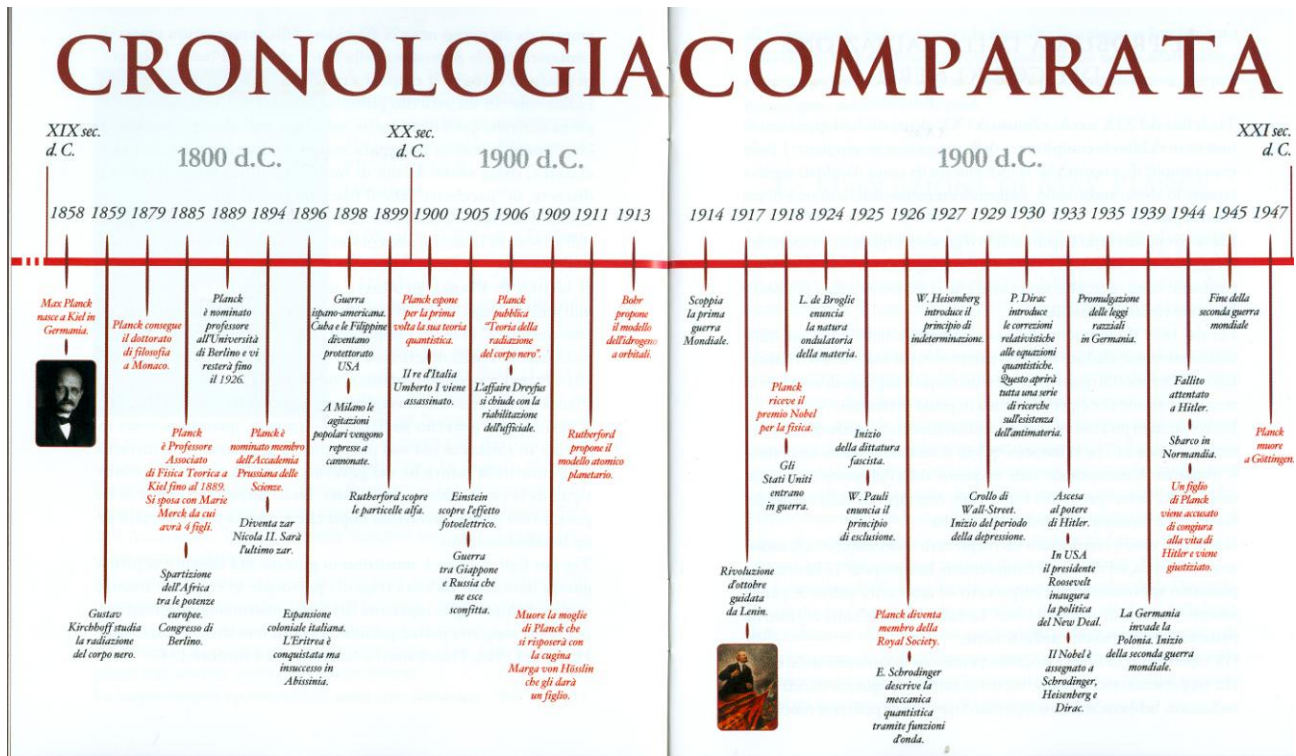


# Max Planck

## I quanti: quantità di energia misurabile



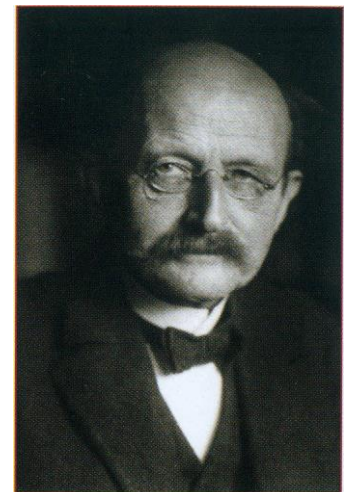
### Max Planck

Max Karl Ernst Ludwig Planck nacque a Kiel, Germania, il 23 aprile 1858. Suo padre era professore di Diritto Costituzionale presso l'Università di Kiel e poi a Göttingen.

Planck studiò presso le Università di Monaco di Baviera e Berlino, dove ebbe come insegnanti Kirchhoff e Helmholtz, e conseguì il dottorato di filosofia a Monaco di Baviera nel 1879. Fu Professore Associato di Fisica Teorica a Kiel fino al 1889, anno in cui Kirchhoff riuscì ad ottenergli l'incarico di professore MaxPlanck all'Università di Berlino, dove rimase fino al suo pensionamento nel 1926. In seguito divenne Presidente della Kaiser Wilhelm Society per la promozione della Scienza, incarico che ricoprì fino al 1937. Fu nominato membro dell'Accademia Prussiana delle Scienze nel 1894 e segretario permanente nel 1912.

All'inizio della sua carriera si interessò ai processi radiativi in termodinamica e mostrò che questi processi erano da considerarsi di natura elettromagnetica. Da questi studi giunse a risolvere il problema della radiazione emessa dal corpo nero, una superficie ideale che assorbe tutta l'energia incidente.

Le osservazioni sperimentali sulla distribuzione dell'energia emessa da un corpo nero in funzione della temperatura erano in contrasto con le previsioni della fisica classica. Planck fu invece in grado di dedurre il rapporto tra l'energia e la frequenza della radiazione. In un articolo pubblicato nel 1900, annunciò come aveva derivato questo rapporto: sulla base dell'idea



rivoluzionaria che l'energia venisse irraggiata non come ipotizzato dalla fisica classica, ossia sotto forma di onda continua, ma in quantità discrete, in "pacchetti", che il fisico battezzò "quanti".

Il valore dell'ipotesi di Planck fu reso evidente qualche anno dopo dall'attività di Einstein, che col suo lavoro sull'effetto fotoelettrico poté metterne in luce la rilevanza in senso propriamente fisico. Il lavoro di Planck produsse una rivoluzione concettuale nell'ambito degli studi sulla natura, introducendo il concetto di "discontinuità" in molti campi della fisica e imponendo un radicale cambiamento nella descrizione dei fenomeni. Per questa teoria nel 1918 Planck ricevette il premio Nobel per la Fisica.

Planck passò una fase travagliata e tragica della sua vita durante il periodo del governo nazista in Germania, quando si sentì in dovere di rimanere nel suo paese, ma fu apertamente contrario ad alcune delle politiche del governo, in particolare per quanto riguarda la persecuzione degli ebrei. Nelle ultime settimane della guerra subì grandi privazioni dopo che la sua casa fu distrutta da un bombardamento.

Tre dei figli di Planck morirono in giovane età durante la prima guerra mondiale, un'altra tragedia personale lo colpì duramente quando l'ultimo figlio superstite del primo matrimonio fu giustiziato per la sua supposta partecipazione al fallito tentativo di assassinare Hitler nel 1944. Planck morì a Göttingen il 4 ottobre 1947.

### Il problema della radiazione del corpo nero

Tra la fine del XIX secolo e l'inizio del XX alcuni risultati sperimentali misero in dubbio la completezza della meccanica newtoniana, I fisici erano stupiti di scoprire che la luce emessa da corpi riscaldati seguiva sempre lo stesso andamento, indipendentemente dalla sostanza di cui era composto.

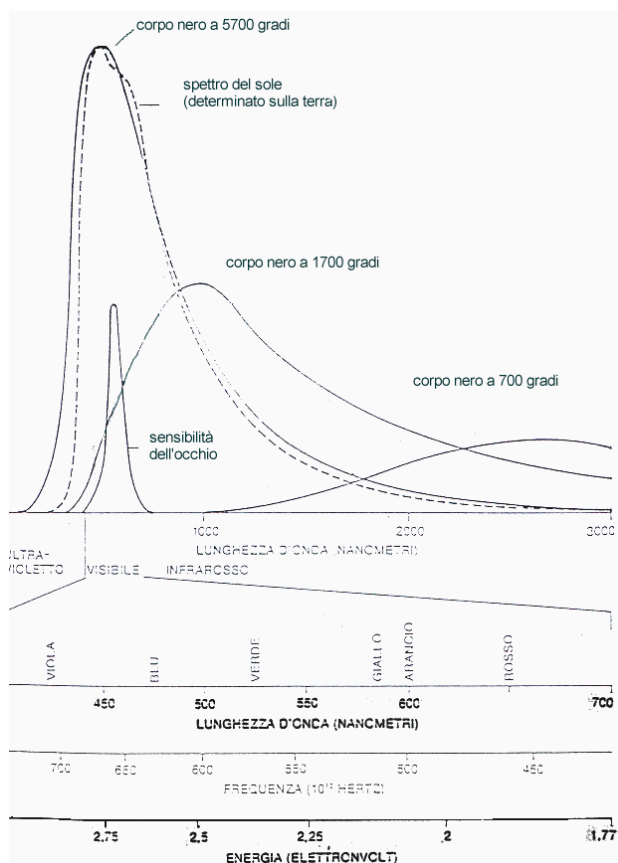
Era noto che un corpo liquido, solido o gassoso, a qualsiasi temperatura (maggiore di 0 K) emette onde elettromagnetiche. Noi non ce ne rendiamo conto perché è necessario che ci sia molto caldo per poter emettere radiazione visibile.

Fin dal 1859 il fenomeno dell'assorbimento e dell'emissione della radiazione venne studiato in modo sistematico dal fisico tedesco Gustav Robert Kirchhoff il quale scoprì che un corpo è in grado di assorbire la stessa radiazione che è per sua natura in grado di emettere.

Un corpo nero può essere considerato un sistema in grado di assorbire tutta la radiazione che lo investe e quindi di emettere radiazione di tutte le frequenze. L'intensità alle varie frequenze della radiazione emessa dal corpo nero, detta spettro del corpo nero, non dipende dalla natura del corpo, ma è funzione della sola temperatura.

Il sole può essere considerato un corpo nero (esso assorbe radiazione senza rifletterla, ed allo stesso tempo emette luce propria). In laboratorio possiamo approssimare un corpo nero ad una cavità avente le pareti annerite, munita di un piccolo foro. La radiazione che entra nel foro ha praticamente probabilità nulla di uscire.

Gli esperimenti di fine Ottocento permisero di costruire delle curve che rappresentavano il legame tra temperatura e lunghezza d'onda della radiazione. Sebbene avessero registrato i



dati, i fisici però non riuscivano ad interpretarli. Non si trovava la formula che spiegasse l'andamento della curva. Furono trovate soluzioni parziali che ben si adattavano a certe frequenze ma non a tutte. Quindi il problema rimaneva aperto e preoccupava tutti fisici dell'epoca.

### La rivoluzione di Max Planck

La soluzione al problema fu individuata da Planck grazie ad un'ipotesi ardita. **Max Planck** combinò la fisica del calore e quella della luce. Era affascinato dal concetto di entropia e dal secondo principio della termodinamica, il quale afferma che il calore si trasferisce dai corpi caldi a quelli freddi e non viceversa

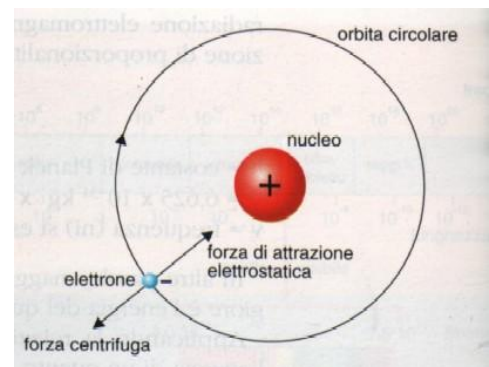
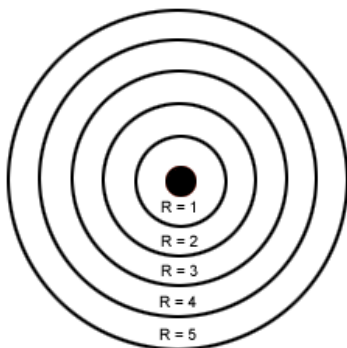
*"Pensava che quest'ultimo e le equazioni di Maxwell dalle quali si possono ottenere tutte le proprietà dei campi elettrici e magnetici fossero leggi fondamentali della natura e cercò di dimostrare che erano collegati".*

Per far funzionare le sue equazioni, Planck introdusse una correzione ingegnosa. Trattò la radiazione elettromagnetica nello stesso modo in cui gli studiosi avevano trattato il calore. Così come la temperatura consiste nella distribuzione dell'energia termica tra molte particelle, Planck descrisse la luce scambiata in minuscole unità subatomiche di carica elettromagnetica. Le unità elettromagnetiche furono denominate "quanti" per indicare che si trattava di quantità discrete di energia. Il 14 dicembre 1900, Max Planck esponeva ai membri della *Deutsche Physikalische Gesellschaft* le assunzioni teoriche alla base della legge della radiazione del corpo nero, quella da lui presentata nella stessa sede due mesi prima. In questa comunicazione compariva per la prima volta una nuova costante di natura, la costante  $h$ , che poi sarebbe appunto diventata famosa con il nome di costante di Planck.

Per Planck i quanti erano un artificio utile per aggiustare la matematica della sua legge, così facendo aveva piantato un seme che avrebbe cambiato la fisica e lo avrebbe fatto ricordare come uno dei più grandi fisici del Novecento. Max Planck, infatti, è considerato il padre della teoria quantistica.

### L'atomo di Bohr

Nel 1911 **Rutherford** formulò il suo modello atomico. Esso prevedeva che gli elettroni con carica negativa ruotassero intorno al nucleo denso e positivamente carico come pianeti intorno al Sole. Tuttavia secondo la teoria elettromagnetica classica di Maxwell, un elettrone orbitante intorno a un nucleo dovrebbe consumare progressivamente la sua energia emettendola con continuità sotto forma di radiazione elettromagnetica fino a collassare sul nucleo; l'atomo di Rutherford risulterebbe di conseguenza instabile. Due anni dopo **Niels Bohr** propose un nuovo modello che prevedeva che gli elettroni occupassero orbite fisse ben determinate; inoltre ogni cambiamento di orbita da parte di un elettrone corrispondeva all'emissione o all'assorbimento di un quanto di radiazione.



La teoria di Bohr diede risultati esatti per l'atomo di idrogeno, ma per gli altri atomi con più di un elettrone si rivelò problematica: per gli atomi più complessi erano possibili solo soluzioni approssimate

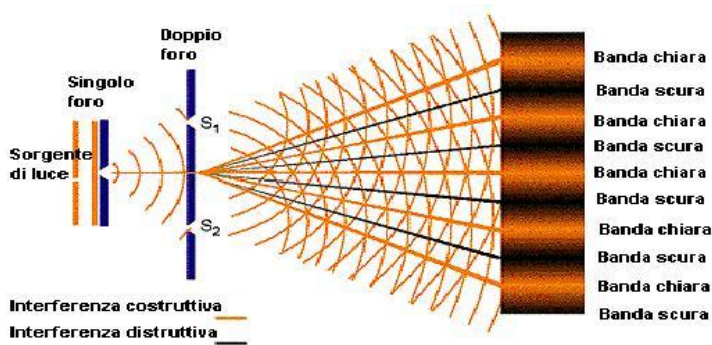
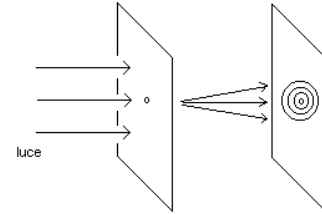
### I principi della meccanica quantistica

Per comprendere i fenomeni quantistici occorre analizzare prima i fenomeni ondulatori, come le vibrazioni che si producono in una corda tesa quando viene pizzicata. Le onde che si formano sulle corde di una chitarra si trasmettono all'aria che le diffonde sotto forma di onde sonore. La lunghezza

d'onda caratterizza l'altezza del suono; minore la lunghezza d'onda, più acuto il suono. La chitarra, le cui corde sono corte, produce un suono di tonalità più alta rispetto al contrabbasso.

Anche la propagazione della luce rientra nel campo della teoria ondulatoria; la luce è composta da onde elettromagnetiche. In questo caso la lunghezza d'onda determina il colore della luce; la radiazione con lunghezza d'onda maggiore (poco meno di un millesimo di millimetro) ha colore rosso, quella con lunghezza d'onda minore (circa mezzo millesimo di millimetro) violetto.

Gli esperimenti di laboratorio confermano la natura ondulatoria della luce; ad esempio i raggi luminosi possono fare osservare fenomeni di diffrazione ed interferenza. Se si fa passare un raggio di luce attraverso uno stretto forellino e si raccoglie la luce su uno schermo retrostante, si osserva una macchia luminosa con i bordi colorati (la figura di diffrazione), spiegabile dalla teoria ondulatoria.



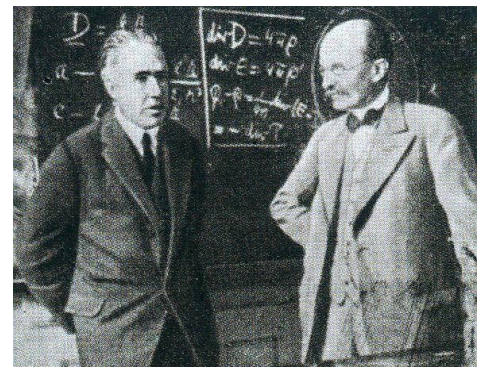
Per rilevare l'interferenza si fanno passare raggi luminosi attraverso un cartone con due sottili fenditure; chiudendo prima l'una e poi l'altra si osservano due figure di diffrazione. Mantenendole invece tutte e due aperte non si osserva la sovrapposizione delle due figure di diffrazione, come ci si aspetterebbe, ma una successione di frange scure e luminose, la figura di interferenza, che può essere spiegata con

la teoria ondulatoria.

Le particelle studiate dalla meccanica quantistica, come l'elettrone, sono di dimensioni infinitesimali. L'elettrone è uno dei componenti dell'atomo, assieme a protone e neutrone. Normalmente è rappresentato come una particella, con la sua massa e la sua carica elettrica. Questo modello è sfruttato in numerose applicazioni pratiche, come i raggi catodici. In alcuni esperimenti, però, l'elettrone si comporta in maniera sorprendente: se ad esempio si modifica l'esperimento delle due fenditure, sostituendo alla sorgente di luce una sorgente di elettroni ed allo schermo un rivelatore di particelle, si osserva una figura di interferenza (una successione di zone colpite da molte particelle e di zone colpite da pochissime particelle). In questo esperimento gli elettroni sembrano comportarsi come onde.

### L'onda di probabilità

La meccanica quantistica permette di spiegare il comportamento degli elettroni associando loro delle onde. L'onda che descrive l'elettrone, però, non è un'onda ordinaria, ma un'onda di probabilità. Ogni particella è descritta da una funzione d'onda che indica la probabilità che essa si trovi in una determinata posizione. L'interferenza tra gli elettroni si verifica perché una certa quota di probabilità di un elettrone passa da una fenditura ed un'altra quota di probabilità passa dall'altra fenditura. L'elettrone passa da entrambe le fenditure. L'aspetto più curioso è che non ci si può chiedere da quale fenditura sia passato un elettrone. Se mettessimo un contatore di elettroni su una delle due fenditure sapremmo con esattezza se un elettrone è passato da una fenditura o dall'altra, ma allo stesso tempo il fenomeno di interferenza scomparirebbe. Qui entrano in gioco i concetti probabilistici. Per capire meglio facciamo un'analogia tra le possibili



posizioni di un elettrone e un mazzo di carte da gioco. Immaginiamo che in una partita a carte il nostro avversario sia rimasto con una sola carta; dall'andamento dei turni di gioco precedenti sappiamo che questa carta può essere soltanto un fante di fiori o un Asso di quadri. Secondo il nostro normale modo di pensare, questa carta è di fatto un fante di fiori o un Asso di quadri. Quando la carta viene girata, ci limitiamo a prendere atto della situazione.

Se invece interpretiamo questo esempio con i criteri della meccanica quantistica, la carta si trova in uno stato indefinito, 50% fante di fiori e 50% Asso di quadri. Solo quando giriamo la carta questa assume uno dei due valori possibili. Non è facile adeguarsi a questo modo di pensare.

### **Il principio di indeterminazione e l'interpretazione di Copenhagen**

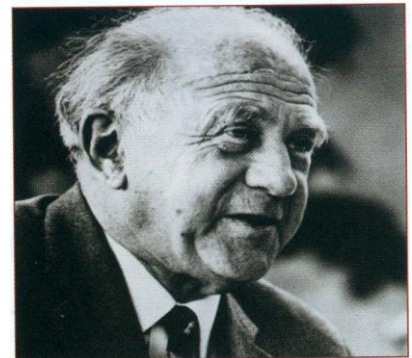
Le formule della meccanica quantistica sono molto precise nel prevedere i risultati degli esperimenti, ma la loro interpretazione è controversa. Nell'"interpretazione di Copenhagen", dalla città di Niels Bohr (1885-1962), che la propose nel 1927, il concetto di "processo di misura" è fondamentale. Prima di una misura, l'elettrone si trova in uno stato indefinito; possiamo solamente calcolare la probabilità dei risultati che la misura potrà dare. Il processo di misura implica una interazione tra lo strumento e l'elettrone, per cui è possibile che dopo la misura lo stato del sistema sia diverso.

Nel caso dell'esperimento delle due fenditure, l'elettrone si trova in una mescolanza di stati che genera interferenza. Per sapere a quale stato effettivamente appartenga (e quindi da che fenditura sia effettivamente passato) dobbiamo effettuare una misura; possiamo, per esempio, mettere un rilevatore di particelle su ogni fenditura. La misura ci dice in quale dei due stati si trova l'elettrone (si dice che la misura fa precipitare lo stato); di conseguenza, dopo la misura non si potrà più osservare interferenza. Effettuando la misura abbiamo scoperto che una delle due onde non esiste, e quindi essa non può interagire con l'altra onda. Se invece non sappiamo quale delle due onde effettivamente esista, esse possono interagire tra loro.

Questa interpretazione ci costringe a ripensare il significato dei fenomeni fisici. Secondo l'interpretazione di Copenhagen, un fenomeno non è tale fino a che non viene osservato. Se non misuriamo la posizione dell'elettrone, non possiamo sapere da quale fenditura passi e anzi questa è una domanda priva di senso. In questo modo possiamo concepire l'idea che l'elettrone passi contemporaneamente da entrambe le fenditure.

A seconda di come si compiono le osservazioni, la materia si può presentare sotto forma di onde o di particelle e causa ed effetto non sono più intimamente legati. Questa interpretazione della meccanica quantistica (le regole su come e quando applicarla per ciò che essa ci dice del mondo fisico) ebbe un successo sbalorditivo nelle applicazioni, già negli anni '30.

Uno dei principali ideatori e più attivi sostenitori dell'interpretazione di Copenhagen, fu **Werner Karl Heisenberg**. Nel 1927 questi, venticinquenne assistente di Niels Bohr, diede il suo più celebre contributo alla fisica: il principio di indeterminazione, che costituisce un tassello fondamentale nel mosaico dell'interpretazione di Copenhagen. Questo principio, come del resto tutta l'interpretazione, scaturì dalla ricerca di un legame corrente tra il mondo quotidiano del laboratorio e lo strano mondo microscopico dell'atomo. In breve, il principio di indeterminazione asserisce che *la misurazione simultanea di due variabili coniugate, come la posizione e la quantità di moto di una particella, si può effettuare solo con precisione limitata. Quanto più è precisa la misurazione della posizione, tanto più imprecisa è quella della quantità di moto e viceversa*. Nel caso limite, una precisione assoluta per una delle variabili comporterebbe un'imprecisione assoluta per l'altra. Questa indeterminazione non è attribuibile all'errore sperimentale, ma è una conseguenza fondamentale delle equazioni quantistiche ed è caratteristica di qualsiasi esperimento quantistico. Inoltre, dichiarò Heisenberg, *finché la meccanica quantistica resterà valida, il principio di indeterminazione non*



sarà mai violato. Era la prima volta dalla rivoluzione galileiana che un fisico eminente proclamava l'esistenza di limiti alla comprensione scientifica.

Per Bohr le rappresentazioni ondulatoria e corpuscolari erano complementari, mutuamente esclusive, ma congiuntamente essenziali. Bohr sosteneva che per analizzare l'esperimento, lo sperimentatore doveva scegliere o la radiazione ondulatoria o quella corpuscolare. Il prezzo imposto da questa preferenza si esplicava in una limitazione di ciò che è possibile imparare dall'esperimento e questa limitazione era rappresentata dalle relazioni di indeterminazione.

Heisenberg e gli altri riuscirono a far accettare la loro interpretazione nonostante le perduranti obiezioni di maestri come Einstein e **Schroedinger**. Nel frattempo Wolfgang Pauli enunciò il principio di esclusione che spiega perché la materia è rigida e impermeabile e non siamo in grado di passare una mano attraverso un tavolo. Il principio afferma che due particelle dello stesso tipo non possono assumere contemporaneamente lo stesso insieme di numeri quantici. Un numero quantico è un numero che specifica il valore di una proprietà di una particella e contribuisce a definire il suo stato).

Infine Paul Dirac introdusse nelle equazioni della meccanica quantistica i principi della relatività di Einstein anche se a tutt'oggi i risultati non sono ancora totalmente soddisfacenti.

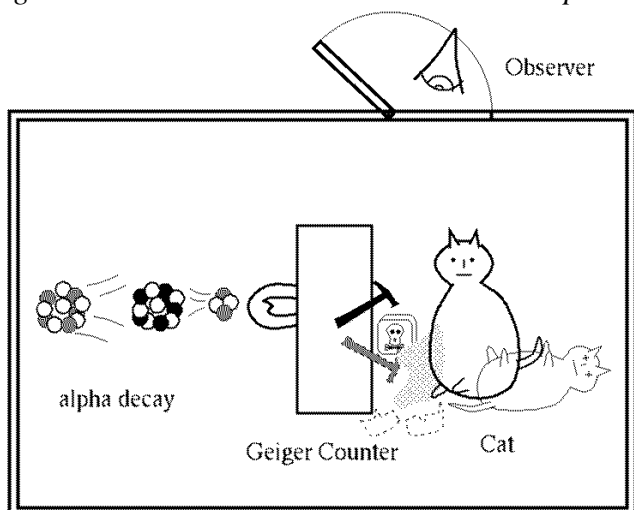
Nel 1933 la comunità scientifica conferì a Heisenberg, insieme con Schroedinger e Dirac, il riconoscimento più ambito: il premio Nobel.



### I paradossi della meccanica quantistica

La meccanica quantistica è ricca di paradossi che sono utilissimi per comprendere meglio la teoria. Il più noto è il paradosso del "Gatto di Schroedinger" che venne proposto nel 1935 da Erwin Schroedinger (1887-1961). Secondo questa teoria gli oggetti non possono essere descritti con precisione, con conseguenze paradossali: una particella si può trovare in più di un posto contemporaneamente, un elettrone può passare attraverso barriere invalicabili. Questi effetti, però, sono confinati al mondo microscopico: nella realtà di tutti i giorni non percepiamo nulla di simile. Il paradosso proposto da Schroedinger, invece, sembra indicare che la meccanica quantistica può invadere il mondo macroscopico:

*"Un gatto è posto all'interno di una camera d'acciaio assieme al seguente marchingegno: in un contatore Geiger c'è una piccola quantità di una sostanza radioattiva, tale che forse nell'intervallo di un'ora uno degli atomi decadrà, ma anche, con eguale probabilità, nessuno degli atomi subirà questo processo; se il processo avviene il contatore genera una scarica e attraverso un relay libera un martello che frantuma un piccolo recipiente di vetro che contiene dell'acido prussico che uccide il gatto. Se l'intero sistema è rimasto isolato per un'ora, si può dire che il gatto è ancora vivo se nel frattempo nessun atomo ha subito un processo di decadimento. Il primo decadimento l'avrebbe avvelenato. La funzione d'onda del sistema completo esprimerà questo fatto per mezzo della combinazione di due termini che si riferiscono al gatto vivo o al gatto morto, due situazioni mescolate in parti uguali".*



Il decadimento di una sostanza radioattiva, l'emissione di una particella da parte di un nucleo atomico che si trasforma in un altro elemento, è un fenomeno regolato dai principi della meccanica quantistica. Fino a che non effettuiamo una misura, non possiamo sapere se il decadimento ha avuto luogo. Il nucleo

della sostanza radioattiva si trova in una mescolanza di stati, nucleo decaduto e nucleo non-decaduto, e soltanto una misura può fare in modo che assuma uno di questi due stati.

Il meccanismo ideato da Schroedinger estende questa ambiguità al mondo macroscopico. Legando la sorte del gatto a quella dell'atomo radioattivo, si è costretti ad utilizzare il modello quantistico anche per il primo: fino a che non si effettua la misura aprendo la camera d'acciaio, il gatto non è nè vivo nè morto: si trova in una mescolanza di stati. Il gatto va descritto da una funzione d'onda, che sarà una mescolanza dei due stati gatto-vivo e gatto-morto. Il concetto di incertezza di stato sembra assurdo se esteso ad un gatto o ad un altro essere vivente. Il gatto deve essere o vivo o morto, non riusciamo ad ammettere un'altra possibilità, come invece richiede l'esempio di Schroedinger. Per uscire da questo paradosso dobbiamo ripensare la nostra visione del mondo. Normalmente riteniamo che, al di fuori di noi, vi siano cose che esistono indipendentemente da noi; il gatto esiste, e questo implica che debba essere o vivo o morto. Proviamo invece ad accettare completamente il paradigma dell'interpretazione di Copenhagen: quando un oggetto o un essere vivente non influenza i nostri sensi, in altri termini, non viene misurato, possiamo dire di sapere qualcosa su di esso? Fino a quando non apriamo la scatola del gatto, il che equivale ad effettuare una misura, ha senso chiedersi se sia vivo o morto? Le nostre concezioni non riflettono le cose come stanno là fuori, ma semplicemente ci servono, ci permettono di fare fronte all'ambiente naturale in cui ci troviamo. Chiedersi come siano le cose là fuori indipendentemente da quanto possiamo osservare, in altre parole chiedersi se il gatto sia vivo o morto prima che la scatola venga aperta, è privo di senso. Il paradosso del gatto può essere risolto soltanto attraverso questo cambio di prospettiva.

### **Risultati della teoria quantistica**

La meccanica quantistica, ha accresciuto il livello di conoscenza della struttura della materia e ha fornito una base teorica per la comprensione della struttura dell'atomo e del fenomeno delle righe spettrali: ogni riga spettrale corrisponde all'energia di un fotone emesso o assorbito quando un elettrone compie una transizione da un livello energetico a un altro. Anche la conoscenza dei legami chimici è stata completamente rivoluzionata. La fisica dello stato solido, la fisica della materia condensata, la superconduttività, la fisica nucleare, e la fisica delle particelle elementari sono fondate sui principi della meccanica quantistica.

### **I ragazzi terribili**

Da noi, quando si parla dei ragazzi della fisica, il riferimento quasi inevitabile è a quel gruppo di giovanissimi che affiancarono Enrico Fermi all'Istituto di fisica di Roma, in via Panisperna. A loro si devono molti progressi nell'epoca pionieristica della fisica nucleare. Ma ci furono altri ragazzi, pochi anni prima, che furono protagonisti di quella rivoluzione epocale nel nostro modo di percepire la materia che va sotto il nome di meccanica quantistica. Non certo Max Planck, che quando ebbe la prima intuizione della natura quantistica della luce aveva già 42 anni - era il 1900, quando formulò l'ipotesi dei quanti come ipotesi di lavoro per risolvere il problema dell'irraggiamento del corpo nero - e più di sessanta quando i suoi eredi trovarono il bandolo della matassa che dava forma alla più fertile teoria della fisica moderna.

Di dieci anni più giovane di lui era Arnold Sommerfeld, che avrebbe contribuito a perfezionare il primo modello atomico di Niels Bohr per adattarlo meglio ai dati fenomenici. Quando lo elaborò, nel 1913, il "danese tranquillo" - come lo chiama Abraham Pais nella sua biografia - aveva appena 28 anni, e si apprestava ad entrare nel gotha della fisica dalla porta principale, diventando ad appena 35 anni fondatore e direttore dell'Istituto di fisica teorica di Copenhagen che da lui prenderà il nome.

Era il 1920, e di qui in poi Bohr sarà considerato un veterano. Perché negli anni immediatamente successivi gli altri protagonisti della rivoluzione quantistica, che prenderà forma tra Göttingen, Monaco e Copenhagen, saranno ragazzi appena laureati. Come Werner Heisenberg, che espone la teoria della meccanica delle matrici, la prima formalizzazione della meccanica

quantistica, a soli 25 anni e due anni dopo scopre il celebre principio di indeterminazione. Wolfgang Pauli invece ne ha 24, quando formula il principio di esclusione. Ne ha qualcuno in più Louis-Victor de Broglie, che lo stesso anno ipotizza il dualismo onda-corpuscolo della materia. E ne ha 26 Paul Adrien Maurice Dirac quando scopre, indipendentemente da Pauli, lo spin delle particelle elementari.

Tutti giovanissimi, dunque. E tutti insigniti del premio Nobel per la fisica, il massimo riconoscimento mondiale per uno scienziato, in tempi da record. Con l'eccezione di Wolfgang Pauli, che avrebbe dovuto aspettare i 45 anni per avere questa soddisfazione. Di sicuro il vecchio Planck, quando timidamente aveva illustrato la sua ipotesi dei quanti all'Accademia delle scienze di Berlino, non avrebbe mai creduto che un'idea che lui stesso all'inizio considerava piuttosto bizzarra avrebbe prodotto risultati di questa portata, tanto per il cammino della conoscenza quanto per i molti protagonisti di quell'avventura.







