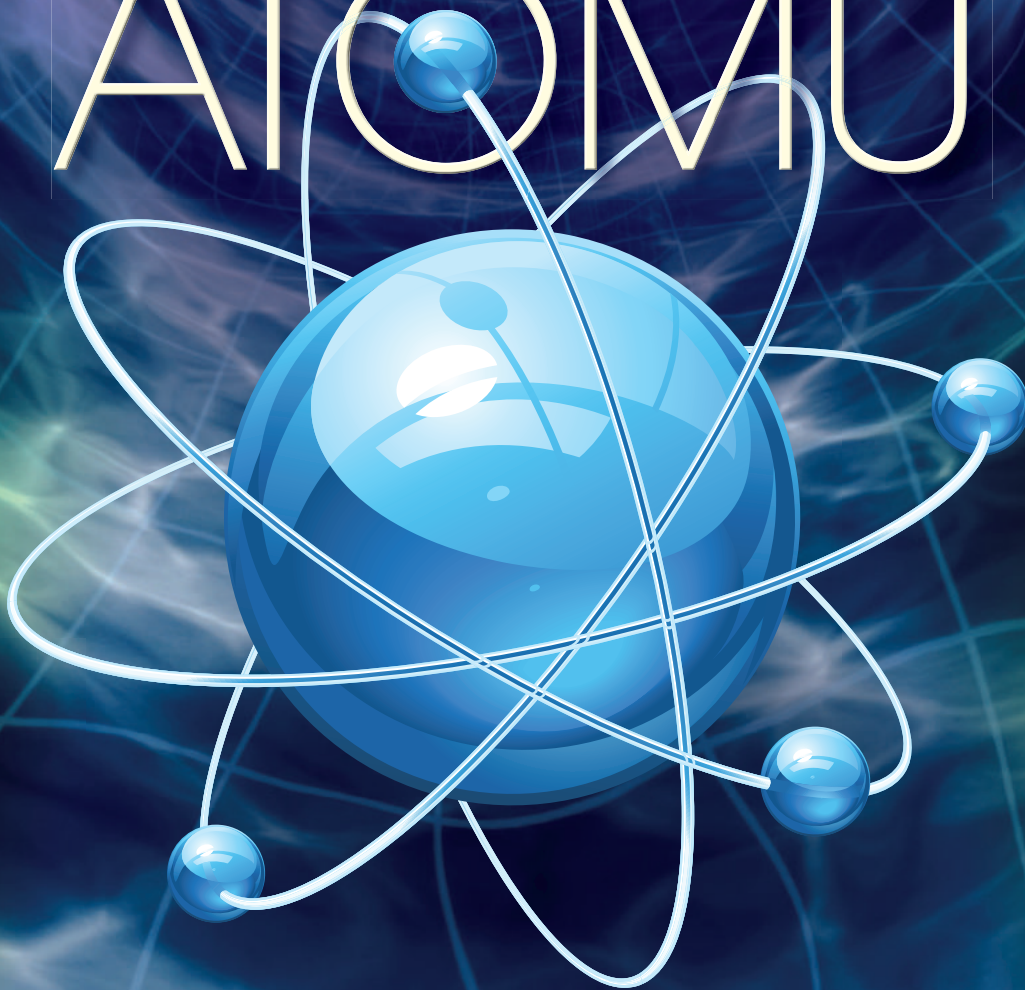


Zofia Leś

podstawy

FIZYKI ATOMU



Struktura elektronowa pierwiastków (dla uproszczenia zapisu konfiguracje elektronowe zamkniętych powłok wewnętrznych zostały zastąpione symbolami odpowiednich gazów szlachetnych)

	Pierwiastek		Konfiguracja elektronowa	Stan podstawowy
1	H	wodór	1s	$^2S_{1/2}$
2	He	hel	1s ²	1S_0
3	Li	lit	(He) 2s	$^2S_{1/2}$
4	Be	beryl	(He) 2s ²	1S_0
5	B	bor	(He) 2s ² 2p	$^2P_{1/2}$
6	C	węgiel	(He) 2s ² 2p ²	3P_0
7	N	azot	(He) 2s ² 2p ³	$^4S_{3/2}$
8	O	tlen	(He) 2s ² 2p ⁴	3P_2
9	F	fluor	(He) 2s ² 2p ⁵	$^2P_{3/2}$
10	Ne	neon	(He) 2s ² 2p ⁶	1S_0
11	Na	sód	(Ne) 3s	$^2S_{1/2}$
12	Mg	magnez	(Ne) 3s ²	1S_0
13	Al	glin	(Ne) 3s ² 3p	$^2P_{1/2}$
14	Si	krzem	(Ne) 3s ² 3p ²	3P_0
15	P	fosfor	(Ne) 3s ² 3p ³	$^4S_{3/2}$
16	S	siarka	(Ne) 3s ² 3p ⁴	3P_2
17	Cl	chlor	(Ne) 3s ² 3p ⁵	$^2P_{3/2}$
18	Ar	argon	(Ne) 3s ² 3p ⁶	1S_0
19	K	potas	(Ar) 4s	$^2S_{1/2}$
20	Ca	wapń	(Ar) 4s ²	1S_0
21	Sc	skand	(Ar) 3d 4s ²	$^2D_{3/2}$
22	Ti	tytan	(Ar) 3d ² 4s ²	3F_2
23	V	wanad	(Ar) 3d ³ 4s ²	$^4F_{3/2}$
24	Cr	chrom	(Ar) 3d ⁵ 4s	7S_3
25	Mn	mangan	(Ar) 3d ⁵ 4s ²	$^6S_{5/2}$
26	Fe	żelazo	(Ar) 3d ⁶ 4s ²	5D_4
27	Co	kobalt	(Ar) 3d ⁷ 4s ²	$^4F_{9/2}$
28	Ni	nikiel	(Ar) 3d ⁸ 4s ²	3F_4
29	Cu	miedź	(Ar) 3d ¹⁰ 4s	$^2S_{1/2}$
30	Zn	cynk	(Ar) 3d ¹⁰ 4s ²	1S_0
31	Ga	gal	(Ar) 3d ¹⁰ 4s ² 4p	$^2P_{1/2}$
32	Ge	german	(Ar) 3d ¹⁰ 4s ² 4p ²	3P_0
33	As	arsen	(Ar) 3d ¹⁰ 4s ² 4p ³	$^4S_{3/2}$
34	Se	selen	(Ar) 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴	3P_2
35	Br	brom	(Ar) 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵	$^2P_{3/2}$
36	Kr	krypton	(Ar) 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶	1S_0
37	Rb	rubid	(Kr) 5s	$^2S_{1/2}$
38	Sr	stront	(Kr) 5s ²	1S_0

podstawy

FIZYKI

ATOMU

Zofia Leś

—
podstawy

FIZYKI ATOMU



Projekt okładki i stron tytułowych *Przemysław Spiechowski*

Ilustracja na okładce *AND Inc/Shutterstock*
Vladfoto/Shutterstock

Recenzent *prof. dr hab. Jan Godlewski*

Wydawca *Izabela Ewa Mika*

Redaktor *Anna Bogdanienko*

Produkcja *Mariola Grzywacka*

Skład i łamanie *Grafini, Brwinów*

Publikacja dofinansowana przez Wydział Fizyki, Astronomii
i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2015

ISBN 978-83-01-18014-0

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
tel. 22 69 54 321; faks 22 69 54 288
e-mail: pwn@pwn.com.pl; www.pwn.pl
Druk i oprawa: Pabianickie Zakłady Graficzne SA

Spis treści

Przedmowa	XXI
1. Wiadomości wstępne	1
2. Stara teoria kwantów. Atom wodoru	30
3. Odkrycie mechaniki kwantowej	65
4. Podstawowe pojęcia mechaniki kwantowej	106
5. Atom wodoru w mechanice kwantowej	149
6. Systematyka poziomów energetycznych atomów wieloelektronowych	187
7. Zasada Pauliego. Okresowy układ pierwiastków	227
8. Zarys teorii promieniowania	270
9. Ogólna struktura optycznych widm atomowych	322
10. Struktura liniowych widm rentgenowskich	365
11. Wpływ jądra na strukturę widm atomowych	390
12. Atom w polu magnetycznym	429
13. Atom w polu elektrycznym	468
14. Atomowa spektroskopia laserowa	488
15. Fizyka zimnych atomów	528
Uzupełnienie. Dielektryczne pokrycia cienkowarstwowe	575
Literatura	589
Skorowidz	595

Spis treści szczegółowy

Przedmowa	XXI
1. Wiadomości wstępne	1
1.1. Przedmiot fizyki atomu	1
1.2. Widma atomowe	3
1.2.1. Charakterystyczne wielkości promieniowania atomowego	4
A. Równanie fali elektromagnetycznej	4
B. Długość fali – jednostki	5
C. Częstość i liczba falowa – jednostki	6
D. Energia – jednostki	7
1.2.2. Rejestracja widm	10
1.3. Widma emisyjne	12
1.3.1. Widma liniowe, pasmowe i ciągłe – uwagi ogólne	12
A. Widma liniowe	12
B. Widma pasmowe	14
C. Widma ciągłe	15
1.3.2. Widma ciągłe – przykłady	15
A. Promieniowanie ciała doskonale czarnego; wzór Plancka	15
B. Promieniowanie termiczne i luminescencyjne	17
C. Ciągłe promieniowanie optyczne	19
D. Ciągłe promieniowanie rentgenowskie	19
E. Promieniowanie synchrotronowe	21
1.3.3. Widma absorpcyjne	23
1.4. Początki spektroskopii atomowej	24
1.4.1. Pierwsze pomiary spektroskopowe	24
A. Linie Fraunhofera	24
B. Rozwój techniki pomiarowej	25
1.4.2. Pierwsze poszukiwania prawidłowości w widmach atomowych	26
1.5. Serie widmowe	26
1.5.1. Odkrycie Balmera	27
1.5.2. Terminy. Zasada kombinacji Ritza	27
1.5.3. Serie wodorowe	28

2. Stara teoria kwantów. Atom wodoru	30
2.1. Bohra teoria atomu wodoru	30
2.1.1. Prosty oscylator harmoniczny Plancka	30
2.1.2. Pierwsze modele atomu	33
A. Model Thomsona	33
B. Model Rutherforda	33
2.1.3. Postulaty kwantowe Bohra	34
2.1.4. Wyprowadzenie wzoru Rydberga	35
A. Energia stanu stacjonarnego	35
B. Przejścia promieniste w atomie	37
C. Stała Rydberga dla jądra nieruchomego	38
D. Terminy	39
2.2. Graficzna ilustracja atomowych stanów energetycznych	39
2.2.1. Kołowe orbity elektronowe w atomie wodoru	40
2.2.2. Schemat poziomów energetycznych	40
2.2.3. Stany nieskwantowane i widmo ciągłe atomów	42
2.3. Widma jonów wodoropodobnych	43
2.3.1. Serie widmowe jonów wodoropodobnych	43
A. Spektroskopowe oznaczanie widm jonów	43
B. Seria Pickeringa	43
C. Widma jonów wodoropodobnych w teorii Bohra	44
D. Ciężkie jony wodoropodobne	45
2.3.2. Wpływ masy jądra na poziomy energetyczne atomów	46
A. Masa zredukowana	46
B. Izotopowy efekt masy	48
C. Stała Rydberga atomu wodoru i jonów wodoropodobnych	49
2.4. Doświadczalny dowód istnienia skwantowanych stanów energetycznych w atomach	49
2.4.1. Zderzenia pierwszego i drugiego rodzaju	50
A. Zderzenia pierwszego rodzaju	50
B. Zderzenia drugiego rodzaju	50
C. Zderzenia pierwszego i drugiego rodzaju w fizyce atomowej	50
2.4.2. Doświadczenie Francka–Hertza	51
2.5. Rozszerzenie teorii Bohra przez Sommerfelda	52
2.5.1. Uogólnione warunki kwantowe Sommerfelda	53
2.5.2. Orbity eliptyczne Sommerfelda	54
2.5.3. Energia elektronu na torze eliptycznym	55
A. Niezależność energii elektronu od kształtu elipsy	55
B. Interpretacja liczb kwantowych n i k	55
2.5.4. Subtelna struktura w widmie atomu wodoru według Sommerfelda	56
A. Relatywistyczne rozszczepienie poziomów energetycznych w teorii Sommerfelda	56
B. Stała struktury subtelnej	57
C. Reguła wyboru dla azymutalnej liczby kwantowej	59
2.6. Zasada odpowiedniości	61
2.6.1. Nieciągłość wartości wielkości fizycznych w mikro- i makroświecie	61
A. Moment pędu	61
B. Częstość promieniowania atomu	62
2.6.2. Sformułowanie zasady odpowiedniości	62

2.7.	Wady i zalety starej teorii kwantów	63
2.7.1.	Wady starej teorii kwantów	63
2.7.2.	Zakres stosowalności starej teorii kwantów	64
2.7.3.	Zalety starej teorii kwantów	64
3.	Odkrycie mechaniki kwantowej	65
3.1.	Wprowadzenie	65
3.1.1.	Teorie kwantowe Heisenberga i Schrödingera	65
3.1.2.	Obecny status mechaniki kwantowej	66
3.1.3.	Mechanika kwantowa w niniejszym podręczniku	67
3.2.	Dualizm falowo-korpuskularny	67
3.2.1.	Falowa natura promieniowania elektromagnetycznego	68
	A. Interferencja	68
	B. Interferometr Fabry’ego–Pérot’a	70
	C. Dyfrakcja na wąskiej szczelinie	79
	D. Doświadczenie Younga z dwiema szczelinami	80
	E. Siatka dyfrakcyjna	81
3.2.2.	Falowa natura promieniowania rentgenowskiego	85
	A. Podstawy teoretycznej analizy dyfraktogramów rentgenowskich	85
	B. Metody otrzymywania dyfraktogramów rentgenowskich	86
	C. Bezwzględny pomiar długości fali promieniowania rentgenowskiego	88
3.2.3.	Korpuskularna natura promieniowania	88
	A. Zjawisko fotoelektryczne	88
	B. Zjawisko Comptona	90
3.2.4.	Hipoteza de Broglie’a. Fale materii	93
3.2.5.	Doświadczalne dowody falowych własności materii	94
3.2.6.	Dualizm falowo-korpuskularny – podsumowanie wyników doświadczalnych	96
3.3.	Równanie Schrödingera	97
3.3.1.	„Wyprowadzenie” równania Schrödingera	98
	A. Cząstka swobodna, ruch jednowymiarowy	98
	B. Cząstka swobodna, ruch trójwymiarowy	99
	C. Cząstka w potencjalnym polu sił	100
3.3.2.	Uwagi o równaniu Schrödingera zależnym od czasu	100
	A. Separacja zmiennych przestrzennych i czasowych	100
	B. Czasowe równanie Schrödingera	101
	C. Równanie Schrödingera niezależne od czasu	101
	D. Ewolucja funkcji stanu w czasie	102
3.3.3.	Równanie Schrödingera jako równanie na wartości własne	102
	A. Wprowadzenie	102
	B. Zagadnienia własne w fizyce klasycznej	102
	C. Ogólne własności równań własnych	103
	D. Operatorowa postać równań Schrödingera	104
3.3.4.	Operatory składowych pędu i współrzędnych położenia	104
	A. Tworzenie operatorów w mechanice kwantowej	104
	B. Operatory składowych pędu	105
	C. Operatory współrzędnych położenia	105

4. Podstawowe pojęcia mechaniki kwantowej	106
4.1. Formalne przejście od mechaniki klasycznej do kwantowej	106
4.2. Fizyczna interpretacja mechaniki kwantowej	106
4.2.1. Fizyczne znaczenie wartości własnych	107
A. Operatory wielkości fizycznych	107
B. Algebra operatorów hermitowskich; komutatory	109
4.2.2. Ogólne własności funkcji falowych	113
A. Probabilistyczna interpretacja funkcji falowej	113
B. Normalizacja funkcji falowej	115
C. Funkcje falowe ortogonalne i ortonormalne	116
D. Własności funkcji własnych	116
4.2.3. Wartości oczekiwane	119
A. Wartości oczekiwane w fizyce klasycznej	119
B. Wartości oczekiwane w mechanice kwantowej	120
C. Obliczanie wartości oczekiwanych	121
D. Twierdzenie Ehrenfesta	123
E. Stałe ruchu i prawa zachowania	125
4.2.4. Zasada nieokreśloności Heisenberga	125
A. Sformułowanie zasady nieokreśloności Heisenberga	125
B. Wyprowadzenie zasady nieokreśloności Heisenberga	126
C. Fale monochromatyczne i pakiety fal materii	130
D. Doświadczenie z podwójną szczeliną	135
E. Zasada nieokreśloności w mikro- i makrofizyce	136
F. Uwagi końcowe	137
4.3. Mechanika kwantowa w notacji Diraca	138
4.3.1. Przestrzeń wektorowa	138
4.3.2. Przestrzeń Hilberta	139
4.3.3. Notacja Diraca	141
A. Symbole ket i bra	141
B. Operatory	142
C. Wektory własne i reprezentacje	143
4.3.4. Macierzowa reprezentacja mechaniki kwantowej	146
A. Elementy macierzowe	146
B. Macierze hermitowskie	146
C. Macierze diagonalne	147
D. Macierze niediagonalne	147
E. Macierzowy zapis iloczynu skalarnego	148
5. Atom wodoru w mechanice kwantowej	149
5.1. Przykłady stosowania metod rachunkowych mechaniki kwantowej	149
5.1.1. Zagadnienie własne energii cząstki swobodnej	149
5.1.2. Zagadnienie własne składowej momentu pędu	150
A. Wartości własne operatora składowej momentu pędu	150
B. Funkcje własne operatora składowej momentu pędu	151
5.1.3. Zagadnienie własne kwadratu momentu pędu	152
A. Wartości własne operatora kwadratu momentu pędu	152
B. Funkcje własne operatora kwadratu momentu pędu	154
5.1.4. Zagadnienie własne energii atomu wodoru	155

A.	Energia całkowita układu dwu cząstek	155
B.	Wartości własne operatora energii atomu wodoru	157
C.	Funkcje własne operatora energii atomu wodoru	159
D.	Symbolika stanów kwantowych elektronu	161
5.2.	Kwantowomechaniczny obraz atomu wodoru	161
5.2.1.	Unormowana pełna funkcja własna operatora energii	161
5.2.2.	Zależność $\Phi^* \Phi$ od kąta φ	163
5.2.3.	Zależność $\Theta^* \Theta$ od kąta ϑ	163
5.2.4.	Zależność $R^* R$ od promienia r	164
5.2.5.	Ogólny przebieg funkcji $\psi^* \psi$	166
5.3.	Orbitalny moment magnetyczny elektronu	167
5.3.1.	Orbitalny moment magnetyczny elektronu według fizyki klasycznej	167
5.3.2.	Orbitalny moment magnetyczny elektronu w mechanice kwantowej	168
5.3.3.	Stosunek giromagnetyczny dla orbitalnego ruchu elektronu	169
5.4.	Wektorowy model atomu i kwantowanie kierunkowe wektora momentu pędu	169
5.4.1.	Precesja Larmora	169
5.4.2.	Wektor momentu pędu w modelu wektorowym	171
5.4.3.	Kwantowanie kierunkowe wektora orbitalnego momentu pędu	171
5.5.	Spin i spinowy moment magnetyczny elektronu	172
5.5.1.	Liczby kwantowe spinu elektronu	173
5.5.2.	Spinowy moment magnetyczny elektronu	174
A.	Związek spinowego momentu magnetycznego ze spinem	174
B.	Kwantowanie kierunkowe wektora spinu	175
C.	Spinowy stosunek giromagnetyczny	175
5.5.3.	Elektronowy czynnik g_e	176
A.	Definicja czynnika g_e	176
B.	Czynnik g_e – konfrontacja teorii i doświadczenia	177
5.5.4.	Funkcje falowe elektronu z uwzględnieniem spinu. Operatory spinu	180
A.	Schrödingerowskie funkcje falowe ze spinem	180
B.	Równanie własne operatora spinu	180
C.	Relacje komutacyjne dla spinu	181
D.	Macierze spinowe Pauliego; spinory	182
E.	Spin a fizyka relatywistyczna	185
6.	Systematyka poziomów energetycznych atomów wieloelektronowych	187
6.1.	Problem atomu wieloelektronowego w mechanice kwantowej	187
6.1.1.	Rachunek zaburzeń	188
6.1.2.	Przybliżenie pola centralnego	190
6.2.	Równanie Schrödingera w przybliżeniu pola centralnego	192
6.2.1.	Przybliżenie jednoelektronowe	192
6.2.2.	Systematyka kwantowych stanów elektronowych w polu centralnym	193
6.2.3.	Konfiguracja elektronowa	194
6.2.4.	Samouzgodnione pole Hartree'ego	195
6.3.	Dodawanie momentów pędu w mechanice kwantowej	196
6.3.1.	Wypadkowy orbitalny moment pędu atomu wieloelektronowego	196
6.3.2.	Wypadkowy spin atomu wieloelektronowego	198
6.3.3.	Dodawanie momentów pędu według modelu wektorowego	199

6.4.	Całkowity moment pędu powłoki elektronowej atomu	200
6.4.1.	Całkowity moment pędu powłoki atomu jednoelektronowego	200
6.4.2.	Całkowity moment pędu powłoki elektronowej atomu o wielu elektro- nach	201
	A. Sprzężenie $L-S$ (sprzężenie Russela–Saundersa)	201
	B. Sprzężenie $j-j$	201
	C. Liczba wartości liczby kwantowej J w sprzężeniu $L-S$ i $j-j$	202
6.4.3.	Stosunki energetyczne w przybliżeniu sprzężeń $L-S$ i $j-j$	203
	A. Niecentralna część oddziaływania kulombowskiego i oddziały- wanie spin-orbita	203
	B. Przybliżenie sprzężenia $L-S$ i $j-j$	205
6.5.	Cechy charakterystyczne przybliżenia sprzężenia $L-S$	206
6.5.1.	Termy LS i struktura prosta poziomów energetycznych w schema- cie $L-S$	207
	A. Symbole literowe termów LS	207
	B. Krotność termów LS	207
	C. Przykłady znajdowania symboli termów LS	208
6.5.2.	Subtelna struktura termów LS i poziomy LSJ	209
	A. Oddziaływanie spin-orbita w przybliżeniu wiązania $L-S$	209
	B. Poprawka do energii wynikająca z oddziaływania spin-orbita ..	209
	C. Przykłady znajdowania symboli poziomów LSJ	210
	D. Multiplety struktury subtelnej	210
6.5.3.	Względne położenia poziomów energetycznych w sprzężeniu $L-S$..	211
	A. Reguła Hunda	211
	B. Reguła odległościowa (interwałów)	212
	C. Waga statystyczna poziomu energetycznego	213
	D. Środek ciężkości multipletu	213
	E. Multiplety regularne i odwrócone	214
	F. Struktura subtelna termów na przykładzie konfiguracji $nsnp$..	214
6.6.	Cechy charakterystyczne przybliżenia sprzężenia $j-j$	214
6.6.1.	Termy jj i struktura prosta poziomów energetycznych w schemacie $j-j$	214
6.6.2.	Struktura subtelna termów jj ; poziomy jjJ	216
6.6.3.	Występowanie wiązania $j-j$ w strukturach atomowych	217
6.7.	Sprzężenie $L-S$ i $j-j$ w modelu wektorowym	218
6.8.	Magnetyczny moment powłoki elektronowej związany z jej całkowitym mo- mentem pędu	219
6.8.1.	Atom jednoelektronowy: związek między wektorami μ oraz \mathbf{j}	219
6.8.2.	Atom wieloelektronowy: związek między wektorami μ i \mathbf{J} w sprzęże- niu $L-S$	221
6.8.3.	Atom wieloelektronowy: związek między wektorami μ i \mathbf{J} w sprzęże- niu $j-j$	223
6.9.	Reprezentacje atomowych stanów kwantowych	224
6.9.1.	Reprezentacje kwantowych stanów elektronów atomowych	224
6.9.2.	Reprezentacje kwantowych stanów układów wieloelektronowych ..	225
7.	Zasada Pauliego. Okresowy układ pierwiastków	227
7.1.	Zasada wykluczenia Pauliego	227
7.1.1.	Zasada wykluczenia w sformułowaniu Pauliego	227

7.1.2.	Własności zespołów identycznych cząstek elementarnych	228
A.	Zasada nierozróżnialności cząstek elementarnych	228
B.	Symetria operatorów obserwabli względem przestawiania cząstek	228
C.	Zwyrodnienie wymienne	228
D.	Status symetryczności funkcji falowych względem przestawiania cząstek	230
E.	Zasada zachowania statusu symetryczności funkcji falowej	230
F.	Funkcje falowe układów elektronowych	231
G.	Niemieszanie się stanów o różnym statusie symetryczności	232
H.	Fermiony i bozony	233
7.1.3.	Kwantowomechaniczne sformułowanie zasady wykluczenia Pauliego	234
7.1.4.	Samouzgodnione pole Hartree’ego–Focka	234
7.2.	Konsekwencje zasady Pauliego dla struktury atomów	236
7.2.1.	Powłokowa struktura atomów	236
A.	Maksymalne liczby elektronów równoważnych	236
B.	Stan podstawowy atomu	237
C.	Zamknięte powłoki nl	238
7.2.2.	Termy elektronów równoważnych	238
A.	Termy elektronów równoważnych a zasada Pauliego	238
B.	Ogólna metoda znajdowania termów elektronów równoważnych	239
C.	Multiplety normalne i odwrócone a liczba elektronów w powłoce nl	241
7.2.3.	Zależność energii oddziaływania elektrostatycznego od liczb kwantowych L i S	242
A.	Antysymetryczne funkcje falowe elektronów atomu helu	242
B.	Stany singletowe i trypletowe atomu helu	244
C.	Poprawki pierwszego rzędu do energii stanów kwantowych atomu helu	244
7.3.	Okresowy układ pierwiastków	246
7.3.1.	Ogólna budowa okresowego układu pierwiastków	247
A.	Cechy charakterystyczne okresowego układu pierwiastków	247
B.	„Idealna” a rzeczywista struktura układu okresowego pierwiastków	253
C.	Gazy szlachetne i alkalia	254
7.3.2.	Szczegółowa struktura okresowego układu pierwiastków	256
A.	Okres pierwszy: ${}_1\text{H}$ i ${}_2\text{He}$	256
B.	Okres drugi: ${}_3\text{Li}$ – ${}_{10}\text{Ne}$	257
C.	Okres trzeci: ${}_{11}\text{Na}$ – ${}_{18}\text{Ar}$	258
D.	Okres czwarty: ${}_{19}\text{K}$ – ${}_{36}\text{Kr}$	259
E.	Okres piąty: ${}_{37}\text{Rb}$ – ${}_{54}\text{Xe}$	259
F.	Okres szósty: ${}_{55}\text{Cs}$ – ${}_{86}\text{Rn}$	260
G.	Okres siódmy: ${}_{87}\text{Fr}$ – ${}_{294}118$	260
7.3.3.	Pierwiastki promieniotwórcze	261
A.	Czasy życia pierwiastków promieniotwórczych	261
B.	Naturalne pierwiastki promieniotwórcze	261
C.	Pierwiastki wytwarzane sztucznie. Transuranowce	262
D.	Pierwiastki transfermowe	263

7.4.	Energetyczna kolejność wewnętrznych powłok elektronowych w atomach . . .	266
7.5.	Kwantowomechaniczny obraz atomu o wielu elektronach	268
8.	Zarys teorii promieniowania	270
8.1.	Wprowadzenie	270
8.2.	Promieniowanie elektryczne dipolowe	270
8.2.1.	Promieniowanie klasycznego dipola elektrycznego	270
8.2.2.	Elektryczno-dipolowe promieniowanie atomu według mechaniki kwantowej	272
	A. Elektryczny moment dipolowy atomu w mechanice kwantowej . . .	272
	B. Status elektrycznego dipolowego momentu atomu w czasie	273
	C. Moc linii widmowej	274
	D. Siła linii widmowej	275
	E. Względne natężenia linii widmowych	276
8.2.3.	Współczynniki Einsteina określające prawdopodobieństwa przejść . .	278
8.2.4.	Siła oscylatora	281
	A. Sens fizyczny siły oscylatora	281
	B. Zespolony współczynnik załamania	282
	C. Związek siły oscylatora ze współczynnikiem Einsteina dla ab- sorpcji	286
	D. Reguły sum dla sił oscylatorów	287
8.3.	Promieniowanie multipolowe	288
8.3.1.	Retardacja fali elektromagnetycznej	288
8.3.2.	Elektryczne i magnetyczne układy multipolowe	290
	A. Statyczne multipole elektryczne	290
	B. Statyczne multipole magnetyczne	291
	C. Polowość i promieniowanie multipoli	292
8.3.3.	Multipolowe promieniowanie atomów	292
	A. Przybliżenie elektryczno-dipolowe	292
	B. Dalsze wyrazy rozwinięcia multipolowego	293
	C. Promieniowanie $M1$ i $E2$	293
8.4.	Reguły wyboru	297
8.4.1.	Reguły wyboru w starej i nowej teorii kwantowej	297
8.4.2.	Reguły wyboru związane z prawem zachowania momentu pędu . . .	298
	A. Reguły wyboru dla liczb kwantowych całkowitego momentu pędu	298
	B. Reguły wyboru dla kwantowej liczby orbitalnej l	301
	C. Reguły wyboru o wąskim zakresie działania	301
	D. Polaryzacyjne reguły wyboru	302
8.4.3.	Reguły wyboru związane z parzystością funkcji falowych	302
	A. Parzystość funkcji falowych	302
	B. Reguła Laporte'a	304
8.4.4.	Zestawienie reguł wyboru dla promieniowania $E1$, $M1$ i $E2$	306
8.5.	Szerokość linii widmowych	308
8.5.1.	Naturalna szerokość linii widmowej	308
	A. Naturalna szerokość linii widmowej według elektrodynamiki kla- sycznej	308
	B. Naturalna szerokość linii widmowej w mechanice kwantowej; czas życia stanów kwantowych	311

	C. Naturalna szerokość linii a prawdopodobieństwa przejść	312
	D. Stany metatrwałe	313
	E. Autojonizacja	314
8.5.2.	Wpływ czynników zewnętrznych na szerokość linii widmowej	315
	A. Poszerzenie dopplerowskie	315
	B. Poszerzenie ciśnieniowe	320
	C. Poszerzenie starkowskie	320
	D. Poszerzenie zderzeniowe (ze ściankami źródła)	321
	E. Poszerzenie związane z czasem przelotu	321
9.	Ogólna struktura optycznych widm atomowych	322
9.1.	Serie widmowe atomów i jonów o konfiguracji podstawowej ns	322
9.1.1.	Fenomenologiczny opis widmowych serii alkaliów	322
	A. Geneza symboliki termów LS	322
	B. Defekt kwantowy	324
9.1.2.	Modelowe objaśnienie widmowych serii alkaliów	325
	A. Rola zamkniętych powłok elektronowych w alkaliach	325
	B. Orbity zanurzające się	326
	C. Orbity niezanurzające się	328
9.1.3.	Serie widmowe atomów o konfiguracji podstawowej ns w mechanice kwantowej	328
9.1.4.	Widma jonów alkalipodobnych	333
9.1.5.	Efektywny ładunek jądra	333
9.1.6.	Szeregi izoelektronowe; diagramy Bohra–Costera (Moseleya)	334
9.2.	Serie widmowe atomów i jonów o konfiguracjach podstawowych innych niż ns	335
9.2.1.	Serie widmowe atomów i jonów o konfiguracji podstawowej ns^2	336
9.2.2.	Serie widmowe pierwiastków trzeciej i dalszych kolumn układu okresowego	340
9.3.	Subtelna struktura w widmach atomów wieloelektronowych	342
9.3.1.	Multiplety sprzężenia $L-S$	342
	A. Multiplet jako zbiór linii widmowych	342
	B. Multiplety proste	343
	C. Multiplety złożone	343
9.3.2.	Subtelna struktura serii widmowych atomów wieloelektronowych w sprzężeniu $L-S$	344
9.3.3.	Stosunki sił linii widmowych i ich natężeń wewnątrz multiple- tów LS	346
	A. Reguła sum dla sił linii widmowych	346
	B. Względne natężenia linii widmowych a reguła sum	348
9.3.4.	Subtelna struktura linii widmowych w sprzężeniu $j-j$ i pośrednim	350
9.4.	Subtelna struktura w widmie atomu wodoru	351
9.4.1.	Subtelna struktura linii wodorowych według mechaniki kwantowej	351
9.4.2.	Przesunięcie Lamba	356
	A. Odkrycie i pomiary klasycznego przesunięcia Lamba w wodorze	356
	B. Teoretyczne wyjaśnienie przesunięcia Lamba	358
	C. Przesunięcie Lamba podstawowego stanu atomu wodoru	359
	D. Przesunięcie Lamba w jonach wodoropodobnych	360

9.5.	Optyczne przejścia wzbronione	361
9.5.1.	Przejścia wzbronione a stany metatrwałe	361
9.5.2.	Obserwacje spontanicznego promieniowania M1 i E2 w widmach optycznych	362
	A. Linie wzbronione w badaniach astrofizycznych	362
	B. Wzbronione linie widmowe w badaniach laboratoryjnych	363
9.5.3.	Optyczne przejścia wymuszone	363
10.	Struktura liniowych widm rentgenowskich	365
10.1.	Wprowadzenie	365
10.1.1.	Powstawanie liniowego widma rentgenowskiego	365
10.1.2.	Ogólna charakterystyka liniowego widma promieni Röntgena	365
	A. Symbolika widm rentgenowskich	365
	B. Struktura widm rentgenowskich w porównaniu z optycznymi ..	366
10.2.	Prawo Moseleya dla widm rentgenowskich	367
10.2.1.	Sformułowanie i znaczenie prawa Moseleya	367
10.2.2.	Termy rentgenowskie; diagramy Bohra–Costera	369
10.3.	Prosta i subtelna struktura widm rentgenowskich	371
10.3.1.	Prosta i subtelna struktura termów rentgenowskich	371
10.3.2.	Atomowe przejścia rentgenowskie	372
10.4.	Schematy rentgenowskich poziomów energetycznych	373
10.4.1.	Porównanie optycznych i rentgenowskich poziomów energetycznych	373
10.4.2.	Schematy rentgenowskich poziomów energii wzbudzenia atomu ...	374
10.4.3.	Schematy rentgenowskich poziomów energii wiązania atomu	376
10.5.	Atomowa absorpcja promieniowania rentgenowskiego	378
10.5.1.	Rentgenowskie widma absorpcyjne	378
	A. Powstawanie i struktura widm absorpcyjnych	378
	B. Spektroskopia fotoelektronów rentgenowskich	379
10.5.2.	Elektrony Augera	380
10.6.	Rentgenowskie promieniowanie atomów egzotycznych	381
10.6.1.	Ogólne cechy atomów egzotycznych	383
10.6.2.	Atomy mionowe	386
10.6.3.	Atomy hadronowe	388
11.	Wpływ jądra na strukturę widm atomowych	390
11.1.	Wprowadzenie	390
11.2.	Nadsubtelna struktura linii widmowych	391
11.2.1.	Multipole jądrowe	391
11.2.2.	Spin jądra i moment pędu całego atomu	392
11.2.3.	Magnetyczny moment dipolowy jądra	394
11.2.4.	Magnetyczne oddziaływanie jądra z powłoką elektronową	395
	A. Stała struktury nadsubtelnej	395
	B. Hipermultiplet jako zbiór podpoziomów struktury nadsubtelnej	397
	C. Hipermultiplet jako zbiór linii widmowych	398
11.2.5.	Wyznaczanie spinu i magnetycznego momentu jądra ze struktury nadsubtelnej	398

A. Metody wyznaczania spinu jądra z nadsubtelnej struktury linii widmowych	398
B. Przykłady wyznaczania spinu jądra z nadsubtelnej struktury linii widmowych	399
C. Wyznaczenie magnetycznych dipolowych momentów jąder ze struktury nadsubtelnej	401
11.2.6. Wpływ elektrycznego kwadrupolowego momentu jądra na strukturę nadsubtelną	401
11.2.7. Wpływ momentów jądrowych M3 i E4 na strukturę nadsubtelną ...	404
11.3. Efekt izotopowy w optycznych widmach atomowych	405
11.3.1. Ogólna charakterystyka atomowego efektu izotopowego	405
11.3.2. Izotopowe efekty masowe	407
A. Normalny efekt masy w atomach jednoelektronowych	407
B. Efekty masowe w atomach wieloelektronowych. Specyficzny efekt masy	408
11.3.3. Izotopowe efekty pola	413
A. Izotopowy efekt objętościowy	413
B. Izotopowy efekt kształtu	416
11.3.4. Wykres Kinga	417
11.3.5. Separacja efektów masowych i polowych	420
A. Separacja efektów masowych i polowych w widmach optycznych	420
B. Separacja efektów masowych i polowych w widmach rentgenowskich	420
11.4. Egzotyczne atomy dwucząstkowe	422
11.4.1. Mionium	422
11.4.2. Pozytonium	424
12. Atom w polu magnetycznym	429
12.1. Ogólna charakterystyka efektu Zeemana	429
12.1.1. Efekt Zeemana w fizyce klasycznej i kwantowej	429
12.1.2. Szczególne przypadki efektu Zeemana	430
12.2. Normalny efekt Zeemana	431
12.2.1. Zeemanowskie rozszczepienie poziomów singletowych	431
12.2.2. Zeemanowskie rozszczepienie linii singletowych; normalny tryplet Lorentza	432
12.3. Anomalny efekt Zeemana	434
12.3.1. Rozszczepienie poziomów energetycznych w anomalnym efekcie Zeemana	434
12.3.2. Rozszczepienie linii widmowych w anomalnym efekcie Zeemana ..	435
12.4. Efekt Paschena–Backa	438
12.4.1. Normalny tryplet Lorentza w efekcie Paschena–Backa	439
12.4.2. Struktura subtelna efektu Paschena–Backa	440
12.4.3. Rozszczepienie linii widmowych w efekcie Paschena–Backa	440
12.5. Efekt Zeemana w przypadku pól pośrednich	443
12.6. Efekt Zeemana struktury nadsubtelnej	444
12.6.1. Efekt Zeemana struktury nadsubtelnej: słabe pole magnetyczne ...	444
12.6.2. Efekt Backa–Goudsmita: silne pole magnetyczne (efekt Zeemana struktury nadsubtelnej)	445

12.7.	Efekt Zeemana linii wzbronionych	448
12.7.1.	Reguły polaryzacyjne dla promieniowania E1, M1 i E2	448
12.7.2.	Reguły polaryzacyjne a identyfikacja przejść wzbronionych	449
12.8.	Doświadczenie Sterna–Gerlacha	450
12.8.1.	Przebieg doświadczenia Sterna–Gerlacha	450
12.8.2.	Interpretacja doświadczenia Sterna–Gerlacha	451
12.9.	Metody rezonansowe w fizyce atomu	452
12.9.1.	Rezonans magnetyczny	453
A.	Rezonans magnetyczny w obrazie klasycznym	453
B.	Rezonans magnetyczny w obrazie kwantowym	455
C.	Zastosowania rezonansu magnetycznego	455
12.9.2.	Podwójny rezonans optyczny. Pompowanie optyczne	456
A.	Podwójny rezonans w badaniach atomowych stanów wzbronionych	456
B.	Podwójny rezonans w badaniach atomowych stanów podstawowych. Pompowanie optyczne	458
12.9.3.	Rezonans magnetyczny w wiązce atomowej	461
A.	Rezonansowa metoda Rabiego	461
B.	Metoda Ramseya rozdzielonych pól zmiennych	463
C.	Atomowy zegar cesowy	465
13.	Atom w polu elektrycznym	468
13.1.	Odkrycie efektu Starka	468
13.2.	Ogólna charakterystyka efektu Starka	469
13.2.1.	Degeneracja stanów kwantowych w efekcie Starka	470
13.2.2.	Reguły polaryzacyjne w efekcie Starka	470
13.2.3.	Zależność rozszczepienia starkowskiego od głównej liczby kwantowej	471
13.2.4.	Ogólna teoria efektu Starka	471
13.2.5.	Indukowany elektryczny moment dipolowy atomu	474
13.3.	Efekt Starka w wodorze i jonach wodoropodobnych	474
13.3.1.	Silne pole elektryczne	475
A.	Rozszczepienia starkowskie w silnym polu elektrycznym	475
B.	Liniowy efekt Starka	476
13.3.2.	Bardzo silne pole elektryczne	479
A.	Kwadratowy efekt Starka	479
B.	Jonizacja polowa i autojonizacja poprzez zjawisko tunelowe	480
13.3.3.	Słabe pole elektryczne	482
13.3.4.	Bardzo słabe pole elektryczne	483
13.4.	Efekt Starka w atomach wieloelektronowych	484
13.4.1.	Słabe pole elektryczne	485
13.4.2.	Silne pole elektryczne	486
13.4.3.	Bardzo silne pole elektryczne	487
14.	Atomowa spektroskopia laserowa	488
14.1.	Fizyczne podstawy działania laserów	488
14.1.1.	Odkrycie laserów	488
14.1.2.	Ogólne warunki wywołania akcji laserowej	489
A.	Promieniowanie wymuszone	489
B.	Absorpcja i spontaniczna emisja promieniowania	489
C.	Podstawowe elementy lasera	490

14.1.3.	Laser helowo-neonowy	490
	A. Inwersja populacji poziomów energetycznych	490
	B. Rezonator optyczny; modowa struktura promieniowania laserowego	491
14.1.4.	Promieniowanie laserowe	495
	A. Cechy charakterystyczne promieniowania laserowego	495
	B. Spójność	495
	C. Monochromatyczność	497
	D. Ukierunkowanie	499
	E. Gęstość mocy	499
	F. Statystyczne własności promieniowania	500
14.2.	Atomowa spektroskopia laserowa; optyka nieliniowa	503
14.2.1.	Bezdopplerowska spektroskopia nasyceniowa	503
	A. Zjawisko nasycenia i współczynnik absorpcji	503
	B. Dziura Bennetta i dip Lamba	506
	C. Dip Lamba rejestrowany przeciwbieżną wiązką sondującą	508
	D. Pik Lamba, czyli odwrócony dip Lamba	509
14.2.2.	Spektroskopia wielofotonowa	511
	A. Wprowadzenie	511
	B. Podwajanie częstości fali elektromagnetycznej	512
	C. Wzbudzenie wielofotonowe	513
	D. Bezdopplerowska spektroskopia dwufotonowa	514
	E. Optyczny grzebień częstości	516
	F. Pomiar przejścia 1S–2S w wodorze	520
14.3.	Atomy rydbergowskie	522
14.3.1.	Ogólne własności atomów rydbergowskich	523
14.3.2.	Wytwarzanie i detekcja stanów rydbergowskich	525
14.3.3.	Atomy rydbergowskie w stanach kołowych	525
15.	Fizyka zimnych atomów	528
15.1.	Wprowadzenie	528
15.2.	Chłodzenie laserowe	529
15.2.1.	Dwa rodzaje chłodzenia laserowego	530
	A. Chłodzenie dopplerowskie	530
	B. Chłodzenie spowodowane odrzutem atomu	532
	C. Względna wielkość obu rodzajów chłodzenia	533
15.2.2.	Melasa optyczna	534
15.3.	Pałapki jonowe	535
15.3.1.	Elektrostatyczne pole pałapek jonowych	535
15.3.2.	Pałapka Penninga	537
15.3.3.	Elektromagnetyczna pałapka Paula	537
15.3.4.	Zastosowanie pałapek jonowych	538
15.4.	Pałapkowanie atomów obojętnych	539
15.4.1.	Pałapki magnetyczne	539
15.4.2.	Pałapki optyczne	543
15.4.3.	Pałapka magnetooptyczna – PMO	546
15.5.	Atomowe gazy kwantowe	548
15.5.1.	Kwantowa degeneracja gazów atomowych	548

15.5.2.	Kondensacja Bosego–Einsteina	550
A.	Historia odkrycia kondensacji BE	550
B.	Parametr degeneracji bozonów	551
C.	Metatrwałość kondensatu	552
D.	Chłodzenie przez odparowanie	552
E.	Realizacja kondensatu Bosego–Einsteina	554
F.	Obserwacja kondensatu Bosego–Einsteina	555
15.5.3.	Lasery atomowe	558
A.	Spójność funkcji falowej kondensatu	558
B.	Atomowy laser impulsowy	559
C.	Atomowy laser o pracy ciągłej wytworzony w pułapce magnetycznej	559
D.	Atomowy laser o pracy ciągłej wytworzony w pułapce optycznej	559
15.5.4.	Rezonanse Feshbacha w gazach bozonowych	560
A.	Rozpraszanie fali-s	560
B.	Długość rozpraszania fali-s i równanie Grossa–Pitajewskiego	561
C.	Modyfikacja długości rozpraszania. Rezonanse Feshbacha	562
15.5.5.	Ultraniskie temperatury fermionów	565
A.	Wiadomości wstępne	565
B.	Degeneracja kwantowa fermionów	565
C.	Rezonanse Feshbacha i dwuatomowe cząsteczki fermionów	567
D.	Kondensacja molekularna fermionów	568
E.	Nadprzewodnictwo i nadpłynność. Pary Coopera	570
F.	Złącze BCS-kBE. Kondensacja Fermiego	571
Uzupełnienie. Dielektryczne pokrycia cienkowarstwowe		575
U1.	Wprowadzenie	575
U2.	Spektralne charakterystyki układów cienkowarstwowych	576
U3.	Analiza układów cienkowarstwowych	580
U4.	Synteza układów cienkowarstwowych	581
U4.1.	Układ startowy i funkcja celu	581
U4.2.	Synteza półprzezroczystego zwierciadła szerokopasmowego	582
U4.3.	Synteza skomplikowanych pokryć dielektrycznych	584
A.	Metoda igłowa syntezy	584
B.	Sylwetka Katedry Wawelskiej	586
Literatura		589
1.	Literatura cytowana	589
	Uzupełnienie	592
2.	Podręczniki i opracowania monograficzne	592
	Uzupełnienie	593
Skorowidz		595

Przedmowa

Książka *Podstawy fizyki atomu* zawiera możliwie kompletny opis najważniejszych zagadnień współczesnej fizyki atomowej, łącznie z głównymi wiadomościami z mechaniki kwantowej, bez wdawania się w szczegóły zarówno w zakresie problemów teoretycznych, jak i doświadczalnych. Chodziło o to, aby dać *podstawy*, które – w razie potrzeby – pomogą Czytelnikowi znaleźć w odpowiedniej literaturze wiadomości bardziej wyczerpujące. Poszczególne partie materiału prezentowane są, o ile to możliwe, w ujęciu historycznym.

Punktem wyjścia przy pisaniu niniejszej książki był mój skrypt dla studentów wyższych uczelni, *Wstęp do spektroskopii atomowej*, wydany trzykrotnie przez PWN w latach 1969, 1970 i 1972. Jak się okazało, podręcznik ten zyskał duże uznanie nie tylko wśród studentów, ale także pracowników naukowych.

Materiał z tego skryptu został teraz uporządkowany i znacznie rozszerzony o nowe zagadnienia, przede wszystkim o tematy mniej lub bardziej związane z wykorzystaniem niezwykłych własności laserów. Tekst kończy się omówieniem kondensatu Bosego–Einsteina, bozonów i degeneracji kwantowej fermionów.

Książka zawiera Uzupełnienie: *Dielektryczne pokrycia cienkowarstwowe*. Wiadomości tam zawarte pozwolą Czytelnikowi zapoznać się z podstawowymi aspektami własności i syntezy cienkowarstwowych układów dielektrycznych, które odgrywają wielką rolę w pracach doświadczalnych fizyki atomu, a także w wielu innych dziedzinach nauki i techniki.

Winna jestem podziękowanie bardzo wielu osobom, które w czasie długich lat pracy nad książką pomogły mi w różnoraki sposób; bez nich praca ta trwałaby znacznie dłużej. Z konieczności mogę wymienić tylko niektórych moich „dobroczyńców”.

Ze względów chronologicznych dziękuję najpierw dwóm osobom, które czytały rękopis *in statu nascendi*. Pierwszą była dr Marta Starnawska, która wprawdzie przeczytała tylko dwa pierwsze rozdziały, ale pierwszy z nich poddała tak gruntownej i szczegółowej krytyce, że jej uwagi stały się dla mnie cenną wskazówką w dalszej pracy nad książką. Drugą osobą czytającą rękopis w czasie jego powstawania była dr hab. Katarzyna Mazurek, której jestem ogromnie wdzięczna za wielki wkład pracy przy krytycznej lekturze wszystkich kolejnych rozdziałów i za udzielenie mi wielu cennych uwag.

Bardzo dziękuję Paniom prowadzącym bibliotekę Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego, pod kierunkiem mgr Marii Pawłowskiej, a w szczególności mgr Jadwidze Wichman, za przychylność i niestrudzoną współpracę w docieraniu do często trudno dostępnej literatury. Wyrażam ogromną wdzięczność mgr. inż. Piotrowi Piątkowskiemu za zawsze chętną i fachową pomoc, jaką mi służył – jego życzliwość trudno przecenić. Dziękuję również dr. Jakubowi Lisowi za stałe zainteresowanie i doraźne wsparcie. Dziękuję prof. Markowi Szymońskiemu, kierownikowi Zakładu Fizyki Nanostruktur i Nanotechnologii Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki UJ, za umożliwienie mi pracy w jego Zakładzie i za życzliwą pomoc w różnych trudnych dla mnie okresach pisania książki. Dziękuję Dziekanom tego Wydziału, prof. Andrzejowi Warczakowi i prof. Jarosławowi Koperskiemu, za dofinansowanie niniejszej publikacji. Moje podziękowania należą się także Redaktor Izabeli Mika, Wydawcy Publikacji Akademickich i Naukowych Wydawnictwa Naukowego PWN, za miłą współpracę, wielką życzliwość i cierpliwość. Dziękuję wreszcie obu moim córkom, Dorocie i Grażynie, a także ich mężom, prof. Piotrowi Żenczykowskiemu i prof. Krzysztofowi Piotrzkowskiemu, za nieustające wsparcie, a Piotrowi Żenczykowskiemu dodatkowo za rozwiązanie niektórych problemów teoretycznych.

Jednak moje przedsięwzięcie nie mogłoby być zrealizowane, gdyby nie stałe, ewidentne działanie Opatrzności, dzięki której – w każdej trudnej sytuacji – zjawiała się na mojej drodze odpowiednia osoba lub następował pozornie przypadkowy zbieg okoliczności pozwalający mi rozwiązać dany problem. Dlatego: *Soli Deo Gratias!*

Zofia Leś

Kraków, 3 listopada 2014 r.

1

Wiadomości wstępne

1.1. Przedmiot fizyki atomu

a. Słowo *atom* jest pochodzenia greckiego – *atomos* oznacza *niepodzielny*. Zostało ono zastosowane w starożytności przez Demokryta (ok. 460–370 p.n.e.) na oznaczenie najmniejszej, niedającej się już podzielić cząstki materii. Była to jedynie spekulacja filozoficzna, gdyż w owym czasie nie było możliwości doświadczalnej weryfikacji tej idei. (W filozofii średniowiecznej znane było także pojęcie *atomu czasu*. Jednostka ta określała najmniejszy odstęp czasu, w którym może zająć poruszenie ludzkiej woli, i wynosiła nieco mniej niż jedna szоста sekundy. Łatwo sprawdzić, że tyle właśnie czasu zajmuje wymówienie (pomyślenie) jednej sylaby.) Dopiero począwszy od końca XVIII w. ziarnista budowa materii zaczęła zyskiwać podstawy naukowe. Najpierw opierając się na badaniach w dziedzinie chemii (A.L. Lavoisier, L.J. Gay-Lussac, J. Dalton, A. Avogadro, P.S. Laplace), potem także fizyki (zapoczątkowane przez G.R. Kirchhoffa i R.W. Bunsena).

Obecnie wiadomo, że *materia* składa się z *pierwiastków*, czyli substancji prostych, których nie można rozłożyć zwykłymi metodami chemicznymi, a *atomy* stanowią ich najmniejsze części. W tym sensie także dzisiaj atom jest niepodzielny. Można go jednak rozłożyć na części składowe metodami niechemicznymi, z tym że zniszczymy wówczas jego tożsamość: atom danego pierwiastka po prostu przestanie istnieć. Tak więc dzisiejszy atom jest najmniejszą, niepodzielną cząstką danej substancji, ale jest *zniszczalny*.

Każdy atom składa się z dodatnio naładowanego *jądra*, w którym skupiona jest niemal cała masa atomu, oraz otaczających go *elektronów* o elementarnych ładunkach ujemnych, tworzących *powłokę* elektronową atomu. Nazwa *elektron* pochodzi od greckiego słowa *elektron* oznaczającego bursztyn, gdyż elektryczność została odkryta w starożytności właśnie za pomocą bursztynu, który elektryzuje się przy pocieraniu. Każde jądro atomowe zawiera pewną liczbę *nukleonów* (łac. *nucleus* = jądro), na które składają się *protony* (gr. *proton* = pierwsze) o dodatnim ładunku elementarnym i elektrycznie obojętne *neutrony* (łac. *neutrum* = obojętne). Wszystkie atomy tego samego pierwiastka mają tę samą liczbę protonów, która decyduje o ładunku jądra, ale mogą różnić się liczbą neutronów, określającą różne *izotopy* tego samego pierwiastka. Wszystkie izotopy danego pier-