

The Quantum Theory of Fields

С. ВАЙНБЕРГ

**КВАНТОВАЯ
ТЕОРИЯ ПОЛЯ**



1

С. ВАЙНБЕРГ

**КВАНТОВАЯ
ТЕОРИЯ ПОЛЯ**

Том 1
Общая теория

Перевод с английского

Я.А. Уржумова, Р.А. Усманова, Д.И. Подольского, Д.С. Любшина

ПОД РЕДАКЦИЕЙ В.Ч. ЖУКОВСКОГО



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2015

УДК 530.1
ББК 22.31
В 14

Вайнберг С. **Квантовая теория поля. Т. 1. Общая теория** / Пер. с англ. под ред. В.Ч. Жуковского. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. — 648 с. — ISBN 978-5-9221-1620-6.

Книга выдающегося американского ученого, лауреата Нобелевской премии С. Вайнберга «Квантовая теория поля» представляет собой современный курс квантовой теории поля, охватывающий как основные положения этой области теоретической физики, так и многочисленные новые идеи и современные методы, разработанные в последние годы. В первом томе излагаются основы квантовой теории поля. Сюда входят релятивистская квантовая механика и теория рассеяния, основы канонического квантования полей и метод интегрирования по путям, инвариантная теория возмущений (в частности, ее приложения к квантовой электродинамике) и непертурбативные методы, а также последовательное изложение теории перенормировок и другие вопросы.

Книга рассчитана на научных работников, аспирантов, студентов старших курсов, занимающихся проблемами квантовой теории поля и физики элементарных частиц.

Научное издание

ВАЙНБЕРГ Стивен

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ

Том 1

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ

Редактор *Н.Б. Бартошевич-Жагель*

Оригинал-макет: *Д.В. Горбачев*

Оформление переплета: *А.А. Логунов*

Подписано в печать 23.06.2015. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 40,5. Уч.-изд. л. 44,5. Тираж 500 экз. Заказ №К-3879.

Издательская фирма «Физико-математическая литература»

МАИК «Наука/Интерпериодика»

117342, Москва, ул. Бутлерова, 17Б

E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;

<http://www.fml.ru>

Отпечатано с электронных носителей издательства

в ОАО «ИПК «Чувашия»,

428019 г. Чебоксары, пр-т И. Яковлева, 13

ISBN 978-5-9221-1620-6



9 785922 116206

ISBN 978-5-9221-1620-6 (русск.)

ISBN 0-521-55001-7 (англ.)

© Cambridge University Press, 2000

© ФИЗМАТЛИТ, 2003, 2015 (русск.)

Содержание

Предисловие к тому I	7
Обозначения	13
Глава 1. Историческое введение	15
§ 1.1. Релятивистская волновая механика	17
§ 1.2. Рождение квантовой теории поля	30
§ 1.3. Проблема расходимостей	47
Литература	56
Дополнительная литература	64
Глава 2. Релятивистская квантовая механика	66
§ 2.1. Квантовая механика	66
§ 2.2. Симметрии	67
§ 2.3. Квантовые преобразования Лоренца	73
§ 2.4. Алгебра Пуанкаре	76
§ 2.5. Одночастичные состояния	81
§ 2.6. Пространственная инверсия и обращение времени	93
§ 2.7. Проективные представления	101
Приложение А. Теорема о представлении симметрии	110
Приложение В. Групповые операторы и гомотопические классы	116
Приложение С. Инверсии и вырождение мультиплетов	120
Задачи	125
Литература	126
Глава 3. Теория рассеяния	128
§ 3.1. Начальное и конечное состояния	128
§ 3.2. S -матрица	134
§ 3.3. Симметрии S -матрицы	138
§ 3.4. Вероятности и сечения рассеяния	156
§ 3.5. Теория возмущений	164
§ 3.6. Следствия унитарности	170
§ 3.7. Разложение по парциальным амплитудам	175
§ 3.8. Резонансные состояния	183
Задачи	190
Литература	191

Глава 4. Принцип кластерной разложимости	194
§ 4.1. Бозоны и фермионы	195
§ 4.2. Операторы рождения и уничтожения	198
§ 4.3. Кластерная разложимость и связанные амплитуды	202
§ 4.4. Структура взаимодействия	208
Задачи	215
Литература	215
Глава 5. Квантовые поля и античастицы	217
§ 5.1. Свободные поля	217
§ 5.2. Причинные скалярные поля	227
§ 5.3. Причинные векторные поля	234
§ 5.4. Формализм Дирака	240
§ 5.5. Причинные дираковские поля	247
§ 5.6. Неприводимые представления однородной группы Лоренца	256
§ 5.7. Причинные поля: общий случай	260
§ 5.8. СРТ-теорема	273
§ 5.9. Поля, соответствующие безмассовым частицам	275
Задачи	284
Литература	285
Глава 6. Правила Фейнмана	287
§ 6.1. Вывод правил Фейнмана	287
§ 6.2. Вычисление пропагатора	301
§ 6.3. Правила в импульсном пространстве	307
§ 6.4. Вычисления вне массовой оболочки	313
Задачи	317
Литература	318
Глава 7. Канонический формализм	319
§ 7.1. Канонические переменные	320
§ 7.2. Лагранжев формализм	325
§ 7.3. Глобальные симметрии	334
§ 7.4. Лоренц-инвариантность	341
§ 7.5. Переход к представлению взаимодействия	345
§ 7.6. Связи и скобки Дирака	352
§ 7.7. Переопределения полей и свободные параметры	358
§ 7.7. Приложение: вывод скобок Дирака из канонических коммутаторов	359
Задачи	363
Литература	364
Глава 8. Электродинамика	365
§ 8.1. Калибровочная инвариантность	365
§ 8.2. Связи и выбор калибровки	369
§ 8.3. Квантование в кулоновской калибровке	373

§ 8.4. Электродинамика в представлении взаимодействия . . .	376
§ 8.5. Пропагатор фотона	379
§ 8.6. Правила Фейнмана для спинорной электродинамики . . .	381
§ 8.7. Комптоновское рассеяние	387
§ 8.8. Обобщение калибровочных полей на p -формы	395
§ 8.9. Приложение: следы γ -матриц	398
Задачи	400
Литература	401
Глава 9. Методы интегрирования по путям	402
§ 9.1. Основная формула интегрирования по путям	404
§ 9.2. Переход к S -матрице	412
§ 9.3. Лагранжева версия формулы интегрирования по путям	417
§ 9.4. Вывод правил Фейнмана с помощью метода интегрирования по путям	422
§ 9.5. Интегралы по путям в случае фермионов	427
§ 9.6. Формулировка квантовой электродинамики в терминах интегрирования по путям	443
§ 9.7. Различные статистики	448
Приложение. Кратные гауссовы интегралы	451
Задачи	453
Литература	454
Глава 10. Непертурбативные методы	456
§ 10.1. Симметрии	456
§ 10.2. Полусная структура	459
§ 10.3. Перенормировка поля и массы	467
§ 10.4. Перенормировка заряда и тождества Уорда	473
§ 10.5. Калибровочная инвариантность	479
§ 10.6. Электромагнитные формфакторы и магнитный момент	483
§ 10.7. Представление Челлена–Лемана	488
§ 10.8. Дисперсионные соотношения	494
Задачи	501
Литература	502
Глава 11. Однопетлевые радиационные поправки в квантовой электродинамике	504
§ 11.1. Контрчлены	504
§ 11.2. Поляризация вакуума	505
§ 11.3. Аномальный магнитный момент и радиус заряда	517
§ 11.4. Собственная энергия электрона	526
Приложение. Вычисление интегралов	530
Задачи	531
Литература	531
Глава 12. Общая теория перенормировок	533
§ 12.1. Степени расходимости	534
§ 12.2. Уничтожение расходимостей	540

§ 12.3. Нужна ли перенормируемость?	552
§ 12.4. Плавающий порог обрезания	562
§ 12.5. Дополнительные симметрии	566
Задачи	569
Литература	569
Г л а в а 13. Инфракрасные расходимости	572
§ 13.1. Амплитуды излучения мягких фотонов	572
§ 13.2. Виртуальные мягкие фотоны	577
§ 13.3. Реальные мягкие фотоны: уничтожение расходимостей	583
§ 13.4. Инфракрасные расходимости. Общий случай	587
§ 13.5. Рассеяние мягких фотонов	592
§ 13.6. Приближение внешнего поля	595
Задачи	601
Литература	602
Г л а в а 14. Связанные состояния во внешних полях	603
§ 14.1. Уравнение Дирака	604
§ 14.2. Радиационные поправки во внешних полях	612
§ 14.3. Лэмбовский сдвиг в легких атомах	618
Задачи	634
Литература	635
Предметный указатель	636
Именной указатель	644