

# Spis treści

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

# Spis treści szczegółowy

<b>1. Wiadomości wstępne</b> .....	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. Termy. Zasada kombinacji Ritza .....	27
1.5.3. Serie wodorowe .....	28

<b>2. Stara teoria kwantów. Atom wodoru</b> .....	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
<b>3. Odkrycie mechaniki kwantowej .....</b>	<b>65</b>
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–Pérota .....	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. Bezzględny 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. „Wprowadzenie” 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
<b>4.</b>	<b>Podstawowe pojęcia mechaniki kwantowej</b>	<b>106</b>
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
<b>5.</b>	<b>Atom wodoru w mechanice kwantowej</b>	<b>149</b>
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 $\varphi$ .....	163
5.2.3. Zależność $\Theta^*\Theta$ od kąta $\vartheta$ .....	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. Schrödingerskie 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
<b>6. Systematyka poziomów energetycznych atomów wieloelektronowych .....</b>	<b>187</b>
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 schemacie $L$ - $S$ .....	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 $\mu$ oraz $\mathbf{j}$ .....	219
6.8.2.	Atom wieloelektronowy: związek między wektorami $\mu$ i $\mathbf{J}$ w sprzęże- niu $L$ - $S$ .....	221
6.8.3.	Atom wieloelektronowy: związek między wektorami $\mu$ 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
<b>7.</b>	<b>Zasada Pauliego. Okresowy układ pierwiastków .....</b>	<b>227</b>
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. Zwyródnienie 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 powłoczce $nl$ .....	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
<b>8.</b>	<b>Zarys teorii promieniowania</b> .....	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 klasycznej .....	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
<b>9. Ogólna struktura optycznych widm atomowych .....</b>	<b>322</b>
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 multipletów $LS$ .....	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
<b>10. Struktura liniowych widm rentgenowskich .....</b>	<b>365</b>
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. Terminy 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 energetycz- nych .....	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
<b>11. Wpływ jądra na strukturę widm atomowych .....</b>	<b>390</b>
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 $M_3$ i $E_4$ 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
<b>12. Atom w polu magnetycznym .....</b>	<b>429</b>
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
<b>13.</b>	<b>Atom w polu elektrycznym</b>	<b>468</b>
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
<b>14. Atomowa spektroskopia laserowa . . . . .</b>	<b>488</b>
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
<b>15. Fizyka zimnych atomów . . . . .</b>	<b>528</b>
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 pałapce magnetycznej .....	559
	D. Atomowy laser o pracy ciągłej wytworzony w pałapce 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.	Ultraniśkie 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
<b>Uzupełnienie. Dielektryczne pokrycia cienkowarstwowe .....</b>		<b>575</b>
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
<b>Literatura</b> .....	589
1. Literatura cytowana .....	589
Uzupełnienie .....	592
2. Podręczniki i opracowania monograficzne .....	592
Uzupełnienie .....	593