

1 Introduzione: la crisi della fisica classica e la nascita di nuovi paradigmi

Alla fine dell'Ottocento la fisica classica – meccanica newtoniana, termodinamica, elettromagnetismo di Maxwell – sembrava in grado di descrivere ogni fenomeno naturale. Eppure, tra la fine dell'Ottocento e i primi decenni del Novecento, emersero problemi profondi che portarono a due rivoluzioni concettuali distinte ma complementari:

- la **relatività ristretta** (Einstein, 1905): l'invarianza della velocità della luce in tutti i sistemi di riferimento inerziali impose una revisione radicale dei concetti di spazio e tempo, rendendo obsoleta la meccanica newtoniana per corpi in moto a velocità prossime a c ;
- la **fisica quantistica** (1900–1927): tre fenomeni sperimentali ben precisi resistevano a ogni tentativo di spiegazione classica e rivelarono che l'energia a livello microscopico non è continua, ma *quantizzata*.

Questa dispensa si concentra sulla seconda rivoluzione. I tre fenomeni chiave sono:

1. la **radiazione del corpo nero**;
2. l'**effetto fotoelettrico**;
3. gli **spettri di emissione/assorbimento** degli atomi.

La loro risoluzione, tra il 1900 e il 1913, richiese l'introduzione di una idea radicalmente nuova: l'*energia è quantizzata*.

Contesto nelle Indicazioni Nazionali

Il DM 211/2010 per il Liceo Scientifico prevede, al quinto anno, lo studio della «*crisi della fisica classica*» e degli «*elementi di fisica quantistica*», con particolare attenzione ai fenomeni che hanno reso necessaria la quantizzazione dell'energia (corpo nero, effetto fotoelettrico, modello atomico di Bohr).

2 Il corpo nero e la catastrofe ultravioletta

2.1 Che cos'è un corpo nero

Corpo nero

Un **corpo nero ideale** è un oggetto che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente, indipendentemente dalla frequenza e dalla direzione, e la ri-emette in equilibrio termico con l'ambiente circostante.

In pratica un piccolo foro in una cavità con pareti assorbenti ne è una buona approssimazione: la radiazione che entra dal foro viene riflessa più volte dalle pareti fino a essere completamente assorbita, e la luce che fuoriesce rappresenta la radiazione di corpo nero alla temperatura T delle pareti.



Figure 1: Cavit  di corpo nero. Le pareti assorbono ed emettono continuamente radiazione in equilibrio termico alla temperatura T . La luce che fuoriesce dal foro   caratterizzata dall'emittanza spettrale M_ν , che dipende solo da T , non dal materiale delle pareti.

La termodinamica classica concorda bene con gli esperimenti per le basse frequenze ma diverge per $\nu \rightarrow +\infty$.

2.4 La soluzione di Planck (1900): la quantizzazione dell'energia

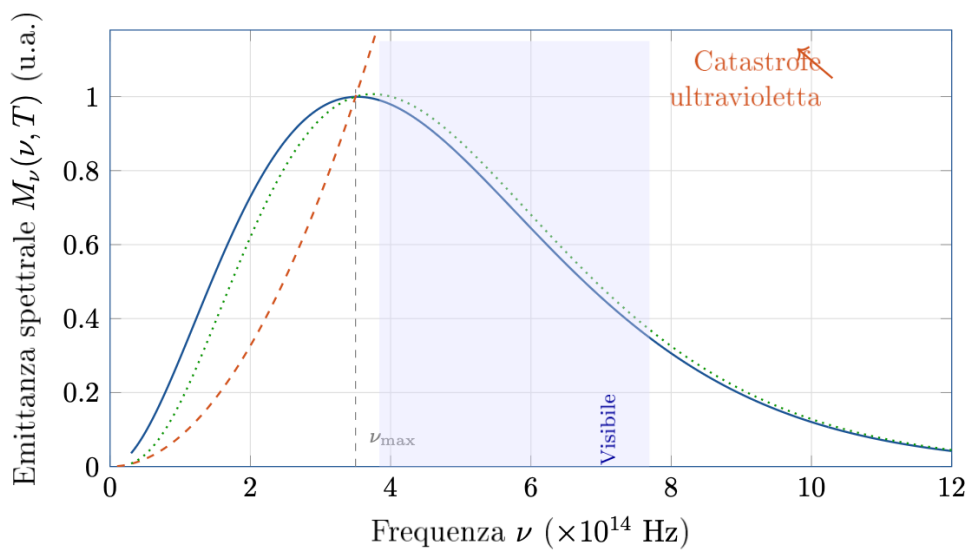
Per riprodurre i dati sperimentali, Planck dovette introdurre un'*ipotesi* radicalmente nuova sulla natura dello scambio di energia tra materia e luce.

Nella fisica classica l'energia   una grandezza *continua*: un oggetto pu  cedere o acquistare qualsiasi quantit  di energia, per quanto piccola, esattamente come si pu  versare dell'acqua in un bicchiere nella quantit  desiderata.

Planck propose invece che lo scambio di energia avvenga in modo *discreto*: esistono dei «pacchetti» minimi di energia che non possono essere ulteriormente suddivisi.   come pagare con monete di taglio fisso – si pu  pagare 1, 2, 3... ma non 1.37 esatti senza resto. Ogni pacchetto elementare prende il nome di **quanto di energia**, e la sua dimensione dipende dalla frequenza della luce:

$$E = h\nu,$$

dove $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$   la **costante di Planck**. La luce ad alta frequenza (es. ultravioletto) ha quanti pi  “costosi” (E grande), quella a bassa frequenza (es. infrarosso) ha quanti pi  “economici” (E piccola). Le energie scambiate possibili sono quindi $h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \dots$ e mai valori intermedi.



Significato concettuale

L'ipotesi di Planck rompe con la fisica classica: l'energia non varia con continuità, ma a *salti discreti*. Questo è il primo seme della **quantizzazione**.

3 L'effetto fotoelettrico e i fotoni di Einstein

3.1 Il fenomeno sperimentale

Heinrich Hertz (1887) e Philipp Lenard (1902) osservarono che illuminando una superficie metallica con luce di frequenza sufficientemente alta vengono emessi elettroni. Le caratteristiche sperimentali *incomprensibili* per la fisica classica sono:

Grandezza	Previsione classica	Risultato sperimentale
Energia degli e^-	proporzionale a I (intensità)	proporzionale a ν (frequenza), indipendente da I
Frequenza di soglia	nessuna	esiste ν_0 sotto cui non c'è emissione
Ritardo di emissione	atteso (accumulo di energia)	istantaneo ($< 10 \text{ ns}$)

3.2 L'interpretazione di Einstein (1905): dall'ipotesi di Planck al fotone

Fonte: Einstein, A. (1905). *Annalen der Physik*, **17**, 132–148.

Per comprendere il passo compiuto da Einstein è utile confrontarlo esplicitamente con quello di Planck.

L'ipotesi di Planck (1900) riguardava esclusivamente lo *scambio* di energia tra materia e radiazione: la materia emette e assorbe luce solo a pacchetti di energia $h\nu$, ma la luce stessa, una volta emessa, era ancora pensata come un'onda continua, esattamente come nell'elettromagnetismo di Maxwell. In altre parole, Planck quantizzava il *meccanismo di emissione*, non la natura della luce.

Einstein (1905) compie un passo molto più radicale: propone che la luce *sia fisicamente costituita* da pacchetti discreti di energia, i **fotoni**, anche durante la propagazione. Un fascio luminoso non è un'onda continua ma un flusso di «granelli»

di energia. Ogni fotone trasporta un'energia

$$E = h\nu$$

e quando colpisce la superficie metallica interagisce con *un singolo elettrone*, cedendogli tutta la sua energia in un'unica interazione localizzata – non distribuita come farebbe un'onda.

Questa differenza concettuale spiega i tre fatti sperimentali altrimenti incomprensibili:

- **Energia degli elettroni indipendente dall'intensità:** ogni elettrone riceve l'energia di *un* fotone ($h\nu$); l'intensità determina quanti fotoni arrivano, non quanto «pesa» ciascuno.
- **Frequenza di soglia:** se $h\nu < \phi$ il singolo fotone non ha abbastanza energia per strappare l'elettrone dalla superficie, a prescindere da quanti fotoni arrivano.
- **Emissione istantanea:** l'energia non si accumula lentamente come in un'onda; il primo fotone con $h\nu \geq \phi$ che raggiunge un elettrone lo espelle immediatamente.

Planck vs. Einstein: cosa aggiunge il fotone

	Planck (1900)	Einstein (1905)
Cosa è quantizzato	lo scambio materia-luce	la luce stessa
Natura della luce	onda continua (Maxwell)	flusso di fotoni
Fenomeno spiegato	spettro del corpo nero	effetto fotoelettrico
Novità concettuale	energia scambiata a «dosi»	luce come «granelli»

Einstein riconobbe esplicitamente il debito verso Planck, ma sottolineò che la sua ipotesi era più profonda: non si trattava solo di un artificio matematico, ma di una realtà fisica della luce.

L'equazione del fotoelettrico diventa:

Equazione di Einstein per l'effetto fotoelettrico

$$K_{\max} = h\nu - \phi,$$

dove $\phi = h\nu_0$ è la **funzione lavoro** del metallo (energia minima per estrarre un elettrone) e $K_{\max}$ è l'energia cinetica massima degli elettroni emessi.

L'intensità della luce determina il *numero* di fotoni, non la loro energia: aumentare I significa estrarre più elettroni, non più veloci.

4 Gli spettri atomici e il modello di Bohr

4.1 Gli spettri di emissione: un mistero classico

Ogni elemento chimico, se eccitato (per riscaldamento o scarica elettrica), emette luce solo a lunghezze d'onda *discrete* e caratteristiche: le **righe spettrali**.

Per l'idrogeno, Balmer (1885) trovò empiricamente che le lunghezze d'onda della serie visibile soddisfano:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

con $R_H = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ costante di Rydberg.

La fisica classica non aveva nessuna spiegazione: un elettrone in orbita circolare dovrebbe irradiare continuamente (perdendo energia) e spirare verso il nucleo in $\sim 10^{-10} \text{ s}$.

4.2 Il modello di Bohr (1913)

Niels Bohr propose tre **postulati**:

P1. Gli elettroni si muovono in **orbite stazionarie quantizzate**, senza irradiare.

La condizione di quantizzazione del momento angolare è:

$$L = m_e v r = n\hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \left(\hbar = \frac{h}{2\pi} \right).$$

P2. Un elettrone che passa da un'orbita di energia E_n a una di energia $E_m < E_n$ emette un fotone di frequenza:

$$h\nu = E_n - E_m.$$

P3. La transizione all'orbita più interna ($n = 1$, **stato fondamentale**) è quella di minima energia; l'atomo non irradia in questo stato.

5.1 L'effetto Compton (1923): il fotone ha quantità di moto

Fonte: Compton, A. H. (1923). *Physical Review*, **21**(5), 483–502.

Einstein aveva dimostrato che la luce si comporta come un flusso di particelle (fotoni) con energia $E = h\nu$. Ma una particella ha anche una *quantità di moto*. Arthur Compton (1923) dimostrò sperimentalmente che il fotone possiede una quantità di moto

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

5.3 La dualità onda-corpuscolo (de Broglie, 1924)

Fonte: de Broglie, L. (1924). *Thèses de doctorat*. Université de Paris; pubblicato in *Annales de Physique*, **3**, 22 (1925). Davisson, C. J., & Germer, L. H. (1927). *Physical Review*, **30**(6), 705–740.

Il contesto. Agli inizi degli anni Venti la fisica si trovava in una situazione paradossale. Da un lato, la luce – tradizionalmente descritta come onda elettromagnetica – si comportava in certi esperimenti come un flusso di particelle (fotoni): era la lezione dell'effetto fotoelettrico e dell'effetto Compton. Dall'altro, non era chiaro perché le orbite di Bohr fossero stabili proprio a quei valori discreti di raggio ed energia, e non ad altri.

Louis de Broglie, studente di dottorato a Parigi, si pose una domanda simmetrica: se la luce – classicamente un'onda – può comportarsi come una particella, perché la materia – classicamente composta di particelle – non potrebbe comportarsi come un'onda? Questa idea, sviluppata nella sua tesi di dottorato (1924), era fortemente

ispirata dalla *simmetria* tra materia e luce che de Broglie riteneva fondamentale in natura.

L'ipotesi. Einstein aveva mostrato che il fotone ha quantità di moto $p = h/\lambda$. De Broglie invertì questa relazione: ad ogni particella materiale di quantità di moto p è associata una lunghezza d'onda

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

5.4 Il principio di indeterminazione (Heisenberg, 1927)

Fonte: Heisenberg, W. (1927). *Zeitschrift für Physik*, **43**, 172–198.

La dualità onda-corpuscolo porta a una conseguenza fondamentale: non è possibile conoscere simultaneamente con precisione arbitraria la posizione x e la velocità v di una particella. Poiché $p = mv$, il principio si scrive sia in termini di quantità di moto che di velocità:

Principio di indeterminazione (Heisenberg, 1927)

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad \Longleftrightarrow \quad \Delta x \cdot \Delta v \geq \frac{\hbar}{2m}.$$

Δx è l'indeterminazione sulla posizione, Δv quella sulla velocità, m la massa della particella. La forma con Δv è valida in regime non relativistico ($v \ll c$), che è una buona approssimazione per gli elettroni negli atomi leggeri ($v \approx c/137$ per il livello fondamentale dell'idrogeno).

Questo non è un limite tecnologico (non dipende dalla precisione degli strumenti) ma una proprietà *intrinseca* della natura: più precisamente si localizza una particella (Δx piccolo), più grande è l'incertezza sulla sua velocità (Δv grande), e viceversa.

5.5 La funzione d'onda e la meccanica quantistica (Schrödinger, 1926)

Fonte: Schrödinger, E. (1926). *Annalen der Physik*, **79**, 361–376; Born, M. (1926). *Zeitschrift für Physik*, **37**, 863–867.

Cos'è la funzione d'onda. Nella meccanica classica lo stato di una particella è completamente determinato dalla sua posizione $\vec{r}$ e dalla sua velocità $\vec{v}$ in ogni istante. Nella meccanica quantistica questo non è più possibile (principio di indeterminazione): lo stato della particella è descritto da una **funzione d'onda** $\psi(\vec{r}, t)$, una funzione matematica che dipende dalla posizione e dal tempo.

La funzione d'onda è in generale un numero *complesso* e non ha un significato fisico diretto. Il suo significato fisico emerge attraverso il **modulo quadro** $|\psi(\vec{r}, t)|^2$:

Interpretazione di Born (1926)

$|\psi(\vec{r}, t)|^2 dV$ è la **probabilità** di trovare la particella nel volumetto dV attorno al punto $\vec{r}$ all'istante t . La funzione d'onda non dice *dove* si trova la particella, ma *quanto è probabile* trovarla in ciascuna regione dello spazio.

La condizione che la particella si trovi da qualche parte nello spazio impone la **normalizzazione**:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(\vec{r}, t)|^2 dV = 1.$$