CAPITOLO

13

I quanti: la luce e la materia

«Secondo l'ipotesi che qui si vuole considerare, quando un raggio di luce si propaga a partire da un punto, l'energia non si distribuisce in modo continuo su spazi sempre più grandi, ma consiste di un numero finito di quanti di energia localizzati in punti dello spazio, che si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti e prodotti soltanto per intero.» — Albert Einstein, Su un punto di vista euristico relativo alla produzione e alla trasformazione della luce (1905), introduzione (traduzione della redazione)

OBIETTIVI

1. Descrivere lo spettro del corpo nero, applicare la legge di Wien e spiegare perché la fisica classica falliva.
2. Enunciare l'ipotesi di Planck e calcolare l'energia di un quanto, in joule e in elettronvolt.
3. Descrivere i fatti dell'effetto fotoelettrico e spiegarli con l'equazione di Einstein, anche leggendo un grafico.
4. Riconoscere nel fotone una particella senza massa a riposo, con energia e quantità di moto, e discutere il dualismo onda–particella.
5. Calcolare la lunghezza d'onda di de Broglie e spiegare perché gli effetti ondulatori della materia si vedono solo nel microcosmo.
6. Enunciare il principio di indeterminazione e discuterne il significato fisico e filosofico.

INDICE DEL CAPITOLO

13.1 Il corpo nero e i quanti di Planck 2
13.2 L'effetto fotoelettrico 5
13.3 Onda o particella? 14
13.4 Le onde di materia 16
13.5 Il principio di indeterminazione 18

Fisica 5 · Parte V · La fisica del Novecento · versione 1.0
Capitolo 13: I quanti: la luce e la materia · pagine 367–392 del volume completo · estratto per lo studio

Il filamento di una vecchia lampadina, la piastra di una stufa elettrica, il ferro nella fucina di un fabbro: scaldati, prima diventano rosso cupo, poi arancioni, poi quasi bianchi. Il colore della luce dice la temperatura, e un metallurgista esperto la stimava a occhio. Sembra un fatto modesto. Eppure, alla fine dell'Ottocento, proprio la luce dei corpi caldi mise in crisi la fisica classica, che pure aveva spiegato con successo le orbite dei pianeti, il calore e le onde elettromagnetiche.

Questo capitolo racconta come, fra il 1900 e il 1927, i fisici dovettero accettare due idee che sembravano contraddire tutto ciò che sapevano: l'energia della luce arriva a «pacchetti», i quanti, e la materia si comporta anche come un'onda. Dal corpo nero di Planck passerai all'effetto fotoelettrico di Einstein, agli elettroni che interferiscono come la luce di Young e al principio di indeterminazione di Heisenberg: le basi della fisica del microcosmo, che nel capitolo 14 ti porterà nell'atomo e nel nucleo.

13.1 Il corpo nero e i quanti di Planck

13.1.1 La luce dei corpi caldi

DA RICORDARE

Dal volume del quarto anno e dai capitoli precedenti

Ogni corpo emette radiazione per irraggiamento, tanta più quanto più è caldo: la potenza irraggiata cresce come T^4 (legge di Stefan-Boltzmann, Fisica 4, capitolo 7). L'energia di agitazione termica di una molecola è dell'ordine di $k_B T$, con $k_B = 1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K (Fisica 4, capitolo 9).

La luce è un'onda elettromagnetica, con $c = \lambda f$; il visibile va da circa 400 nm (violetto) a 700 nm (rosso), fra l'ultravioletto e l'infrarosso (capitolo 10). Le frange di Young sono la prova del suo aspetto ondulatorio (Fisica 4, capitolo 16). L'elettronvolt è l'energia che una carica e acquista attraversando 1 V: 1 eV = $1{,}60 \times 10^{-19}$ J (capitolo 3).

Lo spettro emesso da un corpo caldo dipende in generale anche dal materiale e dalla superficie, ma c'è un caso ideale in cui dipende soltanto dalla temperatura: un corpo che assorbe *tutta* la radiazione che lo colpisce. Gustav Kirchhoff lo chiamò nel 1860 **corpo nero**; «nero» riguarda l'assorbimento, non il colore, e un corpo nero caldo può essere luminosissimo. Un buon modello è una cavità con un piccolo foro, come un forno visto dallo spioncino: la radiazione che entra rimbalza sulle pareti finché viene assorbita, e quella che esce è in equilibrio con le pareti. Il Sole, le stelle e il filamento di una lampadina si comportano, in buona approssimazione, come corpi neri.

Alla fine dell'Ottocento gli spettri del corpo nero erano stati misurati con grande precisione, soprattutto a Berlino. La Figura 13.1 riporta l'intensità della radiazione emessa per unità di lunghezza d'onda a tre temperature. Ogni curva parte da zero alle lunghezze d'onda brevissime, sale fino a un massimo e poi ridiscende lentamente. Al crescere della temperatura la curva si alza a tutte le lunghezze d'onda, e l'area sotto la curva, che rappresenta la potenza totale, cresce come T^4: è la legge di Stefan-Boltzmann. Ma cambia anche la forma: il massimo si sposta verso lunghezze d'onda più corte.

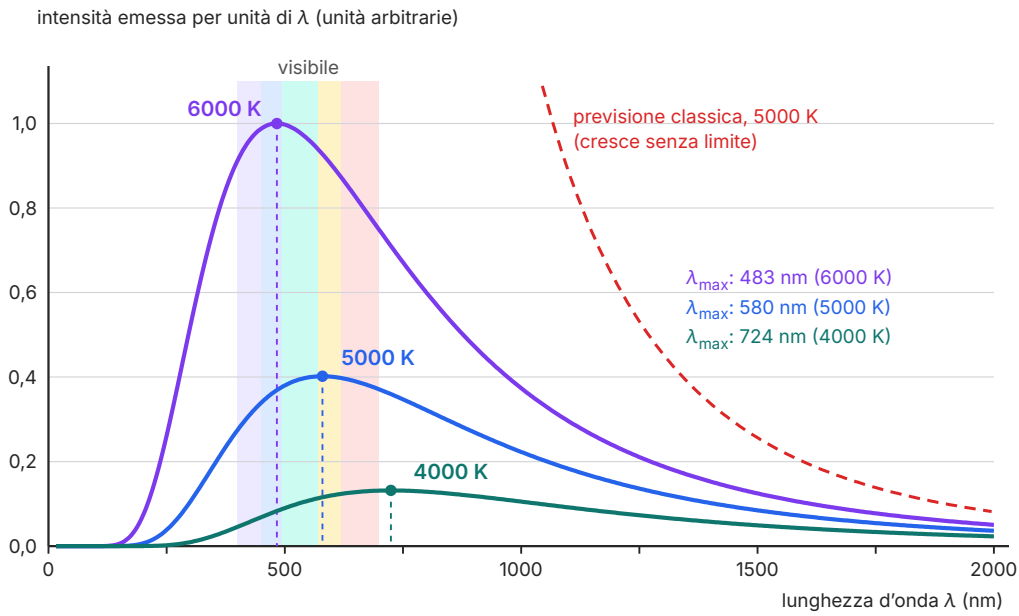


Figura 13.1 Lo spettro del corpo nero a 4000 K, 5000 K e 6000 K, calcolato con la legge di Planck, nella stessa scala per le tre curve (1 = massimo della curva a 6000 K). Il pallino segna il massimo, alla lunghezza d'onda λ_{max} della legge di Wien. Le fasce colorate indicano il visibile. La linea tratteggiata rossa è la previsione della fisica classica (legge di Rayleigh-Jeans) a 5000 K: si avvicina alla curva vera solo a lunghezze d'onda molto lunghe, oltre il bordo destro del grafico, e cresce senza limite verso l'ultravioletto.

Nel 1893 Wilhelm Wien trovò la regola che lega la posizione del massimo alla temperatura: la lunghezza d'onda λ_{max} a cui l'emissione è massima è inversamente proporzionale alla temperatura assoluta. È la **legge di Wien**:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2{,}898 \times 10^{-3}\ \text{m·K}$$

Raddoppiando la temperatura assoluta, la lunghezza d'onda del massimo si dimezza: ecco la successione dei colori del ferro nella fucina, e un modo di misurare la temperatura di un corpo lontano. La superficie del Sole, a circa 5800 K, ha il massimo a $\lambda_{max} = 2{,}898 \times 10^{-3}$ m·K / 5800 K $\approx 5{,}0 \times 10^{-7}$ m = 500 nm, in pieno visibile. Il filamento di una lampadina a incandescenza, a circa

2800 K, ha il massimo a circa 1,0 μm, nell'infrarosso: ecco perché, come hai visto nel capitolo 5, la maggior parte della sua energia non diventa luce. Il nostro corpo, a circa 310 K, emette soprattutto a 9–10 μm: è la radiazione che vedono le termocamere.

13.1.2 Una catastrofe annunciata

La fisica classica aveva gli strumenti per calcolare la forma della curva: le onde di Maxwell nella cavità e la teoria cinetica per lo scambio di energia con le pareti. Il calcolo, di Lord Rayleigh e James Jeans, assegna in media a ogni modo di vibrazione della radiazione nella cavità la stessa energia, dell'ordine di $k_B T$ (è il principio di equipartizione); ma i modi possibili sono tanto più numerosi quanto più corta è la lunghezza d'onda, senza limite. Ne segue una curva che concorda con le misure alle lunghezze d'onda lunghe e che, verso l'ultravioletto, cresce all'infinito (linea tratteggiata nella Figura 13.1): un corpo nero dovrebbe emettere un'energia infinita, e un forno acceso dovrebbe accecarci di raggi ultravioletti e X.

È evidentemente falso. Il fallimento fu chiamato più tardi, nel 1911, dal fisico Paul Ehrenfest, **catastrofe ultravioletta**. Il nome è successivo ai fatti, ma descrive bene la situazione: non un piccolo disaccordo da correggere con una misura migliore, ma una previsione assurda che nasceva da principi considerati certissimi.

13.1.3 L'ipotesi di Planck

Max Planck, professore a Berlino, lavorava sul corpo nero da anni. Nell'ottobre del 1900, partendo dalle misure più recenti dei suoi colleghi, trovò una formula che le riproduceva perfettamente a tutte le lunghezze d'onda: è la legge con cui sono calcolate le curve della Figura 13.1. Restava da giustificarla. Il 14 dicembre 1900, in una seduta della Società tedesca di fisica, Planck presentò la sua derivazione, che conteneva un'ipotesi del tutto estranea alla fisica classica: le cariche che oscillano nelle pareti della cavità con frequenza f non possono scambiare energia con la radiazione in quantità qualsiasi, ma soltanto per multipli interi di una quantità minima, il **quanto** di energia,

$$E = hf$$

dove h è una nuova costante universale, oggi chiamata **costante di Planck**: $h = 6{,}626 \times 10^{-34}$ J·s ($6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s negli esercizi). Dal 2019 il suo valore è fissato esattamente, e serve a definire il kilogrammo nel Sistema Internazionale.

Perché l'ipotesi elimina la catastrofe? Alle frequenze basse il quanto hf è piccolo rispetto all'energia termica $k_B T$, lo scambio è quasi continuo e le due curve coincidono. Alle frequenze alte hf è molto più grande di $k_B T$: l'agitazione termica delle pareti riesce di rado a mettere insieme un pacchetto così grande, e quei modi restano quasi spenti. La curva scende, e l'energia totale è finita. A 5000 K, per esempio, $k_B T \approx 0{,}43$ eV, mentre un quanto di luce violetta vale circa 3 eV e uno di ultravioletto lontano più di 10 eV.

Planck non pensava di aver fatto una rivoluzione: considerava la quantizzazione un artificio di calcolo sul modo in cui la materia emette e assorbe, non sulla natura della luce, e per anni cercò di farla rientrare nella fisica classica. Molto più tardi, in una lettera del 1931, definì la sua scelta del 1900 «un atto di disperazione». Il premio Nobel per la fisica del 1918 gli fu assegnato per la scoperta dei quanti di energia, e il 14 dicembre 1900 è spesso indicato come la data di nascita della fisica quantistica.

ESEMPIO SVOLTO

Il colore di una stella e la grandezza di un quanto

Problema. La luce di una stella ha il massimo di emissione a 400 nm. a) Stima la temperatura della sua superficie, considerandola un corpo nero. b) Calcola l'energia di un quanto di frequenza corrispondente a 400 nm, in joule e in elettronvolt. c) Confrontala con l'energia termica $k_B T$ alla stessa temperatura.

a) Dalla legge di Wien: $T = 2{,}898 \times 10^{-3}\ \text{m·K} / (4{,}00 \times 10^{-7}\ \text{m}) = 7{,}2 \times 10^{3}\ \text{K}$. È più calda del Sole.

b) La frequenza è $f = c/\lambda = 3{,}00 \times 10^{8}\ \text{m/s} / 4{,}00 \times 10^{-7}\ \text{m} = 7{,}50 \times 10^{14}\ \text{Hz}$; il quanto vale $E = hf = 6{,}63 \times 10^{-34}\ \text{J·s} \cdot 7{,}50 \times 10^{14}\ \text{Hz} = 4{,}97 \times 10^{-19}\ \text{J}$. In elettronvolt: $4{,}97 \times 10^{-19}\ \text{J} / 1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{J/eV} = 3{,}11\ \text{eV}$.

c) $k_B T = 1{,}38 \times 10^{-23}\ \text{J/K} \cdot 7{,}2 \times 10^{3}\ \text{K} = 9{,}9 \times 10^{-20}\ \text{J} \approx 0{,}62\ \text{eV}$. Il quanto è circa cinque volte maggiore dell'energia termica tipica.

Osservazione. Il massimo cade dove hf vale qualche volta $k_B T$; alle frequenze più alte i quanti sono troppo «cari» per l'agitazione termica, e la curva scende.

13.2 L'effetto fotoelettrico

13.2.1 I fatti

Nel 1887 Heinrich Hertz, mentre produceva le onde elettromagnetiche (capitolo 10), notò che le scintille scoccavano più facilmente fra elettrodi illuminati da luce ultravioletta. L'anno dopo Wilhelm Hallwachs mostrò che una lastra di zinco carica negativamente, collegata a un elettroscopio (capitolo 1), si scarica sotto la luce ultravioletta, ma non se è carica positivamente, né con la luce visibile, per quanto intensa. Nel 1899 J. J. Thomson identificò le cariche che lasciano il metallo: sono elettroni. Il fenomeno per cui la luce estrae elettroni da un metallo si chiama **effetto fotoelettrico**, e gli elettroni emessi sono detti **fotoelettroni**.

Per studiarlo in modo quantitativo si usa un apparato come quello della Figura 13.2. In un tubo a vuoto la luce, che entra da una finestra di quarzo trasparente all'ultravioletto, colpisce un elettrodo metallico, il catodo; i fotoelettroni che raggiungono l'altro elettrodo, l'anodo, chiudono il circuito, e l'amperometro misura la corrente. Un generatore regolabile permette di va-

riare la differenza di potenziale fra anodo e catodo e di invertirla: con l'anodo positivo gli elettroni sono accelerati verso di esso, con l'anodo negativo sono frenati.

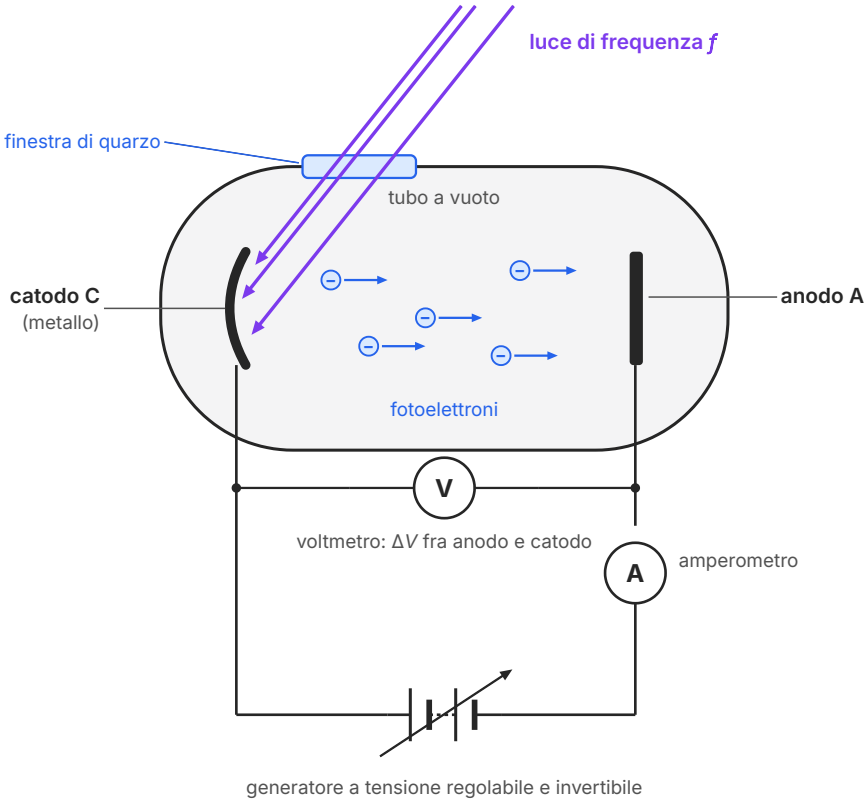


Figura 13.2 L'apparato per studiare l'effetto fotoelettrico (schema). La luce estrae elettroni dal catodo; quelli che raggiungono l'anodo producono la corrente misurata dall'amperometro. Il generatore regolabile fissa la differenza di potenziale fra anodo e catodo, misurata dal voltmetro, e può invertirla per frenare gli elettroni.

Con luce di una data frequenza e l'anodo positivo, la corrente cresce con la tensione fino a un valore massimo, la **corrente di saturazione**, quando tutti i fotoelettroni emessi arrivano all'anodo (Figura 13.3). Rendendo l'anodo negativo, solo gli elettroni abbastanza veloci riescono a raggiungerlo contro il campo frenante, e la corrente diminuisce; si annulla quando la tensione frenante raggiunge un valore $\Delta V_{\text{arresto}}$, il **potenziale di arresto**, che ferma anche gli elettroni più veloci. Per la conservazione dell'energia (capitolo 3), l'energia cinetica massima dei fotoelettroni è

$$K_{\max} = e\,\Delta V_{\text{arresto}}$$

Misurare una tensione, quindi, equivale a misurare un'energia: un potenziale di arresto di 0,80 V significa che i fotoelettroni più veloci hanno 0,80 eV di energia cinetica.

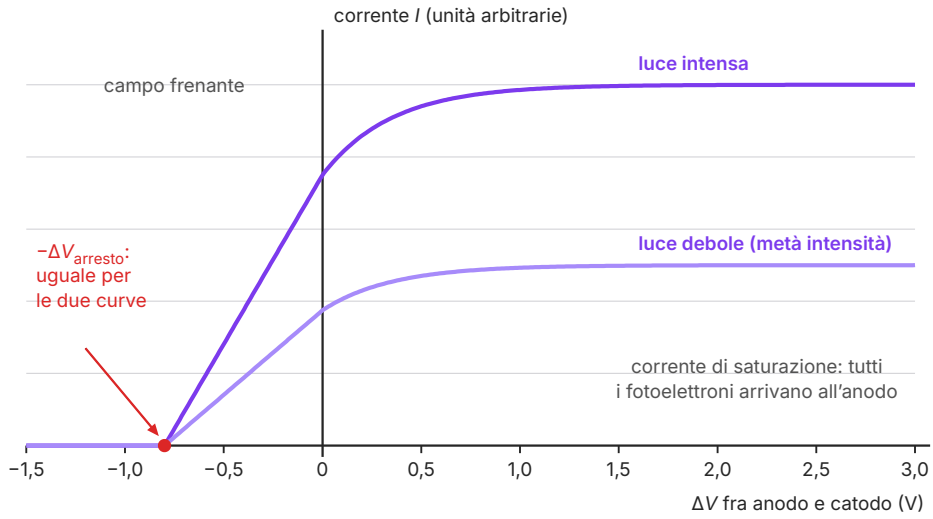


Figura 13.3 La corrente fotoelettrica in funzione della differenza di potenziale fra anodo e catodo, per luce della stessa frequenza e di due intensità diverse (andamento qualitativo, per un catodo di sodio illuminato con luce di 400 nm). L'intensità cambia la corrente di saturazione, cioè il numero di elettroni emessi; il potenziale di arresto, cioè l'energia dei più veloci, è lo stesso.

Le misure, completate nel 1902 da Philipp Lenard, rivelarono quattro fatti:

- **Esiste una frequenza di soglia.** Per ogni metallo c'è una frequenza minima f_0, la **frequenza di soglia**, al di sotto della quale non viene emesso nessun elettrone, per quanto intensa sia la luce. Per lo zinco la soglia è nell'ultravioletto: per questo Hallwachs non otteneva nulla con la luce visibile.
- **L'energia degli elettroni non dipende dall'intensità.** $K_{\max}$ cresce con la frequenza della luce, ma non cambia se la luce è più intensa (Figura 13.3).
- **L'intensità cambia il numero degli elettroni.** La corrente di saturazione è proporzionale all'intensità della luce.
- **L'emissione è immediata.** Anche con luce debolissima i primi elettroni escono senza un ritardo misurabile.

Per la teoria ondulatoria questi fatti erano incomprensibili. Un'onda trasporta energia distribuita in modo continuo sul suo fronte, e un'onda più intensa trasporta più energia: dovrebbe scuotere gli elettroni più forte e farli uscire più veloci, a qualunque frequenza. Con luce debole, poi, un elettrone dovrebbe accumulare energia per un tempo lungo prima di poter uscire: i calcoli davano ritardi di minuti o più. Le misure dicevano l'opposto, punto per punto.

13.2.2 Einstein e i quanti di luce

Nel marzo del 1905, nel primo dei lavori del suo «anno mirabile», Albert Einstein propose di prendere sul serio l'ipotesi di Planck ben oltre ciò che Planck stesso aveva immaginato: non solo lo scambio di energia fra materia e radiazione avviene a pacchetti, ma è la luce stessa a essere fatta di pacchetti. È il passo dell'articolo che hai letto in epigrafe: l'energia della luce non è distribuita con continuità sul fronte d'onda, ma concentrata in quanti che si muovono senza dividersi e vengono assorbiti o prodotti soltanto per intero. Una luce di frequenza f è un flusso di quanti di luce, ciascuno di energia hf; oggi li chiamiamo fotoni.

Con questa ipotesi l'effetto fotoelettrico diventa semplice. Un fotone che colpisce il metallo cede tutta la sua energia hf a un solo elettrone. Per uscire, l'elettrone deve spendere una certa energia per vincere l'attrazione del metallo: la minima energia necessaria è il **lavoro di estrazione** W, caratteristico del metallo e dell'ordine di qualche elettronvolt (Tabella A.5: 2,3 eV per il sodio, 4,3 eV per lo zinco). Ciò che resta diventa energia cinetica, e gli elettroni che partono dalla superficie senza perdere altra energia escono con l'energia massima. È l'equazione di Einstein per l'effetto fotoelettrico:

$$K_{\max} = hf - W$$

Ora i quattro fatti si spiegano uno per uno.

- Se $hf < W$ nessun fotone, da solo, ha l'energia per estrarre un elettrone, e aumentare l'intensità significa solo mandare più fotoni ugualmente insufficienti. La soglia è $f_0 = W/h$.
- $K_{\max}$ dipende dall'energia del singolo fotone, cioè dalla frequenza, e cresce linearmente con essa; non dipende da quanti fotoni arrivano.
- Una luce più intensa, della stessa frequenza, porta più fotoni al secondo, ed estrae più elettroni al secondo: cresce la corrente.
- L'energia non si accumula a poco a poco: arriva tutta insieme, con il primo fotone che colpisce un elettrone.

ERRORE FREQUENTE

Intensità o frequenza? E quale «quanto»?

Nell'effetto fotoelettrico l'intensità della luce decide *quanti* elettroni escono, la frequenza decide con *quale energia* massima escono, e se escono. Una luce rossa intensissima non estrae elettroni dallo zinco; una debole luce ultravioletta sì. E $K_{\max}$ cresce linearmente con f ma non è proporzionale a f: raddoppiando la frequenza più che raddoppia.

Non confondere poi i quanti di Planck con quelli di Einstein: Planck (1900) quantizzò lo *scambio* di energia fra radiazione e materia, Einstein (1905) la *luce stessa*, un'ipotesi che per quasi vent'anni pochi accettarono, Planck compreso.

ESEMPIO SVOLTO

Il sodio illuminato dalla luce violetta

Problema. Un catodo di sodio (W = 2,3 eV) è illuminato con luce di lunghezza d'onda 400 nm. Calcola a) l'energia di un fotone in eV, b) l'energia cinetica massima dei fotoelettroni e il potenziale di arresto, c) la loro velocità massima, d) la frequenza e la lunghezza d'onda di soglia del sodio.

a) Conviene usare hc = 1240 eV·nm (Tabella A.1): $E = hf = hc/\lambda$ = 1240 eV·nm / 400 nm = 3,10 eV.

b) $K_{max} = hf - W$ = 3,10 eV − 2,3 eV = 0,8 eV = 0,8 · 1,60 × 10^{-19} J ≈ 1,3 × 10^{-19} J. Il potenziale di arresto è $\Delta V_{arresto} = K_{max}/e$ = 0,8 V.

c) Da $\frac{1}{2}m_e v^2 = K_{max}$: $v = \sqrt{(2 \cdot 1{,}28 \times 10^{-19}\ \text{J} / 9{,}11 \times 10^{-31}\ \text{kg})} \approx 5 \times 10^5$ m/s.

d) $f_0 = W/h$ = 2,3 · 1,60 × 10^{-19} J / 6,63 × 10^{-34} J·s = 5,6 × 10^{14} Hz; $\lambda_0 = hc/W$ = 1240 eV·nm / 2,3 eV ≈ 540 nm. Il sodio emette elettroni con la luce di lunghezza d'onda minore di 540 nm, dal verde al violetto, non con la gialla e la rossa.

Controllo. W ha due cifre significative, e così i risultati; la velocità è circa lo 0,2% di c, e l'energia cinetica classica va benissimo.

13.2.3 La prova di Millikan e il premio Nobel

L'equazione di Einstein fa una previsione precisa e controllabile: se si riporta $K_{max} = e\Delta V_{arresto}$ in funzione della frequenza, i punti di ogni metallo devono stare su una retta di pendenza h/e, la stessa per tutti i metalli, che incontra l'asse delle frequenze nella soglia f_0 e, prolungata, l'asse delle energie in $-W$ (Figura 13.4). Robert Millikan, lo stesso delle goccioline d'olio (capitolo 2), dedicò anni a queste misure, convinto di smentire un'ipotesi che contraddiceva l'ottica ondulatoria. Nel 1916 pubblicò il contrario: l'equazione era verificata con grande precisione, e la pendenza dava un valore di h in accordo con quello di Planck. Ma per anni continuò a ritenere insostenibile l'interpretazione di Einstein.

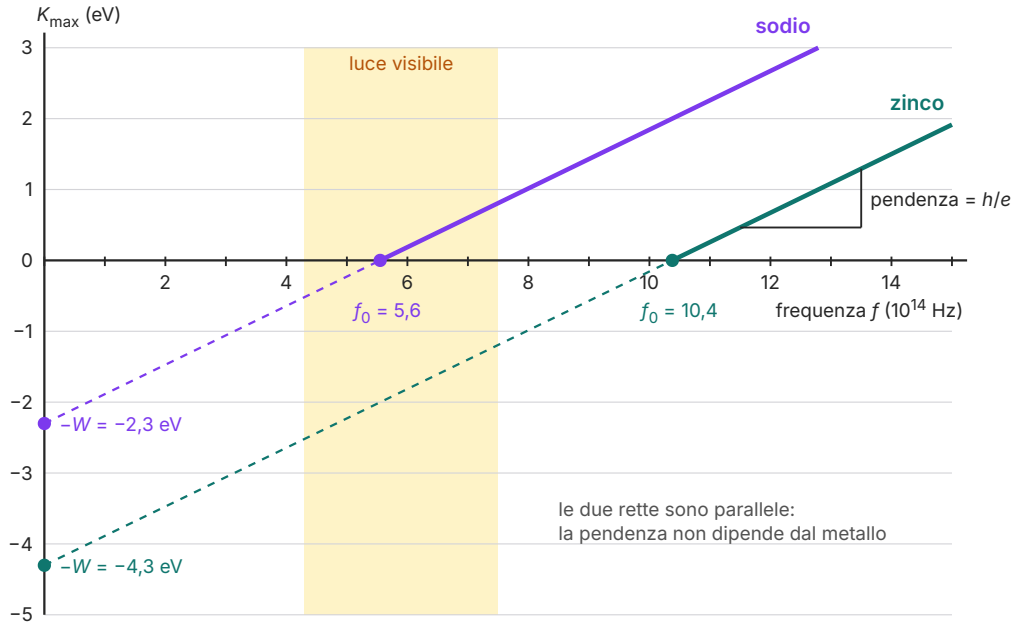


Figura 13.4 L'energia cinetica massima dei fotoelettroni in funzione della frequenza della luce, per il sodio (W = 2,3 eV) e per lo zinco (W = 4,3 eV), calcolata con l'equazione di Einstein. Le rette hanno la stessa pendenza h/e; sotto la soglia f_0 non ci sono fotoelettroni, e il prolungamento tratteggiato incontra l'asse verticale in $-W$. La fascia gialla indica le frequenze della luce visibile.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere il grafico dell'effetto fotoelettrico

Problema. Usa la Figura 13.4. a) Ricava la frequenza di soglia dello zinco e spiega perché la luce visibile non estrae elettroni dallo zinco. b) Ricava la costante di Planck dalla pendenza della retta dello zinco.

a) La retta dello zinco incontra l'asse delle frequenze a circa $10{,}4 \times 10^{14}$ Hz, cioè $f_0 = W/h = 4{,}3 \cdot 1{,}60 \times 10^{-19}$ J / $6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s = $1{,}04 \times 10^{15}$ Hz, nell'ultravioletto (λ_0 = 1240 eV·nm / 4,3 eV ≈ 290 nm). La luce visibile arriva al più a $7{,}5 \times 10^{14}$ Hz: tutti i suoi fotoni hanno energia minore di 4,3 eV.

b) Due punti della retta dello zinco: $K_{max} = 0$ a $10{,}4 \times 10^{14}$ Hz e K_{max} = 1,9 eV a $15{,}0 \times 10^{14}$ Hz. La pendenza è 1,9 eV / $4{,}6 \times 10^{14}$ Hz ≈ $4{,}1 \times 10^{-15}$ eV/Hz = $4{,}1 \times 10^{-15}$ V·s; moltiplicando per e: $h = 4{,}1 \times 10^{-15}$ V·s · $1{,}60 \times 10^{-19}$ C ≈ $6{,}6 \times 10^{-34}$ J·s.

Osservazione. È il metodo di Millikan: la pendenza, uguale per ogni metallo, dà h, l'intercetta dà W. La costante misurata dal colore dei corpi caldi e quella misurata con elettroni e voltmetri coincidono.

Nel 1921 Einstein ricevette il premio Nobel per la fisica (assegnato nel 1922) «per i suoi servizi alla fisica teorica, e in particolare per la scoperta della legge dell'effetto fotoelettrico». Non per la relatività, allora ancora discussa: anche questo è un modo di vedere quanto la verifica sperimentale pesi nel giudizio su una teoria.

13.2.4 Il fotone

Il nome *fotone* fu proposto dal chimico americano Gilbert N. Lewis nel 1926 ed entrò subito nell'uso. L'energia di un fotone di frequenza f e lunghezza d'onda λ, in elettronvolt, si calcola comodamente con hc = 1240 eV·nm:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \qquad E\,(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda\,(\text{nm})}$$

Un fotone di luce rossa (700 nm) porta 1,8 eV, uno di luce violetta (400 nm) 3,1 eV, uno di raggi X di 0,1 nm più di 10 000 eV; un fotone delle onde radio FM, a 100 MHz, appena 4×10^{-7} eV. I fotoni visibili hanno l'energia dei legami chimici, qualche eV (capitolo 3): per questo la luce guida la fotosintesi e la visione. E solo i fotoni dell'ultravioletto più energetico, X e gamma sono *ionizzanti* (capitolo 10): uno solo basta a strappare un elettrone a un atomo, mentre milioni di fotoni radio non ci riescono.

I fotoni sono tantissimi. Un puntatore laser rosso di 1,0 mW (650 nm) emette fotoni da $3{,}06 \times 10^{-19}$ J: per portare $1{,}0 \times 10^{-3}$ J al secondo ne servono $3{,}3 \times 10^{15}$ al secondo. Per questo la luce ordinaria ci appare continua, come un getto d'acqua fatto di molecole. L'interazione dei fotoni

con gli elettroni è alla base delle celle solari, in cui un fotone di più di circa 1,1 eV libera un elettrone nel silicio (capitolo 5), dei sensori delle fotocamere, in cui ogni pixel conta gli elettroni liberati dalla luce, e delle fotocellule delle porte automatiche.

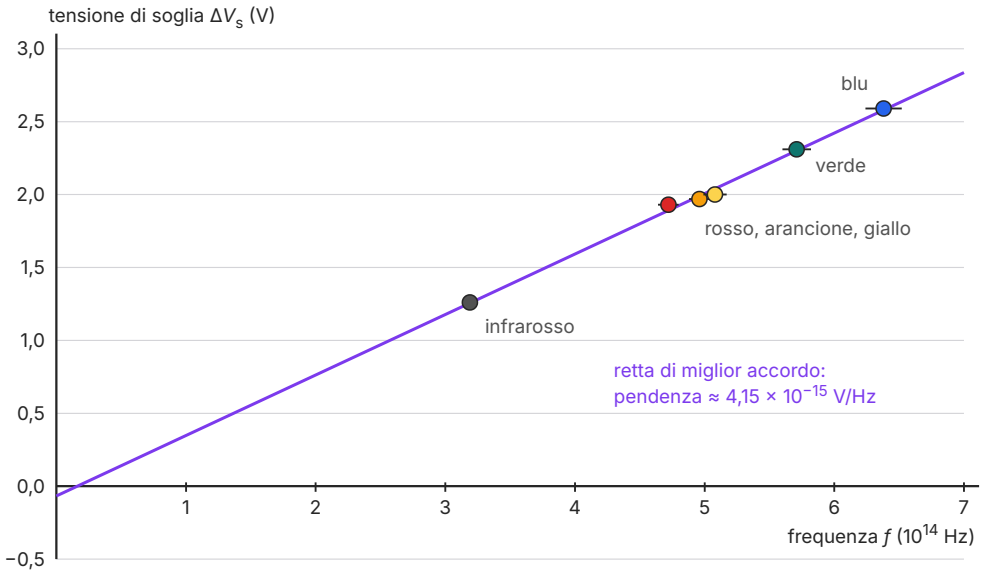


Figura 13.5 La tensione di soglia dei sei LED della Tabella 13.1 (nel riquadro «In laboratorio») in funzione della frequenza della luce emessa, con le barre d'incertezza (quella sulla tensione, ± 0,03 V, è appena visibile). La pendenza della retta di miglior accordo, moltiplicata per la carica elementare, dà la costante di Planck.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: la costante di Planck con i LED

Materiali. Sei LED di colori diversi, dall'infrarosso al blu, con la lunghezza d'onda di picco indicata dal costruttore (incertezza ± 10 nm, perché la luce di un LED non è monocromatica); un alimentatore a bassa tensione regolabile (0–5 V); un resistore da 470 Ω in serie al LED; un voltmetro digitale (sensibilità 0,01 V); un tubetto opaco per osservare il LED al buio (il LED infrarosso si osserva con la fotocamera di un telefono).

Procedimento. Un LED (capitolo 5) emette luce solo quando la tensione supera una soglia ΔV_s; ogni elettrone che attraversa la giunzione può cedere a un fotone l'energia $e\Delta V_s$, e ci si aspetta $e\Delta V_s \approx hf$, cioè $\Delta V_s \approx (h/e)f$. Si aumenta lentamente la tensione e si annota il valore a cui il LED comincia appena a emettere; si fa la media di tre misure e si calcola $f = c/\lambda$ e la sua incertezza (Tabella 13.1).

Tabella 13.1 Tensione di soglia di sei LED (dati tipici, media di tre misure). Incertezze: λ ± 10 nm, ΔV_s ± 0,03 V.

LED	λ (nm)	f (10^{14} Hz)	Δf (10^{14} Hz)	ΔV_s (V)
infrarosso	940	3,19	0,03	1,26
rosso	635	4,72	0,07	1,93
arancione	605	4,96	0,08	1,97
giallo	590	5,08	0,09	2,00
verde	525	5,71	0,11	2,31
blu	470	6,38	0,14	2,59

Che cosa concludere. Nel grafico di ΔV_s in funzione di f i punti sono ben allineati (Figura 13.5). La retta di miglior accordo ha pendenza $4{,}15 \times 10^{-15}$ V/Hz; le rette di massima e di minima pendenza compatibili con le barre d'incertezza hanno pendenze di circa $4{,}6 \times 10^{-15}$ e $3{,}8 \times 10^{-15}$ V/Hz. Moltiplicando per $e = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C si ottiene $h = (6{,}6 \pm 0{,}7) \times 10^{-34}$ J·s, compatibile con il valore $6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s. L'incertezza, circa il 10%, viene dalla soglia poco netta e dalla banda di lunghezze d'onda del LED; ma con materiali da pochi euro si misura una costante di 10^{-34} J·s.

Sicurezza. Mai collegare un LED senza il resistore in serie, che limita la corrente; solo bassa tensione; non fissare da vicino i LED molto luminosi.

Per la relazione. Segui lo schema di Fisica 3, capitolo 4. Riporta il grafico con le barre d'incertezza, traccia la retta di miglior accordo e le rette di massima e minima pendenza, e ricava h con la sua incertezza. Discuti perché l'intercetta non è esattamente zero e perché il LED infrarosso è il punto più utile per determinare la pendenza.

13.3 Onda o particella?

13.3.1 L'effetto Compton

Se la luce è fatta di particelle, dovrebbe avere anche una quantità di moto (Fisica 4, capitolo 1). Nel capitolo 12 hai visto che per una particella priva di massa la relatività dà $E = pc$. Per un fotone, allora,

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

Un fotone di luce verde (500 nm) ha una quantità di moto di appena $6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s / $5{,}00 \times 10^{-7}$ m = $1{,}33 \times 10^{-27}$ kg·m/s: il fotone non ha massa a riposo, ma ha quantità di moto. Per vederla all'opera servono fotoni molto energetici. Nel 1923 l'americano Arthur H. Compton mandò raggi X su un blocchetto di grafite e trovò che i raggi diffusi avevano lunghezza d'onda *maggiore* di quelli incidenti, tanto più quanto più erano deviati; per un'onda classica sarebbe rimasta la stessa. Compton lo spiegò come un urto fra un fotone e un elettrone, con la conservazione di energia e quantità di moto (Fisica 4, capitolo 2): il fotone cede all'elettrone parte della sua energia ed esce con lunghezza d'onda maggiore. È l'**effetto Compton**. Dopo questa esperienza, premiata con il Nobel nel 1927, i fotoni divennero una realtà per quasi tutti i fisici.

13.3.2 Un fotone alla volta

Ma allora la luce è un'onda o un flusso di particelle? L'interferenza di Young, la diffrazione e la polarizzazione (capitolo 10) sono fenomeni ondulatori; l'effetto fotoelettrico e l'effetto Compton sono fenomeni corpuscolari. Un esperimento li mette di fronte. Si ripete l'esperienza di Young con una luce così debole che fra le fenditure e lo schermo, in media, c'è un solo fotone alla volta, e si sostituisce lo schermo con un rivelatore capace di registrare ogni singolo fotone (Figura 13.6).

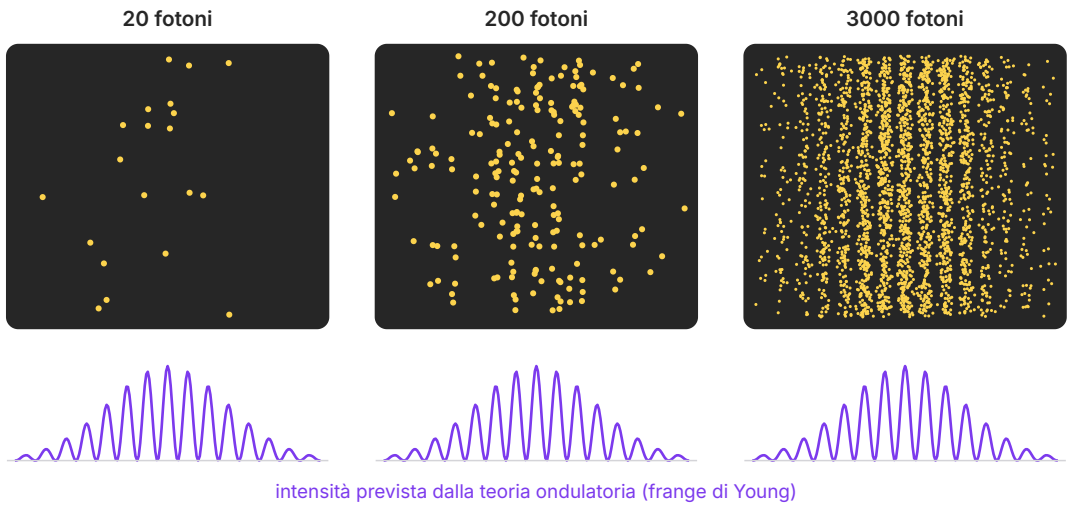


Figura 13.6 L'esperimento di Young con un fotone alla volta (simulazione al calcolatore). Ogni punto è l'arrivo di un fotone sul rivelatore. Con pochi fotoni gli arrivi sembrano casuali; con molti fotoni compaiono le frange d'interferenza. In basso, l'intensità prevista dalla teoria ondulatoria: la densità dei punti la riproduce sempre meglio al crescere del loro numero.

Ogni fotone arriva in un punto preciso, tutto intero: come una particella. Dove arriverà il singolo fotone non si può prevedere, e i primi arrivi sembrano distribuiti a caso. Ma quando i fotoni sono migliaia, la loro distribuzione riproduce le frange chiare e scure dell'interferenza: i fotoni arrivano spesso dove l'onda prevede un'intensità grande, mai dove prevede le frange scure. E l'interferenza si forma anche se i fotoni passano uno alla volta: ogni fotone «interferisce con sé stesso», e se si chiude una fenditura, o si cerca di scoprire da quale delle due è passato, le frange spariscono. L'onda, allora, non descrive una sostanza diffusa nello spazio, ma la *probabilità* di trovare il fotone in un punto: dove l'onda è intensa la probabilità è grande. Questa interpretazione probabilistica fu proposta nel 1926 da Max Born.

La luce, dunque, non è né un'onda né un flusso di particelle nel senso della fisica classica: si propaga come un'onda e scambia energia con la materia come una particella. È il **dualismo onda–particella**. Niels Bohr lo espresse con il principio di **complementarità**: l'aspetto ondulatorio e quello corpuscolare sono due descrizioni che si escludono in uno stesso esperimento, ma che servono entrambe per descrivere la luce completamente. Nella sezione che segue scoprirai che lo stesso vale per la materia.

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Quanto è il latino *quantum*, «quanto, quanta quantità», neutro dell'aggettivo *quantus*. Einstein, nel 1905, parlò di *Energiequanten*, «quanti di energia» (lo hai letto in epigrafe), e Planck chiamò h il «quanto d'azione»; da qui «quantizzazione», «quantistico», «meccanica quantistica». Nel linguaggio comune il «salto quantico» è diventato un grande cambiamento; in fisica, ironia della parola, un quanto è la quantità di energia *più piccola* che un sistema può scambiare.

Fotone viene dal greco φῶς, φωτός, «luce», con la stessa terminazione di elettrone (da ἤλεκτρον, capitolo 1) e protone. Il termine è di G. N. Lewis (1926). Dalla stessa radice greca vengono fotografia, «scrittura con la luce», fotosintesi, fotovoltaico e fotoelettrico.

Dualismo deriva dal latino *duo*, «due», attraverso *dualis*, «che riguarda il due»: in filosofia indica le dottrine che ammettono due principi irriducibili, come lo spirito e la materia. In fisica non ci sono due sostanze: un solo oggetto, il fotone o l'elettrone, mostra due comportamenti, e quale si vede dipende dall'esperimento.

13.4 Le onde di materia

13.4.1 L'ipotesi di de Broglie

Nel 1924 un giovane fisico francese, Louis de Broglie, rovesciò la domanda nella sua tesi di dottorato. Se la luce, che si credeva un'onda, si comporta anche come una particella, perché le particelle, come gli elettroni, non dovrebbero comportarsi anche come onde? Per la luce vale $p = h/\lambda$; de Broglie propose di invertire la relazione e di associare a ogni particella di quantità di moto $p = mv$ un'onda di lunghezza d'onda

$$\lambda_{\text{dB}} = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\,v}$$

È la **lunghezza d'onda di de Broglie**, e le onde associate alle particelle si chiamano **onde di materia**. L'ipotesi, accolta con scetticismo da molti, fu sostenuta da Einstein; cinque anni dopo valse a de Broglie il premio Nobel. La costante di Planck è così piccola che per gli oggetti della vita quotidiana λ_{dB} è assurdamente piccola, mentre per un elettrone è paragonabile alle distanze fra gli atomi di un cristallo (Tabella 13.2).

ESEMPIO SVOLTO

Un elettrone e una pallina da tennis

Problema. a) Calcola la lunghezza d'onda di de Broglie di un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 100 V, partendo da fermo (il cannone elettronico del capitolo 3). b) Calcola quella di una pallina da tennis di 57 g che viaggia a 50 m/s. c) Confronta i due risultati con le dimensioni di un atomo, circa 10^{-10} m.

a) L'elettrone acquista $K = 100$ eV $= 1{,}60 \times 10^{-17}$ J. Dato che $K = p^2/(2m)$, la quantità di moto è $p = \sqrt{(2 m_e K)} = \sqrt{(2 \cdot 9{,}11 \times 10^{-31}\ \text{kg} \cdot 1{,}60 \times 10^{-17}\ \text{J})} = 5{,}40 \times 10^{-24}$ kg·m/s, e $\lambda_{dB} = h/p = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s / $5{,}40 \times 10^{-24}$ kg·m/s $= 1{,}23 \times 10^{-10}$ m $\approx 0{,}12$ nm. (Con $v = 5{,}93 \times 10^{6}$ m/s del capitolo 3, $h/(m_e v)$ dà lo stesso valore.)

b) $\lambda_{dB} = h/(mv) = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s / (0,057 kg · 50 m/s) $= 2{,}3 \times 10^{-34}$ m.

c) L'onda dell'elettrone è grande come un atomo: un cristallo può fargli da reticolo di diffrazione (Fisica 4, capitolo 16). Quella della pallina è più di 10^{23} volte più piccola di un atomo: nessuna fenditura mostrerà mai la diffrazione di una pallina da tennis.

Osservazione. Gli effetti ondulatori si vedono quando la lunghezza d'onda è paragonabile agli ostacoli: per questo la fisica quantistica è necessaria fra gli atomi e invisibile fra i corpi macroscopici.

Tabella 13.2 Lunghezza d'onda di de Broglie di alcune particelle e di alcuni corpi (calcolata con $\lambda_{dB} = h/(mv)$, trascurando gli effetti relativistici).

Oggetto	Massa (kg)	Velocità o energia	λ_{dB} (m)
elettrone accelerato da 10 V	$9{,}11 \times 10^{-31}$	10 eV	$3{,}9 \times 10^{-10}$
elettrone accelerato da 100 V	$9{,}11 \times 10^{-31}$	100 eV	$1{,}2 \times 10^{-10}$
elettrone accelerato da 10 kV	$9{,}11 \times 10^{-31}$	10 keV	$1{,}2 \times 10^{-11}$
protone accelerato da 1 kV	$1{,}67 \times 10^{-27}$	1 keV	$9{,}1 \times 10^{-13}$
pallina da tennis	0,057	50 m/s	$2{,}3 \times 10^{-34}$
persona che cammina	70	1,4 m/s	$6{,}8 \times 10^{-36}$

13.4.2 Elettroni che interferiscono

La conferma arrivò nel 1927, da due esperimenti indipendenti. Negli Stati Uniti Clinton Davisson e Lester Germer, che studiavano la diffusione di un fascio di elettroni da parte di un cristallo di nichel, trovarono che gli elettroni rimbalzavano con intensità massima solo in certe direzioni, come i raggi X diffratti da un cristallo; dagli angoli ricavarono una lunghezza d'onda che coincideva con la previsione di de Broglie. In Gran Bretagna George Paget Thomson fece attraversare a un fascio di elettroni sottilissime lamine metalliche e ottenne su una lastra fotografi-

ca anelli di diffrazione. Ironia della storia: J. J. Thomson aveva scoperto nel 1897 l'elettrone come particella, e suo figlio ne mostrò il comportamento ondulatorio. Davisson e G. P. Thomson ricevettero insieme il premio Nobel nel 1937. La **diffrazione degli elettroni** è oggi una tecnica di routine per studiare la struttura dei cristalli e delle superfici.

L'equivalente dell'esperimento della Figura 13.6 è stato realizzato anche con gli elettroni. Nel 1974, a Bologna, Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli e Giulio Pozzi mandarono gli elettroni, uno alla volta, attraverso un dispositivo che li divideva in due fasci, e osservarono su un monitor la formazione delle frange punto dopo punto. Elettroni e fotoni si comportano allo stesso modo: arrivano come particelle, si distribuiscono come onde.

13.4.3 Il microscopio elettronico

La diffrazione impedisce a un microscopio ottico di distinguere dettagli molto più piccoli della lunghezza d'onda della luce, qualche centinaio di nanometri (Fisica 4, capitolo 16): si vedono le cellule e i batteri, non i virus più piccoli. Gli elettroni accelerati da decine di migliaia di volt hanno lunghezze d'onda decine di migliaia di volte più piccole. All'inizio degli anni Trenta il tedesco Ernst Ruska costruì il primo **microscopio elettronico**, in cui il ruolo delle lenti di vetro è svolto da campi magnetici che curvano le traiettorie degli elettroni (capitolo 7); ricevette il premio Nobel solo nel 1986. I microscopi elettronici moderni mostrano i virus, le proteine e, nei casi migliori, le file di atomi di un cristallo.

13.5 Il principio di indeterminazione

13.5.1 Heisenberg, 1927

Se un elettrone è descritto da un'onda, che senso ha chiedersi dove si trova esattamente e quanto è veloce? Un'onda con una lunghezza d'onda ben definita, e quindi con una quantità di moto ben definita, è estesa su una grande regione di spazio; un'onda concentrata in una piccola regione è fatta di onde di molte lunghezze d'onda, e quindi la sua quantità di moto è incerta. Nel 1927 il tedesco Werner Heisenberg, uno dei fondatori della nuova meccanica quantistica, trasformò questa osservazione in un principio. Se Δx è l'indeterminazione sulla posizione di una particella lungo una direzione e Δp quella sulla quantità di moto nella stessa direzione, il loro prodotto non può essere più piccolo di un limite fissato dalla costante di Planck:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

È il **principio di indeterminazione** di Heisenberg. Quanto più precisamente è definita la posizione di una particella, tanto meno lo è la sua quantità di moto, e viceversa. Applichiamolo a un elettrone confinato in un atomo, in una regione di circa $\Delta x = 1{,}0 \times 10^{-10}$ m: $\Delta p \geq 6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s / $(4\pi \cdot 1{,}0 \times 10^{-10}\ \text{m}) = 5{,}3 \times 10^{-25}$ kg·m/s, cioè un'indeterminazione sulla velocità $\Delta v = \Delta p / m_e \geq 5{,}8 \times$

10^5 m/s, centinaia di chilometri al secondo. Non ha senso immaginare l'elettrone su un'orbita definita, come un pianeta. Per una pallina di 0,15 kg localizzata entro un micrometro, invece, $\Delta v \geq 3{,}5 \times 10^{-28}$ m/s: un'indeterminazione del tutto irrilevante. Ancora una volta, la piccolezza di h nasconde gli effetti quantistici nel mondo macroscopico.

Heisenberg illustrò il principio con un esperimento ideale: per vedere dove si trova un elettrone bisogna illuminarlo con lunghezze d'onda corte, ma quei fotoni hanno grande quantità di moto e, urtandolo come nell'effetto Compton, ne cambiano la velocità. L'esempio non deve trarre in inganno: il principio non dice soltanto che gli strumenti disturbano la misura. Dice che una particella quantistica *non possiede* contemporaneamente una posizione e una quantità di moto ben definite, perché è descritta da un'onda. Il concetto classico di traiettoria, una linea percorsa punto per punto con una velocità definita in ogni istante, nel mondo atomico perde significato.

13.5.2 Il dibattito sull'interpretazione

Fra il 1925 e il 1927, con Heisenberg, Erwin Schrödinger, Born e Paul Dirac, la meccanica quantistica prese la forma che usiamo ancora oggi. Ma che cosa dice del mondo? Secondo l'**interpretazione di Copenaghen**, elaborata soprattutto da Bohr, che lavorava a Copenaghen, e da Heisenberg, la teoria non descrive che cosa fa un elettrone quando nessuno lo osserva, ma permette di calcolare le probabilità dei risultati delle misure; e il caso, nel singolo evento, non è il segno della nostra ignoranza ma un tratto della natura. Einstein non accettò mai questa conclusione. In una lettera a Max Born del dicembre 1926 scrisse di essere convinto che Dio, il «Vecchio» della sua lettera, non giochi a dadi; per lui la meccanica quantistica era corretta ma incompleta, e dietro le probabilità doveva esserci una descrizione più profonda.

Il confronto diretto fra Bohr ed Einstein cominciò nell'ottobre del 1927 a Bruxelles, al quinto congresso Solvay, dedicato a «Elettroni e fotoni», che riunì quasi tutti i protagonisti della nuova fisica. Einstein proponeva esperimenti ideali per aggirare il principio di indeterminazione; Bohr trovava ogni volta l'errore. La discussione continuò per decenni, e che cosa sia davvero la realtà quantistica è ancora oggi discusso da fisici e filosofi.

COLLEGAMENTI

Filosofia e Storia: la fine di un mondo prevedibile

Nel 1814 il matematico Pierre-Simon Laplace aveva immaginato un'intelligenza capace di conoscere in un istante la posizione e la velocità di ogni particella dell'universo: per essa, nulla sarebbe incerto, e il futuro come il passato le sarebbero presenti davanti agli occhi. È il *determinismo* della fisica classica, che il positivismo dell'Ottocento aveva fatto proprio. Il principio di indeterminazione nega il presupposto stesso dell'immagine di Laplace: posizione e velocità di una particella non sono date insieme, e le leggi quantistiche prevedono probabilità, non singoli eventi. Ernst Mach aveva chiesto di ammettere in fisica solo ciò che si osserva, e Heisenberg costruì la sua meccanica su grandezze osservabili; la crisi della fisica classica fu uno dei punti di partenza della filosofia della scienza del Novecento, per esempio di Karl Popper.

La storia dei quanti è anche storia d'Europa. Philipp Lenard, che aveva misurato l'effetto fotoelettrico e ricevuto il Nobel nel 1905, divenne negli anni Venti e Trenta un sostenitore del nazismo e di una «fisica tedesca» contrapposta a quella che chiamava «fisica ebraica», a cominciare dalla relatività di Einstein. Einstein lasciò la Germania nel 1933, dopo l'ascesa al potere di Hitler, per Princeton, negli Stati Uniti, come molti scienziati costretti a emigrare (capitolo 14).

APPROFONDIMENTO

Il laser: un'idea di Einstein del 1917

Nel 1917, ripensando alla legge di Planck, Einstein descrisse come un atomo interagisce con la radiazione: può assorbire un fotone e passare a uno stato di energia maggiore, tornare spontaneamente a quello di energia minore emettendo un fotone in una direzione qualsiasi, oppure essere «stimolato» a emettere da un fotone di passaggio di energia giusta. In questa **emissione stimolata** il fotone emesso è una copia del fotone che l'ha provocata: stessa frequenza, stessa direzione, stessa fase.

Per oltre quarant'anni l'idea rimase teoria, perché normalmente gli atomi eccitati sono pochissimi. Il primo **laser** (acronimo dell'inglese *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, «amplificazione della luce per emissione stimolata di radiazione») fu costruito nel 1960 dall'americano Theodore Maiman con un cristallo di rubino. In un laser si porta la maggior parte degli atomi di un materiale in uno stato eccitato, e la luce, rimbalzando fra due specchi, viene amplificata a ogni passaggio da una valanga di emissioni stimolate.

Ne esce una luce quasi monocromatica, coerente, raccolta in un fascio sottile: oggi i laser leggono i codici a barre, trasmettono dati nelle fibre ottiche, tagliano metalli, correggono la miopia. Tutto da un ragionamento teorico sulla luce del corpo nero.

IN SINTESI

Le formule del capitolo e il loro significato

Legge di Wien: $\lambda_{max} \cdot T = 2{,}898 \times 10^{-3}$ m·K (T in kelvin): più caldo è un corpo nero, più corta la lunghezza d'onda a cui emette di più.

Quanto di energia (Planck, 1900): $E = hf$, con $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s: la radiazione di frequenza f scambia energia con la materia solo a pacchetti hf.

Fotone (Einstein, 1905): energia $E = hf = hc/\lambda$; in elettronvolt $E = 1240$ eV·nm$/\lambda$. Quantità di moto $p = h/\lambda = E/c$, senza massa a riposo.

Effetto fotoelettrico: $K_{max} = hf - W$, con W lavoro di estrazione del metallo (eV); soglia $f_0 = W/h$; potenziale di arresto $\Delta V_{arresto} = K_{max}/e$ (in volt, numericamente uguale a K_{max} in eV). La frequenza decide l'energia degli elettroni, l'intensità il loro numero.

Lunghezza d'onda di de Broglie: $\lambda_{dB} = h/(mv) = h/p$, in metri: l'onda associata a una particella; i suoi effetti si vedono quando è paragonabile alle dimensioni degli ostacoli.

Principio di indeterminazione: $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/(4\pi)$: posizione e quantità di moto di una particella non sono definite insieme oltre questo limite; in un atomo non ha senso parlare di traiettoria.

Hai visto la luce diventare particella e la materia diventare onda. Nel prossimo capitolo userai queste idee per entrare nell'atomo: capirai perché ogni gas emette luce di colori caratteristici, come le insegne al neon del capitolo 5, e scoprirai, con Rutherford, Bohr e Fermi, il nucleo e la sua energia.

SINTESI

- Un corpo nero assorbe tutta la radiazione che lo colpisce; il suo spettro dipende solo dalla temperatura. Al crescere di T la potenza emessa cresce come T^4 e il massimo si sposta verso lunghezze d'onda corte: $\lambda_{max} T = 2{,}898 \times 10^{-3}$ m·K (legge di Wien).
- La fisica classica prevedeva per il corpo nero un'emissione infinita alle lunghezze d'onda corte: la «catastrofe ultravioletta», come la chiamò Ehrenfest nel 1911.
- Planck (14 dicembre 1900) spiegò lo spettro supponendo che l'energia sia scambiata fra materia e radiazione in quanti $E = hf$, con $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s; considerava l'ipotesi un artificio formale.
- Nell'effetto fotoelettrico la luce estrae elettroni da un metallo: esiste una frequenza di soglia, l'energia massima degli elettroni dipende dalla frequenza e non dall'intensità, l'intensità decide il numero degli elettroni, l'emissione è immediata. La teoria ondulatoria non spiega nessuno di questi fatti.
- Einstein (1905) suppose che la luce stessa sia fatta di quanti di energia hf, oggi detti fotoni (Lewis, 1926): $K_{max} = hf - W$, e $K_{max} = e\Delta V_{arresto}$.
- Millikan (1916) verificò l'equazione di Einstein, pur dubitando della sua interpretazione; il premio Nobel del 1921 fu dato a Einstein per la legge dell'effetto fotoelettrico.
- L'energia di un fotone è $E = 1240$ eV·nm$/\lambda$: da 1,8 eV (rosso) a 3,1 eV (violetto) per il visibile. Celle solari, sensori delle fotocamere e fotocellule sfruttano l'interazione dei fotoni con gli elettroni.
- Il fotone non ha massa a riposo ma ha quantità di moto $p = h/\lambda$: lo mostra l'effetto Compton (1923), un urto fra un fotone di raggi X e un elettrone.
- Nell'esperimento di Young con un fotone alla volta ogni fotone arriva in un punto, ma la distribuzione di molti arrivi riproduce le frange: l'onda dà la probabilità di trovare il fotone. È il dualismo onda–particella.
- De Broglie (1924) associò a ogni particella un'onda di lunghezza $\lambda_{dB} = h/(mv)$; la diffrazione degli elettroni (Davisson e Germer, G. P. Thomson, 1927) lo confermò. Il microscopio elettronico sfrutta le piccole lunghezze d'onda degli elettroni.
- Principio di indeterminazione (Heisenberg, 1927): $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/(4\pi)$. Non è solo un limite degli strumenti: una particella quantistica non ha insieme posizione e velocità definite, e nell'atomo non ha traiettoria.
- Secondo l'interpretazione di Copenaghen la teoria prevede probabilità e il caso è un tratto della natura; Einstein non lo accettò, e il suo dibattito con Bohr cominciò al congresso Solvay del 1927.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Se la temperatura assoluta di un corpo nero raddoppia, la lunghezza d'onda a cui l'emissione è massima:
   - **A.** raddoppia
   - **B.** si dimezza
   - **C.** resta la stessa
   - **D.** diventa sedici volte più piccola

2. ● Secondo l'ipotesi di Planck (1900), le cariche che oscillano con frequenza f nelle pareti di un corpo nero:
   - **A.** emettono soltanto luce visibile
   - **B.** non possono scambiare energia con la radiazione
   - **C.** scambiano energia con la radiazione solo per multipli interi di hf
   - **D.** emettono fotoni che hanno tutti la stessa energia, qualunque sia f

3. ● Un metallo è illuminato con luce di frequenza maggiore della soglia. Se si raddoppia l'intensità della luce, senza cambiarne la frequenza:
   - **A.** raddoppia il numero di fotoelettroni emessi al secondo, e la loro energia cinetica massima non cambia
   - **B.** raddoppia l'energia cinetica massima dei fotoelettroni
   - **C.** il potenziale di arresto raddoppia
   - **D.** non cambia nulla

4. ●● Una lastra di zinco ($W = 4{,}3$ eV) è illuminata da una lampada rossa molto potente. Che cosa succede?
   - **A.** Escono pochi elettroni, molto lenti
   - **B.** Escono elettroni dopo un certo tempo, quando hanno accumulato abbastanza energia
   - **C.** Escono molti elettroni, perché la luce è intensa
   - **D.** Non esce nessun elettrone

5. ● Il premio Nobel per la fisica del 1921 fu assegnato ad Albert Einstein:
   - **A.** per la teoria della relatività ristretta
   - **B.** in particolare per la scoperta della legge dell'effetto fotoelettrico
   - **C.** per la scoperta dell'effetto Compton
   - **D.** per la formula $E = mc^2$

6. ●● Un elettrone e un protone si muovono con la stessa velocità. La lunghezza d'onda di de Broglie:
   A. è uguale per le due particelle
   B. è maggiore per il protone, che ha massa maggiore
   C. è maggiore per l'elettrone, circa 1800 volte
   D. non esiste per il protone, perché è una particella

7. ●● Il principio di indeterminazione di Heisenberg afferma che:
   A. non si possono conoscere insieme, con precisione arbitraria, la posizione e la quantità di moto di una particella
   B. ogni misura ha un errore, che si può però ridurre con strumenti migliori
   C. la posizione di una particella non si può mai misurare
   D. le leggi della fisica cambiano da un sistema di riferimento all'altro

Vero o falso

8. ● Il fotone non ha massa a riposo, ma possiede una quantità di moto. V / F

9. ● Un pezzo di ferro scaldato a circa 1000 K, che appare rosso, emette la maggior parte della sua energia come luce rossa. V / F

10. ●● Nel 1900 Planck affermò che la luce è fatta di fotoni che viaggiano nello spazio. V / F

11. ●● Nell'effetto fotoelettrico, se si raddoppia la frequenza della luce, l'energia cinetica massima dei fotoelettroni raddoppia. V / F

12. ● La diffrazione di un fascio di elettroni da parte di un cristallo è una prova del comportamento ondulatorio della materia. V / F

Applicare

13. ● La luce di una stella ha il massimo di emissione a 290 nm. Stima la temperatura della sua superficie, considerandola un corpo nero. A quale temperatura il massimo cadrebbe a 870 nm?

14. ● Calcola l'energia di un fotone di luce verde di lunghezza d'onda 550 nm, in joule e in elettronvolt.

15. ● Completa. Un fotone di energia 2,0 eV ha lunghezza d'onda _____ nm e frequenza _____ Hz.

16. ●● Il lavoro di estrazione del potassio è 2,3 eV. a) Calcola la frequenza e la lunghezza d'onda di soglia. b) Una luce arancione di 600 nm estrae elettroni dal potassio?

17. ●● Usa la Figura 13.4. a) Leggi le frequenze di soglia del sodio e dello zinco. b) Quale dei due metalli useresti per una fotocellula che deve reagire alla luce visibile, e perché? c) Quanto vale K_{max} per lo zinco illuminato con radiazione di $1{,}4 \times 10^{15}$ Hz?

18. ● Calcola la lunghezza d'onda di de Broglie di un elettrone che si muove a $2{,}0 \times 10^{6}$ m/s.

19. ● Completa. Un fotone di luce di lunghezza d'onda 500 nm ha quantità di moto p = _____ kg·m/s.

Problemi

20. ●● Un puntatore laser verde emette una potenza luminosa di 1,0 mW a 532 nm. a) Calcola l'energia di un fotone. b) Quanti fotoni emette al secondo? c) Un rivelatore riceve solo un miliardesimo della luce: quanti fotoni conta al secondo?

21. ●●● Un catodo di cesio (W = 2,1 eV) è illuminato con luce di 400 nm. a) Calcola l'energia cinetica massima dei fotoelettroni, in eV e in J, e il potenziale di arresto. b) Calcola la velocità massima dei fotoelettroni con la relazione fra energia e velocità del capitolo 3. c) Si illumina il catodo con luce rossa di 700 nm: escono ancora elettroni? d) Che cosa cambia se, con la luce di 400 nm, si dimezza l'intensità?

22. ●●● Un metallo sconosciuto è illuminato prima con luce ultravioletta di 300 nm, poi con luce violetta di 400 nm; i potenziali di arresto misurati sono 1,63 V e 0,60 V. a) Calcola le due frequenze. b) Ricava la costante di Planck dalla pendenza della retta K_{max}–f. c) Calcola il lavoro di estrazione del metallo e, con la Tabella A.5, prova a identificarlo, motivando la risposta.

23. ●●● In un microscopio elettronico gli elettroni partono da fermi e sono accelerati da una differenza di potenziale di 10 kV (capitolo 3). a) Calcola la loro energia cinetica in eV e in J. b) Calcola la loro quantità di moto e la lunghezza d'onda di de Broglie, trascurando gli effetti relativistici. c) Quante volte è più piccola della lunghezza d'onda della luce verde (550 nm)? Perché questo permette di vedere dettagli più fini? d) Calcola la loro velocità come frazione di c: era lecito trascurare la relatività (capitolo 11)?

24. ●●● a) Un elettrone è confinato in una regione di $1{,}0 \times 10^{-10}$ m, le dimensioni di un atomo. Calcola l'indeterminazione minima sulla sua quantità di moto e sulla sua velocità. b) Ripeti il calcolo per un granello di polvere di massa $1{,}0 \times 10^{-9}$ kg localizzato entro 1,0 μm. c) Commenta i due risultati.

Ragionare e argomentare

25. ●● Commenta la fonte. Nel 1905 Einstein scrisse: «Secondo l'ipotesi che qui si vuole considerare, quando un raggio di luce si propaga a partire da un punto, l'energia non si distribuisce in modo continuo su spazi sempre più grandi, ma consiste di un numero finito di quanti di energia localizzati in punti dello spazio, che si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti e prodotti soltanto per intero.» (A. Einstein, *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, «Annalen der Physik», 1905, introduzione (traduzione della redazione)). Che cosa afferma Einstein? In che cosa la sua ipotesi va oltre quella di Planck del 1900? Quali fatti dell'effetto fotoelettrico la confermano, e quali esperimenti successivi la resero accettabile alla maggior parte dei fisici?

26. ●● Trova l'errore. Uno studente scrive: «Una lastra di zinco non emette elettroni con la luce rossa perché la luce è troppo debole: con una lampada rossa abbastanza potente gli elettroni uscirebbero, anche se più lentamente». Trova l'errore e correggi il ragionamento.

27. ●●● Stima. Una lampadina a LED emette circa 3 W di luce visibile, la cui lunghezza d'onda media si può prendere di 550 nm. a) Stima quanti fotoni emette al secondo. b) A 3 m di distanza la luce si distribuisce su una sfera; stima quanti fotoni al secondo entrano in una pupilla di 3 mm di diametro. c) Usa il risultato per spiegare perché nella vita quotidiana la natura «granulare» della luce non si nota.

Verso l'esame

28. ●● **Dal documento.** Osserva la Figura 13.6, che mostra la formazione di una figura d'interferenza con un fotone alla volta. a) Quale fenomeno mostra la figura, e che cosa si vede con 20 fotoni e con 3000 fotoni? b) Quale idea della fisica del Novecento illustra, e che cosa rappresenta la curva in basso? c) Collega l'esperimento al dibattito filosofico sul determinismo e sul caso.

29. ●● **Trattazione sintetica.** In 10–15 righe spiega l'effetto fotoelettrico: i fatti sperimentali, perché la teoria ondulatoria della luce non li spiega e come li spiega l'ipotesi dei quanti di luce di Einstein, con la sua equazione.

30. ●● **Collegamento.** Collega la nascita della fisica dei quanti (1900–1927) con la storia del Novecento: le vicende di Lenard e di Einstein in Germania, l'emigrazione degli scienziati negli anni Trenta e il congresso Solvay del 1927 come luogo di confronto internazionale.

PER APPROFONDIRE

- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: l'ultima parte, sui quanti, segue la strada dal corpo nero alle onde di materia con gli occhi di uno dei protagonisti, senza formule.
- [QED] R. P. Feynman, *QED. La strana teoria della luce e della materia*: quattro lezioni per non specialisti su come fotoni ed elettroni «scelgono» dove andare, con le probabilità al posto delle traiettorie.
- [HEI] W. Heisenberg, *Fisica e filosofia*: il fondatore del principio di indeterminazione discute l'interpretazione di Copenaghen e il suo rapporto con la filosofia antica e moderna.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: i capitoli sulla fisica quantistica offrono molti esercizi graduati sull'effetto fotoelettrico e sulla lunghezza d'onda di de Broglie.

Glossario del capitolo

Catastrofe ultravioletta
Previsione assurda della fisica classica, per cui un corpo nero emetterebbe un'energia infinita alle lunghezze d'onda corte; il nome è di Ehrenfest (1911).

Corpo nero
Corpo ideale che assorbe tutta la radiazione che lo colpisce; la radiazione che emette dipende solo dalla sua temperatura. Un buon modello è una cavità con un piccolo foro.

Costante di Planck
$h = 6{,}626 \times 10^{-34}$ J·s, costante universale che fissa la grandezza dei quanti; dal 2019 ha valore esatto per definizione.

Diffrazione degli elettroni
Formazione di massimi e minimi d'intensità da parte di un fascio di elettroni diffuso da un cristallo o da una lamina sottile; prova del comportamento ondulatorio della materia (1927).

Dualismo onda–particella
Proprietà della luce e della materia di manifestare, secondo l'esperimento, un comportamento ondulatorio o uno corpuscolare.

Effetto Compton
Aumento della lunghezza d'onda dei raggi X diffusi dagli elettroni, spiegato come un urto fra un fotone e un elettrone (1923).

Effetto fotoelettrico
Emissione di elettroni da parte di un metallo illuminato da radiazione di frequenza superiore a una soglia.

Emissione stimolata
Emissione di un fotone da parte di un atomo eccitato, provocata da un fotone di passaggio di uguale energia, di cui il fotone emesso è una copia; è il principio del laser (Einstein, 1917).

Fotone
Quanto di luce, di energia $E = hf$ e quantità di moto $p = h/\lambda$, privo di massa a riposo (Einstein, 1905; il nome è di Lewis, 1926).

Frequenza di soglia
La frequenza minima $f_0 = W/h$ della luce capace di estrarre elettroni da un metallo.

Interpretazione di Copenaghen
Interpretazione della meccanica quantistica, dovuta soprattutto a Bohr e Heisenberg, per cui la teoria prevede le probabilità dei risultati delle misure e il caso è un tratto della natura.

Lavoro di estrazione
L'energia minima W, di solito in eV, necessaria per estrarre un elettrone da un metallo; dipende dal metallo e dalla sua superficie.

Legge di Wien
$\lambda_{max} T = 2{,}898 \times 10^{-3}$ m·K: la lunghezza d'onda di massima emissione di un corpo nero è inversamente proporzionale alla temperatura assoluta.

Lunghezza d'onda di de Broglie
$\lambda_{dB} = h/(mv)$, lunghezza d'onda dell'onda di materia associata a una particella di quantità di moto mv (1924).

Microscopio elettronico
Microscopio che usa fasci di elettroni, deviati da campi magnetici, al posto della luce; la piccola lunghezza d'onda degli elettroni permette di vedere dettagli molto più fini.

Potenziale di arresto
La differenza di potenziale frenante $\Delta V_{arresto}$ che ferma anche i fotoelettroni più veloci: $K_{max} = e\Delta V_{arresto}$.

Principio di indeterminazione
$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/(4\pi)$: posizione e quantità di moto di una particella non possono essere definite insieme con precisione arbitraria (Heisenberg, 1927).

Quanto
La quantità minima di energia $E = hf$ che una radiazione di frequenza f può scambiare con la materia (Planck, 1900).

Soluzioni

1. B. Per la legge di Wien λ_{max} è inversamente proporzionale a T: raddoppiando T si dimezza. (È la potenza totale che diventa sedici volte maggiore.)

2. C. Lo scambio di energia avviene solo per quanti hf; l'ipotesi riguarda l'emissione e l'assorbimento, a ogni frequenza.

3. A. A frequenza fissa ogni fotone ha la stessa energia: raddoppiano i fotoni al secondo e quindi gli elettroni, ma K_{max} e il potenziale di arresto non cambiano.

4. D. I fotoni rossi (circa 1,8–2,0 eV) hanno energia minore del lavoro di estrazione dello zinco: nessun fotone, da solo, può estrarre un elettrone, e l'energia non si accumula.

5. B. La motivazione cita i servizi alla fisica teorica e in particolare la legge dell'effetto fotoelettrico; non la relatività.

6. C. $\lambda_{dB} = h/(mv)$: a parità di velocità è inversamente proporzionale alla massa, e il protone ha massa circa 1830 volte maggiore.

7. A. $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/(4\pi)$: il limite non dipende dalla qualità degli strumenti, e si può misurare bene una delle due grandezze a scapito dell'altra.

8. V. Il fotone non ha massa a riposo, ma ha quantità di moto $p = h/\lambda = E/c$, come mostra l'effetto Compton.

9. F. Per la legge di Wien $\lambda_{max} = 2{,}898 \times 10^{-3}$ m·K / 1000 K ≈ 2,9 μm, nell'infrarosso: il rosso che vediamo è la piccola coda visibile dello spettro.

10. F. Planck quantizzò lo scambio di energia fra materia e radiazione e lo considerava un artificio di calcolo; i quanti di luce sono di Einstein (1905), il nome «fotone» di Lewis (1926).

11. F. $K_{max} = hf - W$ cresce linearmente con f ma non è proporzionale a f: raddoppiando f, K_{max} diventa $2hf - W$, più del doppio.

12. V. Gli elettroni diffusi da un cristallo producono massimi e minimi d'intensità come un'onda diffratta da un reticolo (Davisson e Germer, 1927), con la lunghezza d'onda prevista da de Broglie.

13. $T = 2{,}898 \times 10^{-3}$ m·K / $2{,}90 \times 10^{-7}$ m = $1{,}0 \times 10^{4}$ K. Per 870 nm (lunghezza d'onda tripla) la temperatura è un terzo: $T = 2{,}898 \times 10^{-3}$ m·K / $8{,}70 \times 10^{-7}$ m = $3{,}3 \times 10^{3}$ K.

14. $E = hc/\lambda = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s · $3{,}00 \times 10^{8}$ m/s / $5{,}50 \times 10^{-7}$ m = $3{,}62 \times 10^{-19}$ J; in eV: $3{,}62 \times 10^{-19}$ J / $1{,}60 \times 10^{-19}$ J/eV = 2,26 eV (con 1240 eV·nm / 550 nm = 2,25 eV).

15. 620; $4{,}8 \times 10^{14}$. $\lambda = 1240$ eV·nm / 2,0 eV = 620 nm; $f = c/\lambda = 3{,}00 \times 10^{8}$ m/s / $6{,}20 \times 10^{-7}$ m = $4{,}8 \times 10^{14}$ Hz (oppure $f = E/h = 3{,}20 \times 10^{-19}$ J / $6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s).

16. a) $f_0 = W/h = 2{,}3 \cdot 1{,}60 \times 10^{-19}$ J / $6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s = $5{,}6 \times 10^{14}$ Hz; $\lambda_0 = 1240$ eV·nm / 2,3 eV ≈ 540 nm. b) Un fotone di 600 nm ha 1240/600 = 2,07 eV < 2,3 eV: no, non estrae elettroni (600 nm è maggiore della lunghezza d'onda di soglia).

17. a) Sodio: circa $5{,}6 \times 10^{14}$ Hz; zinco: circa $10{,}4 \times 10^{14}$ Hz. b) Il sodio: la sua soglia cade dentro le frequenze visibili ($4{,}3–7{,}5 \times 10^{14}$ Hz), e la luce verde, azzurra e violetta estrae elettroni; quella dello zinco è nell'ultravioletto. c) $hf = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s · $1{,}4 \times 10^{15}$ Hz = $9{,}3 \times 10^{-19}$ J = 5,8 eV; $K_{max} = 5{,}8$ eV − 4,3 eV = 1,5 eV, in accordo con il grafico.

18. $\lambda_{dB} = h/(m_e v) = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s / ($9{,}11 \times 10^{-31}$ kg · $2{,}0 \times 10^{6}$ m/s) = $3{,}6 \times 10^{-10}$ m = 0,36 nm.

19. $1{,}33 \times 10^{-27}$. $p = h/\lambda = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s / $5{,}00 \times 10^{-7}$ m = $1{,}33 \times 10^{-27}$ kg·m/s.

20. a) $E = hc/\lambda = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s · $3{,}00 \times 10^{8}$ m/s / $5{,}32 \times 10^{-7}$ m = $3{,}74 \times 10^{-19}$ J (2,34 eV). b) $N = P/E = 1{,}0 \times 10^{-3}$ J/s / $3{,}74 \times 10^{-19}$ J = $2{,}7 \times 10^{15}$ fotoni al secondo. c) $2{,}7 \times 10^{15} \cdot 10^{-9} \approx 2{,}7 \times 10^{6}$ fotoni al secondo: anche una frazione piccolissima di un fascio debole contiene milioni di fotoni al secondo.

21. a) hf = 1240 eV·nm / 400 nm = 3,10 eV; K_{max} = 3,10 eV − 2,1 eV = 1,0 eV = 1,6 × 10^{-19} J; $\Delta V_{arresto}$ = 1,0 V. b) $v = \sqrt{(2K_{max}/m_e)} = \sqrt{(2 \cdot 1{,}6 \times 10^{-19}\ \text{J} / 9{,}11 \times 10^{-31}\ \text{kg})} \approx 5{,}9 \times 10^5$ m/s. c) A 700 nm il fotone ha 1240/700 = 1,77 eV < 2,1 eV: nessun elettrone, per quanto intensa sia la luce. d) Si dimezza il numero di fotoni e quindi di elettroni al secondo (la corrente di saturazione); K_{max}, velocità massima e potenziale di arresto non cambiano.

22. a) $f_1 = c/\lambda_1 = 3{,}00 \times 10^8$ m/s / $3{,}00 \times 10^{-7}$ m = $1{,}00 \times 10^{15}$ Hz; $f_2 = 3{,}00 \times 10^8$ m/s / $4{,}00 \times 10^{-7}$ m = $7{,}50 \times 10^{14}$ Hz. b) $h = e(\Delta V_1 - \Delta V_2)/(f_1 - f_2) = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C · 1,03 V / $2{,}50 \times 10^{14}$ Hz = $6{,}59 \times 10^{-34}$ J·s. c) $W = hf_1 - e\Delta V_1 = 6{,}59 \times 10^{-34}$ J·s · $1{,}00 \times 10^{15}$ Hz − $1{,}60 \times 10^{-19}$ C · 1,63 V = $6{,}59 \times 10^{-19}$ J − $2{,}61 \times 10^{-19}$ J = $3{,}98 \times 10^{-19}$ J ≈ 2,5 eV (con hf_2 si ottiene lo stesso valore). Nessun metallo della Tabella A.5 ha esattamente 2,5 eV: i più vicini sono il sodio e il potassio (2,3 eV), ma i valori dipendono dallo stato della superficie, e con due sole misure non si può identificare il metallo con certezza.

23. a) $K = e\Delta V$ = 10 keV = $1{,}0 \times 10^4 \cdot 1{,}60 \times 10^{-19}$ J = $1{,}6 \times 10^{-15}$ J. b) $p = \sqrt{(2m_eK)} = \sqrt{(2 \cdot 9{,}11 \times 10^{-31}\ \text{kg} \cdot 1{,}6 \times 10^{-15}\ \text{J})} = 5{,}4 \times 10^{-23}$ kg·m/s; $\lambda_{dB} = h/p = 1{,}2 \times 10^{-11}$ m = 0,012 nm. c) 550 nm / 0,012 nm ≈ 4×10^4: la lunghezza d'onda è circa 45 000 volte minore; il limite imposto dalla diffrazione ai dettagli osservabili si abbassa nella stessa proporzione. d) $v = p/m_e = 5{,}9 \times 10^7$ m/s ≈ 0,20c. A questa velocità $\gamma \approx 1{,}02$: le correzioni relativistiche sono dell'ordine del percento, trascurabili per una stima; ma nei microscopi reali, a tensioni di centinaia di kilovolt, la relatività va considerata.

24. a) $\Delta p \geq h/(4\pi\Delta x) = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s / $(4\pi \cdot 1{,}0 \times 10^{-10}$ m) = $5{,}3 \times 10^{-25}$ kg·m/s; $\Delta v = \Delta p/m_e \geq 5{,}8 \times 10^5$ m/s. b) $\Delta p \geq 6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s / $(4\pi \cdot 1{,}0 \times 10^{-6}$ m) = $5{,}3 \times 10^{-29}$ kg·m/s; $\Delta v \geq 5{,}3 \times 10^{-29} / 1{,}0 \times 10^{-9}$ kg = $5{,}3 \times 10^{-20}$ m/s. c) Per l'elettrone nell'atomo l'indeterminazione sulla velocità è enorme, centinaia di km/s: non ha senso parlare di un'orbita definita. Per il granello di polvere, pur piccolissimo, è di 10^{-20} m/s, del tutto irrilevante: nel mondo macroscopico la fisica classica funziona.

25. Traccia di risposta. Einstein afferma che l'energia della luce non è distribuita con continuità sul fronte d'onda, ma concentrata in quanti indivisibili che si propagano e vengono assorbiti o emessi per intero. Planck aveva quantizzato solo lo scambio di energia fra materia e radiazione, e lo considerava un artificio; Einstein attribuisce i quanti alla luce stessa. La confermano la soglia di frequenza (un fotone da solo deve bastare a estrarre un elettrone), l'indipendenza di K_{max} dall'intensità, la proporzionalità fra intensità e numero di elettroni e l'assenza di ritardo. La verifica quantitativa dell'equazione venne da Millikan (1916), ma l'idea fu accettata dalla maggior parte dei fisici solo dopo l'effetto Compton (1923), che mostrò che il fotone trasporta anche quantità di moto.

26. L'errore è pensare che l'energia della luce si accumuli e che l'intensità possa compensare la frequenza. L'energia arriva in fotoni da hf, e ogni elettrone assorbe un solo fotone: un fotone rosso porta circa 1,8–2,0 eV, meno dei 4,3 eV necessari per lo zinco. Una lampada più potente manda più fotoni, tutti insufficienti: non esce nessun elettrone. Correzione: «la luce rossa non estrae elettroni dallo zinco, per quanto intensa, perché la sua frequenza è minore della frequenza di soglia; serve luce ultravioletta, sotto circa 290 nm».

27. a) Un fotone di 550 nm ha $3{,}6 \times 10^{-19}$ J; 3 W / $3{,}6 \times 10^{-19}$ J ≈ 8×10^{18} fotoni al secondo. b) La sfera di raggio 3 m ha superficie $4\pi(3\ \text{m})^2 \approx 113\ \text{m}^2$; la pupilla ha area $\pi(1{,}5 \times 10^{-3}\ \text{m})^2 \approx 7 \times 10^{-6}\ \text{m}^2$, circa 6×10^{-8} della sfera: entrano circa 5×10^{11} fotoni al secondo. c) Centinaia di miliardi di fotoni al secondo sono un flusso che l'occhio percepisce come continuo, come un getto d'acqua fatto di innumerevoli molecole; la granularità si nota solo con luce estremamente debole e rivelatori molto sensibili.

28. Traccia di risposta. a) L'interferenza di Young (Fisica 4, capitolo 16) ottenuta con un fotone alla volta: con 20 fotoni si vedono punti distribuiti apparentemente a caso, con 3000 compaiono le frange chiare e scure. b) Il dualismo onda–particella: ogni fotone arriva in un punto, intero, come una particella; la distribuzione degli arrivi segue l'intensità dell'onda, che rappresenta la probabilità (Born, 1926); la curva in basso è l'intensità prevista dalla

teoria ondulatoria. c) Collegamento: il singolo arrivo non si può prevedere, solo la statistica di molti arrivi; è la crisi del determinismo classico (Laplace) e il punto del dibattito fra Bohr ed Einstein («Dio non gioca a dadi»), cominciato al congresso Solvay del 1927. Errore tipico: dire che il fotone «si divide» fra le fenditure e arriva in più punti.

29. Traccia di risposta (10–15 righe). La luce che colpisce un metallo può estrarne elettroni (Hertz 1887, Hallwachs 1888, Lenard 1902). I fatti: esiste una frequenza di soglia sotto cui non esce alcun elettrone, a qualunque intensità; l'energia cinetica massima degli elettroni, misurata con il potenziale di arresto, cresce con la frequenza ma non con l'intensità; l'intensità aumenta il numero di elettroni; l'emissione è immediata. Per la teoria ondulatoria l'energia è distribuita con continuità e cresce con l'intensità: una luce intensa di qualunque frequenza dovrebbe estrarre elettroni veloci, e una debole dovrebbe farlo con ritardo. Einstein (1905) suppose che la luce sia fatta di quanti di energia hf, e che ogni fotone ceda tutta la sua energia a un elettrone: $K_{max} = hf - W$. Così la soglia è $f_0 = W/h$, l'energia dipende dalla frequenza, l'intensità decide il numero di fotoni e quindi di elettroni, e non c'è accumulo. Millikan verificò la legge nel 1916; il Nobel 1921 a Einstein la cita espressamente.

30. Traccia di risposta. Lenard misurò le proprietà dell'effetto fotoelettrico (1902) e ricevette il Nobel nel 1905; in seguito sostenne il nazismo e una «fisica tedesca» contro la «fisica ebraica», relatività compresa. Einstein, il cui Nobel premiava la legge dell'effetto fotoelettrico, lasciò la Germania nel 1933 per Princeton: le leggi e le persecuzioni del regime spinsero all'emigrazione molti scienziati, e il centro della ricerca si spostò negli Stati Uniti (il caso di Fermi, nel capitolo 14, è legato alle leggi razziali italiane del 1938). Il congresso Solvay del 1927 a Bruxelles mostra invece una comunità scientifica internazionale che discute insieme, al di là dei confini, i fondamenti della nuova fisica. Errori da evitare: attribuire a Einstein il Nobel per la relatività; inventare date o episodi.