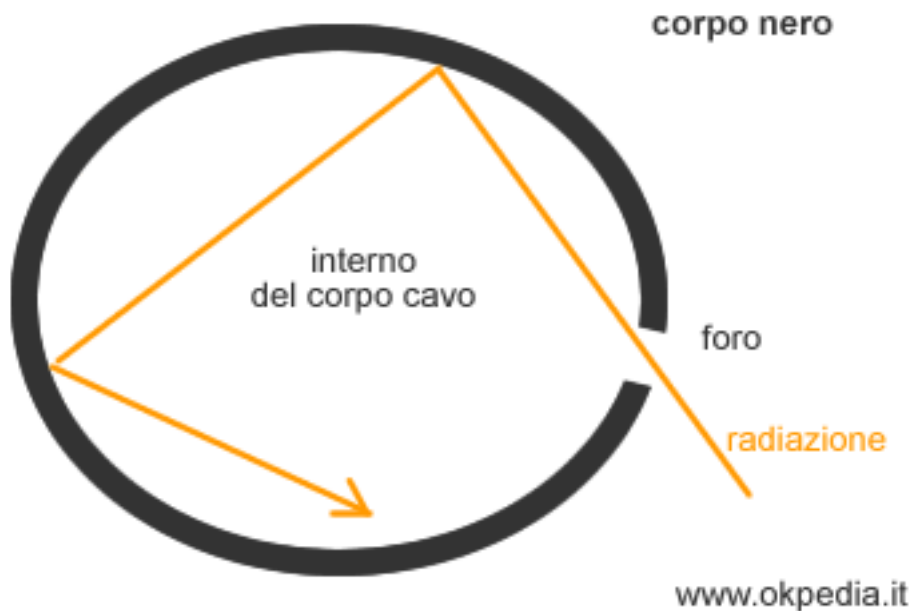
Esperienza: un corpo solido freddo non produce alcuna emissione di radiazione, ma al crescere della temperatura comincia a diventare luminoso e a cambiare colore. Esempio: un metallo che diventa incandescente cambia il suo colore e passa dal rosso, poi arancione, ad un giallo-bianco fino ad arrivare al blu.



La formula che spiegava questo fenomeno è la seguente:

Il valore E (Energia) di un quanto di energia dipende dalla **frequenza** ν della radiazione secondo la formula:

$$E = h * \nu$$



dove h è la costante di Planck.

Il valore della costante di Planck è senza errori di misura in quanto, a partire dal 20 maggio 2019, è la costante utilizzata per definire il chilogrammo. Il valore scelto è:

h è la costante di Planck e dove J sta per Joule e s per secondi

Come era possibile questo cambiamento di colore nei corpi portati all'incandescenza? Perché i cambiamenti di colore erano così netti e separati? L'unica spiegazione che diede Planck, con suo rammarico, era che l'energia veniva emessa a pacchetti e non in modo continuo: a **questi pacchetti venne dato il nome di quanti!**

Questo implicava che siamo in presenza di corpuscoli, i quanti, scoperta che contraddiceva la corrente di pensiero sulla natura della luce, altro argomento di discussione e di studio per anni. Si passa dalla teoria Newtoniana e/a quella di Fresnel che pensavano alla luce più come onde che come corpuscoli. Addirittura Fresnel assimilò la luce alle onde sonore, compressione e dilatazione dell'atmosfera, e quando chiesero come mai la luce attraversava lo spazio? Rispose che nello spazio c'era l'etere!

Per chi volesse approfondire metto in linea una Unità Didattica desunta dal sito dell'Università di Padova. È semplice, ma corretta dal punto di vista scientifico:

[UniDid_1Download](#)

La costante di Planck **h** è una costante Universale, il suo valore è uguale sia sulla Terra che su Marte, Giove, Venere...in tutto lo spazio così come lo sono il π , il numero neperiano **e**, $\sqrt{2}$ e molte altre.

file contenente i valori delle costanti in matematica e fisica.

[090-costanti_fisicheDownload](#)

Max Planck affermò che *“Il mondo esterno è qualcosa di indipendente dall'uomo, qualcosa di assoluto e la ricerca delle leggi che regolano questo assoluto, mi appare come un sublime impegno della vita.”*

La Meccanica Quantistica regola le dinamiche nella struttura fine della materia con le cui applicazioni si sono raggiunte notevoli innovazioni tecnologiche dal microchip, al laser, ai superconduttori fino ai super computer quantistici governati dai qubit. Offro un altro spunto per capire il corpo nero e la sua importanza per aver permesso di penetrare il mistero fondamentale della meccanica quantistica: **IL QUANTO!**

L'effetto fotoelettrico

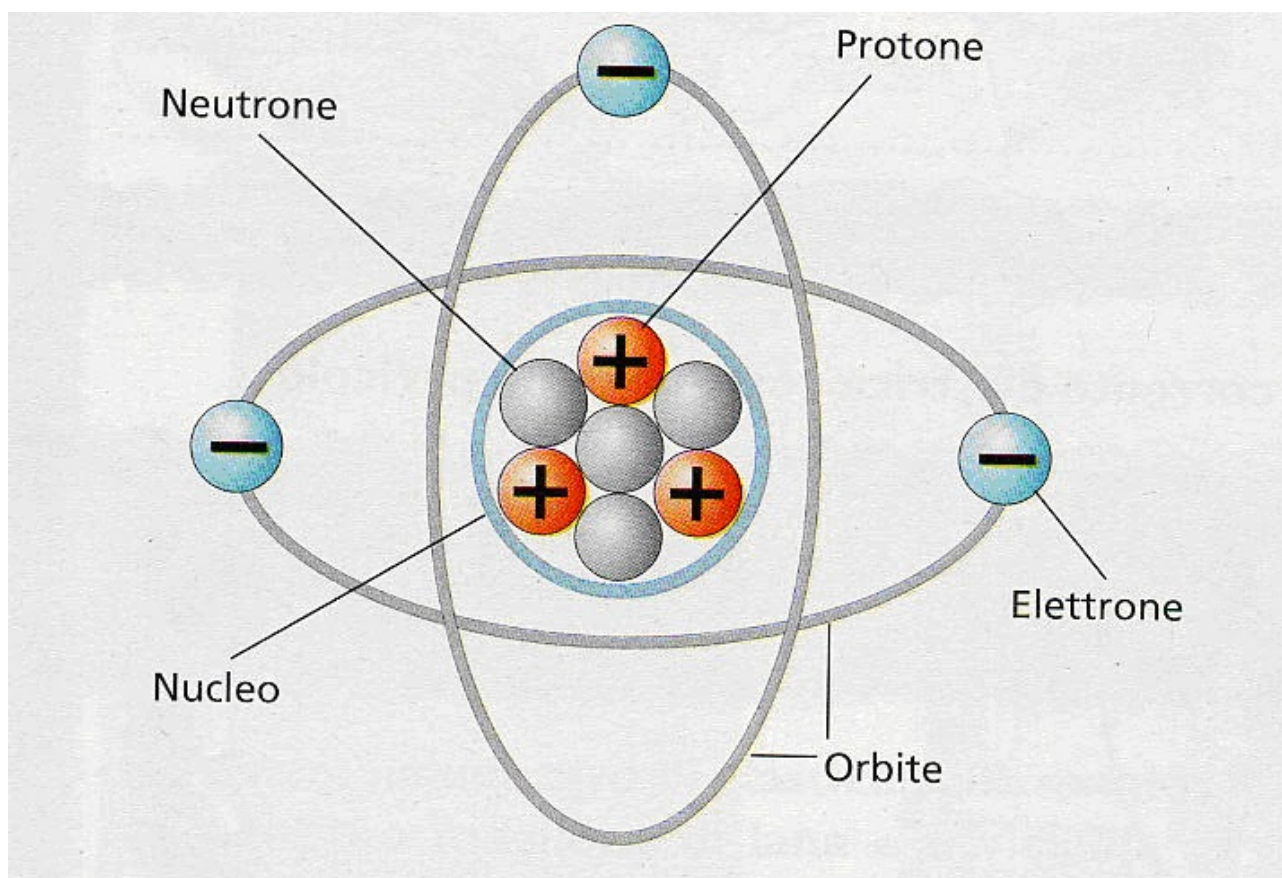


Figura 4 Semplice modello di atomo visto con più orbite per gli elettroni

Tutti noi abbiamo sotto gli occhi le applicazioni molteplici dell'effetto fotoelettrico presente in molte artefatti della nostra vita. Un esempio per tutti è l'apertura automatica delle porte degli ascensori. Il fenomeno è facile da descrivere, più complicato capirlo negli aspetti infinitesimali dove entra a piè pari la meccanica quantistica. Una superficie metallica riceve o meglio viene colpita da una radiazione, emessa da apposita lampada e a determinata E energia e lunghezza d'onda ν (simbolo greco ν), e da questa superficie si liberano elettroni che vanno a colpire un'altra superficie metallica creando così un flusso di corrente. *(quando si vuole bloccare questo flusso di corrente basta mettere una mano che interrompe il flusso di corrente e le porte dell'ascensore resteranno aperte).*

Prima di iniziare questo argomento faccio alcune riflessioni sulla scienza, riportando il pensiero di Pietro Greco, chimico e grande divulgatore!

La scienza è uno strumento di crescita sociale e di pace, non di divisione e conflitto! La scienza può portare le persone, non adeguatamente preparate, a MISconcetti che possono essere utilizzati anche per fake news, sia da un punto di vista politico, sia religioso. È importante la scelta delle parole nel raccontare la scienza! "Non c'è scienza senza comunicazione della scienza!!!!"

Il chimico francese Antoine-Laurent de Lavoisier affermava che usando parole poco appropriate si corre il rischio di trasmettere impressioni sbagliate anche quando i fatti scientifici da comunicare sono certi! Il fisico James Clerk Maxwell anche lui ha ribadito l'importanza della scelta delle parole nel raccontare la scienza. La percezione di autorevolezza

della scienza da parte della società sarebbe tale da rendere accettabili anche le opinioni più assurde, se descritte con parole il cui suono ricordi espressioni scientifiche note.

(tratto da considerazioni di Pietro Greco, divulgatore scientifico)

Iniziamo con il descrivere una particella elementare particolarmente importante: l'elettrone.

L'elettrone

Fu scoperto nel 1897, anno in cui Joseph John Thomson (1865-1940) direttore del Cavendish Laboratory di Cambridge, osservò che i raggi catodici erano sensibili ai campi elettrici e magnetici e che si comportavano come particelle cariche negativamente. Si progettò un esperimento dove i raggi catodici (particelle negative) emessi dal catodo e sparati a velocità elevata passavano dove agivano campi elettrici e magnetici. Alla fine del percorso il raggio arrivava a colpire una zona fluorescente dello schermo segnalando la posizione del raggio con un punto luminoso. Se i campi erano spenti il raggio colpiva la parte centrale dello schermo, mentre se erano accesi il raggio catodico veniva deviato segnalando così la presenza di una particella carica negativamente: l'elettrone.

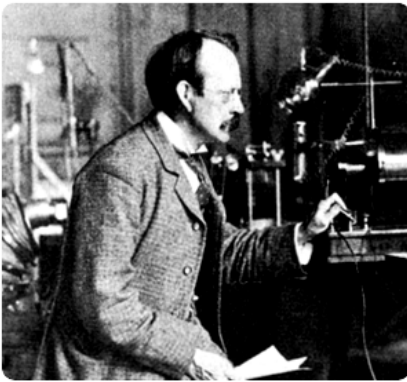


Figura 5 Joseph John Thomson (1856 -1940) scoprì che gli atomi non sono divisibili.

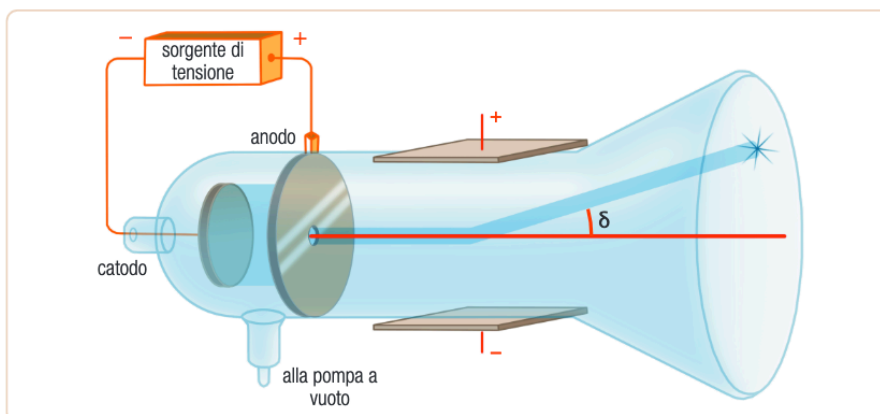


Figura 6 La deflessione dei raggi catodici provocata dal campo elettrico esterno nel tubo catodico modificato da Thomson

L'effetto fotoelettrico

L'effetto fotoelettrico era noto da tempo, e consisteva nell'emissione di elettroni da una piastra di metallo irradiata da energia. Solo Einstein riuscì a formalizzarlo e darne una spiegazione esauriente.

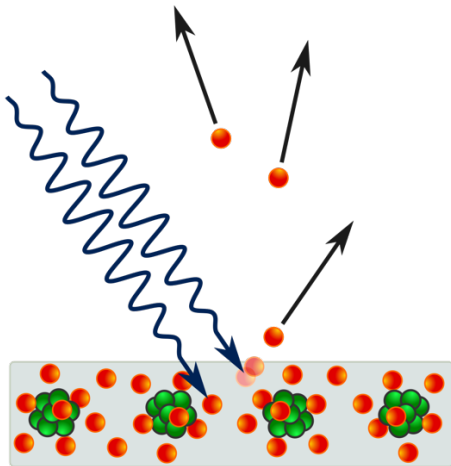


Figura 7 Schema che illustra l'emissione di elettroni da una piastra di metallo irradiata da energia.

La scoperta dell'effetto fotoelettrico va fatta risalire alla seconda metà del XIX secolo e ai tentativi di spiegare la conduzione nei liquidi e nei gas. Nel 1887, Hertz, riprendendo e sviluppando gli studi di Schuster sulla scarica dei conduttori elettrizzati stimolata da una scintilla elettrica nelle vicinanze, si accorse che tale fenomeno è più intenso se gli elettrodi vengono illuminati con luce ultravioletta. Nello stesso anno, Wiedemann e Ebert stabilirono che la sede dell'azione di scarica è l'elettrodo negativo e Hallwachs trovò che la dispersione delle cariche elettriche negative è accelerata se i conduttori vengono illuminati con luce ultravioletta.

Nei primi mesi del 1888, il fisico italiano Augusto Righi, nel tentativo di capire i fenomeni osservati, scoprì un fatto nuovo: una lastra metallica conduttrice investita da una radiazione UV si carica positivamente. Righi introdusse, per primo, il termine "fotoelettrico" per descrivere il fenomeno. Hallwachs, che aveva sospettato ma non accertato il fenomeno qualche mese prima di Righi, dopo qualche mese, dimostrava, indipendentemente dall'italiano, che non si trattava di trasporto, ma di vera e propria produzione di elettricità.

Sulla priorità della scoperta tra i due scienziati si accese una disputa, riportata sulle pagine del Nuovo Cimento. La comunità scientifica tagliò corto e risolse la controversia chiamando il fenomeno *effetto Hertz-Hallwachs*. Fu poi Einstein, nel 1905, a darne l'interpretazione corretta, intuendo che l'estrazione degli elettroni dal metallo si spiegava molto più coerentemente ipotizzando che la radiazione elettromagnetica fosse costituita da pacchetti di energia o quanti, poi denominati fotoni.

L'ipotesi quantistica di Einstein non fu accettata per diversi anni da una parte importante della comunità scientifica, tra cui Hendrik Lorentz, Max Planck e Robert Millikan (vincitori del Premio Nobel per la fisica, rispettivamente, nel 1902, 1918 e 1923), secondo i quali la reale esistenza dei fotoni era un'ipotesi inaccettabile, considerato che nei fenomeni di interferenza le radiazioni elettromagnetiche si comportano come onde. L'iniziale scetticismo di questi grandi scienziati dell'epoca non deve sorprendere dato che perfino Max Planck, che per primo ipotizzò l'esistenza dei quanti (anche se con riferimento agli atomi, che emettono e assorbono "pacchetti di energia"), ritenne, per diversi anni, che i quanti fossero un semplice artificio matematico e non un reale fenomeno fisico.

Ma, successivamente, lo stesso Robert Millikan dimostrò sperimentalmente l'ipotesi di Einstein sull'energia del fotone, e quindi dell'elettrone emesso, che dipende soltanto dalla frequenza della radiazione, e nel 1916 effettuò uno studio sugli elettroni emessi dal sodio che contraddiceva la classica teoria ondulatoria di Maxwell.

L'aspetto corpuscolare della luce fu confermato definitivamente dagli studi sperimentali di Arthur Holly Compton. Infatti il fisico statunitense nel 1921 osservò che, negli urti con gli elettroni, i fotoni si comportano come particelle materiali aventi energia e quantità di moto che si conservano; nel 1923, pubblicò i risultati dei suoi esperimenti (effetto Compton) che confermavano in modo indiscutibile l'ipotesi di Einstein: la radiazione elettromagnetica è costituita da quanti (fotoni) che interagendo con gli elettroni si comportano come singole particelle. Per la scoperta dell'effetto omonimo, Compton ricevette il premio Nobel nel 1927.

Per i suoi studi sull'effetto fotoelettrico e la conseguente scoperta dei quanti di luce, Einstein ricevette il Premio Nobel per la fisica nel 1921.

Tratto da Wikipedia

Nell'articolo (1905) **“Emissione e trasformazione della luce da un punto di vista euristico¹”** **Albert Einstein propose che la luce non fosse fatta di onde, ma di quanti simili a particelle. Un punto di vista rivoluzionario che stabiliva che la luce e la radiazione elettromagnetica non fosse affatto un fenomeno ondulatorio (come credeva Planck), ma fosse suddivisa in piccoli frammenti: in quanti di luce!!**

Questo per far capire quanto problematica e difficile fosse accettare la teoria dei quanti come corpuscoli e quanto ebbe a spendersi per spiegarlo Albert Einstein.

Per chi volesse approfondire vi propongo il testo integrale di Einstein, è da leggere anche se dopo un le formule matematiche diventano realmente difficili, ma basta per dare una idea della difficoltà che si dovevano affrontare! *(in italiano)*

[A.-Einstein-Emissione-e-trasformazione-della-luce-da-un-punto-di-vista-euristicoDownload](#)

Perché tutto queste contrastanti teorie e difformità di pensiero tra scienziati? La risposta è semplice e riguarda la comprensione della natura della luce.

La luce è un'onda elettromagnetica o un corpuscolo?

alla prossima puntata!

¹ Voglio esplicitare il significato della parola EURISTICO: *l'euristica è una parte dell'epistemologia e del metodo scientifico nella ricerca che si occupa di favorire l'accesso a nuovi sviluppi teorici, nuove scoperte empiriche e nuove tecnologie. Ma ci sono anche altre interpretazioni: Relativo all'ipotesi di lavoro assunta come guida nel corso di una ricerca scientifica e alla metodologia che vi è connessa, spec. diretta alla scoperta di nuovi risultati. In matematica, di procedimento non rigoroso che consente di prevedere un risultato, che dovrà poi essere convalidato.*

La natura della luce-onda-corpuscolo

Sul fatto che la luce sia un'onda o sia un corpuscolo è in corso un dibattito che al giorno d'oggi è solo sopito da più di quaranta anni di ricerca ad altissimi livelli. Per questo motivo inizio con due tavole sinottiche:

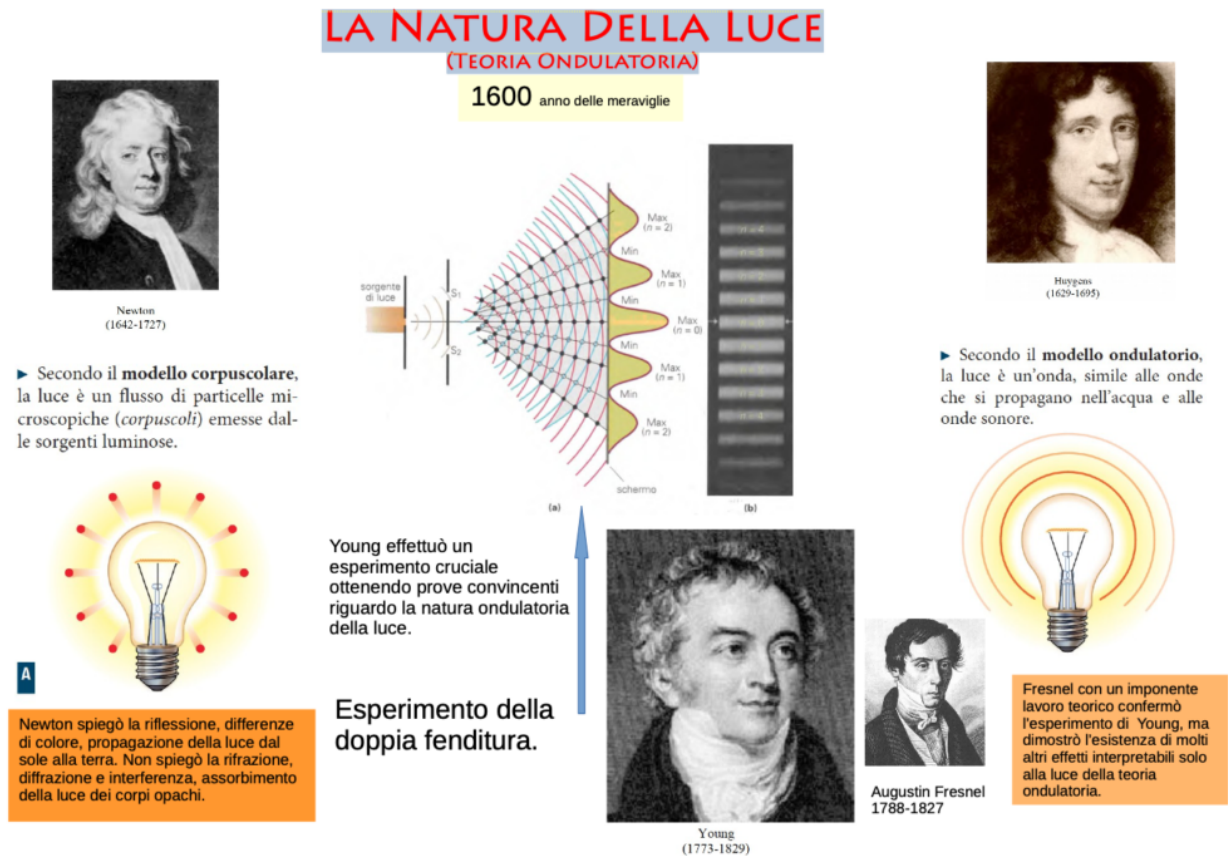


Figura 8 La natura della luce. Onda o corpuscolo? I parte

LA NATURA DELLA LUCE

(TEORIA CORPUSCOLARE)

Teoria corpuscolare

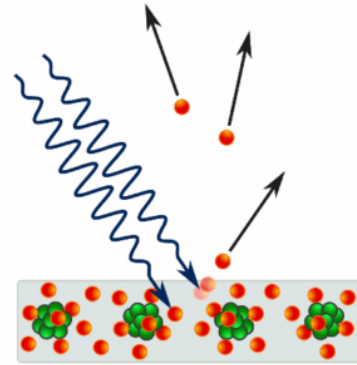
1800 fotoni

Newton
(1642-1727)



- La luce è composta da particelle dotate di energia e impulso.
- Tali particelle vengono liberate dai corpi luminosi e si propagano in linea retta.
- La riflessione è spiegata tramite il rimbalzo delle particelle nel momento dell'urto con una superficie.
- La rifrazione è dovuta alle forze che le molecole di una sostanza esercitano sulle particelle di luce deviandone la direzione.
- La luce è più veloce nei corpi rispetto al vuoto.
- Luci di colori diversi vengono rifratte con angoli differenti a parità di indice di rifrazione.
- Le particelle hanno diversa massa:
 - i corpuscoli più grossi provocano la sensazione del rosso;
 - i corpuscoli più piccoli danno la sensazione del violetto.

Effetto fotoelettrico nel quale si vede che l'emissione di radiazioni ad una certa frequenza forniscono Energia agli elettroni permettendo loro di fuori uscire dall'atomo.



I corpuscoli possono essere considerati come piccoli proiettili: sono materia in movimento.

Le onde trasportano Energia, ma non materia.

Le discussioni si moltiplicano nei primi del 900 fino ad arrivare al dualismo onda-particella! Alla prossima puntata.

TEORIA CORPUSCOLARE

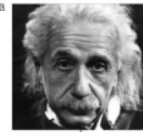
Planck si rese conto che la luce doveva essere formata da **granuli**.

L'energia emessa da un corpo nero si presentava suddivisa in pacchetti.

L'energia veniva emessa in forma quantizzata e i pacchetti furono definiti "**quanti**".

Albert Einstein, spiegò poi l'effetto fotoelettrico ipotizzando che i quanti fossero entità reali che chiamò **fotoni**.

L'**intensità**, nella teoria corpuscolare è data dal numero di fotoni che compongono il raggio.



La luce è un fascio di pacchetti o **QUANTI** di energia chiamati **FOTONI**.

L'equazione di Planck - Einstein



$$E = hv$$

l'energia del fotone o quanto di luce

- h è la **COSTANTE DI PLANCK** (valore di $6,626 \times 10^{-34} \text{Js}$)
- v è la frequenza in Hz

Figura 9 La natura della luce. Onda o corpuscolo? Il parte

Termodinamica

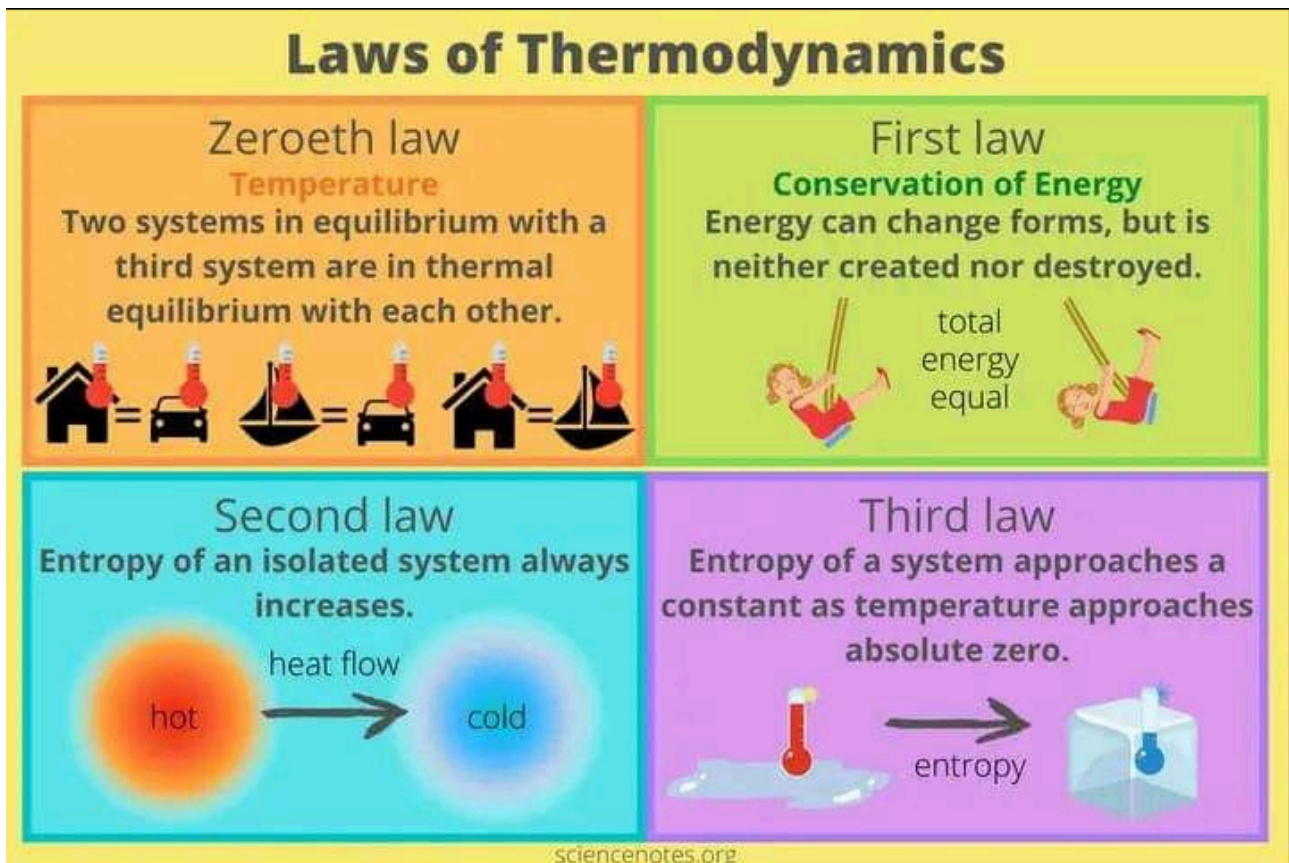


Figura 10 La termodinamica in sintesi

1. **Legge zero**

Temperatura

Due sistemi in equilibrio con un terzo sistema sono in equilibrio termico tra loro.

2. **Prima Legge**

Conservazione dell'energia

L'energia può formarsi, ma non viene né creata né distrutta.

3. **Seconda Legge**

L'entropia di un sistema isolato aumenta sempre.

4. **Terza legge**

L'entropia di un sistema si avvicina a una costante quando la temperatura si avvicina allo zero assoluto.

La termodinamica è la disciplina che studia essenzialmente le trasformazioni reciproche tra lavoro meccanico e calore.

I principio della termodinamica

L'Energia, in qualsiasi forma, possiede la peculiare proprietà di conservarsi. L'Energia non può essere creata e non può essere distrutta, ma soltanto convertita da una forma all'altra.

Esempio: abbiamo un lago di alta montagna, ad una altitudine di 1500 m sul livello del mare. Esso possiede una determinata Energia Potenziale. Pensiamo adesso di costruire una Centrale Idroelettrica a valle, cioè a 100 m sul livello del mare. Adesso attraverso apposite condotte forzate e turbine facciamo defluire l'acqua del lago e assisteremo alla conversione dell'Energia Potenziale in Energia Cinetica, e poi con opportuni alternatori in Energia elettrica.

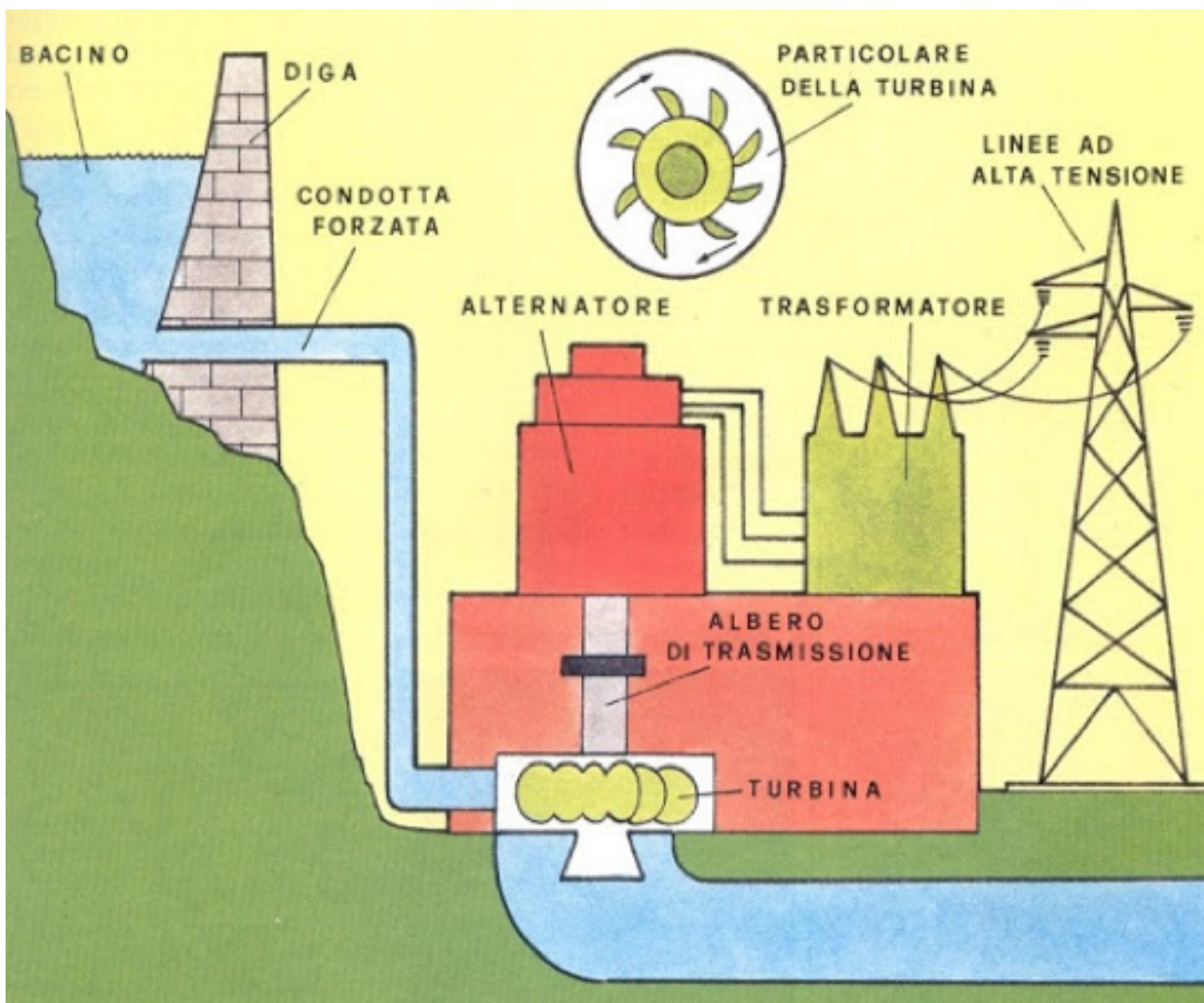


Figura 11 Schema di centrale idroelettrica

II principio della termodinamica

Quando una tazza di caffè bollente si raffredda, l'aria circostante si riscalda mentre l'Energia viene dissipata andando irrimediabilmente perduta, siamo sicuri che il processo inverso non possa verificarsi.

Se la conservazione dell'Energia era il modo in cui la natura faceva tornare i conti in ogni possibile transazione fisica, la natura richiedeva un prezzo per ogni transazione che effettivamente aveva luogo.

Secondo Clausius, l'ENTROPIA era il prezzo da cui dipendeva che qualcosa accadesse oppure no. In ogni sistema isolato erano consentiti soltanto quei processi, o transazioni, in cui l'ENTROPIA o rimaneva invariata o aumentava. Qualunque processo che portasse a una diminuzione di ENTROPIA era assolutamente vietato.



Figura 12 Entropia

Definizione di ENTROPIA

- L'entropia S è una grandezza la cui variazione è rappresentata dal **rapporto** tra:
il calore Q
(trasferito con una trasformazione **reversibile**
ad una data temperatura T espressa in kelvin)
e la temperatura T stessa. (Si misura in J/K)

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

Figura 13 Definizione di Entropia

In termodinamica, la trasformazione che porti il sistema da uno stato iniziale A ad uno finale B, viene calcolata sommando le quantità di calore scambiate dal sistema in una qualsiasi trasformazione reversibile che vada da A a B, divise rispettivamente per le temperature assolute delle sorgenti con cui si scambia calore; si misura in joule per grado Kelvin. In tutti i processi fisici reali (quindi irreversibili) di un sistema isolato, l'entropia aumenta sempre e tende ad un valore massimo; secondo l'interpretazione data dalla meccanica statistica, l'entropia è una funzione crescente della probabilità che un sistema si trovi in un determinato stato macroscopico, per cui i sistemi isolati evolvono spontaneamente verso le configurazioni a entropia maggiore, che sono quelle con un grado minore di ordine.

Nella teoria dell'informazione, l'entropia è un modo per capire quanto è chiaro e univoco il messaggio; **maggiore è l'entropia, minore è la quantità di informazione.**

Planck, che in quel periodo studiava la radiazione emessa da un corpo nero, riteneva che l'ENTROPIA, accanto all'Energia, fosse la proprietà di tutti i sistemi fisici e dedicò la tesi del dottorato sull'irreversibilità dei processi fisici. Non venne preso in considerazione dai Grandi del periodo!

Questi sono concetti universali che ci torneranno utili in seguito! Adesso il prossimo articolo riguarderà tutte le evoluzioni del modello atomico. Per arrivare a quello di oggi ci sono voluti circa 40 anni con ripensamenti, riformulazioni e poi finalmente la conferma finale. Anche in questo caso dovremo fare una piccola timeline che riguarderà tutti i personaggi coinvolti!

Atomo dal greco atomos: Indivisibile

L'era filosofica

Le prime teorie sulla scienza e sulla natura della materia risalgono ai tempi dell'antica Grecia e sono di natura prettamente filosofica. In quel periodo la scienza era un ramo della filosofia, e senza fare troppe indagini e considerazioni (vedi Babilonesi, Caldei, Egizi) osserviamo i filosofi che si sono occupati di questo argomento.

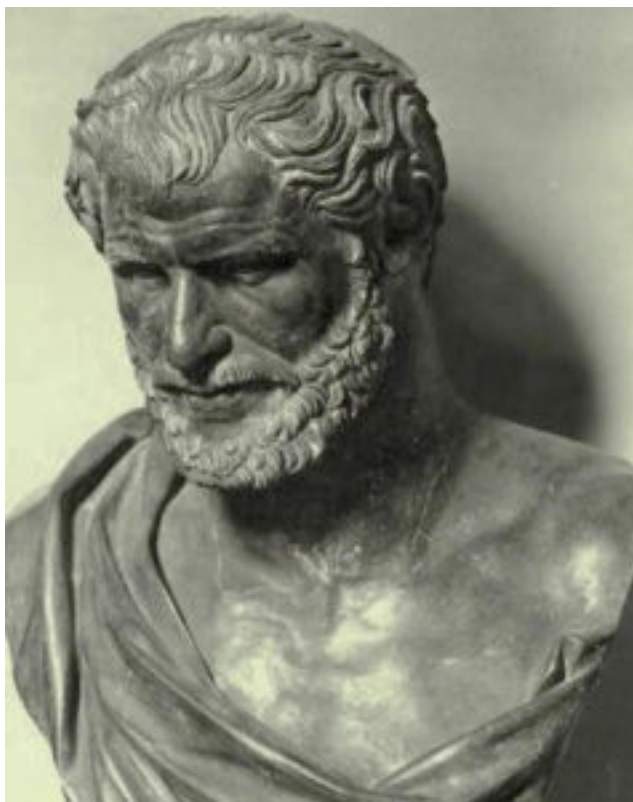


Figura 14 Democrito

Democrito nato ad Abdera nel 406 a.c. e morto nel 370 a.c. fu assieme al suo maestro Leucippo il padre dell'atomismo. Disse che la materia era formata da atomi che costituivano la parte più piccola e indivisibile (atomo). La sua filosofia si basava su due concetti, il vuoto e la materia. Il vuoto era lo spazio dove non c'era nulla e la materia era composta da atomi. Questa teoria fu avversata da Aristotele. Fin dai tempi di Aristotele, atomi e vuoto sono stati variamente interpretati; infatti, lo stesso Aristotele così si esprime nella sua Metafisica: "Leucippo e il suo discepolo Democrito pongono come elementi il pieno e il vuoto, chiamando l'uno essere e l'altro non essere". Per chiudere questo brevissimo excursus, il noto filosofo della scienza: Ludovico Geymonat afferma che **«l'atomismo di Democrito [...] ebbe una funzione determinante, nel XVI e XVII secolo, per la formazione della scienza moderna»**.

L'era scientifica moderna

L'era scientifica moderna inizia con **Galileo Galilei** (1564 – 1642). È considerato il padre della Rivoluzione Scientifica con l'introduzione del metodo scientifico e l'introduzione della matematica come linguaggio universale della scienza.

Introdusse il concetto di esperimento (**Prova e Riprova.....**) per capire i fenomeni naturali. Democrito propose la teoria atomica, secondo cui la materia è costituita da minuscole particelle, diverse tra loro, chiamate atomi, la cui unione dà origine alle sostanze. Questo aiutò **Isaac Newton** (1643 – 1727) a sviluppare la sua teoria corpuscolare sulla luce, e a **John Dalton** che fu il primo scienziato che elaborò una teoria atomica partendo dal pensiero di Democrito. **Nel 1808 rielaborò la teoria atomica di Democrito, con un intensissimo lavoro di laboratorio e tantissimi esperimenti fino ad elaborare una teoria su come dovesse essere costituito un atomo.**



Figura 15 John Dalton 1766-1844

La teoria di Dalton è basata su cinque principi:

1. **La materia è formata da piccolissime particelle elementari chiamate atomi che sono indivisibili e indistruttibili;**
2. **Gli atomi di uno stesso elemento sono tutti eguali tra loro;**
3. **Gli atomi di elementi diversi si combinano tra loro in rapporto di numeri interi (in genere piccoli numeri) dando origine ai composti;**
4. **Gli atomi non possono essere creati o distrutti;**
5. **Gli atomi di un elemento non possono essere convertiti in atomi di altri elementi.**

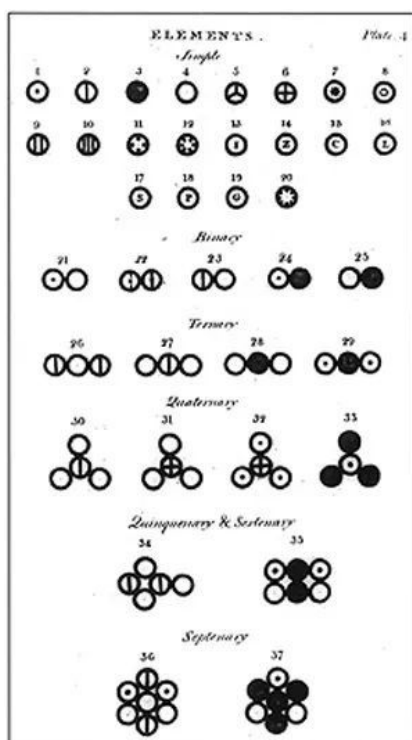
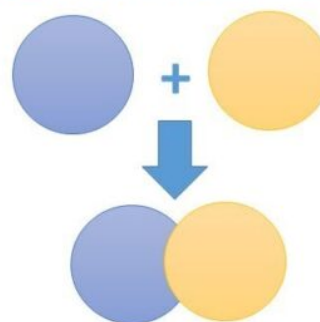
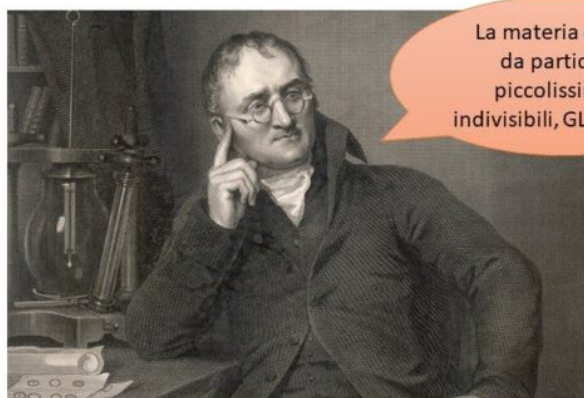


Figura 16 Gli elementi atomici in simboli secondo Dalton

Vari atomi e molecole rappresentati nella prima pagina di “A New System of Chemical Philosophy”, di John Dalton, pubblicato nel 1808.

IL MODELLO ATOMICO DI DALTON

Nel 1808 il chimico inglese Jhon Dalton osservò che le sostanze elementari non si possono scomporre in sostanze semplici. La materia che ci circonda infatti può essere suddivisa in porzioni sempre più piccole fino a quando le sue proprietà chimico-fisiche rimangono inalterate. **POI NON SI PUO' PIU'.**



In una reazione chimica le particelle scompaiono per formare una nuova sostanza. IL NUMERO DI PARTICELLE TOTALI TRA REAGENTI E PRODOTTI NON VARIA MAI. NULLA SI CREA NULLA SI DISTRUGGE

Figura 17 Sintesi del pensiero Daltoniano

IL MODELLO ATOMICO DI DALTON

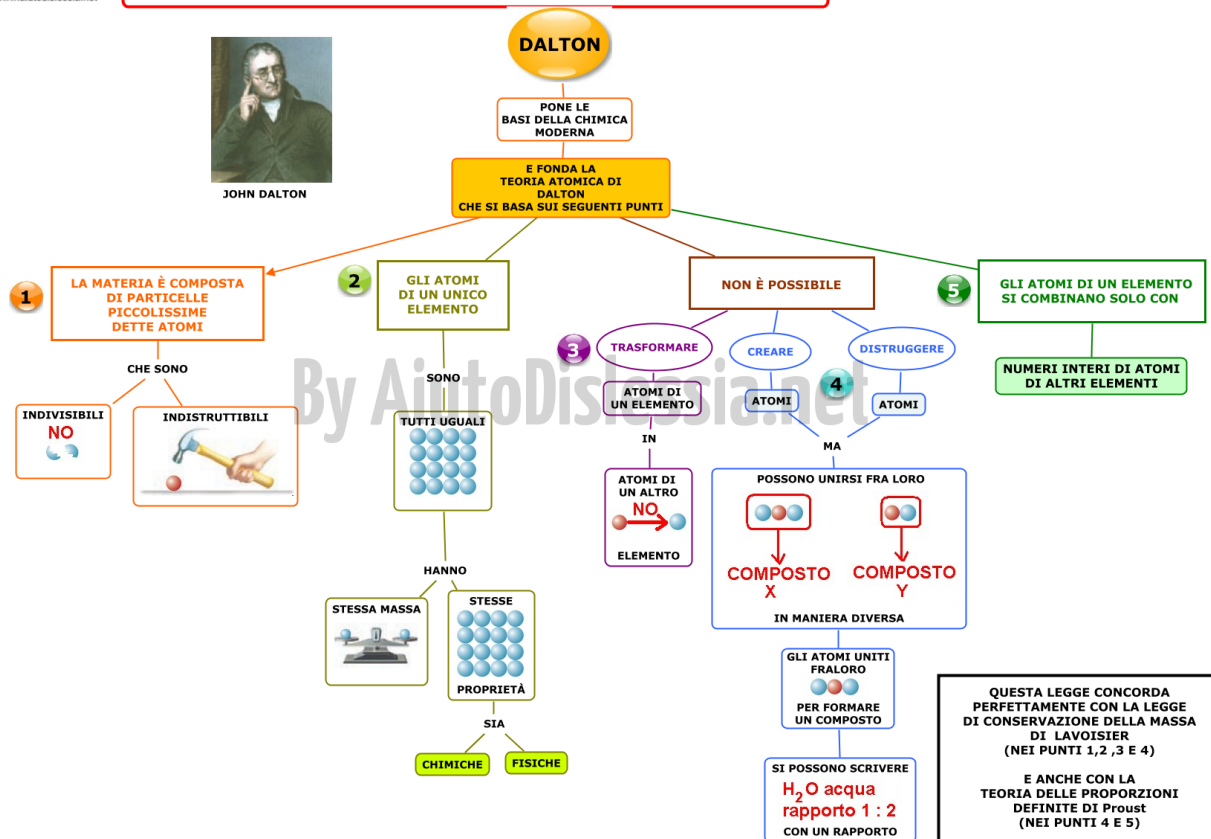


Figura 18 Mappa concettuale sulla chimica di Dalton

La storia delle teorie atomiche (sempre controverse e contestate) continua **Joseph John Thomson** (1856 – 1840). Thomson con i suoi esperimenti lavorando con i raggi X e in special modo con i raggi catodici notò che questi venivano deviati se sottoposti a un campo elettrico, desunse che fossero composti da particelle di carica negativa, che chiamò *corpuscoli*, e che sono successivamente diventati noti come **elettroni**, per questa scoperta prese il Nobel nel 1906. Egli immaginò che un atomo fosse costituito da una sfera fluida in cui erano immersi gli elettroni (considerate come particelle negative): è il **modello a panettone**, in inglese *plum pudding model*.

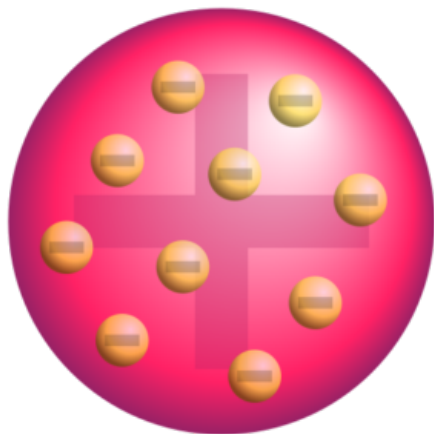


Figura 19 Teoria Atomica di Thomson, modello a panettone

Nel 1910 due allievi di Ernest Rutherford (1871 – 1934) Geiger e Mardsen svolsero un esperimento cruciale con lo scopo di convalidare il modello di Thomson. Bombardarono un sottilissimo foglio di oro, posto tra una sorgente di particelle alfa e uno schermo. L'esperimento portò alla constatazione che

i raggi alfa non venivano quasi mai deviati: solo l'1% dei raggi incidenti era deviato considerevolmente dal foglio d'oro, alcuni venivano respinti. Attraverso questo esperimento, Rutherford propose un modello di atomo in cui tutta la massa dell'atomo fosse concentrata in una porzione molto piccola, il nucleo (caricato positivamente) e gli elettroni gli girassero così come i pianeti ruotano attorno al Sole: fu così varato il **modello planetario**! L'atomo era quindi composto da spazio vuoto, e questo spiegava il perché del passaggio della maggior parte dei raggi alfa attraverso la lamina. Il nucleo è così concentrato che gli elettroni gli ruotano attorno a distanze relativamente enormi. Rutherford intuì che i **protoni** (particelle cariche nel nucleo) da soli non bastavano a giustificare tutta la massa del nucleo e formulò l'ipotesi dell'esistenza di altre particelle, che contribuissero a formare l'intera massa del nucleo.

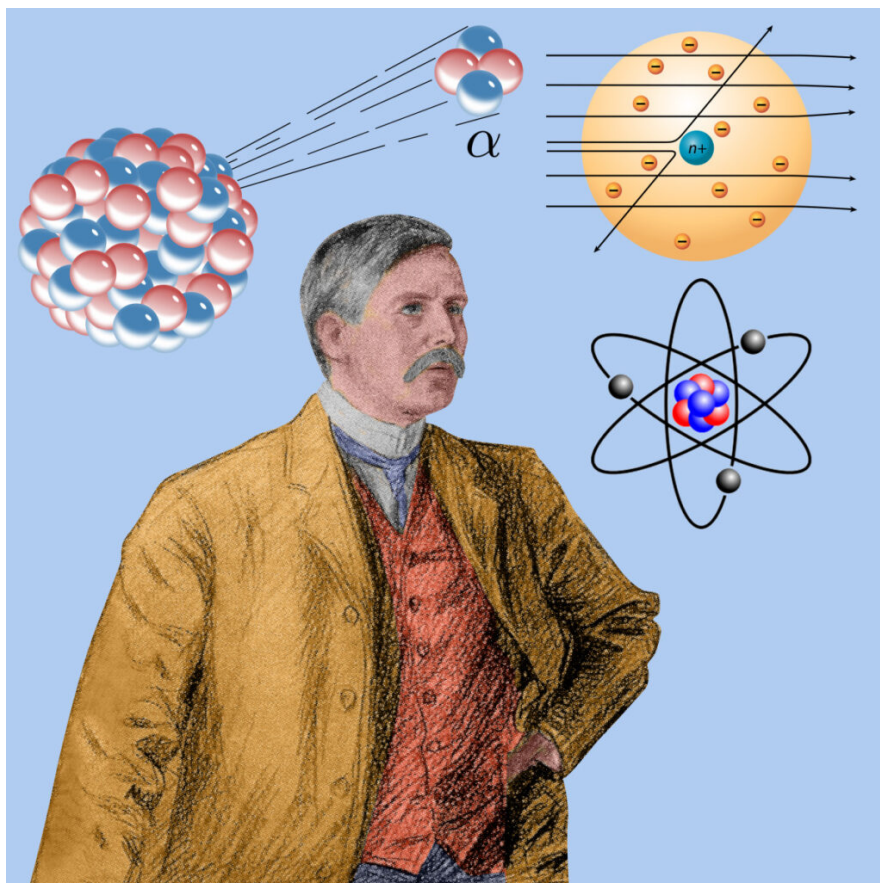


Figura 20 Ernest Rutherford il protone e il modello planetario dell'atomo

Il modello di Rutherford aveva incontrato una palese contraddizione con le leggi della fisica classica. Secondo la teoria elettromagnetica, una carica che subisce una accelerazione emette energia sotto forma di radiazione elettromagnetica. Per questo motivo, gli elettroni dell'atomo di Rutherford, che si muovono di moto circolare intorno al nucleo, avrebbero dovuto emettere onde elettromagnetiche e quindi, perdendo energia, annichilire nel nucleo stesso (**teoria del collasso**), cosa che evidentemente non accade. Inoltre un elettrone, nel perdere energia, potrebbe emettere onde elettromagnetiche di qualsiasi lunghezza d'onda operazione preclusa nella teoria e nella pratica dagli studi sul **corpo nero** di Max Planck (e successivamente di Albert Einstein). Solo la presenza di livelli di energia quantizzati per quanto riguarda gli stati degli elettroni poteva spiegare i risultati sperimentali: la stabilità degli atomi rientra nelle proprietà spiegabili mediante la meccanica quantistica, crescenti col numero atomico degli elementi secondo incrementi dei tempi di stabilità via via decrescenti (regola dell'ottetto e regola dei 18 elettroni). *Tratto da Wikipedia*



Figura 21 Niels Bohr 1912-1962 ricevette il Nobel per la fisica nel 1922

Siamo finalmente alla prima svolta importante, nella sequenza di scoperte avete visto nascere i quanti, l'elettrone, i primi tre modelli di atomi, ma il primo più significativo modello lo ha proposto il grande fisico danese **Niels Bohr** nel 1913. Pur accettando il modello planetario di Rutherford, propose che gli elettroni avessero a disposizione orbite fisse, dette anche orbite quantizzate, queste orbite un'energia quantizzata nella quale gli elettroni non emettevano né assorbivano energia sotto forma di radiazione elettromagnetica. Una ulteriore correzione la propose **Arnold Sommerfeld** (1858 – 1961) proponendo l'idea che le orbite fossero ellittiche e il nucleo occupasse uno dei due fuochi dell'ellisse.

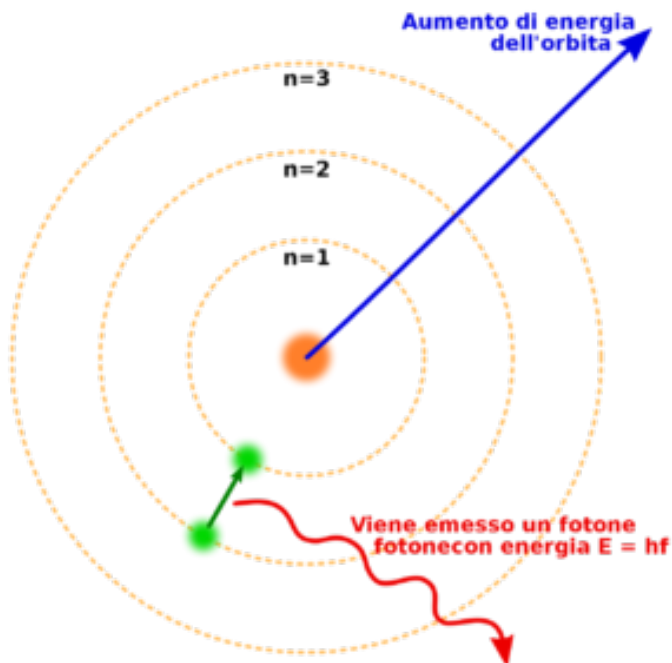


Figura 22 Modello atomico di Niels Bohr con orbite circolari quantizzate

Modello atomico di Neils Bohr con orbite circolari quantizzate

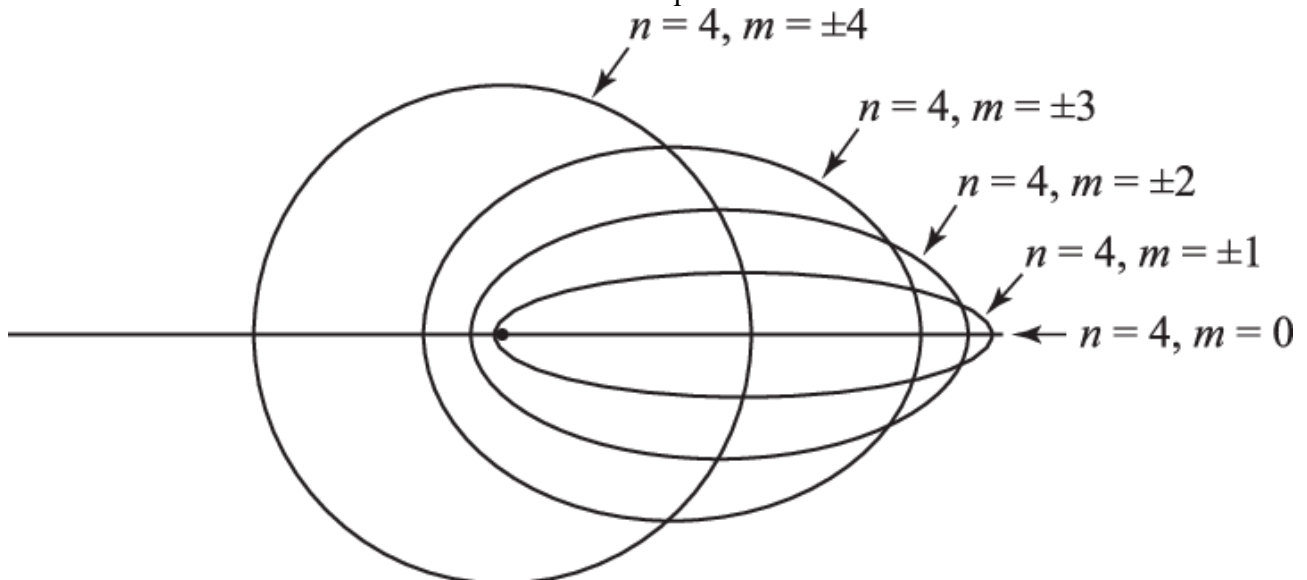


Figura 23 Modello atomico di Sommerfeld con orbite ellittiche e il nucleo che occupa uno dei fuochi

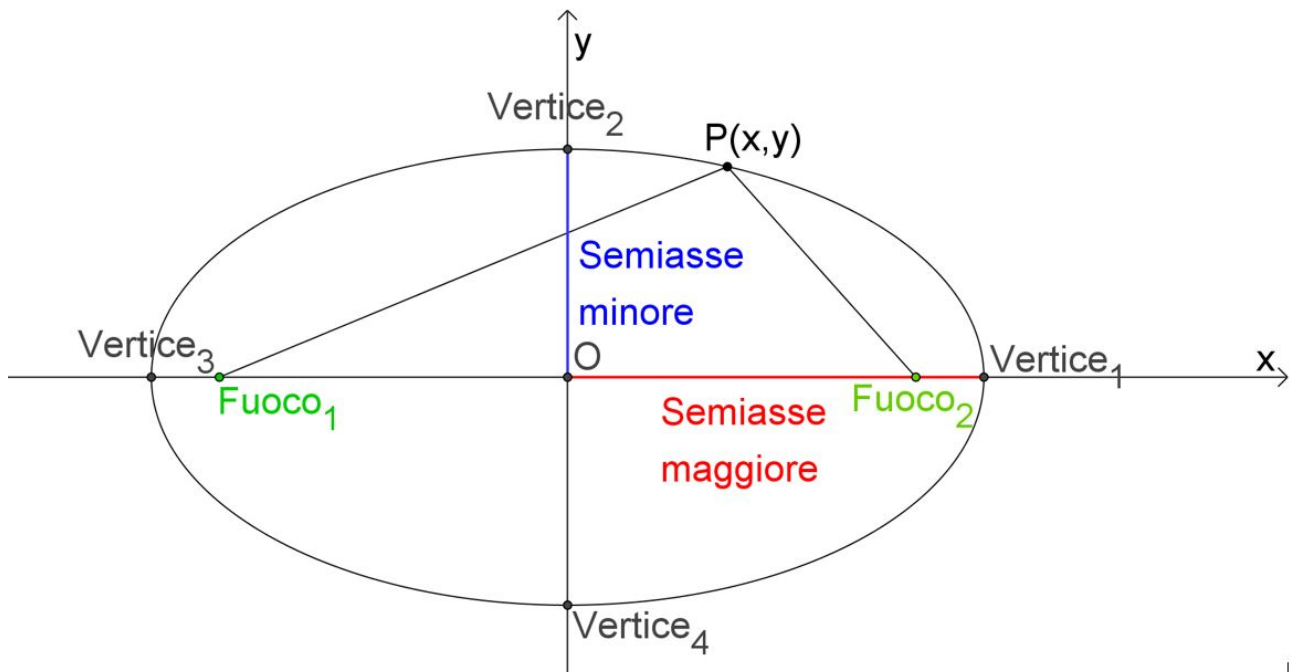


Figura 24 Questa è la rappresentazione analitica di una ellisse

Il 5 aprile del 1913 Bohr pubblica sul “Philosophical Magazine” l’articolo “*On the Constitution of Atoms and Molecules*” che rappresenta la versione definitiva della sua visione dell’atomo quantizzato, con gli elettroni che circolano su orbite predefinite e su posizioni predefinite. Bohr aveva costruito il suo atomo servendosi di un inebriante cocktail di fisica classica e quantistica: l’atomo quantistico fu un trionfo della mente sulla materia!

Nel 1932 ad opera di James Chadwick fu scoperto il neutrone, la sua esistenza fu desunta a partire da contraddizioni studiate prima da Walther Bothe, poi da Irene Joliot-Curie e Frederic Joliot. Dopo tutto questo fermento nel mondo della fisica ci stiamo avvicinando alla definizione attuale della configurazione dell’atomo. Tutti i fisici, fin a questo punto conosciuti, erano propensi se non addirittura certi che la natura della luce, sebbene quantizzata, fosse di natura ondulatoria e non corpuscolare. Ho tratto dal libro di Manjit Kumar “Quantum” il seguente brano:

Einstein ammetteva senza difficoltà che la teoria ondulatoria della luce si era dimostrata eccellente nella spiegazione della diffrazione, dell'interferenza, della riflessione della rifrazione e che non sarebbe stata sostituita da un'altra teoria. Tuttavia questo processo sottolineava Einstein, poggiava sul fatto essenziale che tutti questi fenomeni riguardavano fenomeni ottici e riguardavano il comportamento della luce su un periodo di tempo non trascurabile dove qualunque proprietà corpuscolare non sarebbe apparsa manifesta. La situazione era completamente diversa quando si aveva a che fare con i processi istantanei dell'emissione e assorbimento della luce. Questo era secondo Einstein la ragione per cui la teoria ondulatoria incontrava difficoltà particolarmente gravi a spiegare l'effetto fotoelettrico.

Manjit Kumar "Quantum"

Effetto Compton (Arthur Compton 1892 – 1962)

Arthur Holly Compton era un giovanissimo fisico americano che a soli ventisette anni era stato nominato professore e direttore del Dipartimento di Fisica alla Washington University di St Louis nel Missouri, le sue ricerche sulla diffusione dei raggi X sarebbero state descritte come il punto di svolta nella fisica del XX secolo!

Quando i raggi X urtavano contro il bersaglio, la maggior parte di essi gli passava attraverso senza deviazioni, ma alcuni venivano diffusi a vari angoli. Erano questi raggi X secondari o diffusi che interessavano a Compton. Voleva verificare se c'era qualche variazione nella loro lunghezza d'onda rispetto a quella dei raggi incidenti. Scoprì che le lunghezze d'onda dei raggi X diffusi erano leggermente maggiori di quelle dei raggi X incidenti. Questa variazione di lunghezza e quindi anche di frequenza significava che i raggi X secondari non erano gli stessi che erano stati sparati contro il bersaglio.

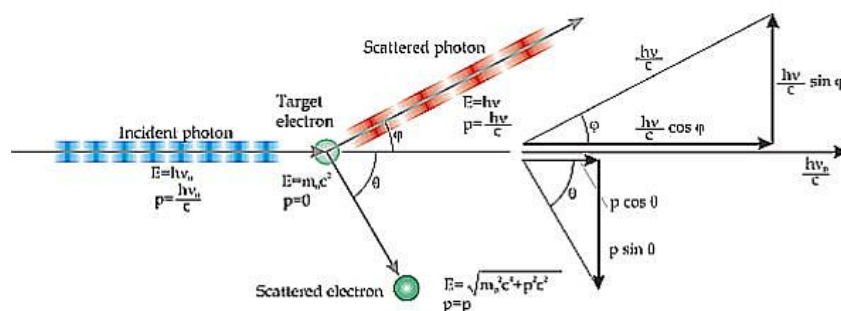


Figura 25 Effetto Compton

Figura 26 Arthur Holly Compton 1892-1962

Abbiamo la conferma dei quanti di luce di Einstein, perché i dati non combaciavano con la supposta teoria ondulatoria!!!! Quasi subito si rese conto che la lunghezza d'onda e l'intensità dei raggi diffusi erano quelle che avrebbero dovuto essere se un quanto di radiazione fosse rimbalzato su un elettrone, proprio come una palla di biliardo rimbalza su un'altra. Se i raggi X erano formati da quanti, un fascio di raggi X doveva essere simile a un insieme di a un insieme di microscopiche palle di biliardo che urtavano il bersaglio. anche se alcune lo avrebbero attraversato senza colpire nulla, altre avrebbero

urtato contro gli elettroni all'interno degli atomi del bersaglio. Durante una simile collisione non quanto di raggi X avrebbe perso energia poiché veniva diffuso mentre l'elettrone subiva un rinculo per effetto dell'impatto. Siccome l'energia di un quanto di raggi X è data $E=h\nu$ dove h è la costante di Planck e ν è la frequenza, qualunque perdita di energia deve produrre una diminuzione della frequenza. Dato poi che la lunghezza d'onda è inversamente proporzionale alla frequenza, la lunghezza d'onda associata a un quanto di raggi X diffuso aumenta.

Il quanto di luce era stato ribattezzato **fotone!**

tratto da "Quantum" di Manjit Kumar

Il dualismo onda-corpuscolo

La luce ha una doppia natura: onda-corpuscolo? Il principe Louis de Broglie, matematico, fisico e storico francese risolse brillantemente e **matematicamente** il quesito proponendo il dualismo:

LA LUCE PUO' ESSERE SIA ONDA, SIA CORPUSCOLO!



Figura 27 Il principe Louis Victor Pierre Raymond de Broglie 1892-1987

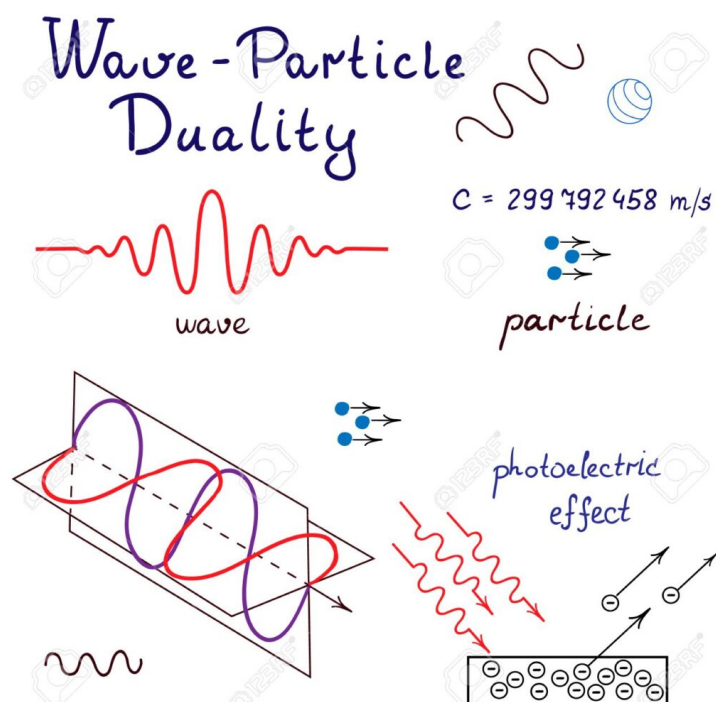


Figura 28 Illustrazione del dualismo onda-particella

Le motivazioni e gli argomenti per spiegare il dualismo sono piuttosto complicati quindi accettiamo solo l'assunto che la luce può comportarsi in un dualismo onda – corpuscolo. De Broglie si pose le seguenti domande e diede la seguente risposta (motivata matematicamente):

1. Se le **onde** luminose possono comportarsi come **particelle**, gli **elettroni** possono comportarsi come **onde**?
2. Ebbene sì! Esiste un dualismo onda – corpuscolo: se si assegna ad un elettrone un'onda associata fittizia di frequenza ν e lunghezza d'onda λ lambda si è in grado di spiegare l'esatta collocazione delle orbite nell'atomo quantistico di Bohr.

La seguente presentazione, recepita in internet, riassume efficacemente il modello atomico rappresentato dalla “Nuvola di elettroni che circondano il nucleo seguendo le leggi quantistiche”.

Electron Cloud Model

✎ About 1926

✎ Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, and Werner Heisenberg



Louis de Broglie



Werner Heisenberg



Erwin Schrödinger

Figura 29 Dia 1

The Big Ideas

✎ de Broglie: Electrons have wavelike properties.

✎ Heisenberg: It is impossible to know both the location of a particle and how a particle is moving. With small particles (like electrons) this means we will never be able to say exactly where an electron is located.

✎ Schrödinger: Developed mathematical equations to predict the most likely location of electrons.

Figura 30 Dia 2

The Electron Cloud Model



- ❧ Electrons exist in certain energy levels as suggested by Bohr but they are not circular orbits.
- ❧ Probability is used to predict where electrons can be found.
- ❧ Electrons are instead found in orbitals.
- ❧ An orbital is a region around nucleus where you are most likely to find an electron.
- ❧ An electron cloud is a visual model of the most likely locations to find an electron around an atom.

Figura 31 Dia 3

Visual Representation

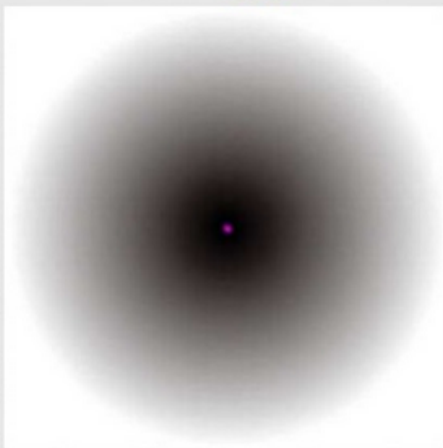


Figura 32 Dia 4 il cloud dell'atomo di idrogeno

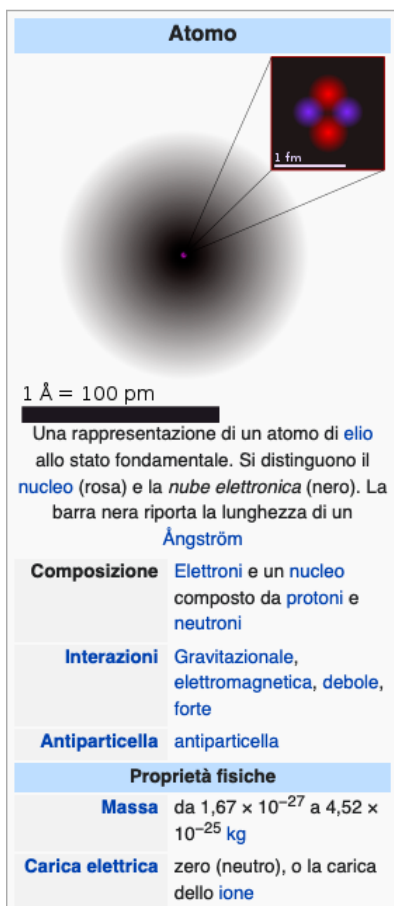


Figura 33 Rappresentazione dell'atomo con foto da wikipedia

Il Principio di Indeterminazione

Altri due grandissimi personaggi ci porteranno verso la fine di questa cavalcata nella Meccanica Quantistica. Cominciamo con Werner Heisenberg, che a soli 27 anni, formulò “**Il Principio di indeterminazione**”.

Il principio di indeterminazione è enunciato nel 1927 dal fisico tedesco Werner Heisenberg.

Esso afferma che la posizione e la velocità di una particella non possono essere misurate simultaneamente con precisione arbitraria.

Le implicazioni di questo principio sono rivoluzionarie. Werner Karl Heisenberg nasce a Würzburg, in Germania, nel 1901. Compiuti gli studi di fisica all'Università di Monaco, approfondisce l'analisi della struttura e del comportamento dell'atomo. Nei primi decenni del Novecento, gli studi sull'atomo sono in fermento.

Heisenberg conosce le concezioni più innovative, e si interessa in particolare alla teoria dei quanti, enunciata nel 1900 dal fisico tedesco Max Planck. Secondo questa teoria, l'energia delle radiazioni non cambia in modo continuo, ma a “salti”. È costituita da quanti, ovvero “pacchetti” di energia che si propagano nello spazio. Heisenberg intuisce la portata innovativa della teoria dei quanti per le ricerche sull'atomo. Per questo, nel 1924, si trasferisce a Copenaghen, dove collabora con il fisico danese Niels Bohr allo sviluppo della fisica quantistica, che in breve tempo scardina le certezze della fisica tradizionale.

Proseguendo la sua indagine sul funzionamento dell'atomo, Heisenberg studia le proprietà delle particelle che lo compongono. Per determinare il movimento di una particella, come di qualunque altro oggetto esistente, la scienza richiede che vengano misurate con esattezza la sua posizione e la sua velocità. Nello sviluppo delle sue teorie, però, Heisenberg nota che, nel caso di oggetti infinitamente piccoli, ciò non è possibile. L'atto stesso dell'osservazione, infatti, altera il comportamento degli oggetti osservati. Per analizzare la posizione di una particella è necessario proiettare su di essa un fascio di luce.

La luce, a sua volta, è composta da particelle chiamate fotoni, che interferiscono con le particelle dell'atomo che si sta analizzando, alterandone l'impulso e dunque la velocità. Heisenberg conclude che, tanto più è grande la precisione con la quale si misura la posizione di una particella, tanto più sarà **indeterminata** la sua velocità. E viceversa. Lo stesso accade per altre coppie di grandezze misurabili, come l'energia e il tempo. Heisenberg giunge così, nel 1927, a formulare il principio di indeterminazione, secondo il quale non è possibile conoscere contemporaneamente tutte le proprietà di un oggetto.

Di conseguenza, l'universo fisico, per come lo conosciamo, è frutto di un insieme di probabilità, che si manifestano nelle nostre osservazioni. Il tipo di conoscenza che ne deriva, dunque, è probabilistico. Questo principio è una colonna portante della fisica moderna. Ma la sua importanza travalica l'ambito della fisica, e investe tutto ciò che concerne i processi di conoscenza. Lo stesso Heisenberg analizza le connessioni tra le sue ricerche e i vari ambiti del sapere nel volume *Fisica e Filosofia*. Tra le implicazioni più rilevanti per l'esperienza quotidiana, vi è l'impossibilità di pervenire a una conoscenza oggettiva, completa e imparziale di un fenomeno se prima, chi osserva non è in grado di sapere come egli stesso interferisce sull'oggetto osservato. (da *OVO chimica*)

Il principio di indeterminazione viene espresso, nella sua forma più nota dalla seguente relazione:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

Fra l'incertezza sulla posizione Δx e quella della quantità di moto Δp_x di una particella, dove $\frac{\hbar}{2}$ è la costante di Planck divisa per 2.

Il principio fu enunciato da Werner Heisenberg nel 1927, all'età di 27 anni, e confermato da innumerevoli esperimenti, rappresenta un concetto cardine della Meccanica Quantistica che ha sancito una radicale rottura rispetto alle leggi della Meccanica Classica.

Werner
Heisenberg
1901 - 1976



Figura 34 Werner Heisenberg e il principio di indeterminazione

Werner non appoggiò mai il regime nazista e non collaborò alla costruzione della bomba atomica nazista!

Un ricordo personale! Novembre 1969, facoltà di Fisica Università di Padova. Ero appena diplomato come perito chimico e iscritto alla facoltà di CHIMICA e nel mese di novembre mi accingevo ad assistere alla mia prima lezione di fisica. Dopo tanti anni ho ancora il ricordo di quella lezione tenuta dal prof. Mezzetti. Il prof. si presenta con una giacca color verde panno di biliardo e già questo ci aveva impressionato, perché ci avevano riferito che i fisici erano un po' strani. Da bravo e coscienzioso studente avevo aperto il mio quaderno di appunti aspettandomi di

scrivere formule e formule. Questo intendevo per la materia Fisica, un insieme di formule che spiegassero matematicamente la natura e la materia, nel solco del buon Galileo e Newton. Il prof. Mezzetti iniziò il suo intervento: parlò per buone due ore su come doveva essere considerato un osservatore posto al di fuori della terra che volesse misurare con precisione il movimento di quest'ultima. Eravamo affascinati! Ci disse che l'osservatore era anche lui coinvolto nel sistema di osservazione e quindi non poteva fornirci misure esatte sulla posizione e sulla velocità della Terra! E' stata una lezione fantastica sul principio di indeterminazione e questo ci ha fatto capire che prima di arrivare alle formule bisogna **P E N S A R E**.....porsi continue domande..... **riflettere!!!!**

In memoria del grande prof. Mezzetti Università degli Studi di Padova

Erwin Schoedinger e la sua equazione



Figura 35 Erwin Schoedringer 1887 - 1961

La diatriba quantistica

Einstein e Planck si dimostrarono entusiasti del lavoro di Schrödinger. Sommerfeld, dopo iniziali titubanze, dichiarò:

«Sebbene la verità della meccanica delle matrici (il principio di indeterminazione è stato calcolato per la prima volta con il calcolo matriciale, sconosciuto a Heisenberg) sia indubitabile, il compito di padroneggiarla è estremamente complesso e terribilmente astratto. Schrödinger è ora venuto in nostro aiuto.»

L'entusiasmo tra gli scienziati per la meccanica ondulatoria di Schrödinger (il termine, in tedesco *Wellenmechanik*, fu usato per la prima volta da Schrödinger il 20 febbraio 1926) risiedeva soprattutto nel fatto che appariva meglio visualizzabile rispetto al “freddo” calcolo delle matrici di Heisenberg. Si crearono tuttavia degli attriti fra la visione “graduale” dei fenomeni atomici di Schrödinger e quella “discontinua” dei salti quantici di Heisenberg. A proposito della differenza tra le due teorie, Heisenberg infastidito commentò: *«Più penso agli aspetti fisici della teoria di Schrödinger, più repellenti li trovo. Quel che Schrödinger scrive della visualizzabilità della sua teoria non è probabilmente del tutto esatto, in altri termini sono cretinate»*.

Dal canto suo Schrödinger affermò: *«Non posso immaginare che un elettrone salti qua e là come una pulce.»* Chi alla fine fece da paciere tra i due fisici fu Niels Bohr, che invitò Schrödinger a Copenaghen per discutere della sua versione della fisica dei quanti.

In meccanica quantistica l'**equazione di Schrödinger** è un'equazione fondamentale che determina l'evoluzione temporale dello stato di un sistema, ad esempio di una particella, di un atomo o di una molecola.

Ψ

Funzione d'onda di Schroedinger

Funzioni d'onda

☞ **Equazione di Schrödinger (1926)** è l'espressione matematica (differenziale) che descrive il moto di un elettrone (moto ondulatorio) nel campo di potenziale in cui esso si muove.

La soluzione dell'equazione è la **funzione d'onda Ψ**

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V) \Psi = 0$$

E: energia totale dell'elettrone

Ψ : funzione d'onda

V: energia potenziale (per l'atomo di idrogeno $V \propto -\frac{e^2}{r}$)

Tale equazione ha soluzioni esatte solo per l'atomo di idrogeno o per atomi con un solo elettrone

Figura 36 funzione d'onda di Schoedringer

Formulata da Erwin Schroedinger nel 1925 e pubblicata nel 1926, è un'equazione differenziale alle derivate parziali, lineare complessa e non relativistica che ha come incognita la funzione d'onda ψ , introdotta basandosi sull'ipotesi di de Broglie dell'*onda di materia*. Secondo l'interpretazione di Copenaghen, il modulo quadro della funzione d'onda è legato alla **probabilità** di trovare una particella in una determinata regione spaziale.

L'ipotesi di de Broglie e il dualismo onda-particella

Nel 1923 Louis de Broglie ipotizzò che così come le onde possono comportarsi come particelle, anche le particelle possono comportarsi come onde

De Broglie propose di applicare alle particelle dotate di massa la stessa relazione tra lunghezza d'onda e quantità di moto utilizzata per i fotoni:

Lunghezza d'onda di de Broglie

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

Nel 1923 Louis de Broglie ipotizzò che così come le onde possono comportarsi come particelle, anche le particelle possono comportarsi come onde. De Broglie propose di applicare alle particelle dotate di massa la stessa relazione tra lunghezza d'onda e quantità di moto utilizzata per i fotoni.

L'equazione di Schrödinger, fondante quella che verrà chiamata dall'autore meccanica ondulatoria, ha avuto un ruolo determinante nella storia della meccanica quantistica, ad esempio permettendo di comprendere perché soltanto alcuni valori discreti di energia sono ammessi per l'elettrone nell'atomo di idrogeno.

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}(\mathbf{r}, t) = \hat{H}\Psi(\mathbf{r}, t)$$

dove:

- i è l'unità immaginaria;
- $\mathbf{r} = (x, y, z)$ è un punto nello spazio tridimensionale;
- $\Psi(\mathbf{r}, t)$ è la **funzione d'onda**, cioè l'**ampiezza di probabilità** per differenti configurazioni del sistema;
- $\hbar$ è la **costante di Planck** ridotta, cioè divisa per 2π ;
- $\hat{H}$ è l'**operatore hamiltoniano**, che ha la proprietà di essere **hermitiano**.

Il valore medio dell'operatore hamiltoniano sullo stato $\psi(x)$ rappresenta il valore di aspettazione dell'**energia**:^[note 1]

$$\langle \hat{H} \rangle_\psi = \int \psi^*(x) \hat{H} \psi(x) dx$$

Poiché gli operatori posizione e impulso sono operatori hermitiani, l'equazione per **sistemi scleronomi** si può scrivere nel limite non relativistico:

$$\left[i\hbar \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 - \hat{U}(\mathbf{r}) \right] \psi(\mathbf{r}, t) = 0$$

dove intervengono gli operatori impulso $-i\hbar \nabla = \hbar \mathbf{k}$ e **energia potenziale** U .

Figura 38 Formula matematica della funzione d'onda, è una versione più sofisticata della figura precedente.

tratto da Wikipedia

Paul A.M. Dirac (Entaglement)

$(\partial + m) \psi = 0$

Paul Adrien Maurice Dirac (Bristol, 8 agosto 1902 – Tallahassee, 20 ottobre 1984).

Paul Dirac è stato un fisico e matematico britannico considerato tra i fondatori della meccanica e della fisica quantistica.

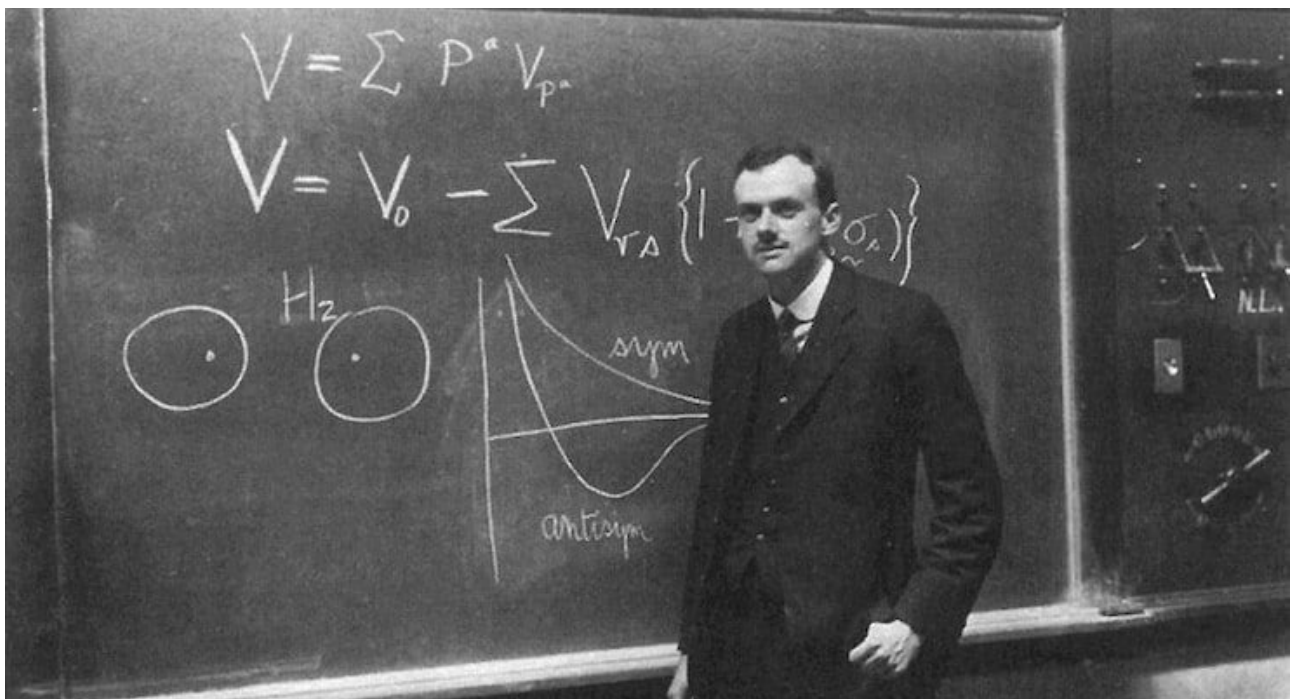


Figura 39 Paul Dirac

Come caratteristica fondamentale, la meccanica quantistica descrive la radiazione e la materia sia come fenomeno ondulatorio che come entità particellare, al contrario della meccanica classica, dove per esempio la luce è descritta solo come un'onda o l'elettrone solo come una particella.

Paul A.M. Dirac, premio Nobel per la Fisica nel 1933, come teorico viene annoverato tra i fondatori della meccanica quantistica ed è famoso per le sue equazioni.

$$\underline{(\partial + m) \psi = 0}$$

È l'equazione forse più famosa di Dirac e significa che: “Se due sistemi interagiscono tra loro per un certo periodo di tempo e poi vengono separati, non possono più essere descritti come due sistemi distinti, ma in qualche modo, diventano un unico sistema. In altri termini, quello che accade a uno di loro continua ad influenzare l'altro, anche se distanti chilometri o anni luce».

È il cosiddetto fenomeno quantistico dell'«**entanglement**», che fornisce la base per la nuova visione filosofica del mondo.

Dirac era un ricercatore solitario e taciturno, al punto che i suoi colleghi, scherzando, avevano coniato una nuova unità di misura, il *Dirac*, che equivaleva ad una parola l'ora, il minimo che una persona potesse pronunciare in compagnia. In ogni caso formulò una equazione che risulta fondamentale. La sua equazione $(\partial + m) \psi = 0$ è ancora considerata la più “bella” della fisica.

tratto da Dott. Donato Saulle

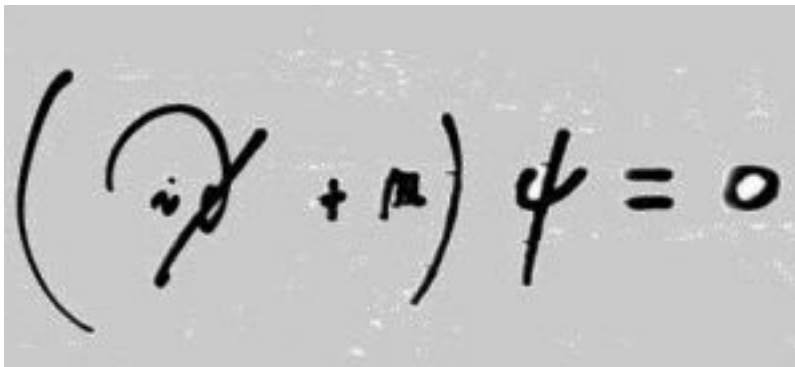
A black and white photograph of the original handwritten Dirac equation. The equation is written in a cursive, handwritten style on a light-colored background. It reads: $(\partial + m) \psi = 0$. The partial derivative symbol ∂ is written with a small 'i' above it, and the Greek letter ψ is written with a small 'i' above it. The entire equation is enclosed in a large, hand-drawn parentheses.

Figura 40 Equazione originale di Dirac



Figura 41 Lapide commemorativa di Paul Dirac, inaugurata il 13 novembre 1995 in una navata dell'Abbazia di Westminster (Londra), vicina al monumento dedicato a Newton.

Un mare di antimateria

L'equazione di Dirac, dalla meccanica quantistica al modello standard

di Graziano Venanzoni

Paul Adrien Maurice Dirac fu senza dubbio uno fra i massimi fisici di tutti i tempi. Dal 1926 al 1928, in tre articoli, gettò le basi della meccanica quantistica, della teoria quantistica dei campi (che poi portò alla formulazione dell'elettrodinamica quantistica, Qed, la prima teoria quantistica dei campi che conciliava la meccanica quantistica e la relatività) e infine – con l'equazione che porta il suo nome – della moderna teoria delle particelle elementari (nota anche come modello standard). La famosa equazione di Dirac per l'elettrone apparve nel 1928. È difficile non provare ammirazione di fronte alla bellezza di una tale equazione. Conciliando la meccanica quantistica e la relatività di Einstein, introduceva un nuovo formalismo a quattro componenti (detti spinori) che andava al di là del concetto di tensore. Permettendo di descrivere il moto dell'elettrone libero, ma anche di entità composite libere come protoni e neutroni, prevedeva un moto di “rotazione” intrinseco dell'elettrone, il cosiddetto spin, con valori quantizzati seminteri (oggi diciamo che l'elicità dell'elettrone, ossia la componente dello spin lungo la direzione di moto, può prendere solo due valori, $+1/2$ o $-1/2$), associato a un momento magnetico, che permetteva di spiegare alcuni aspetti “misteriosi” degli spettri atomici, di cui parleremo tra poco. Ma poneva anche un problema nuovo: quello delle energie negative. Infatti, se si risolve l'equazione di Dirac per un singolo elettrone, si ottengono due soluzioni, una positiva e una negativa, allo stesso modo per cui la radice quadrata di 49 è $+7$ e -7 . La soluzione negativa era preoccupante: l'energia negativa, che era in sé un'idea imbarazzante, implicava, per la famosa equazione della relatività speciale di Einstein $E = mc^2$ (vd. [Creare materia](#), ndr), una massa negativa: una cosa chiaramente assurda! All'epoca, ovviamente nessuno aveva mai visto questi oggetti con energia negativa. Si racconta che un teorico li chiamò “elettroni asini”: “se li tiri in avanti, si muovono all'indietro”! Capita spesso nell'ambito della ricerca scientifica che la soluzione di un problema ne faccia emergere uno nuovo, completamente

inaspettato, la cui soluzione rappresenta un progresso significativo della conoscenza. Capì così anche a Dirac, che lottò con le energie negative per l'intero 1929, finché non giunse alla conclusione che esse non potevano essere evitate. La spiegazione che diede era che gli stati a energia negativa non si vedono, perché occupano lo stato di minima energia possibile che è lo stato di vuoto. Gli elettroni a energia positiva non possono cadere in questo mare senza fondo, perché non vi è spazio per loro. Però può succedere, così come ogni tanto un pesce salta fuori dall'acqua, che un elettrone presente in questo mare, investito da un fascio di luce, possa saltar fuori, acquistando un'energia positiva e lasciando una buca nella posizione originaria. Questa buca apparirebbe come una sorta di elettrone "opposto": stessa massa, ma con carica positiva (corrispondente a un'assenza di carica negativa) ed energia positiva. Fu così che l'equazione di Dirac prediceva un nuovo tipo di materia: l'antimateria, del tutto simile alla materia ma con carica opposta (occorre dire, però, che per un bel po' di tempo Dirac fu riluttante ad accettare la predizione dell'esistenza di un antielettrone, a tal punto da identificarlo con il protone). Qualche anno più tardi l'antielettrone (chiamato positrone) fu scoperto da Carl D. Anderson nei raggi cosmici, scoperta che gli valse il premio Nobel per la fisica del 1936. Fu un vero trionfo per l'equazione di Dirac. "L'equazione – egli disse in seguito – era stata più intelligente di me". Ma il trionfo sperimentale ancora maggiore fu la produzione di antiprotoni da parte di Emilio Segrè e Owen Chamberlain nel 1956, la produzione di antideutoni da parte di Antonino Zichichi e altri nel 1965, per arrivare alla produzione dell'antidrogeno al Cern alla fine del secolo scorso. Oggigiorno i positroni vengono prodotti e utilizzati quotidianamente sia in ambito scientifico che medicale (basti pensare alla Pet – Positron Emission Tomography). L'equazione di Dirac aveva inoltre un'altra conseguenza ancora più sorprendente, destinata a cambiare radicalmente il modo di concepire la materia: le particelle elementari non erano enti immutabili (come secondo la filosofia di Democrito), ma potevano trasformarsi tra loro, così come un fotone (quanto di luce) che interagisse con la materia poteva trasformarsi in una coppia elettrone-positrone.



Figura 42 Pet

La Pet (Positron Emission Tomography, tomografia a emissione di positroni) è una delle tecniche diagnostiche utilizzate oggi per la diagnostica avanzata di neoplasie. Nella foto una Discovery 690 dell'unità di Medicina Nucleare dell'Ospedale Cannizzaro di Catania, utilizzata anche dai fisici medici dei Laboratori Infn del Sud per la loro formazione.

Inoltre, le loro caratteristiche (come per esempio la carica e la massa) erano determinate dalla presenza del vuoto quantistico con il quale esse interagivano. Un'altra predizione dell'equazione di

Dirac era il valore pari a due per il fattore giromagnetico g dell'elettrone (o di qualsiasi altra particella elementare di spin pari a $1/2$). Si tratta del rapporto (opportunamente "normalizzato") tra il momento magnetico e quello angolare di spin. Classicamente, un corpo carico rotante intorno a un asse di simmetria produce un momento (di dipolo) magnetico (si pensi a una spira percorsa da corrente) e un momento angolare. Si può dimostrare che in questo caso $g = 1$, uguaglianza che rimane valida anche nella meccanica quantistica. Nel 1925 Samuel Goudsmit e George Eugene Uhlenbeck mostrarono come l'introduzione di un campo magnetico associato allo spin dell'elettrone poteva spiegare gli spettri atomici osservati nel litio e nel sodio, se si assumeva per g il valore empirico $g = 2$. Questo valore ebbe la sua naturale giustificazione solo nel 1928, come predizione dell'equazione di Dirac. Dovettero passare circa altri vent'anni prima che misure sperimentali, condotte da John Nafe, Edward Nelson e Isidor Rabi sulla struttura iperfine dell'idrogeno e del deuterio e da Polykarp Kusch e Henry Foley su atomi di gallio, mostrassero nel 1947 che g invece differiva da 2 per circa lo 0,1 %, ossia che esisteva un contributo "extra" (anomalo) al momento magnetico dell'elettrone, espresso dall'anomalia del momento magnetico (indicata con a) nella semplice formula $a = (g-2)/2$.

Ma cosa provocava questo contributo anomalo al momento magnetico dell'elettrone?

Non potevano che essere le correzioni radiative, il ribollire del vuoto, quel vuoto quantistico pieno di particelle virtuali (le particelle fantasma, presenti ma invisibili, che sono un carattere centrale della teoria quantistica dei campi), a permettere all'elettrone di emettere e assorbire un fotone virtuale. Detto in altre parole, i demoni di Dirac che si agitavano nello stato di vuoto avevano degli effetti tangibili e misurabili! Non fu Dirac, o la prima generazione di fisici che fondarono la meccanica quantistica a calcolare gli effetti delle fluttuazioni del vuoto quantistico, ma una nuova generazione di fisici tra cui Julian Schwinger, enfant prodige della fisica teorica del dopoguerra, che all'età di quattordici anni ebbe modo di assistere a una conferenza di Dirac sulla teoria delle buche. Nel 1948 egli calcolò il contributo anomalo al momento magnetico dell'elettrone trovando un ottimo accordo con il valore sperimentale di Kusch e Foley. Per la misura del momento magnetico anomalo dell'elettrone Kusch ricevette il premio Nobel nel 1955 e Schwinger, assieme a Richard Feynman e Sin- Itiro Tomonaga, nel 1965 per lo sviluppo dell'elettrodinamica quantistica.

La storia delle misure del momento magnetico dell'elettrone e poi, successivamente, del muone è uno dei capitoli più belli della fisica sperimentale. Esperimenti di precisione sempre maggiore hanno messo in evidenza come all'anomalia dell'elettrone e del muone (che data la massa 200 volte quella dell'elettrone, ha una sensibilità maggiore alle fluttuazioni del vuoto quantistico e ai possibili contributi di nuova fisica) contribuiscano non solo le coppie di elettroni e positroni, ma anche i quark e i portatori delle interazioni forti e anche i bosoni W^+ , W^- , Z , messaggeri delle interazioni deboli. Anche il bosone di Higgs dà il suo contributo all'anomalia del muone.

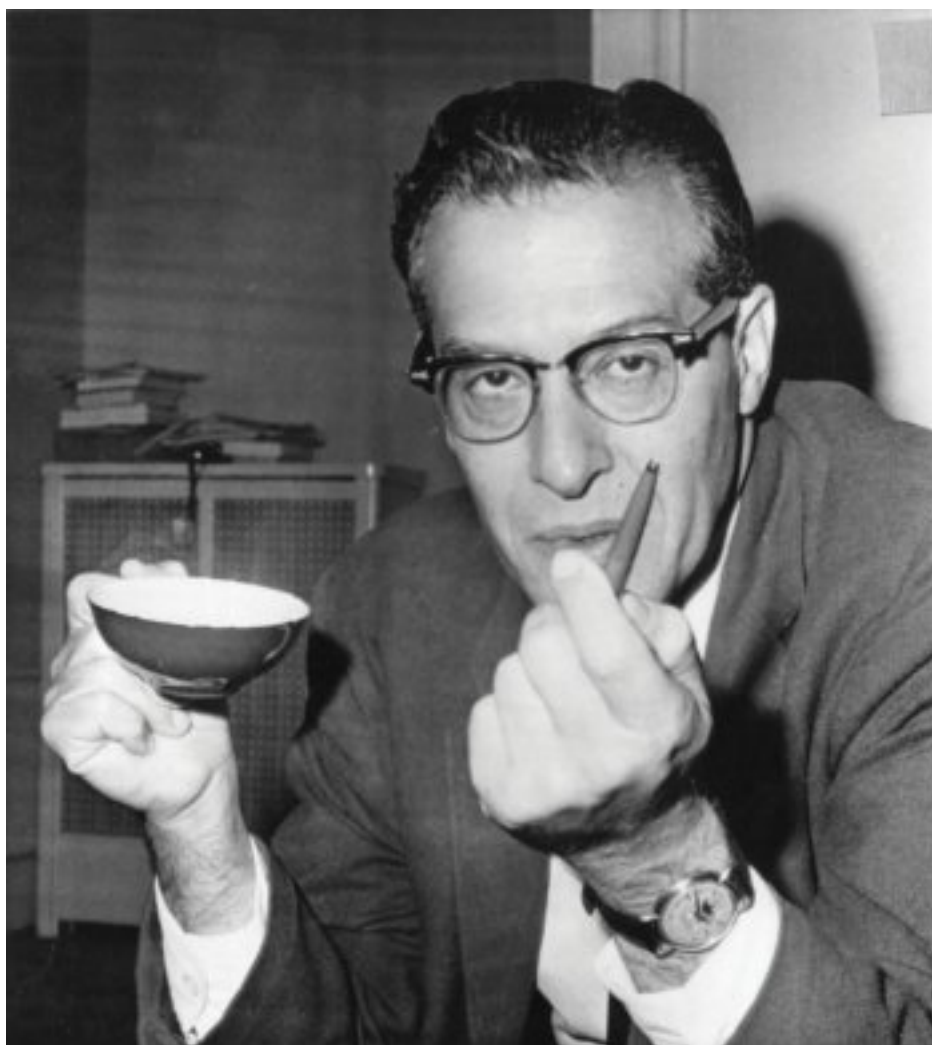


Figura 43 Julian Schwinger

Di Julian Schwinger, fisico teorico, si diceva che il suo laboratorio fosse nella penna. All'inizio degli anni 2000, misurando il momento magnetico anomalo del muone a una precisione di 540 parti per miliardo (che equivale a conoscere il fattore giromagnetico g , paragonato al diametro della Terra, con un'incertezza pari alle dimensioni di una formica), i fisici del Brookhaven National Laboratory di Upton, nello Stato di New York, hanno trovato che il valore misurato si discosta da quello teorico di tre deviazioni standard (e la probabilità che questo accada a causa di una fluttuazione statistica è dello 0,3%). Questa discrepanza, per quanto non conclusiva, potrebbe essere spiegata dal contributo all'anomalia del muone di particelle tuttora ignote, come le particelle supersimmetriche (che si cercano ora in Lhc) o dei nuovi fotoni (particelle di spin pari a 1) con una massa diversa da zero (che potrebbero spiegare la materia oscura). Per poter capire se si tratta di una crepa nel modello standard o di una fluttuazione statistica o di un eventuale effetto strumentale, è in fase di costruzione al Fermilab di Chicago (Usa) un nuovo esperimento (Muon $g-2$) che misurerà l'anomalia del muone con una precisione di 140 parti per miliardo. Anche grazie al risultato di questo esperimento, a cui partecipa per l'Italia anche l'Infn, tra qualche anno sapremo se il modello standard debba essere abbandonato a favore di una teoria più completa.

Biografia

Graziano Venanzoni è ricercatore presso i Laboratori Nazionali di Frascati. Da sempre interessato alla fisica di precisione, è responsabile nazionale del nuovo esperimento Muon $g-2$ per la misura ad altissima precisione del momento magnetico anomalo del muone presso il laboratorio americano Fermilab.

Lo SPIN dell'elettrone

Gli elettroni hanno la capacità di ruotare sui se stessi, in senso orario o in senso antiorario!

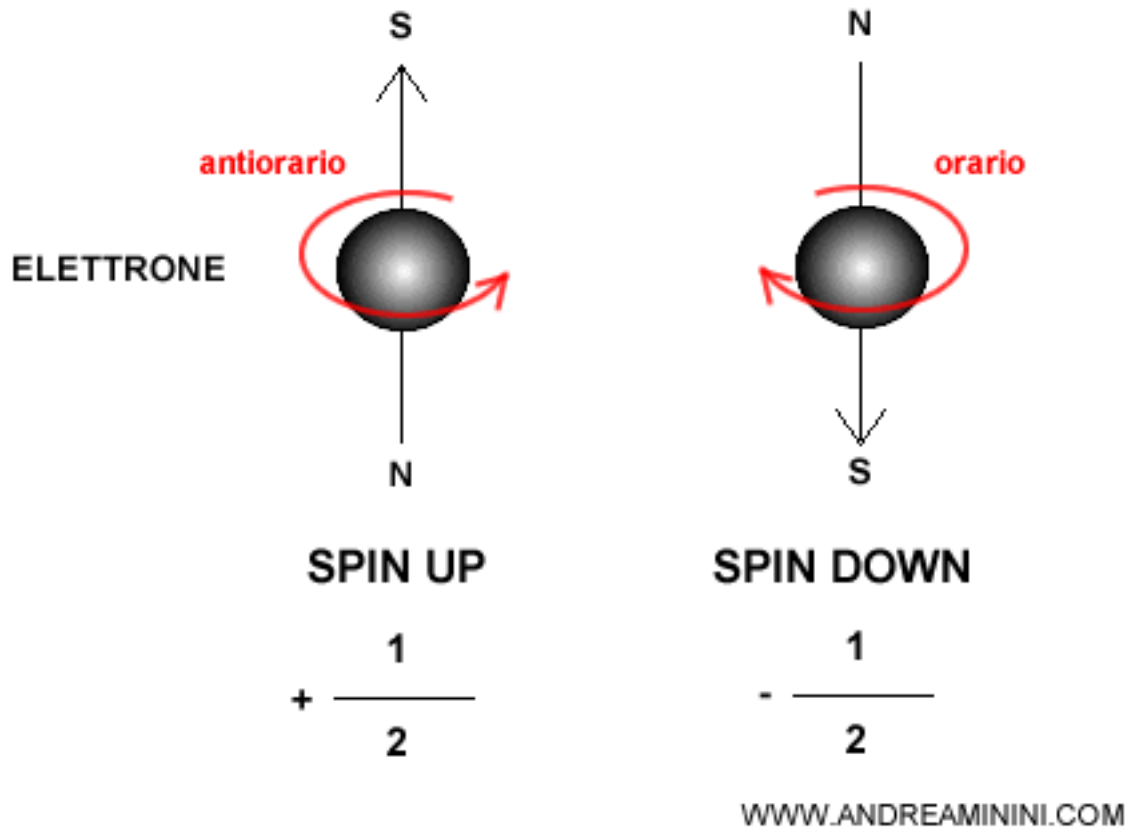


Figura 44 Lo spin dell'elettrone

Questa proprietà quantistica fu postulata da Wolfgang Pauli, ma la scoperta fu di due giovani ricercatori!

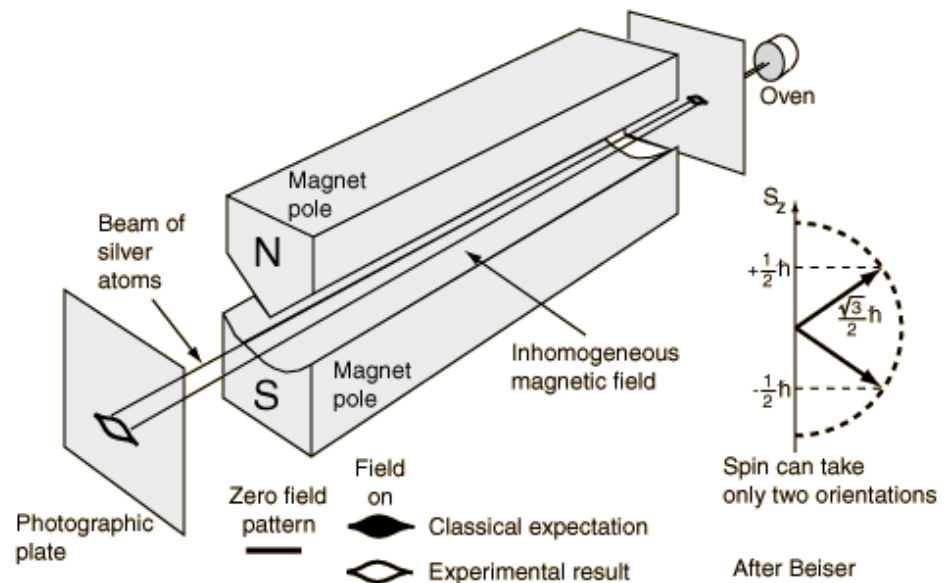
La scoperta dello spin

Per arrivare alla vera scoperta dello spin dell'elettrone bisogna però attendere il 1925 con l'esperimento di due fisici olandesi (G.E.Uhlenbeck e S.A.Goudsmit) che dimostrarono che lo spettro atomico può essere spiegato solo assumendo che gli elettroni abbiano spin.

Lo spin degli elettroni ($s=1/2$) è stato misurato nel famoso esperimento di Stern-Gerlach, ma la vera scoperta dello spin è stata fatta da due giovani fisici: G.E. Uhlenbeck e S.A. Goudsmit. È curioso ricordare che, inizialmente, Pauli non era convinto che quello che i giovani fisici chiamavano spin era la stessa quantità che lui aveva postulato. Se un elettrone ha un momento magnetico intrinseco (spin), allora anche un atomo neutro, con un certo numero di elettroni nei suoi orbitali, può essere sensibile a un campo magnetico esterno. Nel 1921, Otto Stern e Walther Gerlach pensarono di effettuare tale misura: presero un fascio di atomi di argento elettricamente neutri e lo fecero passare attraverso un campo magnetico non uniforme. Tale campo defletteva gli atomi di argento allo stesso modo di un piccolo magnete dipolo. Il risultato dell'esperimento fu assolutamente inaspettato. Secondo la fisica classica, gli atomi avrebbero dovuto essere deflessi in modo uniforme (una grande macchia circolare sulla lastra fotografica dove terminavano il loro percorso) dato che lo spin degli

elettroni negli atomi di argento poteva essere orientato in qualsiasi direzione. Il risultato dell'esperimento mostrava invece solo un contorno circolare e nulla al centro.

Schema



Schema dell'esperimento Stern-Gerlach (estratto da <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/spin.html>).

Figura 45 La scoperta dello spin

L'unica possibile spiegazione per tale comportamento era che i momenti magnetici (gli spin) potevano avere solo due possibili orientazioni nello spazio. Questo è quello che in fisica si chiama "quantizzazione", e infatti in fisica quantistica solo determinati valori dello spin sono possibili. *Delia Hasch – Fisico*

Paradosso di Schrödinger, il gatto nella scatola è vivo o morto? La risposta vi spiazzerà (Sovrapposizione di due stati)

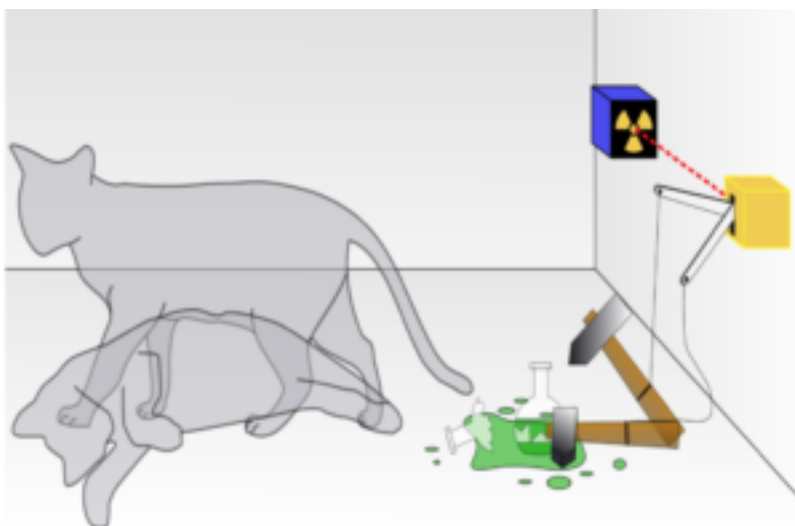


Figura 46 Il gatto di Schoedringer

Dominella Trunfio 14 Dicembre 2020

Un gatto è chiuso in una scatola contenente un gas velenoso e radioattivo a rilascio: riuscirà a sopravvivere o morirà? State tranquilli, nessun esperimento macabro, ma solo mentale. Parliamo del famoso paradosso del gatto di Schrödinger, ideato nel 1935 proprio da Erwin Schrödinger, con lo scopo di illustrare come la meccanica quantistica riesca a fornire risultati paradossali se applicata ad un sistema fisico macroscopico.

Vediamo cosa dice lo scienziato austriaco, premio Nobel per la fisica nel 1933. In pratica, per illustrare la meccanica quantistica invita a fare un esperimento mentale curioso che ha come protagonista un gatto e una scatola. Lo spieghiamo in maniera molto semplice, anche se poi il paradosso di Schrödinger è stato formulato per mettere in evidenza la debolezza della cosiddetta interpretazione di Copenhagen della teoria quantistica.

C'è un gatto dentro una scatola in cui a sua volta c'è un meccanismo che se premuto può emettere gas velenoso. Ovviamente il gatto può interferire con il meccanismo o può non farlo: ci sono appunto 50 e 50 di possibilità.

Secondo lo scienziato, prima di aprire la scatola è impossibile sapere se il gatto è vivo o morto, ovvero se abbia o meno interferito con il meccanismo, quindi automaticamente si trova in uno stato simbolico, indeterminato, in cui è sia vivo che morto.

Solo aprendo la scatola e quindi dando un senso alla **sovrapposizione** degli stati, si può risolvere la situazione. Chiaramente in un modo o nell'altro perché la vita del gatto, paradossalmente appunto, è nelle nostre mani. Proprio questo è l'assunto alla base del paradosso di Schrödinger, ma per capirlo dobbiamo lasciare il gatto e andare nel mondo delle particelle di cui sono fatti gli atomi, cioè elettroni e protoni, che si possono trovare nello stesso istante in stati diversi.

Quindi se il gatto venisse paragonato a degli atomi allora si che potrebbe contemporaneamente essere vivo o morto. L'apparente paradosso nasce dal fatto che in meccanica quantistica non è possibile descrivere classicamente gli oggetti, e si ricorre ad una rappresentazione probabilistica: per mostrare il fatto che una particella può collocarsi in diverse posizioni, ad esempio, la si descrive come se essa fosse contemporaneamente in tutte le posizioni che può assumere.

Ad ogni posizione possibile corrisponde la probabilità che osservando la particella essa si trovi proprio in quella posizione. L'operazione di osservazione, tuttavia, modifica irrimediabilmente il sistema poiché una volta osservata in una posizione la particella assume definitivamente quella posizione (cioè ha probabilità 1 di trovarsi lì) e quindi non si trova più in una "sovrapposizione di stati".

Il paradosso è stato citato in questi giorni anche da **Elon Musk**:

In pratica l'esperimento realizzerebbe uno dei principi base della fisica quantistica: se non si effettua alcuna misurazione, possono esistere più realtà contemporanee. In altre parole "finché non vedo tutto esiste". In termini tecnici si dice che esiste la '**sovrapposizione**' ovvero la coesistenza di più stati.

$$|A\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\text{decaduto}\rangle + |\text{non decaduto}\rangle).$$

Ma poiché il decadimento determina la sorte del gatto, questo dovrebbe essere considerato contemporaneamente vivo e morto:

$$|G\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\text{morto}\rangle + |\text{vivo}\rangle)$$

Il paradosso di Einstein-Podolsky-Rosen (paradosso EPR) è un esperimento mentale che dimostrò la previsione dell'Entanglement quantistico. Albert Einstein, Boris Podolski, e Nathan Rosen dimostrarono che dall'interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica deriva teoricamente il fenomeno dell'entanglement, considerato paradossale perché ritenuto incompatibile con la relatività ristretta (che considera la velocità della luce la massima alla quale può viaggiare qualunque tipo d'informazione) e, più in generale, con il principio di località. Da ciò scaturì la loro convinzione che la teoria quantistica fosse incompleta, ovvero comprendesse variabili nascoste.

La meccanica quantistica per immagini

Oh la meccanica quantistica! Più la si studia e più si è affascinati dai principi e dalle possibilità sul nostro futuro. Anche Einstein, dopo aver partecipato attivamente alla affermazione della meccanica quantistica, è sempre stato perplesso sui principi enunciati fino a dire, prima di morire, che per lui questo ramo della fisica era ancora incompleto! Benvenuti ai nuovi fisici che vorranno portare avanti il super lavoro fatto da questi scienziati del primo novecento! Iniziamo con la consacrazione della meccanica quantistica che è avvenuta a Bruxelles al congresso “**Elettroni e Fotoni**” tenutosi il 24-29 ott 1927.

«I Congressi Solvay sono un esempio di come conferenze ben pianificate e ben organizzate possano contribuire al progresso della Scienza»

([Werner Heisenberg](#))

I **Congressi Solvay** (chiamati anche *Conferenze Solvay*), fondati dall'industriale belga Ernest Solvay (produceva il bicarbonato di sodio...), sono una serie di conferenze scientifiche dedicate ad importanti problemi aperti, riguardanti fisica e chimica, che si tengono a Bruxelles ogni tre anni, a partire dal 1911, agli *International Solvay Institutes for Physics and Chemistry*. L'ideatore di questi incontri a Bruxelles fu Ernest Solvay, il ricco industriale che ha avuto l'intuizione di riunire le più grandi menti scientifiche. Aveva tanti soldi e voleva fare qualcosa di utile per l'umanità. Aveva anche un grande amico, Alfred Nobel svedese, molto ricco anche lui. I due discutevano spesso insieme per capire come realizzare qualcosa di nuovo che favorisse lo sviluppo e il progresso. Decisero allora di procedere nel modo seguente: uno realizzò i famosi premi, che sarebbero diventati i più ambiti in tutti i campi della scienza, tranne la matematica, e non solo; l'altro, invece, organizzò gli incontri dei fisici più importanti, di cui in pochi conoscevano le storie. Solvay finanziava viaggi, alloggi, spese e tutto quello che poteva servire, a cadenza costante, ogni tre anni, dal 1911 in poi. I congressi furono interrotti solo dalle guerre e proseguono ancora oggi, sempre a Bruxelles, sempre in autunno e sempre ogni tre anni. Così facendo, uno dei due amici ha fatto in modo di facilitare la nascita delle idee, delle scoperte che avrebbero cambiato la storia e l'altro, successivamente, faceva in modo di premiare le idee più geniali. I congressi erano nati per fare il punto della situazione sull'attualità più scottante. Solvay morì nel 1922, facendo in tempo a vedere solo tre congressi. (tratto da Wikipedia)

Il quinto Congresso Solvay (Bruxelles, 24-29 ott 1927)
"Elettroni e Fotoni"

I partecipanti invitati erano 29, di questi 12 erano premi Nobel!



Prima fila (da sx a dx): Irving Langmuir, **Max Planck**, **Marie Curie**, **Hendrik Lorentz**, **Albert Einstein**, Paul Langevin, Charles-Eugene Guye, Charles T.R. Wilson, **Owen Richardson**.
Seconda fila: Pietre Debye, Martin Knudsen, **William L. Bragg**, Hendrik Kramers, **Paul Dirac**, **Arthur H. Compton**, **Louis De Broglie**, **Max Born**, **Niels Bohr**.
Ultima fila: Auguste Piccard, Emile Henriot, Paul Ehrenfest, Eduard Herzen, Theophile de Donder, **Erwin Schrodinger**, Jules-Emile Verschaffelt, **Wolfgang Pauli**, **Werner Heisenberg**, Ralf Fowler, Leon Brillouin.

Figura 47 Il quinto congresso Solvay

La luce è sempre stata “il fil rouge” della scienza, capirne le proprietà e la sua natura è sempre stato un dilemma! La sua natura corpuscolare e ondulatoria hanno sempre accompagnato tutti gli studi fatti: di seguito due schemi riassuntivi. In tutto questo si accompagnano due fenomeni molto importanti: l’effetto fotoelettrico e la teoria della relatività generale. Il fenomeno fotoelettrico, per il quale Einstein prese il Nobel, è la prova inconfutabile della natura corpuscolare della luce, mentre la teoria della relatività generale è uno dei capisaldi della scienza moderna! Con questa teoria siamo stati traghettati dall’era tolemaica e poi newtoniana all’era di Einstein, all’era della meccanica quantistica che ci ha aperto le porte del futuro!!! Ma era corretta la teoria della relatività e come si poteva dimostrare? Einstein propose all’Accademia della fisica prussiana a Berlino di finanziarlo per una spedizione in Crimea per osservare un’eclissi totale del Sole da parte della Luna e osservare il comportamento della luce proveniente da alcune stelle che stavano proprio dietro il Sole. L’Accademia fomentata dal fisico tedesco Philipp Lenard (1862-1947 Nobel 1905 e consigliere scientifico di Hitler), avversario della cosiddetta “fisica giudaica” non approvò la richiesta! La storia si fa più avvincente con l’entrata in scena dell’astronomo Eddington.

Tratto da WIRED Sandro Iannacone 2014

Correva l’anno **1916**. E ancora nessuno si sognava di mettere in discussione la legge della gravitazione universale formulata tre secoli prima da Isaac Newton, che sembrava in grado di fornire spiegazioni e previsioni accurate per osservazioni ed esperimenti. Eccetto un oscuro impiegato dell’ufficio brevetti di Berna con il *pallino* della fisica si chiamava: **Albert Einstein**. Qualche tempo prima, Einstein aveva concepito una *sua* teoria della **gravitazione**, secondo la quale **spazio e tempo** erano in un certo senso *uniti* a formare un *continuum* a quattro dimensioni chiamato, per l’appunto, **spazio-tempo**. Secondo Einstein, i **campi gravitazionali** degli oggetti con massa avrebbero causato una sorta di *deformazioni* nello spazio-tempo.

Di conseguenza, ipotizzava **Einstein**, la **luce** non avrebbe potuto propagarsi lungo una linea esattamente **retta**. Al contrario, viaggiando attraverso lo spazio-tempo, si sarebbe dovuta **curvare** a causa delle deformazioni provocate dai campi gravitazionali dei corpi. Non di molto, in realtà: secondo le previsioni della teoria, un raggio di luce che fosse passato vicino al Sole si sarebbe *piegato* di appena **1,75 arcosecondi**, pari all'angolo formato da un triangolo rettangolo alto **un centimetro e mezzo** e lungo **tre chilometri**. C'è da dire, comunque, che anche la fisica newtoniana prevedeva una curvatura per la luce, di entità dimezzata rispetto a quella predetta dalla relatività einsteiniana.

La differenza sembrava troppo *esigua* per poter essere misurata con gli strumenti allora a disposizione. Finché sir **Frank Watson Dyson**, astronomo reale della Gran Bretagna, s'inventò un modo per risolvere il problema. Avrebbe *approfittato* dell'eclissi solare totale prevista per il **29 maggio 1919**. La nostra stella, in quel momento, si sarebbe trovata *dietro* la Luna ma *davanti* all'ammasso stellare **Hyades** (davanti e *dietro* rispetto alla Terra, naturalmente). Dyson, dunque, intuì che la luce delle stelle sarebbe passata attraverso il campo gravitazionale del Sole prima di arrivare sulla Terra e sarebbe stata ben visibile a causa del **buio** provocato dall'eclissi. Il che avrebbe consentito una misura accurata delle posizioni stellari, che – se la teoria di **Einstein** era giusta – sarebbero dovute apparire *spostate* a causa della gravità. L'esperimento fu condotto da **Arthur Eddington**. L'astronomo iniziò col misurare, all'inizio dell'anno, le posizioni *vere* delle stelle. Quindi si diresse verso l'isola di **Principe**, nel **golfo di Guinea**, da cui l'eclissi sarebbe stata visibile, per rivelare la luce stellare *deformata* dal campo gravitazionale del Sole. Per maggiore sicurezza, se il cielo sopra Principe fosse stato nuvoloso, Eddington inviò una seconda équipe di astronomi anche in **Brasile**. Entrambe le spedizioni furono **fortunate**. Il tempo fu sereno e gli scienziati ebbero a disposizione il doppio dei dati. Tornato in Inghilterra, **Eddington** scoprì che le previsioni di **Einstein** erano corrette e annunciò la scoperta il 19 novembre 1919. Il fisico di Ulm divenne immediatamente una celebrità mondiale. La sua teoria ancora *resiste*. E qualche tempo fa *ha superato anche la prova più dura*, dimostrando di essere valida anche in un ambiente estremo come una **stella di neutroni**. Da notare che anche Dyson, appartenente alla chiesa Battista, ebbe il suo bel da fare contro l'opposizione della Royal Astronomical Society, ma alla fine vinse il pragmatismo inglese.

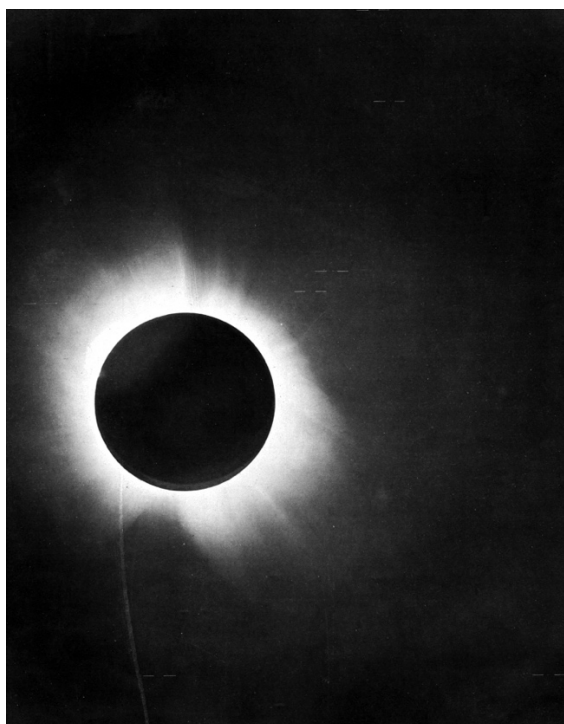


Figura 48 Foto dell'eclisse che prova la teoria della relatività

One of Eddington's photographs of the total solar eclipse of 29 May 1919, presented in his 1920 paper announcing its success, confirming Einstein's theory that light "bends"

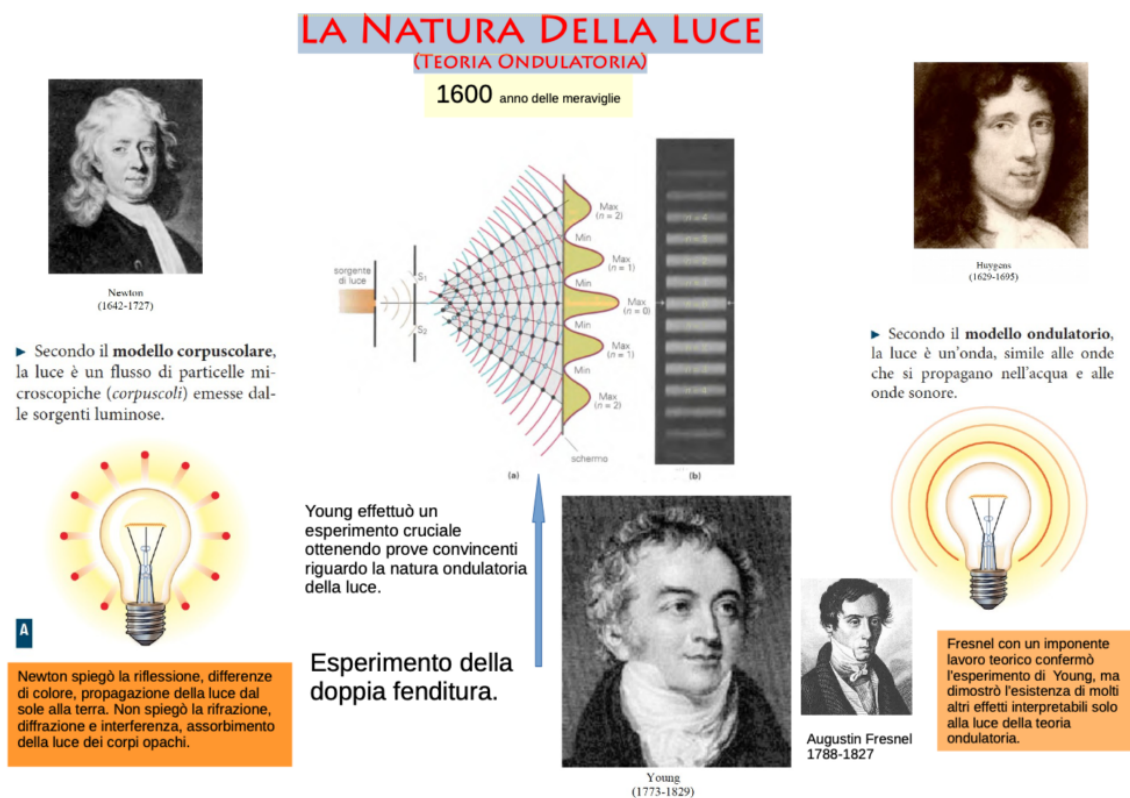


Figura 49 Teoria della luce ONDULATORIA

TEORIA CORPUSCOLARE

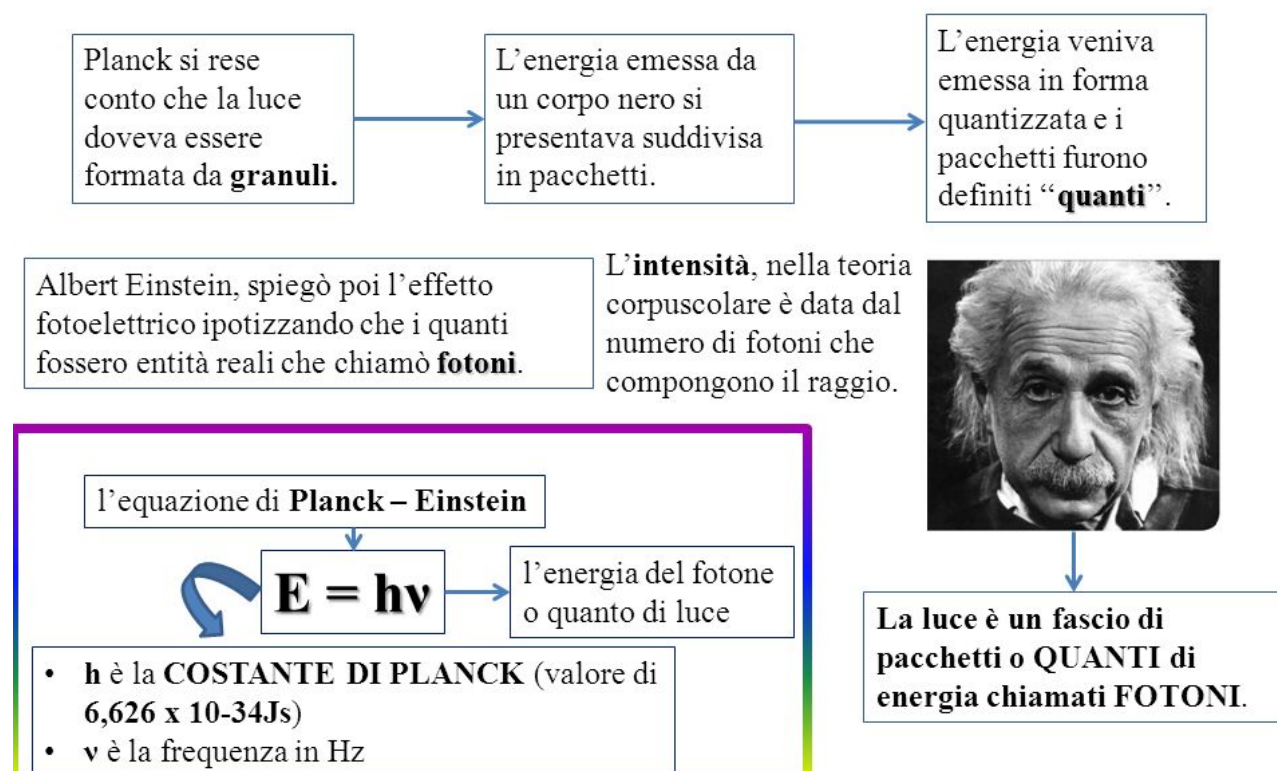


Figura 50 Teoria della luce CORPUSCOLARE

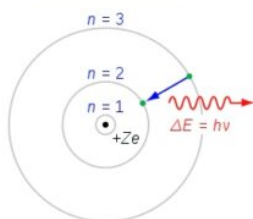
L'energia veniva emessa in forma quantizzata e i pacchetti furono definiti “quanti”. Planck si rese conto che la luce doveva essere formata da granuli. L'energia emessa da un corpo nero si presentava suddivisa in pacchetti. L'intensità, nella teoria corpuscolare è data dal numero di fotoni che compongono il raggio. Albert Einstein, spiegò poi l'effetto fotoelettrico ipotizzando che i quanti fossero entità reali che chiamò fotoni. l'equazione di Planck – Einstein. $E = h\nu$. l'energia del fotone o quanto di luce. La luce è un fascio di pacchetti o QUANTI di energia chiamati FOTONI. h è la COSTANTE DI PLANCK (valore di $6,626 \times 10^{-34} \text{Js}$) ν è la frequenza in Hz.



Figura 51 Entanglement

Compendio di meccanica quantistica I

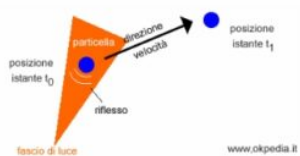
I quanti



La matematica è alla base per la comprensione dei fenomeni fisici, sia classici, sia quantistici. L'è dura!

Il principio di indeterminazione

Orbite degli elettroni quantizzate (salti discreti)! L'elettrone quando ritorna alla sua orbita rilascia una radiazione di energia $h \cdot \nu$ dove h è la costante di Planck e ν la lunghezza d'onda.



Il principio di indeterminazione

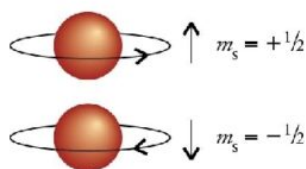


Più precisamente la posizione di un elettrone è determinata, meno precisamente è noto il momento, e viceversa -- Heisenberg, articolo sull'indeterminazione, 1927

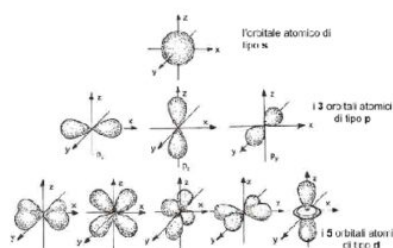
Heisenberg in 1927.

$$\Delta p \Delta x \geq h / 4\pi$$

Figura 52 Compendio di meccanica quantistica



Lo spin dell'elettrone



I primi tre numeri quantici servono ad indicare i diversi orbitali atomici (s, p, d) in s possono coesistere solo due elettroni, in p solo 6 elettroni e in d 10.

Il numero quantico di spin riguarda l'elettrone, viene indicato con la lettera m_s e può assumere soltanto due valori:

Ne novembre del 1925 due fisici olandesi, G.E. Uhlenbeck e S.A. Goudsmit, formularono l'ipotesi che l'elettrone potesse ruotare attorno al proprio asse proprio come fa la Terra.

L'elettrone ruotando su sé stesso produce sullo spazio circostante un effetto che si rappresenta con un vettore (si tratta quindi di una grandezza vettoriale) la cui orientazione coincide con l'asse di rotazione della particella. Questa grandezza prende il nome di momento angolare di spin dell'elettrone.

Livello n	l	Orbitali	m	Spin m_s	Numero di Orbitali
1	0	1s	0	+1/2, -1/2	1
2	0	2s	0	+1/2, -1/2	1
	1	2p	-1 0 +1	+1/2, -1/2	3
3	0	3s	0	+1/2, -1/2	1
	1	3p	-1 0 +1	+1/2, -1/2	3
	2	3d	-2 -1 0 +1 +2	+1/2, -1/2	5
4	0	4s	0	+1/2, -1/2	1
	1	4p	-1 0 +1	+1/2, -1/2	3
	2	4d	-2 -1 0 +1 +2	+1/2, -1/2	5
	3	4f	-3 -2 -1 0 +1 +2 +3	+1/2, -1/2	7

Inoltre, poiché l'elettrone possiede una carica elettrica, il suo movimento a trotto gli conferisce un'altra proprietà, quella di una minuscola calamita con polo nord e polo sud. Anche questa proprietà dell'elettrone fu rappresentata con un vettore che prende il nome di momento magnetico dell'elettrone. Per descrivere l'orientazione del vettore di spin dell'elettrone, fu definito quindi un quarto numero quantico che, simboleggiato con m_s prende il nome di numero quantico di spin. L'elaborazione matematica di Goudsmit e Uhlenbeck portò al risultato che affinché fosse verificata la quantizzazione dell'energia dell'elettrone, erano permessi due valori per il numero quantico di spin: Ciò indusse a pensare che per l'elettrone sono consentiti solo due versi di rotazione su sé stesso: l'uno destrorso (da sx verso dx) e l'altro sinistrorso (da dx verso sx) indicati con i termini rispettivamente di spin su e spin giù. (vedi figura in alto)

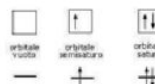


Figura 53 Breve sintesi della teoria atomica

Avvio al computer quantistico

Iniziare a descrivere questo argomento è difficile, da dove si incomincia? Viene visualizzato l'impatto che questa novità "informatica" ha sulla comunità mondiale con una carrellata di titoli di giornale che evidenziano l'impatto del CQ (d'ora in avanti chiameremo così il computer quantistico). Si ribadisce che la meccanica quantistica è propedeutica e i suoi principi sono alla base del funzionamento dei CQ. È una nuova avventura della scienza!

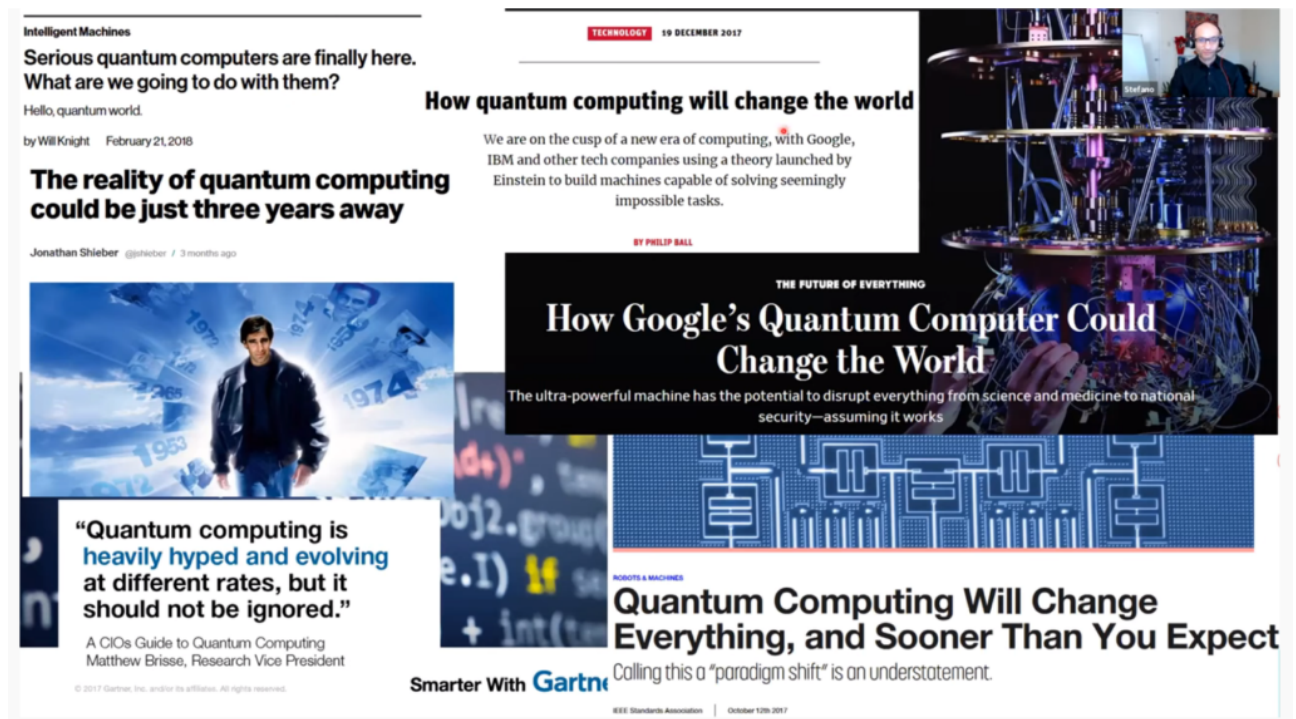


Figura 54 Avvio al computer quantistico

I computer quantistici seri sono finalmente arrivati. Cosa farai con loro?

La realtà dell'informatica quantistica potrebbe essere a soli tre anni di distanza.

Il quantum computing è fortemente pubblicizzato e si evolve a velocità diverse, ma non dovrebbe essere ignorato!

Come l'informatica quantistica cambierà il mondo.
Siamo all'apice di un'era computing, con Google, IBM e altre aziende tecnologiche che utilizzano una teoria lanciata da Einstein per costruire macchine in grado di risolvere compiti apparentemente impossibili!

Il futuro di tutto
Come il computer quantistico di Google potrebbe cambiare il mondo.
La macchina ultra-potente ha il potenziale per sconvolgere tutto, dalla scienza e dalla medicina alla sicurezza nazionale, ammesso che funzioni.

Il Quantum Computing cambierà tutto e prima di quanto ti aspetti!
Collaps: questo un "cambio di paradigma" è un eufemismo!

Figura 55 Quantum computing

Alcuni titoli che spiegano l'importanza di questa nuova disciplina, a fianco le traduzioni degli slogan!

Sono un divulgatore e ho fatto per oltre 40 anni l'insegnante (matematica e scienze) e la creazione di questo sito è l'esemplificazione di quello che posso fare nel campo della divulgazione. Per il CQ ho pensato di farvi iniziare con due video di un giovin ragazzo, Marco Romboli, che nel 2014 ha aperto un sito "OverVolt" di svariati argomenti informatici. Questo giovin ragazzo è un ottimo divulgatore, essenziale, preciso, pieno di comunicativa e che può introdurvi con semplicità in un mondo molto complesso.

- https://youtu.be/UnDvJj5p7a0?list=PLPGpywm-ENVaslyiU-CH_TFCojvB3Q2xb
- <https://youtu.be/iMN9Gt26j2k>

Dopo avere questi due video vi offro un altro video su: "Sviluppare computer quantistici con qubit superconduttori" Sfide ed emozioni nel realizzare la tecnologia del futuro. Questo video è stato preparato da Stefano Poletto Senior Manager, Quantum Engineering at Rigetti Computing Berkeley, California, Stati Uniti d'America

Stefano Poletto è stato anche uno studente dell'Università di Padova e per l'Associazione Alumni Università di Padova e quindi il 17 feb 2021 ha presentato questo video, molto interessante.

È un video corposo, non preoccupatevi c'è ancora modo di spiegare e tornare sull'argomento.

https://youtu.be/oVIG_Ny7pik?list=PLPGpywm-ENVaslyiU-CH_TFCojvB3Q2xb

Figura 1 Computer quantistici della Rigetti	3
Figura 2 Il fisico premio Nobel Richard Feynman	4
Figura 3 Nell'ordine: Niels Bohr, Albert Einstein, Max Planck. Tre grandi scienziati precursori della meccanica quantistica.	5
Figura 4 Semplice modello di atomo visto con più orbite per gli elettroni	8
Figura 5 Joseph John Thomson (1856 -1940) scoprì che gli atomi non sono divisibili.	9
Figura 6 La deflessione dei raggi catodici provocata dal campo elettrico esterno nel tubo catodico modificato da Thomson	9
Figura 7 Schema che illustra l'emissione di elettroni da una piastra di metallo irradiata da energia.	10
Figura 8 La natura della luce. Onda o corpuscolo? I parte	12
Figura 9 La natura della luce. Onda o corpuscolo? II parte	13
Figura 10 La termodinamica in sintesi	14
Figura 11 Schema di centrale idroelettrica	15
Figura 12 Entropia	16
Figura 13 Definizione di Entropia	16
Figura 14 Democrito	18
Figura 15 John Dalton 1766-1844	19
Figura 16 Gli elementi atomici in simboli secondo Dalton	20
Figura 17 Sintesi del pensiero Daltoniano	20
Figura 18 Mappa concettuale sulla chimica di Dalton	21
Figura 19 Teoria Atomica di Thompson, modello a panettone	21
Figura 20 Ernest Rutherford il protone e il modello planetario dell'atomo	22
Figura 21 Niels Bohr 1912-1962 ricevette il Nobel per la fisica nel 1922	23
Figura 22 Modello atomico di Niels Bohr con orbite circolari quantizzate	23
Figura 23 Modello atomico di Sommerfeld con orbite ellittiche e il nucleo che occupa uno dei fuochi	24
Figura 24 Questa è la rappresentazione analitica di una ellisse	24
Figura 25 Effetto Compton	25
Figura 26 Arthur Holly Compton 1892-1962	25
Figura 27 Il principe Louis Victor Pierre Raymond de Broglie 1892-1987	27
Figura 28 Illustrazione del dualismo onda-particella	27
Figura 29 Dia 1	28
Figura 30 Dia 2	28
Figura 31 Dia 3	29
Figura 32 Dia 4 il cloud dell'atomo di idrogeno	29
Figura 33 Rappresentazione dell'atomo con foto da wikipedia	30
Figura 34 Werner Heisenberg e il principio di indeterminazione	31
Figura 35 Erwin Schoedringer 1887 - 1961	32
Figura 36 funzione d'onda di Schoedringer	33
Figura 37 Ipotesi di de Broglie	34
Figura 38 Formula matematica della funzione d'onda, è una versione più sofisticata della figura precedente.	35
Figura 39 Paul Dirac	35
Figura 40 Equazione originale di Dirac	36
Figura 41 Lapide commemorativa di Paul Dirac, inaugurata il 13 novembre 1995 in una navata dell'Abbazia di Westminster (Londra), vicina al monumento dedicato a Newton.	37
Figura 42 Pet	38
Figura 43 Julian Schwinger	40
Figura 44 Lo spin dell'elettrone	41
Figura 45 La scoperta dello spin	42
Figura 46 Il gatto di Schoedringer	42
Figura 47 Il quinto congresso Solvay	46
Figura 48 Foto dell'eclisse che prova la teoria della relatività	47
Figura 49 Teoria della luce ONDULATORIA	48
Figura 50 Teoria della luce CORPUSCOLARE	48
Figura 51 Entanglement	49
Figura 52 Compendio di meccanica quantistica	50
Figura 53 Breve sintesi della teoria atomica	50
Figura 54 Avvio al computer quantistico	51
Figura 55 Quantum computing	51

