

Н. И. БОГОЛЮБОВ и Д. В. ШИРКОВ

**ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ
КВАНТОВАННЫХ
ПОЛЕЙ**

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1957

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	8
§ 1. Введение	9
1.1. Очерк состояния теории поля (9). 1.2. План изложения (12). 1.3. Некоторые обозначения (13).	
Глава I. Классическая теория свободных полей	15
§ 2. Лагранжев формализм и инварианты полей	15
2.1. Поля и частицы (15). 2.2. Гамильтонов и лагранжев формализмы (15). 2.3. Функция Лагранжа и принцип стационарного действия (16). 2.4. Трансформационные свойства функций поля. Тензоры и спиноры (18). 2.5. Теорема Нётер (20). 2.6. Вектор энергии-импульса (23). 2.7. Тензор момента количества движения и тензор спина (23). 2.8. Заряд и вектор тока (25).	
§ 3. Скалярное поле	26
3.1. Лагранжев формализм действительного скалярного поля (27). 3.2. Импульсное представление и частотные компоненты (28). 3.3. Дискретное импульсное представление (31). 3.4. Комплексное скалярное поле (31).	
§ 4. Векторное поле	33
4.1. Лагранжиан, доминирующее условие и инварианты (33). 4.2. Переход к импульсному представлению (37). 4.3. Спин векторного поля (39). 4.4. Запись уравнений Клейна—Гордона в виде системы уравнений первого порядка (40).	
§ 5. Электромагнитное поле	41
5.1. Потенциал электромагнитного поля (41). 5.2. Градиентное преобразование второго рода и условие Лоренца (42). 5.3. Лагранжев формализм (43). 5.4. Поперечные, продольные и временные составляющие (45). 5.5. Спин (46).	
§ 6. Спинорное поле. Матрицы Дирака и закон преобразования спинорных функций	46
6.1. Линеаризация оператора Клейна—Гордона (46). 6.2. Матрицы Дирака (48). 6.3. Уравнение Дирака (51). 6.4. Трансформационные свойства спинорного поля (52).	
§ 7. Спинорное поле. Свойства решений и динамические переменные	56
7.1. Импульсное представление и матричная структура (56). 7.2. Разложение по спиновым состояниям и соотношения нормировки и ортогональности (59). 7.3. Лагранжев формализм и инварианты (61).	
§ 8. Лагранжиан системы полей	64
8.1. Лагранжиан взаимодействия и инварианты системы полей (64). 8.2. Инварианты градиентных преобразований (65).	
Глава II. Квантовая теория свободных полей	69
§ 9. Общие принципы квантования волновых полей	69
9.1. Операторная природа функций поля и закон преобразования амплитуды состояния (69). 9.2. Постулат квантования волновых полей (70). 9.3. Физический смысл положительных и отрицательно-частотных составляющих и сопряженных функций (73). 9.4. Состояние вакуума и амплитуда состояния с заданным числом частиц (74).	
§ 10. Установление перестановочных соотношений	76
10.1. Типы перестановочных соотношений (76). 10.2. Нормальное произведение операторов и запись динамических переменных (77). 10.3. Требование положительности энергии (79). 10.4. Перестановочные соотношения Ферми—Дирака и Бозе—Эйнштейна (80). 10.5. Перестановочные соотношения в дискретном импульсном представлении (82).	

§ 11. Скалярное и векторное поля	84
11.1. Действительное скалярное поле (84). 11.2. Комплексное скалярное поле (86). 11.3. Комплексное векторное поле (87).	
§ 12. Спинорное поле	89
12.1. Квантование по Ферми—Дираку и перестановочные функции (89). 12.2. Динамические переменные (91). 12.3. Зарядовое сопряжение (92).	
§ 13. Электромагнитное поле	95
13.1. Особенности электромагнитного поля и схема квантования (95). 13.2. Индефинитная метрика (96). 13.3. Запись основных величин (100).	
§ 14. Функции Грина	100
14.1. Определение (100). 14.2. «Запаздывающая» и «опережающая» функции Грина скалярного поля (101). 14.3. Причинная функция Грина скалярного поля (103). 14.4. Причинные функции Грина различных полей (104). 14.5. Связь с обозначениями Штюкельберга и Швингера (106).	
§ 15. Особенности перестановочных и причинных функций	107
15.1. Вычисление $D^{(+)}$ - и $D^{(-)}$ -функций (107). 15.2. Явный вид и особенности функций $D(x)$ и $D^c(x)$ (110). 15.3. Регуляризация сингулярных функций методом Паули—Вилларса (111).	
§ 16. Операторные выражения и сингулярные функции	114
16.1. Коэффициентные функции операторных выражений (114). 16.2. Теорема Вика для нормальных произведений (115). 16.3. Несобственная природа сингулярных функций (121). 16.4. Некоторые свойства регуляризации Паули—Вилларса (125). 16.5. Умножение сингулярных функций (127). 16.6. Некоторые свойства сингулярных функций (132). 16.7. Умножение операторных функций (133). 16.8. Некоторые определения (136).	
Глава III. Матрица рассеяния	138
§ 17. Основные понятия теории взаимодействующих полей	138
17.1. Представления уравнения Шредингера (138). 17.2. Представление взаимодействия (139). 17.3. Матрица рассеяния (141). 17.4. Релятивистская ковариантность и унитарность S -матрицы (142). 17.5. Условие причинности (143). 17.6. «Классические поля» как функциональные аргументы (146).	
§ 18. Лагранжиан взаимодействия и S -матрица	147
§ 18.1. Разложение S -матрицы по степеням взаимодействия (147). 18.2. Условия ковариантности, унитарности и причинности для S_n (148). 18.3. Определение явного вида $S_1(x)$ и $S_2(x, y)$ (150). 18.4. Хронологическое произведение локальных операторов (153). 18.5. Определение функций S_n при любом n (154). 18.6. Анализ произвола в функциях S_n и наиболее общий вид $S(g)$ (156).	
§ 19. Раскрытие хронологических произведений	160
19.1. Хронологическое спаривание (160). 19.2. Теорема Вика для хронологических произведений (164).	
§ 20. Приведение S -матрицы к нормальной форме	166
20.1. Структура коэффициентов матрицы рассеяния (166). 20.2. Диаграммы Фейнмана и правила соответствия (168). 20.3. Примеры (172). 20.4. Заключительные замечания (173).	
§ 21. Правила Фейнмана для вычисления матричных элементов матрицы рассеяния	175
21.1. Переход к импульсному представлению (175). 21.2. Вычисление матричных элементов (177). 21.3. Учет свойств симметрии (180). 21.4. Рассеяние внешними полями (182). 21.5. Общая структура матричных элементов (183).	
§ 22. Вероятности процессов рассеяния и эффективные сечения	186
22.1. Нормировка амплитуды состояния (186). 22.2. Вычисление вероятностей переходов (188). 22.3. Дифференциальные и полные эффективные поперечные сечения (190).	
§ 23. Примеры расчета процессов второго порядка	191
23.1. Комптоновское рассеяние (191). 23.2. Аннигиляция пары электрон—позитрон (194). 23.3. Тормозное излучение (196).	

Глава IV. Устранение расходимостей из S -матрицы	198
§ 24. О расходимостях S -матрицы в электродинамике (второй порядок)	198
24.1. Расходящаяся диаграмма с двумя внешними электронными линиями Σ (198). 24.2. Выделение из Σ расходящейся части (202). 24.3. Расходящаяся диаграмма с двумя внешними фотонными линиями Π (204). 24.4. Выделение расходимостей из Π и градиентная инвариантность (205). 24.5. Построение интегрируемой функции S_2 (207).	
§ 25. О расходимостях S -матрицы в электродинамике (третий порядок)	208
25.1. Вершинная диаграмма третьего порядка (209). 25.2. Выделение расходимости из Γ и градиентная инвариантность (210). 25.3. Тождество Уорда (213). 25.4. Получение интегрируемой функции S_3 (215).	
§ 26. Общие правила устранения расходимостей из S -матрицы	216
26.1. Постановка задачи (216). 26.2. Графическое представление процедуры вычитания и операции $\Delta(G)$ (218). 26.3. Индекс диаграммы $\omega(G)$ и степень расходимости (220). 26.4. Структура экспоненциальной квадратичной формы (223). 26.5. Выбор операции $\Delta(G)$ (226). 26.6. Переход к пределу при $\varepsilon \rightarrow 0$ (228). 26.7. Обобщение рецепта построения $\Delta(G)$ (230).	
§ 27. Аналитические свойства коэффициентных функций в импульсном представлении	231
27.1. Аналитические свойства S_n (231). 27.2. Структура функций H_n (231). 27.3. Аналитические свойства функций H_n (232).	
§ 28. Классификация ренормируемости теорий	233
28.1. Взаимодействия первого и второго рода (233). 28.2. Перечень взаимодействий первого рода (236). 28.3. Нелокальный характер взаимодействий второго рода (238). 28.4. Фиксирование теории первого рода конечным числом констант (239).	
Глава V. Приложение общей теории устранения расходимостей к конкретным случаям	241
§ 29. Скалярное поле с нелинейным взаимодействием	241
29.1. Поле Хорста–Тирринга (241). 29.2. Конечность числа расходящихся диаграмм (241).	
§ 30. Спинорная электродинамика. I. Общий вид контрчленов	243
30.1. Типы расходящихся диаграмм и теорема Фарри (243). 30.2. Градиентная инвариантность матрицы рассеяния (247). 30.3. Контрчлены (256).	
§ 31. Спинорная электродинамика. II. Ренормировка массы и заряда	258
31.1. Градиентное преобразование спаривания \overline{AA} (258). 31.2. Неоднозначность процесса устранения бесконечностей (259). 31.3. Полные функции Грина G , D и вершинная часть Γ (263). 31.4. Формальный характер бесконечных перенормировок (267). 31.5. Радиационные поправки во внешние линии и выбор конечных постоянных (269).	
§ 32. Спинорная электродинамика. III. Радиационные поправки второго порядка	271
32.1. Поправки к фотонной функции (271). 32.2. Поправки к электронной функции Грина (274). 32.3. Поправки в вершинной части (275). 32.4. Схема вычисления поправок в формуле Клейна–Нисимы (276).	
§ 33. Псевдоскалярная мезонная теория	278
33.1. Изотопический формализм (278). 33.2. Типы расходящихся диаграмм и контрчлены (279). 33.3. Второй заряд, мультипликативные ренормировки и внешние линии (280).	
§ 34. Уравнения Швингера для функций Грина	282
34.1. Связь полных функций Грина с вакуумными ожиданиями T -произведений (282). 34.2. Обобщенная теорема Вива (285). 34.3. Уравнения Швингера (287). 34.4. Учет контрчленов (294).	
Глава VI. Уравнение Шредингера и динамические переменные	293
§ 35. Уравнение Шредингера для амплитуды состояния	293
35.1. Уравнение для $\Phi(g)$ в вариационных производных (293). 35.2. Уравнение Шредингера в представлении взаимодействия и уравнение Томонага–Швингера (294). 35.3. Сингулярности обобщенного гамильтониана (297). 35.4. Основные свойства обобщенного гамильтониана (299).	

§ 36. Динамические переменные системы взаимодействующих полей	300
36.1. Энергия, импульс и тензор момента (301). 36.2. Локальные динамические величины (304). 36.3. Вектор тока (306). 36.4. Условие Лоренца (308). 36.5. Операторы волновых полей (309).	
§ 37. Поляризация вакуума и аномальный магнитный момент электрона	309
37.1. Поляризации вакуума (309). 37.2. Аномальный магнитный момент электрона (313).	
§ 38. Уравнение Дирака с радиационными поправками	317
38.1. Обобщение волновой функции электрона (317). 38.2. Обобщение уравнения Дирака (320). 38.3. Лэмбовский сдвиг уровней (323). 38.4. Заключительные замечания (325).	
Глава VII. Метод функционального уреднения	327
§ 39. Представление функций Грина через континуальные интегралы	327
39.1. Введение (327). 39.2. Вычисление $\langle T(\exp i \int \varphi d\mu) \rangle_0$ (328). 39.3. Континуальные интегралы (330). 39.4. Замкнутые выражения для функций Грина (332).	
§ 40. Градиентное преобразование функции Грина электрона в спинорной электродинамике	334
40.1. Переход к поперечной калибровке и преобразование функции $G(x, y A)$ (334). 40.2. Функциональный интеграл для $G(x, y)$ в случае поперечной калибровки (336). 40.3. Градиентное преобразование функции $G(x, y)$ (338).	
§ 41. Исследование модели Блоха—Нордсика	339
41.1. Модель Блоха—Нордсика и определение $G(x, y A)$ (339). 41.2. Вычисление $G(x, y)$ (342).	
Глава VIII. Ренормализационная группа	345
§ 42. Группа мультипликативных ренормировок в спинорной электродинамике	345
42.1. Введение (345). 42.2. Групповой характер мультипликативных ренормировок (345). 42.3. Функциональные уравнения группы (347). 42.4. Дифференциальные уравнения Ли (349). 42.5. Вершинная часть (351).	
§ 43. Асимптотические свойства электродинамических функций Грина	354
43.1. Постановка задачи (352). 43.2. Ультрафиолетовая асимптотика (353). 43.3. Инфракрасная асимптотика (356).	
§ 44. Ренормализационная группа в электродинамике при $d^0 \neq 0$	359
44.1. Обобщение групповых уравнений (357). 44.2. Определение «ультрафиолетовой» и «инфракрасной» асимптотик (359). 44.3. Асимптотики вершинной части (360). 44.4. Различные возможности (366).	
§ 45. Ренормализационная группа в двухзарядной псевдоскалярной мезонной теории	367
45.1. Второй заряд мезонной теории (367). 45.2. Переход к функциональным уравнениям группы (367). 45.3. Ультрафиолетовая асимптотика (369).	
Глава IX. Дисперсионные соотношения	372
§ 46. Общие представления о методе	372
46.1. Введение (372). 46.2. Математическая и физическая основы дисперсионных соотношений (373). 46.3. Обзор работ по дисперсионным соотношениям (375). 46.4. Проблема обоснования (378).	
§ 47. Основные свойства S -матрицы в локальной теории поля	380
47.1. Вступительные замечания (380). 47.2. Общие свойства (382). 47.3. Локальные свойства (383).	
§ 48. Спектральное представление пионной функции Грина	386
48.1. Радиационные операторы первого и второго порядка и их вакуумные средние (386). 48.2. Вакуумное ожидание от $\delta^2 S / \delta \varphi_2(x) \delta \varphi_2(y)$ (388). 48.3. Вакуумное ожидание произведения двух токов (388). 48.4. Аналитические свойства ζ^r и ζ^a (390). 48.5. Спектральное представление q^r , q^a и q^c (393).	

§ 49. Спектральное представление фермионной функции Грина	395
49.1. Спектральное представление вакуумного ожидания от $\bar{\psi}^2 S \psi \bar{\psi} \psi$ (395).	
49.2. Вязкость и противоречие (399).	
§ 50. Амплитуда рассеяния мезонов на нуклонах	400
50.1. Связь амплитуды рассеяния с «запаздывающим» и «сперекающим» матричными элементами (400). 50.2. Переход к фиксированной системе отсчета, трудности аналитического продолжения (403). 50.3. Схема получения дисперсионных соотношений для амплитуды рассеяния вперед (405).	
§ 51. Вопросы аналитического продолжения амплитуды рассеяния при $p \neq 0$	408
51.1. Аналитические свойства в фиктивной области $\tau < -p^2$ (408). (413). 51.2. Структура однонуклонного члена (414). 51.3. Вспомогательная теорема 51.4. Аналитическое продолжение в $\tau < -p^2$ (417).	
§ 52. Дисперсионные соотношения для рассеяния пионов на нуклонах	424
52.1. Переход к действительным величинам (424). 52.2. Учет свойств симметрии по E (423). 52.3. Изотопическая и спиновая структура (424). 52.4. Наблюдаемая область и переход к случаю рассеяния вперед (427).	
§ 53. Заключение	428
Приложение. Сводка сингулярных функций	431
Литература	435
Именной указатель	438
Предметный указатель	440