



1

# Fisica quantistica attraverso i Nobel

*«Ci sono soltanto due possibili conclusioni: se il risultato conferma le ipotesi, allora hai appena fatto una misura; se il risultato è contrario alle ipotesi, allora hai fatto una scoperta.»*

ENRICO FERMI

**P**er una migliore comprensione della medicina la sola biochimica non è più sufficiente, si impone un approccio biofisico. È necessario l'ausilio della fisica, in particolare lo studio dei fenomeni elettrici, elettromagnetici e delle frequenze, il tutto correlato ai fenomeni biologici. Sappiamo quanto sia importante in medicina la conoscenza dei fenomeni che avvengono a livello atomico e subatomico, è per questo che non possiamo fare a meno di conoscere la fisica, soprattutto la quantistica.

Anche l'uomo è parte delle vibrazioni elettromagnetiche dell'Universo in cui è immerso, anche le nostre cellule vibrano e oscillano, comunicano tra di loro in continuazione; tanto che Gioacchino Pagliaro parla di *campo unificato*. La fisica quantistica ha dimostrato che tutto è energia che si associa sempre all'informazione: tutto è informazione quantistica.

Se attualmente possiamo avvalerci del supporto della fisica quantistica che, come sappiamo, si occupa dell'infinitamente piccolo e dei fenomeni legati alla dualità onda-particella, lo dobbiamo principalmente alle teorizzazioni dei Nobel per la fisica Max Planck ed Albert Einstein.

Con la nascita della teoria quantistica inizia anche la sua applicazione al campo di radiazione, in particolare alla radiazione elettromagnetica. A tal proposito, ricordiamo l'introduzione della costante di Planck, meglio conosciuta come costante  $h$ , costante associata ai *pacchetti di energia* emessi ed assorbiti dagli oscillatori del campo di radiazione all'interno di una cavità. La teoria quantistica dei campi venne sviluppata perché si avvertiva la necessità di associare gli aspetti ondulatori e corpuscolari della radiazione. Nonostante fosse evidente l'esistenza di aspetti più sottili nell'interazione tra radiazione e materia che rendevano la teoria quantistica insufficiente, la trattazione quantistica del campo seguiva l'evoluzione della nuova meccanica quantistica.

Secondo Maxwell e Faraday lo spazio circostante le cariche elettriche viene "saturato" da campi elettromagnetici caratterizzati dai vettori  $E$  e  $B$ , le leggi che governavano l'elettromagnetismo classico (equazioni di Maxwell) mettevano in collegamento i campi elettrici e magnetici con la densità di carica e di corrente. Quanto appena esposto, e l'espressione della forza di Lorentz portarono alla comprensione della luce come onda elettromagnetica.

La teoria di Maxwell del campo elettromagnetico fu confermata a fine ottocento dalla scoperta delle onde elettromagnetiche, è così che fu messo in disparte il paradigma dominante della teoria dei corpuscoli di elettricità che aveva dominato tut-

to il secolo. Restava però il *germe* dei raggi catodici, che a fine secolo influì sulla reintroduzione del concetto di carica elettrica elementare. Fu il punto di partenza per la teoria elettronica della materia. Wiechert e Thomson confermarono l'atomo di elettricità di Helmholtz, che Stoney chiamò elettrone. Con la nuova teoria si cercava di spiegare la "visione elettromagnetica" del mondo, cioè le proprietà elettriche e magnetiche della materia<sup>1</sup> a partire dalle consolidate leggi dell'interazione fra i campi e gli elettroni.

Alle soglie del XX secolo, Hendrik Lorentz risolse il problema legato alle linee spettrali dell'atomo immerso nel campo elettromagnetico (noto come fenomeno dello *splitting*) e su cui aveva lavorato Zeeman. Fu la base di partenza per la soluzione delle complicate tematiche legate ai fenomeni elettrici, magnetici e termici della materia. Era evidente che le proprietà elettriche e magnetiche della materia dipendevano dall'interazione fra campi ed elettroni. Si scoprì che l'atomo, per ogni elemento, aveva il suo spettro di emissione caratteristico, dovuto alla capacità di emissione o di assorbimento della radiazione a determinate lunghezze d'onda. Tutto questo fu possibile perché furono messe in rapporto la struttura quantistica degli atomi e l'elettrodinamica classica alla Maxwell.

Contemporaneamente alla *nascita* dell'elettrone ci si interrogò anche sulla sua natura: quale è la sua struttura? Quale è la sua dimensione? Quale è il campo elettrico prodotto da una carica puntiforme? Possiede energia infinita?

Fu solo il primo dei problemi che avrebbero tormentato il sonno di molti scienziati impegnati nella ricerca sull'elettrodinamica.

Fuori del coro si fece sentire la voce di Einstein, con una teoria che mise in discussione i concetti classici di spazio e di tempo. Lo fece riprendendo il lavoro di Planck sulla radiazione del corpo nero e rivedendo gli aspetti quantistici dei fenomeni atomici. Ricordo che fu Planck il primo scienziato ad applicare la relatività alla teoria dei quanti, con la sua legge teorizzò che l'energia di un *quanto* è uguale alla frequenza della radiazione moltiplicata per una costante universale, conosciuta come costante di Planck.

A quei tempi era una teoria rivoluzionaria, utile per spiegare alcuni fenomeni ma di difficile interpretazione, non fu presa in considerazione. La teoria però aveva solide basi empiriche e matematiche, per questo motivo fu ripresa da Einstein che la utilizzò per spiegare l'effetto fotoelettrico; ripartendo dal concetto di *quanto* riuscì a definirlo in termini fisici.

Le equazioni avanguardistiche di Planck, di Einstein e di Bohr furono le prime spallate utili per l'abbattimento dei dogmi legati ai concetti classici. La prima in ordine di tempo fu la formula di Planck, che esprime la densità spettrale  $\rho$  della radiazione del corpo nero in equilibrio termico in funzione della frequenza  $\nu$  e della temperatura  $T$ :

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

La seconda fu quella dedotta da Einstein nel 1905, in cui viene mostrata una espressione per l'energia  $E$  dei fotoelettroni liberati da una superficie metallica irradiata da luce di frequenza  $\nu$ ; fu questa la prima equazione della teoria quantistica dell'interazione fra radiazione e materia:

$$E = h\nu - P$$

La terza equazione fu la prima della teoria quantistica dello stato solido, fu dedotta da Einstein per il calore specifico di un grammo-atomo di un solido cristallino ideale, nel quale i punti reticolari vibrano con moto armonico, con la sola frequenza  $\nu$ , intorno alle relative posizioni di equilibrio:

$$C_\nu = 3R \left( \frac{h\nu}{kT} \right) \frac{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right)}{\left[ \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]^2}$$

Nel 1913, il Nobel per la fisica Niels Henrik David Bohr diede inizio all'era della teoria quantistica della struttura atomica.

Per quanto concerne la conoscenza dell'atomo sono stati fatti passi da gigante da quando Bohr, in contrapposizione con la fisica classica e il mainstream dominante, sviluppò un modello atomico che confermava l'ipotesi dei quanti. Fu il primo e

1. In questo caso per materia si intendono i solidi, i liquidi e i gas.

## 1. Fisica quantistica attraverso i Nobel

fondamentale passo utile per il cammino della fisica moderna, fu lo spartiacque tra fisica classica e meccanica quantistica.

Quando elaborò la prima teoria dell'atomo di idrogeno, il fisico danese rivolse l'attenzione alla dinamica degli stati stazionari, "distogliendola" dal meccanismo con il quale viene emessa la radiazione osservabile tramite le righe spettrali che caratterizzano ogni specie atomica. In ambito quantistico, *emissione spontanea* vuol dire emissione di un fotone dall'atomo che da un livello di energia più alto del fondamentale (eccitato) torna allo stato più basso di energia (stazionario). Invece, la teoria semiclassica prevede che se l'atomo si trova in uno stato eccitato nel *vuoto* – non ci sono cioè campi elettromagnetici derivanti da altre fonti – si è in presenza di uno stato stazionario che si conserva all'infinito. Il XX secolo è stato un secolo fecondo per la fisica, un susseguirsi di previsioni teoriche e di verifiche sperimentali; sono stati molti i personaggi che hanno dato vita a questo *dinamismo* scientifico.

---

### MAX PLANCK

---

Il fisico tedesco Max Planck, insignito del Nobel nel 1918, ritenuto a ragione il padre della teoria quantistica, insegnò all'Università di Berlino e di Monaco, nel 1885 ottenne la cattedra di fisica a Kiel. Era intento a lavorare sulla radiazione emessa da una superficie con la caratteristica ideale dell'assorbimento dell'energia incidente (corpo nero), quando si rese conto che il meccanismo di emissione della radiazione non poteva essere quello ipotizzato dalla fisica classica (onda continua), ma si trattava di *pacchetti discreti* a cui fu dato il nome di *quanti*.

Sebbene fosse stato Gustav Kirchhoff, con il suo teorema, ad introdurre per primo il termine corpo nero, fu Planck ad interpretarne correttamente lo spettro, affermando che la radiazione elettromagnetica si può propagare in pacchetti discreti e la loro energia è proporzionale alla frequenza dell'onda elettromagnetica. L'interpretazione dello spettro del corpo nero è all'origine della meccanica quantistica, da qui scaturirono il concetto di fotone, la soluzione alla problematica del calore specifico dei solidi e l'origine dei coefficienti di assorbimento e di emissione di Einstein.

Il corpo nero è un oggetto capace di assorbire tutta la radiazione elettromagnetica incidente senza che possa essere riflessa, è in perfetto equilibrio termico, l'energia irradiata o prodotta corrisponde all'energia che lo irradia, appare nero proprio perché non riflette nessuna radiazione. Ma a dispetto del nome, il corpo nero comunque irradia, ha uno spettro (intensità della radiazione emessa ad ogni lunghezza d'onda) caratteristico che dipende esclusivamente dalla sua temperatura. L'emissione di un corpo nero è detta *radiazione del corpo nero*, la densità d'energia emessa è detta *spettro di corpo nero*, utile per determinare la composizione chimica di un altro oggetto attraverso la differenza dello spettro. Per determinare l'intensità della radiazione di un corpo nero a temperatura T si utilizza la legge della radiazione di Planck e la costante di Boltzmann.

### Statistica di Boltzmann

La statistica di Boltzmann espone l'andamento del rapporto tra gruppi di particelle allo stato normale "Nn" ed allo stato eccitato "Ne" in funzione della temperatura T. L'aumento di quest'ultima può portare un numero crescente di spin allo stato eccitato. L'equazione di Boltzmann interpreta la ripartizione teorica all'equilibrio dei gruppi di spin Nn ed Ne e il loro grado di interazione:

$$\frac{N_n}{N_e} = e^{\frac{h \cdot f}{K \cdot T}}$$

dove K è la costante di Boltzmann ( $1,380 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ); f la frequenza; h la costante di Planck; T la temperatura. Il rapporto Nn/Ne si avvicina ad 1 con l'aumentare della temperatura.

---

### ALBERT EINSTEIN

---

Einstein nacque ad Ulma nel 1879 e morì a Princeton nel 1955. Probabilmente la sua "curiosità" scientifica fu stimolata da un regalo fattogli all'età di cinque anni: una bussola. Quando divenne un uomo di scienza, affermò che questo regalo lo indusse a porsi le domande che lo portarono a scoprire quel "*qualcosa*" che nello spazio vuoto *agiva* per modificare lo stato dell'ago.

Einstein è famoso per la teoria della relatività ristretta, elaborata circa dieci anni prima di quella della relatività generale, che contribuì in maniera determinante al cambio di paradigma che all'epoca imperava nell'interpretazione della fisica. Studiò l'effetto fotoelettrico dei metalli, riprendendo la teoria di Planck del quanto, dimostrandone la validità. Successivamente lo denominò fotone. La legge dell'effetto fotoelettrico gli valse il Nobel.<sup>2</sup> Riporto un piccolo passaggio dei suoi studi: *“Se elettrodi metallici sono esposti alla luce tra di loro possono verificarsi più facilmente scintille elettriche. Affinché questo “effetto fotoelettrico” si verifichi, le onde luminose devono essere, al di sopra di una certa frequenza”*.

In uno dei tanti lavori, Einstein spiegò che la luce consiste di “quanta” (*packets*) con energie fisse corrispondenti a determinate frequenze, uno di questi quanti di luce: il fotone, deve avere una frequenza minima prima di poter liberare un elettrone. Con la costante di Planck si riuscì a distinguere il dominio macroscopico dal microscopico, ma la spiegazione delle proprietà quantistiche e meccaniche legate all'interazione della radiazione elettromagnetica con la materia era più difficile di quanto si potesse immaginare. Le basi per poter proporre una teoria completa per calcolare l'assorbimento e l'emissione della luce da parte degli atomi, le interazioni tra i *quanti di luce* e gli elettroni, furono poste da Einstein: *ipotesi del quanto di luce*. Dall'ipotesi che la luce abbia proprietà corpuscolari e ondulatorie (natura duale della luce), si arrivò a comprendere che l'elettromagnetismo è la risultante del comportamento quantistico del fotone: la particella che trasmette la radiazione elettromagnetica.

---

## FOTONE

---

Il fotone (dal greco *photòs*, luce), o quanto di luce, indicato con la lettera greca  $\gamma$ , rappresenta il quanto di energia della radiazione elettromagnetica. È una particella elementare con massa nulla, ma con

spin intero. È un bosone.<sup>3</sup> Il fotone ha la stessa velocità della luce, energia quantizzata esprimibile con la legge di Planck, ha una sua frequenza vibratoria e una sua lunghezza d'onda. Il prodotto della frequenza  $f$  per la lunghezza d'onda  $\lambda$  corrisponde alla velocità di propagazione dell'onda  $c$ :

$$\lambda f = c$$

All'aumento della frequenza corrisponde una diminuzione della lunghezza d'onda. Va considerato anche il trasporto di energia  $E$  dei fotoni, che è proporzionale alla frequenza  $f$  da cui:

$$E = hf$$

dove  $h$  è la costante di Planck.

La costante di Planck o quanto d'azione è indicata con la lettera  $h$ , essa assume notevole importanza in fisica quantistica, il suo valore corrisponde a  $6,626 \cdot 10^{-34}$  (J·s), prevede le dimensioni di una energia (J) per un tempo (s). In fisica atomica, ai fini della semplificazione, la costante  $h$  viene indicata come  $h$  tagliata ( $\hbar$ ).  $\hbar$  è uguale ad  $h/2\pi$ , equivalente a:  $1,0551 \cdot 10^{-34}$  J·s. La costante di Planck assume importanza anche nel principio di indeterminazione di Heisenberg, infatti viene utilizzata per la determinare i valori di variazione ( $\Delta x$ ) e di moto ( $\Delta p$ ) di un elettrone:  $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{1}{2} \hbar$ . Attraverso la lettura della sua autobiografia scientifica, possiamo farci un'idea di cosa pensava Einstein del lavoro di Planck.

In realtà, essa<sup>4</sup> presuppone implicitamente che l'energia venga assorbita ed emessa dal singolo oscillatore soltanto sotto forma di quanti di grandezza  $h\nu$ , quindi, l'energia di una struttura meccanica capace di oscillare, così come l'energia radiante, possa soltanto trasformarsi in simili quanti, in contrasto con le leggi della meccanica e dell'elettrodinamica.

La contraddizione con la dinamica risulta fondamentale, mentre la contraddizione con l'elettrodinamica potrebbe essere di minor rilievo. La relazione che esprime la densità dell'energia radiante è conciliabile con le equazioni di Maxwell, ma non rappresenta una conseguenza ne-

2. Effetto fotoelettrico scoperto da W. Hertz e studiato da P. Lenard ed A. Righi che ne conì il nome.

3. Elettroni, protoni e neutroni sono fermioni.

4. Ci si riferisce alla deduzione di Planck della legge del corpo nero.

## 1. Fisica quantistica attraverso i Nobel

cessaria di esse.<sup>5</sup> Che questa espressione fornisca i valori medi importanti, lo si capisce dal fatto che le leggi di Stefan Boltzmann e di Wien, le quali sono in accordo con essa, sono in accordo con l'esperienza. Tutto ciò mi fu chiaro subito dopo la pubblicazione dell'opera fondamentale di Planck, per cui, senza aver nessun sostituto per la meccanica classica, potei concepire lo stesso, quali sarebbero state le conseguenze di questa legge della radiazione termica in relazione all'effetto fotoelettrico ed altri fenomeni connessi alla trasformazione dell'energia radiante, ed in relazione al calore specifico dei solidi.

Secondo le leggi della “nuova” meccanica quantistica, un atomo eccitato, in un momento non prevedibile, effettua una transizione al suo stato fondamentale emettendo un fotone; quest'ultimo viene generato nel momento in cui avviene la transizione. Prima non esisteva.

Nel processo inverso, il fotone si estingue per il processo di annichilazione.

La teoria quantistica dei campi giustifica la simultaneità del comportamento del campo elettromagnetico e del moto di tutte le particelle, è così che si coniugano meccanica quantistica e relatività speciale. Il concetto di campo quantico è fondamentale per assumere in sé due nozioni fondamentali della fisica classica e della fisica quantistica non relativistica: particelle e campi.

Fu Einstein a porre le basi concettuali che portarono alla comprensione dell'elettrodinamica quantistica, la teoria delle interazioni tra i campi quantici di radiazione<sup>6</sup> e i campi quantici di Dirac.<sup>7</sup> Lo fece con le sue pubblicazioni a partire dal 1905. Pubblicazioni nate dalla riflessione sul concetto di emissione ed assorbimento dei quanti, concetto che risulterà fondamentale per formulare la teoria quantistica, oltre alle intuizioni ricavate dalla teoria quantistica del campo elettromagnetico.

All'inizio del XX secolo, Einstein pubblicava una serie di memorie, nelle quali troviamo riflessioni importanti sulla natura della radiazione elettromagnetica.

Nella memoria del 1905 sulla relatività ristretta, leggiamo: *“È noto che l'elettrodinamica di Maxwell – così come oggi comunemente intesa – conduce, nelle sue applicazioni a corpi in movimento, ad asimmetrie che non sembrano conformi ai fenomeni. Si pensi ad esempio alle interazioni elettrodinamiche tra un magnete e un conduttore”*.

Dalla memoria del 1905 sui quanti di luce (ipotesi dei fotoni) si può individuare la prima risposta al problema della natura duale della radiazione luminosa:

Fra le descrizioni teoriche che i fisici si sono formati dei gas e di altri corpi ponderabili, e la teoria di Maxwell dei processi elettromagnetici nel cosiddetto spazio vuoto, vi è una profonda differenza formale. Mentre, infatti, lo stato di un corpo è completamente determinato da posizione e velocità di un numero finito, anche se grandissimo, di atomi ed elettroni, mentre per la determinazione dello stato elettromagnetico di uno spazio si utilizzano funzioni spaziali continue, sicché a definire compiutamente un tale stato non può essere considerato sufficiente un numero finito di grandezze... La teoria ondulatoria della luce basata su funzioni spaziali continue si è dimostrata eccellente per la descrizione dei fenomeni puramente ottici e non sarà certo mai sostituita da un'altra teoria. Si deve tuttavia tener presente che le osservazioni ottiche si riferiscono a valori medi temporali, e non già a valori istantanei, e nonostante gli esperimenti abbiano pienamente confermato la teoria della diffrazione, della riflessione, della rifrazione, della dispersione e così via, è concepibile che una teoria della luce basata su funzioni spaziali continue porti a contraddizioni con l'esperienza se la si applica ai fenomeni della generazione e della trasformazione della luce. A me sembra in effetti che le osservazioni sulla “radiazione di corpo nero”, la fotoluminescenza, la generazione dei raggi catodici tramite luce ultravioletta e altre classi di fenomeni concernenti la generazione o la trasformazione della luce

5. Pur rimanendo valide le equazioni di Maxwell, non è da escludere una diversa relazione tra campo ed energia elettromagnetica.

6. Fotoni.

7. Elettroni e positroni.

appaiano più comprensibili nell'ipotesi di una distribuzione spaziale discontinua dell'energia luminosa. Secondo l'ipotesi che sarà qui considerata, quando un raggio luminoso uscente da un punto si propaga, l'energia non si distribuisce in modo continuo in uno spazio via via più grande; essa consiste invece in un numero finito di quanti di energia, localizzati in un punto dello spazio, i quali si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti e generati solo nella loro interezza.<sup>8</sup>

Planck si oppose alla teoria di Einstein sui quanti di luce e all'ipotesi ondulatoria e corpuscolare della luce, perché l'ipotesi dei fotoni secondo lui era in contraddizione con le equazioni di Maxwell. Ma l'idea di Einstein fu ripresa e sviluppata da de Broglie, che la applicò sia alla materia sia alla radiazione. Il fisico francese, per elaborare una teoria della meccanica ondulatoria, si servì delle considerazioni relativistiche e di alcune analogie tra il formalismo della meccanica analitica e della teoria ondulatoria. Secondo de Broglie la traiettoria di una particella, generalmente determinata dal principio di Fermat-Maupertuis, nel passaggio in una fessura di dimensioni equiparabili alla lunghezza d'onda dell'onda di fase per la diffrazione di quest'ultima, viene deviata.

Le ipotesi di de Broglie furono confermate da Schrödinger, che partendo dagli esperimenti sui fenomeni di interferenza degli elettroni, tenendo però presente l'equazione di Hamilton, sviluppò una nuova teoria della meccanica. Superò le difficoltà derivanti dalla generalizzazione della meccanica ordinaria in meccanica ondulatoria con l'analogia tra ottica geometrica e ondulatoria:

Importanti concetti della teoria ondulatoria, come l'ampiezza, la lunghezza d'onda e la frequenza o più in generale la forma dell'onda, non compaiono affatto nell'analogia perché non ne esiste alcun parallelo meccanico; né viene fatto alcun riferimento a una funzione d'onda. Anche la definizione di  $W$  come corri-

spettivo della fase, senza una definizione della forma dell'onda, non è sufficientemente chiara. Se ci limitiamo a considerare l'analogia nel suo complesso come un conveniente mezzo di raffigurazione, allora il difetto non disturba.<sup>9</sup>

### ALTRE TAPPE FONDAMENTALI DELLA FISICA

Nel 1927, Werner Karl Heisenberg, il bambino prodigio tedesco, annunciò il principio di indeterminazione che affermava quanto segue: se si vuole conoscere la velocità di una particella non se ne può ricavare la posizione, e viceversa.

Fino ad allora, questi erano temi cari alla filosofia, ma dopo la nascita della meccanica quantistica divennero argomento di discussione delle menti eccelse della fisica dell'epoca.

Il *quantum* ricevette un importante impulso al famoso V congresso Solvay di Bruxelles, che si caratterizzò per l'acceso dibattito tra Einstein e Bohr sulla natura della realtà, argomento che ancora oggi tiene impegnati fisici e filosofi. Per gran parte del XX secolo i fisici hanno sostenuto che la meccanica quantistica nega l'esistenza di una realtà al di là di ciò che poteva essere misurabile negli esperimenti.

Anche il fisico statunitense Murray Gell-Mann ci aiuta a comprendere il concetto di meccanica quantistica, a tal proposito scrisse: *quella disciplina misteriosa e fuorviante che nessuno di noi comprende realmente, ma che sappiamo come usare*. Murray aveva ragione, perché è la meccanica quantistica che modella il mondo moderno, pensiamo ai computer, ai telefonini cellulari e perfino alla bomba atomica.

Nel 1859, Kirchhoff elaborò il concetto di corpo nero, affermando che è un perfetto "assorbitore" ed "emettitore" di radiazione, sia la gamma sia l'intensità della radiazione all'interno della cavità del corpo nero non dipendono né dal materiale né dalla forma o dimensione, ma solo dalla temperatura. Il compito che si "accollò" Kirchhoff era conosciuto come problema del corpo nero, cioè misurare la distribuzione spettrale dell'energia nella radiazione,

8. Einstein, Un punto di vista euristico relativo alla generazione e alla trasformazione della luce (1905), in Opere scelte, cit., pp.118-119.

9. E. Schrödinger, Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen, in "Annalen der Physics", 79. 126, pp.496-497.

## 1. Fisica quantistica attraverso i Nobel

che equivale a dire la quantità di energia a ciascuna lunghezza d'onda nello spettro dall'infrarosso all'ultravioletto a una data temperatura e ricavare una formula che riproduca la distribuzione a una qualsiasi temperatura. La formula avrebbe dovuto contenere le seguenti variabili: temperatura del corpo nero e lunghezza d'onda della radiazione emessa. Lo spettro del corpo nero doveva essere un parametro di riferimento per la taratura e la produzione di una lampada con la massima emissione di luce possibile e minima produzione di calore.

Nel 1893, a soli ventinove anni, Wilhelm Wien elaborò una *relazione* matematica che descriveva l'effetto di una variazione di temperatura sulla distribuzione della radiazione di corpo nero. Con l'aumento della temperatura, la lunghezza d'onda alla quale il corpo nero emette la radiazione della massima intensità decresce sempre di più. Anche se molte cose erano già note, la legge di spostamento di Wien rivelava che il prodotto della lunghezza d'onda, alla quale viene emesso il massimo quantitativo di radiazione, per la temperatura del corpo nero è una costante. Questo gli garantì il premio Nobel nel 1911.

Planck si rese conto che la legge di Wien non era valida per le grandi lunghezze d'onda e alle alte temperature, partendo da tre dati fondamentali:

1. la legge di Wien rendeva conto dell'intensità a piccole lunghezze d'onda;
2. non aveva valore nell'ambito dell'infrarosso;
3. la legge di spostamento era sbagliata.

Con l'aiuto dell'intuito elaborò la sua teoria che sottopose a verifica sperimentale, per elaborarla Planck attinse a piene mani nel bacino delle tecniche di Boltzmann, che era il più autorevole sostenitore dell'atomo, fu costretto ad ammettere che l'atomo era più di una *comoda funzione* e si convertì. Fino ad allora, aveva osteggiato la teoria dell'atomo.

L'introduzione della statistica in fisica fu un'innovazione importante, il primo a farlo fu Maxwell; solo successivamente, Boltzmann riprese dal fisico scozzese e consolidò la teoria cinetica dei gas. Secondo il principio di Boltzmann, l'entropia è una misura della probabilità di trovare un sistema in un particolare stato, ma secondo lui non è una legge assoluta, esiste anche la possibilità che un sistema passi da uno stato disordinato ad uno ordinato.

Planck riteneva che il secondo principio della termodinamica avesse validità assoluta, che equivale a dire che l'entropia aumenta sempre; "quasi sempre" per Boltzmann.

Planck si rese conto che solo applicando le tecniche di Boltzmann poteva sostenere la sua formula per la distribuzione della radiazione del corpo nero, ammettendo che gli oscillatori assorbono ed emettono "pacchetti" di energia proporzionali alla loro frequenza di oscillazione. Dovette anche ammettere che era "*il punto essenziale dell'intero calcolo*" e considerare l'energia di ciascuna frequenza composta da "elementi di energia" uguali e indivisibili, che successivamente chiamerà *quanti*.

$E = hv$  è una delle equazioni più famose della scienza, dove  $E$  rappresenta l'energia suddivisa in blocchi di entità  $hv$ ,  $v$  è la frequenza dell'oscillatore,  $h$  è una costante: la costante di Planck.

Un quanto di energia è indivisibile, quindi un oscillatore non ne può assorbire una frazione; l'energia scambiata deve essere un quanto intero o nulla. Quando Planck si rese conto di aver scoperto qualcosa di straordinario e di inatteso, ma soprattutto di non afferrarne appieno il significato, ebbe modo di esprimersi così: "[...] *in poche parole ciò che feci può essere descritto semplicemente come un atto di disperazione.*"

Ciò che quantizzò era l'energia che gli ipotetici e immaginari oscillatori potevano emettere ed assorbire, di fatto non quantizzò, ma suddivise l'energia in frammenti quantizzabili in  $hv$ . Molto di quanto fatto da Planck non fu chiaro neanche a se stesso, inoltre, essendo un conservatore cercò in tutti i modi di far rientrare il quanto nella fisica classica imperante dell'epoca. Nei suoi ultimi anni di vita confidò a un suo allievo: "*È inutile. Dobbiamo convivere con la teoria dei quanti. E credimi, si espanderà.*"

Il primo a *convivere* con i quanti fu Einstein. Quando studiò la soluzione di Planck – per quanto concerne il corpo nero – ebbe modo di esprimersi così: "*Era come se ci fosse mancata la terra sotto i piedi, e in vista non vi fosse nessun punto fermo su cui poter costruire*". Scrisse quattro articoli che furono pubblicati tra marzo e giugno del 1905 e li inviò alla prestigiosa rivista di fisica *Annalen der Physik*. La sua proposta di teoria quantistica sulla luce, che era molto più radicale della teoria di

Planck, era una vera eresia per l'epoca. Einstein ne era consapevole.

Il primo era un articolo che riguardava il quanto. Il secondo ricalcava la sua dissertazione per il dottorato, in cui descriveva un nuovo metodo per la determinazione degli atomi. Nel terzo relazionava su un nuovo modo di vedere il moto browniano. Nel quarto affrontò la problematica legata allo spazio tempo “[...] è soltanto un abbozzo iniziale a questo punto, ed è una elettrodinamica dei corpi in moto, che fa ricorso a una modificazione della teoria dello spazio e del tempo”.

Riguardo a quanto espose nel quarto articolo, ebbe modo di affermare che la sua teoria era una semplice “*modificazione*” delle idee elaborate da Newton. Il suo concetto di *quanto* di luce era innovativo e rappresentava la rottura radicale con il dogma dominante della fisica dell'epoca. Fino ad allora, la luce era considerata un fenomeno ondulatorio, mentre per Einstein la luce e la sua radiazione elettromagnetica erano suddivisibili in quanti, questo all'epoca era un sacrilegio; infatti, per un paio di decenni nessuno gli dette credito. Subito dopo queste quattro pubblicazioni scrisse un quinto articolo contenente una sola equazione:

$$E = mc^2$$

risultato dell'esplosione creativa dalla quale fu preso mentre la elaborava, e che egli stesso descrisse magnificamente in poche e significative parole: “[...] *nella mia mente si scatena una tempesta*”.

Einstein si rese conto che Planck fu portato fuori strada perché difendeva e giustificava ad oltranza la sua equazione, applicando in maniera scorretta le conoscenze scientifiche disponibili all'epoca. La soluzione fu proposta dal barone Rayleigh, ma Planck lo snobbò perché non credeva agli atomi rifiutando così l'uso che Rayleigh faceva del teorema di equipartizione, che invece servì per suddividere l'energia della radiazione del corpo nero tra le diverse lunghezze d'onda presenti nella cavità. In pratica aveva applicato, in maniera impeccabile, la fisica di Newton, Maxwell e Boltzmann, ma c'era un piccolo errore matematico, che successivamente fu corretto da James Jeans. Fu elaborata così la legge di Rayleigh- Jeans. Legge necessaria per predire l'accumulo di energia nella regione dell'ultravioletto, che fu poi denominata *catastrofe dell'ultravioletto*; fortunatamente, in realtà non accadeva nulla.

Einstein iniziò la sua analisi sul corpo nero, ma a differenza di Planck riempì con particelle di gas ed elettroni la cavità, applicò il primo principio della termodinamica, utilizzò la legge di Wien e le tecniche di Boltzmann, pervenne così ad una formula sovrapponibile a quella che spiega come l'entropia di un gas dipenda dal volume che occupa. In pratica, aveva scoperto il quanto di luce senza “passare” per la legge di radiazione del corpo nero di Planck. Planck aveva quantizzato solo l'emissione e l'assorbimento della radiazione elettromagnetica, Einstein quantizzò quest'ultima: la luce in quanto tale; dimostrando come questa a volte si comporta come le particelle di un gas.

Einstein aveva introdotto i quanti di luce per analogia passando per l'ingresso secondario, fece anche leva sul termine euristico, che introdusse in maniera intelligente e non a caso. Con il *suo* quanto di luce superò lo stallo che aveva bloccato il fisico tedesco Hertz, che non fu più in grado di spiegare la maggiore luminosità della scintilla che scoccava da una delle due sfere metalliche in presenza di luce ultravioletta. Lenard, assistente di Hertz, constatò anche una maggior emissione di elettroni senza variazione della loro energia individuale.

Einstein adottò una soluzione quantistica semplice ed elegante: “*Se la luce è composta di quanti, a un aumento dell'intensità corrisponde un aumento dei quanti, e quando un raggio luminoso di maggiore intensità colpisce la placca metallica, al maggior numero di quanti corrisponde una maggiore emissione di elettroni*”.

Lenard scoprirà in seguito, che l'energia degli elettroni non dipende dall'intensità della luce ma dalla frequenza, infatti l'energia del quanto di luce è direttamente proporzionale alla frequenza. Ne è un esempio il quanto della luce rossa, che ha una frequenza bassa e ha minore energia rispetto al quanto della luce blu, quest'ultimo ha una frequenza maggiore. La radiazione ultravioletta libererà elettroni con maggiore energia cinetica rispetto a quella emessa dagli elettroni della luce rossa.

Il premio Nobel Millikan confermò le intuizioni di Einstein: “[...] *ho passato dieci anni della mia vita a sottoporre a controlli quell'equazione del 1905; contrariamente ad ogni mia aspettativa fui costretto ad ammettere che era verificata con certezza, nonostante sembrasse assurda, poiché contraddiceva tutto ciò che si sapeva sulla interferenza della luce...*”.