

В. Г. Сербо, А. С. Руденко

ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Начальный курс

Учебное пособие



Москва ♦ Ижевск

2025

УДК 539.12
ББК 22.382
С320

Сербо В. Г., Руденко А. С.

С320 Лекции по физике элементарных частиц (*начальный курс*): учебное пособие. — М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2025. — 232 с.

ISBN 978-5-4344-1077-9

Эта книга основана на конспектах лекций и семинаров по полугодовому курсу физики элементарных частиц для студентов 4-го курса физического факультета Новосибирского государственного университета и отражает многолетний опыт авторов в чтении лекций и проведении семинаров. Базовым институтом для наших слушателей является Институт ядерной физики (ИЯФ) им. Г. И. Будкера (г. Новосибирск). Это определило особенность данного курса и его отличие от многих хороших руководств по квантовой теории поля. Наш курс не относится к варианту чисто теоретической теории, он имеет непосредственное отношение к повседневной жизни ИЯФ, к проводимым в нём экспериментам. Более того, для расширения кругозора слушателей мы ввели в конце курса раздел *Дополнения*, в которой обсуждаем в форме мини-обзоров несколько интересных тем, непосредственно связанных с современным экспериментом.

Для студентов, аспирантов и преподавателей.

На обложке представлены портреты Поля Дирака (вверху слева), Энрико Ферми (вверху посередине), Ричарда Фейнмана (вверху справа), Джулиана Швингера (внизу слева) и Синъитиро Томонаги (внизу справа).

ББК 22.382
УДК 539.12

ISBN 978-5-4344-1077-9

© В. Г. Сербо, А. С. Руденко, 2025
© АНО «Ижевский институт компьютерных исследований», 2025

Оглавление

Предисловие	7
ГЛАВА I. Введение	10
§ 1. Элементарные частицы и их взаимодействия	10
1.1. Частицы	10
1.2. Взаимодействия	11
§ 2. Кварки и лептоны	14
2.1. Три поколения лептонов и кварков	14
2.2. Кварки и адроны	16
§ 3. Понятие о квантовой теории поля	17
ГЛАВА II. Электромагнитное поле	22
§ 4. Квантование электромагнитного поля	22
4.1. Электромагнитное поле как набор осцилляторов	22
4.2. Квантование электромагнитного поля	30
4.3. Рождение и уничтожение квантов поля	33
§ 5. Переход к гейзенберговскому представлению	35
Задачи к главе II	37
ГЛАВА III. Лагранжев формализм и законы сохранения в теории поля	39
§ 6. Лагранжев подход в теории поля	39
§ 7. Симметрия и законы сохранения	44
7.1. Теорема Нётер	44
7.2. Однородность пространства-времени и сохранение импульса-энергии	47
7.3. Калибровочное преобразование первого рода и сохранение заряда	49
Задачи к главе III	51
ГЛАВА IV. Скалярные поля	52
§ 8. Действительное скалярное поле $\Phi(x) = \Phi^*(x)$	52
§ 9. Комплексное скалярное поле $\varphi(x) \neq \varphi^*(x)$	57

§ 10. C -, P -, T -преобразования	60
10.1. Релятивистская кинематика	61
10.2. C -, P -, T -преобразования комплексного скалярного поля	62
10.3. C -, P -, T -преобразования электромагнитного поля	65
Задачи к главе IV	66
ГЛАВА V. Спинорное поле Дирака	68
§ 11. Трёхмерные спиноры (3-спиноры)	68
§ 12. Четырёхмерные спиноры (4-спиноры)	72
12.1. Правые и левые 4-спиноры	72
12.2. Билинейные ковариантные комбинации 4-спиноров	73
§ 13. Уравнение Дирака	74
§ 14. C -, P -, T -преобразования спинорного поля Дирака	79
§ 15. Гамильтонова форма уравнения Дирака	80
§ 16. Плоские волны	82
§ 17. Квантование спинорного поля Дирака	86
Задачи к главе V	88
ГЛАВА VI. Взаимодействие полей	91
§ 18. Представление взаимодействия	91
§ 19. Инвариантная теория возмущений	94
19.1. Основные соотношения	94
19.2. Примеры	98
§ 20. Амплитуда рассеяния и вероятность перехода	100
20.1. Амплитуда рассеяния	100
20.2. Ширина распада	103
20.3. Сечение рассеяния	104
§ 21. Переменные Мандельштама	106
Задачи к главе VI	110
ГЛАВА VII. Первый порядок теории возмущений	112
§ 22. Взаимодействие $g\hat{\varphi}^+\hat{\varphi}\hat{\Phi}$	112
§ 23. Взаимодействие $g\hat{\Psi}\hat{\Psi}\hat{\Phi}$. Распад бозона Хиггса	117
23.1. Взаимодействие $g\hat{\Psi}\hat{\Psi}\hat{\Phi}$ в Стандартной модели	117
23.2. Распад бозона Хиггса $H \rightarrow e^+e^-$	119
23.3. Суммирование по спиновым состояниям	121
23.4. Распад бозона Хиггса $H \rightarrow \gamma\gamma$	122
§ 24. Образование бозона Хиггса в столкновениях e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ и $\gamma\gamma$	123

§ 25. Квантовая электродинамика (КЭД). Правила Фейнмана в КЭД	125
25.1. Процессы первого порядка в КЭД	125
25.2. Правила Фейнмана в КЭД	127
Задачи к главе VII	129
ГЛАВА VIII. Второй порядок теории возмущений	132
§ 26. Второй порядок теории возмущений со взаимодействием $g\hat{\varphi}^+\hat{\varphi}\hat{\Phi}$	132
26.1. Рассеяние заряженных частиц	134
26.2. Виртуальные частицы. МД-эффект	137
26.2.1. Виртуальные частицы	137
26.2.2. Эффект ограничения прицельных параметров на встречных пучках, или МД-эффект	138
§ 27. Пропагатор скалярной частицы	140
§ 28. Процессы $\pi^0\pi^- \rightarrow \pi^0\pi^-$ и $\pi^+\pi^- \rightarrow \pi^0\pi^0$	145
§ 29. Рассеяние электронов в КЭД	146
§ 30. Фотонный пропагатор	148
§ 31. Диаграммы Фейнмана и закон Кулона	151
§ 32. Процессы аннигиляции $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ и $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$	154
§ 33. Процессы $e^+e^- \rightarrow \bar{q}q$ и $e^+e^- \rightarrow hadrons$ при высоких энергиях	159
§ 34. Процесс $e\mu \rightarrow e\mu$ и перекрёстная симметрия	166
§ 35. Амплитуда процесса $\gamma e \rightarrow \gamma e$	168
§ 36. Пропагатор электрона	170
§ 37. Эффект Комптона и его приложения	173
37.1. Кинематика эффекта Комптона и его сечение	173
37.2. Эксперименты Артура Комптона (1923–1924)	175
37.3. Столкновения ультрарелятивистских электронов и лазерных фотонов	177
37.4. Комптоновское рассеяние как базовый процесс для преобразования $e \rightarrow \gamma$ на будущих фотонных коллайдерах	181
§ 38. Основные характеристики процессов $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ и $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ при высоких энергиях	185
§ 39. Вместо заключения: что дальше?	188
Задачи к главе VIII	190
Дополнения	192
А. Глубоко неупругое ep -рассеяние	192
А.1. Спиральные состояния виртуального фотона	192
А.2. Связь сечений ep - и γ^*p -рассеяний	194

A.3. Структурные функции элементарных частиц	197
В. Метод эквивалентных фотонов (МЭФ)	197
В.1. Идея МЭФ	197
В.2. Пример: процесс $e\gamma \rightarrow e\mu^-\mu^+$	199
В.3. Число эквивалентных фотонов (ЭФ)	202
С. Тормозное излучение	206
Д. Процессы с большими прицельными параметрами	209
Е. Когерентное тормозное излучение	213
Ф. Двухфотонные процессы на встречных e^-e^\pm -пучках	217
F.1. Связь сечений e^-e^\pm - и $\gamma^*\gamma^*$ -рассеяний	218
F.2. Приближение МЭФ для двухфотонных процессов	219
F.3. Светимость $\gamma^*\gamma^*$ -соударений	220
Приложение	222
Литература	225
Предметный указатель	230