

Spis treści

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

PRZEDMOWA DO TRZECIEGO TOMU	17
OZNACZENIA	21
24. WPROWADZENIE HISTORYCZNE	25
24.1. Niekonwencjonalne symetrie i twierdzenia „no-go”	25
Symetria $SU(6)$ • Proste twierdzenie „no-go” dla niekonwencjonalnych zwartych półprostych algebr Liego • Rola niezmienniczości relatywistycznej	
24.2. Narodziny supersymetrii	28
Teoria struny bozonowej • Współrzędne fermionowe • Supersymetria na powierzchni świata • Model Wessa–Zumino • Prekursorzy	
Dodatek A. Symetria $SU(6)$	32
Dodatek B. Twierdzenie Coleman–Manduli	37
Zadania	47
Wykaz cytowanej literatury	47
25. ALGEBRY SUPERSYMETRII	49
25.1. Algebry Liego z gradacją i parametry z gradacją	49
Generatory fermionowe i bozonowe • Uogólniona tożsamość Jacobiiego • Parametry grassmanowskie • Stałe struktury z reguł mnożenia supergrupowego • Sprzężenie zespolone	

25.2. Algebry supersymetrii	53
Twierdzenie Haaga–Łopuszańskiego–Sohniusa • Przekształcenia lorentzowskie generatorów fermionowych • Ładunki centralne • Inne symetrie bozonowe • Symetria R • Supersymetria prosta i rozszerzona • Notacja czteroskładnikowa • Algebra superkonforemna	
25.3. Własności generatorów supersymetrii przy inwersji przestrzennej ..	65
Czynniki fazowe parzystości w supersymetrii prostej • Fermiony mają urojoną parzystość wewnętrzną • Macierze parzystości w supersymetrii rozszerzonej • Notacja Diraca	
25.4. Supermultiplety cząstek bezmasowych	68
Znane cząstki są bezmasowe w przypadku nienaruszonej supersymetrii • Operatory zwiększające i zmniejszające skłonność • Proste dublety supersymetrii • Skwarki, sleptony i fermiony cechowania • Grawitino • Multiplety supersymetrii rozszerzonej • Problem chiralności w supersymetrii rozszerzonej	
25.5. Supermultiplety cząstek masywnych	73
Operatory zwiększające i zmniejszające trzecią składową spinu • Multiplety masywne ogólnej postaci w supersymetrii prostej • Supermultiplety zredukowane • Relacje masowe w supersymetrii rozszerzonej • Stany BPS i supermultiplety krótkie	
Zadania	79
Wykaz cytowanej literatury	79
26. SUPERSYMETRYCZNE TEORIE POLA	80
26.1. Bezpośrednia konstrukcja supermultipletów pól	80
Konstrukcja najprostszyc multipletów pól w przypadku $N = 1$ • Pola pomocnicze • Reguły inftytezymalnych przekształceń supersymetrii • Notacja czteroskładnikowa • Odtworzenie supermultipletu Wessa–Zumino	
26.2. Ogólna postać superpola	84
Spinorowe współrzędne superprzestrzeni • Generatory supersymetrii jako operatory różniczkowe w superprzestrzeni • Przekształcenia supersymetrii w superprzestrzeni • Ogólna postać superpola • Reguły tworzenia iloczynów • Supersymetryczne operatory różniczkowe w superprzestrzeni • Supersymetryczne działania dla superpól ogólnej postaci • Parzystości pól składowych • Podliczenie składowych fermionowych i bozonowych	

26.3.	Superpola chiralne i liniowe	93
	Warunki chiralności dla superpola ogólnej postaci • Superola lewo- i prawochiralne • Współrzędne x_{\pm}^{μ} • Więzy różniczkowe • Reguły tworzenia iloczynów • Supersymetryczne człony \mathcal{F} • Człony \mathcal{F} równoważne członom D • Superpotencjały • Potencjały Kählera • Całkowanie przez części w superprzestrzeni • Inwersja przestrzenna superpól chiralnych • Symetria R jeszcze raz • Superpola liniowe	
26.4.	Renormalizowalne teorie superpól chiralnych	101
	Podliczanie potęg • Lagranżjan kinetyczny • Człon \mathcal{F} superpotencjału • Pełny lagranżjan • Wylimowanie pól pomocniczych • Superalgebra na powłoce masy • Rozwiązania próżniowe • Masy i sprzężenia • Odtworzenie lagranżjanu Wessa–Zumino	
26.5.	Spontaniczne naruszenie supersymetrii w przybliżeniu drzewowym	109
	Mechanizm O’Raifeartaigha • Ograniczenia nakładane przez symetrię R • Płaskie kierunki potencjału • Goldstino	
26.6.	Całki po superprzestrzeni, równania pola i superpole prądu	112
	Całkowanie Berezina • Człony D i \mathcal{F} jako całki po superprzestrzeni • Superpola potencjałów • Superprzestrzenne równania pola • Prądy zachowane jako składowe superpól liniowych • Superprzestrzenne warunki zachowania	
26.7.	Superprąd	117
	Prąd supersymetrii • Przekształcenia superprzestrzenne generowane przez prąd supersymetrii • Lokalne przekształcenia supersymetrii • Konstrukcja superprądu • Zachowanie superprądu • Tensor energii-pędu i prąd symetrii R • Niezmienniczość względem skalowania i zachowanie ładunku symetrii R • Niejednoznaczność superprądu	
26.8.	Ogólne potencjały Kählera*	130
	Działania nierenormalizowalne nie zawierające pochodnych • Człon D potencjału Kählera • Metryka Kählera • Gęstość lagranżjanu • Nieliniowy model σ jako efektywny opis spontanicznego naruszenia symetrii wewnętrznej • Rozmaitości Kählera • Skompleksyfikowane przestrzenie warstw	
	Dodatek. Spinory Majorany	135
	Zadania	139
	Wykaz cytowanej literatury	140

27. SUPERSYMETRYCZNE TEORIE Z CECHOWANIEM	141
27.1. Niezmiennicze względem cechowania działania dla superpól chiralnych	141
Przekształcenia cechowania superpól chiralnych • Superpole cechowania V	
• Niezmienniczość względem rozszerzonych przekształceń cechowania • Cechowanie Wessa–Zumino • Niezmienniczy względem cechowania supersymetryczny człon kinetyczny superpól chiralnych	
27.2. Niezmiennicze względem cechowania działanie dla abelowych superpól cechowania	151
Supermultiplet natężenia pola • Gęstość lagranżjanu kinetycznego abelowego supermultipletu cechowania • Człon Fayeta–Iliopoulosa • Spinorowe superpole W_α natężenia pola abelowego • Lewo- i prawochiralne części W_α	
• W_α jako pochodna superprzestrzenna superpola V • Niezmienniczość W_α względem cechowania • Superprzestrzenne tożsamości „Bianchiego”	
27.3. Niezmiennicze względem cechowania działanie dla ogólnych superpól cechowania	156
Gęstość lagranżjanu kinetycznego nieabelowego supermultipletu cechowania	
• Spinorowe superpole W_α natężenia pola nieabelowego • Lewo- i prawochiralne części W_α • Człon θ • Zespolony parametr sprzężenia τ	
27.4. Renormalizowalne teorie z cechowaniem i superpolami chiralnymi	162
Supersymetryczna gęstość lagranżjanu • Wyeliminowanie pól pomocniczych	
• Warunki zapewniające nienaruszenie supersymetrii • Podliczenie niezależnych warunków i zmiennych polowych • Cechowanie unitarne • Masy cząstek o spinach 0, 1/2 oraz 1 • Prąd supersymetrii • Nieabelowe teorie z cechowaniem i potencjałem Kählera ogólnej postaci • Masa fermionu cechowania	
27.5. Naruszenie supersymetrii w przybliżeniu drzewowym — ciąg dalszy	174
Naruszenie supersymetrii w supersymetrycznej elektrodynamice kwantowej • Przypadek ogólny: masy cząstek o spinach 0, 1/2 oraz 1 • Reguły sum dla mas • Składowe goldstinowe fermionu cechowania i pól fermionów chiralnych	
27.6. Perturbacyjne twierdzenia o braku renormalizacji	179
Nierenormalizowanie się wilsonowskiego superpotencjału • Jednopętłowa renormalizacja członów kwadratowych w superpolach cechowania • Dowód wykorzystujący holomorficzność i dodatkowe symetrie w obecności superpól zewnętrznych • Nierenormalizowanie się stałej ξ_A Fayeta–Iliopoulosa • W przypadku $\xi_A = 0$ naruszenie supersymetrii zależy tylko od superpotencjału	
• Teorie nierenormalizowalne	

27.7. Miękkie naruszenie supersymetrii*	186
Warunki ograniczające poprawki promieniste naruszające supersymetrię • Rozbieżności kwadratowe diagramów kijankowych	
27.8. Inne podejście: przekształcenia supersymetrii niezmiennicze względem cechowania*	189
Reguły przekształceń De Wita–Freedmana • Zachowywanie cechowania Wessa–Zumino przez przekształcenia supersymetrii połączone z rozszerzonymi przekształceniami cechowania	
27.9. Teorie z cechowaniem i supersymetrią rozszerzoną*	192
Supersymetria o $N = 2$ z supersymetrią o $N = 1$ i symetrii R • Lagranżjan supersymetrycznej teorii o $N = 2$ • Wylimitowanie pól pomocniczych • Prąd supersymetrii • Obliczenie ładunków centralnych à la Witten–Olive • Nieronormalizowanie się mas • Monopole BPS • Wprowadzenie hipermulti- pletów • Supersymetria o $N = 4$ • Obliczenie funkcji beta • Teoria o $N = 4$ jest skończona • Dualność Montonena–Olive’a	
Zadania	207
Wykaz cytowanej literatury	208
28. SUPERSYMETRYCZNA WERSJA MODELU STANDARDOWEGO	210
28.1. Superpola, anomalie i prawa zachowania	211
Superpola cechowania, kwarków i leptonów • Co najmniej dwa dublety superpól skalarnych • Sprzężenia Yukawy z członów \mathcal{F} • Ograniczenia wynikające z anomalii • Niczym nie tłumione pogwałcenie liczby bariono- wej i leptonowej • Symetria R • Parzystość R • Człon μ • Problem hierarchii • Masy s -cząstek • Ograniczenia kosmologiczne na najlżejszą s -cząstkę	
28.2. Supersymetria i unifikacja oddziaływań silnych i elektroślabych....	219
Równania grupy renormalizacji dla biegnących stałych sprzężenia cechowania • Modyfikacje funkcji beta spowodowane supersymetrią • Obliczenie kąta mieszania elektroślabeo i skali unifikacji • Tylko dwa dublety superpól ska- larnych • Wartość stałej sprzężenia przy skali unifikacji	
28.3. Gdzie zostaje naruszona supersymetria?	224
Naruszenie supersymetrii w przybliżeniu drzewowym jest wykluczone • Hie- rarchia jako skutek efektów nieperturbacyjnych związanych z asymptotycznie swobodnymi stałymi sprzężenia cechowania • Przekazywanie naruszenia su- persymetrii za pośrednictwem oddziaływań cechowania i oddziaływań grawi- tacyjnych • Oszacowania skali naruszenia supersymetrii • Masa grawitina • Ograniczenia kosmologiczne	

28.4.	Minimalny supersymetryczny model standardowy	231
	Naruszenie supersymetrii przez człony superrenormalizowalne • Ogólna postać lagranżjanu • Procesy zmieniające zapach • Obliczenie amplitudy mieszania $K^0-\bar{K}^0$ • Zdegenerowane skwarki i sleptony • Pogwałcenie parzystości CP • Obliczenie chromoelektrycznego momentu dipolowego kwarka • „Naiwna analiza wymiarowa” • Elektryczny moment dipolowy neutronu • Ograniczenia na masy i/lub fazy	
28.5.	Sektor o zerowej liczbie barionowej i leptonowej	243
	Wkład członów D do potencjału pól skalarnych • Wkład członu μ do potencjału pól skalarnych • Człony miękko naruszające supersymetrię • Ograniczenie na parametry wynikające ze stabilności próżni • Znalezienie minimum potencjału • $B\mu \neq 0$ • Masy neutralnych skalarów o ujemnym CP • Masy neutralnych skalarów o dodatnim CP • Masy skalarów naładowanych • Ograniczenia na masy • Poprawki promieniste • Warunki naruszenia symetrii elektroslabej • Chargina i neutralina • Dolne ograniczenie na wartość $ \mu $	
28.6.	Przekazywanie naruszenia supersymetrii za pośrednictwem oddziaływań cechowania	255
	Superpola przekazujące • Naruszenie supersymetrii w propagatorach supermultipletów cechowania • Masy fermionów cechowania • Masy skwarków i sleptonów • Wyprowadzenie oparte na holomorficzości • Poprawki promieniste • Przykłady liczbowe • Masy skalarów Higgsa • Problem parametru μ • Parametry A_{ij} oraz C_{ij} • Grawitino jako najlżejsza cząstka supersymetryczna • Druga co do lekkości cząstka supersymetryczna	
28.7.	Niezachowanie liczb barionowej i leptonowej	270
	Oddziaływania wymiaru pięć • Wymiana fermionów cechowania • Wymiana gluina jest tłumiona • Efekty wymiany wina i bina • Oszacowanie czasu życia protonu • Główne kanały rozpadu protonu	
	Zadania	276
	Wykaz cytowanej literatury	277
29.	WYJŚCIE POZA RACHUNEK ZABURZEŃ	282
29.1.	Ogólne aspekty naruszenia supersymetrii	282
	Skończona objętość • Energia próżni a naruszenie supersymetrii • Częściowo naruszona supersymetria? • Parowanie się stanów bozonowych i fermionowych • Parowanie się stanu próżni ze stanem jednogoldstinowym • Indeks Wittena • W modelu Wessa–Zumino supersymetria jest nienaruszona • Modele z nienaruszoną supersymetrią mające indeks Wittena równy zero • Duże wartości pól • Ważone indeksy Wittena	

29.2.	Reguły sum dla prądu supersymetrii	290
	Reguła sum dla gęstości energii próżni • Wkład stanu jednogoldstinowego • Parametr naruszenia supersymetrii F • Amplitudy procesów z emisją miękkiego goldstina • Reguła sum dla prądu supersymetrii — fermionowe funkcje spektralne • Wkład stanu jednogoldstinowego • Gęstość energii próżni wyrażona przez wartości próżniowe członów \mathcal{F} i D • Reguła sum dla energii próżni w nieskończonej objętości	
29.3.	Nieperturbacyjne poprawki do superpotencjału	300
	Efekty nieperturbacyjne naruszają symetrię względem przesunięć pola zewnętrznego oraz zachowanie liczby R • Pozostająca symetria • Przykład: uogólniona supersymetryczna chromodynamika kwantowa • Struktura indukowanego superpotencjału w przypadku $C_1 > C_2$ • Stabilizowanie próżni za pomocą gołego superpotencjału • Moduły próżniowe w uogólnionej supersymetrycznej chromodynamice kwantowej w przypadku $N_c > N_f$ • W przypadku $C_1 = C_2$ indukowany superpotencjał jest liniowy w parametrach gołego superpotencjału • Jednopętlowa renormalizacja członu $[W_\alpha W_\alpha]_{\mathcal{F}}$ w przypadku dowolnych wartości C_1 i C_2	
29.4.	Naruszenie supersymetrii w teoriach z cechowaniem	312
	W supersymetrycznej elektrodynamice kwantowej indeks Wittena znika • W supersymetrycznej elektrodynamice kwantowej supersymetria nie jest naruszona • Znalezienie liczby stanów o zerowej energii pola cechowania w supersymetrycznej elektrodynamice kwantowej • Obliczanie indeksu Wittena w przypadku supersymetrycznych czystych teorii z cechowaniem ogólnej postaci • Znalezienie liczby stanów o zerowej energii pola cechowania w przypadku supersymetrycznych czystych teorii z cechowaniem ogólnej postaci • Niezmienniczość weylowska • Supersymetria jest nienaruszona w ogólnych supersymetrycznych czystych teoriach z cechowaniem • Indeks Wittena i anomalie symetrii R • Dodanie skalarów chiralnych • Modele, w których supersymetria jest naruszona spontanicznie	
29.5.	Rozwiązanie Seiberga–Wittena*	323
	Wyjściowy lagranżjan niezmienniczy względem supersymetrii o $N = 2$ • Moduł próżniowy • Wiodące człony nierenormalizowalne lagranżjanu efektywnego • Lagranżjan efektywny pól składowych • Funkcja $h(\Phi)$ jako źródło potencjału Kählera i sprzężeń cechowania • Grupa $SU(2)$ symetrii R • Prepotencjał • Przekształcenia dualności • Przesunięcia funkcji $h(\Phi)$ • Grupa Z_8 symetrii R • Symetria $SL(2, Z)$ • Ładunek centralny • Ładunek i moment magnetyczny monopola • Zachowanie perturbacyjne dla dużych wartości $ a $ • Macierz monodromii punktu w nieskończoności • Osobliwości, których źródłem są dyony • Macierze monodromii w punktach osobliwych • Rozwiązanie Seiberga–Wittena • Dowód jednoznaczności	
	Zadania	343
	Wykaz cytowanej literatury	343

30. SUPERGRAFY	345
30.1. Superpola potencjałów	346
Problem więzów chiralnych • Analogiczny problem w elektrodynamice kwantowej • Całki po trajektoriach względem superpól potencjałów	
30.2. Superpropagatory	348
Kłopotliwa niezmienniczość • Zamiana zmiennych • Własność definiująca superpropagator • Analogia do elektrodynamiki kwantowej • Propagatory superpól potencjałów • Propagatory superpól chiralnych	
30.3. Obliczenia z wykorzystaniem supergrafów	352
Kwantowe działanie efektywne w superprzestrzeni • Lokalność we współrzędnych fermionowych • Podliczenie pochodnych superprzestrzennych • Nierenormalizowanie się członów \mathcal{F}	
Zadania	355
Wykaz cytowanej literatury	355
31. SUPERGRAWITACJA	356
31.1. Superpole metryki	357
Formalizm tetradowy • Przekształcenia pola grawitacyjnego • Przekształcenia pola grawitina • Uogólnione przekształcenia superpola metryki H_μ • Oddziaływanie superpola H_μ z superprądem • Niezmienniczość oddziaływań • Uogólnione przekształcenia składowych superpola H_μ • Pola pomocnicze • Podliczenie składowych • Oddziaływania składowych superpola H_μ • Normalizacja działania	
31.2. Działanie grawitacyjne	365
Superpole Einsteina E_μ • Pola składowe superpola E_μ • Lagranżjan superpola H_μ • Wartość stałej κ • Pełny lagranżjan • Gęstość energii próżni • Wartość minimalna energii próżni • Przestrzenie de Sittera i anty-de Sittera • Dlaczego energia próżni jest ujemna • Stabilność przestrzeni płaskiej • Przekształcenie Weyla	
31.3. Grawitino	372
Warunki nieredukowalności dla pola grawitina • Propagator grawitina • Lagranżjan kinetyczny grawitina • Równanie pola grawitina • Masa grawitina pochodząca z naruszenia supersymetrii • Masa grawitina wyrażona przez wartości próżniowe pól s i p	

31.4.	Naruszenie supersymetrii przekazywane za pośrednictwem anomalii 377 Oddziaływanie pierwszego rzędu z superpolem X opisującym naruszenie symetrii skalowania • Ogólny wzór na superpole X • Oddziaływanie pierwszego rzędu ogólnej postaci • Masy fermionów cechowania • Masa gluina • Parametr B • Masy wina i bina • Parametry A	
31.5.	Lokalne przekształcenia supersymetrii 381 Cechowanie Wessa–Zumino w przypadku superpola metryki • Lokalne przekształcenia supersymetrii • Niezmienniczość działania	
31.6.	Supergrawitacja do wszystkich rzędów 384 Lokalne przekształcenia supersymetrii tetrazy, grawitina i pól pomocniczych • Zmodyfikowana koneksja spinowa • Lokalne przekształcenia supersymetrii supermultipletu skalarnego ogólnej postaci • Reguły tworzenia iloczynów superpól ogólnej postaci • Rzeczywiste superpola materii • Chiralne superpola materii • Reguły tworzenia iloczynów superpól chiralnych • Stała kosmologiczna i masa grawitina • Lagranżjan supergrawitacji i superpól chiralnych z ogólnym potencjałem Kählera i ogólnym superpotencjałem • Wylimitowanie pól pomocniczych • Metryka Kählera • Przekształcenie Weyla • Potencjał pól skalarnych • Warunki konieczne dla istnienia płaskiej przestrzeni i nienaruszonej supersymetrii • Pełna bozonowa część lagranżjanu • Unormowanie kanoniczne • Połączenie superpotencjału i potencjału Kählera • Modele bez skali	
31.7.	Grawitacyjne przekazywanie naruszenia supersymetrii 396 Wczesne teorie z sektorem ukrytym • Silne przy skali Λ sprzężenie cechowania sektora ukrytego • Wersja pierwsza: sektory obserwowalny i ukryty • Separowalny goły superpotencjał • Ogólna postać potencjału • Wyrazy rzędu $\kappa^4 \Lambda^8 \approx m_g^4$ • Oszacowanie wartości Λ na $\approx 10^{11}$ GeV • Człony μ i $B\mu$ • Masy skwarków i sleptonów • Masy fermionów cechowania • Parametry A • Wersja druga: sektory obserwowalny, ukryty i pól modułów • Dynamicznie indukowany superpotencjał pól modułów • Efektywny superpotencjał sektora obserwowalnego • Człon μ • Potencjał pól skalarnych sektora obserwowalnego • Wyrazy rzędu $\kappa^8 \Lambda^{12} \approx m_g^4$ • Człony miękko naruszające supersymetrię • Oszacowanie wartości Λ na 10^{13} GeV • Przesunięcia pól modułów • Niewystępowanie członów C_{ij} • Masy skwarków i sleptonów • Masy fermionów cechowania	
	Dodatek. Formalizm tetradowy 418	
	Zadania 421	
	Wykaz cytowanej literatury 422	

32. ALGEBRY SUPERSYMETRII W WIĘKSZEJ LICZBIE WYMIARÓW	424
32.1. Ogólne algebry supersymetrii	424
Klasyfikacja generatorów fermionowych • Definicja wag • Generatory fermionowe tworzą podstawowe reprezentacje spinorowe • Generatory fermionowe komutują z operatorem P_μ • Ogólna postać związków antykomutacyjnych • Ładunki centralne • Związki antykomutacyjne w nieparzystej liczbie wymiarów • Związki antykomutacyjne w parzystej liczbie wymiarów • Grupy symetrii R	
32.2. Supermultiplety cząstek bezmasowych	436
Mała grupa $O(d-2)$ • Definicja „spinu” j • Wykluczenie spinów $j > 2$ • Znikające generatory fermionowe • Liczba generatorów fermionowych jest ≤ 32 • Supersymetria o $N = 1$ w $d = 11$ wymiarach • 3-forma opisująca cząstkę bezmasową • Supersymetria typu IIA, IIB i supersymetria heterotyczna w $d = 10$ wymiarach	
32.3. p-brany	440
Nowe tensory zachowane • Generatory fermionowe nadal tworzą podstawowe reprezentacje spinorowe • Generatory fermionowe nadal komutują z operatorem P_μ • Wymagane symetrie tensorowych ładunków centralnych • Ładunki centralne będące 2-formami i 5-formami w $d = 11$ wymiarach	
Dodatek. Spinory w większej liczbie wymiarów	444
Zadania	450
Wykaz cytowanej literatury	451
SKOROWIDZ	453