

# Spis treści

Podrozdziały opatrzone gwiazdką odchodzą nieco od głównego nurtu książki i można je pominąć przy pierwszym czytaniu.

<b>PRZEDMOWA</b> .....	19
<b>OZNACZENIA</b> .....	24
<b>1. WSTĘP HISTORYCZNY</b> .....	27
1.1. <b>Relatywistyczna mechanika falowa</b> .....	29
Fale de Broglie'a • Równanie falowe Schrödingera–Kleina–Gordona • Struktura subtelna • Spin • Równanie Diraca • Ujemne energie • Zasada wykluczania • Pozytony • Ponowna dyskusja równania Diraca	
1.2. <b>Narodziny kwantowej teorii pola</b> .....	41
Skwantowane pole Borna, Heisenberga, Jordana • Emisja spontaniczna • Antykomutatory • Kwantowa teoria pola Heisenberga–Pauliego • Kwantyzacja Furry'ego–Oppenheimera pola Diraca • Kwantyzacja Pauliego–Weisskopfa pola skalarnego • Wczesne rachunki w elektrodynamice kwantowej • Neutrony • Mezony	
1.3. <b>Zagadnienie nieskończoności</b> .....	57
Nieskończone przesunięcia energii elektronu • Polaryzacja próżni • Rozpraszanie światła na świetle • Rozbieżności w podczerwieni • Poszukiwanie alternatywy • Renormalizacja • Konferencja na Shelter Island • Przesunięcie Lamba • Anomalny moment magnetyczny elektronu • Formalizmy Schwingera, Tomonagi, Feynmana, Dysona • Dlaczego nie wcześniej?	
<b>Bibliografia</b> .....	65
<b>Wykaz cytowanej literatury</b> .....	66

<b>2. RELATYWISTYCZNA MECHANIKA KWANTOWA</b> .....	72
2.1. <b>Mechanika kwantowa</b> .....	72
Promienie • Iloczyny skalarne • Obserwable • Prawdopodobieństwa	
2.2. <b>Symetrie</b> .....	73
Twierdzenie Wignera • Operatory antyliniowe i antyunitarne • Obserwable • Struktura grupy • Reprezentacje z dokładnością do fazy • Reguły nadwyboru • Grupy Liego • Stałe struktury • Symetrie abelowe	
2.3. <b>Kwantowe przekształcenia Lorentza</b> .....	78
Przekształcenia Lorentza • Operatory kwantowe • Inwersje	
2.4. <b>Algebra Poincarégo</b> .....	82
$J^{\mu\nu}$ i $P^\mu$ • Własności transformacyjne • Związki przemienności • Generatory zachowane i nie zachowane • Skończone przesunięcia i obroty • Zwężenie Inönü–Wignera • Algebra Galileusza	
2.5. <b>Stany jednocząstkowe</b> .....	86
Reguły transformacyjne • Pchnięcia • Małe grupy • Normalizacja • Cząstki masywne • Cząstki bezmasowe • Skrętność i polaryzacja	
2.6. <b>Inwersja przestrzenna i odwrócenie czasu</b> .....	98
Przekształcenie $J^{\mu\nu}$ i $P^\mu$ • P jest unitarny, a T jest antyunitarny • Cząstki masywne • Cząstki bezmasowe • Degeneracja Kramersa • Elektryczne momenty dipolowe	
2.7. <b>Reprezentacje rzutowe*</b> .....	105
Dwukocykle • Ładunki centralne • Grupy jednospójne • Grupa Lorentza nie ma ładunków centralnych • Dwuspójność grupy Lorentza • Grupy nakrywające • Reguły nadwyboru jeszcze raz	
<b>Dodatek A. Twierdzenie o reprezentacjach przekształceń symetrii</b> .....	115
<b>Dodatek B. Operatory grup i klasy homotopii</b> .....	120
<b>Dodatek C. Inwersje i zdegenerowane multiplety</b> .....	124
<b>Zadania</b> .....	129
<b>Wykaz cytowanej literatury</b> .....	129
<b>3. TEORIA ROZPRASZANIA</b> .....	131

3.1. Stany in i out.....	131
Stany wielocząstkowe • Paczki falowe • Warunki asymptotyczne w odległej przeszłości i odległej przyszłości • Równania Lippmanna–Schwingera • Wartość główna i funkcje delta	
3.2. Macierz $S$ .....	137
Definicja macierzy $S$ • Macierz $T$ • Przybliżenie Borna • Unitarność macierzy $S$	
3.3. Symetrie macierzy $S$ .....	140
Nieziemniczość lorentzowska • Warunki dostateczne • Symetrie wewnętrzne • Ładunek elektryczny, dziwność, spin izotopowy, $SU(3)$ • Zachowanie parzystości • Parzystości wewnętrzne • Parzystość pionu • Niezachowanie parzystości • Nieziemniczość odwrócenia czasu • Twierdzenie Watsona • Niezachowanie $PT$ • $C$ , $CP$ , $CPT$ • Obojętne mezony $K$ • Niezachowanie $CP$	
3.4. Szybkości i przekroje czynne.....	158
Szybkości w pudle • Szybkości rozpadu • Przekroje czynne • Niezmienniczość lorentzowska • Przestrzeń fazowa • Wykresy Dalitza	
3.5. Teoria zaburzeń.....	165
Staromodna teoria zaburzeń • Zależna od czasu teoria zaburzeń • Ilozyny chronologiczne • Szereg Dysona • Teorie lorentzowsko niezmiennicze • Przybliżenie Borna fali odkształconej	
3.6. Wnioski z unitarności.....	171
Twierdzenie optyczne • Wierzchołki dyfrakcyjne • Związki $CPT$ • Szybkości rozpadu cząstki i antycząstki • Teoria kinetyczna • Twierdzenie $H$ Boltzmanna	
3.7. Rozwinięcie na fale cząstkowe*.....	176
Baza dyskretna • Rozwinięcie na funkcje kuliste • Całkowite przekroje czynne elastyczne i nieelastyczne • Przesunięcia fazowe • Zachowanie w proggu: reakcje egzotermiczne, endotermiczne i elastyczne • Długość rozpraszania • Elastyczne i nieelastyczne rozpraszanie przy wysokich energiach	
3.8. Rezonanse*.....	184
Przyczyny rezonansów: słabe sprzężenie, bariery i złożoność • Zależność od energii • Unitarność • Wzór Breita–Wignera • Rezonanse mierzone ze zbyt małą zdolnością rozdzielczą • Przesunięcia fazowe w rezonansie • Zjawisko Ramsauera–Townsenda	
Zadania.....	190
Wykaz cytowanej literatury.....	191

<b>4. ZASADA ROZKŁADU GRONOWEGO</b> .....	193
4.1. <b>Bozony i fermiony</b> .....	194
Fazy permutacyjne • Statystyki Bosego i Fermiego • Unormowanie dla identycznych cząstek	
4.2. <b>Operatory kreacji i anihilacji</b> .....	197
Operatory kreacji • Obliczenie operatora sprzężonego • Wyprowadzenie związków przemienności i antyprzemienności • Reprezentacja operatorów ogólnych • Hamiltonian cząstki swobodnej • Przekształcenie Lorentza operatorów kreacji i anihilacji • Własności operatorów kreacji i anihilacji względem C, P, T.	
4.3. <b>Rozkład gronowy i amplitudy spójne</b> .....	201
Brak korelacji odległych doświadczeń • Amplitudy spójne • Zliczanie funkcji delta	
4.4. <b>Struktura oddziaływania</b> .....	206
Warunek rozkładu gronowego • Analiza graficzna • Rozpraszanie dwuciałowe pociąga za sobą rozpraszanie trójciałowe	
<b>Zadania</b> .....	213
<b>Wykaz cytowanej literatury</b> .....	213
<b>5. POLA KWANTOWE I ANTYCZĄSTKI</b> .....	214
5.1. <b>Pola swobodne</b> .....	214
Pola kreujące i anihilujące • Przekształcenie Lorentza funkcji współczynnikowych • Konstrukcja funkcji współczynnikowych • Zastosowanie rozkładu gronowego • Niezmienniczość lorentzowska wymaga przyczynowości • Przyczynowość wymaga antycząstek • Równania pola • Uporządkowanie normalne	
5.2. <b>Przyczynowe pola skalarne</b> .....	224
Pola kreujące i anihilujące • Zapewnienie przyczynowości • Pola skalarne opisują bozony • Antycząstki • Przekształcenia P, C, T • $\pi^0$	
5.3. <b>Przyczynowe pola wektorowe</b> .....	230
Pola kreujące i anihilujące • Spin zero albo spin jeden • Pola wektorowe opisują bozony • Wektory polaryzacji • Zapewnienie przyczynowości • Antycząstki • Granica zerowej masy • Przekształcenia P, C, T	
5.4. <b>Formalizm Diraca</b> .....	236
Reprezentacje Clifforda algebry Poincarégo • Przekształcenia macierzy Di-	

raca • Wymiar macierzy Diraca • Ich jawna postać • $\gamma_5$ • Pseudouni- tarność • Sprzężenie zespolone i transpozycja	
5.5. <b>Przyczynowe pola Diraca</b> .....	242
Pola kreujące i anihilujące • Spinory Diraca • Zapewnienie przyczynowości • Pola Diraca opisują fermiony • Antycząstki • Inwersja przestrzenna • Parzystość wewnętrzna par cząstka-antycząstka • Sprzężenie ładunkowe • Wewnętrzna faza C par cząstka-antycząstka • Fermiony Majorany • Od- wrócenie czasu • Współmienniki dwuliniowe • Oddziaływania rozpadu beta	
5.6. <b>Ogólne nieprzywiedlne reprezentacje jednorodnej grupy Lorentza*</b> ..	252
Izomorfizm z $SU(2) \otimes SU(2)$ • Reprezentacje $(A, B)$ znanych pól • Pole Rarity-Schwingera • Inwersja przestrzenna	
5.7. <b>Ogólne pola przyczynowe*</b> .....	256
Konstrukcja funkcji współczynnikowych • Skalarne gęstości hamiltonianu • Zapewnienie przyczynowości • Antycząstki • Ogólny związek spinu ze sta- tystyką • Równoważność różnych rodzajów pól • Inwersja przestrzenna • Parzystość pary cząstka-antycząstka w przypadku ogólnym • Sprzężenie ła- dunkowe • Wewnętrzna faza C antycząstek • Cząstki ładunkowo samo- sprzężone i warunki rzeczywistości • Odwrócenie czasu • Trudności z wyż- szym spinem?	
5.8. <b>Twierdzenie CPT</b> .....	268
Przekształcenie CPT pól skalarnych, wektorowych i pól Diraca • Przekształ- cenie CPT skalarnej gęstości oddziaływania • Przekształcenie CPT ogólnych pól nieprzywiedlnych • Niezmienniczość CPT hamiltonianu	
5.9. <b>Pola cząstek bezmasowych</b> .....	270
Konstrukcja funkcji współczynnikowych • Brak pól wektorowych o skrętności $\pm 1$ • Potrzeba niezmienniczości względem cechowania • Antysymetryczne pole tensorowe o skrętności $\pm 1$ • Sumy względem skrętności • Konstrukcja pól przyczynowych o skrętności $\pm 1$ • Grawitony • Spin $\geq 3$ • Ogólne nieprzywiedlne pola bezmasowe • Określona skrętność pól $(A, B)$	
<b>Zadania</b> .....	279
<b>Wykaz cytowanej literatury</b> .....	280
<b>6. REGULY FEYNMANA</b> .....	281
6.1. <b>Wyprowadzenie reguł</b> .....	281
Łączenie w pary • Twierdzenie Wicka • Reguły w przestrzeni konfigura- cyjnej • Czynniki kombinatoryczne • Czynniki znaków • Przykłady	

6.2. Obliczenie propagatora .....	296
Wielomian w liczniku • Propagator Feynmana pól skalarnych • Pola Diraca	
• Ogólne pola nieprzywiedlne • Propagatory współzmiennicze • Człony niewspółzmiennicze w iloczynach chronologicznych	
6.3. Reguły w przestrzeni pędów .....	302
Przejsie do przestrzeni pędów • Reguły Feynmana • Zliczanie niezaleznych pędów • Przykłady • Czynniki ograniczające wkład od pętli	
6.4. Poza powłoką masy .....	308
Prądy • Amplitudy poza powłoką masy są ścisłymi elementami macierzowymi operatorów w obrazie Heisenberga • Dowód twierdzenia	
Zadania .....	312
Wykaz cytowanej literatury .....	313
<b>7. FORMALIZM KANONICZNY .....</b>	<b>314</b>
7.1. Zmienne kanoniczne .....	315
Kanoniczne związki przemienności • Przykłady: rzeczywiste i zespolone pola skalarne, pola wektorowe, pola Diraca • Hamiltoniany cząstek swobodnych • Lagranżjan pola swobodnego • Formalizm kanoniczny dla pól oddziałujących	
7.2. Formalizm Lagrange'a .....	320
Równania ruchu Lagrange'a • Działanie • Gęstość lagranżjanu • Równania Eulera-Lagrange'a • Rzeczywistość działania • Od lagranżjanów do hamiltonianów • Powracamy do pól skalarnych • Od obrazu Heisenberga do obrazu oddziaływania • Pola pomocnicze • Całkowanie działania przez części	
7.3. Symetrie globalne .....	329
Twierdzenie Noether • Jawne wyrażenie na wielkości zachowane • Jawne wyrażenie na zachowane prądy • Kwantowe generatory symetrii • Tensor energii-pędu • Pęd • Symetrie wewnętrzne • Związki przemienności pędów	
7.4. Niezmienniczość lorentzowska .....	336
Prądy $\mathcal{M}^{\rho\mu\nu}$ • Generatory $J^{\mu\nu}$ • Tensor Belinfantego • Niezmienniczość lorentzowska macierzy $S$	
7.5. Przejsie do obrazu oddziaływania: przykłady .....	341
Pole skalarne ze sprzężeniem z pochodnymi • Pole wektorowe • Pole Diraca	

7.6. Więzy i nawiasy Diraca .....	348
Więzy pierwotne i wtórne • Nawiasy Poissona • Więzy pierwszego i drugiego rodzaju • Nawiasy Diraca • Przykład: rzeczywiste pole wektorowe	
7.7. Nowe definicje pól i sprzężenia nadmiarowe* .....	354
Parametry nadmiarowe • Przedefiniowanie pól • Przykład: rzeczywiste pole skalarne	
Dodatek. Od komutatorów kanonicznych do nawiasów Diraca .....	355
Zadania .....	360
Wykaz cytowanej literatury .....	360
<b>8. ELEKTRODYNAMIKA .....</b>	<b>361</b>
8.1. Niezmienniczość względem cechowania .....	361
Potrzeba sprzężenia z zachowanym prądem • Operator ładunku • Symetria lokalna • Działanie fotonu • Równania pola • Pochodne niezależne od cechowania	
8.2. Więzy i warunki cechowania .....	365
Więzy pierwotne i wtórne • Więzy są pierwszego rodzaju • Ustalenie cechowania • Cechowanie kulombowskie • Rozwiązanie dla $A^0$	
8.3. Kwantowanie w cechowaniu kulombowskim .....	369
Pozostałe więzy są drugiego rodzaju • Obliczenie nawiasów Diraca w cechowaniu kulombowskim • Konstrukcja hamiltonianu • Oddziaływanie kulombowskie	
8.4. Elektrodynamika w obrazie oddziaływania .....	372
Pole swobodne i hamiltoniany oddziaływania • Operatory w obrazie oddziaływania • Rozkład na mody normalne	
8.5. Propagator fotonu .....	376
Wielomian w liczniku • Wydzielenie członów niewspółzmienniczych • Znoszenie się członów niewspółzmienniczych	
8.6. Reguły Feynmana dla elektrodynamiki spinorowej .....	377
Grafy Feynmana • Wierzchołki • Linie zewnętrzne • Linie wewnętrzne • Rozwinięcie w $\alpha/4\pi$ • Polaryzacje: kołowa, liniowa i eliptyczna • Sumy polaryzacyjne i spinowe	

8.7. Rozpraszanie Comptona.....	384
Macierz $S$ • Różniczkowy przekrój czynny • Kinematyka • Sumy spinowe • Ślady • Wzór Kleina–Nishiny • Polaryzacja w rozpraszaniu Thomsona • Całkowity przekrój czynny	
8.8. Uogólnienie: pola z cechowaniem w postaci $p$ -formy*.....	392
Motywacja • $p$ -formy • Pochodne zewnętrzne • $p$ -formy zamknięte i zupełne • Pola z cechowaniem w postaci $p$ -form • Pola dualne i prądy w $D$ -wymiarowej czasoprzestrzeni • Równoważność pól z cechowaniem w postaci $p$ -form i $(D - p - 2)$ -form • Nic nowego w czasoprzestrzeni czterowymiarowej	
Dodatek. Ślady.....	395
Zadania.....	398
Wykaz cytowanej literatury.....	398
<b>9. METODY CAŁEK PO TRAJEKTORIACH.....</b>	<b>400</b>
9.1. Ogólny wzór z całką po trajektoriach.....	402
Amplitudy przejścia dla przedziałów infinityzmalnych • Amplitudy przejścia dla przedziałów skończonych • Funkcje interpolujące • Elementy macierzowe iloczynów chronologicznych • Równania ruchu	
9.2. Przejście do macierzy $S$ .....	409
Funkcja falowa próżni • Człony $i\epsilon$	
9.3. Lagranżowska wersja wzoru z całką po trajektoriach.....	413
Scałkowanie „pędów” • Skalary sprzężone przez pochodne • Nieliniowy model $\sigma$ • Pole wektorowe	
9.4. Wyprowadzenie reguł Feynmana z całek po trajektoriach.....	419
Wydzielenie działania pola swobodnego • Całka gaussowska • Propagatory: pola skalarne, pola wektorowe, sprzężenia z pochodnymi	
9.5. Całki po trajektoriach dla fermionów.....	423
Antyprzemienne $c$ -liczby • Wektory własne operatorów kanonicznych • Sumowanie stanów za pomocą całkowania Berezina • Zamiany zmiennych • Amplitudy przejścia dla przedziałów infinityzmalnych • Amplitudy przejścia dla skończonych przedziałów • Wyprowadzenie reguł Feynmana • Propagator fermionu • Amplitudy próżniowe jako wyznaczniki	
9.6. Sformułowanie elektrodynamiki kwantowej za pomocą całek po trajektoriach.....	438

Całka po trajektoriach w cechowaniu kulombowskim • Ponowne wprowadzenie $a^0$ • Przejście do cechowań współzmienniczych	
9.7. Rodzaje statystyk* .....	443
Przygotowanie stanów in oraz out • Reguły składania • W przestrzeniach o wymiarach $\geq 3$ tylko bozony i fermion • W dwóch wymiarach anyony	
Dodatek. Wielokrotne całki gaussowskie .....	445
Zadania .....	448
Wykaz cytowanej literatury .....	449
<b>10. METODY NIEPERTURBACYJNE</b> .....	<b>450</b>
10.1. Symetrie .....	450
Przesunięcia • Zachowanie ładunku • Twierdzenie Furry'ego	
10.2. Biegunologia .....	454
Wzór biegunowy dla ogólnych amplitud • Wyprowadzenie wzoru biegunowego • Wymiana pionów	
10.3. Renormalizacja pola i masy .....	461
Wzór redukcyjny LSZ • Pola zrenormalizowane • Bieguny propagatora • Brak poprawek promienistych do linii zewnętrznych • Przeciwczyłony w wyrazach energii własnej	
10.4. Zrenormalizowany ładunek i tożsamości Warda .....	467
Operator ładunku • Renormalizacja pola elektromagnetycznego • Renormalizacja ładunku • Tożsamość Warda-Takahashi • Tożsamość Warda	
10.5. Niezmienniczość względem cechowania .....	473
Poprzeczność amplitud wielofotonowych • Człony Schwingera • Człony cechowania w propagatorze fotonu • Struktura propagatora fotonu • Zerowa zrenormalizowana masa fotonu • Obliczenie $Z_3$ • Poprawki promieniste do wyboru cechowania	
10.6. Elektromagnetyczne czynniki postaci i moment magnetyczny .....	477
Elementy macierzowe $J^0$ • Czynniki postaci $J^\mu$ : spin zero • Czynniki postaci $J^\mu$ : spin $\frac{1}{2}$ • Moment magnetyczny cząstki o spinie $\frac{1}{2}$ • Pomiar czynnika postaci	
10.7. Reprezentacja Källena-Lehmanna .....	483
Funkcje spektralne • Związki przyczynowości • Reprezentacja spektralna	

• Asymptotyczne zachowanie propagatorów • Bieguny • Ograniczenia na stałe renormalizacyjne • $Z = 0$ dla cząstek złożonych	
10.8. Związki dyspersyjne*.....	488
Historia • Własności analityczne amplitudy rozpraszania do przodu bozonów bezmasowych • Odjęcia • Związki dyspersyjne • Symetria krzyżowania • Twierdzenie Pomeranchuka • Zachowanie asymptotyczne Reggego • Rozpraszanie fotonu	
Zadania .....	495
Wykaz cytowanej literatury .....	496
<b>11. JEDNOPĘTLOWE POPRAWKI PROMIENISTE W ELEKTRODYNAMICE KWANTOWEJ .....</b>	<b>497</b>
11.1. Przeciwczyłony .....	497
Renormalizacja pola, ładunku i masy • Przeciwczyłony lagranżowskie	
11.2. Polaryzacja próżni .....	498
Całka jednopętlowa dla wyrażenia energii własnej fotonu • Parametry Feynmana • Obrót Wicka • Regularyzacja wymiarowa • Niezmienniczność względem cechowania • Obliczenie $Z_3$ • Skracanie się nieskończoności • Polaryzacja próżni w rozpraszaniu cząstek naładowanych • Zjawisko Uehlinga • Atomy mionowe	
11.3. Anomalny moment magnetyczny i promienie ładunkowe .....	510
Wzór jednopętlowy na funkcję wierzchołkową • Obliczanie czynników postaci • Anomalny moment magnetyczny leptonu do rzędu $\alpha$ • Anomalny moment magnetyczny mionu do rzędu $\alpha^2 \ln(m_\mu/m_e)$ • Promień ładunkowy leptonów	
11.4. Energia własna elektronu .....	518
Wzór jednopętlowy na energię własną elektronu • Renormalizacja masy elektronu • Znoszenie się rozbieżności nadfioletowych	
Dodatek. Wybrane całki .....	522
Zadania .....	523
Wykaz cytowanej literatury .....	523

<b>12. OGÓLNA TEORIA RENORMALIZACJI</b> .....	524
12.1. <b>Stopnie rozbieżności</b> .....	525
Powierzchnowy stopień rozbieżności • Analiza wymiarowa • Renormalizowalność • Kryterium zbieżności	
12.2. <b>Znoszenie się rozbieżności</b> .....	530
Odjęcia przez różniczkowania • Program renormalizacji • Teorie renormalizowalne • Przykład: elektrodynamika kwantowa • Rozbieżności przekrywające się • Przepis renormalizacyjny BPHZ • Zmiana punktu renormalizacji: teoria $\phi^4$	
12.3. <b>Czy renormalizowalność jest niezbędna?</b> .....	542
Spis oddziaływań renormalizowalnych • Nie istnieje renormalizowalna teoria grawitacji • Znoszenie się rozbieżności w teoriach nierenormalizowalnych • Ograniczenie roli oddziaływań nierenormalizowalnych • Ograniczenia na nowe skale masy • Kłopoty z wyższymi pochodnymi? • Wykrywanie oddziaływań nierenormalizowalnych • Niskoenergetyczne rozwinięcia w teoriach nierenormalizowalnych • Przykład: pole skalarne z oddziaływaniem wyłącznie poprzez pochodne • Nasylenie czy nowa fizyka? • Efektywne teorie pola	
12.4. <b>Pływający parametr obciążenia*</b> .....	550
Metoda Wilsona • Równanie grupy renormalizacji • Twierdzenie Polchinskigo • Przyciąganie do stabilnej powierzchni • Pływający parametr obciążenia a renormalizowalność	
12.5. <b>Symetrie przypadkowe*</b> .....	554
Ogólna renormalizowalna teoria naładowanych leptonów • Przedefiniowanie pól leptonowych • Przypadkowe zachowanie zapachów leptonowych, P, C oraz T	
<b>Zadania</b> .....	557
<b>Wykaz cytowanej literatury</b> .....	557
<b>13. ZJAWISKA W PODCZERWIENI</b> .....	559
13.1. <b>Amplitudy miękkich fotonów</b> .....	559
Wypromieniowanie pojedynczego fotonu • Zaniedbywalne promieniowanie z linii wewnętrznych • Z niezmienniczości lorentzowskiej wynika zachowanie ładunku • Wypromieniowanie pojedynczego grawitonu • Z niezmienniczości lorentzowskiej wynika zasada równoważności • Wypromieniowanie wielu fotonów • Faktoryzacja	
13.2. <b>Miękkie fotony wirtualne</b> .....	565
Zjawisko miękkich fotonów wirtualnych • Poprawki promieniste do linii wewnętrznych	

13.3. Rzeczywiste miękkie fotony; znoszenie się rozbieżności .....	570
Sumowanie względem skrętności • Całkowanie względem energii • Sumowanie względem liczby fotonów • Znoszenie się podczerwonych parametrów obciążenia • Podobne własności grawitacji	
13.4. Ogólne rozbieżności w podczerwieni .....	573
Bezmasowe cząstki naładowane • Podczerwone rozbieżności w przypadku ogólnym • Strumienie • Twierdzenie Lee-Nauenberga	
13.5. Rozpraszanie miękkich fotonów* .....	578
Biegunki amplitudy • Związki zachowania • Uniwersalność granicy niskoenergetycznej	
13.6. Przybliżenie pola zewnętrznego* .....	582
Sumowanie względem permutacji wierzchołków fotonowych • Granica nierelatywistyczna • Wymiana w postaci skrzyżowanej drabinki	
Zadania .....	587
Wykaz cytowanej literatury .....	588
<b>14. STANY ZWIĄZANE W POLACH ZEWNĘTRZNYCH .....</b>	<b>589</b>
14.1. Równanie Diraca .....	590
Funkcje falowe Diraca jako elementy macierzowe pola • Antykomutatory i zupełność • Stany własne energii • Funkcje falowe ujemnych energii • Ortonormalizacja • „Duże” i „małe” składowe • Parzystość • Zależność od spinu i od kątów • Radialne równania falowe • Energie • Struktura subtelna • Przybliżenia nierelatywistyczne	
14.2. Poprawki promieniste w polach zewnętrznych .....	597
Propagator elektronu w polu zewnętrznym • Niejednorodne równanie Diraca • Wpływ poprawek promienistych • Przesunięcia energii	
14.3. Przesunięcie Lamba w lekkich atomach .....	603
Rozdzielenie niskich i wysokich energii • Człony wysokoenergetyczne • Człony niskoenergetyczne • Wynik renormalizacji masy • Całkowite przesunięcie energii • $\ell = 0$ • $\ell \neq 0$ • Wyniki numeryczne • Teoria a doświadczenie dla klasycznego przesunięcia Lamba • Teoria a doświadczenie dla przesunięcia energii poziomego $1s$	
Zadania .....	620

Wykaz cytowanej literatury .....	621
SKOROWIDZ .....	622

## *Ogólny zarys treści tomu II*

15. TEORIE Z CECHOWANIEM NIEABELOWYM
16. METODY POLA ZEWNĘTRZNEGO
17. RENORMALIZACJA TEORII CECHOWANIA
18. METODY GRUPY RENORMALIZACJI
19. SPONTANICZNIE NARUSZONE SYMETRIE GLOBALNE
20. ROZWINIĘCIA ILOCZYNU OPERATORÓW
21. SPONTANICZNIE NARUSZONE SYMETRIE CECHOWANIA
22. ANOMALIE
23. ROZSZERZONE KONFIGURACJE PÓL

