

# Spis treści

<b>Wstęp</b> .....	<b>15</b>
<b>I Fizyka jądra atomowego</b> .....	<b>17</b>
<b>1 Energia i jej przemiany</b> .....	<b>19</b>
1.1 Energia – w jaki sposób rozumiemy to pojęcie?.....	20
1.2 Energia a świat i ludzie .....	20
1.3 Ilościowe ujęcie zasady zachowania energii .....	23
1.4 Energia całkowita, energia wewnętrzna, silniki cieplne i pojęcie sprawności .....	25
1.5 Praca, moc, uogólnienie pojęcia sprawności. ....	28
1.6 „Odnawialne” źródła energii .....	33
1.7 Energia i jej przemiany, moc i sprawność – przykłady .....	35
1.8 Skąd możemy czerpać potrzebną energię? .....	41
1.9 Wartość energetyczna materiałów .....	42
1.10 Sprawdź się .....	43
1.11 Dodatek: proponowane ćwiczenia laboratoryjne.....	45
<b>2 Promieniowanie i jego rodzaje</b> .....	<b>47</b>
2.1 Promieniowanie jako sposób przekazywania energii na odległość.....	48
2.2 Fale i cząstki .....	49
2.3 Gdy cząstka ma prędkość zbliżoną do prędkości światła .....	55
2.4 Sprawdź się .....	58
2.5 Dodatek: proponowane ćwiczenie laboratoryjne.....	58
<b>3 Widmo promieniowania elektromagnetycznego</b> .....	<b>59</b>
3.1 Widmo promieniowania .....	60
3.2 Podstawowe źródła i odbiorniki fal elektromagnetycznych.....	61
3.3 Promieniowanie ciała doskonale czarnego .....	64
3.4 Wykorzystanie fal elektromagnetycznych, widma źródeł światła .....	68
3.5 Przykładowe zadania.....	73
<b>4 Budowa atomu i jego promieniowanie</b> .....	<b>77</b>
4.1 Pierwiastki i atomy, a także trochę historii .....	78
4.2 Orbity elektronowe – co to jest? .....	86
4.3 Jak w bardziej precyzyjny sposób opisać elektrony w atomie?.....	91

4.4	Energia wiązania, poziomy i pasma elektronowe.....	94
4.5	Sprawdź się .....	96
<b>5</b>	<b>Jądro atomowe.....</b>	<b>99</b>
5.1	Małe, ale masywne.....	100
5.2	Izotopy, nuklidy i ich masy.....	101
5.3	Energia wiązania .....	106
5.4	Promieniotwórczość jąder .....	109
5.4.1	Promieniowanie $\alpha$ .....	110
5.4.2	Promieniowanie $\beta$ .....	113
5.4.3	Promieniowanie $\gamma$ .....	116
5.5	Aktywność preparatu promieniotwórczego .....	117
5.6	Kilka słów o historii odkrycia zjawiska promieniotwórczości.....	119
5.7	Czy nukleon jest niepodzielny? O skali przedmiotów i dualizmie korpuskularno-falowym.....	121
5.8	Sprawdź się .....	123
5.9	Dodatek: proponowane ćwiczenia laboratoryjne.....	124
<b>6</b>	<b>Źródła i właściwości promieniowania jonizującego.....</b>	<b>125</b>
6.1	Zjawisko jonizacji. Przykłady średniej energii jonizacji różnych substancji.....	126
6.2	Jonizacja ośrodków promieniowaniem korpuskularnym.....	128
6.2.1	Jonizacja ośrodka elektronami.....	128
6.2.2	Jonizacja protonami i jonami.....	129
6.2.3	Jonizacja (pośrednia) neutronami.....	129
6.2.4	Jonizacja fotonami .....	130
6.2.5	Zasięg różnych rodzajów promieniowania .....	131
6.2.6	Oslabianie wiązek fotonowych w materii .....	134
6.3	Źródła promieniowania jonizującego (jądrowego i niejądrowego) .....	135
6.4	Rozchodzenie się promieniowania w przestrzeni. Prędkości różnych rodzajów cząstek w próżni .....	137
6.5	Oznaczenia stosowane w pracy ze źródłami promieniowania jonizującego .....	139
6.6	Sprawdź się .....	140
	Uzupełnienie 1. Zasięgi elektronów .....	141
	Uzupełnienie 2. Zasięgi cząstek $\alpha$ .....	141
	Uzupełnienie 3. Grubości połówkowe dla fotonów w wodzie i ołowiu.....	142
<b>II</b>	<b>Człowiek a promieniowanie jonizujące.....</b>	<b>143</b>
<b>7</b>	<b>Podstawy ochrony radiologicznej .....</b>	<b>145</b>
7.1	Uwagi wstępne .....	146
7.2	Dawka .....	148
7.3	Dawka równoważna (równoważnik dawki) .....	149
7.4	Dawka skuteczna .....	150
7.5	Moc dawki.....	151
7.6	Ilość materiału promieniotwórczego, równowaga promieniotwórcza.....	152

7.7	Czy wiemy, w jaki sposób chronić się przed promieniowaniem jonizującym? .....	154
7.8	Narażenie radiacyjne ludności .....	155
7.9	Narażenie zawodowe: dawki graniczne .....	156
7.10	Przykładowe zadania .....	158
7.11	Sprawdź się .....	162
7.12	Dodatek: proponowane ćwiczenia laboratoryjne .....	163
<b>8</b>	<b>Biologiczny wpływ promieniowania na organizmy .....</b>	<b>165</b>
8.1	Szkodliwość substancji jako efekt dawki .....	166
8.2	Mechanizm działania promieniowania jonizującego na organizm .....	172
8.3	Efekty napromienienia organizmu promieniowaniem jonizującym .....	176
8.3.1	Skutki deterministyczne .....	177
8.3.2	Skutki stochastyczne (późne) .....	179
8.4	Pomysł, podyskutuj .....	182
8.5	Sprawdź się .....	183
<b>9</b>	<b>Promieniowanie środowiska .....</b>	<b>185</b>
9.1	Wstęp .....	186
9.2	Naturalna promieniotwórczość skał i składników atmosfery .....	186
9.2.1	Radon .....	190
9.2.2	Inne substancje promieniotwórcze w atmosferze .....	191
9.3	Zagadnienia pomiarowe .....	193
9.4	Naturalna promieniotwórczość wewnętrzna organizmów .....	195
9.5	Cywilizacyjne źródła promieniowania jonizującego .....	195
9.6	Sprawdź się .....	199
	Uzupełnienie 1. Dane niektórych izotopów promieniotwórczych .....	199
	Uzupełnienie 2. Opad promieniotwórczy w Polsce .....	200
	Uzupełnienie 3. Roczna dawka dla ludności świata w latach 1945–2000 .....	201
<b>III</b>	<b>Pomiary jądrowe .....</b>	<b>203</b>
<b>10</b>	<b>Detektory promieniowania jonizującego .....</b>	<b>205</b>
10.1	Podstawowe sposoby klasyfikacji detektorów .....	206
10.2	Czas martwy, czas żywy i czas rzeczywisty .....	206
10.3	Klisza światłoczuła .....	208
10.4	Elektrometr .....	210
10.5	Komora mgłowa i komora pęcherzykowa .....	211
10.6	Detektory gazowe .....	214
10.6.1	Komora jonizacyjna .....	216
10.6.2	Licznik proporcjonalny .....	218
10.6.3	Detektor Geigera–Müllera .....	220
10.7	Detektory scyntylacyjne .....	223
10.7.1	Scyntylatory nieorganiczne .....	226
10.7.2	Scyntylatory organiczne .....	227
10.7.3	Ciekłe scyntylatory .....	227
10.8	Detektory półprzewodnikowe .....	228
10.9	Detektory termoluminescencyjne .....	230

10.10	Detektory neutronów .....	231
10.11	Sprawdź się .....	233
<b>11</b>	<b>Pomiar promieniowania jonizującego .....</b>	<b>235</b>
11.1	Układ pomiarowy .....	236
11.2	Zasilacze niskiego i wysokiego napięcia .....	236
11.3	Separacja i przekazywanie impulsów .....	237
11.4	Wzmacniacze impulsów .....	241
11.5	Dyskryminatory amplitudy .....	242
11.6	Liczniki impulsów .....	242
11.7	Analizatory amplitudy .....	244
11.8	Układy koincydencji .....	246
11.9	Wpływ sprzętu na jakość pomiaru .....	248
11.10	Różne konfiguracje układów pomiarowych .....	250
11.10.1	Układ pomiarowy z komorą jonizacyjną .....	250
11.10.2	Układ pomiarowy z detektorem Geigera-Müllera .....	251
11.10.3	Układ pomiarowy z detektorem scyntylacyjnym .....	251
11.10.4	Układ pomiarowy z detektorem półprzewodnikowym .....	252
11.11	Kalibracja energetyczna .....	252
11.12	Kalibracja wydajnościowa .....	256
11.13	Kalibracja wskazań dawki i mocy dawki .....	257
11.14	Sprawdź się .....	260
<b>12</b>	<b>Opracowywanie danych pomiarowych .....</b>	<b>261</b>
12.1	Statystyczny charakter pomiaru promieniowania .....	262
12.2	Metoda najmniejszych kwadratów .....	263
12.3	Odchylenie standardowe .....	267
12.4	Histogram .....	272
12.5	Rozkład jednorodny, rozkład Gaussa, rozkład Poissona .....	274
12.6	Inne wielkości używane do opisu rozkładów .....	277
12.6.1	Mediana .....	277
12.6.2	Średnia ważona .....	277
12.7	Przedziały ufności i współczynnik poszerzenia .....	278
12.8	Dopasowywanie funkcji do danych eksperymentalnych .....	280
12.9	Niepewności pomiarowe .....	283
12.9.1	Pomiary bezpośrednie .....	283
12.9.2	Pomiary pośrednie .....	285
12.10	Sprawdź się .....	290
12.11	Uzupełnienie .....	291
12.11.1	Zadanie nadprogramowe: rozpad promieniotwórczy .....	291
12.11.2	Przykład dopasowania prostej metodą najmniejszych kwadratów .....	293
<b>13</b>	<b>Czy naszym życiem rządzą chaos? .....</b>	<b>297</b>
13.1	Nieprzewidywalność w świecie kwantowym .....	298
13.2	Nieprzewidywalność w świecie makroskopowym .....	301
13.2.1	Problem wielu ciał .....	301

13.2.2	Mała zmiana warunków początkowych	302
13.2.3	Zaokrąglanie wyników – chaos deterministyczny	302
13.2.4	Przypadek chaosu deterministycznego z życia zwierząt	306
13.2.5	Hydrozagadka	308
13.3	Procesy stochastyczne a determinizm	310
13.3.1	Błądzenie przypadkowe	310
13.3.2	Katastrofy: lawiny, pożary itp.	310
13.4	Sprawdź się	311
<b>IV</b>	<b>Przemiany jądrowe</b>	<b>313</b>
<b>14</b>	<b>Urządzenia wytwarzające promieniowanie jonizujące</b>	<b>315</b>
14.1	Ruch cząstek naładowanych w polu elektrycznym i magnetycznym	316
14.2	Lampa rentgenowska; promieniowanie hamowania	321
14.3	Akceleratory cząstek naładowanych	323
14.3.1	Akceleratory liniowe	323
14.3.2	Akceleratory cykliczne	327
14.4	Źródła neutronowe	334
14.5	Sprawdź się	336
14.6	Dodatek: proponowane ćwiczenia laboratoryjne	336
<b>15</b>	<b>Reakcje jądrowe i sztuczna promieniotwórczość</b>	<b>337</b>
15.1	Wstęp	338
15.2	Reakcja jądrowa jako wymuszona przemiana jądrowa	338
15.3	Ogólny opis reakcji jądrowych	340
15.4	Reakcje z neutronami	344
15.5	Reakcje z protonami	346
15.6	Spalacja, czyli kruszenie jąder atomowych wysokoenergetycznymi protonami	347
15.7	Reakcje z fotonami	348
15.8	Reakcje syntezy źródłem światła gwiazd	348
15.9	Reakcje z ciężkimi jonami	350
15.10	Sprawdź się	351
15.11	Uzupełnienie	352
<b>V</b>	<b>Elementy energetyki jądrowej</b>	<b>353</b>
<b>16</b>	<b>Reakcja rozszczepienia</b>	<b>355</b>
16.1	Nuklidy rozszczepialne i paliworodne	356
16.2	Prawdopodobieństwo rozszczepienia – przekroje czynne	360
16.3	Warunki zajścia reakcji rozszczepienia	361
16.4	Co po rozszczepieniu? Neutrony opóźnione	363
16.5	Kilka słów o historii korzystania z energii rozszczepienia	365
16.6	Sprawdź się	369
<b>17</b>	<b>Reaktor jądrowy i jego działanie</b>	<b>371</b>
17.1	Reakcja łańcuchowa	372
17.2	Naturalne reaktory	373

17.3	Elementy konstrukcyjne reaktora jądrowego .....	375
17.4	Paliwo.....	378
17.5	Moderator i reflektor.....	381
17.6	Współczynnik mnożenia neutronów w reaktorze.....	384
17.7	Rozmiary krytyczne reaktora.....	389
17.8	Sterowanie reaktorem .....	391
17.9	Reaktywność i jej wpływ na kinetykę oraz dynamikę reaktora .....	394
17.10	Elementy paliwowe .....	397
17.11	Zatrucie reaktora .....	398
17.12	Chłodzenie reaktora .....	401
17.13	Wypalanie paliwa.....	402
17.14	Sprawdź się .....	404
<b>18</b>	<b>Zastosowania reaktorów jądrowych. Energetyka jądrowa .....</b>	<b>407</b>
18.1	Podstawy klasyfikacji reaktorów jądrowych .....	408
18.2	Reaktor wodno-ciśnieniowy PWR .....	409
18.3	Reaktor z wrzącą wodą BWR.....	411
18.4	Reaktory kanałowe: RBMK i CANDU.....	413
18.5	Reaktory chłodzone gazem AGR .....	417
18.6	Reaktory wysokotemperaturowe.....	417
18.7	Reaktory powielające.....	420
18.8	Reaktory ciepłownicze .....	423
18.9	Reaktory energetyczne w skrócie .....	425
18.10	Reaktory badawcze .....	427
	18.10.1 Reaktory stacjonarne .....	427
	18.10.2 Spalacyjne źródła neutronów .....	429
	18.10.3 Reaktor impulsowy.....	432
18.11	Sprawdź się .....	433
<b>19</b>	<b>Cykl paliwowy .....</b>	<b>435</b>
19.1	Cykl paliwowy .....	436
19.2	Transmutacja i spalanie.....	439
19.3	Układy sterowane akceleratorami (ADS) .....	443
19.4	Sprawdź się .....	449
<b>20</b>	<b>Synteza jądrowa .....</b>	<b>451</b>
20.1	Reakcja syntezy jądrowej i jej bilans energetyczny.....	452
20.2	Plazma – „czwarty stan materii” .....	454
	20.2.1 Klasyfikacja plazmy .....	458
	20.2.2 Źródła plazmy i metody jej wytwarzania.....	459
	20.2.3 Przykłady technicznych zastosowań plazmy.....	461
20.3	Reakcja syntezy jądrowej w warunkach ziemskich .....	465
20.4	Projekt ITER.....	472
20.5	Energia gwiazd i pochodzenie pierwiastków we Wszechświecie .....	475
20.6	Sprawdź się .....	479

<b>VI</b>	<b>Wykorzystanie promieniowania jądrowego</b>	<b>481</b>
<b>21</b>	<b>Zastosowania medyczne</b>	<b>483</b>
21.1	Promieniowanie jonizujące i izotopy promieniotwórcze we współczesnej medycynie	484
21.2	Tomografia komputerowa (TK)	488
21.3	Tomografia emisyjna pojedynczych fotonów (SPECT)	491
21.4	Pozytonowa tomografia emisyjna (PET)	493
21.5	Radioterapia nowotworów	496
21.6	Sprawdź się	502
<b>22</b>	<b>Zastosowania naukowe</b>	<b>503</b>
22.1	Poznanie struktury materii	504
22.1.1	Kilka uwag wstępnych	504
22.1.2	Jakie promieniowanie wybrać?	504
22.1.3	Neutrony reaktorowe i promieniowanie rentgenowskie w badaniach strukturalnych	508
22.1.4	Tomografia neutronowa i rentgenowska	515
22.2	Badania własności jąder atomowych i nukleonów	516
22.3	Techniki badań wykorzystujących próbniki lokalne	517
22.3.1	Anihilacja pozytonów i efekt Comptona	517
22.3.2	Miony w materii	521
22.3.3	Efekt Mössbauera	522
22.4	Rentgenowska analiza fluorescencyjna	526
22.4.1	Uwagi na temat analizy ilościowej	527
22.4.2	Metody radioizotopowe wzbudzenia fluorescencji rentgenowskiej	527
22.4.3	Wykorzystanie promieniowania korpuskularnego	529
22.5	Neutronowa analiza aktywacyjna (NAA)	532
22.6	Analiza aktywacyjna przy użyciu protonów	534
22.7	Datowanie izotopowe	535
22.8	Sprawdź się	538
22.9	Dodatek: proponowane ćwiczenia laboratoryjne	538
<b>23</b>	<b>Zastosowania przemysłowe</b>	<b>539</b>
23.1	Radioizotopowe metody pomiarowe	540
23.1.1	Wstęp	540
23.1.2	Radioznaczniki w akcji	540
23.1.3	Metody transmisyjne	543
23.1.4	Metody rozproszeniowe	543
23.1.5	Utrwalanie żywności promieniowaniem	544
23.1.6	Wykorzystanie elektronów i źródeł promieniowania $\beta$	546
23.1.7	Wykorzystanie promieniowania $\alpha$	549
23.1.8	Napędy jądrowe	551
23.1.9	Techniki radiacyjne – kilka uwag	559
23.2	Energia jądrowa dla produkcji wodoru	560

23.3	Energia jądrowa dla odsalania wody .....	564
23.4	Neutronowa analiza aktywacyjna (NAA) .....	569
23.5	Inne przemysłowe zastosowania neutronów .....	569
23.6	Warto zapamiętać .....	572
23.7	Sprawdź się .....	573
<b>24</b>	<b>Odpady promieniotwórcze i ich transport .....</b>	<b>575</b>
24.1	Odpady promieniotwórcze i ich klasyfikacja .....	576
24.2	Zasady postępowania z nisko- i średnioaktywnymi odpadami promieniotwórczymi .....	577
24.3	Wybór miejsca na składowisko odpadów promieniotwórczych .....	583
24.4	Wypalone paliwo reaktorowe .....	585
24.5	Składowanie wysokoaktywnych odpadów promieniotwórczych .....	590
24.6	Transport materiałów promieniotwórczych .....	591
24.7	Elektrownia jądrowa po okresie eksploatacji .....	597
24.8	Sprawdź się .....	598
<b>25</b>	<b>Porównanie różnych źródeł energii elektrycznej .....</b>	<b>599</b>
25.1	Wprowadzenie .....	600
25.2	Różne typy elektrowni .....	600
25.2.1	Elektrownie węglowe i elektrociepłownie .....	600
25.2.2	Elektrownie gazowe .....	602
25.2.3	Spalarnie śmieci .....	602
25.2.4	Elektrownie na biomasę .....	603
25.2.5	Elektrownie wodne .....	603
25.2.6	Elektrownie wiatrowe .....	604
25.2.7	Elektrownie słoneczne .....	605
25.3	Sytuacja energetyczna Polski .....	606
25.4	Ekonomiczne aspekty energetyki .....	608
25.5	Perspektywy rozwoju .....	609
25.6	Sprawdź się .....	610
<b>26</b>	<b>Dodatki .....</b>	<b>611</b>
<b>A</b>	<b>Odpowiedzi i podpowiedzi do zadań „Sprawdź się” .....</b>	<b>613</b>
<b>B</b>	<b>Słowniczek najważniejszych pojęć .....</b>	<b>621</b>
<b>C</b>	<b>Literatura .....</b>	<b>631</b>
<b>D</b>	<b>Spis rysunków .....</b>	<b>635</b>
<b>E</b>	<b>Spis tabel .....</b>	<b>653</b>