

Jearl Walker

Halliday - Resnick
Fondamenti
di fisica

Fisica moderna

Ottava edizione italiana



cea casa editrice
ambrosiana

Jearl Walker

Halliday - Resnick Fondamenti di fisica

Fisica moderna

Ottava edizione italiana

A cura di Dario Gerace

Se vuoi accedere alle risorse online riservate

1. Vai su **my.zanichelli.it**
2. Clicca su *Registrati*.
3. Scegli *Studente*.
4. Segui i passaggi richiesti per la registrazione.
5. Riceverai un'email: clicca sul link per completare la registrazione.
6. Cerca il tuo codice di attivazione stampato in verticale sul bollino argentato in questa pagina.
7. Inseriscilo nella tua area personale su **my.zanichelli.it**

Se sei già registrato, per accedere ai contenuti riservati ti serve solo il codice di attivazione.

Titolo originale: *Fundamentals of Physics, Extended*, 12th Edition by David Halliday, Robert Resnick and Jearl Walker (Chapters 37-44)

Copyright © 2022, 2014, 2011, 2008, 2005 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

This translation published under license with the original publisher John Wiley & Sons, Inc.

© 2024, 2015, 2006, 2001, 1998, 1995, 1984, 1977 CEA - Casa Editrice Ambrosiana, viale Romagna 5, 20089 Rozzano (MI) [89977/der] CEA - Casa Editrice Ambrosiana è un marchio editoriale di Zanichelli editore S.p.A.

Traduzione: Epitesto, Milano, basata sul testo della settima edizione italiana tradotta da Lanfranco Cicala.

Revisione: Dario Gerace

Diritti riservati

I diritti di pubblicazione, riproduzione, comunicazione, distribuzione, trascrizione, traduzione, noleggio, prestito, esecuzione, elaborazione in qualsiasi forma o opera, di memorizzazione anche digitale e di adattamento totale o parziale su supporti di qualsiasi tipo e con qualsiasi mezzo (comprese le copie digitali e fotostatiche), sono riservati per tutti i paesi. L'acquisto della presente copia dell'opera non implica il trasferimento dei suddetti diritti né li esaurisce.

Fotocopie e permessi di riproduzione

Le fotocopie per uso personale (cioè privato e individuale, con esclusione quindi di strumenti di uso collettivo) possono essere effettuate, nei limiti del 15% di ciascun volume, dietro pagamento alla S.I.A.E. del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Tali fotocopie possono essere effettuate negli esercizi commerciali convenzionati S.I.A.E. o con altre modalità indicate da S.I.A.E.

Per le riproduzioni ad uso non personale (ad esempio: professionale, economico, commerciale, strumenti di studio collettivi, come dispense e simili) l'editore potrà concedere a pagamento l'autorizzazione a riprodurre un numero di pagine non superiore al 15% delle pagine del presente volume.

Le richieste vanno inoltrate a:

Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali (CLEARedi),

Corso di Porta Romana 108, 20122 Milano

e-mail: autorizzazioni@clearedi.org e sito web: www.clearedi.org

L'autorizzazione non è concessa per un limitato numero di opere di carattere didattico riprodotte nell'elenco che si trova all'indirizzo www.zanichelli.it/chi-siamo/fotocopie-e-permessi

L'editore, per quanto di propria spettanza, considera rare le opere fuori del proprio catalogo editoriale. La loro fotocopia per i soli esemplari esistenti nelle biblioteche è consentita, anche oltre il limite del 15%, non essendo concorrenziale all'opera. Non possono considerarsi rare le opere di cui esiste, nel catalogo dell'editore, una successiva edizione, né le opere presenti in cataloghi di altri editori o le opere antologiche. Nei contratti di cessione è esclusa, per biblioteche, istituti di istruzione, musei e archivi, la facoltà di cui all'art. 71-ter legge diritto d'autore.

Per permessi di riproduzione, diversi dalle fotocopie, rivolgersi a ufficiocontratti@zanichelli.it

Licenze per riassunto, citazione e riproduzione parziale a uso didattico con mezzi digitali

La citazione, la riproduzione e il riassunto, se fatti con mezzi digitali, sono consentiti (art. 70 bis legge sul diritto d'autore), limitatamente a brani o parti di opera, a) esclusivamente per finalità illustrative a uso didattico, nei limiti di quanto giustificato dallo scopo non commerciale perseguito. (La finalità illustrativa si consegue con esempi, chiarimenti, commenti, spiegazioni, domande, nel corso di una lezione); b) sotto la responsabilità di un istituto di istruzione, nei suoi locali o in altro luogo o in un ambiente elettronico sicuro, accessibili solo al personale docente di tale istituto e agli alunni o studenti iscritti al corso di studi in cui le parti di opere sono utilizzate; c) a condizione che, per i materiali educativi, non siano disponibili sul mercato licenze volontarie che autorizzano tali usi. Zanichelli offre al mercato due tipi di licenze di durata limitata all'anno accademico in cui le licenze sono concesse:

A) licenze gratuite per la riproduzione, citazione o riassunto di una parte di opera non superiore al 5%. Non è consentito superare tale limite del 5% attraverso una pluralità di licenze gratuite.

B) licenze a pagamento per la riproduzione, citazione, riassunto parziale ma superiore al 5% e comunque inferiore al 40% dell'opera. Per usufruire di tali licenze occorre seguire le istruzioni su www.zanichelli.it/licenzeeducative

L'autorizzazione è strettamente riservata all'istituto educativo licenziatario e non è trasferibile in alcun modo e a qualsiasi titolo.

Garanzie relative alle risorse digitali

Le risorse digitali di questo volume sono riservate a chi acquista un volume nuovo: vedi anche al sito www.zanichelli.it/contatti/acquisti-e-recesso

le voci *Informazioni generali su risorse collegate a libri cartacei e Risorse digitali e libri non nuovi*.

Zanichelli garantisce direttamente all'acquirente la piena funzionalità di tali risorse.

In caso di malfunzionamento rivolgersi a assistenza@zanichelli.it

La garanzia di aggiornamento è limitata alla correzione degli errori e all'eliminazione di malfunzionamenti presenti al momento della creazione dell'opera. Zanichelli garantisce inoltre che le risorse digitali di questo volume sotto il suo controllo saranno accessibili, a partire dall'acquisto, per tutta la durata della normale utilizzazione didattica dell'opera. Passato questo periodo, alcune o tutte le risorse potrebbero non essere più accessibili o disponibili: per maggiori informazioni, leggi my.zanichelli.it/fuoricatalogo

Soluzioni degli esercizi e altri svolgimenti di compiti assegnati

Le soluzioni degli esercizi, compresi i passaggi che portano ai risultati e gli altri svolgimenti di compiti assegnati, sono tutelate dalla legge sul diritto d'autore in quanto elaborazioni di esercizi a loro volta considerati opere creative tutelate, e pertanto non possono essere diffuse, comunicate a terzi e/o utilizzate economicamente, se non a fini esclusivi di attività didattica.

Diritto di TDM

L'estrazione di dati da questa opera o da parti di essa e le attività connesse non sono consentite, salvi i casi di utilizzazioni libere ammessi dalla legge.

L'editore può concedere una licenza. La richiesta va indirizzata a tdm@zanichelli.it

Redazione e impaginazione: Epitesto, Milano

Copertina:

- Progetto grafico: Falcinelli & Co., Roma

- Immagine di copertina: © noLimit46/istockphoto

Prima edizione italiana: 1977

Seconda edizione italiana: 1984

Terza edizione italiana: febbraio 1995

Quarta edizione italiana: ottobre 1998

Quinta edizione italiana: settembre 2001

Sesta edizione italiana: gennaio 2006

Settima edizione italiana: maggio 2015

Ottava edizione italiana: febbraio 2024

Ristampa: **prima tiratura**

5

4

3

2

1

2024

2025

2026

2027

2028

Realizzare un libro è un'operazione complessa, che richiede numerosi controlli: sul testo, sulle immagini e sulle relazioni che si stabiliscono tra loro. L'esperienza suggerisce che è praticamente impossibile pubblicare un libro privo di errori. Saremo quindi grati ai lettori che vorranno segnalarceli.

Per segnalazioni o suggerimenti relativi a questo libro rivolgersi a: segreteria_cea@ceaedizioni.it

Per comunicazioni di tipo commerciale rivolgersi a: universita@zanichelli.it

Stampa:

per conto di Zanichelli editore S.p.A.
Via Irnerio 34, 40126 Bologna

Indice generale

Prefazione	V		
Ringraziamenti	VII		
Crediti fotografici	IX		
Tavole matematiche e fisiche	X		
CAPITOLO 37			
Relatività	1019		
37.1 Simultaneità e dilatazione del tempo	1019		
37.2 Relatività della lunghezza	1028		
37.3 Trasformazioni di Lorentz	1031		
37.4 Relatività delle velocità	1035		
37.5 Effetto Doppler per la luce	1036		
37.6 Quantità di moto ed energia	1038		
Sintesi	1043		
Domande	1044		
Problemi	1045		
Problemi di riepilogo	1049		
CAPITOLO 38			
Fotoni e onde di materia	1053		
38.1 Fotoni, quanti di luce	1053		
38.2 Effetto fotoelettrico	1055		
38.3 Fotoni, quantità di moto, effetto Compton, interferenza luminosa	1058		
38.4 Nascita della fisica quantistica	1063		
38.5 Elettroni e onde di materia	1065		
38.6 Equazione di Schrödinger	1068		
38.7 Principio di indeterminazione di Heisenberg	1070		
38.8 Riflessione su un gradino di potenziale	1071		
38.9 Effetto tunnel attraverso una barriera di potenziale	1073		
Sintesi	1076		
Domande	1077		
Problemi	1078		
Problemi di riepilogo	1081		
CAPITOLO 39			
Ancora onde di materia	1083		
39.1 Energia di un elettrone intrappolato	1083		
39.2 Funzioni d'onda di un elettrone intrappolato	1088		
		V	39.3 Elettrone in una buca finita 1091
		VII	39.4 Trappole elettroniche bi- e tridimensionali 1093
		IX	39.5 Atomo di idrogeno 1096
		X	Sintesi 1106
			Domande 1106
			Problemi 1107
			Problemi di riepilogo 1110
CAPITOLO 40			
			Atomi 1112
			40.1 Proprietà degli atomi 1112
			40.2 Esperimento di Stern e Gerlach 1118
			40.3 Risonanza magnetica 1120
			40.4 Principio di esclusione e trappole multielettroniche 1121
			40.5 Costruzione della tavola periodica degli elementi 1125
			40.6 Raggi X e ordinamento degli elementi 1127
			40.7 Laser 1130
			Sintesi 1135
			Domande 1136
			Problemi 1136
			Problemi di riepilogo 1139
CAPITOLO 41			
			Conduzione elettrica nei solidi 1141
			41.1 Proprietà elettriche dei metalli 1141
			41.2 Semiconduttori e drogaggio 1149
			41.3 Giunzione $p-n$ e transistor 1153
			Sintesi 1158
			Domande 1159
			Problemi 1160
			Problemi di riepilogo 1162
CAPITOLO 42			
			Fisica nucleare 1163
			42.1 Alla scoperta del nucleo 1163
			42.2 Alcune proprietà del nucleo 1166
			42.3 Decadimento radioattivo 1172
			42.4 Decadimento alfa 1175

42.5	Decadimento beta	
42.6	Metodi di radiodattazione	
42.7	Misura delle dosi di radiazioni	
42.8	Modelli nucleari	
	Sintesi	
	Domande	
	Problemi	
	Problemi di riepilogo	

CAPITOLO 43

Energia dal nucleo

43.1	Fissione nucleare	
43.2	Reattori nucleari	
43.3	Un reattore nucleare naturale	
43.4	Fusione termonucleare	
43.5	Fusione termonucleare nelle stelle	
43.6	Fusione termonucleare controllata	
	Sintesi	
	Domande	
	Problemi	
	Problemi di riepilogo	

1177

CAPITOLO 44

Quark, leptoni e il Big Bang

1179		1214
1180	44.1 Proprietà generali delle particelle elementari	1214
1181	44.2 Leptoni, adroni e stranezze	1222
1184	44.3 Quark e particelle mediatrici	1227
1185	44.4 Cosmologia	1233
1186	Sintesi	1239
1190	Domande	1239
	Problemi	1240
	Problemi di riepilogo	1242

1192

Appendici

1192		
1198	A Sistema Internazionale di unità di misura (SI)	A-1
1201	B Alcune costanti fondamentali della fisica	A-3
1203	C Alcuni dati astronomici	A-4
1204	D Fattori di conversione	A-5
1207	E Formule matematiche	A-9
1209	F Proprietà degli elementi	A-11
1209	G Tavola periodica degli elementi	A-14
1210		
1213	Indice analitico	I-1

Prefazione

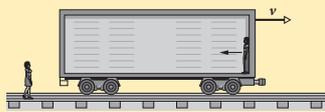
Ecco una nuova edizione del libro di testo ideato da David Halliday e Robert Resnick nel 1963 e che io stesso ho usato da studente del primo anno al MIT. (Accidenti, il tempo è volato!)

Lavorare a questa nuova edizione mi ha permesso di scoprire molti nuovi esempi interessanti e di rividerne alcuni tra i miei preferiti delle edizioni precedenti.

CHE COSA C'È DI NUOVO?

✓ VERIFICA 1

Stando di fianco ai binari della ferrovia vi passa davanti un carro merci come nella figura. Dentro, uno sperimentatore invia un impulso di luce laser dal fronte verso il retro del vagone. (a) Una vostra misura della velocità del raggio laser sarebbe maggiore, minore o uguale a quella misurata dallo sperimentatore? (b) Per lo sperimentatore la misura del tempo di percorrenza è un tempo proprio? (c) Questo tempo da lui misurato è legato al nostro dall'equazione 37.9?



Verifiche, una per ogni paragrafo.

Sintesi

Fotoni, quanti di luce Un'onda elettromagnetica (luce) è quantizzata e i suoi quanti sono detti *fotoni*. Per un'onda luminosa di frequenza f e lunghezza d'onda λ , l'energia E e la quantità di moto p del fotone sono dati da

$$E = hf \quad (\text{energia del fotone}) \quad (38.2)$$

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (\text{quantità di moto del fotone}) \quad (38.7)$$

Effetto fotoelettrico Quando una luce di frequenza sufficientemente elevata incide su una superficie metallica lucida, gli elettroni sono emessi dalla superficie per l'interazione fotone-elettrone nel metallo. L'equazione che descrive questo fenomeno è

$$hf = K_{\max} + \Phi \quad (38.5)$$

in cui hf rappresenta l'energia del fotone, K_{\max} è l'energia cinetica massima degli elettroni emessi e la **funzione lavoro** Φ del materiale bersaglio, cioè l'energia che deve possedere il fotone come minimo per emergere un elettrone dalla superficie del bersaglio. Se hf è inferiore a Φ , gli elettroni non vengono emessi.

Sintesi alla fine di ogni capitolo.

Problema svolto 41.4 Probabilità di occupazione di uno stato energetico in un metallo

(a) Qual è la probabilità che uno stato quantico, la cui energia è di 0,10 eV sopra il livello di Fermi di un metallo, sia occupato? Si assuma una temperatura di 800 K.

(b) Quant'è la probabilità di occupazione per uno stato dello stesso metallo che si trova 0,10 eV sotto il livello di Fermi?

SOLUZIONE (b)

SOLUZIONE (a)

La probabilità di occupazione di un certo stato di un metallo può essere trovata mediante la statistica di Fermi-Dirac secondo l'equazione 41.6.

Calcoli. Cominciamo dall'esponente che compare nell'equazione 41.6:

$$\frac{E - E_f}{kT} = \frac{0,10 \text{ eV}}{(8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K})(800 \text{ K})} = 1,45$$

Introducendo l'esponente nell'equazione 41.6, si ottiene

$$P(E) = \frac{1}{e^{1,45} + 1} = 0,19 \quad \text{ossia } 19\%$$

Calcoli. Per risolvere questo punto si può seguire lo stesso procedimento di quanto fatto per la parte (a), a eccezione del fatto che lo stato ha energia *minore* dell'energia di Fermi. Quindi l'esponente dell'equazione 41.6 ha lo stesso valore assoluto determinato in (a) ma è negativo, sicché il denominatore diminuisce. Pertanto l'equazione 41.6 dà

$$P(E) = \frac{1}{e^{-1,45} + 1} = 0,81 \quad \text{ossia } 81\%$$

Per gli stati con energia al di sotto del livello di Fermi spesso siamo più interessati alla probabilità che lo stato *non* sia occupato; questa probabilità è data da $1 - P(E)$, cioè in questo caso 19%. Si noti che è lo stesso valore della probabilità di occupazione determinata nel punto (a).

Problemi svolti con soluzioni per passi.

Problemi di riepilogo

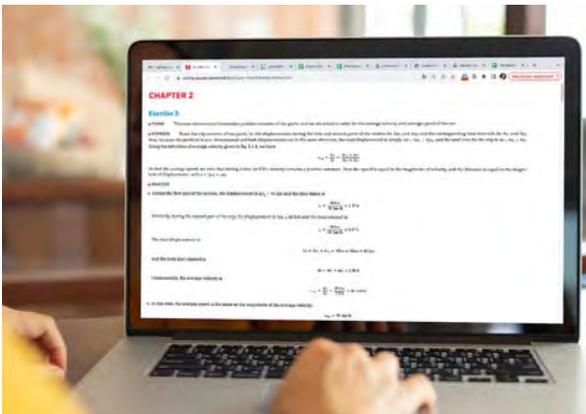
56. Sia ΔE_{ad} la differenza di energia tra due livelli di energia vicini per un elettrone intrappolato in una buca di potenziale infinitamente profonda. Sia E l'energia di uno dei due livelli. (a) Dimostrare che il rapporto $\Delta E_{ad}/E$ tende al valore $2/n$ per elevati valori del numero quantico n . Per $n \rightarrow \infty$, si ha che (b) ΔE_{ad} , (c) E , o (d) $\Delta E_{ad}/E$ tendono a zero? (e) Cosa implicano questi risultati in termini di principio di corrispondenza?

57. Un elettrone è intrappolato in una buca di potenziale unidimensionale infinitamente profonda. Mostrare che la differenza di energia ΔE tra il livello n e il livello $n+2$ è $(h^2/2mL^2)(n+1)$.

58. Come suggerisce la **Figura 39.8**, la densità di probabilità per un elettrone nella regione $0 < x < L$ per la buca di potenziale finita della **Figura 39.7** è sinusoidale, essendo data da $\psi^2(x) = B \sin^2 kx$, in cui B è costante. (a) Dimostrare che la funzione d'onda $\psi(x)$ che può essere determinata da questa equazione è soluzione dell'equazione di Schrödinger nella sua forma unidimensionale. (b) Determinare una espressione per k che rende ciò vero.

59. MS Come suggerisce la **Figura 39.8**, la densità di probabilità per un elettrone nella regione $x > L$ per la buca di potenziale finita della **Figura 39.7** decresce esponenzialmente, essendo data da $\psi^2(x) = Ce^{-2kx}$, in cui C è costante. (a) Dimostrare che

Nuovi problemi di fine capitolo.



Soluzioni dettagliate, disponibili online in lingua inglese, per i problemi di fine capitolo indicati con **MS**.

Risposte

Capitolo 1

Problemi 1. (a) $4,00 \cdot 10^4$ km; (b) $5,10 \cdot 10^8$ km²; (c) $1,08 \cdot 10^{12}$ km³
 3. (a) 10^6 μm; (b) 10^{-4} ; (c) $9,1 \cdot 10^5$ μm 5. (a) 160 pertica; (b) 40 catene 7. $1,1 \cdot 10^3$ piedi aciri 9. $1,9 \cdot 10^{22}$ cm³ 11. (a) 1,43; (b) 0,864
 13. (a) 495 s; (b) 141 s; (c) 198 s; (d) -245 s 15. $1,21 \cdot 10^{12}$ μs 17. C, D, A, B, E; il criterio importante è la stabilità della variazione giornaliera, non la sua entità 19. $5,2 \cdot 10^6$ m 21. $9,0 \cdot 10^{19}$ atomi
 23. (a) $1 \cdot 10^3$ kg; (b) 158 kg/s 25. $1,9 \cdot 10^3$ kg 27. (a) $1,18 \cdot 10^{-29}$ m³; (b) 0,282 nm 29. $1,75 \cdot 10^3$ kg 31. 1,43 kg/min 33. (a) 293 U.S. bushel; (b) $3,81 \cdot 10^3$ U.S. bushel 35. (a) 22 peck; (b) 5,5 Imperial bushel; (c) 200 L 37. $8 \cdot 10^2$ km 39. (a) 18,8 galloni USA; (b) 22,5 galloni USA 41. 0,3 cordoni 43. 3,8 mg/s 45. (a) sì; (b) 8,6 secondi-universo 47. 0,12 au/min 49. (a) 3,88; (b) 7,65; (c) 156 ken^2 ; (d) $1,19 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ 51. $1,4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ 53. $3,0 \cdot 10^7 \text{ ft}^2$
 55. 72 a 57. $8,07 \cdot 10^{60}$ 59. 6,400 m 61. (a) $1,4 \cdot 10^3$ h; (b) $5,2 \cdot 10^6$ s

Soluzioni sintetiche in italiano per le verifiche e per i problemi dispari.

Fisica nucleare

42.1 ALLA SCOPERTA DEL NUCLEO

Idee chiave

- La carica positiva di un atomo è concentrata nel suo nucleo, e non sparsa su tutto il volume dell'atomo. Fu l'inglese Ernest Rutherford a proporre nel 1910 questa struttura a séguito degli esperimenti che oggi definiamo di diffusione alla Rutherford. Particelle alfa (particelle di carica positiva costituite da due protoni e due neutroni) vengono inviate attraverso un sottile foglio metallico in modo che vengano deviate dai nuclei (positivi) che lo compongono.
- L'energia totale (energia cinetica più energia potenziale elettrica) del sistema costituito da particella alfa e nucleo bersaglio si conserva mentre la particella alfa si avvicina al nucleo.

Nucleo atomico

Torniamo a considerare ciò che giace al centro dell'atomo, il nucleo. Per oltre cento anni uno dei principali obiettivi dei fisici è stata l'elaborazione della fisica quantistica del nucleo e, per almeno altrettanto tempo, uno degli obiettivi principali di specifici settori dell'ingegneria è stata l'applicazione di quella fisica quantistica a campi che spaziano dalla radioterapia nella lotta al cancro fino agli strumenti per rilevare il gas radon nelle cantine.

Prima di dedicarci a tali applicazioni e alla fisica del nucleo, raccontiamo come i fisici scoprirono che l'atomo ha un nucleo: quello che oggi ci appare come un fatto ovvio e acquisito, agli inizi fu un'incredibile sorpresa.

Alla scoperta del nucleo

Nei primi anni del XX secolo non si sapeva molto sulla struttura degli atomi, al di là del fatto che contenevano elettroni. L'elettrone era stato scoperto da J.J. Thomson soltanto nel 1897 e a quel tempo la sua massa era ancora ignota. Non era quindi nemmeno possibile dire quale fosse il numero esatto di questi elettroni, carichi negativamente, contenuti in un certo atomo. Gli scienziati pensavano che, essendo gli atomi essenzialmente neutri, dovessero contenere qualche carica positiva, ma allora nessuno era ancora in grado di dire quale forma potesse assumere questa carica positiva di compensazione. Un modello accreditato prevedeva che le cariche positive e negative fossero uniformemente distribuite in una sfera.

Nel 1911 Ernest Rutherford formulò la teoria secondo cui la carica positiva dell'atomo è fortemente concentrata proprio al centro dell'atomo, nel **nucleo**, e che questo è responsabile della maggior parte della massa dell'atomo. Questa ipotesi non nasceva come frutto di una gratuita elucubrazione, ma si fondeva sui risultati di un esperimento da lui proposto ed eseguito dai suoi collaboratori, Hans Geiger (oggi famoso per il contatore Geiger) ed Ernest Marsden, uno studente ventenne non ancora laureato.

Ai tempi di Rutherford era noto che certi elementi, detti **radioattivi**, si trasformano spontaneamente in altri elementi, emettendo delle particelle durante il processo. Uno di questi è il radon, che decade emettendo particelle alfa (α) con energia di circa 5,5 MeV. Oggi sappiamo che queste particelle sono nuclei di elio.

L'idea di Rutherford fu di inviare particelle alfa ad alta energia contro un bersaglio costituito da una sottile lamina metallica, per misurare l'entità della deviazione che esse subivano attraversando la lamina. Le particelle alfa, che hanno massa circa 7300 volte maggiore di quella dell'elettrone, hanno carica $+2e$.

La **Figura 42.1** mostra il dispositivo sperimentale di Geiger e Marsden. La loro sorgente era un tubo di vetro sottile contenente gas radon. L'esperimento consisteva nel rilevare il numero di particelle α deviate sotto diversi angoli di diffusione ϕ .

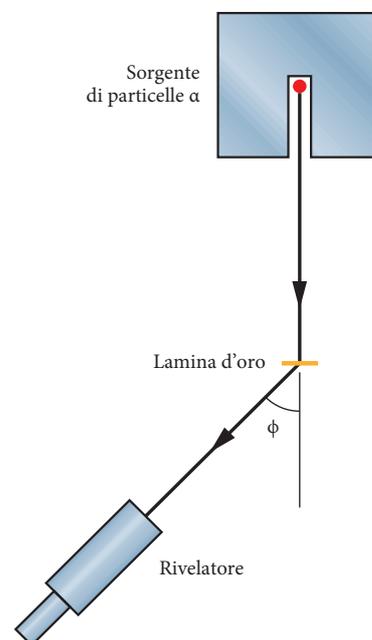


Figura 42.1 Disposizione (vista dall'alto) dell'apparecchiatura sperimentale usata nel laboratorio di Rutherford nel 1911-1913 per studiare la diffusione di particelle α da parte di fogli metallici sottili. Il rivelatore può essere orientato per diversi valori dell'angolo di diffusione ϕ . La sorgente di particelle alfa era il radon, un prodotto di decadimento del radio. Fu con questo semplice apparecchio «da tavolo» che fu scoperto il nucleo.

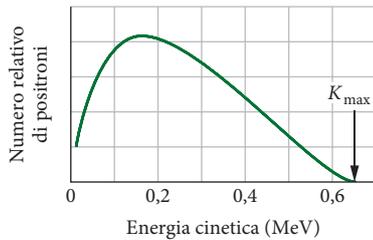


Figura 42.11 Distribuzione secondo l'energia cinetica dei positroni emessi nel decadimento beta del ^{64}Cu . La massima energia cinetica misurata (K_{max}) vale 0,653 MeV. In tutti gli eventi di decadimento beta del ^{64}Cu questa energia è divisa, in varie proporzioni, fra il positrone e il neutrino. L'energia più probabile per il positrone è di circa 0,15 MeV.

specifico radionuclide ogni particella alfa emessa possiede rigorosamente la stessa energia cinetica. Nel decadimento β^- dell'equazione 42.26 con emissione di elettrone, invece, l'energia di disintegrazione Q si ripartisce, secondo proporzioni variabili, fra l'elettrone e il neutrino. A volte l'elettrone si prende quasi tutta l'energia, altre volte invece tocca al neutrino prenderla. La somma delle energie dell'elettrone e del neutrino è comunque uguale a un valore costante Q . E questa ripartizione casuale dell'energia, ma con somma sempre uguale a Q , si verifica anche per il decadimento β^+ dell'equazione 42.27.

Quindi, nel decadimento beta l'energia degli elettroni o dei positroni emessi può variare da circa zero fino a un massimo K_{max} . La **Figura 42.11** mostra la distribuzione dell'energia del positrone emesso per il decadimento beta di ^{64}Cu , secondo l'equazione 42.25. La massima energia del positrone K_{max} deve essere uguale all'energia di disintegrazione Q , perché, se il positrone porta via l'energia K_{max} , per il neutrino non rimane più alcuna energia residua. Si ha dunque

$$Q = K_{\text{max}} \tag{42.28}$$

Neutrini

Nel 1930 Wolfgang Pauli per primo formulò l'ipotesi dell'esistenza dei neutrini. La sua ipotesi non soltanto consentiva un'interpretazione della distribuzione dell'energia dell'elettrone o del positrone nel decadimento beta, ma risolveva anche un altro enigma che si presentava all'inizio dello studio del decadimento beta, quello del momento angolare «mancante».

Il neutrino è una particella veramente sfuggente: si è calcolato che il cammino medio in acqua di un neutrino ad alta energia non sia minore di parecchie migliaia di anni luce! E al tempo stesso i neutrini residui del *Big Bang*, l'evento che ha presumibilmente segnato la creazione dell'universo, sono le particelle più abbondanti dell'universo conosciuto. Ogni secondo ne passano miliardi attraverso il nostro corpo senza lasciar tracce.

Nonostante questa loro indole sfuggente, i neutrini sono stati rivelati in laboratorio. Ciò venne realizzato per la prima volta nel 1953 da F. Reines e C. L. Cowan, utilizzando neutrini generati in un reattore nucleare di grande potenza. Nel 1995 Reines ricevette il premio Nobel per questo lavoro. Nonostante le difficoltà di rivelazione dei neutrini, la fisica sperimentale del neutrino è una componente ben sviluppata della fisica sperimentale, praticata da appassionati studiosi in parecchi laboratori di tutto il mondo.

Il Sole emette neutrini in grande quantità dalla fornace nucleare che occupa il suo nucleo centrale: durante la notte questi messaggeri provenienti dal centro del Sole ci investono attraversando anche l'interno della Terra, che per essi è quasi del tutto trasparente. Nel febbraio del 1987 giunse sulla Terra, dopo un viaggio durato 170 000 anni, la luce dell'esplosione di una stella situata nella Grande Nube di Magellano (una galassia vicina). In questa esplosione si generarono enormi quantità di neutrini, e circa una decina di essi furono catturati in Giappone da un sensibilissimo strumento rivelatore: la **Figura 42.12** riporta la registrazione del loro passaggio.

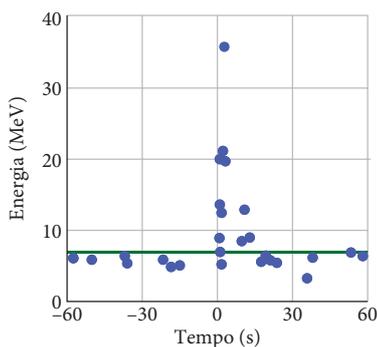


Figura 42.12 Il passaggio, registrato al tempo (relativo) zero, di uno sciame di neutrini generato dall'esplosione della supernova SN 1987A spicca nettamente rispetto all'andamento di fondo. (Per i neutrini, una decina è «uno sciame»!) I neutrini sono stati captati da un sensore molto raffinato, collocato in fondo a una miniera in Giappone. La supernova era visibile soltanto nell'emisfero australe: i neutrini hanno quindi attraversato indisturbati tutta la Terra (una barriera ridicola, per loro!) prima di incappare in quel sensibilissimo rivelatore.

Radioattività e mappa dei nuclidi

Possiamo arricchire le informazioni fornite dalla mappa dei nuclidi della **Figura 42.5** costruendo un grafico tridimensionale in cui riportiamo su un terzo asse l'eccesso di massa Δ di ciascun nuclide espresso in MeV/c^2 . L'inserimento di tale asse sfocia nella **Figura 42.13**, che rivela il grado di stabilità nucleare dei nuclidi.

Come si vede nella **Figura 42.13**, limitata ai nuclidi leggeri, la superficie descrive una «valle dei nuclidi», lungo il cui fondo corre la zona di stabilità della **Figura 42.5**. I nuclidi sul versante della valle più ricco in protoni vi decadono β^+ con emissione di positroni, e quelli sul versante più ricco in neutroni decadono β^- sul «fondovalle» con emissione di elettroni.

✓ VERIFICA 3

^{238}U decade in ^{234}Th con emissione di una particella alfa. Segue una catena di successivi decadimenti, sia di tipo alfa sia di tipo beta. Alla fine si ottiene un nuclide stabile e non è più possibile alcun decadimento radioattivo. Quale dei seguenti nuclidi stabili costituisce il prodotto finale della catena di decadimento del nuclide ^{238}U : ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb o ^{209}Pb ? (*Suggerimento*: lo si capisce considerando le variazioni del numero di massa A nei due tipi di decadimento.)

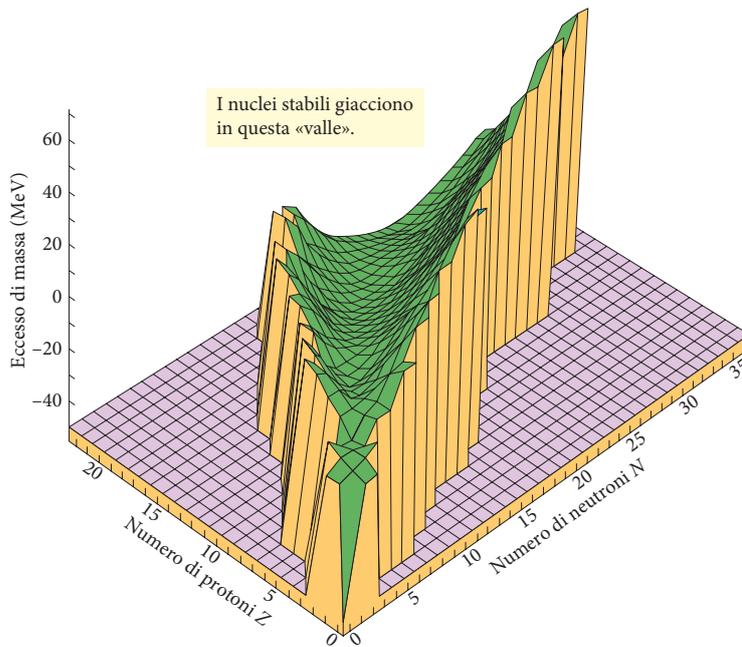


Figura 42.13 Vista parziale, prospettica, della valle dei nuclidi, limitata ai nuclidi più leggeri. Il deuterio, il trizio e l'elio giacciono all'estremità più vicina del grafico, con l'elio nel punto più alto. La valle si estende allontanandosi dall'osservatore, ma qui il grafico si interrompe a $Z = 22$ e $N = 35$. I nuclidi con valori di A maggiori, che dovrebbero essere disegnati ben oltre la valle qui rappresentata, possono decadere nella valle per successive emissioni alfa e per fissione (la scissione di un nuclide).

Problema svolto 42.7 Energia di reazione Q in un decadimento beta, con uso delle masse

Calcolate l'energia di disintegrazione Q nel decadimento beta di ^{32}P espresso dall'equazione 42.24. Le masse atomiche occorrenti sono 31,973 91 u per ^{32}P e 31,972 07 u per ^{32}S .

SOLUZIONE

L'energia di disintegrazione Q corrisponde alla variazione di energia di massa nel decadimento.

Calcoli. Q è data dall'equazione 37.50 ($Q = -\Delta M c^2$). In ogni caso, dobbiamo essere attenti nel distinguere fra massa nucleare (ignota) e massa atomica (nota). Useremo i simboli in grassetto \mathbf{m}_p e \mathbf{m}_s per le masse nucleari di ^{32}P e ^{32}S , riservando i simboli in corsivo m_p e m_s alle loro rispettive masse atomiche. Scriveremo dunque la variazione di massa per il decadimento espresso dalla relazione 42.24 come

$$\Delta m = (\mathbf{m}_s + m_e) - \mathbf{m}_p$$

ove m_e è la massa dell'elettrone. Se sommiamo e sottraiamo $15m_e$ al secondo membro dell'equazione, otteniamo

$$\Delta m = (\mathbf{m}_s + 16m_e) - (\mathbf{m}_p + 15m_e)$$

Le quantità fra parentesi sono le masse atomiche di ^{32}P e ^{32}S , quindi

$$\Delta m = m_s - m_p$$

Sottraendo in questo modo le masse atomiche, si tiene automaticamente conto della massa dell'elettrone emesso. (Ciò non vale, però, per l'emissione di positroni.)

L'energia di disintegrazione per il decadimento di ^{32}P è dunque

$$\begin{aligned} Q &= -\Delta m c^2 \\ &= -(31,972\,07\text{ u} - 31,973\,91\text{ u})(931,494\,013\text{ MeV/u}) \\ &= 1,71\text{ MeV} \end{aligned}$$

Sperimentalmente questo valore calcolato corrisponde al valore misurato di K_{max} , la massima energia degli elettroni emessi. Sebbene vengano liberati 1,71 MeV ogni volta che un nucleo di ^{32}P decade, nella maggior parte degli eventi l'energia che l'elettrone si porta via è inferiore. È il neutrino che, quasi sempre invisibile, assume su di sé il resto dell'energia e se la porta fuori dal laboratorio.

42.6 METODI DI RADIODATTAZIONE

Idea chiave

- I radionuclidi naturali forniscono un metodo per determinare le età degli eventi storici e preistorici. Per esempio, l'età dei materiali organici spesso si può stabilire misurando il loro

contenuto di ^{14}C , mentre l'età dei campioni di rocce si trova mediante il ^{40}K .

Radiodattazione

Conoscendo l'emivita di un certo radionuclide, è teoricamente possibile usare il suo decadimento come orologio per misurare un intervallo di tempo. Il decadimento di nuclidi a vita molto lunga, per esempio, può servire a misurare l'età delle rocce, ossia il tempo trascorso dalla loro formazione. Tali misure per le rocce terrestri, le rocce lunari e i meteoriti sembrano confermare che queste abbiano una stessa età massima di circa $4,5 \cdot 10^9$ anni, comunemente accettata come età del sistema solare.

Problema svolto 42.9 Tempo di esistenza di un nucleo composto formatosi per cattura neutronica

Consideriamo la reazione di cattura neutronica



nella quale si forma un nucleo composto (^{110}Ag). La **Figura 42.15** rappresenta l'andamento della frequenza relativa che si verifichi questo tipo di evento in funzione dell'energia del neutrone incidente. Trovate la vita media di questo nucleo composto usando il principio di indeterminazione scritto nella forma:

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar \quad (42.36)$$

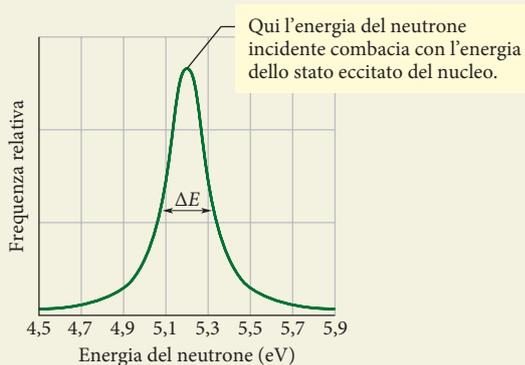


Figura 42.15 Una curva tipica del numero relativo di eventi per una reazione del tipo descritto dall'equazione 42.35 in funzione dell'energia del neutrone incidente. La larghezza a metà altezza del picco di risonanza è $\Delta E \approx 0,20$ eV.

Qui ΔE rappresenta il grado di incertezza con il quale può essere definita l'energia dello stato. La quantità Δt si può interpretare come il tempo disponibile per fare la misurazione dell'energia dello stato; di fatto qui Δt è uguale a t_m , la vita media del nucleo composto prima di decadere al suo stato fondamentale.

SOLUZIONE

Si vede che la curva presenta un picco molto marcato per un'energia del neutrone intorno ai 5,2 eV. Ciò induce a pensare che il nucleo composto ^{110}Ag possieda un solo livello eccitato. Quando l'energia disponibile derivante dal neutrone incidente è esattamente uguale all'energia di quel livello sopra lo stato fondamentale di ^{110}Ag , si ha «risonanza», e la reazione data dalla 42.35 «si innesca» con decisione.

Il picco di risonanza non è però definito in modo netto, ma presenta, intorno alla metà del valore massimo, una larghezza approssimata (indicata nella figura da ΔE) di 0,20 eV.

Calcoli. Introducendo tale incertezza di 0,20 eV nell'equazione 42.36, si ottiene

$$\begin{aligned} \Delta t = t_m &\approx \frac{\hbar}{\Delta E} \approx \frac{4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}}{2\pi(0,20 \text{ eV})} \\ &\approx 3 \cdot 10^{-15} \text{ s} \end{aligned}$$

Questo è un tempo centinaia di volte maggiore di quello che un neutrone di energia 5,2 eV impiega per attraversare un diametro del nucleo di ^{109}Ag . Il neutrone dunque trascorre il tempo di $3 \cdot 10^{-15}$ s come *parte* del nucleo.

Sintesi

Nuclidi Sono circa 2000 i **nuclidi** dei quali si conosce l'esistenza. Ciascuno è caratterizzato da un **numero atomico** Z (il numero dei protoni) e da un **numero di massa** A (il numero totale dei nucleoni, cioè protoni e neutroni). Si ha dunque $A = Z + N$. Nuclidi aventi lo stesso numero atomico ma numero di neutroni differenti sono chiamati **isotopi**. I nuclei hanno un raggio medio r dato da

$$r = r_0 A^{1/3} \quad (42.3)$$

ove $r_0 \approx 1,2$ fm.

Massa ed energia di legame Spesso le masse atomiche sono indicate in termini di **ecceso di massa**:

$$\Delta = M - A \quad (\text{ecceso di massa})$$

ove M è la massa effettiva di un atomo in unità di massa atomica e A è il numero di massa del nucleo atomico. L'**energia di legame** di un nucleo è la differenza

$$\Delta E = \Sigma(mc^2) - Mc^2 \quad (\text{energia di legame}) \quad (42.7)$$

in cui $\Sigma(mc^2)$ è l'energia di massa totale di *tutti* i protoni e neutroni. L'**energia di legame per nucleone** è

$$\Delta E_n = \frac{\Delta E}{A} \quad (\text{energia di legame per nucleone}) \quad (42.8)$$

Conversioni fra massa ed energia L'energia equivalente di un'unità di massa u è 931,494 013 MeV. La curva delle energie di legame mostra che i nuclidi di massa media sono i più stabili e che si può avere liberazione di energia sia dalla fissione di nuclei pesanti, sia dalla fusione di nuclei leggeri.

Forza nucleare I nuclei sono tenuti insieme da una forza di attrazione che agisce fra i nucleoni. Si ritiene che sia un effetto residuo dell'**interazione forte** che agisce fra i quark che formano i nucleoni.

Decadimento radioattivo La maggior parte dei nuclidi noti è radioattiva; essi decadono spontaneamente con una frequenza $R = -dN/dt$ proporzionale al numero N degli atomi presenti, secondo la **costante di decadimento** λ . Ciò si traduce nella legge del decadimento esponenziale:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad R = \lambda N = R_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{decadimento radioattivo}) \quad (42.15, 42.17, 42.16)$$

L'**emivita** o **tempo di dimezzamento** $T_{1/2} = (\ln 2)/\lambda$ di un nuclide radioattivo è l'intervallo di tempo dopo il quale l'attività R (o il numero di nuclidi N) si è ridotta alla metà del suo valore iniziale.

Decadimento alfa Alcuni nuclidi decadono emettendo una particella alfa (un nucleo di elio, ^4He). Questo tipo di decadimento è ostacolato da una barriera di potenziale, che non è penetrabile secondo le leggi della meccanica classica, ma nella fisica quantistica è soggetta all'effetto tunnel. La penetrabilità della barriera, e quindi l'emivita per il decadimento alfa, sono molto sensibili a variazioni dell'energia della particella alfa emessa.

Decadimento beta Nel **decadimento beta** si ha emissione di un elettrone o di un positrone, insieme a un neutrino. Le particelle emesse condividono l'energia di disintegrazione disponibile. Gli elettroni e i positroni emessi nel decadimento beta hanno uno spettro continuo di energia fino a un massimo $K_{\max} = Q = -\Delta m c^2$.

Datazione radioattiva I nuclidi radioattivi che si trovano in natura forniscono un mezzo agevole per la stima delle date di eventi storici e preistorici. Così, per esempio, si può spesso trovare l'età di materiali organici misurandone il contenuto in ^{14}C , mentre per le rocce si ricorre al radionuclide ^{40}K .

Misura delle dosi di radiazioni ionizzanti Per descrivere l'esposizione a radiazioni ionizzanti sono state definite tre unità di misura. Il **becquerel** (1 Bq = 1 disintegrazione al secondo) misura l'**attività** di una sorgente radioattiva. Il **gray** (1 Gy = 1 J/kg) misura la **dose di radiazione assorbita** effettivamente da un oggetto specifico, in termini di energia a esso trasferita. Il **sievert** (1 Sv = FQ · 1 Gy) misura la **dose equivalente**, ossia gli effetti biologici prodotti su un determinato organismo da una dose di 1 Gy effettivamente assorbita. Una dose equivalente di 1 Sv produce gli stessi effetti indipendentemente dal tipo di radiazione assorbita.

Modelli del nucleo Il **modello a goccia** della struttura del nucleo suppone che i nucleoni interni al nucleo entrino continuamente in collisione fra loro, e che si formino dei **nuclei composti**

di vita relativamente lunga ogniqualvolta viene catturato un proiettile. La formazione di un nucleo composto e il suo successivo decadimento sono eventi totalmente indipendenti.

Il **modello a guscio** o a **particella indipendente** della struttura del nucleo suppone che ciascun nucleone si muova, essenzialmente senza collisioni, in uno stato quantico all'interno del nucleo. Questo modello presuppone l'esistenza di livelli e di **numeri magici** per i nucleoni (2, 8, 20, 28, 50, 82 e 126), associati a gusci chiusi di nucleoni; i nuclidi che possiedono un numero magico di neutroni o di protoni godono di una particolare stabilità.

Il **modello combinato**, nel quale alcuni nucleoni extra si muovono su stati quantici al di fuori di una zona centrale di gusci chiusi, descrive con molta efficacia un gran numero di proprietà del nucleo.

Domande

1. Il radionuclide ^{196}Ir decade emettendo un elettrone. (a) In che casella della **Figura 42.6** andrà a cadere? (b) Avverranno ulteriori decadimenti?
2. L'eccesso di massa di una particella alfa (usate un righello sulla **Figura 42.13**) è maggiore o minore dell'energia di legame totale della particella (usate l'energia di legame per nucleone che si ricava dalla **Figura 42.7**)?
3. A $t = 0$, un campione del radionuclide A ha la stessa frequenza di decadimento che ha un campione del radionuclide B a $t = 30$ min. Le costanti di decadimento sono λ_A e λ_B , con $\lambda_A < \lambda_B$. I due campioni potranno mai avere, nello stesso momento, la stessa frequenza di decadimento? (*Suggerimento*: abbozzare un grafico delle loro attività).
4. Un certo nuclide è particolarmente stabile. La sua energia di legame per nucleone si trova leggermente al di sotto o leggermente al di sopra della curva di energia di legame mostrata nella **Figura 42.7**?
5. Supponete che la particella alfa dell'esperimento di Rutherford sia sostituita con un protone di stessa energia cinetica iniziale e anch'esso diretto verso il nucleo dell'atomo d'oro. (a) La distanza dal centro del nucleo di oro che provoca l'arresto del protone è maggiore, minore o uguale a quella della particella alfa? (b) Se cambiamo il bersaglio con un nucleo di numero Z maggiore, la distanza di arresto della particella alfa è maggiore, minore o uguale rispetto a quella che si ha con l'oro?
6. La **Figura 42.16** illustra l'attività di tre sorgenti radioattive in funzione del tempo. Ordinate, in modo decrescente, le sorgenti secondo la loro (a) emivita e (b) la loro costante di decadimento. (*Suggerimento*: per la risposta (a) misurate il grafico con un righello.)

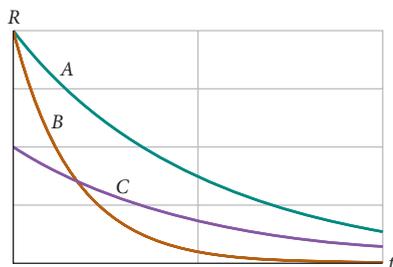


Figura 42.16 Domanda 6.

7. Il nuclide ^{244}Pu ($Z = 94$) è un emettitore alfa. In quale dei seguenti nuclei decade: ^{240}Np ($Z = 93$), ^{240}U ($Z = 92$), ^{248}Cm ($Z = 96$), oppure ^{244}Am ($Z = 95$)?
8. Il radionuclide ^{49}Sc ha una emivita di 57,0 min. A $t = 0$, la frequenza di conteggi di un campione è pari a 6000 conteggi/min

sopra l'attività di fondo generale, pari a 30 conteggi/min. Senza svolgere calcoli, determinare se la frequenza di conteggi del campione sarà uguale alla frequenza di fondo in 3 h, 7h, 10h o in un tempo molto più lungo di 10 h.

9. A $t = 0$ si inizia a osservare due nuclei radioattivi identici con emivita pari a 5 min. A $t = 1$ min, uno dei nuclei decade. Questo evento aumenta o diminuisce la possibilità che un secondo nucleo decada nei successivi 4 min, o non ci sono effetti sul secondo nucleo? (Sono questi eventi l'uno causa e l'altro effetto, o casuali?)
10. La **Figura 42.17** mostra la curva dell'energia di legame per nucleone ΔE in funzione del numero di massa A . Sono indicati tre isotopi. Ordinarli in modo decrescente in funzione dell'energia di legame richiesta per rimuovere un nucleone dall'isotopo.

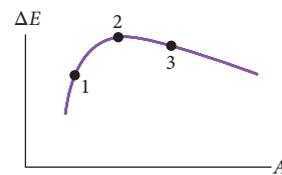


Figura 42.17 Domanda 10.

11. A $t = 0$, un campione del radionuclide A ha una frequenza di decadimento doppia rispetto a quella di un campione del radionuclide B . Le costanti di decadimento sono λ_A e λ_B , con $\lambda_A > \lambda_B$. I due campioni potranno mai avere, nello stesso momento, la stessa frequenza di decadimento?
12. La **Figura 42.18** è un grafico del numero di massa A rispetto al numero di carica Z . Il collocamento di un certo nucleo sul grafico è rappresentato da un punto. Quale delle frecce che partono dal punto rappresenta meglio la transizione in cui un nucleo effettui (a) un decadimento β^- e (b) un decadimento α ?

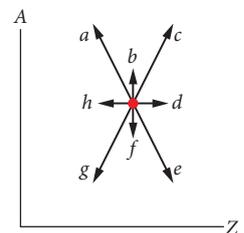


Figura 42.18 Domanda 12.

13. (a) Quali dei seguenti nuclidi sono magici? ^{122}Sn , ^{132}Sn , ^{98}Cd , ^{198}Au , ^{208}Pb . (b) Quali, se ve ne sono, hanno doppio numero magico?
14. Se si raddoppia la massa di un dato campione radioattivo, (a) l'attività e (b) la costante di decadimento aumentano, diminuiscono o restano invariate?
15. I numeri magici per l'occupazione dei nucleoni nei gusci nucleari sono forniti nel paragrafo 42.8 e sono 2, 8, 20, 28, 50, 82, e 126. I nuclidi sono magici (cioè particolarmente stabili) quando (a) solo il numero di massa A , (b) solo il numero atomico Z , (c) solo in numero di neutroni N è uguale a uno di questi numeri oppure (d) se lo sono sia Z sia N ? Scegliere tutte le affermazioni corrette.

Problemi

MS Soluzioni disponibili nel Manuale delle soluzioni dettagliate

BIO Applicazione biomedica

Paragrafo 42.1 Alla scoperta del nucleo

- Un nucleo di ${}^7\text{Li}$ con energia cinetica di 3,00 MeV è inviato verso un nucleo di ${}^{232}\text{Th}$. Qual è la separazione minore possibile tra i centri dei due nuclei, assumendo che il (più massivo) ${}^{232}\text{Th}$ non si muova?
- Calcolate la distanza di massimo avvicinamento per un urto frontale fra una particella alfa di energia 5,30 MeV e il nucleo di un atomo di rame.
- Un nucleo di Li con energia cinetica 10,2 MeV è inviato direttamente verso il centro di un nucleo di Ds. A quale distanza tra i due centri il Li si ferma momentaneamente, assumendo che il nucleo di Ds non si muova?
- In un esperimento di diffusione alla Rutherford si assuma che la particella alfa incidente (raggio 1,80 fm) sia lanciata frontalmente verso il nucleo di oro (raggio 6,23 fm). Quanta energia dovrebbe possedere la particella alfa per arrivare a «toccare» appena il nucleo?
- Quando una particella alfa urta elasticamente un nucleo, questo rincula. Supponiamo che una particella alfa con energia di 5,00 MeV abbia una collisione elastica frontale con un nucleo di oro, inizialmente a riposo. Qual è l'energia cinetica (a) del nucleo che rincula e (b) della particella alfa che rimbalza?

Paragrafo 42.2 Alcune proprietà del nucleo

- Il grande eccesso neutronico dei nuclei pesanti (definito come $N - Z$) è comprovato dal fatto che la maggior parte dei nuclei pesanti non potrebbe mai dividersi per fissione in due nuclei stabili senza lasciare neutroni residui. Consideriamo per esempio la fissione spontanea di un nucleo di ${}^{235}\text{U}$ in due nuclei figli di numeri atomici 39 e 53 stabili. Con riferimento all'Appendice F, determinare il nome (a) del primo nucleo figlio e (b) del secondo nucleo figlio. In base alla [Figura 42.5](#), all'incirca qual è il numero di neutroni (c) nel primo e (d) nel secondo? (e) Approssimativamente, qual è il numero di neutroni residui?
 - Qual è la densità di massa nucleare per (a) il nucleo leggero ${}^{56}\text{Mn}$ e per (b) il nucleo pesante ${}^{209}\text{Bi}$? (c) Confrontare le due risposte fornendo una spiegazione. Qual è la densità di carica nucleare ρ_p (d) per il nucleo leggero ${}^{56}\text{Mn}$ e per (e) il nucleo pesante ${}^{209}\text{Bi}$? (f) Confrontare le due risposte fornendo una spiegazione.
 - (a) Dimostrate che la massa M di un atomo è approssimativamente data da $M_{\text{app}} = Am_p$, in cui A è il numero di massa e m_p è la massa del protone. Per (b) ${}^1\text{H}$, (c) ${}^{31}\text{P}$, (d) ${}^{120}\text{Sn}$, (e) ${}^{197}\text{Au}$ e (f) ${}^{239}\text{Pu}$, usare la [Tabella 42.1](#) per determinare l'errore percentuale tra M_{app} e M

$$\text{Deviazione percentuale} = \frac{M_{\text{app}} - M}{M} 100$$
- (g) Questo valore di M_{app} è abbastanza accurato da poter essere usato nel calcolo dell'energia di legame del nucleo?
- (a) Quanti protoni e (b) quanti neutroni contiene il nuclide ${}^{14}\text{C}$?
 - Qual è l'eccesso di massa Δ_1 del nuclide ${}^1\text{H}$ (la cui massa è 1,007 825 u) in (a) unità di massa atomica e (b) MeV/c^2 ? Qual è l'eccesso di massa Δ_n di un neutrone (la cui massa è 1,008 665 u) in (c) unità di massa atomica e (d) MeV/c^2 ? Qual è l'eccesso di massa Δ_{120} del ${}^{120}\text{Sn}$ (la cui massa è 119,902 197 u) in (e) unità di massa atomica e (f) MeV/c^2 ?
 - **MS** I raggi dei nuclei possono essere misurati per diffusione di elettroni ad alta energia (alta velocità) su di esso. (a) Qual è il valore della lunghezza d'onda di de Broglie per elettroni di energia 200 MeV? (b) Questi elettroni potrebbero essere usati come sonde adatte a questo scopo?

- L'energia potenziale elettrostatica di una sfera uniforme di carica q e raggio r è data da

$$U = \frac{3q^2}{20\pi\epsilon_0 r}$$

- L'energia rappresenta per la sfera una tendenza a rimanere compatta o a frantumarsi? Il nuclide ${}^{239}\text{Pu}$ è sferico, con raggio 6,64 fm. Per tale nuclide, quali sono (b) l'energia potenziale elettrica U secondo l'equazione data, (c) l'energia potenziale elettrica per protone e (d) l'energia potenziale elettrica per nucleone. L'energia di legame per nucleone è 7,56 MeV. (e) Perché il nucleo risulta così strettamente legato quando le risposte (c) e (d) consistono in valori grandi e positivi?

- Una stella di neutroni è un oggetto astronomico la cui densità è prossima a quella della materia nucleare, $2 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$. Supponiamo che il Sole collassi in questa forma senza perdere nulla della sua attuale massa. Quale diventerebbe presumibilmente il suo raggio?

- Qual è l'energia di legame per nucleone relativa all'isotopo dell'americio ${}^{244}_{95}\text{Am}$? Ecco le masse atomiche coinvolte e la massa del neutrone:

${}^{244}_{95}\text{Am}$	244,064 279 u	${}^1\text{H}$	1,007 825 u
n	1,008 665 u		

- (a) Dimostrate che l'energia associata ai legami nucleari, o all'interazione forte, è proporzionale al numero di massa A del nucleo considerato. (b) Dimostrate che l'energia associata alla forza di Coulomb fra i protoni è proporzionale a $Z(Z - 1)$. (c) Dimostrate che, passando a nuclei sempre più grandi (vedi la [Figura 42.5](#)), l'importanza della forza di Coulomb aumenta più rapidamente di quella dell'interazione forte.

- Qual è l'energia di legame per nucleone relativa all'isotopo dell'europio ${}^{152}_{63}\text{Eu}$? Ecco le masse atomiche coinvolte:

${}^{152}_{63}\text{Eu}$	151,921 742 u	${}^1\text{H}$	1,007 825 u
n	1,008 665 u		

- Poiché il neutrone non possiede carica, la sua massa deve essere misurata con un metodo diverso da quello dello spettrometro di massa. Quando un neutrone e un protone si incontrano (assumeteli entrambi come a riposo), si combinano a formare un deutrone, emettendo un raggio gamma di energia 2,223 MeV. Le masse atomiche del protone e del deutrone sono rispettivamente 1,007 276 467 u e 2,013 553 212 u. Da questi dati ricavate la massa del neutrone.

- Qual è l'energia di legame per nucleone relativa all'isotopo del rutherfordio ${}^{259}\text{Rf}$? Ecco le masse atomiche coinvolte e la massa del neutrone:

${}^{259}_{104}\text{Rf}$	259,105 63 u	${}^1\text{H}$	1,007 825 u
n	1,008 665 u		

- Nella tavola periodica, al magnesio è attribuita una massa atomica media di 24,312 u. Questo valore è il risultato di una *media* delle masse atomiche degli isotopi del magnesio secondo le loro abbondanze naturali sulla Terra. I tre isotopi e le loro masse sono ${}^{24}\text{Mg}$ (23,985 04 u), ${}^{25}\text{Mg}$ (24,985 84 u), e ${}^{26}\text{Mg}$ (25,982 59 u). L'abbondanza naturale di ${}^{24}\text{Mg}$ è del 78,99% in massa (significa che il 78,99% della massa di un campione naturale di magnesio è costituito dall'isotopo ${}^{24}\text{Mg}$). Quali sono le abbondanze di (a) ${}^{25}\text{Mg}$ e (b) ${}^{26}\text{Mg}$?

- Qual è l'energia di legame per nucleone del ${}^{262}\text{Bh}$? La massa dell'atomo è 262,1231 u.

21. •• MS (a) Dimostrate che l'energia di legame complessiva E di un dato nuclide è:

$$E = Z\Delta_H + N\Delta_n - \Delta$$

ove Δ_H è l'eccesso di massa per il nuclide ^1H , Δ_n è l'eccesso di massa per il neutrone, e Δ è l'eccesso di massa per il nuclide dato. (b) Usando questo metodo, calcolate l'energia di legame per nucleone del nuclide ^{197}Au . Confrontate il risultato con il valore riportato nella **Tabella 42.1**. I valori degli eccessi di massa necessari, arrotondati a tre cifre significative, sono: $\Delta_H = +7,29$ MeV, $\Delta_n = +8,07$ MeV e $\Delta_{197} = -31,2$ MeV. Notate il risparmio di calcolo che si realizza usando gli eccessi di massa invece delle masse effettive.

22. •• Una particella alfa (nucleo di ^4He) viene smembrata secondo i passi seguenti. Fornire l'energia (il lavoro) necessario per ogni passo: (a) rimuovere un protone; (b) rimuovere un neutrone e (c) separare il protone e il neutrone rimanenti. Per una particella alfa, (d) qual è l'energia di legame totale, ed (e) la sua energia di legame per nucleone? (f) Coincidono forse con le risposte (a), (b) o (c)? Di seguito si trovano i valori occorrenti per le masse atomiche e per la massa del neutrone.

^4He	4,002 60 u	^2H	2,014 10 u
^3H	3,016 05 u	^1H	1,007 83 u
n	1,008 67 u		

23. •• MS Verificate l'energia di legame per nucleone data dalla **Tabella 42.1** per l'isotopo del plutonio ^{239}Pu . La massa dell'atomo neutro è 239,052 16 u.

24. •• Una monetina di rame ha una massa di 3,0 g. Calcolate l'energia che sarebbe richiesta per separare tutti i neutroni e i protoni presenti in questa monetina. Per semplicità ammettete che la monetina sia costituita interamente da atomi di ^{63}Cu (di massa 62,929 60 u). Le masse atomiche da usare per protone-più-elettrone e neutrone sono rispettivamente 1,007 83 u e 1,008 66 u.

Paragrafo 42.3 Decadimento radioattivo

25. • BIO Le cellule cancerose sono più vulnerabili di quelle sane alle radiazioni X o gamma. In passato la sorgente usuale per la radioterapia era costituita dal radionuclide ^{60}Co , che decade, con emivita di 5,27 a, in uno stato eccitato del ^{60}Ni . Questo stato eccitato dei nichel a sua volta subisce immediata transizione al suo stato fondamentale emettendo due fotoni gamma aventi ciascuno un'energia di circa 1,2 MeV. Quanti nuclei radioattivi di ^{60}Co sono presenti in una sorgente di 6000 Ci comunemente usata negli ospedali? (Oggi giorno per la radioterapia si impiegano di preferenza particelle ad alta energia prodotte da acceleratori lineari.)

26. • L'emivita di un isotopo radioattivo è 140 d. Quanti giorni impiegherebbe l'attività di questo radioisotopo per scendere a un quarto del suo valore iniziale?

27. • Un nucleo radioattivo ha una emivita di 30,0 a. Quale frazione di un campione inizialmente puro di questo nucleo rimarrà non-decaduto al termine di un tempo di (a) 60,0 a e di (b) 90,0 a?

28. • L'isotopo del plutonio ^{239}Pu si forma come sottoprodotto nei reattori nucleari e si accumula così nel nostro ambiente. È radioattivo, decadendo alfa con emivita $2,41 \cdot 10^4$ a. (a) Quanti nuclei di Pu costituiscono una dose chimicamente letale di 2,00 mg? (b) Qual è la frequenza di decadimento di questa quantità?

29. • MS Un isotopo radioattivo del mercurio, ^{197}Hg , decade in oro, ^{197}Au , con una costante di decadimento di $0,0108 \text{ h}^{-1}$. (a) Calcolate il tempo di dimezzamento del ^{197}Hg . Quale frazione della quantità iniziale rimarrà (b) dopo tre emivite e (c) dopo 10,0 giorni?

30. • L'emivita di un certo isotopo radioattivo è 6,5 h. Se inizialmente un campione di questo radioisotopo contiene $48 \cdot 10^{19}$ atomi, quanti ne rimangono dopo 26 ore?

31. • Si consideri un campione di 3,4 g di ^{67}Ga , un isotopo con emivita di 78 ore. (a) Qual è la sua attività iniziale? (b) Qual è il suo tasso di decadimento dopo 48 ore?

32. • Quando furono condotti i test nucleari sopra il livello del suono, le esplosioni scagliarono polvere radioattiva nella parte superiore dell'atmosfera. La circolazione globale dell'aria poi diffuse la polvere in tutto il mondo, prima di posizionarsi sul terreno e in acqua. Un test di questo genere fu condotto nell'ottobre 1976. Quale frazione di ^{90}Sr prodotto da quell'esplosione esiste ancora nell'ottobre 2006? La vita media dell'isotopo ^{90}Sr è 29 a.

33. •• BIO L'aria di alcune caverne include una componente notevole di gas radon, che può portare al cancro al polmone se respirato nell'arco di un tempo prolungato. Nelle caverne della Gran Bretagna, l'aria nella caverna con il maggior quantitativo di radon ha un'attività per volume pari a $1,55 \cdot 10^5 \text{ Bq/m}^3$. Si supponga di spendere due giorni pieni esplorando quella caverna e dormendo in essa. Approssimativamente, quanti atomi di ^{222}Rn entrerebbero e uscirebbero dai polmoni durante questi due giorni? Il radionuclide ^{222}Rn nel gas di radon ha una vita media di 3,82 giorni. È necessario stimare la propria capacità polmonare e la frequenza media di respirazione.

34. •• Calcolate la massa di un campione, inizialmente puro, di ^{40}K con una attività iniziale di decadimento di $1,70 \cdot 10^5 \text{ Bq}$. L'isotopo ha emivita di $1,28 \cdot 10^9$ a.

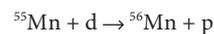
35. •• MS Un certo radionuclide viene preparato in un ciclotrone con un ritmo produttivo costante R . Esso contemporaneamente decade con una costante di decadimento λ . Supponiamo che il processo continui per un tempo lungo in confronto all'emivita del radionuclide. (a) Dimostrate che il numero di nuclei radioattivi presenti dopo questo tempo sarà costante e uguale a $N = R/\lambda$. (b) Dimostrate poi che questo risultato è valido qualunque sia il numero di nuclei radioattivi presenti all'inizio. Il nuclide si definisce in *equilibrio secolare* con la sua sorgente; in questo stato la sua frequenza di decadimento è uguale al suo ritmo di produzione.

36. •• L'isotopo del plutonio ^{239}Pu decade alfa con emivita di 24 100 a. Quanti milligrammi di elio saranno stati prodotti da un campione di 12,0 g di ^{239}Pu inizialmente puro dopo 20 000 anni? (Si consideri solo l'elio prodotto direttamente dal plutonio e non quello eventualmente generato dai suoi prodotti di decadimento.)

37. •• Il radionuclide ^{64}Cu ha un'emivita di 12,7 h. Se un campione contiene 5,50 g di ^{64}Cu inizialmente puro a $t = 0$, quanto ne decadrà durante l'intervallo compreso tra $t = 14,0$ h e $t = 16,0$ h?

38. •• BIO Una dose di 8,60 μCi di un isotopo radioattivo viene iniettata in un paziente. L'isotopo ha emivita di 3,0 h. Quanti atomi dell'isotopo genitore vengono iniettati?

39. •• Il radionuclide ^{56}Mn ha emivita di 2,58 h ed è prodotto in un ciclotrone bombardando un bersaglio di manganese con deuteroni. Questo bersaglio contiene soltanto l'isotopo stabile ^{55}Mn , e la reazione deuterio-manganese che produce ^{56}Mn è



Se il bombardamento dura molto più della vita media del ^{56}Mn , l'attività del ^{56}Mn prodotto nel bersaglio raggiunge un valore finale di $8,88 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$. (a) A quale frequenza viene prodotto il ^{56}Mn ? (b) Quanti nuclei di ^{56}Mn saranno presenti al termine del bombardamento? (c) Qual è la loro massa totale?

40. •• Una sorgente contiene due radionuclidi di fosforo, ^{32}P ($T_{1/2} = 14,3$ d) e ^{33}P ($T_{1/2} = 25,3$ d). Inizialmente il 10,0% dei decadimenti proviene da ^{33}P . Quanto tempo occorrerà attendere per vedere questa percentuale salire al 90,0%?

41. •• Un campione di 1,00 g di samario emette 120 particelle alfa al secondo. L'isotopo ^{147}Sm , la cui naturale abbondanza nel samario totale è del 15%, ne è l'unico responsabile. Calcolare l'emivita di questo isotopo.

71. • Una misura dell'energia E di un nucleo intermedio deve essere effettuata all'interno della vita media Δt del nucleo e necessariamente comporta un'incertezza ΔE secondo il principio di indeterminazione

$$\Delta E \cdot \Delta t = \hbar$$

(a) Qual è l'incertezza ΔE nell'energia per un nucleo intermedio se questo ha vita media di 10^{-22} s? (b) Il nucleo in questione è un nucleo composto?

72. • Nell'elenco di nuclidi che segue, identificate (a) quelli che hanno gusci completi di nucleoni, (b) quelli che hanno un nucleone all'esterno di un guscio completo e (c) quelli che hanno un posto vacante in un guscio che sarebbe altrimenti comple-

to. I nuclidi sono: ^{13}C , ^{18}O , ^{40}K , ^{49}Ti , ^{60}Ni , ^{91}Zr , ^{92}Mo , ^{121}Sb , ^{143}Nd , ^{144}Sm , ^{205}Tl e ^{207}Pb .

73. •• MS Considerate i tre modi di formazione illustrati nella **Figura 42.14** per il nucleo composto ^{20}Ne . Alcune delle masse degli atomi e delle particelle sono

^{20}Ne	19,992 44 u	α	4,002 60 u
^{19}F	18,998 40 u	p	1,007 83 u
^{16}O	15,994 91 u		

Quale energia deve avere (a) la particella α , (b) il protone, e (c) il fotone γ per poter conferire al nucleo composto un'energia di eccitazione di 25,0 MeV?

Problemi di riepilogo

74. In una certa roccia il rapporto tra atomi di piombo e atomi di uranio è di 0,300. Si assuma che l'uranio abbia emivita di $4,47 \cdot 10^9$ a e che alla sua formazione la roccia non contenesse piombo. Qual è l'età della roccia?

75. MS Un certo nucleo stabile, dopo avere assorbito un neutrone, emette un elettrone e poi si divide spontaneamente in due particelle alfa. Identificate il nuclide.

76. BIO Una dose tipica di radiazione da radiografia del torace è 250 μSv , provenienti da raggi X con fattore di qualità 0,85. Ammettendo che la massa del tessuto esposto sia la metà della massa del corpo del paziente, 88 kg, calcolate l'energia assorbita in joule.

77. MS Quanti anni sono necessari per ridurre l'attività del ^{14}C a un fattore 0,020 rispetto alla sua attività originale? La vita media del ^{14}C è 5730 a.

78. L'elemento radioattivo AA può decadere nell'elemento radioattivo BB o nell'elemento radioattivo CC . Il decadimento è casuale, ma il rapporto tra il numero di atomi risultanti BB rispetto al numero di atomi risultanti CC è sempre 2/1. Il decadimento ha una emivita di 8,00 giorni. Si inizia con un campione di AA puro. Quanto a lungo bisogna aspettare affinché il numero di atomi CC sia 1,50 volte il numero degli atomi AA ?

79. BIO MS Uno dei componenti più pericolosi della ricaduta radioattiva da bombe nucleari è il radioisotopo stronzio ^{90}Sr , che ha un'emivita per decadimento beta di 29 anni. Avendo proprietà chimiche molto simili a quelle del calcio, lo stronzio, se ingerito dalle mucche, si concentra nel loro latte. Una parte del ^{90}Sr finisce nelle ossa di chi beve il latte. Gli elettroni ad alta energia emessi nel decadimento vanno a ledere il midollo osseo e danneggiando la produzione dei globuli rossi. Una bomba da 1 megaton produce all'incirca 400 g di ^{90}Sr . Se la ricaduta si sparge uniformemente su un'area di 2000 km^2 , quale area verrà a ricevere una radioattività pari al massimo "tollerabile" per una persona, che è 74 000 Bq?

80. BIO A causa dell'esplosione e del fuoco nel reattore della centrale nucleare di Chernobyl nel 1986, nel nord dell'Ucraina, una parte dell'Ucraina stessa è stata contaminata con ^{137}Cs , isotopo che decade β^- beta meno con emivita di 30,2 a. Nel 1996, l'attività totale di questa contaminazione in un'area di $2,6 \cdot 10^5 \text{ km}^2$ è stata stimata pari a 10^{16} Bq. Si assuma che il ^{137}Cs sia uniformemente distribuito in quest'area e che gli elettroni provenienti dal decadimento beta viaggino sia verso l'alto che verso il basso. Quanti elettroni provenienti dal decadimento beta si intercetterebbero se ci si stendesse sul terreno in quell'area per 1 ora (a) nel 1996 e (b) oggi? (Si deve stimare l'area di sezione d'urto che intercetta questi elettroni).

81. La **Figura 42.20** mostra una parte dello schema di decadimento del ^{237}Np su un grafico del numero di massa A in funzione del numero di protoni Z ; le cinque linee che rappresentano o il decadimento α o il decadimento β^- connettono i punti asso-

ciati agli isotopi. Quale è l'isotopo alla fine dei cinque decadimenti, indicato con un punto interrogativo nella **Figura 42.20**?

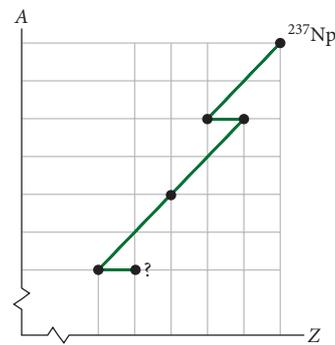


Figura 42.20 Problema 81.

82. Dopo una breve irradiazione di neutroni sull'argento, sono presenti due isotopi: ^{108}Ag ($T_{1/2} = 2,42$ min) con frequenza di decadimento iniziale di $3,1 \cdot 10^5/\text{s}$ e ^{110}Ag ($T_{1/2} = 24,6$ s) con frequenza di decadimento iniziale di $4,1 \cdot 10^6/\text{s}$. Creare un grafico semilogaritmico simile a quello della **Figura 42.9** che mostri la frequenza di decadimento totale combinata dei due isotopi in funzione del tempo da $t = 0$ fino a $t = 10$ min. Abbiamo usato la **Figura 42.9** per illustrare come si estraiga l'emivita per semplici decadimenti, nel caso di un isotopo. Dato solo il grafico della frequenza di decadimento totale per il sistema di due isotopi fornito secondo le indicazioni, si suggerisca un modo per analizzarlo al fine di determinare le vite medie dei due isotopi.

83. Dato che un nucleone è confinato entro un nucleo, possiamo ritenere che l'incertezza sulla sua posizione sia all'incirca uguale al raggio r del nucleo. Utilizzate il principio di indeterminazione per stabilire l'incertezza Δp sulla quantità di moto del nucleone. Utilizzando l'approssimazione $p \approx \Delta p$ e supposto che il nucleone non abbia velocità relativistiche, calcolate l'energia cinetica del nucleone per un nucleo con $A = 100$.

84. Una sorgente di radio contiene 1,00 mg di ^{226}Ra , che decade con emivita di 1600 a producendo ^{222}Rn , un gas nobile. Questo isotopo del radon, a sua volta, decade alfa con emivita di 3,82 d. Se questo processo continua per un tempo molto più lungo del periodo di dimezzamento del ^{222}Rn , la frequenza di decadimento del ^{222}Rn raggiunge un valore limite che eguaglia la frequenza di decadimento a cui il ^{222}Rn è generato, approssimativamente costante a causa della vita relativamente lunga del ^{226}Ra . Per una sorgente in queste condizioni limite, quali sono (a) l'attività del ^{226}Ra , (b) l'attività del ^{222}Rn e (c) la massa totale di ^{222}Rn ?

85. Preparare una carta dei nuclidi analoga a quella della **Figura 42.6** per i 25 nuclidi $^{118-122}\text{Te}$, $^{117-121}\text{Sb}$, $^{116-120}\text{Sn}$, $^{115-119}\text{In}$ e $^{114-118}\text{Cd}$. Tracciate e denominate (a) tutte le linee isobare (A costante) e (b) tutte le linee di eccesso neutronico costante, definito come $N - Z$.

Jearl Walker

Halliday - Resnick Fondamenti di fisica

Fisica moderna

Ottava edizione italiana

Inquadra
e scopri
i contenuti



Le risorse multimediali

online.universita.zanichelli.it/halliday-fm8e

A questo indirizzo sono disponibili le risorse multimediali di complemento al libro.

Per accedere alle risorse protette è necessario registrarsi su my.zanichelli.it inserendo il codice di attivazione personale contenuto nel libro.

Libro con Ebook

Chi acquista il libro nuovo può accedere gratuitamente all'Ebook, seguendo le istruzioni presenti nel sito.

L'accesso all'Ebook e alle risorse digitali protette è personale, non condivisibile e non cedibile, né autonomamente né con la cessione del libro cartaceo.

Nel 2002 l'American Physical Society ha insignito *Fondamenti di fisica* di Halliday, Resnick e Walker del titolo di miglior introduzione alla fisica generale del XX secolo, un tributo al suo impatto duraturo sulla formazione di generazioni di studenti e studentesse. *Fondamenti di fisica* si distingue per la trattazione rigorosa dei concetti di base nello stile chiaro e coinvolgente della migliore tradizione didattica americana.

Gli argomenti sono esposti in modo intuitivo, arricchiti da numerosi esempi di fisica applicata a discipline diverse e tratti dalle ricerche scientifiche più recenti. Questa combinazione rende avvincente lo studio della fisica e comprensibili anche i concetti più complessi della fisica moderna.

Ciascun paragrafo si apre con un elenco per punti delle *idee chiave*; lungo il testo sono proposte *verifiche* (con soluzione online) e *problemi svolti* passo a passo, e le regole fondanti sono messe ben in evidenza per favorire la comprensione; i capitoli si concludono con una *sintesi* degli argomenti, *domande* di revisione, *problemi* di difficoltà diversa (alcuni con applicazioni biomediche) e *problemi di riepilogo* con soluzioni online. Questa edizione si distingue per un marcato interesse verso l'applicazione della fisica al corpo umano.

Jearl Walker, che porta avanti l'aggiornamento dell'opera, ha analizzato infatti migliaia di articoli di ricerca per illustrare come la fisica abbia a che fare direttamente con la nostra salute. L'autore esamina, tra gli altri, argomenti come la misura delle dosi di radiazioni usate nella terapia del cancro, le questioni relative alla radioprotezione, gli effetti sugli organismi viventi degli incidenti nucleari.

Una raccolta di domande interattive a scelta multipla, scritte appositamente per l'ottava edizione italiana, è disponibile online.

David Halliday (1916-2010) e **Robert Resnick** (1923-2014) sono stati due fisici americani che hanno rivoluzionato, con i loro libri, l'insegnamento della Fisica.

Professori e autori, sono noti soprattutto per i libri di testo *Physics* e *Fundamentals of Physics*, tradotti in più di 47 lingue ed entrambi presenti nel catalogo CEA (Halliday, Resnick, Krane *Fisica* quinta edizione, 2003; e Halliday, Resnick, Walker *Fondamenti di fisica* ottava edizione, 2023).

Jearl Walker è professore di Fisica alla Cleveland State University e divulgatore scientifico. È autore anche di *The Flying Circus of Physics* che risponde a 740 domande sulla fisica nella vita di tutti i giorni.

HALLIDAY*FOND.FISICA MOD 8ED(CEALUMKQ

ISBN 978-88-08-72675-9



9 788808 726759

5 6 7 8 9 0 1 2 3 (64D)