Peter Atkins
Loretta Jones
Leroy Laverman

Principi di chimica

Quarta edizione italiana condotta sulla settima edizione americana

CHIMICA ZANICHELLI

Indice generale

Prefazione IX
Tavola periodica XVI

FONDAMENTI

- Introduzione e orientamento F1
- La chimica e la società F1
- La chimica: una scienza a tre livelli F2
- Come si fa scienza F2
- Le branche della chimica F4
- Padroneggiare la chimica F4

A Materia ed energia F5
A.1 Simboli e unità F6
A.2 Accuratezza e precisione F9
A.3 La forza F10
A.4 L'energia F11
Esercizi F15

B Elementi e atomi F16
B.1 Gli atomi F17
B.2 Il modello nucleare F18
B.3 Gli isotopi F19
B.4 L'organizzazione degli elementi F21
Esercizi F23

C I composti F24
C.1 Che cosa sono i composti? F24
C.2 Le molecole e i composti molecolari F25
C.3 Gli ioni e i composti ionici F26
Esercizi F30

D La nomenclatura dei composti F32
D.1 La denominazione dei cationi F32
D.2 La denominazione degli anioni F32
D.3 La denominazione dei composti ionici F33
IN PRATICA... D.1 Come denominare i composti ionici F34
D.4 La denominazione dei composti molecolari inorganici F35
IN PRATICA... D.2 Come denominare i composti molecolari inorganici semplici F36
D.5 Il nome di alcuni composti organici comuni F38
Esercizi F40

E Mole e massa molare F41
E.1 La mole F41
E.2 La massa molare F43
Fondamenti E Esercizi F49

F La determinazione della formula chimica F51
F.1 La composizione percentuale in massa F51
F.2 La determinazione della formula empirica F52
F.3 La determinazione della formula molecolare F54
Esercizi F55

G Miscugli e soluzioni F57
G.1 La classificazione dei miscugli F57
G.2 Le tecniche di separazione F58
G.3 La concentrazione F59
G.4 La diluizione F62
IN PRATICA... G.1 Come calcolare il volume di soluzione madre necessario per realizzare una determinata diluizione F62
Esercizi F64

H Le equazioni chimiche F66
H.1 I simboli nelle reazioni chimiche F66
H.2 Il bilanciamento delle equazioni chimiche F68
Esercizi F70

I Le reazioni di precipitazione F72
I.1 Gli elettroliti F72
I.2 I precipitati F74
I.3 Equazioni ioniche ed equazioni ioniche nette F74
I.4 Mettiamo all'opera la precipitazione F76
Esercizi F77

J Acidi e basi F79
J.1 Gli acidi e le basi in soluzione acquosa F80
J.2 Acidi e basi forti e deboli F81
J.3 La neutralizzazione F83
Esercizi F84

K Le reazioni redox F86
K.1 L'ossidazione e la riduzione F86
K.2 I numeri di ossidazione F87
IN PRATICA... K.1 Come assegnare il numero di ossidazione F88
K.3 Agenti ossidanti e riducenti F90
K.4 Il bilanciamento delle equazioni redox semplici F92
Esercizi F93

L La stechiometria delle reazioni F95
L.1 La previsione da mole a mole F95
L.2 La previsione da massa a massa F96
IN PRATICA... L.1 Come effettuare i calcoli da massa a massa F96
L.3 L'analisi volumetrica F98
IN PRATICA... L.2 Come interpretare una titolazione F99
Esercizi F102

M I reagenti limitanti F105
M.1 La resa delle reazioni F105
M.2 I limiti di una reazione F107
IN PRATICA... M.1 Come identificare il reagente limitante F107
M.3 L'analisi per combustione F111
Esercizi F114

FOCUS 1 Gli atomi 1

CAPITOLO 1A L'osservazione degli atomi
1A.1 Il modello nucleare dell'atomo 2
1A.2 La radiazione elettromagnetica 4
1A.3 Gli spettri atomici 6
Esercizi 9

CAPITOLO 1B La teoria quantistica
1B.1 Radiazione, quanti e fotoni 11
1B.2 Il dualismo onda-particella della materia 17
1B.3 Il principio di indeterminazione 19
Esercizi 22

CAPITOLO 1C Funzioni d'onda e livelli energetici
1C.1 La funzione d'onda e la sua interpretazione 24
1C.2 La quantizzazione dell'energia 25
SCHEDA 1C.1 I nanocristalli 27
Esercizi 30

CAPITOLO 1D L'atomo di idrogeno
1D.1 I livelli energetici 31
1D.2 Gli orbitali atomici 32
1D.3 Numeri quantici, gusci e sottogusci 34
1D.4 La forma degli orbitali 36
1D.5 Lo spin elettronico 40
1D.6 La struttura elettronica dell'idrogeno 40
SCHEDA 1D.1 Come facciamo a sapere... che l'elettrone possiede uno spin? 41
Esercizi 42

CAPITOLO 1E **Gli atomi multielettronici**
1E.1 L'energia degli orbitali 44
1E.2 Il principio di Aufbau 46
IN PRATICA... 1E.1 Come prevedere la configurazione elettronica dello stato fondamentale degli atomi 50
Esercizi 51

CAPITOLO 1F **La periodicità**
1F.1 La struttura generale della tavola periodica 53
1F.2 Il raggio atomico 55
1F.3 Il raggio ionico 57
1F.4 L'energia di ionizzazione 59
1F.5 L'affinità elettronica 61
1F.6 L'effetto della coppia inerte 63
1F.7 Le relazioni diagonali 63
1F.8 Le proprietà generali degli elementi 63
Esercizi 66
FOCUS 1 Esempio integrato online 67
FOCUS 1 Esercizi 67

FOCUS 2 **Le molecole** 71

CAPITOLO 2A **I legami ionici**
2A.1 Gli ioni formati dagli elementi 72
2A.2 I simboli di Lewis 74
2A.3 Aspetti energetici della formazione dei legami ionici 75
2A.4 Le interazioni tra ioni 76
Esercizi 80

CAPITOLO 2B **I legami covalenti**
2B.1 Le strutture di Lewis 82
IN PRATICA... 2B.1 Come scrivere la struttura di Lewis delle specie poliatomiche 84
2B.2 La risonanza 87
2B.3 La carica formale 90
IN PRATICA... 2B.2 Come utilizzare la carica formale per stabilire qual è la struttura di Lewis più probabile 90
Esercizi 92

CAPITOLO 2C **Le eccezioni alla regola dell'ottetto**
2C.1 Radicali e biradicali 94
SCHEDA 2C.1 Che cosa ha a che fare questo con... la sopravvivenza? L'autoconservazione chimica 95
2C.2 I gusci di valenza espansi 95
2C.3 Ottetti incompleti 98
Esercizi 99

CAPITOLO 2D **Le proprietà dei legami**
2D.1 Correggiamo il modello covalente: l'elettronegatività 101
2D.2 Correggiamo il modello ionico: la polarizzabilità 103
2D.3 La forza dei legami 104
2D.4 La lunghezza dei legami 106
Esercizi 108

CAPITOLO 2E **Il modello VSEPR**
2E.1 Il modello VSEPR elementare 110
SCHEDA 2E.1 Le frontiere della chimica I farmaci scoperti e i farmaci progettati 111
2E.2 Molecole che presentano coppie solitarie sull'atomo centrale 115
IN PRATICA... 2E.1 Come applicare il modello VSEPR 118
2E.3 Le molecole polari 120
Esercizi 123

CAPITOLO 2F **La teoria del legame di valenza**
2F.1 I legami sigma e pi greco 125
2F.2 La promozione elettronica e l'ibridizzazione degli orbitali 127
2F.3 Altri tipi di ibridizzazioni comuni 129
2F.4 Le caratteristiche dei legami multipli 132
Esercizi 135

CAPITOLO 2G **La teoria degli orbitali molecolari**
2G.1 Gli orbitali molecolari 137
2G.2 La configurazione elettronica delle molecole biatomiche 138
SCHEDA 2G.1 Come facciamo a sapere... qual è l'energia degli orbitali molecolari? 140
IN PRATICA... 2G.1 Come determinare la configurazione elettronica e l'ordine di legame di una specie biatomica omonucleare 141
SCHEDA 2G.2 Come facciamo a sapere... che gli elettroni non sono appaiati? 143
2G.3 Il legame nelle molecole biatomiche eteronucleari 144
2G.4 Gli orbitali nelle molecole poliatomiche 146
Esercizi 148
FOCUS 2 Esempio integrato online 149
FOCUS 2 Esercizi 149

FOCUS 3 **Gli stati della materia** 155

CAPITOLO 3A **La natura dei gas** 157
3A.1 L'osservazione dei gas 157
3A.2 La pressione 158
3A.3 Le unità di misura alternative della pressione 160
Esercizi 161

CAPITOLO 3B **Le leggi dei gas**
3B.1 Le osservazioni sperimentali 163
3B.2 Le applicazioni della legge dei gas ideali 166
3B.3 Il volume molare e la densità dei gas 169
Esercizi 171

CAPITOLO 3C **Miscugli gassosi e reazioni**
3C.1 I miscugli gassosi 174
3C.2 La stechiometria delle reazioni tra gas 177
Esercizi 180

CAPITOLO 3D **Il moto molecolare**
3D.1 Diffusione ed effusione 182
3D.2 Il modello cinetico dei gas 184
3D.3 La distribuzione di Maxwell delle velocità 188
SCHEDA 3D.1 Come facciamo a sapere... qual è la distribuzione delle velocità molecolari? 188
Esercizi 190

CAPITOLO 3E **I gas reali**
3E.1 Le deviazioni dal comportamento ideale 192
3E.2 Le equazioni di stato dei gas reali 193
3E.3 La liquefazione dei gas 195
Esercizi 197

CAPITOLO 3F **Le forze intermolecolari**
3F.1 Le origini delle forze intermolecolari 198
3F.2 Le forze ione-dipolo 199
3F.3 Le forze dipolo-dipolo 200
3F.4 Le forze di London 202
3F.5 Il legame a idrogeno 205
3F.6 Le repulsioni 206
Esercizi 207

CAPITOLO 3G **La struttura dei liquidi**
3G.1 L'ordine nei liquidi 209
3G.2 Viscosità e tensione superficiale 209
3G.3 I cristalli liquidi 211
3G.4 I liquidi ionici 213
Esercizi 214

CAPITOLO 3H I solidi
3H.1 La classificazione dei solidi 215
SCHEDA 3H.1 Come facciamo a sapere… qual è l'aspetto di una superficie? 216
3H.2 I solidi molecolari 218
3H.3 I solidi reticolari 218
3H.4 I solidi metallici 220
3H.5 Le celle elementari 223
3H.6 I solidi ionici 227
Esercizi 230

CAPITOLO 3I I materiali inorganici
3I.1 Le leghe 233
3I.2 I silicati 235
3I.3 Il carbonato di calcio 236
3I.4 Il cemento e il calcestruzzo 237
Esercizi 239

CAPITOLO 3J I materiali per le nuove tecnologie
3J.1 La conduzione dell'elettricità nei solidi 240
3J.2 I semiconduttori 242
3J.3 I superconduttori 243
3J.4 I materiali luminescenti 244
3J.5 I materiali magnetici 245
3J.6 I nanomateriali 246
3J.7 I nanotubi 247
Esercizi 249
FOCUS 3 Esempio integrato online 250
FOCUS 3 Esercizi 250
INTERLUDIO Le ceramiche e i vetri 257

FOCUS 4 La termodinamica 259

CAPITOLO 4A Lavoro e calore
4A.1 I sistemi e l'ambiente 261
4A.2 Il lavoro 262
4A.3 Il lavoro di espansione 263
4A.4 Il calore 268
4A.5 La misura del calore 269
Esercizi 274

CAPITOLO 4B L'energia interna
4B.1 La prima legge 275
4B.2 Le funzioni di stato 276
4B.3 Interludio molecolare 279
Esercizi 281

CAPITOLO 4C L'entalpia
4C.1 Il trasferimento del calore a pressione costante 283
4C.2 La capacità termica a volume o a pressione costante 284
4C.3 L'origine molecolare della capacità termica dei gas 285
4C.4 L'entalpia dei cambiamenti fisici 288
4C.5 Le curve di riscaldamento 290
SCHEDA 4C.1 Come facciamo a sapere… la forma della curva di riscaldamento? 290
Esercizi 293

CAPITOLO 4D La termochimica
4D.1 L'entalpia di reazione 294
4D.2 La relazione tra ΔH e ΔU 295
4D.3 L'entalpia standard di reazione 297
SCHEDA 4D.1 Che cosa ha a che fare questo con… l'ambiente I combustibili alternativi 298
4D.4 La combinazione delle entalpie di reazione: la legge di Hess 301
IN PRATICA… 4D.1 Come utilizzare la legge di Hess 302
4D.5 L'entalpia standard di formazione 303
4D.6 La variazione dell'entalpia di reazione con la temperatura 307
Esercizi 309

CAPITOLO 4E I diversi contributi all'entalpia
4E.1 La formazione degli ioni 311
4E.2 Il ciclo di Born-Haber 311
4E.3 L'entalpia di legame 313
Esercizi 316

CAPITOLO 4F L'entropia
4F.1 Le trasformazioni spontanee 317
4F.2 Entropia e disordine 318
4F.3 Entropia e volume 319
4F.4 Entropia e temperatura 321
4F.5 Entropia e stato fisico 324
Esercizi 328

CAPITOLO 4G L'interpretazione molecolare dell'entropia
4G.1 La formula di Boltzmann 330
4G.2 L'equivalenza tra entropia statistica ed entropia termodinamica 333
Esercizi 335

CAPITOLO 4H Le entropie assolute
4H.1 L'entropia standard molare 336
SCHEDA 4H.1 Le frontiere della chimica La ricerca dello zero assoluto 337
4H.2 L'entropia standard di reazione 340
Esercizi 341

CAPITOLO 4I I cambiamenti di entropia globali
4I.1 L'ambiente 343
4I.2 La variazione complessiva dell'entropia 345
4I.3 L'equilibrio 349
Esercizi 350

CAPITOLO 4J L'energia libera di Gibbs
4J.1 Concentriamoci sul sistema 352
4J.2 L'energia libera di reazione 355
4J.3 L'energia libera e il lavoro non espansivo 358
4J.4 L'effetto della temperatura 360
Esercizi 362
FOCUS 4 Esempio integrato online 364
FOCUS 4 Esercizi 364
INTERLUDIO Energia libera e vita 370

FOCUS 5 L'equilibrio 371

CAPITOLO 5A La pressione di vapore
5A.1 L'origine della pressione di vapore 373
5A.2 Volatilità e forze intermolecolari 374
5A.3 La variazione della pressione di vapore con la temperatura 375
5A.4 L'ebollizione 378
Esercizi 380

CAPITOLO 5B Gli equilibri di fase nei sistemi a un solo componente
5B.1 I diagrammi di stato a un solo componente 381
5B.2 Le proprietà critiche 385
Esercizi 386

CAPITOLO 5C Gli equilibri di fase nei sistemi a due componenti
5C.1 La pressione di vapore dei miscugli 388
5C.2 I miscugli liquidi binari 391
5C.3 La distillazione 393

5C.4 Gli azeotropi 394
Esercizi 396

CAPITOLO 5D La solubilità
5D.1 I limiti della solubilità 398
5D.2 La regola del «simile scioglie simile» 399
5D.3 Pressione e solubilità dei gas 401
5D.4 La temperatura e la solubilità 402
5D.5 La termodinamica della dissoluzione 402
5D.6 I colloidi 405
Esercizi 407

CAPITOLO 5E La molalità
IN PRATICA... 5E.1 Come si utilizza la molalità 410
Esercizi 413

CAPITOLO 5F Le proprietà colligative
5F.1 Innalzamento ebullioscopico e abbassamento crioscopico 414
5F.2 L'osmosi 416
SCHEDA 5F.1 Le frontiere della chimica
La somministrazione guidata dei farmaci 418
IN PRATICA... 5F.1 Come impiegare le proprietà colligative per la determinazione della massa molare 420
Esercizi 423

CAPITOLO 5G L'equilibrio chimico
5G.1 La reversibilità delle reazioni 424
5G.2 L'equilibrio e la legge dell'azione di massa 426
5G.3 L'origine delle costanti di equilibrio 429
5G.4 La descrizione termodinamica dell'equilibrio 431
Esercizi 435

CAPITOLO 5H Forme alternative della costante di equilibrio
5H.1 Multipli dell'equazione chimica 437
5H.2 Equazioni composite 438
5H.3 La costante di equilibrio in funzione della concentrazione molare dei gas 438
Esercizi 441

CAPITOLO 5I Calcoli relativi agli equilibri
5I.1 Il grado di avanzamento della reazione 442
5I.2 Il verso di svolgimento della reazione 443
5I.3 Calcoli con le costanti di equilibrio 445
IN PRATICA... 5I.1 Come costruire e utilizzare una tabella di equilibrio 446
Esercizi 450

CAPITOLO 5J La risposta dei sistemi all'equilibrio alla variazione delle condizioni
5J.1 L'aggiunta e la sottrazione di reagenti 453
5J.2 La compressione della miscela di reazione 457
5J.3 La temperatura e l'equilibrio 458
Esercizi 462
FOCUS 5 Esempio integrato online 464
FOCUS 5 Esercizi 464
INTERLUDIO L'omeostasi 470

FOCUS 6 Le reazioni 471

CAPITOLO 6A La natura degli acidi e delle basi
6A.1 Gli acidi e le basi di Brønsted-Lowry 473
6A.2 Gli acidi e le basi di Lewis 476
6A.3 Ossidi acidi, basici e anfoteri 478
6A.4 Lo scambio di protoni tra molecole di acqua 479
Esercizi 482

CAPITOLO 6B La scala del pH
6B.1 L'interpretazione del pH 484
6B.2 Il pOH delle soluzioni 486
Esercizi 488

CAPITOLO 6C Gli acidi e le basi deboli
6C.1 Le costanti di acidità e di basicità 489
6C.2 L'altalena coniugata 492
6C.3 La struttura molecolare e la forza acida 494
6C.4 La forza degli ossiacidi e degli acidi carbossilici 496
Esercizi 499

CAPITOLO 6D Il pH delle soluzioni acquose
6D.1 Le soluzioni di acidi deboli 501
IN PRATICA... 6D.1 Come calcolare il pH della soluzione di un acido debole 502
6D.2 Le soluzioni di basi deboli 504
IN PRATICA... 6D.2 Come calcolare il pH della soluzione di una base debole 505
6D.3 Il pH di soluzioni saline 506
Esercizi 511

CAPITOLO 6E Gli acidi e le basi poliprotici
6E.1 Il pH di una soluzione di acido poliprotico 513
6E.2 Le soluzioni di sali degli acidi poliprotici 514
6E.3 La concentrazione delle specie solute 516
IN PRATICA... 6E.1 Come calcolare la concentrazione di tutte le specie nella soluzione di un acido poliprotico 516
6E.4 La composizione e il pH 519
SCHEDA 6E.1 Che cosa ha a che fare questo con... l'ambiente? Le piogge acide e il patrimonio genetico 520
Esercizi 523

CAPITOLO 6F L'autoprotolisi e il pH
6F.1 Le soluzioni molto diluite di acidi e di basi forti 524
6F.2 Le soluzioni molto diluite di acidi deboli 526
Esercizi 528

CAPITOLO 6G I tamponi
6G.1 L'azione tampone 530
6G.2 La costruzione di un tampone 531
6G.3 La capacità tamponante 537
SCHEDA 6G.1 Che cosa ha a che fare questo con... la sopravvivenza? I tamponi fisiologici 538
Esercizi 539

CAPITOLO 6H Le titolazioni acido-base
6H.1 Le titolazioni acido forte-base forte 541
IN PRATICA... 6H.1 Come calcolare il pH durante la titolazione acido forte-base forte 542
6H.2 Le titolazioni acido forte-base debole e acido debole-base forte 544
IN PRATICA... 6H.2 Come calcolare il pH durante la titolazione di un acido debole o di una base debole 547
6H.3 Gli indicatori acido-base 549
6H.4 La stechiometria delle titolazioni degli acidi poliprotici 551
Esercizi 554

CAPITOLO 6I Gli equilibri di solubilità
6I.1 Il prodotto di solubilità 557
6I.2 L'effetto dello ione in comune 559
6I.3 La formazione di ioni complessi 561
Esercizi 563

CAPITOLO 6J La precipitazione
6J.1 Prevedere la precipitazione 564
6J.2 La precipitazione selettiva 565
6J.3 La dissoluzione dei precipitati 567
6J.4 L'analisi qualitativa 568
Esercizi 570

CAPITOLO 6K La rappresentazione delle reazioni redox
6K.1 Le semireazioni 571
6K.2 Il bilanciamento delle equazioni redox 572
IN PRATICA... 6K.1 Come bilanciare le equazioni redox complicate 572
Esercizi 578

CAPITOLO 6L Le celle galvaniche
6L.1 La struttura delle celle galvaniche 579
6L.2 Il potenziale di cella e l'energia libera di reazione 581
6L.3 La notazione delle celle 584
IN PRATICA... 6L.1 Come formulare la reazione di cella corrispondente a un certo diagramma di cella 586
Esercizi 588

CAPITOLO 6M I potenziali standard
6M.1 La definizione di potenziale standard 589
6M.2 La serie elettrochimica 594
Esercizi 595

CAPITOLO 6N Le applicazioni dei potenziali standard
6N.1 I potenziali standard e le costanti di equilibrio 596
IN PRATICA... 6N.1 Come calcolare le costanti di equilibrio dai dati elettrochimici 596
6N.2 L'equazione di Nernst 598
6N.3 Gli elettrodi ione-selettivi 601
6N.4 La corrosione 602
Esercizi 605

CAPITOLO 6O L'elettrolisi 607
6O.1 Le celle elettrolitiche 607
6O.2 I prodotti dell'elettrolisi 609
IN PRATICA... 6O.1 Come prevedere il risultato dell'elettrolisi 610
6O.3 Le applicazioni dell'elettrolisi 612
Esercizi 613
FOCUS 6 Esempio integrato online 614
FOCUS 6 Esercizi 614
INTERLUDIO Le celle di impiego pratico 620

FOCUS 7 La cinetica 623

CAPITOLO 7A La velocità di reazione
7A.1 La concentrazione e la velocità di reazione 625
SCHEDA 7A.1 Come facciamo a sapere... che cosa accade agli atomi durante la reazione? 628
7A.2 La velocità istantanea di reazione 628
7A.3 Le leggi cinetiche e l'ordine di reazione 629
Esercizi 635

CAPITOLO 7B Le leggi cinetiche integrate
7B.1 Le leggi cinetiche integrate del primo ordine 638
7B.2 Il tempo di dimezzamento delle reazioni del primo ordine 642
7B.3 Le leggi cinetiche integrate del secondo ordine 645
Esercizi 647

CAPITOLO 7C I meccanismi di reazione
7C.1 Le reazioni elementari 649
7C.2 Le leggi cinetiche delle reazioni elementari 650
7C.3 Combinare le leggi cinetiche elementari 652
7C.4 Velocità ed equilibrio 655
7C.5 Le reazioni a catena 656
Esercizi 658

CAPITOLO 7D I modelli di reazione
7D.1 L'effetto della temperatura 660
7D.2 La teoria degli urti 663
SCHEDA 7D.1 Come facciamo a sapere... che cosa succede durante l'urto tra le molecole? 666
7D.3 La teoria dello stato di transizione 667
Esercizi 669

CAPITOLO 7E La catalisi 670
7E.1 Come funzionano i catalizzatori 670
SCHEDA 7E.1 Che cosa ha a che fare questo con... l'ambiente La protezione dello strato di ozono 671
7E.2 I catalizzatori industriali 674
7E.3 I catalizzatori viventi: gli enzimi 675
Esercizi 677
FOCUS 7 Esempio integrato online 679
FOCUS 7 Esercizi 679

FOCUS 8 Gli elementi dei gruppi principali 683

CAPITOLO 8A Il carattere periodico
8A.1 Le proprietà atomiche 685
8A.2 L'andamento di legame 686
8A.3 L'andamento di idruri e ossidi 687
Esercizi 689

CAPITOLO 8B L'idrogeno
8B.1 L'elemento 690
SCHEDA 8B.1 Che cosa ha a che fare questo con... l'ambiente L'effetto serra 691
8B.2 I composti dell'idrogeno 693
Esercizi 694

CAPITOLO 8C Il gruppo 1: i metalli alcalini
8C.1 Gli elementi del gruppo 1 695
8C.2 I composti di litio, sodio e potassio 697
Esercizi 699

CAPITOLO 8D Il gruppo 2: i metalli alcalino-terrosi
8D.1 Gli elementi del gruppo 2 700
8D.2 I composti di berillio, magnesio e calcio 702
Esercizi 704

CAPITOLO 8E Il gruppo 13: la famiglia del boro
8E.1 Gli elementi del gruppo 13 705
8E.2 Ossidi, alogenuri e nitruri del gruppo 13 707
8E.3 Borani, boroidruri e boruri 709
Esercizi 710

CAPITOLO 8F Il gruppo 14: la famiglia del carbonio
8F.1 Gli elementi del gruppo 14 711
SCHEDA 8F.1 Le frontiere della chimica I materiali autoassemblanti 713
8F.2 Ossidi del carbonio e del silicio 715
8F.3 Altri importanti composti del gruppo 14 717
Esercizi 718

CAPITOLO 8G Il gruppo 15: la famiglia dell'azoto
8G.1 Gli elementi del gruppo 15 719
8G.2 Composti con l'idrogeno e gli alogeni 721
8G.3 Ossidi e ossiacidi dell'azoto 723
8G.4 Ossidi e ossiacidi del fosforo 725
Esercizi 726

CAPITOLO 8H Il gruppo 16: la famiglia dell'ossigeno
8H.1 Gli elementi del gruppo 16 728
8H.2 I composti con l'idrogeno 731
8H.3 Ossidi e ossiacidi dello zolfo 733
Esercizi 735

CAPITOLO 8I Il gruppo 17: gli alogeni
8I.1 Gli elementi del gruppo 17 737
8I.2 I composti degli alogeni 739
Esercizi 742
CAPITOLO 8J Il gruppo 18: i gas nobili
8J.1 Gli elementi del gruppo 18 743
8J.2 I composti dei gas nobili 744
Esercizi 745
FOCUS 8 Esempio integrato online 746
FOCUS 8 Esercizi 746

FOCUS 9 Gli elementi del blocco *d* 749
CAPITOLO 9A Andamenti periodici degli elementi del blocco *d*
9A.1 L'andamento delle proprietà fisiche 750
9A.2 L'andamento delle proprietà chimiche 752
Esercizi 754
CAPITOLO 9B Alcuni elementi del blocco *d* in rassegna
9B.1 Dallo scandio al nichel 755
9B.2 I gruppi 11 e 12 761
Esercizi 764
CAPITOLO 9C I composti di coordinazione
SCHEDA 9C.1 Che cosa ha a che fare questo con… la sopravvivenza? Perché dobbiamo mangiare i metalli del blocco *d*? 765
9C.1 I complessi di coordinazione 766
IN PRATICA… 9C.1 La nomenclatura dei complessi dei metalli del blocco *d* e dei composti di coordinazione 768
9C.2 La forma dei complessi 770
9C.3 Gli isomeri 772
SCHEDA 9C.2 Come facciamo a sapere… se una sostanza è otticamente attiva? 774
Esercizi 776
CAPITOLO 9D La struttura elettronica dei complessi dei metalli del blocco *d*
9D.1 La teoria del campo cristallino 778
9D.2 La serie spettrochimica 780
9D.3 Il colore dei complessi 783
9D.4 Le proprietà magnetiche dei complessi 785
9D.5 La teoria del campo dei ligandi 787
Esercizi 789
FOCUS 9 Esempio integrato online 791
FOCUS 9 Esercizi 791

FOCUS 10 La chimica nucleare 795
CAPITOLO 10A Il decadimento radioattivo
10A.1 Le prove del decadimento radioattivo spontaneo 796
10A.2 Le reazioni nucleari 798
10A.3 L'andamento della stabilità nucleare 800
10A.4 La previsione del tipo di decadimento nucleare 802
10A.5 La nucleosintesi 803
SCHEDA 10A.1 Che cosa ha a che fare questo con… la sopravvivenza La medicina nucleare 804
Esercizi 806
CAPITOLO 10B La radioattività
10B.1 Gli effetti biologici della radiazione 808
10B.2 La misura della velocità del decadimento nucleare 809
SCHEDA 10B.1 Come facciamo a sapere… quando è radioattivo un materiale? 810
10B.3 Gli impieghi dei radioisotopi 813
Esercizi 814
CAPITOLO 10C L'energia nucleare
10C.1 Le trasformazioni massa-energia 816
10C.2 La produzione dell'energia nucleare 818
10C.3 La chimica dell'energia nucleare 821
Esercizi 822
FOCUS 10 Esempio integrato online 823
FOCUS 10 Esercizi 823

FOCUS 11 La chimica organica 825
CAPITOLO 11A Le strutture degli idrocarburi alifatici
11A.1 I tipi di idrocarburi alifatici 826
IN PRATICA… 11A.1 La nomenclatura degli idrocarburi alifatici 828
11A.2 Gli isomeri 831
11A.3 Le proprietà fisiche degli alcani e degli alcheni 835
Esercizi 836
CAPITOLO 11B Le reazioni degli idrocarburi alifatici
11B.1 Le reazioni di sostituzione degli alcani 838
11B.2 Sintesi degli alcani e degli alcheni 839
11B.3 L'addizione elettrofila 839
Esercizi 841
CAPITOLO 11C Gli idrocarburi aromatici
11C.1 La nomenclatura 842
11C.2 La sostituzione elettrofila 843
Esercizi 846
CAPITOLO 11D I gruppi funzionali comuni
11D.1 Gli aloalcani 848
11D.2 Gli alcoli 849
11D.3 Gli eteri 850
11D.4 I fenoli 850
11D.5 Le aldeidi e i chetoni 851
11D.6 Gli acidi carbossilici 852
11D.7 Gli esteri 852
11D.8 Le ammine, gli amminoacidi e le ammidi 853
IN PRATICA… 11D.1 Come denominare i composti semplici in possesso di gruppi funzionali 855
Esercizi 857
CAPITOLO 11E Polimeri e macromolecole biologiche
11E.1 La polimerizzazione per addizione 859
11E.2 La polimerizzazione per condensazione 861
11E.3 I copolimeri e i materiali compositi 864
11E.4 Le proprietà fisiche dei polimeri 865
SCHEDA 11E.1 Le frontiere della chimica I polimeri conduttori 867
11E.5 Le proteine 868
11E.6 I carboidrati 871
11E.7 Gli acidi nucleici 872
Esercizi 874
FOCUS 11 Esempio integrato online 876
FOCUS 11 Esercizi 876
INTERLUDIO I combustibili 881

Indice analitico 882
Il prefissi SI 892
Costanti fondamentali 892
Relazioni tra unità 892

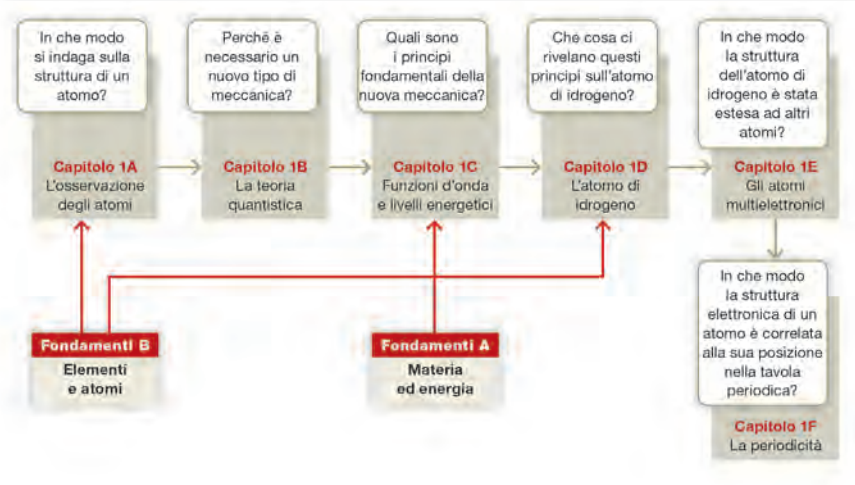
Prefazione

L'obiettivo principale di questo libro è stimolare gli studenti a pensare in maniera critica e a porsi delle domande, fornendo al tempo stesso una solida conoscenza e una profonda comprensione dei principi della chimica. Pensiamo che gli strumenti offerti per imparare a ragionare, a porsi domande e ad affrontare i problemi possano essere utili agli studenti di qualsiasi livello. Nel testo mostriamo come si fa a costruire un modello teorico, a perfezionarlo sulla base dei risultati sperimentali e a esprimerlo quantitativamente. Pertanto, la quarta edizione italiana di *Principi di chimica* mira a fornire una solida conoscenza della disciplina, offrendo, nel contempo, un'ampia gamma di strumenti didattici.

• Una nuova organizzazione generale

In questa edizione abbiamo introdotto una nuova organizzazione del testo. I contenuti sono suddivisi in 85 *Capitoli* raggruppati in 11 temi chiamati *Focus*. In questo modo ci proponiamo un duplice obiettivo: fornire flessibilità e facilità di fruizione sia allo studente sia al docente. Alcuni docenti potrebbero voler organizzare il corso in modo diverso da quello in cui è strutturato il libro. Sebbene il contenuto segua un approccio che inizia dagli atomi, la divisione in capitoli permette al docente sia di adattare il testo alla durata del corso, escludendo determinati capitoli, sia di scegliere il percorso più appropriato per raggiungere obiettivi di insegnamento e apprendimento personalizzati. Abbiamo accuratamente evitato di usare un linguaggio che inducesse a seguire lo stesso ordine di lettura con cui i capitoli sono disposti nel libro. Inoltre, per lo studente dovrebbe essere semplice studiare e ripassare i capitoli, visto che ognuno di essi è diviso in brevi paragrafi. Dato che i *Focus* sono riferiti a grandi temi e possono pertanto avere un'estensione molto diversa, nella stesura dei programmi da parte dei docenti si suggerisce di riferirsi ai singoli *Capitoli* piuttosto che ai *Focus*.

Ogni *Focus* inizia con una breve presentazione dell'argomento principale e del contenuto dei vari capitoli, evidenziando il filo conduttore che li unisce. Questa relazione è visualizzata da una **mappa concettuale** in apertura di ogni *Focus*. In tal modo abbiamo cercato di trasmettere la struttura concettuale dell'argomento, lasciando al tempo stesso libertà nella scelta dell'ordine di presentazione dei singoli concetti.



Il nostro obiettivo di fondo è quello di aiutare gli studenti a padroneggiare il contenuto del corso. Perciò, ogni *Capitolo* si apre con due domande frequenti tra gli studenti: **Perché dobbiamo conoscere queste cose?** e **Che cosa dobbiamo già sapere?** La risposta alla seconda domanda indica gli argomenti che pensiamo debbano essere studiati prima di affrontare il capitolo in questione. Abbiamo seguito i consigli dei nostri revisori, basati sulla loro esperienza, assicurandoci che la nuova organizzazione fosse in grado di guidare e supportare do-

• Perché dobbiamo conoscere queste cose? Il legame ionico è uno dei tipi principali di legame tra gli atomi. La comprensione del modo in cui si formano i legami tra ioni permette di prevedere le formule dei composti ionici e di determinare la forza dei legami tra ioni.

• Che cosa dobbiamo già sapere? In questo capitolo presupponiamo che si conoscano già la configurazione degli atomi multielettronici (Capitolo 1E), il concetto di energia potenziale e la natura dell'interazione elettrostatica (coulombiana) tra cariche (*Fondamenti* A). Ci devono essere familiari il raggio ionico, l'energia di ionizzazione e l'affinità elettronica degli elementi (Capitolo 1F).

COME SI SPIEGA?

...utilizzando la cinetica

L'interpretazione cinetica dell'equilibrio è basata su un confronto tra due velocità in competizione tra loro: in questo caso, tra le velocità di evaporazione e di condensazione. Quando le molecole lasciano la superficie del liquido per mezzo dell'evaporazione, si forma il vapore. Tuttavia, a mano a mano che il numero delle molecole di vapore aumenta, un maggior numero di esse è disponibile per condensare, e cioè colpire la superficie del liquido, aderire a essa e diventare nuovamente parte del liquido. Alla fine, il tasso di molecole che ritornano nel liquido è uguale al tasso di molecole che ne sfuggono (Figura 5A.2). Il vapore ora sta condensando alla stessa velocità a cui il liquido sta evaporando e quindi l'equilibrio è *dinamico*, nel senso che avvengono entrambi i processi, diretto e inverso, e ora le loro velocità sono uguali. L'**equilibrio dinamico** tra acqua liquida e vapor d'acqua si denota

$$H_2O(l) \rightleftharpoons H_2O(g)$$

...utilizzando la termodinamica

Nell'*interpretazione termodinamica* dell'equilibrio, le fasi condensate e il vapore sono in equilibrio, denotato

$$H_2O(l) \rightleftharpoons H_2O(g)$$

quando è nulla la variazione di energia libera di Gibbs associata al processo di transizione di stato, cioè $\Delta G = 0$. In breve, all'equilibrio non è spontaneo né il processo diretto, né quello inverso. La **pressione di vapore** di un liquido (o di un solido) è la pressione esercitata dal suo vapore quando il vapore e il liquido (o il solido) sono in equilibrio l'uno con l'altro.

centi e studenti nel percorso di studio che sceglieranno, fornendo così una migliore esperienza di studio. Anche le mappe concettuali sono state concepite per favorire l'apprendimento, mostrando le connessioni tra gli argomenti trattati e come ogni capitolo scaturisca da una domanda.

Un'altra novità di questa edizione, in particolare del Focus 5, è costituita da una rubrica, **«Come si spiega?»**, in cui si confronta in due colonne affiancate il punto di vista cinetico delle derivazioni con quello termodinamico. Questa innovazione permetterà ai docenti di affrontare l'equilibrio dai due punti di vista, scegliendo se includerne uno solo, o entrambi, nelle loro spiegazioni.

Infine, le *Tecniche principali* sono raggruppate e inserite nel sito web del libro (in inglese), in modo da essere facilmente consultabili in laboratorio o in classe.

• Ripasso dei concetti fondamentali

Le sezioni dei *Fondamenti* forniscono una rassegna dei concetti fondamentali della chimica. Possono essere usate sia come materiale di sostegno, per ripassare le basi man mano che si procede nello studio, sia come anteprima degli argomenti che saranno affrontati e approfonditi nei Focus.

Per rendere le sezioni dei *Fondamenti* più complete dal punto di vista didattico, continuiamo ad affiancarle all'*Esame diagnostico dei fondamenti* (in inglese), disponibile nel sito web del libro e riservato ai soli docenti. Questo esame permette di individuare ciò che gli studenti hanno già appreso e le aree in cui hanno bisogno di maggiore sostegno. Il test di ogni sezione comprende da 5 a 10 problemi, dai quali i docenti possono attingere per assegnare i compiti da svolgere. L'esame diagnostico è stato ideato da Cynthia LaBrake (Università del Texas, Austin).

• Una trattazione matematica innovativa

- **Che cosa ci dice questa equazione?** aiuta gli studenti a interpretare un'equazione in termini chimici e fisici. Uno degli obiettivi di questa rubrica è mostrare come la matematica sia un linguaggio capace di esprimere gli aspetti quantitativi della realtà.

Abbiamo dedotto che il lavoro compiuto quando un sistema si espande in misura di ΔV contro una pressione esterna costante P_{ex} è dato da

$$w = -P_{ex}\Delta V \qquad (3)$$

e tale espressione vale per qualsiasi sistema. È certo più facile immaginare un gas, ma l'espressione si applica anche ai liquidi e ai solidi. L'Equazione 3, però, vale *solo quando la pressione esterna è costante* per tutta la durata dell'espansione.

Che cosa ci dice questa equazione? Quando il sistema si espande, ΔV è positivo. Di conseguenza, il segno meno nell'equazione 3 ci dice che l'energia interna del sistema diminuisce perché parte dell'energia viene persa come lavoro nel corso dell'espansione. Il fattore P_{ex} ci dice che il sistema deve compiere più lavoro quando la pressione esterna (responsabile della forza che si oppone) è elevata. Il fattore ΔV dice che, per una data pressione esterna, si compie più lavoro quando il sistema si espande in misura maggiore rispetto a quando si espande di poco.

In unità SI la pressione esterna si esprime in pascal (1 Pa = 1 $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$, Capitolo 3A) e la variazione di volume in metri cubi (m^3). Pertanto, le unità SI del lavoro si ricavano dal prodotto di 1 Pa per 1 m^3:

- **Come si fa?** Il testo di questa rubrica è concepito in modo tale che la derivazione matematica delle equazioni rimanga indipendente dal resto del testo, rendendo più facile ai docenti il compito di decidere se assegnare o meno questo materiale. Tale struttura ha anche l'obiettivo di far capire agli studenti l'importanza della matematica, mostrando come da essa dipenda il progresso della società moderna. Tutti i calcoli contenuti nel libro sono in queste rubriche, che possono essere facilmente saltate qualora lo si ritenesse opportuno. Viceversa, se i docenti pensano che i loro studenti siano in grado di affrontarle e ritengono sia importante far comprendere loro quanto potenti siano gli strumenti matematici una volta padroneggiati, le derivazioni contenute in queste rubriche rappresentano un incoraggiamento ad approfondire lo studio. Al termine di ogni Focus sono proposti alcuni esercizi che richiedono l'uso del calcolo differenziale e sono contrassegnati dall'icona indicata a lato. Nel sito web del libro sono riportati alcuni *Approfondimenti* (in inglese), basati su strumenti matematici che riteniamo troppo complessi per questo livello di trattazione, ma che costituiscono pur sempre un'utile risorsa.

COME SI FA?

Per calcolare la frazione del volume totale occupata dalle sfere consideriamo una struttura ccp. Dapprima si osserva il modo in cui gli atomi, rappresentati in forma di sfere, si dispongono per formare il cubo. Nella Figura 3H.18, si vede che ai vertici del cubo si trovano otto sfere, ma solo 1/8 di ciascuna sfera si proietta all'interno del cubo, per cui le sfere ai vertici nel loro insieme contribuiscono al volume del cubo per $8 \times 1/8 = 1$ sfera. Su ciascuna delle sei facce è presente mezza sfera, per cui le sfere sulle facce contribuiscono per $6 \times 1/2 = 3$ sfere. Complessivamente, quindi, all'interno del cubo vi sono quattro sfere. La lunghezza della diagonale della faccia del cubo illustrata nella Figura 3H.18 è $4r$, con r uguale al raggio della sfera. Ciascuna delle due sfere ai vertici contribuisce per r e la sfera al centro della faccia per $2r$. Secondo il teorema di Pitagora la lunghezza del lato della faccia, a, è correlata con la diagonale da $a^2 + a^2 = (4r)^2$, vale a dire $2a^2 = 16r^2$, perciò $a = 8^{1/2}r$. Il volume del cubo sarà pertanto $a^3 = 8^{3/2}r^3$. Il volume di ogni sfera è $4/3\pi r^3$, per cui il volume totale delle sfere interne al cubo vale $4 \times 4/3\pi r^3 = 16/3\pi r^3$. Il rapporto tra il volume occupato e il volume totale del cubo sarà pertanto

$$\frac{\text{Volume totale delle sfere}}{\text{Volume totale del cubo}} = \frac{(16/3)\pi r^3}{8^{3/2}r^3} = \frac{16\pi}{3 \times 8^{3/2}} = 0{,}74\ldots$$

- Le **annotazioni di equazione** aiutano gli studenti a interpretare un'equazione osservando il collegamento tra simboli e valori numerici. Riteniamo le unità di misura una componente fondamentale del lessico che lo studente deve padroneggiare, non solo perché fa parte del linguaggio internazionale della chimica ma anche perché favorisce un approccio sistematico ai calcoli. Le annotazioni vengono usate anche per spiegare la conversione delle unità di misura nei casi più complessi o meno familiari.

$$w = -\overbrace{(0{,}100\ \text{mol})}^{n} \times \overbrace{(8{,}3145\ \text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1})}^{R} \times \overbrace{(298\ \text{K})}^{T} \times \ln \overbrace{\frac{2{,}00\ \text{L}}{1{,}00\ \text{L}}}^{V_2/V_1} = -172\ \text{J}$$

Una maggiore attenzione alla risoluzione dei problemi

- **È utile sapere che…** incoraggia l'uso del linguaggio scientifico spiegando le regole stabilite dalla IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*, Unione internazionale di chimica pura e applicata); inoltre identifica anche gli errori più comuni e spiega come evitarli.

È utile sapere che… si dice che una proprietà y «varia linearmente con x» se la relazione tra y e x può essere scritta come $y = b + mx$, con b e m costanti. Quando $y = mx$ (vale a dire, $b = 0$), si dice che y «è proporzionale a x».

- **Esempi svolti** con il metodo ***previsione/strategia/risoluzione/conclusione***. Questo metodo per la risoluzione dei problemi incoraggia gli studenti a prevedere la risposta di un problema dal punto di vista qualitativo e a elaborare una strategia di risoluzione prima di cercare di risolvere il problema quantitativamente. Dopo aver trovato la soluzione, la previsione iniziale viene discussa nella conclusione. Gli studenti fanno spesso confusione riguardo alle ipotesi che occorre fare in un calcolo; perciò molti esempi risolti esplicitano le ipotesi da fare. Inoltre, poiché gli studenti elaborano le informazioni in modi diversi, molti passaggi degli esempi risolti vengono separati in tre componenti: una spiegazione *qualitativa* di ciò che si sta facendo, una trattazione *quantitativa* di tipo matematico e una rappresentazione *visiva* per aiutare

ESEMPIO 6A.2 Il calcolo della concentrazione degli ioni in una soluzione di un idrossido metallico

L'idrossido di bario è una base e viene talvolta utilizzato per la titolazione degli acidi. Quando lo si usa, è necessario conoscere l'effettiva concentrazione di ioni idrossido in soluzione. Qual è la molarità di H_3O^+ e di OH^- in $Ba(OH)_2(aq)$ 0,0030 M a 25 °C?

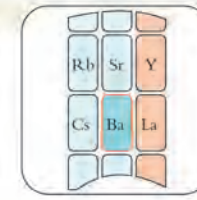
PREVISIONE Poiché il composto fornisce ioni OH^-, questi ultimi saranno presenti in concentrazione prevalente, ciononondimeno dovrà essere presente una minuscola concentrazione di ioni H_3O^+ per mantenere inalterato il valore di K_w.

STRATEGIA In soluzione acquosa, la maggior parte degli idrossidi dei gruppi 1 e 2 si può trattare come completamente dissociata in ioni. Dalla formula chimica si deduce la quantità di ioni OH^- che fornisce ogni unità formula e si calcola la concentrazione di questi ioni in soluzione. Per trovare la concentrazione degli ioni H_3O^+ si applicherà la costante di autoprotolisi dell'acqua, $K_w = [H_3O^+][OH^-]$.

RISOLUZIONE

Si stabilisce se il composto è completamente o parzialmente dissociato in soluzione acquosa.

Poiché il bario è un metallo alcalino-terroso, $Ba(OH)_2$ si dissocia quasi completamente in acqua per formare gli ioni Ba^{2+} e OH^-.



Si trova il rapporto molare degli ioni idrossido rispetto all'idrossido di bario.

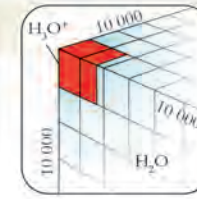
$$Ba(OH)_2(s) \longrightarrow Ba^{2+}(aq) + 2\ OH^-(aq);\quad 1\ mol\ Ba(OH)_2 \simeq 2\ mol\ OH^-$$

Si calcola la concentrazione degli ioni idrossido a partire dalla concentrazione del soluto (le unità di misura sono esplicitate).

$$[OH^-] = 2 \times 0{,}0030\ mol{\cdot}L^{-1} = 0{,}0060\ mol{\cdot}L^{-1}$$

Si trova la concentrazione degli ioni H_3O^+ applicando $K_w = [H_3O^+][OH^-]$ nella forma $[H_3O^+] = K_w/[OH^-]$.

$$[H_3O^+] = \frac{K_w}{[OH^-]} = \frac{1{,}0 \times 10^{-14}}{0{,}0060} = 1{,}7 \times 10^{-12}$$



CONCLUSIONE La concentrazione degli ioni H_3O^+ è uguale a 1,7 pmol·L^{-1} (1 pmol = 10^{-12} mol), molto piccola come previsto, ma non nulla.

Autoesame 6A.3A Calcolate la concentrazione di (a) H_3O^+ e (b) OH^- a 25 °C in HI(aq) $6{,}0 \times 10^{-5}$ M.
[*Risposta*: (a) 60 μmol·L^{-1}; (b) 0,17 nmol·L^{-1}]

Autoesame 6A.3B Calcolate la concentrazione di (a) H_3O^+ e (b) OH^- a 25 °C in NaOH(aq) $2{,}2 \times 10^{-3}$ M.

Esercizi correlati 6A.19, 6A.20, 6A.23, 6A.24

l'interpretazione di ogni passaggio. Per alcune di queste sezioni è disponibile nel sito del libro il corrispondente *Videoesercizio* (in inglese).

- **Esempi concreti tratti da situazioni del mondo reale** Vogliono motivare gli studenti e fare in modo che capiscano l'importanza dei calcoli per qualsiasi tipo di studio e applicazione. Alla luce di questo obiettivo, i problemi vengono posti in un contesto reale nel quale tali calcoli potrebbero rendersi necessari.
- **Autoesami** Gli autoesami permettono agli studenti di valutare da soli la comprensione del materiale trattato nel paragrafo o nell'esempio. In tutto il libro gli autoesami compaiono in coppie; la risposta all'Autoesame A viene fornita immediatamente, mentre la risposta all'Autoesame B è reperibile nel sito web del libro.
- Le **riflessioni** incoraggiano gli studenti a interrogarsi sulle implicazioni di ciò che stanno imparando e a trasferire in situazioni diverse le conoscenze apprese.

Riflessione Di quale fattore cambia la velocità media unica di reazione se i coefficienti stechiometrici dell'equazione chimica raddoppiano?

- Le schede **In pratica…** mostrano come affrontare i principali tipi di calcolo e come collegare i concetti alla risoluzione dei problemi. Sono state concepite come un aiuto all'apprendimento e, nel contempo, un utile riepilogo dei concetti chiave. All'inizio di ciascuna di esse sono illustrati i fondamenti

IN PRATICA... **6H.1 Come calcolare il pH durante la titolazione acido forte-base forte**

Il fondamento concettuale

Durante la titolazione di un acido forte con una base forte il pH è governato dalla specie maggiormente rappresentata in soluzione.

Il procedimento

Si trova, innanzitutto, in base alla stechiometria della reazione, la quantità dell'acido o della base in eccesso nel punto di interesse.

Fase 1 Si calcola la quantità degli ioni H_3O^+ (se l'analita è un acido forte) o degli ioni OH^- (se l'analita è una base forte) nella soluzione originale dell'analita, a partire dalla molarità e dal volume dell'analita stesso (si usa $n_J = V[J]$, dove J è H_3O^+ o OH^-).

Fase 2 Si calcola la quantità degli ioni OH^- (se il titolante è una base forte) o degli ioni H_3O^+ (se il titolante è un acido forte) presente nel volume di titolante aggiunto, in base al prodotto della molarità del titolante per il volume (si usa $n_J = V[J]$, dove J è OH^- o H_3O^+).

Fase 3 Si scrive l'equazione chimica della neutralizzazione e si ricava dalla stechiometria della reazione la quantità di H_3O^+ (o di OH^- se l'analita è una base forte) che rimane nella soluzione dell'analita dopo la reazione con il titolante aggiunto; quindi si sottrae dal numero di moli iniziale il numero di moli di ioni H_3O^+ o OH^- che hanno reagito.

Poi, si determina la concentrazione.

Fase 4 In base alla quantità residua di H_3O^+ (o di OH^-) e al volume *totale* delle soluzioni combinate, $V = V_{analita} + V_{titolante}$, si trova la molarità degli ioni H_3O^+ (o OH^-) nella soluzione, da $[J] = n_J/V$.

Infine, si calcola il pH.

Fase 5 Se l'acido è in eccesso, si calcola il logaritmo negativo della molarità H_3O^+. Se la base è in eccesso, si trova pOH e poi lo si trasforma in pH tramite pH + pOH = pK_w.

Il procedimento è illustrato dall'Esempio 6H.1.

concettuali alla base delle fasi operative elencate nel testo successivo, perché vogliamo assicurarci che gli studenti, oltre a essere in grado di risolvere un problema, capiscano anche quello che stanno facendo. Ogni scheda «In pratica...» è seguita immediatamente da uno o più **Esempi** correlati; tali *Esempi* applicano la strategia di risoluzione dei problemi delineata negli «In pratica...» illustrando esplicitamente ogni passaggio della procedura.

- Alla fine di ogni capitolo si trova una lista dei concetti chiave, preceduta dalla domanda **Quali abilità avete acquisito?**, che costituisce non solo un promemoria degli argomenti con cui gli studenti dovrebbero aver acquisito dimestichezza una volta terminato il capitolo, ma anche un modo pratico per tenere traccia degli argomenti studiati, mettendo un segno di spunta accanto a essi.

Quali abilità avete acquisito?

- ☐ **1.** Determinare l'energia di attivazione usando la relazione determinata sperimentalmente tra costante cinetica e temperatura (Esempio 7D.1).
- ☐ **2.** Predire la costante cinetica di una reazione a una nuova temperatura conoscendo l'energia di attivazione e la costante cinetica a una certa temperatura (Esempio 7D.2).
- ☐ **3.** Discutere i parametri di Arrhenius A ed E_a in termini di modelli di reazione (Paragrafi 7D.2 e 7D.3).

- Le **note a margine** sono brevi frasi in box su fondino giallo, poste accanto al testo attinente, che aiutano a chiarire alcuni concetti o a fornire cenni storici.

L'idea del modello VSEPR fu proposta inizialmente dai chimici britannici Nevil Sidgwick e Herbert Powell, ed è stata poi elaborata dal chimico canadese Ronald Gillespie.

- **NOVITÀ!** Gli **Interludi** descrivono numerose applicazioni della chimica contemporanea, mostrando come essa venga usata nei vari contesti della vita moderna. Una delle novità di questa edizione è costituita dall'introduzione di cinque Interludi, collocati tra i vari Focus.
- **NOVITÀ!** Gli **Esercizi di fine capitolo e di fine Focus** offrono agli studenti l'opportunità di esercitarsi a risolvere sia problemi attinenti a un singolo capitolo sia problemi più complessi, che integrano i concetti dell'intero Focus. Le soluzioni degli esercizi dispari sono disponibili nel sito web del libro.

CAPITOLO 3I Esercizi

3I.1 Stimate la densità relativa (rispetto all'alluminio puro) del magnalio, una lega magnesio-alluminio nella quale il 30,0% di atomi di alluminio è stato rimpiazzato da atomi di magnesio senza distorsione della struttura cristallina.

3I.2 Stimate la densità relativa (rispetto al rame puro) del bronzo all'alluminio (o cupralluminio), una lega contenente l'8,0% in massa di alluminio; assumete che non vi sia distorsione della struttura cristallina.

3I.3 In che modo le leghe differiscono dai metalli puri che le compongono?

3I.4 Qual è la differenza tra leghe omogenee e leghe eterogenee? Fornite un esempio di ciascun tipo.

l'impiego nel settore aeronautico, costituito da alluminio contenente il 4,4% di rame, l'1,5% di magnesio e lo 0,6% di manganese % in massa.

3I.9 Sul sito http://webmineral.com potete trovare la cella unitaria della struttura della calcite. Da tale struttura, identificate (a) il tipo di struttura cristallina e (b) il numero di unità formula presenti nella cella unitaria.

3I.10 Consultate il sito http://webmineral.com ed esaminate le celle unitarie di calcite e dolomite. (a) Che cosa accomuna queste due strutture? (b) Per quali aspetti differiscono? (c) Dove sono localizzati gli ioni magnesio e calcio nella dolomite?

Il seguente esempio e gli esercizi integrati attingono al materiale di tutto il Focus 3.

FOCUS 3 Esempio integrato online

Alcune delle prime malte contenevano leganti *non idraulici*, che si indurivano per reazione con CO_2 anziché con acqua. Queste malte si preparano riscaldando molto la calcite, $CaCO_3(s)$, in modo che elimini CO_2 gassoso e formi calce viva, $CaO(s)$. Il solido che ne risulta viene mescolato con acqua per dare un impasto di calce spenta, $Ca(OH)_2$, alla quale si aggiunge sabbia, o cenere vulcanica, fino a ottenere la malta di calce. Il Colosseo e il Pantheon furono costruiti dagli antichi Romani con questo tipo di malta e hanno resistito attraverso i secoli.

State facendo ricerche sui metodi di costruzione nell'antichità e volete comprendere la chimica alla base di questi materiali.

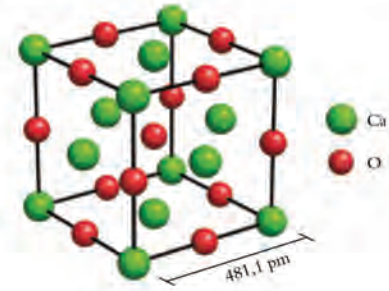
(a) Scrivete l'equazione chimica bilanciata per (i) la conversione della calcite in calce viva, (ii) la reazione della calce viva con acqua per dare calce spenta, e (iii) la reazione della calce spenta con CO_2 per formare carbonato di calcio.

(b) La preparazione della calce viva libera il gas serra diossido di carbonio Se 1,000 t (1 t = 10^3 kg) di $CaCO_3$ viene posta in una fornace e riscaldata a 850 °C, quale volume di $CO_2(g)$ si forma a 850 °C e 1 atm?

(c) Se il $CO_2(g)$ formatosi al punto (b) viene raffreddato alla temperatura ambiente di 22 °C, quale volume occuperà?

(d) L'ossido di calcio ha la struttura cubica mostrata in (1). La lunghezza di ciascuno spigolo è di 481,1 pm. Tutti gli atomi si trovano su uno spigolo, una faccia o un vertice del cubo, con un atomo di O al centro del cubo. Utilizzando queste informazioni e sapendo che la densità di $CaCO_3(s)$ è 2,711 g·cm^{-3}, calcolate la variazione di volume del solido quando CO_2 viene eliminato da 1,0 t di $CaCO_3$.

(e) Basandovi sui risultati ottenuti nel quesito (d), suggerite una ragione per cui gli edifici costruiti con mattoni tenuti insieme con malta di calce potrebbero crollare durante un incendio.



1 Ossido di calcio, CaO

La soluzione dell'Esempio integrato online si trova all'indirizzo **online.universita.zanichelli.it/atkins-principi4e**

- **NOVITÀ!** Ogni Focus si conclude con un esempio pratico, l'**Esempio integrato online**, che sfida gli studenti a combinare la comprensione dei concetti trattati in diverse sezioni del Focus. Le soluzioni complete sono disponibili nel sito web del libro e vengono presentate nello stesso formato degli esempi pratici riportati nel testo.

- **Illustrazioni migliori**
- **NOVITÀ!** Tutti i disegni di questa edizione sono stati aggiornati o rifatti completamente usando una gamma di colori più vivaci.
- Molte fotografie sono state sostituite con immagini più chiare e spesso più rilevanti.
- Nel sito web del libro sono disponibili risorse multimediali, quali *Animazioni*, *VideoLab* e *Grafici interattivi* (in inglese), associate ad alcune figure e indicate da apposite icone al termine delle didascalie. Le Animazioni illustrano alcuni concetti importanti, i VideoLab mostrano esperimenti di laboratorio, i Grafici interattivi permettono allo studente di variare i parametri.

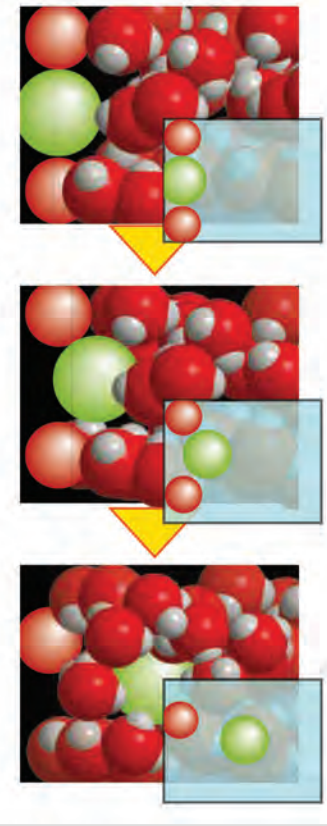


Figura 5D.1 Gli eventi che si svolgono all'interfaccia tra soluto ionico e solvente (acqua). Sono mostrati solo gli ioni dello strato superficiale. Quando gli ioni alla superficie del solido si idratano, si distaccano dal solido e si spostano nella soluzione. Gli inserti a destra mostrano gli ioni da soli.

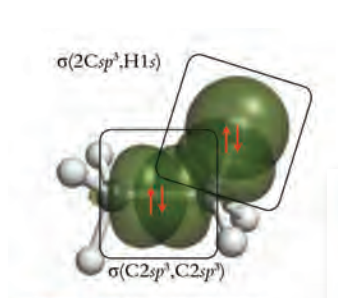


Figura 2F.8 La descrizione del legame nella molecola dell'etano, C_2H_6, basata sulla teoria del legame di valenza. Nella figura sono mostrate le superfici dei contorni di due soli legami. Ciascuna coppia di atomi contigui è tenuta insieme da un legame σ formato appaiando gli elettroni di orbitali H1*s* o di ibridi C2*sp*³. Gli angoli di legame sono tutti prossimi a 109,5° (l'angolo tetraedrico). Animazione 2F.8

Figura 11D.3 Un'aldeide (a sinistra) trattata con il reagente di Tollens produce lo specchio d'argento, mentre un chetone (a destra) non lo fa poiché si ossida meno facilmente che un'aldeide. (W.H. Freeman; fotografia di Ken Karp.) VideoLab 11D.3

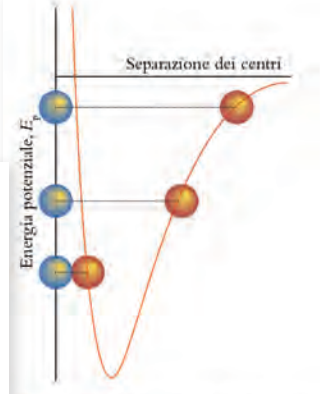


Figura 3E.2 La variazione dell'energia potenziale di una molecola mentre si avvicina a un'altra. Una volta che le due sono venute in contatto diretto, l'energia potenziale si innalza bruscamente. Grafico interattivo 3E.2

• Una chimica contemporanea per tutti gli studenti

La chimica ha un campo di applicazione straordinariamente ampio; pertanto abbiamo cercato di fornire una trattazione teorica e una scelta degli esempi che potessero costituire una conoscenza esaustiva ed estesa della disciplina. La contestualizzazione degli esempi svolti nel testo, di quelli integrati a fine Focus e le schede di approfondimento **Che cosa ha a che fare questo con…** sono alcuni degli strumenti forniti che aiutano a comprendere la vastità delle applicazioni chimiche. Un altro esempio sono le parti del testo che trattano in modo specifico la chimica verde, indicate con l'icona indicata a lato.

Abbiamo sempre tenuto presente, nello stendere il testo, che ingegneri, biologi e tutte le figure professionali che prevedono nel loro lavoro la manipolazione della materia, hanno bisogno di conoscere la chimica.

Un aspetto importante della chimica è che essa può contribuire a costruire abilità utili in diversi ambiti professionali; tenendo sempre presente questa considerazione, abbiamo cercato di insegnare ad applicare in maniera sistematica il pensiero critico, a costruire modelli teorici basati sull'osservazione, a essere in grado di valutare gli aspetti dimensionali dei fenomeni, a esprimere idee e concetti in modo qualitativo e modelli in modo quantitativo, e, infine, a interpretare in modo applicativo le espressioni matematiche.

• Le risorse multimediali

All'indirizzo **online.universita.zanichelli.it/atkins-principi4e** sono disponibili le risorse multimediali di complemento al libro. Per accedere alle risorse protette è necessario registrarsi su **my.zanichelli.it** inserendo la chiave di attivazione personale contenuta nel libro.

Nel sito web, oltre alle risorse già elencate nella prefazione, sono disponibili per gli studenti il *Glossario*, la *Tavola periodica interattiva*, le *Equazioni fondamentali* (in inglese) le *Appendici* richiamate nel testo.

• Libro con ebook

Chi acquista il libro può scaricare gratuitamente l'**ebook**, seguendo le istruzioni presenti nel sito. L'ebook si legge con l'applicazione *Booktab Z*, che si scarica gratis da App Store (sistemi operativi Apple) o da Google Play (sistemi operativi Android).

Tavola periodica degli elementi

GRUPPI → I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII

PERIODI 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

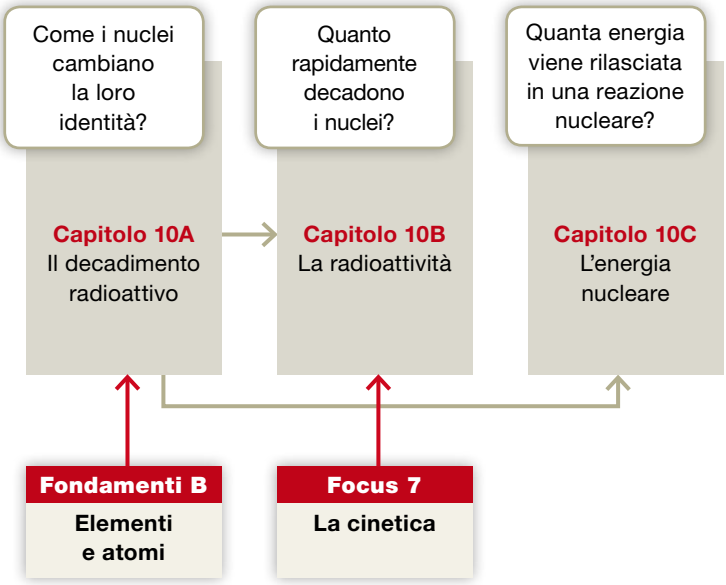
Simbolo	Nome	Numero atomico	Massa atomica (u)[1]	Temperatura di fusione (°C)	Temperatura di ebollizione (°C)	Energia di prima ionizzazione (kJ/mol)	Elettronegatività (secondo Pauling)	Densità[2]	Numeri di ossidazione	Configurazione elettronica
H	idrogeno	1	1,008	−259	−253	1312	2,20	0,0899	+1	$1s^1$
He	elio	2	4,003	−272	−269	2372	—	0,18	—	$1s^2$
Li	litio	3	6,941	181	1342	513	0,98	0,53	+1	$[He]2s^1$
Be	berillio	4	9,012	1288	2471	899	1,57	1,85	+2	$[He]2s^2$
B	boro	5	10,81	2300	3650	801	2,04	2,47	+3	$[He]2s^22p^1$
C	carbonio	6	12,01	3550	—	1086	2,55	2,26	+2±4	$[He]2s^22p^2$
N	azoto	7	14,01	−210	−196	1402	3,04	1,25	+2±3+4+5	$[He]2s^22p^3$
O	ossigeno	8	16,00	−219	−183	1314	3,44	1,43	−2	$[He]2s^22p^4$
F	fluoro	9	19,00	−220	−188	1681	3,98	1,70	−1	$[He]2s^22p^5$
Ne	neon	10	20,18	−249	−246	2081	—	0,90	—	$[He]2s^22p^6$
Na	sodio	11	22,99	98	883	496	0,93	0,97	+1	$[Ne]3s^1$
Mg	magnesio	12	24,31	650	1090	738	1,31	1,74	+2	$[Ne]3s^2$
Al	alluminio	13	26,98	660	2519	578	1,61	2,70	+3	$[Ne]3s^23p^1$
Si	silicio	14	28,09	1414	3280	786	1,90	2,33	+2±4	$[Ne]3s^23p^2$
P	fosforo	15	30,97	44	280	1012	2,19	1,82	±3+5	$[Ne]3s^23p^3$
S	zolfo	16	32,07	115	445	1000	2,58	2,09	−2+4+6	$[Ne]3s^23p^4$
Cl	cloro	17	35,45	−101	−35	1251	3,16	3,21	±1+3+5+7	$[Ne]3s^23p^5$
Ar	argon	18	39,95	−189	−186	1521	—	1,78	—	$[Ne]3s^23p^6$
K	potassio	19	39,10	63	760	419	0,82	0,86	+1	$[Ar]4s^1$
Ca	calcio	20	40,08	842	1484	590	1,00	1,53	+2	$[Ar]4s^2$
Sc	scandio	21	44,96	1541	2836	631	1,36	2,99	+3	$[Ar]3d^14s^2$
Ti	titanio	22	47,87	1668	3287	658	1,54	4,55	+2+3+4	$[Ar]3d^24s^2$
V	vanadio	23	50,94	1910	3407	651	1,63	6,11	+2+3+4+5	$[Ar]3d^34s^2$
Cr	cromo	24	52,00	1907	2672	653	1,66	7,19	+2+3+6	$[Ar]3d^54s^1$
Mn	manganese	25	54,94	1244	2061	717	1,55	7,43	+2+3+4+6+7	$[Ar]3d^54s^2$
Fe	ferro	26	55,85	1535	2861	759	1,83	7,86	+2+3	$[Ar]3d^64s^2$
Co	cobalto	27	58,93	1495	2927	758	1,88	8,80	+2+3	$[Ar]3d^74s^2$
Ni	nichel	28	58,69	1455	2913	737	1,91	8,90	+2+3	$[Ar]3d^84s^2$
Cu	rame	29	63,55	1084	2567	745	1,90	8,96	+1+2	$[Ar]3d^{10}4s^1$
Zn	zinco	30	65,38	420	907	906	1,65	7,14	+2	$[Ar]3d^{10}4s^2$
Ga	gallio	31	69,72	30	2204	579	1,81	5,91	+3	$[Ar]3d^{10}4s^24p^1$
Ge	germanio	32	72,63	937	2830	762	2,01	5,32	+2+4	$[Ar]3d^{10}4s^24p^2$
As	arsenico	33	74,92	817	—	947	2,18	5,73	±3+5	$[Ar]3d^{10}4s^24p^3$
Se	selenio	34	78,96	221	685	941	2,55	4,81	−2+4+6	$[Ar]3d^{10}4s^24p^4$
Br	bromo	35	79,90	−7	59	1140	2,96	3,12	±1+3+5	$[Ar]3d^{10}4s^24p^5$
Kr	cripton	36	83,80	−157	−152	1351	3,00	3,75	—	$[Ar]3d^{10}4s^24p^6$
Rb	rubidio	37	85,47	39	686	403	0,82	1,53	+1	$[Kr]5s^1$
Sr	stronzio	38	87,62	777	1384	549	0,95	2,60	+2	$[Kr]5s^2$
Y	ittrio	39	88,91	1523	3345	616	1,22	4,47	+3	$[Kr]4d^15s^2$
Zr	zirconio	40	91,22	1852	4409	660	1,33	6,49	+4	$[Kr]4d^25s^2$
Nb	niobio	41	92,91	2468	4742	664	1,60	8,57	+3+5	$[Kr]4d^45s^1$
Mo	molibdeno	42	95,95	2617	4639	685	2,16	10,20	+1+2+3+4+5+6	$[Kr]4d^55s^1$
Tc	tecnezio	43	[98,91]	2157	4265	702	1,90	11,50	+4+5+6+7	$[Kr]4d^55s^2$
Ru	rutenio	44	101,1	2334	4150	711	2,20	12,5	+2+3+4+5+6+7	$[Kr]4d^75s^1$
Rh	rodio	45	102,9	1966	3695	720	2,28	12,4	+3	$[Kr]4d^85s^1$
Pd	palladio	46	106,4	1553	2963	805	2,20	12,0	+2+4	$[Kr]4d^{10}$
Ag	argento	47	107,9	962	2162	731	1,93	10,5	+1	$[Kr]4d^{10}5s^1$
Cd	cadmio	48	112,4	321	765	868	1,69	8,65	+2	$[Kr]4d^{10}5s^2$
In	indio	49	114,8	157	2072	558	1,78	7,31	+3	$[Kr]4d^{10}5s^25p^1$
Sn	stagno	50	118,7	232	2602	709	1,96	7,29	+2+4	$[Kr]4d^{10}5s^25p^2$
Sb	antimonio	51	121,8	631	1587	834	2,05	6,68	±3+5	$[Kr]4d^{10}5s^25p^3$
Te	tellurio	52	127,6	450	988	869	2,10	6,24	−2+4+6	$[Kr]4d^{10}5s^25p^4$
I	iodio	53	126,9	114	184	1008	2,66	4,93	±1+5+7	$[Kr]4d^{10}5s^25p^5$
Xe	xenon	54	131,3	−112	−107	1170	2,60	5,90	—	$[Kr]4d^{10}5s^25p^6$
Cs	cesio	55	132,9	28	669	376	0,79	1,87	+1	$[Xe]6s^1$
Ba	bario	56	137,3	727	1897	503	0,89	3,59	+2	$[Xe]6s^2$
57-71										
Hf	afnio	72	178,5	2233	4602	642	1,30	13,3	+4	$[Xe]4f^{14}5d^26s^2$
Ta	tantalio	73	180,9	3017	5425	761	1,50	16,7	+5	$[Xe]4f^{14}5d^36s^2$
W	tungsteno	74	183,8	3422	5555	770	2,36	19,3	+2+3+4+5+6	$[Xe]4f^{14}5d^46s^2$
Re	renio	75	186,2	3186	5627	760	1,90	21,0	+4+6+7	$[Xe]4f^{14}5d^56s^2$
Os	osmio	76	190,2	3033	5027	839	2,20	22,6	+2+3+4+6+8	$[Xe]4f^{14}5d^66s^2$
Ir	iridio	77	192,2	2446	4550	878	2,20	22,5	+3+4	$[Xe]4f^{14}5d^76s^2$
Pt	platino	78	195,1	1768	3827	868	2,28	21,4	+2+4	$[Xe]4f^{14}5d^96s^1$
Au	oro	79	197,0	1064	2856	890	2,54	19,3	+1+3	$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^1$
Hg	mercurio	80	200,6	−39	357	1007	1,90	13,6	+1+2	$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^2$
Tl	tallio	81	204,4	304	1473	589	2,04	11,8	+1+3	$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^16p^1$
Pb	piombo	82	207,2	328	1740	716	2,33	11,4	+2+4	$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^2$
Bi	bismuto	83	209,0	271	1560	703	2,02	9,8	+3+5	$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^3$
Po	polonio	84	[209]	254	962	812	2,00	9,2	+2+4+6	$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^4$
At	astato	85	[210]	302	337	930	2,20	—	±1+3+5+7	$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^5$
Rn	radon	86	[222]	−71	−62	1037	—	9,72	—	$[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^6$
Fr	francio	87	[223]	27	677	380	0,70	1,00	+1	$[Rn]7s^1$
Ra	radio	88	[226]	700	1140	509	0,90	5,00	+2	$[Rn]7s^2$
89-103										
Rf	rutherfordio	104	[261]	2673	6073	409	—	—	+4	$[Rn]5f^{14}6d^27s^2$
Db	dubnio	105	[262]	—	—	640	—	—	—	$[Rn]5f^{14}6d^37s^2$
Sg	seaborgio	106	[266]	—	—	730	—	—	—	$[Rn]5f^{14}6d^47s^2$
Bh	bohrio	107	[264]	—	—	660	—	—	—	$[Rn]5f^{14}6d^57s^2$
Hs	hassio	108	[265]	—	—	750	—	—	—	$[Rn]5f^{14}6d^67s^2$
Mt	meitnerio	109	[268]	—	—	840	—	—	—	$[Rn]5f^{14}6d^77s^2$
Ds	darmstadio	110	[271]	—	—	—	—	—	—	—
Rg	roentgenio	111	[272]	—	—	—	—	—	—	—
Cn	copernicio	112	[285]	—	—	—	—	—	—	—
Nh	nihonio	113	[284]	—	—	—	—	—	—	—
Fl	flerovio	114	[289]	—	—	—	—	—	—	—
Mc	moscovio	115	[288]	—	—	—	—	—	—	—
Lv	livermorio	116	[293]	—	—	—	—	—	—	—
Ts	tennessinio	117	[294]	—	—	—	—	—	—	—
Og	oganessio	118	[294]	—	—	—	—	—	—	—
La	lantanio	57	138,9	920	3454	538	1,10	6,17	+3	$[Xe]5d^16s^2$
Ce	cerio	58	140,1	798	3424	528	1,12	6,77	+3+4	$[Xe]4f^15d^16s^2$
Pr	praseodimio	59	140,9	931	3520	523	1,13	6,77	+3	$[Xe]4f^36s^2$
Nd	neodimio	60	144,2	1010	3074	530	1,14	7,00	+3	$[Xe]4f^46s^2$
Pm	promezio	61	[145]	1080	2457	523	—	7,22	+3	$[Xe]4f^56s^2$
Sm	samario	62	150,4	1072	1778	543	1,17	7,54	+2+3	$[Xe]4f^66s^2$
Eu	europio	63	152,0	822	1597	547	—	5,24	+2+3	$[Xe]4f^76s^2$
Gd	gadolinio	64	157,3	1311	3273	592	1,20	7,89	+3	$[Xe]4f^75d^16s^2$
Tb	terbio	65	158,9	1356	3230	564	1,20	8,27	+3	$[Xe]4f^96s^2$
Dy	disprosio	66	162,5	1409	2567	572	1,22	8,53	+3	$[Xe]4f^{10}6s^2$
Ho	olmio	67	164,9	1470	2720	581	1,23	8,80	+3	$[Xe]4f^{11}6s^2$
Er	erbio	68	167,3	1522	2868	589	1,24	9,05	+3	$[Xe]4f^{12}6s^2$
Tm	tulio	69	168,9	1545	1950	596	1,25	9,33	+2+3	$[Xe]4f^{13}6s^2$
Yb	itterbio	70	173,0	824	1427	603	1,10	6,98	+2+3	$[Xe]4f^{14}6s^2$
Lu	lutezio	71	175,0	1656	3315	524	1,27	9,84	+3	$[Xe]4f^{14}5d^16s^2$
Ac	attinio	89	[227]	1051	3159	499	1,10	10,10	+3	$[Rn]6d^17s^2$
Th	torio	90	232,0	1750	4788	587	1,30	11,7	+4	$[Rn]6d^27s^2$
Pa	protoattinio	91	231,0	1572	3756	568	1,50	15,4	+4+5	$[Rn]5f^26d^17s^2$
U	uranio	92	238,0	1135	4131	584	1,38	19,0	+3+4+5+6	$[Rn]5f^36d^17s^2$
Np	nettunio	93	[237]	640	3902	597	1,36	20,4	+3+4+5+6	$[Rn]5f^46d^17s^2$
Pu	plutonio	94	[244]	641	3228	585	1,28	19,7	+3+4+5+6	$[Rn]5f^67s^2$
Am	americio	95	[243]	1176	2011	579	1,30	13,7	+3+4+5+6	$[Rn]5f^77s^2$
Cm	curio	96	[247]	1345	—	581	1,30	13,5	+3	$[Rn]5f^76d^17s^2$
Bk	berkelio	97	[247]	1050	—	601	1,30	14,8	+3+4	$[Rn]5f^97s^2$
Cf	californio	98	[251]	1060	—	608	1,30	—	+3	$[Rn]5f^{10}7s^2$
Es	einsteinio	99	[252]	860	—	619	1,30	15,1	+3	$[Rn]5f^{11}7s^2$
Fm	fermio	100	[257]	1527	—	627	1,30	—	+3	$[Rn]5f^{12}7s^2$
Md	mendelevio	101	[258]	927	—	637	1,30	—	+2+3	$[Rn]5f^{13}7s^2$
No	nobelio	102	[259]	—	—	642	1,30	—	+2+3	$[Rn]5f^{14}7s^2$
Lr	laurenzio	103	[262]	—	—	—	1,30	—	+3	$[Rn]5f^{14}6d^17s^2$

LANTANIDI

ATTINIDI

FOCUS 10

La chimica nucleare



Finora abbiamo considerato i nuclei alla stregua di passeggeri inerti, che portano con sé gli elettroni, i responsabili delle trasformazioni fisiche e chimiche. I nuclei, invece, hanno una struttura interna e possono subire mutamenti. Le forze che uniscono i nucleoni sono così forti che trasformazioni a livello nucleare possono rilasciare enormi quantità di energia. I chimici possono sfruttare queste trasformazioni e sono fortemente coinvolti nelle conseguenze del loro uso per produrre energia elettrica.

Il Capitolo 10A descrive i tipi di radiazioni che sono emessi quando i nucleoni assestano la loro posizione relativa all'interno dei nuclei o quando il nucleo emette particelle. Queste radiazioni sono state inizialmente un grande punto di domanda, ma hanno consentito di raggiungere un notevole livello di conoscenza sulla composizione dei nuclei. Hanno inoltre trovato largo uso in medicina e nella produzione di energia. Il Capitolo 10B spiega come è analizzata l'intensità delle radiazioni emesse, come varia nel tempo e come queste informazioni sono sfruttate per applicazioni pratiche. Il Capitolo 10C porta avanti la discussione valutando l'energia immagazzinata nei nuclei e rilasciata nella fissione e nella fusione nucleare. Si conclude, infine, con alcuni cenni su come questa energia viene catturata e come i chimici risolvono i problemi legati ai problemi ambientali generati dal processo.

CAPITOLO **10A**

Il decadimento radioattivo

Come i nuclei cambiano la loro identità?

Quanto rapidamente decadono i nuclei?

Capitolo 10A Il decadimento radioattivo → **Capitolo 10B** La radioattività

Perché dobbiamo conoscere queste cose? Molti problemi associati all'energia nucleare possono essere risolti con la chimica ed è necessario sapere come i nuclei si modificano se volete contribuire alla loro soluzione.

Che cosa dobbiamo già sapere? Questo capitolo è uno sviluppo della breve descrizione del nucleo atomico e delle particelle subatomiche dei *Fondamenti* B

I nuclei atomici sono particelle straordinarie; contengono tutti i protoni dell'atomo costretti in un piccolo volume a dispetto della loro carica positiva (Figura 10A.1). Nonostante le immense forze repulsive che si esercitano tra i protoni, la maggior parte dei nuclei sopravvive grazie al contributo dei neutroni alla «forza nucleare forte» che lega i nucleoni (protoni e neutroni). Esistono però nuclei nei quali le repulsioni tra protoni hanno il sopravvento sulla forza nucleare forte che li unisce. In questo caso vengono espulsi frammenti del nucleo, il quale si disintegra cioè «decade».

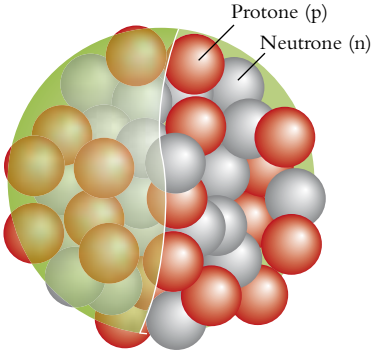


Figura 10A.1 Si può immaginare il nucleo come un insieme di protoni (in rosso) e di neutroni (in grigio) strettamente legati. Il diametro di un nucleo è di circa 10 fm (1 fm = 10^{-15} m).

10A.1 Le prove del decadimento radioattivo spontaneo

Nel 1896 allo scienziato francese Henri Becquerel capitò di conservare un campione di ossido di uranio in un cassetto che conteneva anche alcune lastre fotografiche (Figura 10A.2). Egli si meravigliò nel constatare che le lastre si erano annerite in certe zone, pur essendo queste ricoperte da un materiale opaco. Becquerel si rese conto che il composto dell'uranio doveva emettere una qualche sorta di radiazione. Marie Sklodowska Curie (Figura 10A.3), giovane studentessa polacca impegnata nel dottorato, dimostrò che la radiazione, che ella denominò **radioattività**, veniva emessa dall'uranio indipendentemente dal composto di cui faceva parte. La sua conclusione fu che la sorgente dovesse identificarsi negli atomi dell'uranio in quanto tali. Insieme con il marito Pierre, Marie scoprì successivamente che erano radioattivi anche torio, radio e polonio.

All'inizio l'origine della radioattività era un mistero, perché a quell'epoca l'esistenza del nucleo non era nota. Nel 1898, però, Ernest Rutherford compì il primo passo verso la scoperta della sua origine, identificando tre tipi diversi di radioattività grazie agli effetti del campo elettrico sulle emissioni radioattive (Figura 10A.4). Rutherford le denominò radiazioni α (alfa), β (beta) e γ (gamma).

O Il lavoro di Marie Curie sulla radioattività le ha fatto vincere due premi Nobel, uno dei quali condiviso con suo marito, il fisico francese Pierre Curie, e con Becquerel.

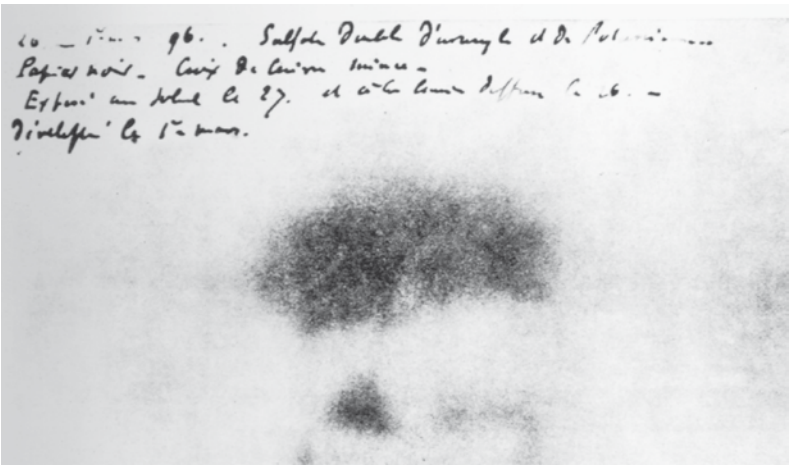


Figura 10A.2 Henri Becquerel scoprì la radioattività notando l'annerimento di una lastra fotografica non esposta lasciata vicino a un campione di ossido di uranio. La fotografia mostra una delle sue lastre fotografiche con l'annotazione dell'evento da lui redatta. (Granger, NYC.)

Tabella 10A.1

Radiazioni nucleari

Tipo	Grado di penetrazione	Velocità[a]	Particella[b]	Numero di massa	Carica	Esempio
α	Non penetrante, ma dannosa	10% di *c*	Nucleo di elio-4 ${}^{4}_{2}He^{2+}$, ${}^{4}_{2}\alpha$, α	4	+2	${}^{266}_{88}Ra \longrightarrow {}^{222}_{86}Rn + \alpha$ (Figura 10A.7)
β	Moderatamente penetrante	< 90% di *c*	Elettrone ${}^{0}_{-1}e$, β^-, β, e^-	0	−1	${}^{3}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{0}_{-1}e$ (Figura 10A.8)
Cattura elettronica[c]	–	–	Elettrone ${}^{0}_{-1}e$, e^-	0	−1	${}^{44}_{22}Ti + {}^{0}_{-1}e \longrightarrow {}^{44}_{21}Sc$ (Figura 10A.9)
γ	Molto penetrante; accompagna spesso altre radiazioni	*c*	Fotone, γ	0	0	${}^{60}_{27}Co^{\star d} \longrightarrow {}^{60}_{27}Co + \gamma^{d}$ (Figura 10A.6)
β^+	Moderatamente penetrante	< 90% di *c*	Positrone, ${}^{0}_{+1}e$, β^+	0	+1	${}^{22}_{11}Na \longrightarrow {}^{22}_{10}Ne + {}^{0}_{+1}e$ (Figura 10A.10)
p	Moderatamente o poco penetrante	10% di *c*	Protone, ${}^{1}_{1}H^+$, ${}^{1}_{1}p$, p	1	+1	${}^{53}_{27}Co \longrightarrow {}^{52}_{26}Fe + {}^{1}_{1}p$
n	Molto penetrante	< 10% di *c*	Neutrone, ${}^{1}_{0}n$, n	1	0	${}^{137}_{53}I \longrightarrow {}^{136}_{53}I + {}^{1}_{0}n$

[a] *c* è la velocità della luce.
[b] Per le particelle si danno simboli alternativi; spesso basta usare i più semplici (quelli a destra).
[c] La cattura elettronica non è una forma di radiazione, ma la si include per completezza.
[d] Uno stato eccitato del nucleo si indica di solito con un asterisco (⋆).

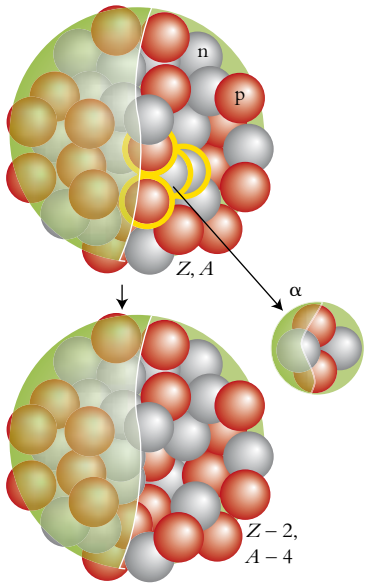


Figura 10A.7 Quando il nucleo emette una particella α il numero atomico diminuisce di 2 e quello di massa di 4. I nucleoni espulsi dal nucleo superiore sono indicati dai contorni dorati.

O Il termine «nuclide» in un primo tempo denotò il nucleo di un atomo, ma ora si riferisce a tutto l'atomo.

corrispondente ordinaria entrambe si annichiliscono, trasformandosi totalmente in energia. Nella **cattura elettronica**, il nucleo cattura un elettrone da un orbitale atomico e un protone si converte in neutrone. La Tabella 10A.1 riassume le proprietà delle particelle comunemente riscontrabili nelle radiazioni nucleari.

Riflessione quale simbolo useresti per un antiprotone? Quale nome gli daresti?

I tipi più comuni di radiazione emessa da nuclei radioattivi sono particelle α (nuclei di elio), particelle β (elettroni veloci espulsi dai nuclei) e raggi γ (radiazione elettromagnetica di alta frequenza).

10A.2 Le reazioni nucleari

Le scoperte di Becquerel, Curie e Rutherford e la successiva elaborazione del modello nucleare dell'atomo da parte di Rutherford mostrarono che la radioattività è dovuta al **decadimento nucleare** (o **disintegrazione nucleare**), cioè alla parziale scissione del nucleo. Il cambiamento di composizione del nucleo si dice **reazione nucleare**. Un determinato atomo con un dato numero atomico (*Z*, il numero di protoni nel suo nucleo) e un certo numero di massa (*A*, il numero totale di nucleoni) si dice **nuclide**. Per esempio, ${}^{1}H$, ${}^{2}H$ e ${}^{16}O$ sono tre nuclidi diversi; i primi due costituiscono isotopi del medesimo elemento, l'idrogeno. I nuclei che mutano di struttura spontaneamente e, ciò facendo, emettono radiazioni si definiscono **radioattivi**. Il risultato è spesso un nuclide differente.

Tra le reazioni nucleari e quelle chimiche sussistono alcune importanti differenze. Innanzitutto i vari isotopi dello stesso elemento subiscono sostanzialmente le stesse reazioni chimiche, ma i loro nuclei manifestano reazioni nucleari assai diverse. In secondo luogo, quando il nucleo emette particelle α o β, si modifica il numero dei suoi protoni. Il prodotto, il **nucleo figlio** (Figura 10A.7 e Figura 10A.8), sarà pertanto quello di un atomo di un elemento differente. Per fare un esempio, se il nucleo di sodio-24 emette una particella β, si forma un nucleo di magnesio-24. In questo caso ha avuto luogo una **trasmutazione nucleare**, cioè la trasformazione di un elemento in un altro. Un'altra differenza importante tra reazioni nucleari e reazioni chimiche è che le prime comportano variazioni di energia di gran lunga maggiori. Per esempio, la combustione di 1,0 g di metano libera a circa 52 kJ di energia in forma termica, mentre la reazione nucleare di 1,0 g di uranio-235 produce approssimativamente $8{,}2 \times 10^7$ kJ di energia, oltre un milione di volte in più.

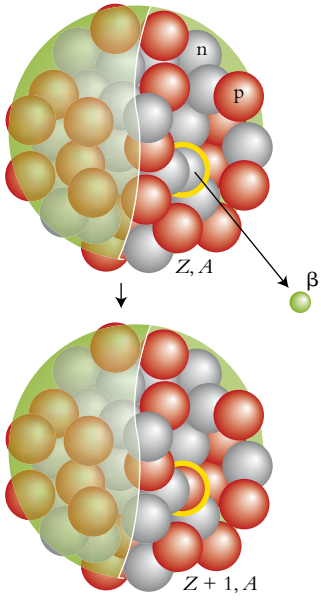


Figura 10A.8 Quando il nucleo emette una particella β il numero atomico aumenta di 1, quello di massa rimane inalterato. Il neutrone che consideriamo quale sorgente dell'elettrone è indicato dai contorni dorati nel nucleo in alto.

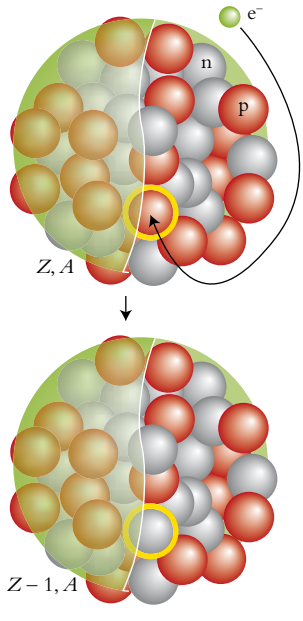


Figura 10A.9 Nella cattura elettronica, un nucleo si impadronisce di uno degli elettroni circostanti, e l'effetto è quello di trasformare un protone (dai contorni dorati, in alto) in un neutrone (dai contorni dorati, in basso). Di conseguenza il numero atomico diminuisce di 1 e il numero di massa rimane identico.

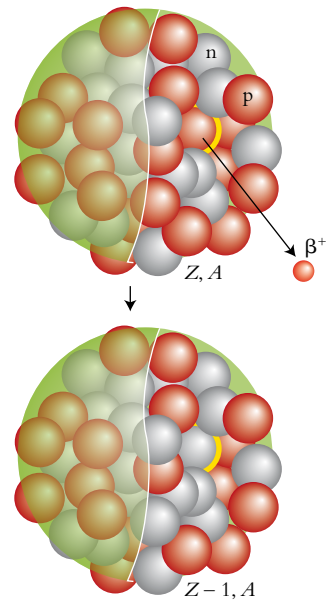


Figura 10A.10 Nel caso dell'emissione di un positrone (β^+) il nucleo espelle, appunto, un positrone, e l'effetto consiste nel trasformare un protone in un neutrone. Di conseguenza il numero atomico diminuisce di 1, mentre quello di massa rimane identico.

Per determinare l'identità del nucleo figlio basta considerare come variano il numero atomico e il numero di massa quando il nucleo emette una particella. Per esempio, quando subisce la disintegrazione α, il nucleo del radio-226, di $Z = 88$, emette una particella α la cui carica è +2, e il numero di massa 4. Dato che nel corso della reazione nucleare devono conservarsi sia la carica sia la massa totali, il frammento residuo deve essere un nucleo di numero atomico 86 (radon) e numero di massa 222; ne consegue che il nucleo figlio è quello del radon-222:

$$^{266}_{88}\mathrm{Ra} \longrightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\alpha$$

L'espressione di tali trasformazioni prende il nome di **equazione nucleare**. L'esempio che segue mostra come applicarla all'identificazione dei nuclei figli.

ESEMPIO 10A.1 Come determinare il prodotto della cattura elettronica e dell'emissione di un positrone

Quando nuclei radioattivi vengono usati in medicina e nell'industria, è importante conoscere quale sarà il nucleo figlio poiché esso potrebbe essere radioattivo. Supponete di star lavorando in un laboratorio di ricerca medica e di star studiando il calcio-41 e l'ossigeno-15. Indicate quale nuclide viene prodotto quando (a) il calcio-41 cattura un elettrone; (b) l'ossigeno-15 emette un positrone.

PREVISIONE (a) Nella cattura elettronica un protone viene trasformato in un neutrone senza cambiamento di numero di massa. Il numero atomico si riduce invece di 1 (Figura 10A.9). (b) Un positrone ha la stessa massa, molto ridotta, di un elettrone e una carica positiva singola. L'emissione di un positrone può essere vista come la carica positiva emessa da un protone che si converte in un neutrone. Attraverso questo processo il numero atomico diminuisce di 1 ma il numero di massa rimane costante (Figura 10A.10).

STRATEGIA Si scrive l'equazione nucleare di ciascuna reazione, rappresentando il nucleo figlio con E, il numero atomico con Z e il numero di massa con A. Si trovano Z e A tenendo conto della conservazione dell'una e dell'altra grandezza nel corso della reazione nucleare.

RISOLUZIONE

(a) Si scrive l'equazione nucleare della reazione:

$$^{41}_{20}\mathrm{Ca} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} \longrightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{E}$$

Si esprime la conservazione di massa e di carica:

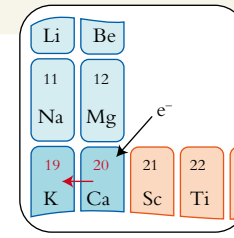
$$41 + 0 = A \text{ o } A = 41, \text{ invariato}$$
$$20 - 1 = Z \text{ o } Z = 19$$

Si identifica l'elemento:

$$Z = 19 \text{ corrisponde al potassio, K}$$

Si scrive l'equazione nucleare:

$$^{41}_{20}\text{Ca} + {}^{0}_{-1}\text{e} \longrightarrow {}^{41}_{19}\text{K}$$



(b) Si scrive l'equazione nucleare della reazione:

$$^{15}_{8}\text{O} \longrightarrow {}^{A}_{Z}\text{E} + {}^{0}_{+1}\text{e}$$

Si esprime la conservazione di massa e di carica:

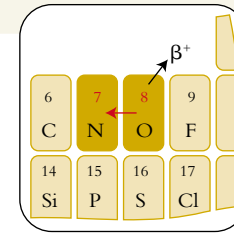
$$15 = A + 0 \text{ o } A = 15, \text{ invariato}$$
$$8 = Z - 1 \text{ o } Z = 7$$

Si identifica l'elemento:

$$Z = 7 \text{ corrisponde all'azoto, N}$$

Si scrive l'equazione nucleare della reazione:

$$^{15}_{8}\text{O} \longrightarrow {}^{15}_{7}\text{N} + {}^{0}_{+1}\text{e}$$



CONCLUSIONE Come previsto, sia nella cattura elettronica che nell'emissione di un positrone un protone è stato trasformato in un neutrone. In entrambi i casi si è verificata una diminuzione del numero atomico senza cambiamento di massa.

Autoesame 10A.1A Identificate il nuclide prodotto in seguito a (a) la cattura elettronica nel berillio-7; (b) l'emissione di un positrone da un atomo di sodio-22.

[*Risposta*: (a) $^{7}_{4}\text{Be} + {}^{0}_{-1}\text{e} \longrightarrow {}^{7}_{3}\text{Li}$; (b) $^{22}_{11}\text{Na} \longrightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + {}^{0}_{+1}\text{e}$]

Autoesame 10A.1B Identificate il nuclide prodotto in seguito a (a) la cattura elettronica nel ferro-55; (b) l'emissione di un positrone da un atomo di carbonio-11.

Esercizi correlati 10A.5-10A.8

Le reazioni nucleari possono generare elementi differenti. È possibile prevedere la trasmutazione di un nucleo osservando il numero atomico e il numero di massa delle specie rappresentate nell'equazione nucleare del processo.

10A.3 L'andamento della stabilità nucleare

I nuclei di alcuni elementi sono stabili mentre altri decadono appena si formano. Sarebbe utile sapere se c'è uno schema di stabilità e instabilità dei nuclei grazie al quale fare previsioni sulle diverse modalità di decadimento nucleare. Un indizio è dato dall'abbondanza consistentemente superiore degli elementi a numero atomico pari rispetto a quelli vicini di numero atomico dispari. La differenza è evidente nella **Figura 10A.11**, che riporta il grafico dell'abbondanza cosmica degli elementi in funzione del numero atomico. Un andamento analogo si verifica sulla Terra. Degli otto elementi presenti in quantità pari all'1% o più della massa terrestre, soltanto uno, l'alluminio, ha numero atomico dispari.

gia cinetica da prevalere sulla repulsione elettrostatica del nucleo colpito. La particella entrante lo penetra e viene catturata dalla forza nucleare forte. Le velocità elevatissime necessarie possono essere generate in un acceleratore di particelle.

La **trasmutazione** degli elementi, vale a dire la trasformazione di un elemento in un altro, particolarmente quella del piombo in oro, costituì il sogno degli alchimisti e anche una delle radici della chimica moderna. Gli alchimisti, però, disponevano solo di tecniche chimiche, che si dimostrarono inefficaci, perché comportavano variazioni di energia troppo piccole per permettere di introdurre nucleoni nel nucleo. La trasmutazione è stata riconosciuta in natura e realizzata anche in laboratorio, ma solo grazie a metodi che gli antichi alchimisti non potevano sognarsi. Rutherford riuscì nella prima trasmutazione nel 1919, bombardando nuclei di azoto-14 con particelle α veloci. I prodotti della trasmutazione furono l'ossigeno-17 e un protone:

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}\alpha \longrightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}p$$

Un grande numero di nuclidi è stato sintetizzato sulla Terra. Per esempio il tecnezio è stato preparato (come tecnezio-97) per la prima volta nel 1937 grazie alla reazione tra i nuclei di molibdeno e deuterio:

$$^{97}_{42}Mo + ^{2}_{1}H \longrightarrow ^{97}_{43}Tc + 2\,^{1}_{0}n$$

Tali processi di trasmutazione sono in genere scritti in forma semplificata come

$$^{97}_{42}Mo(d, 2n)^{97}_{43}Tc$$

dove d indica un deutone, $^{2}H^{+}$. In generale si scrive

bersaglio (particella entrante, particella emessa) prodotto

con il numero di ogni particella incluso. Oggi il tecnezio è moderatamente abbondante, in quanto si accumula nei prodotti di disintegrazione degli impianti nucleari. Un altro isotopo, il tecnezio-99, trova applicazioni farmaceutiche, specialmente per la scansione ossea (Scheda 10A.1).

SCHEDA 10A.1 Che cosa ha a che fare questo con… la sopravvivenza

La medicina nucleare • La chimica nucleare ha rivoluzionato in campo clinico la diagnosi, le terapie e la ricerca. Si usano traccianti radioattivi per saggiare la funzionalità degli organi, come il sodio-24 per registrare il flusso sanguigno e lo stronzio-87 per studiare l'accrescimento dello scheletro. L'effetto più clamoroso dei radioisotopi in campo diagnostico si è registrato tuttavia nella diagnostica per immagini. Il radionuclide più ampiamente impiegato in medicina, specie per l'esame delle ossa, è il tecnezio-99m (la m indica uno stato «metastabile» di vita ragionevolmente lunga). Altamente radioattivo, esso emette raggi γ che attraversano il corpo, causando danni assai più lievi di quelli che arrecherebbero le particelle α; inoltre l'isotopo ha vita così breve che il paziente corre rischi minimi.

Il cobalto-60 è impiegato nel *bisturi gamma*, una tecnica in realtà priva di bisturi che distrugge il tumore situato in sedi quali il cervello dove l'intervento classico è irrealizzabile. Nella terapia, circa 200 raggi γ sono focalizzati da angolazioni differenti sulla massa tumorale di ubicazione nota. Ogni raggio γ di per sé ha una bassa ampiezza per cui danneggia in minima parte o per nulla i tessuti che attraversa. Ma nel punto di intersezione di 200 raggi la radiazione è sufficientemente potente da distruggere le cellule tumorali. Il processo è assolutamente indolore per cui il paziente non viene sedato.

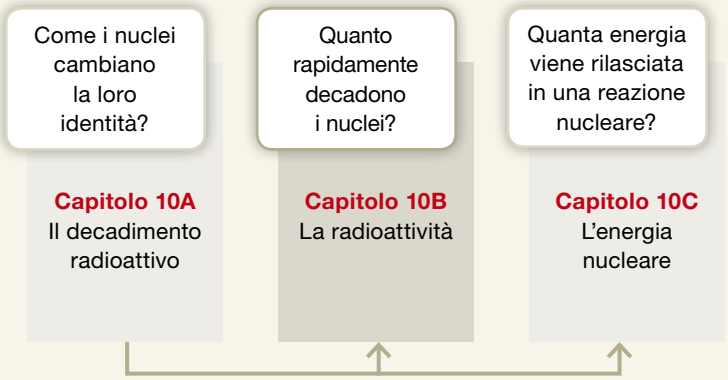
La *tomografia a emissione di positroni* (PET) (Figura 1) sfrutta un emettitore di positroni di breve durata come fluoro-18 per costruire l'immagine dei tessuti umani con un grado di dettaglio impossibile da raggiungere con i raggi X. La PET è applicata ampiamente allo studio delle funzioni cerebrali (Figura 2) e a fini diagnostici. Quando, per esempio, si marca un ormone estrogeno con fluoro-18 e lo si inietta in un individuo affetto da cancro, il composto fluorurato viene assorbito preferenzialmente dal tumore. I positroni emessi dagli atomi di fluoro vengono rapidamente annichilati incontrando elettroni, e i raggi γ risultanti sono rilevati da un analizzatore di immagini che si muove lentamente sulla porzione dell'organismo affetta dal tumore. Con questa tecnica la crescita del tumore può essere

Figura 1 Questa paziente sta per sottoporsi alla scansione PET della funzione cerebrale. (Marcus E. Raichle e Washington University School of Medicine.)

(*segue*)

CAPITOLO **10B**

La radioattività



Perché dobbiamo conoscere queste cose? Per manipolare materiali contenenti nuclei radioattivi è necessario conoscere le modalità e la velocità del decadimento nucleare. La velocità del decadimento sta alla base della datazione degli oggetti antichi.

Che cosa dobbiamo già sapere? È necessario conoscere le origini e la classificazione delle forme di radiazione (Capitolo 10A) e le cinetiche di decadimento di primo ordine (Capitolo 7B).

La radiazione nucleare è detta talora **radiazione ionizzante**, perché è sufficientemente energetica da espellere elettroni dagli atomi. Negli ospedali si sfrutta la radiazione nucleare per uccidere il tessuto indesiderato, per esempio le cellule cancerose (vedi Scheda 10A.1). È possibile, però, che gli stessi potenti effetti che permettono di diagnosticare e di curare le malattie danneggino contemporaneamente i tessuti sani. Il danno dipende dall'energia della sorgente, dal tipo della radiazione e dal tempo di esposizione. I tre tipi principali di radiazione penetrano la materia e provocano danni in misura differente (Tabella 10B.1).

10B.1 Gli effetti biologici della radiazione

Le particelle α, relativamente pesanti e dotate di carica elevata, interagiscono così intensamente con la materia da venire rallentate, catturando elettroni dall'ambiente circostante e mutandosi in atomi di elio prima di poter avanzare a lungo. Esse riescono a penetrare solo il primo strato dell'epidermide e si lasciano arrestare dal vetro, dai vestiti e persino da un foglio di carta. La maggior parte della radiazione α viene assorbita dallo strato superficiale della pelle, di cellule morte, laddove non può arrecare gran danno. Al contrario, le particelle α possono essere pericolosissime se inalate o ingerite. L'energia dei loro urti può espellere gli atomi dalle molecole, e questo può causare disturbi gravi e anche la morte. Per fare un esempio, il plutonio, considerato tra i materiali radioattivi più tossici, è un α-emettitore e può essere manipolato con sicurezza applicando una schermatura minima. Esso si ossida però a Pu^{4+}, le cui proprietà chimiche ricalcano quelle di Fe^{3+}, per cui può sostituire nell'organismo il ferro e farsi assorbire dal tessuto osseo, dove sopprime la possibilità di produrre gli eritrociti (i globuli rossi). Il risultato: malattia da radiazioni, cancro e morte.

Al secondo posto, in fatto di potere penetrante, si pone la radiazione β. Gli elettroni veloci riescono a penetrare circa 1 cm nei tessuti prima che le interazioni elettrostatiche con gli elettroni e con i nuclei delle molecole li arrestino.

La radiazione γ è la più penetrante di tutte. I fotoni γ, ad alta energia, attraversano tranquillamente gli edifici e gli organismi, e possono causare danni ionizzando le molecole che incontrano. Le molecole proteiche e il DNA danneggiati in questo modo non sono più in grado di funzionare correttamente, e di conseguenza si determinano malattia da radiazioni e cancro. Le sorgenti intense di raggi γ devono essere circondate con schermi costituiti da mattonelle di piombo o cemento armato spesso, al fine di assorbire la radiazione penetrante.

Tabella 10B.1

Requisiti di schermatura per le radiazioni α, β e γ

Radiazione	Potere penetrante relativo	Schermo necessario
α	1	Carta, epidermide
β	100	3 mm di alluminio
γ	10 000	Calcestruzzo, piombo

SCHEDA 10B.1 Come facciamo a sapere... quando è radioattivo un materiale?

Per misurare l'intensità della radiazione nucleare si può trarre vantaggio dalla sua capacità di espellere elettroni dagli atomi e dagli ioni. Per primo Becquerel registrò l'intensità della radiazione determinando il grado di annerimento su una lastra fotografica. L'annerimento è dovuto allo stesso processo ossidoriduttivo utilizzato dalla comune fotografia:

$$Ag^+ + Br^- \xrightarrow{h\nu} Ag + Br$$

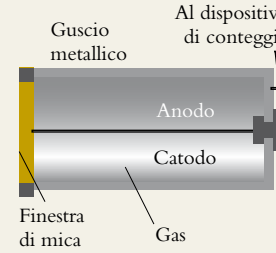
salvo che l'iniziale ossidazione degli ioni bromuro è causata dalla radiazione nucleare anziché dalla luce. Nei *dosimetri*, che registrano il grado di esposizione degli operatori alle radiazioni, si fa tuttora uso della tecnica di Becquerel. Il dosimetro serve a raccogliere prove cumulative di esposizione alle radiazioni, e si indossa come un badge.

I dosimetri contengono un materiale *termoluminescente* quale il fluoruro di litio. Qualsiasi radiazione incidente espelle dallo ione fluoruro elettroni che migrano ma sono catturati dal cristallo. Riscaldando quest'ultimo essi ricadono negli atomi di fluoro emettendo in forma luminosa l'energia accumulata. La dose di radiazione ricevuta si deduce dall'intensità della luce. I dosimetri sono adoperati per tempi che vanno da un giorno ad alcune settimane, perché l'esposizione continuata accumula gli elettroni, permettendo la determinazione del dosaggio a lungo termine. Il riscaldamento del dosimetro durante la lettura rilascia l'energia immagazzinata, per cui i dosimetri termoluminescenti sono riutilizzabili.

Il *contatore Geiger* registra la radiazione rilevando la ionizzazione di un gas a bassa pressione (**Figura 1**). La radiazione ionizza gli atomi del gas dentro un cilindro, permettendo un breve flusso di corrente tra gli elettrodi. Il segnale elettrico risultante può essere registrato direttamente oppure trasformato in un suono udibile. La frequenza di questi «click» indica l'intensità della radiazione. Un limite dei contatori Geiger è che non rispondono bene ai raggi γ. Si rileva solo l'1% circa dei fotoni γ, mentre le particelle β incidenti sul contatore vengono rilevate tutte. Dato che l'efficienza del Geiger dipende dalle dimensioni del tubo, un contatore utilizzato per monitorare un campo di attività ampio contiene di solito due tubi di dimensioni diverse.

Il *contatore a scintillazione* (detto anche scintillatore) sfrutta il fatto che i fosfòri, sostanze fosforescenti quali lo ioduro di sodio e il solfuro di zinco, esposti alla radiazione forniscono un lampo di luce, cioè scintillano. Il contatore contiene anche un *tubo fotomoltiplicatore* che trasforma la luce in un segnale elettrico. L'intensità della radiazione si deduce da quella del segnale elettronico.

(a)



(b)

Figura 1 (a) Un contatore Geiger con un pezzo di minerale di uranio. (b) Il rilevatore cilindrico del contatore Geiger contiene un gas (spesso argon con poco vapore di etanolo o neon con poco vapore di bromo). Tra il filo centrale e la parete sussiste una elevata differenza di potenziale (500-1200 V). Quando la radiazione ionizza il gas, gli ioni fanno fluire per breve tempo la corrente, producendo il caratteristico «click».(Fotografia © 1989 Chip Clark-Fundamental Photographs.)

sura usata comunemente (ma non SI) è il **curie** (Ci), che vale $3{,}7 \times 10^{10}$ decadimenti nucleari al secondo, produzione radioattiva di 1 g di radio-226. Essendo quest'ultima unità molto grande, nella maggior parte dei casi si esprime l'attività in millicurie (mci) oppure in microcurie (μCi). La **Tabella 10B.2** riassume queste unità di misura.

L'equazione che esprime il decadimento di un nucleo (nucleo progenitore $\rightarrow$ nucleo figlio + radiazione) ha esattamente la stessa forma delle reazioni elementari unimolecolari (Capitolo 7B), con il nucleo instabile in luogo della molecola reagente. Tale tipo di decadimento è prevedibile per un processo che non dipenda da fattori esterni, ma semplicemente dalla instabilità del nucleo. La

Tabella 10B.2

Unità di misura della radiazione*

Proprietà	Nome dell'unità	Simbolo	Definizione
Attività	becquerel	Bq	1 decadimento al secondo
	curie	Ci	$3{,}7 \times 10^{10}$ decadimenti al secondo
Dose assorbita	gray	Gy	$1\ J \cdot kg^{-1}$
	dose di radiazione assorbita	rad	$10^{-2}\ J \cdot kg^{-1}$
Dose equivalente	sievert	Sv	$Q \times$ dose assorbita§
	röntgen equivalente uomo	rem	$Q \times$ dose assorbita§

* Le unità più datate sono in rosso.
§ Q è l'efficacia biologica relativa della radiazione. Di norma $Q \approx 1\ Sv \cdot Gy^{-1}$ per γ, β e la maggior parte delle altre radiazioni, mentre $Q \approx 20\ Sv \cdot Gy^{-1}$ per la radiazione α e per i neutroni veloci. In particolari circostanze per le ossa si ricorre a un ulteriore fattore 5 (vale a dire 5Q).

velocità di decadimento nucleare dipende esclusivamente dall'identità dell'isotopo, non dalla sua forma chimica o dalla temperatura.

Come in una reazione chimica unimolecolare la legge cinetica è del primo ordine; in altri termini la relazione tra la velocità di decadimento e il numero N di nuclei radioattivi presenti è data dalla **legge del decadimento radioattivo**:

$$\text{attività} = \text{velocità di decadimento} = k \times N \qquad (2)$$

In questo contesto k è detta **costante di decadimento**. La legge dice che l'attività del campione radioattivo è proporzionale al numero degli atomi costituenti. Come si è visto nel Capitolo 7B, la legge cinetica del primo ordine implica il decadimento esponenziale, per cui il numero N di nuclei residui al tempo t sarà dato da

$$N = N_0 e^{-kt} \qquad (3)$$

dove N_0 rappresenta il numero originario ($t = 0$) di atomi radioattivi; l'espressione è stata riportata in grafico nella **Figura 10B.1**.

Il decadimento radioattivo è trattato normalmente riferendosi al **tempo di dimezzamento**, $t_{1/2}$, cioè al tempo necessario affinché si disintegri la metà del numero iniziale di nuclei. Come si era fatto nel Capitolo 7B, si stabilisce la relazione tra $t_{1/2}$ e k (l'analogo della costante di primo ordine k_v) ponendo nell'Equazione 3, $N = 1/2N_0$ e $t = t_{1/2}$:

$$t_{1/2} = \ln 2/k \qquad (4)$$

L'equazione mostra che, quanto più il valore di k è grande, tanto più breve è il tempo di dimezzamento del nuclide. I nuclidi di vita breve sono meno stabili degli altri, e hanno maggiore probabilità di disintegrarsi in un dato periodo; ovviamente sono «più caldi» (più intensamente radioattivi) dei nuclidi dotati di vita lunga.

Riflessione Potrebbe essere vantaggioso nei reattori nucleari produrre scorie fortemente radioattive?

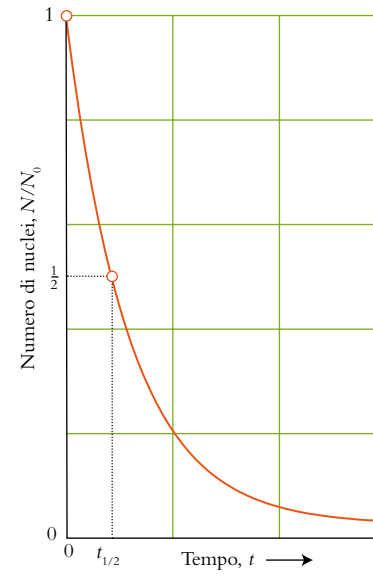


Figura 10B.1 Il decadimento esponenziale del numero di nuclei radioattivi presenti in un campione implica che anche l'attività del campione declini esponenzialmente nel tempo. La curva è caratterizzata dal tempo di dimezzamento, $t_{1/2}$.

ESEMPIO 10B.1 L'applicazione della legge della disintegrazione radioattiva

Una delle ragioni che impongono la manutenzione regolare delle armi termonucleari è la disintegrazione del trizio che esse contengono. Supponete di tenere sotto controllo il decadimento del trizio. Quale massa dell'isotopo sarà rimasta a partire da una massa iniziale di 1,00 g di trizio, dopo 5,0 a (1 a = 1 anno)? La costante del decadimento del trizio è 0,0564 a^{-1}.

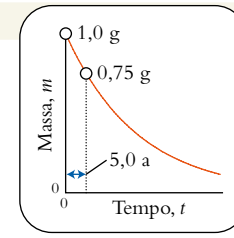
PREVISIONE Il tempo di dimezzamento del trizio (**Tabella 10B.3**) è 12,3 anni; ci si aspetta che la maggior parte del trizio rimanga dopo cinque anni.

STRATEGIA La massa totale di isotopo nel campione è proporzionale al numero dei nuclei presenti, per cui la dipendenza dal tempo della massa seguirà la legge del decadimento radioattivo. Vale a dire, poiché $m \propto N$, nell'Equazione 3 possiamo scrivere $m = m_0 e^{-kt}$ dove m è la massa totale dell'isotopo radioattivo al tempo t e m_0 è la sua massa iniziale.

RISOLUZIONE

Da $m = m_0 e^{-kt}$

$$m = (1{,}0\ \text{g}) \times e^{-(0{,}0564\ \text{a}^{-1}) \times (5{,}0\ \text{a})} = 0{,}75\ \text{g}$$



CONCLUSIONE Come previsto dopo 5,0 anni resta più della metà del campione iniziale, ossia rimangono 0,75 g di trizio.

Autoesame 10B.1A La costante di disintegrazione del fermio-254 è 210 s^{-1}. Quale massa dell'isotopo rimarrà da un campione di 1,00 μg al termine di 10 ms?

[*Risposta*: 0,12 mg]

Autoesame 10B.1B La costante di disintegrazione del nuclide nettunio-237 è $3{,}3 \times 10^{-7}$ a^{-1}. Quale massa dell'isotopo rimarrà, posto che il campione, di massa 5,0 μg, sopravviva per 1,0 Ma (1,0 milioni di anni)?

Esercizi correlati 10B.5, 10B.6

CAPITOLO 10C

L'energia nucleare

Quanto rapidamente decadono i nuclei?

Capitolo 10B La radioattività

Quanta energia viene rilasciata in una reazione nucleare?

Capitolo 10C L'energia nucleare

Perché dobbiamo conoscere queste cose? Uno dei problemi più importanti della nostra epoca è la generazione di energia elettrica. L'energia nucleare ne è una fonte, tuttavia comporta alcuni problemi che i chimici aiutano a risolvere.

Che cosa dobbiamo già sapere? È necessario conoscere le origini e la classificazione delle forme di radiazione (Capitolo 10A).

Quando i nuclei decadono i nucleoni adottano una nuova disposizione a più bassa energia. Il problema tecnologico che si pone nell'industria nucleare è la cattura di quell'energia e del suo uso per generare energia elettrica. Il materiale che rimane dopo l'utilizzo del combustibile nucleare costituisce un problema associato poiché è altamente radioattivo ed è necessario isolarlo dall'ambiente. Entrambi i problemi possono essere affrontati dal punto di vista chimico.

10C.1 Le trasformazioni massa-energia

L'energia che si libera quando i nucleoni di un nucleo adottano un assetto più stabile può essere calcolata confrontando la massa dei reagenti con quella dei prodotti del processo nucleare. La teoria di Einstein della relatività insegna che la massa di un oggetto è misura del suo tenore energetico: quanto più essa è grande, tanto maggiore è l'energia che vi corrisponde. Specificamente l'energia totale, E, e la massa, m, sono correlate dalla famosa equazione di Einstein

$$E = mc^2 \qquad (1)$$

dove c indica la velocità della luce ($3{,}00 \times 10^8$ m·s^{-1}). Una conseguenza di questa relazione è che una perdita di energia si accompagna sempre a una perdita di massa.

La perdita di massa che sempre accompagna quella di energia è normalmente troppo piccola per essere rilevabile. Anche nella reazione chimica più intensamente esotermica, per esempio una che liberi 10^3 kJ, la massa dei prodotti e dei reagenti differirà di soli 10^{-8} g. In una reazione nucleare, invece, le variazioni di energia sono immense, la perdita di massa è misurabile e si può calcolare l'energia liberata a partire dalla variazione di massa osservata.

L'**energia di legame nucleare**, E_{legame}, è quella che si *libera* quando protoni e neutroni si uniscono a formare il nucleo. Le energie di legame sono tutte positive, e ciò significa che un nucleo avrà sempre un contenuto di energia inferiore ai suoi nucleoni separati; quanto più grande è l'energia di legame, tanto minore è l'energia del nucleo. Per calcolare l'energia di legame nucleare si può utilizzare l'equazione di Einstein partendo dalla differenza di massa, Δm, tra nucleo e nucleoni separati. Per esempio, il ferro-56 contiene 26 protoni, ciascuno di massa m_p, e 30 neutroni, ciascuno di massa m_n. La differenza tra la massa del nucleo e quella dei nucleoni separati è

$$\Delta m = m(\text{nucleo}) - \sum m(\text{nucleoni}) = m(\text{nucleo } {}^{56}_{26}\text{Fe}) - (26m_p + 30m_n)$$

O Un nuclide è un atomo, compresi gli elettroni, avente un dato numero atomico e numero di massa atomica.

I valori della massa dei nuclei non sono facilmente disponibili, normalmente si utilizzano le masse dei nuclidi. La massa include la massa totale di tutti gli Z elettroni dell'atomo di numero atomico Z ma nel calcolo si può controbilanciare questo errore rimpiazzando gli Z protoni con Z atomi di idrogeno comprendenti i loro Z elettroni. C'è una piccola differenza nell'energia calcolata secondo questo metodo perché il contributo energetico degli elettroni è leggermente diverso negli atomi pesanti e negli atomi di idrogeno. Tuttavia questa differenza è così ridotta da poter essere ignorata nei calcoli che non necessitano estrema precisione. Quindi nel caso specifico,

$$\Delta m = m(\text{atomo } {}^{56}_{26}\text{Fe}) - (26m_H + 30m_n)$$

dove m_H è la massa di un atomo di idrogeno. Ora si può calcolare l'energia di legame da

$$E_{legame} = -\Delta m \times c^2 \qquad (2)$$

Si utilizza il segno meno perché una perdita di massa ($\Delta m<0$) corrisponde a una energia di legame positiva. L'energia di legame si riporta in elettronvolt (eV) o più precisamente in milioni di elettronvolt (1 MeV = 10^6 eV):

$$1 \text{ eV} = 1{,}60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Poiché le masse dei nuclidi sono molto piccole, esse sono in genere riportate come multipli della **costante di massa atomica**, $m_u = 1{,}66054 \times 10^{-27}$ kg, definita come esattamente uguale a 1/12 della massa di un atomo di carbonio-12:

ESEMPIO 10C.1 Il calcolo dell'energia di legame nucleare

Supponete di essere uno scienziato che lavora allo sviluppo di reazioni di fusione nucleare; a tale scopo, dovreste sapere quanta energia è immagazzinata in un nucleo come energia di legame. Calcolate l'energia di legame (in elettronvolt) per il nucleo dell'elio-4, conoscendo le masse; ^{4}He, $4{,}0026m_u$; ^{1}H, $1{,}0078m_u$; n, $1{,}0087m_u$ con m_u costante di massa atomica ($1{,}66054 \times 10^{-27}$ kg).

PREVISIONE Poiché le reazioni nucleari rilasciano enormi quantità di energia, ci si aspetta un valore molto elevato per l'energia di legame nucleare.

STRATEGIA Si scrive, per cominciare, l'equazione nucleare relativa alla formazione del nuclide dagli atomi di idrogeno e dai neutroni; in secondo luogo si calcola la differenza di massa tra prodotti e reagenti (si considerano gli atomi di H anziché i protoni per tener conto della massa degli elettroni nell'atomo di He); si converte il risultato da costante di massa atomica a kg. In terzo luogo si applica la relazione di Einstein per determinare l'energia corrispondente alla perdita di massa e si convertono le unità in elettronvolt.

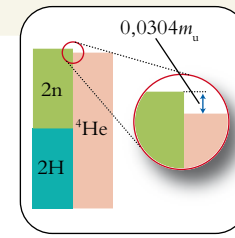
RISOLUZIONE

Si scrive l'equazione nucleare:

$$2\,{}^1\text{H} + 2\,{}^1\text{n} \longrightarrow {}^4\text{He}$$

Si calcola la variazione di massa:

$$\begin{aligned}\Delta m &= m({}^4\text{He}) - (2m_p + 2m_n)\\ &= 4{,}0026m_u - [(2\,(1{,}0078) + (2\,(1{,}0087)]\,m_u\\ &= -0{,}0304m_u\end{aligned}$$



Si converte in kilogrammi:

$$\Delta m = -0{,}0304 \times 1{,}6605 \times 10^{-27} \text{ kg} = -5{,}04\ldots \times 10^{-29} \text{ kg}$$

Si calcola l'energia di legame da $E_{legame} = -\Delta m \times c^2$,

$$\begin{aligned}E_{legame} &= -(-5{,}04\ldots \times 10^{-29} \text{ kg}) \times (3{,}00 \times 10^8 \text{ m·s}^{-1})^2\\ &= 4{,}54\ldots \times 10^{-12} \text{ kg·m}^2\text{·s}^{-2} = 4{,}54\ldots \times 10^{-12} \text{ J}\end{aligned}$$

Si converte l'energia di legame in milioni di elettronvolt:

$$E_{legame} = 4{,}54\ldots \times 10^{-12} \text{ J} \times \frac{1 \text{ eV}}{1{,}602 \times 10^{-19} \text{ J}} \times \frac{1 \text{ MeV}}{10^6 \text{ eV}} = 28{,}4 \text{ MeV}$$

CONCLUSIONE Il valore dell'energia di legame mostra che quando un nucleo ^{4}He si forma dai suoi nucleoni sono rilasciati 4,54 pJ (1 pJ = 10^{-12} J) o 28,4 MeV. Nonostante questa possa sembrare una piccola energia, su scala atomica è invece considerevole, come previsto. L'energia di legame totale di 1 mol di atomi He è $2{,}73 \times 10^{12}$ J, o 2,73 TJ.

Autoesame 10C.1A Calcolate l'energia di legame del nucleo di carbonio-12 in elettronvolt.

[*Risposta*: 92,3 MeV]

Autoesame 10C.1B Calcolate l'energia di legame del nucleo di uranio-235 in elettronvolt. La massa di un atomo di uranio-235 è $235{,}0439m_u$.

Esercizi correlati 10C.3, 10C.4

porati. L'acqua li potrebbe disciogliere e trasportare lontano dall'area di immagazzinamento. Un'alternativa consiste nell'incorporare le scorie radioattive in materiali ceramici duri (vedi *Interludio* al termine del Focus 3), esemplificati dal Synroc, una ceramica a base di titanio, resistente alle fratture, capace di accettare i rifiuti radioattivi nel proprio reticolo.

L'uranio è estratto tramite una serie di reazioni che conducono all'esafluoruro di uranio; gli isotopi si separano poi con vari procedimenti. Una parte dei rifiuti radioattivi attualmente è trasformata in vetri o in materiali ceramici atti a consentirne la conservazione sotto terra.

● Che cosa avete imparato in questo capitolo?

Avete scoperto che l'energia contenuta in un nucleo è espressa come l'energia di legame nucleare che si può calcolare dalla differenza tra le masse del nucleo e dei suoi nucleoni (e, in pratica, dalla massa del nuclide). Inoltre avete scoperto che tale energia può essere liberata; infine, avete avuto qualche cenno sul contributo dato dai chimici nella gestione delle scorie nucleari.

● Quali abilità avete acquisito?

☐ **1.** Calcolare l'energia di legame nucleare date le informazioni sulla massa (Esempio 10C.1).

☐ **2.** Calcolare l'energia che si libera durante una reazione nucleare (Esempio 10C.2).

CAPITOLO 10C Esercizi

10C.1 Il Sole emette energia radiante al tasso di $3{,}9 \times 10^{26}$ $J \cdot s^{-1}$. Qual è la velocità con la quale perde massa (in kilogrammi per secondo)?

10C.2 (a) Per la reazione di fusione $6\ D \rightarrow 2\ {}^4He + 2\ {}^1H + 2\ n$ un certo campione di deuterio libera 3×10^8 kJ di energia (D corrisponde a ${}^2H$) . Qual è (in grammi) la perdita di massa? (b) Qual era la massa del deuterio trasformato? La massa molare del deuterio è $2{,}014\ g \cdot mol^{-1}$.

10C.3 Calcolate l'energia di legame per nucleone ($J \cdot$nucleone^{-1}) di (a) ${}^{62}Ni$, $61{,}928346 m_u$; (b) ${}^{239}Pu$, $239{,}0522 m_u$; (c) ${}^2H$, $2{,}0141 m_u$; (d) ${}^3H$, $3{,}01605 m_u$. (e) Qual è il nuclide più stabile?

10C.4 Calcolate l'energia di legame per nucleone ($J \cdot$nucleone^{-1}) di (a) ${}^{98}Mo$, $97{,}9055 m_u$; (b) ${}^{151}Eu$, $150{,}9196 m_u$; (c) ${}^{56}Fe$, $55{,}9349 m_u$; (d) ${}^{232}Th$, $232{,}0382 m_u$. (e) Qual è il nuclide più stabile?

10C.5 Calcolate l'energia liberata per grammo di materiale di partenza nella reazione di fusione rappresentata da ognuna delle equazioni seguenti.

(a) $D + D \rightarrow {}^3He + n$ (D, $2{,}0141 m_u$; ${}^3He$, $3{,}0160 m_u$)

(b) ${}^3He + D \rightarrow {}^4He + {}^1H$ (${}^1H$, $1{,}0078 m_u$; ${}^4He$, $4{,}0026 m_u$)

(c) ${}^7Li + {}^1H \rightarrow 2\ {}^4He$ (${}^7Li$, $7{,}0160 m_u$)

(d) $D + T \rightarrow {}^4He + n$ (T, $3{,}0160 m_u$); (D corrisponde ad ${}^2H$ e T corrisponde ad ${}^3H$)

10C.6 Calcolate l'energia liberata per grammo di materiale di partenza nella reazione di fusione rappresentata da ognuna delle equazioni seguenti.

(a) ${}^7Li + {}^1H \rightarrow n + {}^7Be$
(${}^1H$, $1{,}0078 m_u$; ${}^7Li$, $7{,}0160 m_u$; ${}^7Be$, $7{,}0169 m_u$)

(b) ${}^{59}Co + D \rightarrow {}^1H + {}^{60}Co$
(${}^{59}Co$, $58{,}9332 m_u$; ${}^{60}Co$, $59{,}9529 m_u$; D, $2{,}0141 m_u$)

(c) ${}^{40}K + \beta \rightarrow {}^{40}Ar$
(${}^{40}K$, $39{,}9640 m_u$; ${}^{40}Ar$, $39{,}9624 m_u$; β, $0{,}0005 m_u$)

(d) ${}^{10}B + n \rightarrow {}^4He + {}^7Li$ (${}^{10}B$, $10{,}0129 m_u$; ${}^4He$, $4{,}0026 m_u$)

10C.7 Il sodio-24 ($23{,}99096 m_u$) decade a magnesio-24 ($23{,}985\ 04 m_u$). (a) Scrivete l'equazione nucleare corrispondente. (b) Determinate la variazione di energia che accompagna il decadimento. (c) Calcolate la variazione di energia di legame a nucleone.

10C.8 (a) Quanta energia viene emessa in ciascun decadimento α del plutonio-234? (${}^{234}Pu$, $234{,}0433 m_u$; ${}^{230}U$, $230{,}0339 m_u$). (b) Il tempo di dimezzamento del plutonio-234 è 8,8 h. Quanto calore si libera a seguito del decadimento α di un campione di 1,00 μg di plutonio-234 nel corso di 24 h?

10C.9 Una delle reazioni di fissione che avvengono all'interno dei reattori nucleari è

$$^{235}_{92}U + {}^1_0n \rightarrow {}^{139}_{56}Ba + {}^{94}_{36}Kr + 3\ {}^1_0n$$

(a) Calcolate l'energia rilasciata (in joules) quando 5,0 g di uranio-235 vanno incontro a questa reazione. La massa degli isotopi è ${}^{235}_{92}U$, $235{,}04 m_u$; ${}^{139}_{56}Ba$, $138{,}91 m_u$; ${}^{94}_{36}Kr$, 93,93; ${}^1_0n$, $1{,}0087 m_u$. (b) Calcolate la massa di carbone che dovrebbe essere bruciata per rilasciare la stessa quantità di energia. Assumete che il carbone sia completamente composto da grafite.

10C.10 Una delle reazioni di fissione che avvengono all'interno dei reattori nucleari è

$$^{235}_{92}U + {}^1_0n \rightarrow {}^{140}_{54}Xe + {}^{92}_{38}Sr + 4\ {}^1_0n$$

(a) Calcolate l'energia rilasciata (in joules) quando 5,0 g di uranio-235 vanno incontro a questa reazione. La massa degli isotopi è ${}^{235}_{92}U$, $235{,}04 m_u$; ${}^{140}_{54}Xe$, $139{,}92 m_u$; ${}^{92}_{38}Sr$, 91,91; ${}^1_0n$, $1{,}0087 m_u$. (b) Calcolate la massa di carbone che dovrebbe essere bruciata per rilasciare la stessa quantità di energia. Assumete che il carbone sia completamente composto da grafite.

Il seguente esempio e gli esercizi integrati attingono al materiale di tutto il Focus 10.

FOCUS 10 Esempio integrato online

La terapia a raggi alfa mirati (*targeted alpha therapy*, TAT) è un trattamento che sta guadagnando importanza come cura contro il cancro. La procedura prevede la somministrazione di un farmaco che contiene un nuclide emettitore di raggi α legato a una molecola attiva assorbita prevalentemente dal tessuto canceroso. Poiché le particelle α sono fortemente dannose per i tessuti molli ma non penetrano molto in profondità il danno cellulare colpisce solo una piccola zona localizzata. State sviluppando nuovi farmaci per la TAT e considerate l'uso dell'astato-211 come sorgente α. Avete però bisogno di comprendere le sue caratteristiche di decadimento. (a) Prevedete l'identità del nucleo figlio che si forma quando ^{211}At subisce un decadimento α e scrivete la reazione nucleare corrispondente. (b) L'energia rilasciata dal decadimento di un nucleo di ^{211}At corrisponde a 5,97 MeV. Prevedete la massa del nuclide figlio sapendo che la massa del ^{211}At è 210,9875m_u e che quella di ^{4}He è 4,0026 m_u. (c) il tempo di dimezzamento del ^{211}At è 7,2 h. Quanto deve attendere un paziente prima che il 95 % del farmaco somministrato contenente ^{211}At abbia subito il decadimento nucleare?

La soluzione dell'Esempio integrato online si trova all'indirizzo **online.universita.zanichelli.it/atkins-principi4e**

FOCUS 10 Esercizi

Il simbolo SI per 1 anno è 1 a. Si utilizzano i prefissi consueti: 1ka = 10^3 a e 1 Ga = 10^9 a.

10.1 Stabilite se le seguenti affermazioni sono vere o false e in quest'ultimo caso spiegate perché. (a) La dose equivalente è minore della dose effettiva di radiazioni perché prende in considerazione i differenti effetti dei diversi tipi di radiazione. (b) L'esposizione a una radiazione di 1×10^8 Bq è più pericolosa dell'esposizione a una di 10 Ci. (c) Il decadimento radioattivo spontaneo segue una cinetica del primo ordine.

10.2 Stabilite se le seguenti affermazioni sono vere o false e in quest'ultimo caso spiegate perché. (a) I nuclei fissili possono subire la fissione per collisione con neutroni lenti, mentre i neutroni veloci sono richiesti per scindere i nuclei fissionabili. (b) Perché avvenga la fusione le particelle che collidono devono possedere energia cinetica elevata. (c) Quanto maggiore è l'energia di legame per nucleone, tanto più stabile è il nucleo.

10.3 (a) Quanti nuclei di radon-222 ($t_{1/2}$ = 3,82 d) decadono al minuto nel produrre un'attività di 4 pCi? (b) Una stanza da bagno in un appartamento seminterrato misura 2,0 m × 3,0 m × 2,5 m. Se l'attività del radon-222 nell'ambiente è di 4,0 pCi·L^{-1}, quanti nuclei si disintegrano durante una doccia che dura 5,0 min?

10.4 Il trizio decade per emissione β, e la particella β emessa ha energia 0,0186 MeV (1 MeV = $1{,}602 \times 10^{-13}$ J). Se un campione di 1,0 g di tessuto assorbe il 10% dei prodotti di decadimento di 1,0 mg di trizio, quale dose equivalente assorbe il tessuto?

10.5 Si constata che $2{,}0 \times 10^{-5}$ mol di atomi di radon-222 ($t_{1/2}$ = 3,82 d) sono filtrati in un seminterrato chiuso del volume di $2{,}0 \times 10^3$ m^3. (a) Qual è l'iniziale attività del radon in picocurie per litro (pCi·L^{-1})? (b) Quanti atomi di ^{222}Rn rimarranno nel tempo di una giornata (24 h)? (c) Quanto impiegherà il radon a decadere fino a un livello inferiore a quello raccomandato di 4 pCi·L^{-1}?

10.6 Un campione radioattivo contiene ^{32}P (tempo di dimezzamento 14,28 d), ^{33}S (tempo di dimezzamento 87,2 d) e ^{59}Fe (tempo di dimezzamento 44,6 d). Dopo 90 giorni il campione della massa originaria di 8,00 g contiene 0,0254 g di ^{32}P, 1,466 g di ^{33}S e 0,744 g di ^{59}Fe. Qual era la composizione percentuale (in massa) del campione originario?

10.7 L'uranio-238 decade attraverso una serie di emissioni α e β fino a piombo-206, con un tempo di dimezzamento complessivo di 4,5 Ga. Quale età avrà un minerale contenente uranio che presenta un rapporto ^{238}U/^{206}Pb di (a) 1,00; (b) 1,25?

10.8 Supponiamo l'esistenza di un pianeta sul quale la vita si basa sul silicio invece che sul carbonio. Tuttavia, l'impatto di un meteorite ha distrutto gran parte delle forme di vita. Per stabilire quanto tempo prima si sia verificato l'impatto si è misurata l'attività del silicio-32, il cui tempo di dimezzamento è pari a $1{,}6 \times 10^2$ a, in reperti fossili di specie morte in seguito all'impatto e in specie ancora in vita. Nei campioni fossili si è trovata un'attività pari allo 0,015% dell'attività dei campioni in vita. Quanto tempo fa si è verificato l'impatto?

10.9 Il tecnezio-99m si produce con una sequenza di reazioni nelle quali il molibdeno-98 viene bombardato con neutroni per formare il molibdeno-99, che subisce una disintegrazione β convertendosi in tecnezio-99m. (a) Scrivete le equazioni nucleari bilanciate per la sequenza. (b) Confrontate il rapporto neutroni/protoni del prodotto finale con quello del molibdeno-99m. Quale è più vicino alla banda di stabilità?

10.10 L'attinio-225 decade mediante l'emissione in successione di tre particelle α. (a) Scrivete le equazioni nucleari per i tre processi di decadimento. (b) Confrontate il rapporto neutroni/protoni del prodotto finale con quello dell'attinio-225. Quale è più vicino alla banda di stabilità?

10.11 Quale volume di elio sarà raccolto a 1,0 atm e 298 K se si conservano 2.5 g di ^{222}Rn in un recipiente in grado di espandersi per rimanere a pressione costante per 23 d? (^{222}Rn decade a ^{218}Po con tempo di dimezzamento di 3,824 d.)

10.12 Si pensa di realizzare un deposito di scorie radioattive nelle vicinanze del vostro paese e vi viene chiesto di predisporre una perizia sul livello di trattamento che le scorie radioattive devono subire e sulle modalità di immagazzinamento. Nel vostro documento prendete in esame i vantag-

gi e gli svantaggi di almeno tre modalità di stoccaggio dei rifiuti radioattivi.

10.13 La radioattività di un campione di $Na_2{}^{14}CO_3$ è stata misurata registrando il tempo richiesto per conteggiare 8000 decadimenti. Si sono registrati cinque tempi: 21,25, 23,46, 20,97, 22,54 e 23,01 min. Si è misurata la radiazione di fondo registrando il tempo necessario per 500 decadimenti: 5,26, 5,12 e 4,95 min. Qual è il livello medio di radioattività nel campione di $Na_2{}^{14}CO_3$ corretto per la radiazione di fondo in (a) decadimenti al minuto, (b) microcurie?

10.14 (a) Utilizzando un programma per l'elaborazione dei grafici, riportate in grafico la frazione di ^{14}C che rimane in un campione archeologico di 40.0 ka in funzione del tempo. Per convenienza utilizzate intervalli di 1000 a. (b) Riportate in grafico il logaritmo naturale della frazione di ^{14}C che rimane in funzione del tempo. (c) Dopo quanto tempo nel campione rimane meno dell'1,00% del ^{14}C originale?

10.15 I prodotti radiofarmaceutici servono a due scopi generali: (1) possono essere utilizzati per *rilevare* o per fornire l'*immagine* di problemi biologici come i tumori, e (2) possono essere applicati alla *cura* di una malattia. Quale tipo di radiazione (α, β o γ) sarebbe più adatta (a) alla rilevazione e (b) alla terapia? Giustificate le risposte. (c) Reperite in letteratura il nome di almeno due nuclidi che siano serviti a costruire l'immagine dei tessuti organici. (d) Qual è il tempo di dimezzamento di questi due nuclidi?

10.16 Gli ioni dei metalli radioattivi che presentano tempo di dimezzamento breve sono oggetto di ricerca intensa in campo farmaceutico. La strategia consiste nel fissare un ligando ben progettato a uno ione metallico in maniera che il complesso si aggreghi con selettività elevata a un particolare tipo di tessuto. Quali proprietà del ligando sono importanti per progettare agenti terapeutici efficaci nel campo dei radiofarmaci?

10.17 Il sodio-24 è usato per registrare la circolazione sanguigna. (a) Se 2,0 mg di sodio presentano un'attività di 17,3 Ci, qual è la costante di disintegrazione e quale il tempo di dimezzamento? (b) Quale massa di sodio-24 è rimasta dopo 2,0 d? La massa di un atomo di sodio-24 è $24m_u$.

10.18 Il positrone possiede la stessa massa dell'elettrone, ma carica contraria. Quando un positrone emesso da una macchina PET incontra un elettrone, nell'organismo si verifica l'annichilimento: si produce energia elettromagnetica e non rimane alcuna materia. Quanta energia (in joule) genera l'incontro? Vedi Scheda 10A.1.

10.19 I nuclei che emettono positroni si situano al di sopra o al di sotto della banda di stabilità? Quale degli isotopi seguenti sarebbe indicato per eseguire la PET? Spiegate il vostro ragionamento e scrivete l'equazione relativa al decadimento: (a) ^{18}O; (b) ^{13}N; (c) ^{11}C; (d) ^{20}F; (e) ^{15}O. Vedi Scheda 10A.1.

10.20 Il tempo di dimezzamento biologico di un radioisotopo è il tempo necessario al corpo per l'escrezione di metà della sua quantità iniziale. Il *tempo di dimezzamento effettivo* è il tempo necessario perché un radioisotopo nel corpo si riduca a metà della sua quantità iniziale attraverso il processo cumulativo di decadimento nucleare ed escrezione. Lo zolfo-35 ($t_{1/2}$= 87,4 d) è usato nella ricerca contro il cancro. Il suo tempo di dimezzamento biologico nel corpo è 90 d. Qual è il tempo di dimezzamento effettivo dello zolfo-35?

10.21 Il bario-140 ($t_{1/2}$= 12,8 d) è stato rilasciato nell'incendio dell'impianto nucleare di Chernobyl e ha contaminato alcuni prodotti agricoli della regione. Il suo tempo di dimezzamento biologico nel corpo è 65 d. Qual è il tempo di dimezzamento effettivo del bario-140 (vedi Esercizio 10.20)?

FOCUS 10 Esercizio integrato

10.22 Una persona affetta da anemia perniciosa è carente di un «fattore intrinseco», un composto essenziale per l'assorbimento della vitamina B_{12} e per il suo immagazzinamento nel fegato. La diagnosi trova conferma con il test di Schilling. In questo test il paziente assume una piccola dose di vitamina B_{12} marcata con isotopi radioattivi del cobalto (^{57}Co o ^{58}Co) e in seguito una dose saturante di B_{12} non marcata che rilascia quella immagazzinata. Se il paziente possiede il fattore intrinseco, il campione di urine raccolto nelle 24 ore conterrà il 13-15% della B_{12} marcata, se il fattore intrinseco è assente ne sarà secreto meno del 6%. Successivamente si somministra al paziente il fattore intrinseco e si ripete il test per un confronto. Nell'esecuzione di un test di Schilling, un paziente ha assunto una capsula contenente 0,5 μCi di $^{58}CoB_{12}$, seguita da 1,0 mg di B_{12} non marcata. Nell'arco delle 24 ore si sono raccolti 1200 mL di urine. Un campione di 3,0 mL di urine ha fornito 83 cpm (conteggi al minuto) e un campione standard di pari volume contenente 0,40 nCi per mL ha fornito 910 cpm. Il test è stato ripetuto una settimana dopo con la somministrazione di 30 mg del fattore intrinseco. Il campione di 3,0 mL di urine del secondo test ha fornito 120 cpm. Il tempo di dimezzamento di ^{58}Co è 72 d.

(a) Calcolate la percentuale di ^{58}Co eliminata per escrezione con e senza il fattore intrinseco. Assumete che il primo test non contamini il secondo.

(b) Quale sarebbe l'attività di $^{58}CoB_{12}$ nella capsula originaria posto che fosse stata conservata per 7 giorni?

(c) Se il tempo di dimezzamento biologico di B_{12} è 180 giorni, qual è il tempo di dimezzamento effettivo di $^{58}CoB_{12}$ nel corpo del paziente? Vedi l'Esercizio 10.20.

(d) Utilizzate il tempo di dimezzamento effettivo di $^{58}CoB_{12}$ per determinare quale frazione dei conteggi del secondo test sia imputabile alla dose assunta nel primo test.

(e) Il radioisotopo ^{58}Co decade in un altro radioisotopo, ^{59}Fe. La massa totale del ferro nel paziente era di 2,5 g. Se tutto il ^{59}Fe prodotto dal primo test fosse incorporato nell'emoglobina, quale percentuale del ferro totale sarebbe dovuta al ^{59}Fe il giorno dopo il test? Trascurate il decadimento di ^{59}Fe.