

Spis treści

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

PRZEDMOWA DO DRUGIEGO TOMU	17
OZNACZENIA	21
15. TEORIE Z CECHOWANIEM NIEABELOWYM	23
15.1. Niezmienniczość względem cechowania	24
Przekształcenia cechowania • Stałe struktury • Tożsamość Jacobiego • Reprezentacja dołączona • Teoria Yanga–Millsa • Pochodne kowariantne • Tensor natężenia pola • Skończone przekształcenia cechowania • Ana- logia do ogólnej teorii względności	
15.2. Lagranżjany teorii z cechowaniem i proste grupy Liego	29
Lagranżjan pól cechowania • Metryka • Antysymetryczne stałe struktury • Proste, półproste i $U(1)$ algebry Liego • Struktura algebry cechowania • Algebry zwarte • Stałe sprzężenia	
15.3. Równania pola i prawa zachowania	34
Prądy zachowane • Prądy zachowane kowariantnie • Niejednorodne rów- nania pola • Jednorodne równania pola • Analogia do tensora energii- -pędu • Generatory symetrii	
15.4. Kwantowanie	37
Pierwotne i wtórne więzy pierwszego rodzaju • Cechowanie osiowe • Nie- jednoznaczność Gribowa • Zmienne kanoniczne • Hamiltonian • Po- nowne wprowadzenie A_{α}^0 • Działanie kowariantne • Niezmienniczość miary względem cechowania	
15.5. Metoda De Witta–Faddiejewa–Popowa	42
Uogólnienie wyników otrzymanych w cechowaniu osiowym • Niezależność	

	od funkcjonalów ustalających cechowanie • Uogólnione cechowanie Feynmana • Postać wierzchołków	
15.6.	Duchy 48 Wyznacznik jako całka po trajektoriach • Pole ducha i pole antyducha • Reguły Feynmana dla duchów • Zmodyfikowane działanie • Zliczanie potęg i renormalizowalność	
15.7.	Symetria BRST 51 Pole pomocnicze h_α • Przekształcenie BRST • Nilpotentność • Niezmienniczość nowego działania • Kohomologia BRST • Niezależność od ustalenia cechowania • Zastosowanie do elektrodynamiki • Kwantowanie BRST • Interpretacja geometryczna	
15.8.	Uogólnienia symetrii BRST* 61 Notacja De Witta • Ogólne twierdzenie Faddiejewa–Popowa–De Witta • Przekształcenia BRST • Nowe działanie • Operator Sławnowa • Stałe struktury zależne od pól • Uogólniona tożsamość Jacobiego • Niezmienniczość nowego działania • Niezależność od ustalenia cechowania • Działania dla duchów opisane formami niekwadratowymi • Kwantowanie BRST • Kohomologia BRST • Symetria anty-BRST	
15.9.	Formalizm Batalina–Wilkowskiego* 67 Otwarte algebry cechowania • Antypola • Równanie M • Zmienne minimalne i pary trywialne • Przekształcenia BRST w obecności antypól • Antynawiasy • Przekształcenia antykanoniczne • Ustalenie cechowania • Kwantowe równanie M	
	Dodatek A. Twierdzenie o algebrach Liego 76	
	Dodatek B. Katalog Cartana 80	
	Zadania 85	
	Wykaz cytowanej literatury 86	
16.	METODY POLA ZEWNĘTRZNEGO 89	
16.1.	Kwantowe działanie efektywne 89 Prądy • Funkcjonał generujący wszystkie diagramy • Funkcjonał generujący diagramy spójne • Przekształcenie Legendre’a • Funkcjonał generujący diagramy jednocząstkowo nieprzywiedlne • Równania pola z poprawkami kwantowymi • Sumowanie diagramów-drzew	

16.2. Obliczanie potencjału efektywnego.....	95
Potencjał efektywny dla pól stałych • Rachunek jednopętlowy • Rozbieżności • Renormalizacja • Pętle fermionowe	
16.3. Interpretacja energetyczna.....	99
Zaburzenie adiabatyczne • Potencjał efektywny jako minimum energii • Wypukłość • Niestabilność pomiędzy lokalnymi minimami • Interpolacja liniowa	
16.4. Symetrie działania efektywnego.....	102
Symetria i renormalizacja • Tożsamości Sławnowa–Taylora • Symetrie realizowane liniowo • Pola fermionowe i prądy	
Zadania	105
Wykaz cytowanej literatury.....	105
17. RENORMALIZACJA TEORII Z CECHOWANIEM.....	107
17.1. Równanie Zinn–Justina.....	107
Tożsamości Sławnowa–Taylora dla symetrii BRST • Pola zewnętrzne $K_n(x)$ • Antynawiasy	
17.2. Renormalizacja: bezpośrednia analiza.....	109
Argument rekurencyjny • Warunek na nieskończoności wynikający z symetrii BRST • Liniowość w polach $K_n(x)$ • Nowa symetria BRST • Skracanie nieskończoności • Stałe renormalizacyjne • Nieliniowe warunki cechowania	
17.3. Renormalizacja: ogólne teorie z cechowaniem*.....	119
Czy „nierenormalizowalne” teorie z cechowaniem są renormalizowalne? • Więzy strukturalne • Antykanoniczna zamiana zmiennych • Argument rekurencyjny • Twierdzenia o kohomologii	
17.4. Cechowanie pola tła.....	123
Funkcje ustalające nowe cechowanie • Prawdziwa i formalna niezmienniczość cechowania • Stałe renormalizacyjne	
17.5. Przykład rachunku jednopętlowego w cechowaniu pola tła.....	129
Jednopętlowe działanie efektywne • Wyznaczniki • Obliczenia algebraiczne dla stałych pól tła • Renormalizacja pól cechowania i sprzężeń • Interpretacja nieskończoności	
Zadania	139
Wykaz cytowanej literatury.....	139

18. METODY GRUPY RENORMALIZACJI	140
18.1. Skąd pochodzą duże logarytmy?	141
Osobliwości przy zerowej masie • Amplitudy i szybkości przejść „bezpieczne w podczerwieni” • Dżety • Osobliwości przy zerowej masie z renormalizacji • Operatory zrenormalizowane	
18.2. Pływająca skala	148
Renormalizacja Gell-Manna–Lowa • Równanie grupy renormalizacji • Obliczenia jednopętlowe • Zastosowanie do teorii ϕ^4 • Czynniki renormalizacyjne pól • Zastosowanie do elektrodynamiki kwantowej • Efektywna stała struktury subtelnej • Zrenormalizowane sprzężenia zależne od pól • Niestabilność próżni	
18.3. Różnorodność zachowań asymptotycznych	160
Osobliwości przy skończonej energii • Nieprzerwany wzrost • Punkt stały dla skończonej wartości sprzężenia • Swoboda asymptotyczna • Kwantowanie na sieci • Trywialność • Uniwersalne współczynniki w funkcji beta	
18.4. Wiele sprzężeń i efekty masowe	170
Zachowanie w otoczeniu punktu stałego • Niezmiennicze wartości własne • Teorie nierenormalizowalne • Skończenie wymiarowe powierzchnie krytyczne • Renormalizacja masy przy zerowej masie • Równania grupy renormalizacji dla mas	
18.5. Zjawiska krytyczne*	176
Małe liczby falowe • Sprzężenia istotne, nieistotne i marginalne • Przejścia fazowe i powierzchnie krytyczne • Temperatura krytyczna • Zachowanie się długości korelacji • Wykładnik krytyczny • $4 - \epsilon$ wymiarów • Punkt stały Wilsona–Fishera • Porównanie z doświadczeniem • Klasy uniwersalności	
18.6. Minimalne odjęcie	180
Definicja sprzężenia zrenormalizowanego • Obliczanie funkcji beta • Zastosowanie do elektrodynamiki • Zmodyfikowane odjęcie minimalne • Oddziaływania nierenormalizowalne	
18.7. Chromodynamika kwantowa	183
Kolory i zapachy kwarków • Obliczanie funkcji beta • Swoboda asymptotyczna • Uwięzienie kwarków i gluonów • Dżety • Anihilacja $e^+ - e^-$ w hadrony • Symetrie przypadkowe • Oddziaływania nierenormalizowalne • Zachowanie sprzężenia cechowania • Wyniki doświadczalnego wyznaczania g_s i Λ	
18.8. Ulepszona teoria zaburzeń*	190
Wiodące logarytmy • Współczynniki logarytmów	

Zadania	191
Wykaz cytowanej literatury	192
19. SPONTANICZNIE NARUSZONE SYMETRIE GLOBALNE.....	194
19.1. Zdegenerowane próżnie	194
Zdegenerowane minima potencjału efektywnego • Symetria naruszona czy symetryczne superpozycje? • Duże układy • Faktoryzacja na dużych odległościach • Diagonalizacja próżniowych wartości oczekiwanych • Rozkład gronowy	
19.2. Bozony Goldstone'a.....	198
Naruszone symetrie globalne implikują bezmasowe bozony • Dowód oparty na potencjale efektywnym • Dowód oparty na algebrze prądów • Czynniki F i próżniowe wartości oczekiwane • Oddziaływania miękkich bozonów Goldstone'a	
19.3. Spontanicznie naruszone symetrie przybliżone.....	209
Bozony pseudogoldstonowskie • Diagramy-kijanki • Ułożenie próżni • Macierz masy • Dodatniość	
19.4. Piony jako bozony Goldstone'a	214
Symetria chiralna $SU(2) \times SU(2)$ chromodynamiki kwantowej • Naruszenie symetrii chiralnej do symetrii izospinowej • Słabe prądy wektorowy i osiowo-wektorowy • Amplituda rozpadu pionu • Osiove czynniki postaci nukleonu • Relacja Goldbergera–Treimana • Ułożenie próżni • Masy kwarków i pionu • Oddziaływania miękkich pionów • Uwaga historyczna	
19.5. Efektywne teorie pola: piony i nukleony	225
Algebra prądów dla dwóch miękkich pionów • Uzasadnienie lagranżjanu efektywnego oparte na algebrze prądów • Model σ • Przekształcenie do postaci zawierającej sprzężenia z pochodnymi • Nieliniowa realizacja symetrii $SU(2) \times SU(2)$ • Lagranżjan efektywny dla miękkich pionów • Bezpośrednie uzasadnienie lagranżjanu efektywnego • Ogólny lagranżjan efektywny dla pionów • Zliczanie potęg • Rozpraszanie pion-pion dla bezmasowych pionów • Identyfikacja czynnika F • Człony masowe pionu w lagranżjanie efektywnym • Rozpraszanie pion-pion dla pionów rzeczywistych • Długości rozpraszania pion-pion • Lagranżjan efektywny pion-nukleon • Pochodne kowariantne • $g_A \neq 1$ • Zliczanie potęg z nukleonami • Długości rozpraszania pion-nukleon • Człony σ • Naruszenie symetrii izospinowej • Reguła sum Adlera–Weisbergera	
19.6. Efektywne teorie pola: ogólne symetrie naruszone.....	245
Przekształcenie do postaci zawierającej sprzężenia z pochodnymi • Bozony	

	Goldstone'a i warstwy prawostronne • Przestrzenie symetryczne • Rozkład Cartana • Reguły przekształceń nieliniowych • Jednoznaczność • Pochodne kowariantne • Człony naruszające symetrię • Zastosowanie do członów masowych kwarków • Zliczanie potęg • Parametry porządku	
19.7.	Efektywne teorie pola: $SU(3) \times SU(3)$ 261 Multiplety i macierze grupy $SU(3)$ • Bozony Goldstone'a naruszonej $SU(3) \times SU(3)$ • Człony masowe kwarków • Masy mezonów pseudoskalarnych • Poprawki elektromagnetyczne • Stosunki mas kwarków • Człony wyższych rzędów w lagranżjanie • Przesunięcia mas nukleonów	
19.8.	Człony anomalne w efektywnych teoriach pola* 270 Człon Wessa–Zumino–Wittena • Postać w pięciu wymiarach • Sprzężenie o wartości całkowitej • Jednoznaczność i kohomologia de Rhama	
19.9.	Symetrie nienaruszone 274 Warunek trwałej masy • Dowód Vafy–Wittena • Małe, niezdegenerowane masy kwarków	
19.10.	Problem $U(1)$ 280 Chiralna symetria $U(1)$ • Implikacje dla mas mezonów pseudoskalarnych	
	Zadania 283	
	Wykaz cytowanej literatury 284	
20.	ROZWINIĘCIA ILOCZYNÓW OPERATORÓW 287	
20.1.	Rozwinięcie iloczynu operatorów: opis i wyprowadzenie 288 Przedstawienie rozwinięcia • Dominacja prostych operatorów • Wyprowadzenie oparte na całce po trajektoriach	
20.2.	Przepływ pędu* 291 Wkład ϕ^2 dla dwóch dużych pędów • Operatory zrenormalizowane • Równanie całkowe dla funkcji współczynnikowej • Wkład ϕ^2 dla wielu dużych pędów	
20.3.	Równania grupy renormalizacji dla funkcji współczynnikowych 298 Wyprowadzenie i rozwiązanie • Zachowanie dla punktów stałych • Zachowanie w przypadku swobody asymptotycznej	
20.4.	Własności symetrii funkcji współczynnikowych 300 Niezmienniczość względem spontanicznie naruszonych symetrii	

20.5.	Reguły sum dla funkcji spektralnej	302
	Zdefiniowanie funkcji spektralnych • Pierwsza, druga i trzecia reguła sum • Zastosowanie do symetrii chiralnej $SU(N) \times SU(N)$ • Porównanie z doświadczeniem	
20.6.	Rozpraszanie głęboko nieelastyczne	308
	Funkcje struktury W_1 i W_2 • Głęboko nieelastyczny różniczkowy przekrój czynny • Skalowanie Bjorkena • Model partonowy • Relacja Callana–Grossa • Reguły sum • Funkcje struktury T_1 i T_2 • Związek między T_r i W_r • Symetryczne operatory tensorowe • Twist • Operatory o minimalnym twiście • Obliczanie funkcji współczynnikowych • Reguły sum dla partonowych funkcji rozkładu • Równania różniczkowe Altarelligo–Parisiego • Poprawki logarytmiczne do skalowania Bjorkena	
20.7.	Renormalony*	319
	Sumowanie Borela szeregu rachunku zaburzeń • Przeszkody wywołane przez instantony i renormalony • Instantony w bezmasowej teorii ϕ^4 • Renormalony w chromodynamice kwantowej	
	Dodatek. Przepływ pędu: przypadek ogólny	325
	Zadania	329
	Wykaz cytowanej literatury	330
21.	SPONTANICZNIE NARUSZONE SYMETRIE CECHOWANIA	331
21.1.	Cechowanie unitarne	331
	Eliminacja bozonów Goldstone'a • Masy bozonów wektorowych • Symetrie nienaruszone i bezmasowe bozony wektorowe • Reprezentacje zespolone • Propagator pola wektorowego • Ciągłość przy znikających sprzężeniach cechowania	
21.2.	Renormalizowalne cechowania ξ	337
	Funkcja ustalająca cechowanie • Lagranżjan z ustalonym cechowaniem • Propagatory	
21.3.	Teoria oddziaływań elektroslabych	341
	Symetrie zachowujące liczbę leptonową • $SU(2) \times U(1)$ • W^\pm, Z^0 i fotony • Kąt mieszania Weinberga • Sprzężenia leptonu z bozonem wektorowym • Masy W^\pm i Z^0 • Rozpad mionu • Efektywna stała struktury subtelnej • Odkrycie prądów neutralnych • Prądy kwarkowe • Kąt Cabibbo • Kwark c • Trzecia generacja • Macierz Kobayashi–Maskawy • Odkrycie W^\pm i Z^0 • Precyzyjne testy doświadczalne • Symetrie przypadkowe	

• Oddziaływania nierenormalizowalne • Niezachowanie liczby leptonowej i masy neutrin • Niezachowanie liczby barionowej i rozpad protonu	
21.4. Dynamicznie naruszone symetrie lokalne*	356
Fikcyjne pola cechowania • Konstrukcja lagranżjanu • Zliczanie potęg • Ogólny wzór masowy • Przykład: $SU(2) \times SU(2)$ • Strażnicza $SU(2) \times SU(2)$ • Technicolor	
21.5. Unifikacja oddziaływań elektroślabyh i silnych	366
Proste grupy cechowania • Związki pomiędzy sprzężeniami cechowania • Przepływ grupy renormalizacji • Kąt mieszania i masa unifikacji • Niezachowanie liczb leptonowej i barionowej	
21.6. Nadprzewodnictwo*	371
$U(1)$ naruszona do Z_2 • Mod goldstonowski • Lagranżjan efektywny • Zachowanie ładunku • Efekt Meissnera • Głębokość wnikania • Pole krytyczne • Kwantowanie strumienia • Zerowa oporność • Efekt zmienoprądowy Josephsona • Teoria Ginzburga-Landaua • Długość korelacji • Linie wirów • Odtworzenie symetrii $U(1)$ • Stabilność • Nadprzewodniki I i II rodzaju • Pola krytyczne dla wirów • Zachowanie w pobliżu centrum wiru • Teoria efektywna dla elektronów w pobliżu powierzchni Fermiego • Zliczanie potęg • Wprowadzenie pola pary • Działywanie efektywne • Równanie szczeliny • Równania grupy renormalizacji • Warunki dla nadprzewodnictwa	
Dodatek. Ogólne cechowanie unitarne	392
Zadania	394
Wykaz cytowanej literatury	394
22. ANOMALIE	398
22.1. Problem rozpadu π^0	398
Szybkość przejścia $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ • Naiwne oszacowanie • Tłumienie spowodowane symetrią chiralną • Porównanie z doświadczeniem	
22.2. Przekształcenie miary: anomalia abelowa	401
Przekształcenia chiralne i niechiralne • Funkcja anomalii • Gęstość Cherna-Pontriagina • Niezachowanie prądu • Zachowanie prądu zmienniczego względem cechowania • Obliczenie $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ • Rachunek euklidesowy • Twierdzenie o indeksie Atiyaha-Singera	

22.3.	Bezpośrednie obliczenie anomalii: przypadek ogólny	410
	Prądy niezachowujące liczby fermionowej • Obliczanie diagramu trójkątnego • Wektory przesunięcia • Anomalia symetryczna • Postać Bardeena • Twierdzenie Adlery–Bardeena • Masywne fermiony • Inne podejście • Anomalie globalne	
22.4.	Teorie z cechowaniem wolne od anomalii	424
	Anomalie cechowania muszą zniknąć • Reprezentacje rzeczywiste i pseudorezeczywiste • Grupy bezpieczne • Skrącanie się anomalii w modelu standardowym • Anomalie grawitacyjne • Przypisanie hiperładunków • Inna $U(1)$?	
22.5.	Bezmasowe stany związane*	429
	Złożone kwarki i leptony? • Nienaruszone symetrie chiralne • Warunki dopasowania anomalii 't Hoofta • Dopasowanie anomalii dla nienaruszonej, chiralnej $SU(n) \times SU(n)$ z grupą cechowania $SU(N)$ • Przypadek $N = 3$ • Chiralna $SU(3) \times SU(3)$ musi być naruszona • Warunek odprężania 't Hoofta • Warunek trwałej masy	
22.6.	Warunki zgodności	437
	Warunki Wessa–Zumino • Kohomologia BRST • Wyprowadzenie anomalii symetrycznej • Równania zstępujące • Rozwiązanie równań • Człony Schwingera • Anomalie w równaniu Zinn–Justina • Kohomologia antynawiasu • Dowód algebraiczny nieobecności anomalii dla grup bezpiecznych	
22.7.	Anomalie i bozony Goldstone'a	449
	Dopasowanie anomalii • Rozwiązanie anomalnych tożsamości Sławnowa–Taylora • Jednoznaczność • Anomalne oddziaływania bozonów Goldstone'a • Przypadek $SU(3) \times SU(3)$ • Wyprowadzenie oddziaływania Wessa–Zumino–Wittena • Obliczenie całkowitego współczynnika • Uogólnienia	
	Zadania	458
	Wykaz cytowanej literatury	459
23.	ROZCIĄGŁE KONFIGURACJE PÓŁ	461
23.1.	Użycie topologii	462
	Klasyfikacje topologiczne • Homotopia • Skyrmiony • Twierdzenie Derricka • Granice domen • Nierówność Bogomolnego • Problemy kosmologiczne • Instantony • Monopole i linie wirów • Odtworzenie symetrii	

23.2.	Grupy homotopii	470
	Reguła mnożenia dla $\pi_1(\mathcal{M})$ • Łączność • Odwrotności • $\pi_1(S_1)$ • Topologiczne prawa zachowania • Reguła mnożenia dla $\pi_k(\mathcal{M})$ • Liczba nawinięć	
23.3.	Monopole	477
	Model $SU(2)/U(1)$ • Liczba nawinięć • Pole elektromagnetyczne • Ładunek magnetyczny monopola • Indeks Kroneckera • Monopol 't Hoofta–Poliakowa • Inna nierówność Bogomolnego • Monopol BPS • Cechowanie Diraca • Kwantowanie ładunku • Monopole $G/(H' \times U(1))$ • Problemy kosmologiczne • Oddziaływania monopol–cząstka • Monopole G/H z grupą G nie jednospójną • Nieistotność zestawu pól	
23.4.	Niezmiennik całkowy Cartana–Maurera	487
	Definicja niezmiennika • Niezależność od układu współrzędnych • Niezmienniczność topologiczna • Addytywność • Niezmiennik całkowy dla $S_1 \mapsto U(1)$ • Twierdzenie Botta • Niezmiennik całkowy dla $S_3 \mapsto SU(2)$	
23.5.	Instantony	492
	Obliczanie niezmiennika Cartana–Maurera • Gęstość Cherna–Pontriagina • Jeszcze jedna nierówność Bogomolnego • Rozwiązanie z $\nu = 1$ • Dowlona liczba nawinięć • Rozwiązanie problemu $U(1)$ • Niezachowanie liczb barionowej i leptonowej przez instantony elektroslabe • Podejście w przestrzeni Minkowskiego • Przenikanie bariery • Fluktuacje termiczne	
23.6.	Kąt teta	497
	Rozkład gronowy • Superpozycja liczb nawinięć • Niezachowanie P i CP • Zespolone masy fermionów • Tłumienie niezachowania P i CP przez małe masy kwarków • Elektryczny moment dipolowy neutronu • Symetria Peccei–Quinna • Aksjony • Masa aksjonu • Oddziaływania aksjonu	
23.7.	Fluktuacje kwantowe wokół rozciągniętych konfiguracji pól	504
	Fluktuacje w przypadku ogólnym • Parametry kolektywne • Czynniki wyznacznikowy • Zależność od stałych sprzężenia • Zliczanie parametrów kolektywnych	
23.8.	Rozpad próżni	507
	Próżnie prawdziwe i fałszywe • Rozwiązanie zwane odbiciem • Czterowymiarowa niezmienniczność obrotowa • Znak działania • Szybkość rozpadu na jednostkę objętości • Przybliżenie cienkiej ściany	
	Dodatek A. Euklidesowe całki po trajektoriach	511
	Dodatek B. Lista grup homotopii	515