CAPITOLO

14

L'atomo e il nucleo

«Se l'esistenza di questo nuovo metallo sarà confermata, proponiamo di chiamarlo polonio, dal nome del paese d'origine di uno di noi.» — Pierre e Marie Curie, nota all'Accademia delle scienze di Parigi, luglio 1898 (traduzione della redazione)

OBIETTIVI

1. Ricostruire il passaggio dal modello di Thomson al modello nucleare di Rutherford a partire dall'esperimento di Geiger e Marsden.
2. Spiegare gli spettri a righe di emissione e di assorbimento e calcolare con il modello di Bohr le righe dell'idrogeno.
3. Descrivere la composizione del nucleo, gli isotopi e il ruolo della forza nucleare forte.
4. Calcolare il difetto di massa e l'energia di legame di un nucleo e leggere la curva dell'energia di legame per nucleone.
5. Riconoscere i decadimenti α, β e γ e applicare la legge del decadimento, anche alla datazione con il carbonio-14.
6. Spiegare la fissione, la reazione a catena e la fusione, e discuterne le applicazioni e le implicazioni storiche e civili.

INDICE DEL CAPITOLO

14.1 Dentro l'atomo: da Thomson a Rutherford 2
14.2 Gli spettri a righe 5
14.3 Il modello di Bohr 7
14.4 Il nucleo atomico 10
14.5 La radioattività 13
14.6 Fissione e fusione 19

Fisica 5 · Parte V · La fisica del Novecento · versione 1.0
Capitolo 14: L'atomo e il nucleo · pagine 393–420 del volume completo · estratto per lo studio

Un granello di polvere d'oro sembra pieno, compatto, impenetrabile. Eppure, se potessimo ingrandire un suo atomo fino alle dimensioni di uno stadio, quasi tutta la sua massa starebbe in un puntino al centro del campo, grande come una mosca; il resto sarebbe un vuoto attraversato da pochi elettroni. Lo si scoprì nel 1909, sparando contro una sottilissima lamina d'oro le particelle emesse da una sostanza radioattiva. Da quel puntino, il nucleo, viene l'energia che fa splendere il Sole, che alimenta le centrali nucleari e che, nell'agosto del 1945, distrusse due città.

Questo capitolo chiude il percorso nel microcosmo iniziato con i quanti di luce del capitolo 13. Seguirai la costruzione dei modelli dell'atomo, da Thomson a Rutherford e a Bohr, e vedrai come le righe colorate degli spettri abbiano rivelato che l'energia dell'atomo è quantizzata. Poi entrerai nel nucleo: di che cosa è fatto, che cosa lo tiene insieme, perché alcuni nuclei si trasformano da soli, e come la fissione e la fusione liberino un'energia milioni di volte maggiore di quella delle reazioni chimiche.

14.1 Dentro l'atomo: da Thomson a Rutherford

14.1.1 L'atomo di Thomson

Alla fine dell'Ottocento l'atomo smise di essere indivisibile. Nel 1897 J. J. Thomson aveva mostrato che i raggi catodici sono fatti di particelle cariche negativamente, molto più leggere dell'atomo più leggero, e che le stesse particelle si estraggono da qualunque materiale (capitolo 7): gli elettroni sono un ingrediente comune a tutti gli atomi. Ma un atomo è neutro, e quindi deve contenere anche una carica positiva, uguale e opposta a quella dei suoi elettroni. Dove si trova, e com'è distribuita?

DA RICORDARE

Dai capitoli 1, 3 e 7: cariche, energie, masse

La carica elementare vale $e = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C: l'elettrone ha carica $-e$, e ogni carica osservata in natura ne è un multiplo. Due cariche puntiformi si respingono o si attraggono con la forza di Coulomb $F = k_0|q_1q_2|/r^2$, con $k_0 = 8{,}99 \times 10^9$ N·m^2/C^2, e hanno energia potenziale elettrica $U = k_0q_1q_2/r$.

L'elettronvolt è un'unità di energia: 1 eV = $1{,}60 \times 10^{-19}$ J è l'energia che acquista una carica e accelerata da una differenza di potenziale di 1 V; 1 MeV = 10^6 eV. Un fotone di frequenza f e lunghezza d'onda λ trasporta l'energia $E = hf = hc/\lambda$; con $hc = 1240$ eV·nm, l'energia in elettronvolt si ottiene dividendo 1240 per la lunghezza d'onda in nanometri (capitolo 13).

Lo spettrometro di massa del capitolo 7 separa gli ioni secondo il rapporto fra massa e carica, e ha mostrato che uno stesso elemento può avere atomi di massa diversa.

Nel 1904 Thomson propose il modello più semplice: l'atomo è una sfera di carica positiva distribuita in modo uniforme, grande circa 10^{-10} m, dentro la quale stanno immersi gli elettroni, in numero tale da renderla neutra (Figura 14.1a). In inglese il modello fu poi chiamato, in modo informale, *plum pudding*, il dolce con l'uvetta sparsa nell'impasto. Era un modello ragionevole, e Thomson cercò di spiegare con la disposizione degli elettroni le regolarità della tavola periodica; mancava però un esperimento capace di guardarci dentro.

14.1.2 L'esperimento di Geiger e Marsden

Lo strumento per guardare dentro l'atomo lo offrì la radioattività, di cui parleremo più avanti in questo capitolo. Alcune sostanze emettono spontaneamente particelle α: particelle pesanti, circa 7300 volte più dell'elettrone, con carica $+2e$, che escono con energie di alcuni MeV. Ernest Rutherford, che a Manchester ne studiava il comportamento, propose a Hans Geiger e al giovane studente Ernest Marsden di lanciarle contro una lamina d'oro sottilissima, spessa meno di un micrometro, e di contare quante venivano deviate e di quanto. Il rivelatore era uno schermo di solfuro di zinco: ogni particella che lo colpiva produceva un minuscolo lampo di luce, da osservare al microscopio, al buio, uno per uno.

Con il modello di Thomson le previsioni erano chiare. Una particella α è pesante e veloce, e dentro una sfera di carica positiva diffusa la forza elettrica è debole: ogni atomo può deviarla appena, e anche sommando gli effetti dei moltissimi atomi attraversati la deviazione deve restare di pochi gradi. Nel 1909 Geiger e Marsden trovarono che la grande maggioranza delle particelle passava infatti quasi indisturbata; ma una piccolissima frazione, una su molte migliaia, veniva deviata di più di 90°, cioè rimbalzava all'indietro verso la sorgente. Per il modello di Thomson era impossibile.

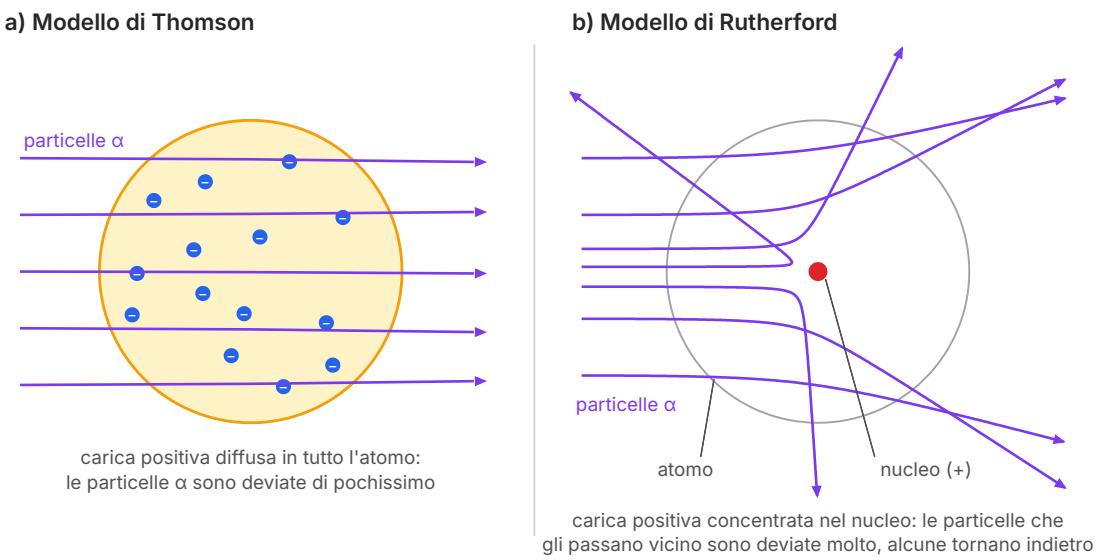


Figura 14.1 Le particelle α attraverso un atomo (schema, non in scala). a) Nel modello di Thomson la carica positiva è diffusa in tutto l'atomo: la forza elettrica su una particella α resta debole e le deviazioni sono piccolissime. b) Nel modello di Rutherford la carica positiva è concentrata nel nucleo: le traiettorie, calcolate per una repulsione coulombiana, sono rami di iperbole, e la particella che punta quasi dritta verso il nucleo torna indietro. Il nucleo è disegnato molto più grande del vero: in scala sarebbe invisibile.

14.1.3 Il nucleo

Rutherford impiegò quasi due anni a trovare la spiegazione, che pubblicò nel 1911. Per rimandare indietro una particella α così energetica serve una forza enorme, e una forza elettrica enorme richiede che la particella si avvicini moltissimo a una carica grande: la carica positiva dell'atomo, e con essa quasi tutta la sua massa, deve essere concentrata in una regione minuscola al centro, il **nucleo atomico**. Gli elettroni occupano lo spazio intorno, a distanze centomila volte maggiori. Rutherford calcolò, con la legge di Coulomb e la meccanica di Newton, come si distribuiscono le deviazioni: la traiettoria di ogni particella è un ramo di iperbole (Figura 14.1b), e il numero di particelle deviate diminuisce in modo preciso al crescere dell'angolo. Le misure di Geiger e Marsden, ripetute con grande cura negli anni successivi, confermarono la previsione: è il modello nucleare dell'atomo.

Le dimensioni rendono l'idea. Un atomo misura circa 10^{-10} m; un nucleo da 10^{-15} m, per quelli più leggeri, a circa 10^{-14} m, per i più pesanti. Ingrandiamo tutto mille miliardi di volte (10^{12}): l'atomo diventa una sfera di 100 m, quanto un grande stadio, e il nucleo un granello di 1–10 mm, una mosca al centro del campo. Poiché i volumi stanno come i cubi delle dimensioni, il nucleo occupa circa 10^{-15} del volume dell'atomo, eppure ne contiene più del 99,9% della massa: la materia ordinaria è quasi tutta vuoto, e la materia del nucleo è incredibilmente densa, circa 2×10^{17} kg/m^3.

ESEMPIO SVOLTO

Quanto si avvicina una particella α al nucleo d'oro

Problema. Una particella α (carica $2e$) con energia cinetica 7,7 MeV punta dritta contro un nucleo d'oro ($Z = 79$, carica $79e$), che resta praticamente fermo perché è circa 50 volte più pesante. A quale distanza minima arriva la particella prima di essere respinta indietro?

Idea. È la conservazione dell'energia del capitolo 3. Lontano dal nucleo la particella ha solo energia cinetica; nel punto di massimo avvicinamento si ferma un istante, e tutta l'energia cinetica è diventata energia potenziale elettrica $U = k_0 q_1 q_2 / d$.

Calcolo. $K = 7{,}7 \times 10^6$ eV $\cdot$ $1{,}60 \times 10^{-19}$ J/eV $= 1{,}23 \times 10^{-12}$ J. Da $K = k_0(2e)(79e)/d$:

$$d = \frac{k_0 \cdot 2 \cdot 79 \cdot e^2}{K} = \frac{8{,}99 \times 10^9 \cdot 158 \cdot (1{,}60 \times 10^{-19})^2}{1{,}23 \times 10^{-12}}\ \text{m} \approx 3{,}0 \times 10^{-14}\ \text{m}$$

Commento. La particella si ferma a 3×10^{-14} m dal centro senza toccare il nucleo, perché la deviazione segue esattamente la legge di Coulomb: il nucleo d'oro deve quindi essere più piccolo di così, almeno tremila volte più piccolo dell'atomo. Con particelle più energetiche, che arrivano più vicino, la legge di Coulomb a un certo punto smette di valere: è il segno che si è raggiunta la superficie del nucleo.

14.1.4 Un atomo che non dovrebbe esistere

Il modello nucleare risolveva un problema e ne apriva un altro. Un elettrone non può stare fermo vicino al nucleo, che lo attirerebbe: deve girargli intorno, come un pianeta intorno al Sole, con la forza di Coulomb nel ruolo della gravità. Ma un elettrone in moto circolare è accelerato, e una carica accelerata irradia onde elettromagnetiche, come gli elettroni che oscillano in un'antenna (capitolo 10). Irradiando perderebbe energia e scenderebbe a spirale verso il nucleo in una frazione piccolissima di secondo. Secondo la fisica classica, dunque, l'atomo di Rutherford non potrebbe esistere, e invece gli atomi sono stabili e tutti uguali fra loro. La chiave per uscire dal paradosso venne dalla luce che gli atomi emettono.

14.2 Gli spettri a righe

14.2.1 Le impronte digitali degli elementi

Un solido o un liquido incandescente, come il filamento di una lampadina, emette uno spettro continuo: attraverso un prisma o un reticolo di diffrazione (Fisica 4, capitolo 16) la sua luce si apre in tutti i colori, senza interruzioni. Un gas rarefatto e caldo, eccitato da una fiamma o da una scarica elettrica come nei tubi al neon (capitolo 5), si comporta in modo del tutto diverso: emette luce solo a poche lunghezze d'onda ben precise, e il suo spettro è una serie di righe lu-

minose su fondo scuro, lo **spettro di emissione** (Figura 14.2a). Al contrario, se la luce bianca attraversa lo stesso gas più freddo, dallo spettro continuo mancano proprio quelle lunghezze d'onda: si vedono righe scure su fondo colorato, lo **spettro di assorbimento** (Figura 14.2b). Un gas assorbe esattamente le lunghezze d'onda che è capace di emettere.

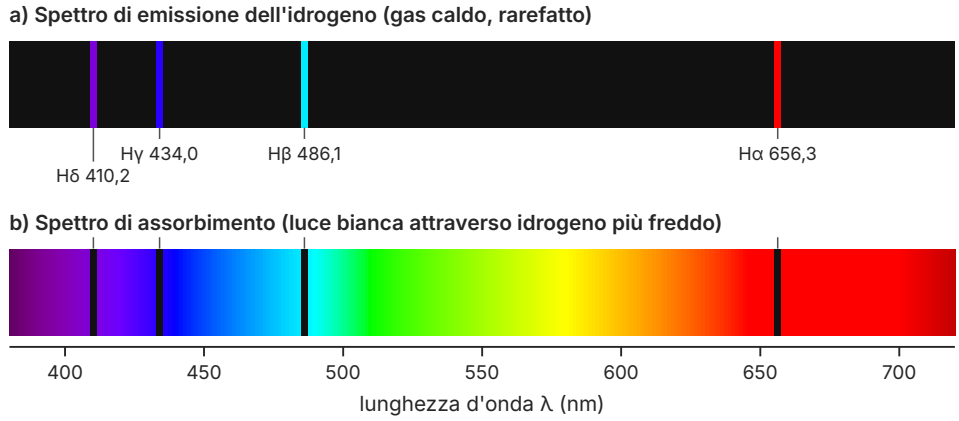


Figura 14.2 Gli spettri a righe dell'idrogeno nel visibile. a) Il gas caldo e rarefatto emette luce solo a quattro lunghezze d'onda: le righe della serie di Balmer, Hα, Hβ, Hγ e Hδ (valori misurati in aria, in nanometri; Tabella A.5). b) La luce bianca che attraversa idrogeno più freddo perde esattamente le stesse lunghezze d'onda. Posizioni delle righe in scala; i colori dello spettro continuo sono approssimati.

Le prime righe scure le aveva viste nello spettro del Sole, intorno al 1814, l'ottico tedesco Joseph von Fraunhofer, che ne catalogò alcune centinaia e indicò le principali con lettere dell'alfabeto, ancora in uso. La loro origine la spiegarono a Heidelberg, fra il 1859 e il 1860, il fisico Gustav Kirchhoff e il chimico Robert Bunsen: ogni elemento chimico, allo stato di gas, ha un suo insieme di righe, sempre lo stesso, che lo identifica come un'impronta digitale. La coppia di righe gialle che il sodio emette in una fiamma coincide con due righe scure del Sole: c'è sodio nell'atmosfera solare. Era nata la spettroscopia. Con essa Kirchhoff e Bunsen scoprirono due elementi nuovi, il cesio, dalle sue righe azzurre (latino *caesius*, «azzurro»), e il rubidio; e nel 1868, durante un'eclissi, nello spettro del Sole fu osservata una riga gialla che non apparteneva a nessun elemento noto. Fu attribuita a un elemento nuovo, chiamato elio dal greco ἥλιος, «sole»; sulla Terra lo si trovò solo nel 1895. Per la prima volta si conosceva la composizione chimica di un corpo che nessuno avrebbe mai potuto toccare.

14.2.2 La serie di Balmer

L'atomo più semplice, l'idrogeno, ha nel visibile solo quattro righe, a 656,3 nm (rossa), 486,1 nm (azzurra), 434,0 nm e 410,2 nm (violette). Nel 1885 Johann Jakob Balmer, insegnante in una scuola femminile di Basilea, trovò che le loro lunghezze d'onda seguono una formula sorpren-

dentemente semplice; pochi anni dopo lo svedese Johannes Rydberg la scrisse nella forma oggi usata:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 3, 4, 5, 6, \ldots$$

dove $R = 1{,}097 \times 10^7\ \mathrm{m}^{-1}$ è la costante di Rydberg. Con $n = 3$ si ottiene la riga rossa, con $n = 4$ quella azzurra, e così via: per n sempre più grande le righe si addensano verso 365 nm, nell'ultravioletto. È la **serie di Balmer**. Altre serie dello stesso tipo, con 1^2 o 3^2 al posto di 2^2, furono trovate più tardi nell'ultravioletto e nell'infrarosso. Una formula così precisa, con i numeri interi al posto giusto, doveva nascondere una legge; ma nessuno sapeva quale.

14.3 Il modello di Bohr

14.3.1 Le orbite stazionarie

Nel 1913 il danese Niels Bohr, che aveva lavorato nel laboratorio di Rutherford, mise insieme i tre pezzi del problema: il nucleo di Rutherford, le righe di Balmer e i quanti di Planck e di Einstein (capitolo 13). Il suo modello dell'atomo di idrogeno si fonda su due ipotesi che contraddicono apertamente la fisica classica:

1. l'elettrone può percorrere solo alcune orbite circolari, scelte da una regola di quantizzazione; su queste orbite, gli **stati stazionari**, non irradia, contro quanto prevede l'elettromagnetismo, e la sua energia resta costante;
2. l'atomo emette o assorbe luce solo quando l'elettrone salta da uno stato stazionario a un altro, e in ogni salto emette o assorbe un solo fotone, che porta via o fornisce esattamente la differenza di energia fra i due stati.

Bohr non spiegava *perché* l'elettrone non irradiasse: lo postulava, perché gli atomi stabili sono un fatto. Le orbite permesse si numerano con un intero $n = 1, 2, 3, \ldots$, il numero quantico, e Bohr ne calcolò le energie con la legge di Coulomb e la sua regola di quantizzazione. Il risultato, che qui usiamo senza ricavarlo, è

$$E_n = -\frac{13{,}6\ \mathrm{eV}}{n^2} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

Le energie permesse, i **livelli energetici**, sono negative: lo zero corrisponde all'elettrone libero, lontanissimo dal nucleo e fermo, e un elettrone legato ha meno energia di uno libero, come un satellite nel campo gravitazionale della Terra (Fisica 4, capitolo 5). Il livello più basso, $n = 1$, con $E_1 = -13{,}6$ eV, è lo **stato fondamentale**, in cui si trova normalmente l'atomo; gli altri sono stati eccitati: −3,40 eV per $n = 2$, −1,51 eV per $n = 3$, e così via, sempre più fitti verso lo zero (Figura 14.3). L'orbita dello stato fondamentale ha raggio $5{,}3 \times 10^{-11}$ m: il modello ritrova la dimensione

dell'atomo. Per strappare l'elettrone all'atomo nello stato fondamentale bisogna fornirgli 13,6 eV: è l'**energia di ionizzazione** dell'idrogeno, e la si misura proprio di questo valore.

14.3.2 I salti quantici e le righe spettrali

Quando l'elettrone salta da un livello iniziale E_i a un livello finale più basso E_f, l'atomo emette un fotone di energia

$$hf = E_i - E_f$$

Poiché i livelli sono pochi e fissi, anche le energie dei fotoni, e quindi le lunghezze d'onda, sono poche e fisse: ecco perché lo spettro è fatto di righe. Proviamo con il salto da $n = 3$ a $n = 2$: $hf = -1{,}51\ \text{eV} - (-3{,}40\ \text{eV}) = 1{,}89\ \text{eV}$, e $\lambda = (1240\ \text{eV·nm})/(1{,}89\ \text{eV}) \approx 656\ \text{nm}$. È la riga rossa Hα. I salti verso il livello 2 da tutti i livelli superiori danno l'intera serie di Balmer (Tabella 14.1), e il numero 2^2 della formula di Rydberg è proprio il livello d'arrivo; i salti verso il livello 1 danno fotoni più energetici, nell'ultravioletto, quelli verso il livello 3 fotoni nell'infrarosso. Il modello spiega anche l'assorbimento: un atomo nello stato $n = 2$ assorbe solo i fotoni che hanno l'energia giusta per portarlo a un livello superiore, e sono gli stessi che emette scendendo.

Tabella 14.1 Le righe visibili dell'idrogeno: lunghezze d'onda calcolate con il modello di Bohr ($E_i - E_f$ con $E_n = -13{,}6\ \text{eV}/n^2$, e $\lambda = 1240\ \text{eV·nm}/(E_i - E_f)$) e misurate in aria (Tabella A.5).

Riga	Salto	$E_i - E_f$ (eV)	λ calcolata (nm)	λ misurata (nm)
Hα, rossa	3 → 2	1,89	656	656,3
Hβ, azzurra	4 → 2	2,55	486	486,1
Hγ, violetta	5 → 2	2,86	434	434,0
Hδ, violetta	6 → 2	3,02	410	410,2

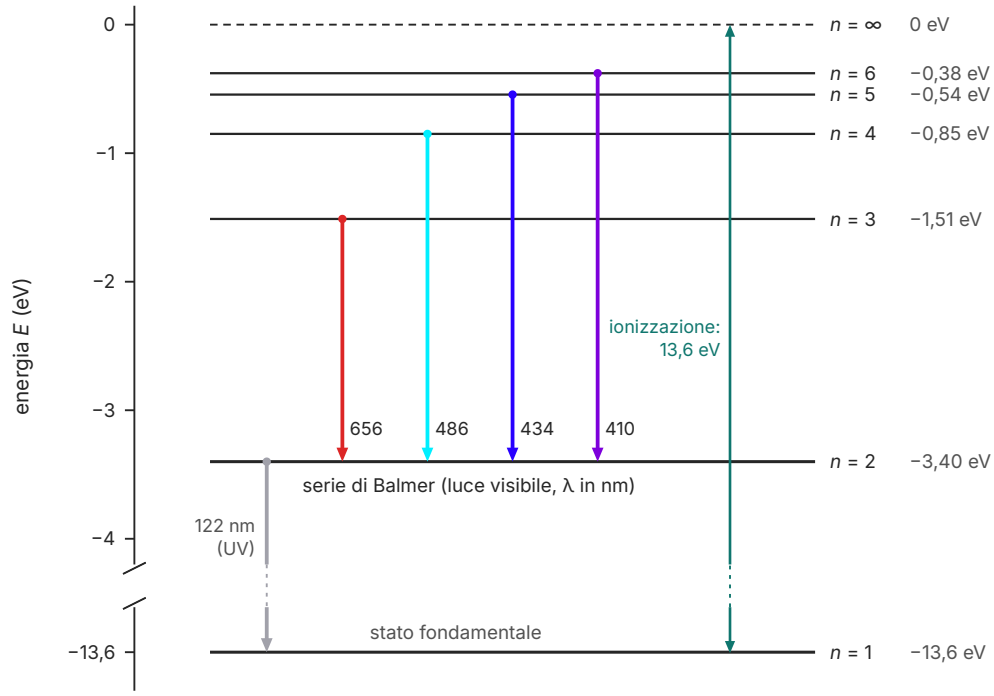


Figura 14.3 I livelli energetici dell'atomo di idrogeno secondo il modello di Bohr, $E_n = -13{,}6\ \text{eV}/n^2$, in scala (l'asse è interrotto fra −4 eV e −13 eV). Le frecce colorate sono i salti verso il livello $n = 2$ che producono le quattro righe visibili della serie di Balmer; la freccia grigia è il salto 2 → 1, che emette un fotone ultravioletto di 122 nm; la doppia freccia è l'energia di ionizzazione dallo stato fondamentale, 13,6 eV.

L'accordo con le misure, entro un millesimo, fu la prova più forte del modello. Un anno dopo, nel 1914, James Franck e Gustav Hertz mostrarono con un esperimento diverso, facendo urtare elettroni contro atomi di mercurio, che gli atomi assorbono energia solo a pacchetti di valore fisso: i livelli esistono davvero.

14.3.3 I limiti del modello

Il modello di Bohr funziona benissimo per l'idrogeno e per gli ioni con un solo elettrone, ma già per l'elio, con due elettroni, dà risultati sbagliati; non spiega perché alcune righe siano più intense di altre, e soprattutto mescola due fisiche: usa le leggi classiche per calcolare le orbite e poi vieta, per decreto, all'elettrone di irradiare. Negli anni Venti la meccanica quantistica, nata dalle idee di de Broglie e di Heisenberg del capitolo 13, lo sostituì. Delle orbite non resta nulla: l'elettrone non ha una traiettoria, e la teoria dà solo la probabilità di trovarlo nelle varie regioni intorno al nucleo, gli orbitali che studi nel corso di Scienze naturali. Restano invece, con gli

stessi valori, i livelli energetici e la regola dei salti: sono ancora oggi il modo in cui si legge uno spettro.

ERRORE FREQUENTE

L'elettrone gira davvero su un'orbita?

No. Il disegno dell'atomo come un piccolo sistema solare, con gli elettroni su orbite circolari, è il modello di Bohr del 1913, utile per ricordare i livelli energetici ma sbagliato come immagine: per il principio di indeterminazione (capitolo 13) l'elettrone non ha una posizione e una velocità definite insieme, e quindi nessuna traiettoria. Del modello di Bohr sono giusti i numeri, cioè le energie dei livelli dell'idrogeno, non l'immagine.

Un secondo errore è pensare che un atomo possa assorbire qualunque fotone abbastanza energetico. Un atomo di idrogeno nello stato fondamentale non assorbe un fotone di 5 eV, né uno di 11 eV: per salire al livello 2 servono esattamente 10,2 eV. Solo al di sopra dei 13,6 eV della ionizzazione qualunque energia va bene, perché l'elettrone liberato porta via l'eccesso come energia cinetica.

14.4 Il nucleo atomico

14.4.1 Protoni e neutroni

Il nucleo più semplice, quello dell'idrogeno, è una sola particella con carica $+e$ e massa circa 1836 volte quella dell'elettrone: il **protone**. Già nel 1919 Rutherford aveva osservato che le particelle α, urtando nuclei di azoto, ne fanno uscire protoni: i nuclei contengono protoni. Ma i conti non tornavano: il nucleo di elio ha carica $2e$ e una massa pari a circa quattro protoni. Rutherford immaginò che nel nucleo ci fosse anche una particella neutra, di massa simile a quella del protone, che fu trovata nel 1932 da James Chadwick a Cambridge: il **neutrone**. Protoni e neutroni, i costituenti del nucleo, si chiamano insieme **nucleoni**.

Un nucleo si descrive con tre numeri: il **numero atomico** Z, il numero dei suoi protoni, che è anche il numero degli elettroni dell'atomo neutro e stabilisce di quale elemento si tratta; il numero di neutroni N; e il **numero di massa** $A = Z + N$, il numero totale di nucleoni. Un nucleo determinato, o nuclide, si indica con il simbolo chimico preceduto da A in alto e da Z in basso: ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ è l'elio-4, con 2 protoni e 2 neutroni; ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ è l'uranio-235, con 92 protoni e 143 neutroni. Poiché Z è fissato dal simbolo, spesso si scrive solo ${}^{235}\mathrm{U}$, o uranio-235.

Atomi con lo stesso Z e diverso N sono **isotopi** dello stesso elemento: hanno gli stessi elettroni e quindi lo stesso comportamento chimico, ma masse diverse, e per questo lo spettrometro di massa li separa (capitolo 7). Il carbonio, per esempio, ha due isotopi stabili, ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ e ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$, e uno radioattivo, ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$. Le masse dei nuclidi si esprimono con l'**unità di massa atomica**, definita come un dodicesimo della massa dell'atomo di carbonio-12: $1\ \mathrm{u} = 1{,}660\,54 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$. Il protone e il neutrone hanno massa poco superiore a 1 u (Tabella A.1).

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Atomo viene dal greco ἄτομος, «indivisibile», la parola di Democrito e di Lucrezio che hai incontrato nella teoria cinetica dei gas (Fisica 4, capitolo 9). Con l'elettrone di Thomson e il nucleo di Rutherford l'atomo si è rivelato divisibile, e anzi quasi vuoto; ma il nome è rimasto, e nessuno ha proposto di cambiarlo.

Nucleo è il latino *nucleus*, «nocciolo», «gheriglio», diminutivo legato a *nux*, «noce». In biologia indicava già dal 1831 il nucleo della cellula, così chiamato dal botanico Robert Brown; fu adottato per il centro dell'atomo poco dopo l'articolo del 1911, in cui Rutherford parlava ancora di una «carica centrale».

Isotopo è un composto di ἴσος, «uguale», e τόπος, «luogo»: due isotopi occupano lo stesso posto nella tavola periodica, perché hanno lo stesso numero atomico. Il termine è del chimico inglese Frederick Soddy (1913).

Protone viene da πρῶτος, «primo»: il nome, proposto da Rutherford nel 1920, indicava il nucleo dell'idrogeno come il mattone primo di tutti i nuclei.

14.4.2 La forza nucleare forte

Un nucleo è un enigma. I protoni, tutti positivi, sono stipati a distanze di circa 10^{-15} m, e la forza di Coulomb fra due di essi a questa distanza vale

$$F = k_0 \frac{e^2}{r^2} = 8{,}99 \times 10^9 \text{ N·m}^2/\text{C}^2 \cdot \frac{(1{,}60 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(1{,}0 \times 10^{-15} \text{ m})^2} \approx 230 \text{ N}$$

il peso di un oggetto di 23 kg, applicato a una particella di massa $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg. L'attrazione gravitazionale fra gli stessi protoni, circa 2×10^{-34} N, è più piccola di 36 ordini di grandezza e non conta nulla. Deve esistere una forza attrattiva più intensa della repulsione elettrica: è la **forza nucleare forte**, che agisce fra tutti i nucleoni, protoni e neutroni, senza distinguere la carica. Ha però un raggio d'azione brevissimo: è fortissima fino a distanze di circa 10^{-15} m e diventa trascurabile già a qualche 10^{-15} m. Per questo non la percepiamo nella vita quotidiana, e per questo ogni nucleone attrae soltanto i vicini, mentre la repulsione elettrica, a lungo raggio, agisce fra tutti i protoni. Nei nuclei pesanti, con molti protoni, la repulsione cresce più in fretta dell'attrazione: servono più neutroni che protoni per tenerli insieme, e oltre un certo numero di nucleoni nessun nucleo è stabile.

14.4.3 Il difetto di massa e l'energia di legame

Per separare un nucleo nei suoi nucleoni bisogna compiere lavoro contro la forza forte. L'energia necessaria è l'**energia di legame** del nucleo: è l'energia che il nucleo ha in meno rispetto ai suoi nucleoni separati, ed è anche quella che si libera quando il nucleo si forma. E qui entra la

relazione di Einstein fra massa ed energia del capitolo 12, $E = mc^2$: un sistema che ha meno energia ha anche meno massa. Un nucleo pesa *meno* della somma dei suoi protoni e neutroni; la differenza è il difetto di massa Δm, e l'energia di legame vale

$$E_{\text{legame}} = \Delta m \cdot c^2$$

Con le masse in unità di massa atomica il conto è immediato, perché a 1 u corrisponde l'energia $(1{,}660\,54 \times 10^{-27}\ \text{kg})(2{,}998 \times 10^{8}\ \text{m/s})^2 = 1{,}492 \times 10^{-10}\ \text{J} = 931{,}5\ \text{MeV}$. Nella pratica si usano le masse degli *atomi* neutri, che sono quelle tabulate (Tabella A.6): al posto dei protoni si prendono altrettanti atomi di idrogeno, così che le masse degli elettroni si compensano.

ESEMPIO SVOLTO

L'energia di legame dell'elio-4

Problema. Calcola il difetto di massa e l'energia di legame del nucleo di elio-4, $^{4}_{2}\text{He}$, e l'energia di legame per nucleone. Masse atomiche (Tabella A.6): ^{1}H 1,007 825 u; neutrone 1,008 665 u; ^{4}He 4,002 603 u.

Difetto di massa. Due atomi di idrogeno e due neutroni pesano $2 \cdot 1{,}007\,825\ \text{u} + 2 \cdot 1{,}008\,665\ \text{u} = 4{,}032\,980\ \text{u}$. L'atomo di elio pesa 4,002 603 u. $\Delta m = 4{,}032\,980\ \text{u} - 4{,}002\,603\ \text{u} = 0{,}030\,377\ \text{u}$: lo 0,75% della massa dei costituenti.

Energia di legame. $E_{\text{legame}} = 0{,}030\,377\ \text{u} \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} \approx 28{,}3\ \text{MeV}$, cioè $28{,}3 \times 10^{6} \cdot 1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{J} \approx 4{,}53 \times 10^{-12}\ \text{J}$ per nucleo.

Per nucleone. 28,3 MeV/4 ≈ 7,07 MeV.

Commento. Nelle reazioni chimiche si scambiano pochi elettronvolt per atomo: legare i nucleoni di un nucleo coinvolge energie milioni di volte maggiori. Un difetto di massa esiste anche in chimica, ma è dell'ordine di una parte su dieci miliardi (capitolo 12), e nessuna bilancia lo può rivelare; nei nuclei è dell'ordine dell'1%, e si misura.

14.4.4 La curva dell'energia di legame

Per confrontare nuclei diversi conta l'energia di legame per nucleone, E_{legame}/A: è il «costo» medio per staccare un nucleone, e dice quanto è legato il nucleo. Il grafico della Figura 14.4, costruito con valori misurati, è una delle curve più importanti della fisica. Parte da poco più di 1 MeV per il deuterio, sale rapidamente, con un picco isolato per l'elio-4, particolarmente stabile, raggiunge il massimo, circa 8,8 MeV, per il ferro e il nichel, e poi scende lentamente fino a circa 7,6 MeV per l'uranio. I nuclei di massa media sono i più legati.

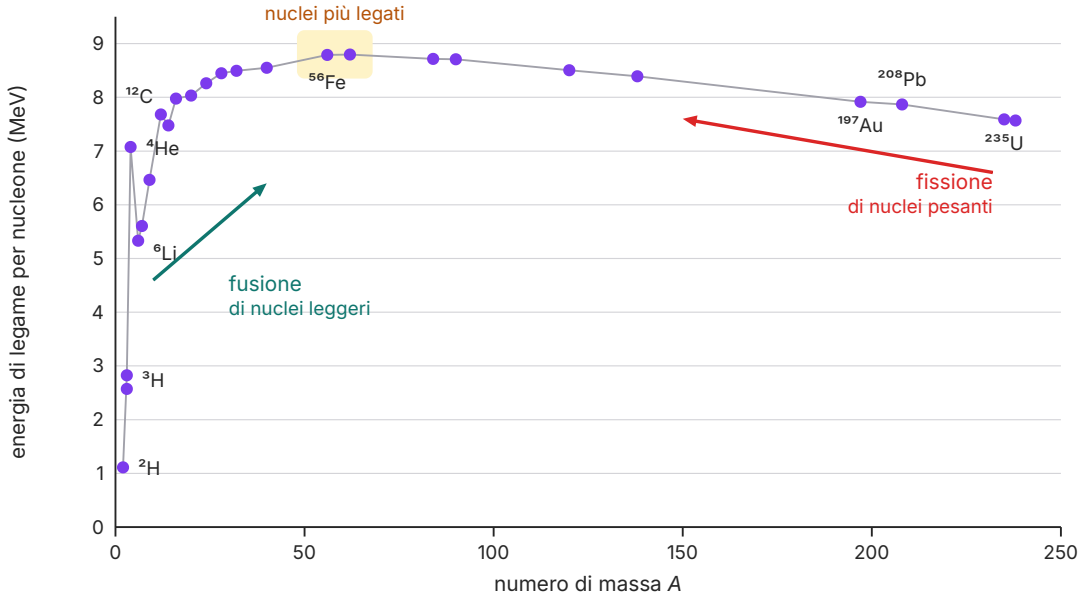


Figura 14.4 L'energia di legame per nucleone in funzione del numero di massa A, per alcuni nuclidi (valori tabulati, arrotondati; la spezzata grigia unisce i punti solo come guida per l'occhio). Il massimo, intorno al ferro e al nichel, separa i nuclei leggeri, che liberano energia unendosi (fusione), da quelli pesanti, che la liberano spezzandosi (fissione).

La forma della curva dice dove si trova l'energia. Se un nucleo pesante, come l'uranio-235, si spezza in due nuclei di massa media, i prodotti stanno più in alto sulla curva: ogni nucleone guadagna circa 0,9 MeV di legame, e con 235 nucleoni si liberano circa 200 MeV. È la *fissione*. Se invece due nuclei leggeri si uniscono in uno più pesante, per esempio in un nucleo di elio, si sale sul ramo ripido di sinistra, e l'energia liberata per nucleone è ancora maggiore. È la *fusione*. Due processi opposti liberano energia per la stessa ragione: in entrambi i prodotti sono *più* legati dei nuclei di partenza, e la loro massa totale è minore.

14.5 La radioattività

14.5.1 Becquerel e i Curie

Nel 1896, pochi mesi dopo la scoperta dei raggi X, Henri Becquerel cercava a Parigi se i sali di uranio, esposti al Sole, emettessero raggi simili. Avvolgeva lastre fotografiche in carta nera, vi appoggiava sopra i sali e lasciava tutto al Sole. In alcune giornate nuvolose ripose il pacchetto in un cassetto; sviluppate le lastre, le trovò impressionate lo stesso. L'uranio emetteva da solo, senza bisogno di luce, una radiazione invisibile capace di attraversare la carta.

Il fenomeno divenne una ricerca sistematica con Marie Skłodowska, nata a Varsavia nel 1867 e laureata a Parigi, e con il marito Pierre Curie. Misurando con un elettrometro la debole corrente prodotta dalla radiazione nell'aria, Marie Curie mostrò che l'intensità della radiazione dipende solo dalla quantità di uranio, non dal composto chimico, dalla temperatura o dalla luce: è una proprietà degli atomi. Un minerale di uranio, la pechblenda, era però più attivo di quanto spiegasse l'uranio che conteneva; separando chimicamente il minerale nei suoi componenti, nel 1898 i Curie annunciarono la scoperta di due elementi nuovi, molto più attivi dell'uranio: il polonio, chiamato così in onore della Polonia, e il radio. Per isolare il radio puro servirono poi anni di lavoro su tonnellate di minerale. Nel titolo della nota del luglio 1898 compare l'aggettivo *radio-active*: la **radioattività** è l'emissione spontanea di radiazione da parte di nuclei instabili. Nel 1903 Becquerel e i due Curie ebbero il premio Nobel per la fisica; nel 1911 Marie Curie ebbe anche quello per la chimica.

14.5.2 Tre tipi di decadimento

Fra il 1899 e il 1903 Rutherford distinse, anche facendole passare fra i poli di un magnete, tre radiazioni diverse, che chiamò con le prime lettere dell'alfabeto greco; la terza, la più penetrante, era stata osservata nel 1900 dal francese Paul Villard. Con Frederick Soddy capì anche, nel 1902, il fatto più sconvolgente: un nucleo radioattivo che emette una particella si trasforma nel nucleo di un altro elemento. È il **decadimento radioattivo**, il sogno degli alchimisti realizzato dalla natura. In ogni decadimento si conservano la carica totale, quindi la somma dei numeri atomici, e il numero totale di nucleoni, quindi la somma dei numeri di massa (Tabella 14.2).

Nel decadimento α il nucleo emette una particella α, che è un nucleo di elio-4, come dimostrarono Rutherford e Thomas Royds raccogliendo il gas che si forma: Z diminuisce di 2 e A di 4. Per esempio, il radio-226 diventa radon-222: ${}^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$.

Nel decadimento β il nucleo emette un elettrone: un neutrone del nucleo si trasforma in un protone, Z aumenta di 1 e A non cambia. Il carbonio-14 diventa così azoto-14: ${}^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + \mathrm{e}^{-} + \bar{\nu}$. L'elettrone non c'era prima nel nucleo: nasce nel decadimento. Il simbolo finale ricorda una scoperta difficile: gli elettroni β escono con energie diverse da un decadimento all'altro, come se una parte dell'energia sparisse. Nel 1930 Wolfgang Pauli propose che la porti via una particella neutra, leggerissima e quasi impossibile da rivelare; nel 1933–34 Enrico Fermi costruì la teoria del decadimento β e la chiamò neutrino, il «piccolo neutro». Il neutrino fu osservato direttamente solo nel 1956. Esiste anche un decadimento β^{+}, in cui un protone diventa neutrone e il nucleo emette un positrone, l'antiparticella dell'elettrone, con carica $+e$.

Nel decadimento γ, infine, un nucleo rimasto in uno stato eccitato, spesso dopo un decadimento α o β, scende a un livello di energia più basso emettendo un fotone di alta energia, un raggio γ: è il modello di Bohr trasferito nel nucleo, con energie di MeV invece che di eV. Z e A non cambiano. I raggi γ sono onde elettromagnetiche come la luce, ma con lunghezze d'onda inferiori a 0,01 nm (capitolo 10).

Tabella 14.2 I tre tipi di decadimento radioattivo. Il potere penetrante è indicativo: dipende dall'energia della radiazione.

Decadimento	Che cosa emette il nucleo	Carica	Variazione di Z e A	Che cosa lo ferma
α	nucleo di elio-4 (2 protoni e 2 neutroni)	$+2e$	$Z - 2$, $A - 4$	un foglio di carta, pochi centimetri d'aria
β^-	elettrone (e un antineutrino)	$-e$	$Z + 1$, A invariato	pochi millimetri di alluminio
γ	fotone di alta energia	0	Z e A invariati	centimetri di piombo o decimetri di cemento, che lo attenuano

14.5.3 La legge del decadimento

Un nucleo radioattivo non invecchia. Non c'è modo di prevedere quando un singolo nucleo di radio decadrà: può farlo fra un secondo o fra diecimila anni, e la probabilità che decada nel prossimo secondo è sempre la stessa, qualunque sia la sua «età». Si sa però con grande precisione che cosa fa un numero grande di nuclei: in ogni intervallo di tempo uguale ne decade sempre la stessa *frazione*. Il tempo in cui decade metà dei nuclei presenti è il **tempo di dimezzamento** $T_{1/2}$, chiamato anche emivita. Partendo da N_0 nuclei, dopo un tempo di dimezzamento ne restano $N_0/2$, dopo due $N_0/4$, dopo tre $N_0/8$: è la stessa forma di dimezzamento a passo costante che hai visto nella scarica di un condensatore (capitolo 5). In generale, dopo un tempo t, restano

$$N = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}}$$

I tempi di dimezzamento vanno da frazioni di secondo a miliardi di anni: 8,02 giorni per lo iodio-131, 30,1 anni per il cesio-137, 1600 anni per il radio-226, 4,47 miliardi di anni per l'uranio-238 (Tabella A.6). E non dipendono, con ottima approssimazione, né dalla temperatura né dalla pressione né dal composto chimico in cui si trova l'atomo: il nucleo è troppo piccolo e troppo legato perché ciò che accade agli elettroni lo raggiunga.

Ciò che si misura con un contatore Geiger non è il numero dei nuclei, ma il numero di decadimenti al secondo, l'**attività** del campione. Si misura in becquerel: 1 Bq è un decadimento al secondo. L'attività è proporzionale al numero di nuclei ancora presenti, e quindi si dimezza con lo stesso tempo di dimezzamento; a parità di numero di nuclei è tanto maggiore quanto più breve è $T_{1/2}$. Un grammo di radio-226, per esempio, ha un'attività di circa $3{,}7 \times 10^{10}$ Bq: era la vecchia unità dell'attività, il curie.

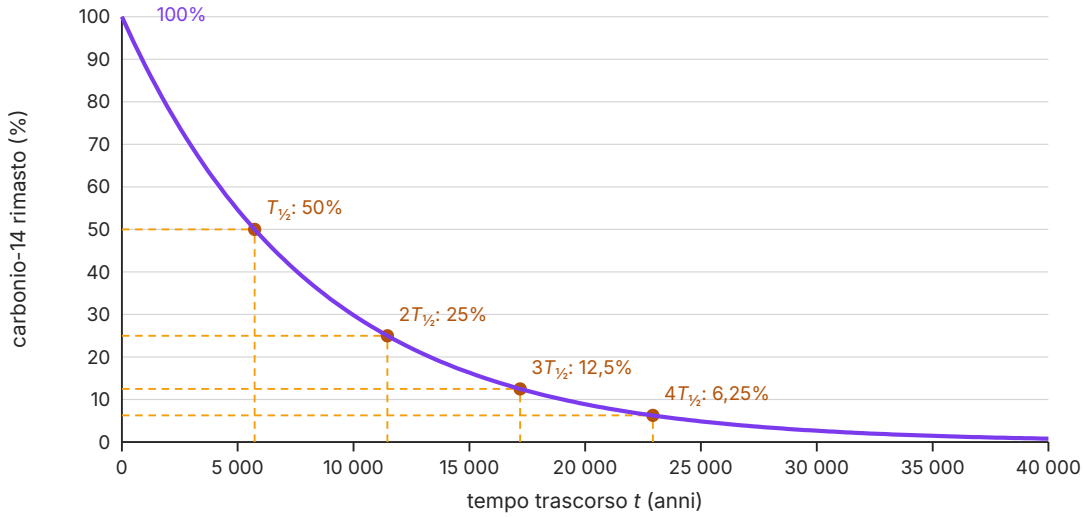


Figura 14.5 La legge del decadimento per il carbonio-14 ($T_{½}$ = 5730 anni), calcolata da $N = N_0 \cdot 2^{-t/5730}$ e riportata come percentuale dei nuclei iniziali. A ogni tempo di dimezzamento ciò che resta si dimezza: 50%, 25%, 12,5%, 6,25%; la curva si avvicina allo zero senza mai raggiungerlo.

ERRORE FREQUENTE

Dopo due tempi di dimezzamento il campione è esaurito?

No. Se in un tempo di dimezzamento decade metà dei nuclei, viene spontaneo pensare che in due decada tutto. Ma il dimezzamento si applica a ciò che *resta*: dopo $2T_{½}$ rimane un quarto dei nuclei, dopo $3T_{½}$ un ottavo, dopo $10T_{½}$ circa un millesimo (1/1024). Il numero di nuclei non arriva mai a zero seguendo la legge; smette di valere solo quando i nuclei rimasti sono così pochi che la statistica non ha più senso.

Ricorda anche che la legge è statistica. Con dieci nuclei può capitare che ne decadano sei o tre in un tempo di dimezzamento; con 10^{20} nuclei la frazione che decade è esattamente un mezzo, entro una precisione straordinaria.

14.5.4 La datazione con il carbonio-14

Negli strati alti dell'atmosfera i neutroni prodotti dai raggi cosmici trasformano continuamente una piccola parte dell'azoto-14 in carbonio-14, radioattivo. Il carbonio-14 entra nell'anidride carbonica, poi nelle piante attraverso la fotosintesi e negli animali attraverso il cibo: finché un organismo vive, la frazione di carbonio-14 nel suo carbonio è la stessa dell'atmosfera. Quando muore smette di scambiare carbonio con l'ambiente, e il carbonio-14 che contiene decade con $T_{½}$ = 5730 anni senza essere rimpiazzato. Misurando quanto ne resta in un reperto di legno, osso o tessuto, e confrontandolo con quello di un organismo vivo, si ricava da quanto tempo è

morto. È la datazione con il carbonio-14, messa a punto da Willard Libby alla fine degli anni Quaranta e premiata con il Nobel per la chimica nel 1960: uno strumento fondamentale dell'archeologia e della storia antica.

ESEMPIO SVOLTO

Datare un reperto dalla curva e con i logaritmi

Problema. In un frammento di legno di una nave antica il carbonio-14 è il 30,0% di quello di un legno attuale. a) Stima l'età del reperto leggendo la Figura 14.5. b) Calcolala con la legge del decadimento.

a) Dal grafico. La retta orizzontale al 30% incontra la curva fra 1 e 2 tempi di dimezzamento, poco più vicino al secondo: sull'asse dei tempi si legge circa 10 000 anni.

b) Con i logaritmi. Da $N/N_0 = 2^{-t/T_{½}}$ si passa ai logaritmi in base 2 (Matematica 4): $t/T_{½} = \log_2(N_0/N) = \log_2(1/0{,}300)$. Con la calcolatrice, $\log_2 x = \ln x/\ln 2$:

$$t = T_{½} \cdot \frac{\ln(1/0{,}300)}{\ln 2} = 5730 \text{ anni} \cdot \frac{1{,}204}{0{,}693} \approx 5730 \text{ anni} \cdot 1{,}737 \approx 9950 \text{ anni}$$

Commento. Il legno ha circa 10 000 anni, in accordo con la lettura del grafico. Il risultato dice quando è stato tagliato l'albero, non quando è stata costruita la nave; e l'incertezza della misura del carbonio-14 rimasto, di solito di qualche percento, si traduce in un'incertezza di qualche secolo sull'età. Il metodo funziona fino a circa 50 000 anni: oltre, il carbonio-14 rimasto è meno di un duecentesimo di quello iniziale ed è troppo poco per misurarlo bene.

14.5.5 Le radiazioni e la salute

Le radiazioni α, β e γ, come i raggi X, sono radiazioni ionizzanti: hanno energia sufficiente per strappare elettroni agli atomi e rompere i legami delle molecole, anche quelle del DNA. Il danno biologico dipende dall'energia assorbita dai tessuti e dal tipo di radiazione: la grandezza che ne tiene conto è la dose efficace, che si misura in **sievert** (Sv), dal nome del fisico svedese Rolf Sievert. Viviamo immersi in una radioattività naturale, che viene dalle rocce, dal radon dei terreni, dai raggi cosmici e perfino dal potassio-40 del nostro corpo; la medicina usa le radiazioni per le radiografie, la diagnosi e la cura dei tumori. Come per molte cose, conta la dose: le regole della radioprotezione si riassumono in tre parole, *tempo* (esporsi il meno possibile), *distanza* (l'intensità diminuisce allontanandosi dalla sorgente) e *schermatura* (interporre il materiale adatto, come nella Tabella 14.2). Le particelle α, fermate da un foglio di carta, sono innocue fuori dal corpo ma molto pericolose se una sostanza che le emette viene inalata o ingerita.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: il decadimento simulato con i dadi

Materiali. 500 dadi comuni a sei facce (100 per ciascuno di cinque gruppi), cinque scatole, un foglio di calcolo o carta millimetrata.

Procedimento. Ogni dado rappresenta un nucleo radioattivo, ogni lancio un intervallo di tempo. Ciascun gruppo lancia i suoi dadi nella scatola, toglie quelli che mostrano il 6, che sono «decaduti», e conta quelli rimasti; poi rilancia i dadi rimasti, e così via per dodici lanci. Si sommano i risultati dei cinque gruppi, per lavorare con 500 «nuclei». Per ogni dado la probabilità di «decadere» a ogni lancio è sempre 1/6, qualunque sia la sua storia, come per un nucleo; in media, quindi, dopo k lanci restano $500 \cdot (5/6)^k$ dadi.

Tabella 14.3 Dadi rimasti dopo ogni lancio (somma di cinque gruppi, dati tipici). L'incertezza statistica di un conteggio N è circa $\sqrt{N}$; l'ultima colonna è la previsione $500 \cdot (5/6)^k$, arrotondata.

Lancio k	Dadi rimasti N	Incertezza $\sqrt{N}$	Previsione
0	500	22	500
1	435	21	417
2	345	19	347
3	292	17	289
4	238	15	241
5	191	14	201
6	160	13	167
7	138	12	140
8	120	11	116
9	99	10	97
10	79	9	81
11	69	8	67
12	58	8	56

Che cosa concludere. Riportando N in funzione di k si ottiene una curva come quella della Figura 14.5. Il valore 250, metà dei dadi iniziali, si raggiunge fra il terzo e il quarto lancio: interpolando fra 292 e 238 si legge circa 3,8 lanci. Il valore 125 si raggiunge dopo circa 7,7 lanci: il secondo dimezzamento richiede lo stesso tempo del primo, entro l'incertezza. Il «tempo di dimezzamento» dei dadi è 3,8 lanci, come prevede la probabilità: $(5/6)^k = 1/2$ per $k = \ln 2/\ln(6/5) \approx$

3,80. Gli scarti fra misure e previsione sono dell'ordine di $\sqrt{N}$, come ci si aspetta da un processo casuale; un gruppo solo, con 100 dadi, ottiene una curva molto più irregolare.

Per la relazione. Segui lo schema di Fisica 3, capitolo 4. Costruisci il grafico di N in funzione di k con le barre di incertezza e la curva prevista; leggi i primi due tempi di dimezzamento e confrontali. Poi discuti: che cosa cambierebbe togliendo i dadi che mostrano 5 o 6? Perché i dati di un solo gruppo sono più irregolari di quelli della classe? In che cosa il modello assomiglia a un vero campione radioattivo, e in che cosa no (pensa al numero di nuclei)?

14.6 Fissione e fusione

14.6.1 Dai neutroni lenti alla fissione

Il neutrone, privo di carica, non è respinto dai nuclei e può penetrarvi anche con poca energia: è il proiettile ideale. Nel 1934, a Roma, Enrico Fermi e il suo gruppo bombardarono con neutroni quasi tutti gli elementi conosciuti, trovando decine di nuovi nuclei radioattivi. Nell'ottobre di quell'anno scoprirono un effetto inatteso: facendo passare i neutroni attraverso la paraffina o l'acqua, sostanze ricche di idrogeno, la radioattività prodotta aumentava enormemente. Urtando i nuclei di idrogeno, di massa simile alla loro, i neutroni perdono gran parte della velocità, come una biglia che urta un'altra biglia uguale (Fisica 4, capitolo 2), e i neutroni lenti restano più a lungo vicino ai nuclei e vengono catturati più facilmente. Nel 1938 Fermi ricevette il premio Nobel per la fisica; da Stoccolma non tornò in Italia, ma raggiunse gli Stati Uniti, perché le leggi razziali colpivano la moglie, Laura Capon, di famiglia ebraica.

Bombardando l'uranio con i neutroni si ottenevano sostanze radioattive che nessuno riusciva a identificare. Nel dicembre 1938, a Berlino, i chimici Otto Hahn e Fritz Strassmann trovarono fra i prodotti il bario, con $Z = 56$, un elemento di massa media. La spiegazione la diedero all'inizio del 1939 Lise Meitner, fisica austriaca costretta a lasciare la Germania perché ebrea, e il nipote Otto Frisch: il nucleo di uranio, catturato un neutrone, si spezza in due nuclei di massa media. Frisch chiamò il fenomeno **fissione nucleare**, dal termine con cui i biologi indicano la divisione di una cellula. Una reazione tipica dell'uranio-235 è

$$^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{141}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{92}_{36}\mathrm{Kr} + 3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

in cui, come si controlla subito, si conservano sia la carica ($92 = 56 + 36$) sia il numero di nucleoni ($1 + 235 = 141 + 92 + 3$). Ogni fissione libera circa 200 MeV, come previsto dalla curva dell'energia di legame, in gran parte come energia cinetica dei frammenti, che diventa calore. È circa cinquanta milioni di volte l'energia che si libera bruciando un atomo di carbonio.

14.6.2 La reazione a catena e il reattore

Il punto decisivo è che ogni fissione libera due o tre neutroni. Se almeno uno di essi produce una nuova fissione, il processo si mantiene da solo: è la **reazione a catena** (Figura 14.6). Se in

media più di un neutrone produce una fissione, il numero di fissioni cresce di generazione in generazione: 1, 3, 9, 27..., e poiché una generazione dura una frazione minima di secondo, l'energia si libera in modo esplosivo. Perché la catena parta serve una quantità di materiale fissile abbastanza grande, la **massa critica**: in un pezzo troppo piccolo troppi neutroni sfuggono dalla superficie prima di colpire un nucleo.

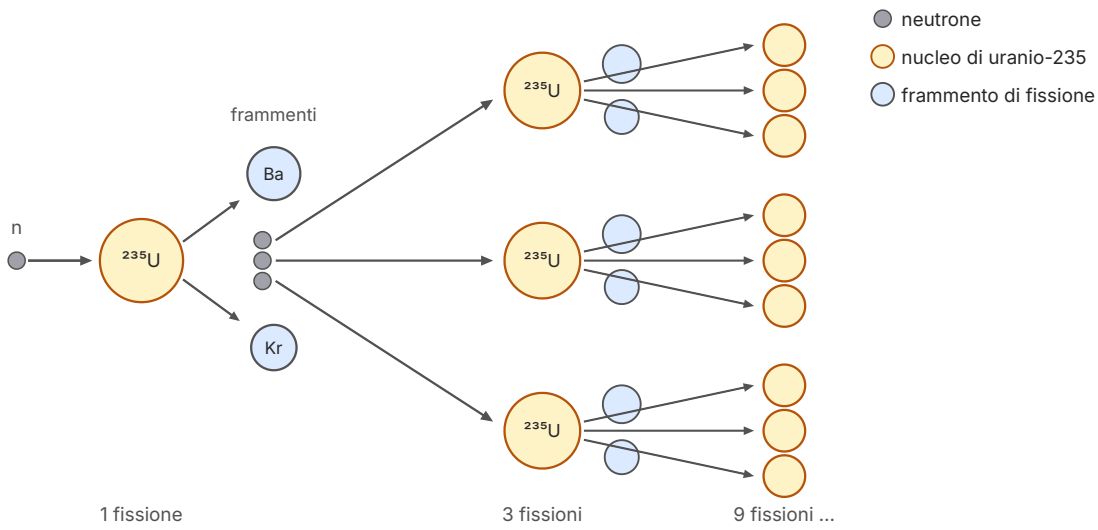


Figura 14.6 La reazione a catena nell'uranio-235 (schema, non in scala). Un neutrone provoca la fissione di un nucleo, che si spezza in due frammenti (per esempio bario e kripton) e libera tre neutroni; ciascuno può provocare un'altra fissione, e così via. Se ogni fissione ne provoca in media più di una, il numero di fissioni cresce rapidamente; nel reattore la catena è controllata in modo che ne provochi esattamente una.

In un **reattore nucleare** la catena è controllata, in modo che ogni fissione ne provochi in media esattamente una e la potenza resti costante. I neutroni veloci prodotti dalla fissione vengono rallentati da un moderatore, acqua o grafite, proprio come nell'esperimento di Fermi, perché i neutroni lenti provocano la fissione dell'uranio-235 molto più facilmente; barre di controllo di materiali che assorbono i neutroni, come il cadmio o il boro, si inseriscono o si estraggono dal nocciolo per regolare la reazione. Il calore prodotto scalda l'acqua, il vapore fa girare una turbina e un alternatore (capitolo 9). Il primo reattore, una pila di blocchi di grafite e di uranio costruita da Fermi a Chicago sotto le tribune di uno stadio universitario, raggiunse la reazione a catena controllata il 2 dicembre 1942.

Quella data apparteneva già alla guerra. Con il progetto Manhattan gli Stati Uniti costruirono le prime bombe a fissione: il 6 agosto 1945 una bomba all'uranio distrusse Hiroshima, il 9 agosto una bomba al plutonio distrusse Nagasaki. Uccisero all'istante decine di migliaia di persone, e molte altre morirono nei mesi e negli anni successivi per le ferite, le ustioni e le radiazioni.

14.6.3 La fusione: l'energia delle stelle

Nel centro del Sole, a una temperatura di circa 15 milioni di kelvin, i nuclei di idrogeno si muovono così velocemente da vincere, negli urti, la repulsione elettrica e da arrivare abbastanza vicini perché agisca la forza forte. Attraverso una serie di reazioni, la catena protone-protone, quattro protoni si trasformano in un nucleo di elio-4; due dei protoni diventano neutroni emettendo due positroni e due neutrini. È la **fusione nucleare**. Il bilancio, con le masse atomiche, è $4 \cdot 1{,}007\,825\ \text{u} - 4{,}002\,603\ \text{u} = 0{,}028\,697\ \text{u}$, cioè 26,7 MeV: lo 0,7% della massa dell'idrogeno diventa energia. È così che il Sole perde ogni secondo, come hai calcolato nel capitolo 12, circa quattro milioni di tonnellate di massa, e brilla da quasi cinque miliardi di anni.

Riprodurre la fusione sulla Terra è molto più difficile della fissione: bisogna portare un gas di nuclei leggeri, di solito deuterio e trizio, gli isotopi pesanti dell'idrogeno, a temperature di oltre cento milioni di kelvin e tenerlo confinato, per esempio con campi magnetici intensi, perché nessun materiale ne sopporterebbe il contatto. Le bombe termonucleari, o «bombe H», realizzano la fusione in modo incontrollato. Per ottenerla in modo controllato è in costruzione nel sud della Francia, con la partecipazione di molti Paesi, il reattore sperimentale ITER. Il combustibile sarebbe abbondante e le scorie molto meno durature di quelle della fissione, ma una centrale a fusione che produca più energia di quella che consuma non esiste ancora.

APPROFONDIMENTO

I ragazzi di via Panisperna

Nel 1926 il fisico e senatore Orso Mario Corbino, direttore dell'Istituto di fisica dell'Università di Roma, in via Panisperna, fece istituire la prima cattedra italiana di fisica teorica e la affidò a Enrico Fermi, che aveva venticinque anni. Intorno a lui si formò un gruppo di giovanissimi: Franco Rasetti, Emilio Segrè, Edoardo Amaldi, Ettore Majorana e poi Bruno Pontecorvo, con il chimico Oscar D'Agostino. Per l'età e lo stile informale furono chiamati «i ragazzi di via Panisperna».

Nel 1933–34 Fermi elaborò la teoria del decadimento β con il neutrino; nel 1934 il gruppo scoprì la radioattività prodotta dai neutroni e l'effetto dei neutroni lenti, la base dei futuri reattori. Poi le strade si divisero. Ettore Majorana, forse il più geniale di tutti, scomparve nel marzo 1938 durante un viaggio in nave fra Palermo e Napoli, e la sua sorte non è mai stata chiarita: Leonardo Sciascia vi ha dedicato il libro *La scomparsa di Majorana*. Nello stesso anno le leggi razziali spinsero all'estero Fermi e Segrè, che era ebreo; Segrè ebbe nel 1959 il Nobel per la scoperta dell'antiprotone. Pontecorvo, emigrato anche lui, si trasferì nel 1950 in Unione Sovietica. Amaldi restò in Italia e, dopo la guerra, fu tra i fondatori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e del CERN di Ginevra, il laboratorio europeo in cui nel 2012 è stato scoperto il bosone di Higgs.

COLLEGAMENTI

Storia e filosofia: il nucleo e il Novecento

Agli inizi del secolo l'esistenza stessa degli atomi era discussa. Il fisico e filosofo austriaco Ernst Mach, vicino al positivismo, sosteneva che la scienza deve limitarsi a ciò che si osserva, e considerava gli atomi un'ipotesi utile ma non una realtà. Il nucleo di Rutherford, misurato contando lampi di luce, e le righe spettrali calcolate da Bohr cambiarono i termini della questione: entità che nessuno può vedere si potevano studiare con precisione attraverso i loro effetti.

Trent'anni dopo, la fisica del nucleo entrò nella storia politica. Le leggi razziali del 1938 in Italia e le persecuzioni in Germania spinsero all'estero molti dei fisici che avrebbero costruito la bomba. Nell'agosto 1939 Albert Einstein firmò una lettera, preparata con il fisico ungherese Leó Szilárd, per avvertire il presidente degli Stati Uniti Roosevelt che la Germania avrebbe potuto costruire armi basate sulla fissione. Dopo Hiroshima e Nagasaki, la responsabilità degli scienziati divenne una questione pubblica: nel luglio 1955 il manifesto di Bertrand Russell e Albert Einstein, firmato da Einstein poco prima della morte, chiese ai governi di rinunciare alla guerra in un mondo dotato di armi nucleari. La corsa agli armamenti fra Stati Uniti e Unione Sovietica è uno dei temi della Guerra fredda che studi in Storia.

COLLEGAMENTI

Educazione civica: l'energia nucleare e le sue scelte

Le centrali a fissione producono elettricità senza emettere anidride carbonica durante il funzionamento, ma lasciano *scorie radioattive*, alcune con tempi di dimezzamento di migliaia di anni, da custodire in depositi sicuri per tempi lunghissimi. Due incidenti hanno segnato il dibattito: Černobyl', in Ucraina, il 26 aprile 1986, e Fukushima, in Giappone, l'11 marzo 2011, dopo un terremoto e uno tsunami. In Italia, dopo il referendum del 1987, le centrali nucleari sono state chiuse, e un nuovo referendum nel 2011 ha confermato la scelta; altri Paesi europei ricavano invece dal nucleare una parte importante della loro elettricità.

La fisica nucleare è anche medicina. La PET usa nuclei che emettono positroni, come il fluoro-18 prodotto con i ciclotroni (capitolo 7); lo iodio-131 cura alcune malattie della tiroide; la radioterapia distrugge le cellule tumorali con raggi γ, raggi X o fasci di protoni. Discutere queste scelte richiede dati affidabili, non slogan: costi, rischi, alternative, tempi.

IN SINTESI

Le formule del capitolo e il loro significato

Livelli dell'atomo di idrogeno (modello di Bohr): $E_n = -13{,}6\ \text{eV}/n^2$, $n = 1, 2, 3, \ldots$; stato fondamentale −13,6 eV, energia di ionizzazione 13,6 eV.

Righe spettrali: nel salto da E_i a E_f l'atomo emette un fotone di energia $hf = E_i - E_f$; in elettronvolt e nanometri $\lambda = 1240/(E_i - E_f)$. Serie di Balmer: salti verso $n = 2$; $1/\lambda = R(1/2^2 - 1/n^2)$, $R = 1{,}097 \times 10^7\ \text{m}^{-1}$.

Nuclidi: $A = Z + N$ (numero di massa = protoni + neutroni); isotopi: stesso Z, diverso N. In ogni reazione nucleare si conservano la somma dei Z e la somma degli A.

Energia di legame: $E_{\text{legame}} = \Delta m \cdot c^2$, con Δm = (massa dei costituenti) − (massa del nucleo); 1 u = $1{,}660\,54 \times 10^{-27}$ kg ↔ 931,5 MeV. Più alta l'energia di legame per nucleone, più legato il nucleo: il massimo è intorno al ferro.

Decadimento: α: $Z - 2$, $A - 4$; β^-: $Z + 1$, A invariato; γ: nessuna variazione. Legge del decadimento $N = N_0 \cdot 2^{-t/T_{½}}$; età di un reperto $t = T_{½} \cdot \ln(N_0/N)/\ln 2$. Attività in becquerel (1 Bq = 1 decadimento/s), proporzionale a N.

Fissione e fusione: circa 200 MeV per fissione di uranio-235; 26,7 MeV per ogni nucleo di elio-4 formato nel Sole. Entrambe liberano energia perché i prodotti sono più legati dei reagenti.

Con questo capitolo si chiude il volume, e con esso il percorso della fisica del liceo. Dalla carica strofinata sull'ambra sei arrivato al nucleo, passando per il campo, la luce, lo spazio-tempo e i quanti: ogni volta la domanda «che cosa c'è davvero lì?» ha costretto a cambiare i concetti, senza buttare via ciò che le misure avevano stabilito. Le leggi della fisica classica restano valide nel loro dominio; la relatività e i quanti dicono dove finisce. È lo stesso cammino che hanno percorso Rutherford, Bohr, Fermi e i loro colleghi, e che oggi continua nei laboratori come il CERN e i Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

SINTESI

- Nel modello di Thomson (1904) la carica positiva dell'atomo è diffusa in una sfera in cui sono immersi gli elettroni; l'esperimento di Geiger e Marsden (1909), con particelle α contro una lamina d'oro, lo smentì: alcune particelle tornavano indietro.
- Rutherford (1911) ne dedusse il modello nucleare: carica positiva e quasi tutta la massa sono concentrate in un nucleo di 10^{-15}–10^{-14} m, centomila volte più piccolo dell'atomo. Per la fisica classica, però, un elettrone in orbita dovrebbe irradiare e cadere sul nucleo.
- Un gas rarefatto e caldo emette uno spettro a righe, caratteristico di ogni elemento, e assorbe le stesse lunghezze d'onda; la spettroscopia di Kirchhoff e Bunsen ha rivelato la composizione del Sole e nuovi elementi. Le righe visibili dell'idrogeno formano la serie di Balmer.
- Nel modello di Bohr (1913) l'elettrone dell'idrogeno sta solo in stati stazionari di energia $E_n = -13{,}6\ \text{eV}/n^2$ e, saltando fra due livelli, emette o assorbe un fotone di energia $hf = E_\text{i} - E_\text{f}$: le lunghezze d'onda calcolate coincidono con quelle di Balmer.
- Il modello di Bohr è giusto per i livelli energetici dell'idrogeno ma sbagliato come immagine: l'elettrone non ha traiettoria, e la meccanica quantistica lo descrive con gli orbitali.
- Il nucleo è formato da Z protoni e N neutroni (Chadwick, 1932); $A = Z + N$. Gli isotopi di un elemento hanno lo stesso Z e diverso N.
- La forza nucleare forte tiene insieme i nucleoni vincendo la repulsione elettrica fra i protoni (circa 230 N a 10^{-15} m), ma agisce solo a distanze di circa 10^{-15} m.
- Un nucleo ha massa minore della somma dei suoi nucleoni: il difetto di massa corrisponde all'energia di legame, $E = \Delta m c^2$ (1 u ↔ 931,5 MeV). L'energia di legame per nucleone è massima, circa 8,8 MeV, per il ferro.
- La radioattività (Becquerel, 1896; i Curie, 1898) è la trasformazione spontanea di nuclei instabili: α (nucleo di elio, $Z - 2$, $A - 4$), β (elettrone e neutrino, $Z + 1$), γ (fotone, nessuna variazione).
- Il decadimento è statistico: $N = N_0 \cdot 2^{-t/T_{½}}$, con un tempo di dimezzamento che non dipende da temperatura e chimica. L'attività si misura in becquerel; la datazione con il carbonio-14 ($T_{½}$ = 5730 anni) misura l'età dei reperti organici.
- La fissione di un nucleo pesante, scoperta nel 1938–39, libera circa 200 MeV e due o tre neutroni, che rendono possibile la reazione a catena: controllata nei reattori (Fermi, 1942), incontrollata nelle bombe di Hiroshima e Nagasaki (1945).
- La fusione di nuclei leggeri alimenta il Sole (quattro protoni → un nucleo di elio, 26,7 MeV); sulla Terra si cerca di controllarla con progetti come ITER.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Che cosa sorprese Rutherford nei risultati di Geiger e Marsden?
   A. la maggior parte delle particelle α attraversava la lamina d'oro
   B. alcune particelle α venivano deviate di grandi angoli, perfino all'indietro
   C. le particelle α venivano attratte dagli elettroni della lamina
   D. la lamina d'oro si caricava negativamente

2. ● Due isotopi dello stesso elemento hanno:
   A. lo stesso numero di neutroni e un diverso numero di protoni
   B. lo stesso numero di massa
   C. proprietà chimiche diverse
   D. lo stesso numero di protoni e un diverso numero di neutroni

3. ● In un decadimento β^- il nucleo che decade:
   A. aumenta Z di 1 e non cambia A
   B. diminuisce Z di 2 e A di 4
   C. non cambia né Z né A
   D. diminuisce Z di 1 e non cambia A

4. ●● Un campione contiene $8{,}0 \times 10^{20}$ nuclei di un isotopo con tempo di dimezzamento di 3,0 giorni. Dopo 9,0 giorni i nuclei rimasti sono:
   A. zero
   B. $4{,}0 \times 10^{20}$
   C. $1{,}0 \times 10^{20}$
   D. $2{,}7 \times 10^{20}$

5. ● Il becquerel è l'unità di misura:
   A. della dose efficace di radiazione
   B. dell'energia di legame
   C. del tempo di dimezzamento
   D. dell'attività: un decadimento al secondo

6. ●● Nel modello di Bohr un elettrone dell'atomo di idrogeno salta dal livello $n = 3$ al livello $n = 2$. Il fotone emesso ha energia:
   A. 3,40 eV
   B. 1,89 eV
   C. 1,51 eV
   D. 13,6 eV

7. ●● La fissione dell'uranio e la fusione dell'idrogeno liberano entrambe energia perché:
   A. i prodotti hanno un'energia di legame per nucleone maggiore dei nuclei di partenza
   B. in entrambe la carica elettrica totale diminuisce
   C. in entrambe si creano nuovi nucleoni
   D. i prodotti hanno una massa totale maggiore dei nuclei di partenza

Vero o falso

8. ● Riscaldando un campione radioattivo a 500 °C, il suo tempo di dimezzamento si riduce. V / F

9. ● Il nucleo contiene quasi tutta la massa dell'atomo, ma ne occupa una frazione piccolissima del volume. V / F

10. ●● La massa di un nucleo di elio-4 è maggiore della somma delle masse dei due protoni e dei due neutroni che lo formano. V / F

11. ● Nell'emissione di un raggio γ il numero atomico del nucleo cambia. V / F

12. ●● Un atomo di idrogeno nello stato fondamentale può assorbire un fotone di 5,0 eV. V / F

Applicare

13. ● Completa la reazione di decadimento α del radio-226: ${}^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow$ _____ + ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$. Di quale elemento è il nucleo prodotto ($Z = 86$: radon)?

14. ● Quanti protoni e quanti neutroni hanno i nuclei ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ e ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$?

15. ● Un difetto di massa vale 0,0100 u. Esprimi l'energia corrispondente in MeV e in joule.

16. ●● Calcola, con il modello di Bohr, l'energia e la lunghezza d'onda del fotone emesso nel salto da $n = 2$ a $n = 1$ dell'atomo di idrogeno. In quale banda dello spettro cade (Tabella A.4)?

17. ●● Leggi nella Figura 14.4 l'energia di legame per nucleone del ferro-56 e dell'elio-4, e calcola l'energia di legame totale dei due nuclei.

18. ●● Lo iodio-131, usato in medicina, ha un tempo di dimezzamento di 8,02 giorni. Quale percentuale di una dose resta dopo 24,1 giorni? E dopo 48,1 giorni?

19. ● Un atomo di idrogeno si trova nel livello $n = 3$. Quanta energia serve per ionizzarlo? Qual è la lunghezza d'onda massima di un fotone capace di farlo, e in quale banda cade?

Problemi

20. ●● Calcola il difetto di massa, l'energia di legame e l'energia di legame per nucleone del carbonio-12, ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$, la cui massa atomica vale 12 u esatte (masse nella Tabella A.6). Confronta il risultato con la Figura 14.4.

21. ●●● Una sorgente di cobalto-60 ($T_{½}$ = 5,27 anni) per radioterapia ha oggi un'attività di $2{,}0 \times 10^{14}$ Bq. a) Quale sarà la sua attività fra 10,0 anni? b) Dopo quanto tempo l'attività sarà scesa al 10% di quella attuale? c) Perché gli ospedali sostituiscono periodicamente queste sorgenti?

22. ●●● In un osso rinvenuto in uno scavo il carbonio-14 rimasto è il (35 ± 1)% di quello di un osso attuale. a) Calcola l'età dell'osso. b) Calcola l'età per 34% e per 36%, e scrivi il risultato con la sua incertezza. c) Si potrebbe datare allo stesso modo una moneta di bronzo? Perché?

23. ●●● Ogni fissione di un nucleo di uranio-235 libera circa 200 MeV. a) Quanti nuclei ci sono in 1,00 kg di uranio-235 (massa molare 235 g/mol, numero di Avogadro $6{,}02 \times 10^{23}$ mol^{-1})? b) Quanta energia si libera se tutti subiscono la fissione? Esprimila in joule e in kilowattora (capitolo 5). c) Quanti chilogrammi di carbone servirebbero per la stessa energia, se un chilogrammo di carbone bruciando libera circa 3×10^7 J? d) Di quanto diminuisce la massa del combustibile (capitolo 12)?

24. ●●● Nel Sole quattro protoni diventano un nucleo di elio-4. a) Calcola con le masse atomiche (Tabella A.6) l'energia liberata per ogni nucleo di elio formato, e la frazione della massa iniziale che si trasforma in energia. b) Il Sole emette una potenza di $3{,}8 \times 10^{26}$ W. Quanti nuclei di elio si formano ogni secondo? c) Quanti chilogrammi di idrogeno consuma il Sole ogni secondo?

Ragionare e argomentare

25. ●● Commenta la fonte. Nell'articolo del 1911 sulla diffusione delle particelle α, Rutherford scrive: «Considerando l'insieme dei dati, sembra più semplice supporre che l'atomo contenga una carica centrale distribuita in un volume molto piccolo, e che le grandi deviazioni singole siano dovute alla carica centrale nel suo complesso, e non ai suoi costituenti» (E. Rutherford, *Philosophical Magazine*, 1911; traduzione della redazione). Che cosa sostiene Rutherford? Quali osservazioni lo portano a questa conclusione, e perché il modello di Thomson non poteva spiegarle? Come si potrebbe stimare quanto è piccolo quel «volume molto piccolo»?

26. ●● Stima di Fermi. Un nucleone ha massa $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg e occupa una sfera di raggio circa $1{,}2 \times 10^{-15}$ m. Stima la densità della materia nucleare e confrontala con quella dell'acqua. Quanto peserebbe un cucchiaino (5 cm^3) di materia nucleare? Perché la materia ordinaria è tanto meno densa?

27. ●●● Trova l'errore. Un tecnico scrive: «Il cobalto-60 ha un tempo di dimezzamento di 5,27 anni: dopo 10,54 anni la sorgente è esaurita e si può smaltire con i rifiuti comuni». Trova l'errore e calcola quale frazione dell'attività iniziale resta dopo 10,54 anni.

Verso l'esame

28. ●● **Dal documento.** «Durante l'eclissi totale di Sole del 1868, nello spettro della parte più esterna dell'atmosfera solare fu osservata una riga gialla brillante che non corrispondeva a nessun elemento conosciuto. Fu attribuita a un elemento nuovo, chiamato elio; sulla Terra fu trovato soltanto nel 1895.» a) Quale fenomeno ha permesso la scoperta? b) Perché ogni elemento ha righe proprie? Rispondi con il modello di Bohr. c) Collega l'episodio con le Scienze naturali o con il Greco.

29. ●● **Collegamento.** Collega la scoperta della fissione nucleare (1938–39) con la storia europea di quegli anni: le leggi razziali, l'emigrazione di Fermi e di Lise Meitner, la lettera di Einstein a Roosevelt e il progetto Manhattan.

30. ●●● **Trattazione sintetica.** In 10–15 righe presenta il modello atomico di Bohr: i problemi che risolveva, le sue ipotesi, le verifiche sperimentali e i suoi limiti.

PER APPROFONDIRE

- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: l'ultima parte racconta come i quanti e gli spettri a righe abbiano costretto ad abbandonare l'immagine classica dell'atomo.
- [HEI] W. Heisenberg, *Fisica e filosofia*: uno dei protagonisti della meccanica quantistica discute la storia della teoria atomica, da Democrito a Bohr, e il suo significato filosofico.
- [FEY] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. II: utile per rivedere le leggi dell'elettromagnetismo che il modello nucleare dell'atomo mise in crisi.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: i capitoli sulla fisica atomica e nucleare offrono molti esercizi graduati su livelli energetici, decadimenti ed energia di legame.

Glossario del capitolo

Attività
Numero di decadimenti al secondo di un campione radioattivo; si misura in becquerel (1 Bq = 1 decadimento/s).

Energia di ionizzazione
Energia minima necessaria per staccare un elettrone da un atomo nello stato fondamentale; 13,6 eV per l'idrogeno.

Energia di legame
Energia necessaria per separare un nucleo nei suoi nucleoni, uguale a Δmc^2; è massima per nucleone intorno al ferro.

Fissione nucleare
Scissione di un nucleo pesante, di solito provocata da un neutrone, in due nuclei di massa media, con liberazione di energia e di neutroni.

Forza nucleare forte
Interazione attrattiva fra nucleoni, più intensa della repulsione elettrica fra i protoni ma con raggio d'azione di circa 10^{-15} m.

Fusione nucleare
Unione di nuclei leggeri in un nucleo più pesante e più legato, con liberazione di energia; alimenta il Sole e le stelle.

Isotopi
Nuclidi dello stesso elemento, con lo stesso numero atomico e un diverso numero di neutroni.

Livelli energetici
Valori discreti dell'energia di un atomo; per l'idrogeno $E_n = -13{,}6\ \text{eV}/n^2$.

Nucleo atomico
Regione centrale dell'atomo, di dimensioni 10^{-15}–10^{-14} m, formata da protoni e neutroni, in cui sono concentrate la carica positiva e quasi tutta la massa.

Numero atomico
Numero Z di protoni nel nucleo; individua l'elemento chimico.

Numero di massa
Numero $A = Z + N$ di nucleoni, cioè di protoni e neutroni, di un nucleo.

Radioattività
Trasformazione spontanea di nuclei instabili con emissione di radiazione α, β o γ.

Reazione a catena
Successione di fissioni in cui i neutroni liberati da ciascuna provocano nuove fissioni.

Serie di Balmer
Le righe dell'idrogeno prodotte dai salti verso il livello $n = 2$; quattro di esse, a 656, 486, 434 e 410 nm, sono visibili.

Spettro di assorbimento
Spettro continuo in cui mancano, come righe scure, le lunghezze d'onda assorbite da un gas attraversato dalla luce; sono le stesse che il gas emette.

Spettro di emissione
Insieme delle lunghezze d'onda emesse da una sostanza; per un gas rarefatto e caldo è formato da righe luminose caratteristiche dell'elemento.

Stato fondamentale
Livello di energia più bassa di un atomo, in cui l'atomo si trova normalmente; per l'idrogeno −13,6 eV.

Stato stazionario
Nel modello di Bohr, orbita permessa dell'elettrone su cui l'atomo ha energia costante e non irradia.

Tempo di dimezzamento
Tempo in cui decade, in media, metà dei nuclei radioattivi di un campione; detto anche emivita.

Soluzioni

1. B. Con il modello di Thomson le particelle α avrebbero dovuto essere deviate di pochi gradi; il fatto che alcune rimbalzassero all'indietro richiedeva una carica positiva concentrata in un nucleo minuscolo.

2. D. Gli isotopi hanno lo stesso numero atomico Z, quindi gli stessi elettroni e la stessa chimica, ma un diverso numero di neutroni e quindi un diverso numero di massa.

3. A. Un neutrone diventa protone ed è emesso un elettrone: Z aumenta di 1, il numero di nucleoni A resta uguale.

4. C. 9,0 giorni sono 3 tempi di dimezzamento: $N = 8{,}0 \times 10^{20}/2^3 = 1{,}0 \times 10^{20}$.

5. D. 1 Bq = 1 decadimento al secondo; la dose efficace si misura in sievert, l'energia di legame in MeV o joule, il tempo di dimezzamento in secondi o anni.

6. B. $hf = E_3 - E_2 = -1{,}51\ \text{eV} - (-3{,}40\ \text{eV}) = 1{,}89\ \text{eV}$: la riga rossa Hα, a 656 nm.

7. A. In entrambi i processi ci si sposta verso il massimo della curva dell'energia di legame per nucleone: i prodotti sono più legati, hanno massa totale minore, e la differenza si libera come energia.

8. F. Il tempo di dimezzamento è una proprietà del nucleo e, con ottima approssimazione, non dipende dalla temperatura né dallo stato chimico: l'agitazione termica coinvolge energie di frazioni di eV, i nuclei sono legati con energie di MeV.

9. V. Il nucleo ha dimensioni 10^4–10^5 volte minori di quelle dell'atomo, quindi un volume 10^{12}–10^{15} volte minore, ma contiene più del 99,9% della massa.

10. F. È minore: la differenza, il difetto di massa di 0,0304 u, corrisponde all'energia di legame di 28,3 MeV, liberata quando il nucleo si forma.

11. F. Con il raggio γ il nucleo passa da uno stato eccitato a uno meno energetico senza cambiare composizione: Z e A restano uguali.

12. F. Il primo livello eccitato è a −3,40 eV: per salirvi servono esattamente 10,2 eV, e 5,0 eV non portano a nessun livello; il fotone non viene assorbito (e non basta per ionizzare, che richiede 13,6 eV).

13. Si conservano Z e A: 88 = 86 + 2, 226 = 222 + 4. Il prodotto è ${}^{222}_{86}\text{Rn}$, il radon-222, un gas radioattivo.

14. Carbonio-14: 6 protoni, 14 − 6 = 8 neutroni. Ferro-56: 26 protoni, 30 neutroni. Uranio-235: 92 protoni, 143 neutroni.

15. $E = 0{,}0100\ \text{u} \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 9{,}32\ \text{MeV}$; in joule $9{,}32 \times 10^6 \cdot 1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{J} \approx 1{,}49 \times 10^{-12}\ \text{J}$.

16. $E_2 - E_1 = -3{,}40\ \text{eV} - (-13{,}6\ \text{eV}) = 10{,}2\ \text{eV}$; $\lambda = 1240\ \text{eV·nm}/10{,}2\ \text{eV} \approx 122\ \text{nm}$. È ultravioletto (fra 10 nm e 400 nm): è la prima riga della serie che termina sul livello 1, invisibile all'occhio.

17. Dal grafico: ferro-56 circa 8,8 MeV per nucleone, elio-4 circa 7,1 MeV. Energie di legame totali: 56 · 8,8 MeV ≈ 490 MeV per il ferro; 4 · 7,1 MeV ≈ 28 MeV per l'elio (il calcolo con le masse dà 492 MeV e 28,3 MeV).

18. 24,1 giorni sono circa 3 tempi di dimezzamento (24,1/8,02 = 3,00): resta 1/8, cioè circa il 12,5%. 48,1 giorni sono 6 tempi di dimezzamento: resta 1/64 ≈ 1,6%.

19. $E_3 = -13{,}6\ \text{eV}/9 = -1{,}51\ \text{eV}$: servono 1,51 eV. $\lambda_{\text{max}} = 1240\ \text{eV·nm}/1{,}51\ \text{eV} \approx 821\ \text{nm}$: un fotone infrarosso (oltre 700 nm). Fotoni di lunghezza d'onda minore, cioè più energetici, lo ionizzano anch'essi, cedendo l'eccesso all'elettrone.

20. Costituenti: $6 \cdot 1{,}007\,825\ \text{u} + 6 \cdot 1{,}008\,665\ \text{u} = 12{,}098\,94\ \text{u}$; $\Delta m = 12{,}098\,94\ \text{u} - 12{,}000\,00\ \text{u} = 0{,}098\,94\ \text{u}$. $E_{\text{legame}} = 0{,}098\,94\ \text{u} \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} \approx 92{,}2\ \text{MeV}$; per nucleone 92,2 MeV/12 ≈ 7,68 MeV, in accordo con il punto del carbonio-12 nella figura, un po' sopra quello dell'elio-4.

21. a) 10,0 anni sono 10,0/5,27 = 1,90 tempi di dimezzamento: attività = $2{,}0 \times 10^{14}$ Bq · $2^{-1{,}90} \approx 2{,}0 \times 10^{14}$ Bq · 0,268 ≈ $5{,}4 \times 10^{13}$ Bq. b) $2^{-t/5{,}27} = 0{,}10$, cioè t = 5,27 anni · ln 10/ln 2 = 5,27 anni · 3,32 ≈ 17,5 anni. c) Con il passare degli anni l'attività, e quindi l'intensità del fascio, diminuisce: per dare la stessa dose servono tempi di trattamento sempre più lunghi, finché la sorgente va sostituita.

22. a) t = 5730 anni · ln(1/0,35)/ln 2 = 5730 anni · 1,515 ≈ 8680 anni. b) Per 34%: 5730 · ln(1/0,34)/ln 2 ≈ 8920 anni; per 36%: ≈ 8450 anni. Quindi $t = (8{,}7 \pm 0{,}2) \times 10^3$ anni: un'incertezza dell'1% sulla percentuale dà circa 240 anni sull'età. c) No: il bronzo è una lega di rame e stagno, non contiene carbonio di origine organica; il metodo data solo resti di organismi che hanno scambiato carbonio con l'atmosfera.

23. a) Moli: 1000 g/(235 g/mol) = 4,26 mol; nuclei: 4,26 · $6{,}02 \times 10^{23} \approx 2{,}56 \times 10^{24}$. b) $E = 2{,}56 \times 10^{24} \cdot 200 \times 10^6$ eV · $1{,}60 \times 10^{-19}$ J/eV ≈ $8{,}2 \times 10^{13}$ J; in kilowattora $8{,}2 \times 10^{13}$ J/($3{,}6 \times 10^6$ J/kWh) ≈ $2{,}3 \times 10^7$ kWh. c) $8{,}2 \times 10^{13}$ J/(3×10^7 J/kg) ≈ $2{,}7 \times 10^6$ kg: quasi tremila tonnellate di carbone. d) $\Delta m = E/c^2 = 8{,}2 \times 10^{13}$ J/($3{,}00 \times 10^8$ m/s)$^2 \approx 9{,}1 \times 10^{-4}$ kg: meno di un grammo, lo 0,09% della massa iniziale.

24. a) Δm = 4 · 1,007 825 u − 4,002 603 u = 0,028 697 u; E = 0,028 697 · 931,5 MeV ≈ 26,7 MeV ≈ $4{,}27 \times 10^{-12}$ J. Frazione: 0,028 697/4,031 30 ≈ 0,0071, lo 0,7%. b) $3{,}8 \times 10^{26}$ W/($4{,}27 \times 10^{-12}$ J) ≈ $8{,}9 \times 10^{37}$ nuclei di elio al secondo. c) Ogni nucleo di elio consuma 4 atomi di idrogeno, cioè 4 · 1,007 825 u · $1{,}660\,54 \times 10^{-27}$ kg/u ≈ $6{,}69 \times 10^{-27}$ kg; al secondo $8{,}9 \times 10^{37} \cdot 6{,}69 \times 10^{-27}$ kg ≈ 6×10^{11} kg, circa seicento milioni di tonnellate di idrogeno, di cui circa quattro milioni di tonnellate (0,7%) diventano energia.

25. Traccia di risposta. Rutherford sostiene che la carica positiva dell'atomo non è diffusa, come nel modello di Thomson, ma concentrata in un volume minuscolo al centro, e che le grandi deviazioni delle particelle α nascono da un solo incontro con questa carica, non dalla somma di tanti piccoli urti con le parti dell'atomo. Le osservazioni: la maggior parte delle particelle attraversa la lamina, ma alcune vengono deviate di più di 90°. Con la carica diffusa la forza su una particella α resta piccola ovunque, e anche la somma di molti urti non può produrre deviazioni così grandi. Per stimare il volume si usa la conservazione dell'energia: la distanza minima a cui arriva una particella α lanciata contro il nucleo (circa 3×10^{-14} m per 7,7 MeV sull'oro) è un limite superiore per il raggio del nucleo, finché le deviazioni seguono la legge di Coulomb.

26. Volume del nucleone: $(4/3)\pi(1{,}2 \times 10^{-15}\ \text{m})^3 \approx 7{,}2 \times 10^{-45}\ \text{m}^3$; densità ≈ $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg/$7{,}2 \times 10^{-45}$ m$^3 \approx 2 \times 10^{17}$ kg/m^3, circa 2×10^{14} volte quella dell'acqua (1000 kg/m^3). Un cucchiaino: $2{,}3 \times 10^{17}$ kg/m$^3 \cdot 5 \times 10^{-6}$ m$^3 \approx 1 \times 10^{12}$ kg, un miliardo di tonnellate. La materia ordinaria è fatta di atomi quasi vuoti: il nucleo occupa circa 10^{-15} del volume dell'atomo. (Una materia di questa densità esiste nelle stelle di neutroni.)

27. L'errore è pensare che in due tempi di dimezzamento decada tutto. 10,54 anni sono 2 tempi di dimezzamento: resta 1/4 dei nuclei, e quindi un quarto dell'attività iniziale, che per una sorgente da radioterapia è ancora enorme. Il decadimento dimezza ciò che resta a ogni intervallo; la sorgente resta pericolosa per decenni e va smaltita come rifiuto radioattivo, schermata, secondo le norme.

28. Traccia di risposta. a) La spettroscopia: un gas caldo emette righe a lunghezze d'onda caratteristiche; la riga gialla non coincideva con nessuna riga nota, e quindi indicava un elemento nuovo. b) Nel modello di Bohr gli elettroni di un atomo possono avere solo certe energie, fissate dalla carica del nucleo e dal numero di elettroni, diverse da elemento a elemento; ogni riga corrisponde a un salto $hf = E_\text{i} - E_\text{f}$, e l'insieme dei salti è l'«impronta digitale» dell'elemento. c) Scienze naturali: la spettroscopia permette di conoscere la composizione chimica e la temperatura delle stelle; l'elio è il secondo elemento più abbondante dell'universo e si forma nel Sole per fusione. Greco: il nome viene da ἥλιος, «sole», perché fu trovato nel Sole prima che sulla Terra.

29. Traccia di risposta. Dicembre 1938: Hahn e Strassmann trovano il bario fra i prodotti dell'uranio bombardato con neutroni; all'inizio del 1939 Lise Meitner, che aveva dovuto lasciare la Germania perché ebrea, e Otto Frisch interpretano il risultato

come fissione. Nello stesso 1938 l'Italia emana le leggi razziali: Fermi, la cui moglie era di famiglia ebraica, va a Stoccolma a ritirare il Nobel e raggiunge gli Stati Uniti. Nell'agosto 1939, poco prima dello scoppio della guerra, Einstein firma la lettera preparata con Szilárd per avvertire Roosevelt del pericolo di armi tedesche basate sulla fissione. Ne nasce, negli anni seguenti, il progetto Manhattan, in cui lavorano molti scienziati esuli; Fermi realizza a Chicago la prima reazione a catena controllata (2 dicembre 1942); le bombe colpiscono Hiroshima e Nagasaki il 6 e il 9 agosto 1945. Il collegamento mostra come le persecuzioni abbiano spostato in America una parte decisiva della fisica europea, e apre la questione della responsabilità degli scienziati (manifesto Russell–Einstein, 1955).

30. Traccia di risposta (10–15 righe). Il modello di Rutherford, con il nucleo e gli elettroni intorno, contraddiceva l'elettromagnetismo: un elettrone in orbita, accelerato, dovrebbe irradiare e cadere sul nucleo; inoltre non spiegava perché gli atomi emettano spettri a righe. Bohr (1913) introdusse due ipotesi: l'elettrone può stare solo su alcune orbite, gli stati stazionari, su cui non irradia; e l'atomo emette o assorbe un fotone solo saltando da uno stato all'altro, con $hf = E_\mathrm{i} - E_\mathrm{f}$. Per l'idrogeno i livelli valgono $E_n = -13{,}6\ \mathrm{eV}/n^2$: il modello ritrova le righe di Balmer entro un millesimo, l'energia di ionizzazione di 13,6 eV e la dimensione dell'atomo; l'esperimento di Franck e Hertz (1914) confermò l'esistenza dei livelli. I limiti: vale solo per atomi con un elettrone, non spiega le intensità delle righe, e mescola la meccanica classica delle orbite con regole quantistiche imposte senza giustificazione. La meccanica quantistica lo ha sostituito: l'elettrone non ha traiettoria, ma i livelli energetici e la regola dei salti restano validi.