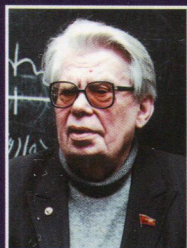


Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
КЛАССИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТСКИЙ УЧЕБНИК



Н. Н. Боголюбов

Академик РАН, АН СССР и АН УССР

Лауреат Ленинской премии
и Государственной премии СССР

Основатель научных школ
по нелинейной механике
и теоретической физике



Д. В. Ширков

Академик РАН

Лауреат Ленинской премии
и Государственной премии СССР,
Золотой медали
им. Н. Н. Боголюбова РАН

Заслуженный деятель
науки РФ

КВАНТОВЫЕ ПОЛЯ



URSS



Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков

КВАНТОВЫЕ ПОЛЯ

Допущено Министерством высшего
и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия для студентов
физических специальностей высших учебных заведений

Издание четвертое



URSS
МОСКВА

ББК 22.31я73 22.315* 22.382

**Боголюбов Николай Николаевич,
Ширков Дмитрий Васильевич**

Квантовые поля. Изд. 4-е. — М.: ЛЕНАНД, 2017. — 400 с.
(Классический университетский учебник.)

В настоящее время курс релятивистских квантовых полей, являющихся основой квантовой теории материи, занял прочное место в программе физических факультетов университетов. Основная цель данной книги состоит в том, чтобы дать студенту-физику минимальный материал по основам современной квантовой теории поля.

Книга содержит линейное изложение теории квантовых полей вплоть до перенормировок в теории возмущений, а также обзор современного состояния. Материал каждого параграфа примерно соответствует одной лекции, а полное содержание основного текста — годовому курсу. Содержащийся в десяти дополнениях технический материал и наборы упражнений, объединенные в семь тематических заданий, предназначены для семинарских занятий.

Книга предназначена для студентов физических специальностей, впервые изучающих предмет. Она может оказаться полезной для преподавателей, а также для самообразования.

Рецензент:

академик РАН, д-р физ.-мат. наук, проф. *А. А. Славнов*

ООО «ЛЕНАНД».
117312, г. Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, д. 11А, стр. 11.
Формат 60×90/16. Печ. л. 25. Зак. № 3286.

Отпечатано в Акционерном обществе «Рыбинский Дом печати»
152901, г. Рыбинск, ул. Чкалова, д. 8.

ISBN 978-5-9710-4149-8

© ЛЕНАНД, 2016

11212 ID 212369



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

Содержание

Предисловие к третьему изданию	9
Предисловие ко второму изданию	10
Из предисловия к первому изданию	11
Некоторые обозначения	12
1. Частицы и поля	14
1.1. Частицы и их основные свойства	14
1.2. Законы сохранения	16
1.3. Соответствие частица \leftrightarrow поле	18
1.4. Представление группы Лоренца	19
Глава 1. Свободные классические поля	24
1.1. Динамические инварианты полей	24
1.1.1. Лагранжиан	24
1.1.2. Динамические инварианты. Энергия-импульс	26
1.1.3. Теорема Нётер	28
1.1.4. Момент количества движения и спин	29
1.1.5. Вектор тока и заряд	31
1.2. Простейшие поля	32
1.2.1. Скалярное поле	32
1.2.2. Импульсное представление	33
1.2.3. Векторное поле	36
1.2.4. Локальный репер	39
1.3. Электромагнитное поле	41
1.3.1. Потенциал электромагнитного поля	41
1.3.2. Калибровочная инвариантность и условие Лоренца	42
1.3.3. Обобщенный лагранжиан	44
1.3.4. Диагональная калибровка	46
1.3.5. Переход к локальному реперу	47
1.4. Поле Дирака	49
1.4.1. Уравнение Дирака и матрицы Дирака	49
1.4.2. Лагранжев формализм	51
1.4.3. Импульсное представление	52
1.4.4. Разложения по спиновым состояниям	54
1.4.5. Динамические инварианты	55

Глава 2. Квантование свободных полей	58
2.1. Квантование полей	58
2.1.1. Сущность процедуры квантования полей	58
2.1.2. Корпускулярная трактовка представления чисел заполнения	60
2.1.3. Каноническое квантование	63
2.1.4. Представления Шрёдингера и Гейзенберга	65
2.1.5. <i>Релятивистская схема квантования полей</i> ¹⁾	66
2.2. Перестановочные соотношения	68
2.2.1. Физический смысл частотных компонент	68
2.2.2. Амплитуда вакуума и фоковское представление	69
2.2.3. Типы перестановочных соотношений	71
2.2.4. Квантование по Ферми—Дираку и Бозе—Эйнштейну	74
2.2.5. Связь спина со статистикой. Теорема Паули	76
2.3. Поля с целым спином	77
2.3.1. Нормальные произведения, вакуумные средние	77
2.3.2. Скалярное поле	79
2.3.3. Комплексное векторное поле	80
2.3.4. <i>Электромагнитное поле — трудности квантования</i>	83
2.3.5. <i>Электромагнитное поле — квантование по Гупта—Блейлеру</i>	84
2.4. Спинорные поля	87
2.4.1. Квантование поля Дирака	87
2.4.2. Спинорное поле с массой нуль	89
2.4.3. Зарядовое сопряжение	93
2.4.4. <i>CPT</i> -теорема	95
Глава 3. Взаимодействующие поля	98
3.1. Взаимодействие полей	98
3.1.1. Взаимодействие частиц	98
3.1.2. Лагранжианы взаимодействия	102
3.1.3. <i>Электромагнитное поле как калибровочное</i>	104
3.2. <i>Неабелевы калибровочные поля</i>	107
3.2.1. <i>Поле Янга—Миллса</i>	107
3.2.2. <i>Калибровочное взаимодействие полей</i>	109
3.2.3. <i>Спонтанное нарушение симметрии</i>	110
3.2.4. <i>Массивное поле Янга—Миллса</i>	114
3.3. <i>Квантовые системы со взаимодействием</i>	117
3.3.1. <i>Постановка задачи</i>	117
3.3.2. <i>Иллюстрация</i>	118
3.3.3. <i>Гамильтонов подход</i>	120
3.3.4. <i>Диагонализация модельных гамильтонианов</i>	122

¹⁾ Курсивом отмечены разделы, которые могут быть опущены при первом чтении — см. по этому поводу Методические указания на с. 393.

3.3.5. Эффекты взаимодействия	126
3.4. Модель тяжелого нуклона	127
3.4.1. Формулировка модели	127
3.4.2. Решение в однонуклонном секторе	128
3.4.3. Свойства однонуклонного решения	131
3.4.4. Переход к локальному пределу	133
Глава 4. Матрица рассеяния	135
4.1. Матрица рассеяния	135
4.1.1. Теория возмущений	135
4.1.2. Представление взаимодействия	137
4.1.3. Матрица рассеяния	139
4.1.4. Хронологические произведения	142
4.1.5. Хронологическая экспонента	143
4.2. Общие свойства S -матрицы	144
4.2.1. Матрица рассеяния как функционал	144
4.2.2. Релятивистская ковариантность и унитарность	146
4.2.3. Условие причинности	148
4.2.4. Дифференциальное условие причинности	149
4.3. Аксиоматическая S -матрица	151
4.3.1. Разложение по степеням взаимодействия	151
4.3.2. Условия на S_n	152
4.3.3. Определение явного вида S_2 и S_3	154
4.3.4. Общий вид $S(g)$	155
4.4. Теоремы Вика	156
4.4.1. Приведение к нормальной форме	156
4.4.2. Первая теорема Вика	157
4.4.3. Хронологические спаривания	159
4.4.4. Вторая теорема Вика	161
4.4.5. Третья теорема Вика	162
Глава 5. Диаграммы и правила Фейнмана	164
5.1. Функция Грина свободных полей	164
5.1.1. Функция Грина скалярного поля	164
5.1.2. Причинная функция Грина	166
5.1.3. Особенности на световом конусе	168
5.2. Диаграммы Фейнмана	170
5.2.1. Коэффициентные функции	170
5.2.2. Графическое изображение S_n	171
5.2.3. Спинорная электродинамика	173
5.2.4. Поле Янга—Миллса	176
5.3. Правила Фейнмана в p -представлении	180
5.3.1. Переход к импульсному представлению	180
5.3.2. Правила Фейнмана для матричных элементов	182

5.3.3. Иллюстрация для модели φ^4	183
5.3.4. Спинорная электродинамика	185
5.4. Вероятности переходов	188
5.4.1. Общая структура матричных элементов	188
5.4.2. Нормировка амплитуды состояния	190
5.4.3. Общая формула для вероятности перехода	192
5.4.4. Рассеяние двух частиц	194
5.4.5. Двухчастичный распад	196
Глава 6. Вычисление интегралов и расходимости	198
6.1. Техника вычисления интегралов	198
6.1.1. Интегралы по виртуальным импульсам	198
6.1.2. Альфа-представление и гауссовы квадратуры	199
6.1.3. Фейнмановская параметризация	202
6.1.4. Ультрафиолетовые расходимости	204
6.2. Вспомогательные регуляризации	205
6.2.1. Необходимость регуляризации	205
6.2.2. Регуляризация Паули—Вилларса	206
6.2.3. Размерная регуляризация	209
6.2.4. Регуляризация обрезанием	211
6.2.5. Вычитание расходимостей	213
6.3. Однопетлевые диаграммы	214
6.3.1. Скалярная «рыба»	214
6.3.2. Собственные энергии фотона и электрона	216
6.3.3. Треугольные вершины диаграммы	219
6.3.4. Ультрафиолетовые расходимости в высших порядках	222
6.4. Выделение расходимостей	224
6.4.1. Структура однопетлевых расходимостей	224
6.4.2. Вклад в S -матрицу	225
6.4.3. Контрчлены и перенормировки	229
6.4.4. Расходимости и обобщенные функции	231
Глава 7. Устранение расходимостей	233
7.1. Общая структура расходимостей	233
7.1.1. Расходимости высших порядков	233
7.1.2. Связь с контрчленами и перенормировки	236
7.1.3. Степень расходимости диаграмм	238
7.1.4. Свойство перенормируемости	240
7.2. Полные функции Грина	242
7.2.1. Пропагаторы физических полей	242
7.2.2. Высшие функции Грина	245
7.2.3. Сильносвязные многохвостки (вертексы)	248
7.2.4. Редукционные формулы	249
7.3. Процедура перенормировок	250

7.3.1. Перенормировка вкладов в функции Грина	250
7.3.2. Теорема о перенормируемости	254
7.3.3. Рецепт вычитания на массовой поверхности	256
7.3.4. Неоднозначность перенормировки вертекса	257
7.4. Перенормировки в спинорной электродинамике	259
7.4.1. Условие градиентной инвариантности	259
7.4.2. Градиентное преобразование фотонного пропэгатора	260
7.4.3. Пропагатор фотона с радиационными поправками	261
7.4.4. Полный пропагатор электрона	264
7.4.5. Вершинная часть и тождество Уорда	266
Глава 8. Описание реальных взаимодействий	270
8.1. Электромагнитное взаимодействие	270
8.1.1. Спинорная электродинамика	271
8.1.2. Аномальный магнитный момент электрона	272
8.1.3. Пределы спинорной электродинамики	276
8.2. Электрослабые взаимодействия	278
8.2.1. Исторические замечания	278
8.2.2. Модель Глэшоу—Салама—Вайнберга	282
8.2.3. Фермионный сектор	285
8.2.4. Лагранжиан и квантование	286
8.2.5. Аксиальная аномалия, кварковое расширение	288
8.2.6. Экспериментальный статус	289
8.3. Квантовая хромодинамика	290
8.3.1. Физическое основание	290
8.3.2. Лагранжиан КХД	292
8.3.3. Теория возмущений. Схемы перенормировок	294
8.3.4. Метод ренормгруппы. Асимптотическая свобода	296
8.3.5. КХД на решетке	299
8.4. Заключение	301
8.4.1. Эволюция квантовой теории	301
8.4.2. Стандартная Модель	302
8.4.3. Перспективы и спекуляции	303
Дополнения	307
I. Изотопический формализм	307
I.1. Дублет нуклонов	307
I.2. Триплет пионов	309
II. Матрицы Дирака и уравнение Дирака	311
II.1. Матрицы Дирака	311
II.2. Уравнение Дирака	315
II.3. Трансформационные свойства	316
II.4. Нерелятивистский предел	318
II.5. Вейлевские и майорановские спиноры	320

III. Непрерывные группы	321
III.1. Общие определения	321
III.2. Группы Ли	323
III.3. Представления групп Ли	327
III.4. Генераторы и алгебра Ли	329
IV. Операторные преобразования	332
IV.1. Линейные непрерывные преобразования	332
IV.2. «Распутывание» экспонент	335
IV.3. Коммутаторы с оператором плотности числа частиц $n(k)$	336
V. Сводка сингулярных функций	336
V.1. Вспомогательные сингулярные функции	336
V.2. Функции скалярного поля	337
V.3. Функции электромагнитного, векторного и спинорного полей	339
VI. Формулы импульсного интегрирования	340
VI.1. Альфа-представление	340
VI.2. Фейнмановская параметризация	342
VI.3. Размерная регуляризация	343
VI.4. Регуляризация обрезанием	345
VI.5. Простейшие однопетлевые квадратуры	345
VII. Кинематические соотношения для вершин	348
VII.1. Тройная вершина	348
VII.2. Четверная вершина	349
VIII. Правила Фейнмана для полей Янга—Миллса	351
VIII.1. Свободное неабелево калибровочное поле	352
VIII.2. Взаимодействие калибровочного поля с полями материи	355
VIII.3. Массивное поле Янга—Миллса	357
IX. Ренормализационная группа	358
IX.1. Введение	358
IX.2. Функциональные уравнения ренормгруппы	359
IX.3. Дифференциальные уравнения	362
IX.4. Связь с теорией возмущений. Ультрафиолетовые асимптотики	364
IX.5. Некоторые применения к квантовой хромодинамике	366
IX.6. Общая формулировка	368
X. Дисперсионные соотношения	369
X.1. Введение. Аналитический метод	369
X.2. Представление Челлена—Лемана	372
X.3. Представление Йоста—Лемана—Дайсона	373
X.4. Представление Манделстама	374
X.5. Дисперсионные соотношения	374
Задания	377
Литература	391
Методические указания	393