

Т.-П.Ченг, Л.-Ф.Ли

КАЛИБРОВОЧНЫЕ ТЕОРИИ В ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Книга американских физиков Т.-П.Ченга и Л.-Ф.Ли представляет собой фундаментальное и современное введение в калибровочные теории элементарных частиц. Подробно излагаются как уже сформировавшиеся теории, так и новые направления и тенденции в теоретической физике элементарных частиц.

Предназначена для студентов и аспирантов, изучающих теорию элементарных частиц, а также для специалистов (теоретиков и экспериментаторов) в качестве справочного пособия по физике элементарных частиц,

ОГЛАВЛЕНИЕ

Разделы, отмеченные звездочкой (*), содержат детали, которые могут быть опущены при первом чтении. Разделы и главы, отмеченные знаком +, представляют собой элементарное изложение вопросов, выходящих за пределы основного предмета книги.

Предисловие редактора перевода	5
Предисловие	7
Часть I	
Глава 1. Основы квантования полей	11
1.1. Формализм канонического квантования	12
1.2. Введение в формализм функционального интегрирования	20
1.3*. Квантование ферми-полей	33
Глава 2. Введение в теорию перенормировок	41
2.1. Стандартные перенормировки в теории $\lambda\phi^4$	42
2.2. БПХ-перенормировки в теории $\lambda\phi^4$	52
2.3. Методы регуляризации	59
2.4. Подсчет степеней расходимостей и перенормируемость	70
Глава 3. Ренормализационная группа	83
3.1. Схемы вычитаний в импульсном пространстве и уравнение Каллана — Симанзика	84
3.2*. Схема минимальных вычитаний и ее ренормгрупповое уравнение	95
3.3. Эффективная константа связи	100
Глава 4. Теория групп и кварковая модель	105
4.1. Элементарная теория групп	105
4.2. Группы $SU(2)$ и $SU(3)$	110
4.3. Тензорный метод для групп $SU(n)$	124
4.4. Кварковая модель	138
Глава 5. Киральная симметрия сильных взаимодействий	152
5.1. Глобальные симметрии в теории поля и коммутаторы токов	153
5.2*. Токи, соответствующие симметрии, как физические токи	162
5.3. Спонтанное нарушение глобальной симметрии. Теорема Голдстоуна	171
5.4*. Частичное сохранение аксиально-векторного тока и теоремы о мягких пионах	181
5.5*. Механизм нарушения киральной симметрии	192

Глава 6. Перенормировки и симметрии	202
6.1*. Тожество Уорда для векторного тока и перенормировка	203
6.2*. Аномалия аксиально-векторного тождества Уорда и распад $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$	207
6.3+. Перенормировка в теориях со спонтанно нарушенной симметрией	217
6.4+. Эффективный потенциал и спонтанное нарушение симметрии, индуцированное радиационными поправками	223
Глава 7. Партоновая модель и скейлинг	235
7.1. Партоновая модель глубоконеупругого лептон-адронного рассеяния	235
7.2. Правила сумм и приложения кварк-партоновой модели	245
7.3. Сингулярности свободных полей на световом конусе и бёркеновский скейлинг	256
Часть II	265
Глава 8. Калибровочные симметрии	
8.1. Локальные симметрии в теории поля	265
8.2*. Калибровочная инвариантность и геометрия	272
8.3. Спонтанное нарушение калибровочной симметрии; явление Хиггса	278
Глава 9. Квантовые калибровочные теории	287
9.1. Квантование калибровочных теорий с помощью функциональных интегралов	287
9.2. Правила Фейнмана в ковариантных калибровках	297
9.3*. Тожества Славнова — Тейлора	308
Глава 10. Квантовая хромодинамика	321
10.1*. Открытие асимптотической свободы	322
10.2. Лагранжиан КХД и симметрии сильных взаимодействий	335
10.3. Ренормгрупповой анализ скейлинга и нарушение скейлинга	340
10.4*. Партоновая модель и пертурбативная КХД	358
10.5+. Калибровочные теории на решетке и удержание цвета	371
Глава 11. Стандартная теория электрослабых взаимодействий I: основы	387
11.1. Слабые взаимодействия до калибровочной теории	387
11.2. Построение стандартной $SU(2) \times U(1)$ -теории	391
11.3. Дублирование фермионных поколений	409
Глава 12. Стандартная теория электрослабых взаимодействий II: феноменологические следствия	419
12.1. Процессы с нейтральными токами, сохраняющими симметрию ароматов	419
12.2. Слабые углы смешивания, механизм ГИМ и нарушение CP-инвариантности	427
12.3. Промежуточные векторные бозоны W и Z	444
12.4. Хиггсовская частица	453
Глава 13. Избранные вопросы квантовой ароматодинамики	461
13.1. Динамическое нарушение симметрии и модели техницвета	461
13.2. Массы нейтрино, смешивания и осцилляции	472

13.3. Распад $\mu \rightarrow e\gamma$, пример вычисления петель в R_ξ -калибровке	485
Глава 14. Великое объединение	494
14.1. Введение в $SU(5)$ -модель	494
14.2. Спонтанное нарушение симметрии -и калибровочная иерархия	501
14.3. Слияние констант связи	505
14.4. Распад протона и барионная асимметрия Вселенной	511
14.5. Массы фермионов и углы смешивания в минимальной $SU(5)$ -модели	517
Глава 15+. Магнитные монополи	524
15.1. Дираковская теория магнитных полюсов	524
15.2. Солитоны в теории поля	532
15.3. Монополь т'Хофта — Полякова	539
Глава 16+. Инстантоны	550
16.1. Топология калибровочных преобразований	551
16.2. Инстантон и вакуумные туннельные переходы	557
16.3. Инстантоны и проблема $U(1)$	564
Приложение А. Обозначения	572
Приложение Б. Правила Фейнмана	577
Библиография	593
Литература	599
Предметный указатель	610

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

<i>Ааронова—Бома эффект</i>	530, 549
<i>Адлера—Бардина теорема</i>	213
— <i>Белла—Джаскива (АБД) аномалия</i>	207—217; см. также Аномалии
— <i>Вайсбергера соотношение (правило сумм)</i>	189—192
— правило сумм	166—170, 250
— условие согласованности	186, 193
Аксиальная проблема $U(1)$	339, 564—569; см. также Масса η -мезона, Распад $\eta \rightarrow 3\pi$, Инстантоны, <i>Когута—Сасскинда</i> полюс, θ -вакуум
Аксион	570
Алгебра зарядов	158
— $SU(2) \times U(1)$	392—393
— $SU(5)$	497
— токов	152, 157—162, 165, 168—169, 321
— — <i>Адлера—Вайсбергера соотношение (правило сумм)</i>	189—192
— — — правило сумм	166—171
— — — условие согласованности	186, 193
— — <i>Голдбергера—Треймана соотношение</i>	185—187, 192—193
— — длина πN -рассеяния	189
— — проблема $\eta \rightarrow 3\pi$	215—216

— — распад $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 215—216
 — — массы псевдоскалярных мезонов 145, 196
 — — правило сумм *Дашена* 200
 — — проблема массы η -мезона 565—569
 — — теоремы о мягких пионах 181—200
Альтарелли—Паризи уравнение 359—362, 368—369
 Аномалии 207—217; *см. также* Аксиальная проблема $U(1)$
 — и инстантоны 564
 — — перенормируемость 320
 — неабелевых теорий 214—216
 — сокращение в теории $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_\gamma$ 399-401
 Аномальная размерность 92, 95, 103, 353—358, 361
 Асимптотическая свобода 103, 322—335, 371, 386
 — — в калибровочных теориях со скалярными мезонами 333—334
 — — — неабелевых калибровочных теориях 327—330
 — — и конфайнмент 371—386
 — — открытие 322
 — — парамагнитные свойства вакуума *Янга* — *Милса* 330—333
 — — применение к процессу e^+e^- 342—343
 — — — IN 343—358, 364—371
 Барийная асимметрия Вселенной 514—517
 Барийное число, асимметрия Вселенной 514—517
 — — несохранение в ТВО 511—517
 — — сохранение в КХД 336
 — — — в стандартной электрослабой теории 409
 Барийные массы 145—146, 197—198
Бекки—Рюэ—Стара (БРС) преобразования 315—318
 Бесконечного импульса система 170
 β -распад 183, 387, 429
 Билокальные операторы 262, 344—345
 Биунитарное преобразование 82, 338, 412—413
Блока—Нордсика теорема 364—365, 370
 Бозон W 390; *см. также* Бозон Z
 — — в докалибровочных моделях 390—391, 394—397
 — — — стандартной $SU(2) \times U(1)$ -теории 404—406, 435, 442—453
 — — масса 445—446
 — — распад в бозон *Хиггса* и лептоны 448—449
 — — распады лептонные 446—449
 — — рождение за счет механизма *Дрелла* — *Яна* 453
 Бозон Z 404—408, 419; *см. также* Бозон W
 — — масса 445—446
 — — распады 449—452

— — рождение за счет механизма *Дрелла*—Яна 453
 БПХ-перенормировки 52—59, 71, 83
 Бьёркеновский скейлинг: *см.* Скейлинг
V—*A*-теория 164, 389—390, 406, 419
Вайнберга—*Салима* теория: *см.* *Вайнберга* угол, ГИМ механизм, *Кобаяси*—*Маскава* матрица смешивания, CP-инвариантность, *Хиггса* явление
 — — — барионные и лептонные числа 409
 — — — выбор группы $SU(2) \times U(1)$ 392—398
 — — — глобальные симметрии 409—418
 — — — калибровочные бозоны *W* и *Z* 404—408, 444—453
 — — — мюонное число 416
 — — — нарушение CP-инвариантности 414—415
 — — — СНС 401—402
 — — — фермионы 398
 — теорема 90—92
 — угол 405
 — — в процессах с нейтральными токами 407—408, 420
 — — — — νN -рассеяния 424—426
 — — — чисто лептонных процессах 420—424
 — — предсказание $SU(5)$ -модели 508-510
 — — соотношение между массами бозонов *W* и *Z* 404, 419, 445
 Вакуум 28, 173
 — вырожденность в теориях с СНС 173, 536—537
 — КХД 372, 571
 — множественность вакуумных состояний с различными топологическими индексами 558—563; *см. также* θ -вакуум
 — вакуум, амплитуда перехода 28, 40, 224, 299; 317; *см. также* Производящий функционал
 Вакуума поляризация 342, 440, 465
 Вакуумного насыщения приближение 437
 Вакуумное среднее, масштаб электрослабого объединения 406, 463, 504
 — — однопетлевой сдвиг 217—220
 — — условие СНС 173
 — — формализм эффективного потенциала 223—224
 Векторная — аксиально-векторная неоднозначность в нейтринных реакциях 422
 Векторные мезоны, массы *W* и *Z* 404—405, 408—409, 445—446
 — — и перенормируемость 77, 304, 391
 — — калибровочные теории 267,271
 — — *Хиггса* явление 278—286
 Великое объединение 494—523, 547—549
 — — квантование заряда 496, 547
 — — монополь 524, 547—549

— — несохранение барионного числа 511-517
— — проблема калибровочных иерархий 504—505
— — связь между массами лептонов и кварков 520—522
— — слияние констант связи 505—510
Вершины константа перенормировки 49, 328
Взаимодействия представление 15
Вика поворот 61
— теорема 17—18, 32, 78, 259
Вильсона коэффициент 344, 346—349, 349—350
Вильсоновская петля 381—384
ВКБ-приближение и мнимое время 560—562
Восьмеричный путь 110, 139, 142—144
Вперед-назад асимметрия в $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 424
Вычитание 46; *см. также* Перенормировки, Регуляризация
— схема импульсная (стандартная) 83—87
— — минимальная 96—100
— — на массовой поверхности 85—86
— — при промежуточной перенормировке 84—85
— точка (условие нормировки) 84—87, 100, 323
Гауссов интеграл 30, 288, 296—298
— — по грасмановым переменным 37—40, 298
Гейзенберга представление 15, 21, 154
Гелл-Манна—Нашиджимы соотношение 141, 163
— *Окубо* массовая формула 145—146, 196, 198
Генератор (группы симметрии) 107—111; *см. также* *Нётер* теорема
Геометрия искривленного пространства 273—276
Гинзбурга — Ландау теорема 172
ГИМ механизм 417, 427—428, 437—440, 485, 493; *см. также* Слабые нейтральные токи, Очарование
Гиперзаряд 141
Гиперцвет: *см.* Техницвет
Глобальные симметрии 105, 153—156; *см. также* Барионное число, Сохранение $B - L$, Киральная симметрия, Лептонное число, Мюонное число
Глубоковеклидова область, асимптотическое поведение функций *Грина* 90—95, 99, 323
— — глубоконеупругое IN -рассеяние 235—243, 246—264
Глубоконеупругое рассеяние 103, 235
Глюоны 151, 246—247, 252, 336, 359—362, 371—372, 465—466, 499
Глэшоу—Вайнберга—Салама теория: *см.* *Вайнберга—Салама* теория
Голдбергера—Треймана соотношение 183—185, 192
Голдстоуна теорема 173—182, 278
— — в случае абелевой симметрии 177—179

- — — — неабелевой симметрии 179—181
- Голдстоуновский бозон 174—175; *см. также* Несостоявшийся голдстоуновский бозон, Псевдоголдстоуновский бозон
- — в абелевом случае 174—175
- — — σ -модели 180
- — — сильных взаимодействиях 182
- — и идея техницвета 464—466
- — — явление *Хиггса* 281
- — полюс *Козута—Сасскинда* и аксиальная проблема $U(1)$ 567—570
- «Головастик» диаграмма 217, 218
- и безмассовые голдстоуновские бозоны 220—222
- — сдвиг вакуумного среднего 217—220
- Гомотопические классы 551
- — $S^1 \rightarrow S^1$ 551—553
- — $S^2 \rightarrow S^2$ 540, 551
- — $S^3 \rightarrow S^3$ 553—554
- Грассмана* алгебра 34—40, 316
- Грина* функция 16—19, 23—30, 224
- — асимптотическое поведение 90—95
- — евклидова 26—28
- — одночастично-неприводимая 42, 48
- — связная 17, 29, 31, 48
- — связь перенормированной и перенормированной функций 52, 204
- — составных операторов 78—82, 87, 91
- — усеченная 19, 48
- Гросса—Льюеллина—Смита* правило сумм 251
- Группа 108, 110; *см. также* Подгруппа, Представление
- абелева 106, 156
- вращений 106, 111—112
- групповой параметр 108, 110
- *Ли* 107—108, 500
- полупростая 106, 272, 497, 500, 543, 547
- прямое произведение 106
- ранг 110, 500—501
- унитарная 106
- d^{abc} символ 195, 498
- Дашена* правило сумм 200
- Двойной β -распад безнейтринный 477
- Действие 11
- решеточной теории поля 375—381
- самодуальной евклидовой калибровочной теории 556
- *Янга—Миллса* теории в ковариантных калибровках 299

Джорджи—Глэшоу модель 394, 496—523, 539—549
Диагонализация массовых матриц 411—413
Дикварк 511
Динамическая масса фермиона 201, 470
Динамическое нарушение симметрии 461—472; *см. также* Составная хиггсовская частица, Техницвет
Дирака монополю 524
— — и монополю *т'Хофта—Полякова* 542—545
— — струна 528—532, 544
— — условие квантования 526—532, 542
— — формулировка *Ву—Янга* 532
Дисперсионное соотношение 191, 347
Дрелла—Яна процесс в кварк-партоновой модели 255—256
— — — — КХД в рамках теории возмущений 371
— — — — процессах рождения бозонов *W* и *Z* 453
Дуальное поле 525, 555
Дуальности преобразование уравнения *Максвелла* 525
Евклидова теория поля калибровочная 554
— — — скалярная 375—376
— — — фермионная 377—378
Евклидовы γ -матрицы 378
 e^+e^- -аннигиляция, полное адронное сечение 253—254, 335
— — — — поправки в КХД 342—343
 eD -рассеяние, асимметрия 426
Заряда квантование 399
— — в ТВО 496—498
— — магнитного монополя 526—527, 543
Зарядовое сопряжение 475, 495, 515—516, 519—520; *см. также* Майорановская масса
Иерархий калибровочных проблема 505
Изоспин 139—140, 156—157; *см. также* $SU(2)$ -симметрия
— и киральная симметрия 152—153, 200
— нарушение в сильных взаимодействиях 198—199
— — — электромагнитных взаимодействиях 140, 199
— структура σ -члена 188—189
— — πN -амплитуды 189—190
Импульсное правило сумм 251—252, 355—357
Инстантоны 336, 550—571; *см. также* Аксиальная проблема $U(1)$, Аксион, Аномалии, Гомотопические классы, θ -вакуум
— вакуумное туннелирование 560, 563—564
— размер 557
— формализм функционального интегрирования 560, 563—564

Инфракрасные расходимости 364—365
Кабиббо—Кобаяси—Маскава (ККМ) матрица 428; *см. также Кобаяси—Маскава*
матрица смешивания
— угол 165, 247, 388, 410, 427, 429; *см. также Кобаяси—Маскава* матрица
смешивания
— универсальность 429
Казимира оператор 111, 470
Калибровка аксиальная 287, 294—297, 312—313, 366—367
— — сумма по поляризациям векторных частиц 312—313
— ковариантная 297—303
— — абелев случай 303—308
— — в стандартной $SU(2) \times U(1)$ -теории 485, 586—592
— — *Ландау* 232, 303
— — *Лоренца* 288, 29Э
— — неабелев случай 308
— перенормируемая 286, 304
— радиационная 287
— *т'Хофта—Фейнмана* 303, 310, 320, 435, 492
— унитарная 280—281, 283—284, 304, 403—404, 492
— условие фиксации 281, 287, 292, 298—299
— — — отсутствие в решеточных калибровочных теориях 383
Калибровочная константа связи 266, 268, 271—272; *см. также Константа связи,*
Электрический заряд
Калибровочное взаимодействие с духами 302
— — — фермионами 267, 303
— поле 266, 269, 271, 276—277
— — топологические свойства: *см. Инстантоны, Монополь магнитный*
— преобразование 266, 268—271, 554
— — сингулярное 528—530
— самодействие 271, 302
Калибровочно-ковариантная производная 266
Калибровочные симметрии (взаимодействия) абелевы 265
— — неабелевы (*Янга—Миллса*) 267
— — собственные состояния 410, 427, 473, 496, 517; *см. также Массовые*
собственные состояния
— теории 272, 273; *см. также Вайнберга—Салама* теория, Великое объединение,
Евклидова теория поля калибровочная, Квантовая ароматодинамика, КХД,
КЭД, Решеточная теория поля калибровочная, Чистая калибровка
Калибровочный параметр ξ 299, 301, 305—308, 328—329, 584—589
Каллана — Гросса соотношение 244—245
— *Симанзика* уравнение 87—95
Каноническая размерность 73, 77, 95; *см. также Аномальная размерность*

Канонические коммутационные соотношения 12, 287
 Канонического квантования формализм 11—20, 294
 Квантовая ароматодинамика 387—493
 — хромодинамика: *см.* КХД
 — электродинамика: *см.* КЭД
 Квантование, канонический формализм 11
 — — — решеточная теория 374—375
 — — — скалярная теория 12—20, 203
 — — — фермионная теория 33
 — теорий с магнитным монополюм 526—532
 — формализм функционального интегрирования 11, 577—582
 — — — калибровочная теория 287—300
 — — — — решеточная теория 374—377
 — — — — скалярная теория 20—32
 — — — — фермионная теория 34—40
 Кварки b , t 149, 410
 — валентные 248
 — морские 248
 — c 148—149
 — u , d , s 143—147, 149
 Кварковые массы m_c , m_b 149; *см. также* Киральная симметрия
 — — m_u , m_d , m_s 199—200
 — — массовые соотношения в $SU(5)$ -модели 520—522
 — — нарушение киральной симметрии 152, 192—201
 — — составляющих и токовых кварков 200
 — — CP-проблема в сильных взаимодействиях 570—571
 — модели; *см. также* Массовая формула Гелл-Манна—Окубо ω - ϕ -смешивание, Цвейга правило
 — — восьмеричный путь и $SU(3)$ -симметрия ароматов 140—147
 — — квантовые числа 143
 — — киральная симметрия 158—162; *см. также* Аксиальная проблема
 — — трудности 149—150
 Кварконий 149; *см. также* Частицы J/ψ , Γ
 Кинк 534 Киношиты—Ли—Науенберга теорема 365
 Киральная симметрия 152—201, 388, 464, 564—565
 — — алгебра 160, 165
 — — нарушение 152, 181—183, 192—201
 K^0 — K^0 -система (смешивание) 431—442; *см. также* ГИМ механизм, CP-инвариантность, Очарование
 — разность масс K_L — K_S 426, 433, 437—438
 — CP-параметры 433—435, 440—442
 Кобаяси — Маскава (KM) матрица смешивания; *см. также* Кабиббо угол,

- Смешивание
 - — — в распадах W -бозона 446—449
 - — — ГИМ механизм 437—440
 - — — смешивание лептонов 415, 473
 - — — ТВО (гипотеза родства) 520
 - — — теория CP-нарушения 415, 343—435, 440—444
 - Ковариантная производная 266—269
 - — в $SU(2) \times U(1)$ 401
 - — — $SU(5)$ 507
 - — как связность 273—274
 - Ковариантные калибровки: см. Калибровка ковариантная
 - Когута — Сасскинда* полюс 569—570
 - Коллинеарные расходимости 365
 - Конденсат: см. Вакуумное среднее
 - Константа g_A 183—184, 191
 - связи 49, 66, 100; см. также Асимптотическая свобода, Калибровочное взаимодействие, Пион-нуклонное взаимодействие
 - — зависимость от точки вычитания 100
 - — перенормировка 48—49, 328
 - — размерность и перенормируемость 72
 - — слияние констант связи 505—510
 - — эффективная (бегущая) 93, 100—103, 505—510
 - Контрчлены, БПХ-перенормировки 53—59, 73—76
 - калибровочные теории 308—309
 - отсутствие перенормировки массы голдстоуновских бозонов 220—222
 - при мягком нарушении симметрии 222—223
 - составных операторов 80—82
 - схема минимальных вычитаний 96—99
 - Конфайнмент 151, 321, 371—373
 - вильсоновская петля 381—383
 - и асимптотическая свобода 371—373, 386
 - критерии 381—383
 - линейно растущий потенциал 372, 383—385
 - Космология; см. Барионное число, Асимметрия Вселенной, Нейтрино масса, космологическое ограничение
 - замкнутая, открытая, плоская Вселенная 478
 - критическая плотность ρ_c 478
 - *Хаббла* закон и постоянная 478
 - Коулмена — Вайнберга* механизм: см. Спонтанное нарушение симметрии за счет радиационных поправок
 - КХД 151, 321; см. также Глюоны, Кварки
 - вакуум 372, 492

- глобальные симметрии 152, 201, 339; *см. также* Киральная симметрия
- лагранжиан 335—336
- масштабный параметр 341, 386, 464, 510
- операторное разложение и ренорм-групповые расчеты 335—358; *см. также* e^+ e^- -аннигиляция, Лептон-нуклонное рассеяние, Скейлинг
- партонная картина 246, 252, 359; *см. также* *Альтарелли—Паризи* уравнение
- расчеты по теории возмущений 358—371; *см. также* Лептон-нуклонное рассеяние
- КЭД как прототип калибровочной теории 265
- квантование и трудности квантования 287
- программа перенормировок 42
- ренормгруппа 83
- β -функция 326—327
- экранировка заряда 322
- тождества *Уорда* аксиально-векторные (аномалии) 207—214
- — — векторные 208, 308—309, 313
- Ландау полюс 104
- Лептокварк 511
- Лептон-нуклонное рассеяние; *см. также* Нейтрино-нуклонное рассеяние
- — асимметрия eD -рассеяния 426
- — бьёркеновский скейлинг и кварк-партонная модель 235—252
- — — — *Альтарелли — Паризи*-уравнение 359—361
- — — — операторное разложение и уравнение ренормгруппы 343—358
- — — — по теории возмущений 364—371
- — правила сумм: *см. Адлера* правило сумм, *Гросса — Льюеллина-Смита* правило сумм, Импульсное правило сумм
- — неупругое 103, 162—170, 235—252, 262, 343—358, 364—371, 425
- — сингулярности на световом конусе в свободной теории 262—264
- — структура слабых нейтральных токов 424—426
- — упругое 238—239
- Лептонное число 409, 477, 482
- Лептонные углы смешивания 415, 475; *см. также* Нейтрино масса, Нейтринные осцилляции
- Лептонный слабый заряженный ток 165, 241, 388
- Лестничные диаграммы 368
- Ли* алгебра 108, 111, 155
- группа 107—108, 500
- Линде—Вайнберга* ограничение на массу хиггсовской частицы 455—458
- Линейно растущий потенциал 372, 383, 385
- Локальные симметрии: *см.* Калибровочные симметрии
- Магнитный момент калибровочной векторной частицы 332
- ток 525

Майорановская масса 475—478; *см. также* Двойной β -распад безнейтринный, Зарядовое сопряжение, Нейтрино масса, Нейтринные осцилляции
Масса: *см.* Векторных мезонов массы, Кварковые массы, Нейтрино масса, Псевдоскалярных мезонов м-ассы, Фермионная масса, Хиггсовская частица
— перенормировка 41, 46—47, 520—522
— — для голдстоуновского бозона 220—222
— эффективная (бегущая) 99, 520—522
Массовая вставка 438; *см. также* ГИМ механизм
Массовые сингулярности: *см.* Коллинеарные расходимости
— собственные состояния 410, 427, 472, 496, 518—520
Мейсснера эффект 279, 372
Минимальное калибровочное взаимодействие 267—268
Монополь магнитный 524; *см. также* Великое объединение, Дирака монополь, Солитоны, Топологический закон сохранения, *т'Хофта—Полякова* монополь
— — и квантование заряда 526, 542
— — — угловой момент 527—528, 545
Мультипликативная перенормируемость 52, 81, 90, 95
Мюонное число 416, 472
Мягкие пионы, случай двух пионов 187—192, 194
— — — одного пиона 183—186
Мягкое нарушение симметрии 222
— — — и перенормируемость 222—223
— — — спонтанное 223
Наиболее притягивающий скалярный канал (НПСК) 470
Намбу—Голдстоуна бозон; *см.* Голдстоуновский бозон
Неинтегрируемый фазовый фактор 379
Неисключительный импульс 90
Нейтринные осцилляции; *см.* Нейтрино масса, Солнечного нейтрино загадка
— — длина осцилляции 473
— — нейтрино-антинейтринные осцилляции 484
— — осцилляции ароматов 472—475
Нейтрино масса 415, 472—485; *см. также* Двойной β -распад безнейтринный, Нейтринные осцилляции
— — в модели $SU(2) \times U(1)$ 482—485
— — — ТВО 482
— — дираковского и майорановского типов 475—477
— — за счет радиационных поправок 481
— — космологическое ограничение 478—480
Нейтрино-нуклонное рассеяние, Бёр-кеновский скейлинг и кварк-пар-тонная модель 240—252
— — проверка алгебры токов (правило сумм Адлера) 166—170

— — слабые нейтральные токи (угол *Вайнберга*) 425—426
 Нейтрино-электронное рассеяние 390, 407, 420—424
 Нелептонные слабые процессы 389, 442
 Неперенормируемые взаимодействия 73
 Непертурбативные эффекты, инстантоны 550
 — — решеточная теория поля 371
 — — солитоны 532
 Несостоявшийся голдстоуновский бозон 281, 283, 286, 304—308, 402, 485—492
 Нётер теорема 154
 Низкоэнергетические теоремы в случае двух мягких пионов 187—192
 — — — одного мягкого пиона 183—186
 Нормировки точка (массовый масштабный параметр) в схеме вычитания в импульсной точке 83—87
 — — — размерной регуляризации 95
O(4)-симметрия 405, 556; *см. также* *SU*(2) \times *SU*(2)-симметрия
 Одночастично-неприводимые диаграммы 42
 — функции *Грина* 42, 79
 — — — ω — ϕ -смешивание 146—147
 — — — идеальное смешивание 147
 Операторное разложение 343—355
 — на световом конусе 344—346
 — факторизация сингулярностей 343
 Очарование (квантовое число) 147—148, 388; *см. также* ГИМ механизм
 Парамагнитные свойства вакуума теории *Янга—Миллса* 330—333; *см. также*
 Асимптотическая свобода
 Партоны; *см. также* Глюоны, Кварки, Партонная модель
 — как точечноподобные составляющие адрона 239, 243, 246
 — море 247—248
 — спин заряженных партонов 244—245
 Партонная модель; *см. также* Глубоконеупругое рассеяние, КХД, Партоны,
 Скейлинг
 — — *Дрелла—Яна* процес 255—256
 — — e^+e^- -аннигиляция 262—264
 — — лептоп-нуклонное рассеяние 243—252
 — — функции распределения 244—250
 Парциальная волна 390, 395—396
Паскоса—Вольфенштейна соотношение 426
 Переключение 469—472
 Перенормировки; *см. также* Аномалии, Перенормируемость, Ренормализационная группа, Теория возмущений
 — в теории $\lambda\phi^4$ 42—59
 — — — со спонтанным нарушением симметрии 217—234

- — — *Янга—Миллса* 327—329
- константа 53, 309
- — вершины Z_λ 49
- — волновой функции (поля) Z_ϕ 47
- — заряда 49, 328
- — Z_a 328
- — Z_g 328
- масс 47
- — голдстоуновских бозонов 220—222
- программа БПХ-перенормировок 52—59
- — стандартных перенормировок 52—54
- составных операторов 78—82
- физическая картина 41—42
- Перенормируемость 59, 71, 76
- векторных теорий 76—78, 303—304, 392
- мультипликативная 52, 81
- мягкое нарушение симметрии 222—223
- перенормируемые взаимодействия 73
- перенормируемые взаимодействия 72
- суперперенормируемые взаимодействия 72
- Петлевое разложение 226—228
- — в модели $\lambda\phi^4$ 228—232
- — — скалярной КЭД 232—234
- — как разложение по постоянной *Планка* 227
- Пион-нуклонная (π, N) амплитуда: *см. Адлера* условие согласованности, *Адлера—Вайсбергера* соотношение, Изоспин, σ -член
- Пион-нуклонное взаимодействие 183—184, 188—198
- Подгруппа 106
- инвариантная 106
- Поколение 392, 409—418, 495, 518; *см. также* Родства гипотеза, Удвоения фермионных поколений проблема
- подавление взаимодействий между поколениями 430, 517—519
- Поляризации векторных частиц 312, 395
- Понтрягина* индекс: *см. Топологический индекс*
- Постоянная тонкой структуры 446, 507
- Правое нейтрино 483—485
- Представление 107
- базисные векторы НО, 113
- векторное 125, 134
- вещественное 109, 117
- графическое изображение 114—118, 121—124
- комплексное 469—470, 501; *см. также* Представление вещественное

- неприводимое 107, 113, 127
- присоединенное 109, 138, 499, 501
- произведение представлений 114—118, 131—133
- размерность 107, 113, 122, ISO-IS!
- сопряженное 109, 125, 133—134, 143, 495
- фундаментальное (определяющее) 107, 125, 134, 495
- Проблема массы η -мезона 565—569; *см. также* Аксиальная проблема
- Производящий функционал 27—32, 34, 40, 224, 288, 294—301, 317; *см. также*
 - Вакуум—вакуум амплитуда перехода
- Промежуточный векторный бозон 164, 390
 - — — W 164, 390, 394—396, 404—406, 435—436, 444—453
 - — — Z 396, 404—409, 419—424, 444—453
- Пропагатор 578—588; *см. также* Фейнмана правила
 - в $R\xi$ -калибровке 305
 - векторного поля 76—77, 301, 304, 391
 - духового поля 301
 - несостоявшегося голдстоуновского бозона 301
 - скалярного поля 14, 18—19, 43—44, 47, 85, 204, 257—258
 - фермионного поля 33, 259, 303
 - хиггсовского скаляра 305
- Протона распад 511—514
 - — амплитуда в $SU(5)$ -теории 512
- Псевдоголдстоуновский бозон 285
 - — в теориях техницвета 466, 468, 471
- Псевдоскалярных мезонов массы: *см.: Гелл-Манн—Окубо* массовая формула, Голдстоуновский бозон, Дашена правило сумм, Кварковые массы, Проблема массы η -мезона, σ -член, Токов алгебра
- Псевдочастицы 550; *см. также* Ин-стантоны
- Размерная трансмутация 232—233
- Распад $\eta \rightarrow 3\pi$ 199, 567; *см. также*. Аксиальная проблема $U(1)$, Изоспин, нарушение в сильных взаимодействиях
 - $\mu \rightarrow e\gamma$ 416, 472, 485—493
 - $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 215, 217
 - — аномалии 216
 - — цвет 216, 335
- Расходимости 42, 45
 - вложенные 59
 - индекс 72, 74, 223
 - инфракрасные 364—365
 - квадратичные 46, 55, 64, 505
 - коллинеарные 365
 - линейные 46, 210

- логарифмические 44—45, 210
- метод подсчета степеней 70—71
- одновершинно-приводимые 59
- перекрывающиеся 59
- примитивные 45, 58
- условная степень 54, 57, 72, 91
- Расширенный техницвет 467—472
- Регуляризация 45, 59
 - ковариантная 60—67
 - — схема вычитания в импульсной точке 83—85
 - размерная 67—70, 96, 308, 320
 - — схема минимальных вычитаний 96—99
- Ренормализационная группа; *см. также* Аномальная размерность, Константа связи эффективная (бегущая)
 - — поправки КХД к полному сечению e^+e^- -аннигиляции 342—343
 - — — — сечению IN -рассеяния 349—350
 - — $SU(5)$ ТВО, амплитуда распада протона 513
 - — — — связь между массами лептонов и кварков 520—522
 - — — — слияние констант связи 507—508
 - —, суммирование главных логарифмов 101, 363—364
 - — β -функция 88—89, 95
 - — уравнения в КЭД 326—327
 - — — — КХД 329, 333, 340—341
 - — — — теории $\lambda\phi^4$ 89—90, 99, 324—325
 - — — — с $SU(3)$ -симметрией 508—509
 - — — — — юкавским взаимодействием 325—326
 - — γ -функции 88—89, 95, 98
 - — — в КХД 353, 357—358
 - — — моменты функций *Альтарелли—Паризи* 361
 - — — *Каллана—Симанзика* 87—90
 - — — — асимптотические решения 92—95, 99, 350—353
 - — — другие формы 93, 350, 353
 - — физические основания 83—87
- Решеточная теория поля 373—381
 - — — вычисления методом Монте-Карло 374, 385
 - — — закон периметра 385
 - — — — площади 383, 385
 - — — калибровочная 379—386
 - — — — плакет 380, 384
 - — — реберная переменная 380
 - — — скалярная 375—377
 - — — фермионная 377—378

ρ параметр 405, 419, 453
— — экспериментальное значение 445, 483
Родства гипотеза 518—520
Самодуальное поле 556
Световой конус, сингулярности 256—264, 344—346
 σ -модель 179—181, 464
 σ -член 188, 190, 192
Сильной связи разложение 374, 383—386
Симметричный фактор 18, 20, 44, 222, 229, 311, 583; *см. также* Фейнмана правила
Симметрия; *см. также* Барионное число, Глобальные симметрии, *CP-инвариантность*, Калибровочные симметрии, Киральная симметрия, Лептонное число, Спонтанное нарушение симметрии, *Уорда* тождества
— и вырождение масс 138—139, 152—155, 171
— — перенормировки 202—203
— — теория групп 105
Сингулярности полей 257, 343—345
— токов 259—260, 346, 351 Скейлинг 235, 239—243, 256, 321, 354, 358
— процесс *Дрелла*—*Яка* 255—256
— e^+e^- -аннигиляция 252—254, 261—262
— лептон-нуклонный (бьёркеновский) 239—252, 256—267, 262—264, 354
— — переменные x, y 239—240
— — функции 241—242
— нарушение 355, 357—358, 359
— сингулярности на световом конусе 257
Слабые радиационные поправки к лагранжиану КХД 339—340
— собственные состояния: *см.* Калибровочные симметрии
— углы смешивания: *см.* *Кабиббо* угол, *Вайнберга* угол, *Кобаяси* — *Маскава* матрица смешивания, Лептонные углы смешивания Слабый гиперзаряд 398—401, 497, 507 Слабых взаимодействий теории, $V-A$ 164, 241, 389—390, 406, 408, 419
— — — *Джорджи* — *Глэшоу* $SO(3)$ 394
— — — с промежуточным векторным бозоном 390—391
— — — стандартная $SU(2) \times U(1)$: *см.* *Вайнберга*—*Салама* теория
— — — *Ферми* 387
Славнова—*Тейлора* тождества 308—320
Смешивание в кварковых взаимодействиях 413, 427—428; *см. также* *Кабиббо* угол, *Кобаяси*—*Маскава* матрица смешивания
— — лептонных взаимодействиях 415, 473
— нейтральных векторных бозонов в электрослабой теории $SU(2) \times U(1)$: *см.* *Вайнберга* угол
— составных операторов при перенормировке 81—82, 355—356
СНС: *см.* Спонтанное нарушение симметрии

$SO(2)$ -симметрия; см. $U(1)$ -симметрия
 $SO(3)$ -симметрия; см. $SU(2)$ -симметрия
 $SO(4)$ -симметрия; см. $SU(2) \times SU(2)$ -симметрия
 Солитоны 532—539, 542—545
 — в калибровочной теории со СНС (монополь *т'Хофта* — *Полякова*) 539—542
 — — теории $\lambda\phi^4$ в двумерном пространстве 532—537
 — — — — — четырехмерном пространстве 537—539
 Солнечных нейтрино загадка 472
 Составная хиггсовская частица 462—463
 Составные полевые операторы 78—82, 91, 259
 — — — смешивание при перенормировке 81—82, 353—358
 Сохранение $B-L$ 482, 513, 522, 523
 Сохранения векторного тока гипотеза 165
 Спиральность 242, 245, 396
 Спонтанное нарушение симметрии (СНС) 152, 171-181, 278, 410; см. также
 Вакуумное среднее, *Голдстоуна* теорема, Киральная симметрия, *Хиггса*
 явление
 — — — за счет радиационных поправок 217—223, 304
 — — — и перенормировки 217—223, 304
 — — — — солитоны 537
 — — — механизм 284
 — — — фермионная масса 181, 411
 469, 520 CP -инвариантность, нарушение 414, 415
 — — в сильных взаимодействиях 570, 571
 — — жесткое и мягкое 444, 571
 — — фазы 410, 414, 415, 511
 Стандартная электрослабая теория; см. *Вайнберга*—*Салама* теория
 Степень отображения: см. Топологический индекс
 Струи 254, 371
 Струна дираковская 528—532, 544
 Струнная модель адронов 372
 Струны натяжение 372—383, 386
 Структурная функция 167, 237, 241, 248—252, 351; см. также *Партонная модель*,
 Скейлинг, Формфактор
 — — моменты 346—349, 354, 358, 360—361
 — — несинглетные комбинации по ароматам 351, 357—358, 361
 — — синглетные комбинации по ароматам 351, 355—357, 361
 — — спиральность 242, 245
 $SU(2)$ -симметрия 110—118
 — изоспиновая симметрия ароматов 139—140
 — калибровочные теории 267
 — — — *Джорджи-Глэшоу* модель 394, 539

— — — инстантоны 554
 — — — квантование 299—303
 — — — и преобразование БРС 315
 $SU(2) \times U(1)$ -симметрия 106, 392—394
 $SU(2) \times SU(2)$ -симметрия; *см. также* Киральная симметрия
 — нарушение до $SU(2)$ и $\rho = 1$ 405, 465
 — σ -модель, СНС и теорема *Голдстоуна* 179
 $SU(3)$ -симметрия 118—124
 — восьмеричный путь, симметрия ароматов 140—149
 — декаплет барионов 142—146
 — нарушение 145, 197
 — октеты мезонов и барионов 141—142, 145—147
 — теория свободных кварков 159
 — трансформационные свойства слабых токов 165
 — цветовая симметрия 150—151
 — — — лагранжиан КХД 335
 $SU(3) \times SU(3)$ -симметрия, алгебра зарядов 157
 — — — токов 161
 $SU(4)$ -симметрия 124
 — переключение 469—472
 — симметрия ароматов 149
 — соотношения между массами леп-тонов и кварков в $SU(5)$ -модели 520
 $SU(5)$ -симметрия 110
 — переключение 469—472
 — ТВО 495—523
 $SU(n)$ -симметрия 110, 124—138
Судакова переменные 366, 367
 Суммирование главных логарифмов 101, 363—364, 371
 Суперсимметрия 334, 505
 Сходимость фейнмановских интегралов, теорема 56
 τ -лептон 410
 Твист 345, 351, 355
 ТВО: *см.* Великое объединение
 Тензорные представления группы $SU(n)$ 124—138, 494
 θ -вакуум 562—564, 568—571; *см. также* Аксиальная проблема $U(1)$, CP -инвариантность
 Теория возмущений; *см. также* *Фейнмана* правила, Непертурбативные эффекты, Перенормировки
 — — калибровочные теории 300
 — — канонический формализм 15—18
 — — — — представление взаимодействия 15
 — — — — U -матрица 15—16

— модель $\lambda\phi^4$ 29—32
 Техницвет 461—472
 — масштабный параметр $\Lambda_{\text{тн}}$ 467
 Токи аксиально-векторные 207—208, 564—566
 — аномалии 564—566
 — коммутатор 157, 165, 237, 261
 — симметрия 155, 162
 — слабые 164—165
 — — заряженные 240—241, 388, 392—393, 406
 — — меняющие странность 388, 417, 427—428, 435—440
 — — нейтральные 388, 394
 — — сохраняющие аромат 417, 419—426
 — топологические 536
 — электромагнитные 237, 260 Токов взаимодействие: см. $V-A$ -взаимодействие
 — сохранение 155, 174, 203—205, 208
 Топологический закон сохранения 535—537
 — индекс 552—553, 555, 559—564
 $(3, 3^*) \oplus (3^*, 3)$ -теория 194; см. также Киральная симметрия, нарушение
т'Хофта—Полякова монополю 524, 539—549; см. также Монополю магнитный,
 Солитоны
 — — взаимосвязь пространственной и внутренней симметрии 545
 — — как монополю *Дирака* 542—545
 — — $SU(3)$ 539—546
 — — $SU(5)$ 547—549
 — — — катализ распада протона 549
 — — — хромомагнитный заряд 548—549
 — — условие квантования 542—543, 547
 Угловой момент и монополю 527—528, 545
 Удвоения фермионных поколений проблема 418, 495; см. также Поколение
 Универсальность *Кабиббо* 420, 429
 — калибровочного взаимодействия 267, 271
 Унитарность абелевой калибровочной теории 304, 307
 — и перенормируемость в теории слабых взаимодействий 390, 394—398
 — — тождества *Уорда* 309—315, 320
Уорда тождества 187, 205, 308—309
 — — в неабелевых калибровочных теориях (тождества *Славнова—Тейлора*) 313—
 320
 — — для аксиально-векторного тока в КЭД 207—214
 — — — векторного тока в $\lambda\phi^4$ 203—207
 — — и унитарность 309—315
fabc символ 119, 159—160, 195
Фаддеева—Попова анзац 294

- — детерминант 293, 297—298
- — духи 298, 301—303, 310—315
- — — отсутствие в абелевом случае 296
- — — — аксиальной калибровке 294—295, 315
- — — петли 303, 311, 328
- — — преобразование БРС 315
- — — тождества *Уорда* 313, 319
- — — унитарность 315
- Фазовый переход 374, 386
- Факторизация сингулярностей 341 — 343, 363—364, 359; *см. также* Операторное разложение
- Фейнмана* правила 11—12, 33, 577—592
- — в абелевой теории в калибровке $R\xi$ 304—306
- — — ковариантных калибровках 299—303, 584—586
- — — КЭД 584
- — — модели $\lambda\phi^4$ 20, 217—220, 577—580, 584
- — — скалярной КЭД 585
- — — теории *Вайнберга—Салама* в калибровке $R\xi$ 586
- — — формализме функционального интегрирования 577—582
- — для фермионных петель 33, 40
- Фейнмановские параметры 61
- Ферми* константа 164, 241, 387, 391, 406, 429
- теория β -распада 387
- Фермионная масса; *см. также* Киральная симметрия, Кварковые массы
- — дираковского и майорановско-го типов 475—478
- — в минимальной $SU(5)$ -модели 520—522
- — — модели *Вайнберга—Салама* 404, 411, 454
- — — теории со спонтанным нарушением симметрии 181
- — — теориях техницвета 466—471
- — массовая матрица 411—413; *см. также* Биунитарное преобразование, Массовые собственные состояния
- Ферромагнетизм 172—173
- Фиксированная точка 102; *см. также* Ренормализационная группа
- Фирца* преобразования 407, 439, 512, 573
- Формфактор 183—184, 239; *см. также* Структурная функция
- Функциональное интегрирование 11, 20, 33
- — калибровочных теорий 287—308
- — квантование 20—28
- — скалярных теорий 28—32
- — фермионных теорий 33—40
- Хиггса* механизм нарушения симметрии 401
- поля 454

- явление 279—286
- — в абелевом случае 279—281
- — — модели $SU(3)$ 539—540
- — — неабелевом случае 282—286
- — — ТВО $SU(5)$ 501—505
- — — *теории Вайнберга—Салама* 401—405
- Хиггсовская частица 283, 304, 453, 458—460
- — — в теории *Вайнберга—Салама* 404, 409, 453—460
- — взаимодействие с калибровочными бозонами 448, 455
- — — фермионами 402—404, 411, 454
- — заряженная 460
- — масса 404, 455—458
- — рождение 458—460
- — составная (модели техницвета) 462—472
- — триплет 483, 539, 540
- Цвейга* правило 147—148, 197 Цвет 150—151, 335, 460
- дробные заряды кварков 498
- магнитные заряды монополей в ТВО 548
- полное адронное сечение $e+e$ -аннигиляции 254
- распад $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 216
- сокращение аномалий 401
- Цветовая трубка 372
- Частица J/ψ 148; *см. также* Очарование
- Г 149; *см. также* Кварки
- Частичное сохранение аксиально-векторного тока (ЧСАТ) 181—189, 192—193
- Четырехфермионного взаимодействия эффективный лагранжиан: *см.* Токов взаимодействие
- Четности несохранение 388, 389
- — в атомной физике 426
- Чистая калибровка 555
- Швингеровские члены 161, 188
- Шредингера* представление 15, 21
- Эксперименты по нарушению четности в атомах 426
- Электрический дипольный момент 442—443, 570; *см. также* CP-инвариантность
- заряд: *см.* Заряда квантование
- в электрослабой теории 392—394, 398—401, 407
- как калибровочная константа 266
- Энергии-импульса тензор 355—357
- Эффективного потенциала формализм 223—226
- Юкавское взаимодействие 402—403, 411, 454
- — β -функция 325—326, 334
- — глобальные симметрии в электрослабой теории 409

- — — — — минимальной $SU(5)$ -модели 522—523
- — — — — CP 444
- — расширенные модели техницвета 467—468
- — теория *Вайнберга—Салама* 402—403, 411, 454
- Юнга* таблица 127—134, 143—144; *см. также* Тензорные представления группы $SU(n)$
- — длина крючка 131
- — основная теорема 130
- — произведение представлений 131—133
- — размерность неприводимого представления 130—131
- — решеточная перестановка 132— 133
- — сопряженные представления 133—134
- — стандартная 129
- Якоби* тождество 109
- Янга — Милса* поля: *см.* Калибровочные симметрии неабелевы

- [download online Ordering Life: Karl Jordan and the Naturalist Tradition pdf, azw \(kindle\), epub, doc, mobi](#)
- [Towers of Midnight \(The Wheel of Time, Book 13\) pdf, azw \(kindle\), epub](#)
- [Reader's Block pdf, azw \(kindle\), epub](#)
- [read Encyclopedia of German Tanks of World War Two: A Complete Illustrated Directory of German Battle Tanks, Armoured Cars, Self-Propelled Guns and Semi- pdf, azw \(kindle\)](#)
- [read online Pagan Ethics: Paganism as a World Religion pdf](#)
- [click No-Bake Gingerbread Houses for Kids](#)

- <http://ramazotti.ru/library/Black---Decker-The-Complete-Guide-to-Roofing-Siding---Trim--Protect---Beautify-the-Exterior-of-Your-Home--Black>
- <http://damianfoster.com/books/A-Menagerie--Conjunctions--Book-61-.pdf>
- <http://xn--d1aboelcb1f.xn--p1ai/lib/Che-Guevara-Reader--Writings-on-Politics---Revolution.pdf>
- <http://flog.co.id/library/Chasing-Cezanne--A-Novel.pdf>
- <http://musor.ruspb.info/?library/Pagan-Ethics--Paganism-as-a-World-Religion.pdf>
- <http://www.celebritychat.in/?ebooks/No-Bake-Gingerbread-Houses-for-Kids.pdf>