

С. ГАЗИОРОВИЧ



ФИЗИКА
ЭЛЕМЕНТАРНЫХ
ЧАСТИЦ

С. ГАЗИОРОВИЧ

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

*Перевод с английского
под редакцией
А. Д. СУХАНОВА*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1969

530.1
Г 13
УДК 539.12

ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS

Stephen Gasiorowicz

Professor of Physics
University of Minnesota

John Wiley & Sons, Inc.,
New York — London — Sydney

Физика элементарных частиц. Газиорович С., Изд. «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1969 г.

Предлагаемая книга С. Газиоровича является первой книгой по физике элементарных частиц, написанной целиком с новых теоретических позиций на основе теории $SU(3)$ -симметрии.

Книга состоит из четырех частей. В первой части даются основные понятия теории поля без излишних математических деталей. Во второй части обсуждаются избранные вопросы квантовой электродинамики, причем автор не претендует на полноту изложения. Центральное место в книге занимает третья часть, посвященная изложению многочисленных аспектов физики сильных взаимодействий. Четвертая часть книги содержит последовательное изложение современной теории слабых взаимодействий. В книгу включены два дополнения: лекция Ван Хоа о теории рассеяния при сверхвысоких энергиях и обзорный доклад Кабиббо о состоянии проблемы слабых взаимодействий. Табл. 17, рис. 125, библиограф. 877 назв.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редактора перевода	9
Предисловие автора	11
Обозначения	15
<i>часть I</i>	
Введение в квантовую теорию поля	17
Введение	17
Глава 1. Скалярное поле	20
Решения уравнения Клейна — Гордона типа плоских волн. Каноническое квантование. Лоренцева инвариантность. Операторы энергии-импульса. Перестановочные соотношения при разных временах. Операторы рождения и уничтожения. Спин скалярной частицы. Оператор заряда. Градиентная инвариантность первого рода и общее выражение для оператора заряда. Оператор четности. Операторы обращения времени и антиунитарные операторы.	
Глава 2. Дираково поле	47
Уравнение Дирака и решения типа плоских волн. Операторы энергии и проекции спина. Лоренцевы преобразования поля $\psi(x)$. Квантование с антиперестановочными соотношениями. Принцип Паули. Оператор заряда и зарядовое сопряжение. Спин кванта диракова поля. Четность и правила суперотбора. Обращение времени.	
Глава 3. Векторные мезоны и фотоны	69
Уравнения поля. Квантование векторного поля. Доказательство того, что спин векторной частицы равен 1. Уравнения электромагнитного поля. Связь градиентной инвариантности с существованием только двух состояний поляризации. Квантование и дополнительное условие. Инdefинитная метрика для скалярных и продольных фотонов.	
Глава 4. Лоренцева инвариантность и спин	84
Перестановочные соотношения для десяти операторов неоднородной группы Лоренца. Малая группа. Оператор спина. Случай нулевой массы. Трансформационные свойства одночастичных векторов состояния (каноническое представление). Спинорный базис и операторы рождения и уничтожения свободного поля. Спиральный базис и его связь с другими базисами. Двухчастичные состояния в спиральном представлении в системе центра масс. Соотношение между собственными состояниями спиральности и полного момента. Нормировка двухчастичных состояний. Редукция матрицы рассеяния в спиральном представлении. Приложение: конечномерные представления однородной группы Лоренца.	

Глава 5. Взаимодействие полей	107
Условия, которым должны удовлетворять лагранжианы. Градиентная инвариантность второго рода и «минимальное» электромагнитное взаимодействие. Неоднозначность предложенного рецепта.	
Глава 6. Матрица рассеяния	115
Определение матрицы рассеяния. Гейзенберговы in- и out-векторы состояния как два базиса в векторном пространстве физических состояний. Асимптотические in- и out-поля. Асимптотическое условие ЛШЦ. Слабая и сильная сходимость. Редукция S-матрицы.	
Глава 7. Редукционные формулы	124
Выражение элементов матрицы рассеяния через T-произведения или запаздывающие коммутаторы операторов поля. Инвариантность S-матрицы относительно обращения времени. Разложение на неприводимые части. Выражение редукционных формул через неперенормированные поля.	
Глава 8. Теория возмущений	136
Соотношение между перенормированными операторами поля и операторами свободных полей. Оператор U. Теорема Гелл-Мана — Лоу. Выражение T-произведения неперенормированных полей через операторы свободного поля. Функциональный метод расчета вакуумных средних T-произведений свободных операторов поля. Иллюстрации графического представления.	
Глава 9. Правила Фейнмана	159
Правила Фейнмана для взаимодействия частиц спина $\frac{1}{2}$ с фотонами. Правила в x-пространстве. Правила в импульсном пространстве. Теорема Фарри. Взаимодействие бозонов спина нуль с фотонами. Правила вычисления вероятностей перехода и сечений. Доказательство релятивистской инвариантности сечения.	
<i>часть II</i>	
Избранные вопросы квантовой электродинамики	171
Введение	171
Глава 10. Комптон-эффект и родственные ему процессы	173
Матричный элемент для эффекта Комптона. Градиентная инвариантность. Вычисление квадрата матричного элемента с использованием шпуров. Суммирование по поляризациям. Инвариантное выражение для формулы Клейна — Нишины. Пик в угловом распределении для рассеяния назад. Рассеяние поляризованных фотонов поляризованными электронами. Рассеяние фотонов бозонами спина нуль на пороге. Рождение пар на лету. Перенос спиральности позитрона.	
Глава 11. Рассеяние электронов и позитронов	191
Амплитуда Мёллера. Нерелятивистский предел. Подавление рассеяния с переворачиванием спина. Правила Фейнмана для рассеяния во внешнем поле. Сечение кулоновского рассеяния. Рассеяние более высоких порядков в кулоновском поле и справедливость формулы Резерфорда для сечения рассеяния.	

Глава 12. Тормозное излучение и родственные ему процессы 201

Сечение тормозного излучения в пределе мягких фотонов. Излучение фотона классическим током. Инфракрасная расходимость в сечении тормозного излучения. Метод Вейцекера — Вильямса. Вычисление длины излучения. Рождение пар фотонами в кулоновском поле. Поляризация жесткого тормозного излучения поляризованными электронами.

Глава 13. Высшие порядки теории возмущений 213

Необходимость перенормировки. Перенормировка массы с помощью асимптотического условия. Общая формула для разности масс. Радиационные поправки к кулоновскому рассеянию. Радиационные поправки к внешним линиям. Радиационные поправки к вершине. Вычитание бесконечности из вершины. Тожество Уорда. Поляризация вакуума и перенормировка заряда. Аномальный магнитный момент электрона. Сокращение инфракрасных расходимостей.

Часть III

Сильные взаимодействия 234

Введение 234

Глава 14. Барions 237

Нуклон. Λ^0 -гиперон. Определение спина Λ^0 -гиперона по характеристикам его распада. Гиперядра. Σ -гипероны. Четность в системе $\Sigma - \Lambda^0$. Ξ -гиперон.

Глава 15. Псевдоскалярные мезоны 252

Определение спина пиона. Двухфотонный распад ρ^0 -мезона. Четность пиона и захват медленных π^- -мезонов протонами. K -мезоны. График Далица. Спин K -мезона. Гиперфрагменты и четность K -мезона. η^0 -мезон.

Глава 16. Зарядовая независимость и странность 269

Зарядовая независимость ядерных сил. Изоспин. Сложение изоспинов. Изоспин античастиц. Изоспин пиона. Проверка закона сохранения изоспина. Новые частицы и введение странности. Выводы из систематики Гелл-Мана — Нишиджимы. G -четность.

Глава 17. Унитарная симметрия 234

Обзор теории $SU(2)$. Перестановочные соотношения в теории $SU(3)$. Графическое представление операторов сдвига. Представления $SU(3)$ в графической форме. Обозначение состояний. Унитарный спин. Редукция произведения двух представлений. Неприводимые тензоры.

Глава 18. Восьмеричный путь 304

Классификация мезонов и барions в октетном представлении. Кварки. Два типа взаимодействия Юкавы, F и D . Матричное представление октетов. Токи в теории $SU(3)$ -симметрии. Метод расчета отношений сечений. Массовая формула Гелл-Мана — Окубо.

Глава 19. Барийонные резонансы	318
Получение резонансов. Резонанс $N_{3/2}^*$ (1238), его изоспин и спин. Некоторые другие резонансы с $Y=1$. Резонанс Y_1^* (1385). Определение его спина. Резонанс Y_0^* (1405). Угловое распределение K^-p -рассеяния при резонансе. Другие резонансы с $Y=0$. Резонансы с $Y=-1$. Ω^- -гиперон и теория $SU(3)$. Декаплет и предсказанные ширины резонансов. Вышние представления.	
Глава 20. Бозонные резонансы	342
ρ -мезон и его квантовые числа. Асимметрия вперед-назад в угловом распределении. Проявление изоспина в периферическом рождении. ω -мезон. Определение спина и четности из графика Далица. Распад $\omega \rightarrow 2\pi$ с нарушением сохранения изоспина. ϕ -мезон. Смешивание $\omega - \phi$. K^* -мезон. Нонетное представление и предсказание угла смешивания $\omega - \phi$. Десятый псевдоскалярный мезон. Нонет 2^+ -мезонов. Другие резонансы: A_1 -пик, ϵ -мезон и B -мезон.	
Глава 21. Свойства элементов S-матрицы. I. Унитарность	365
Унитарность S-матрицы. Оптическая теорема. Обобщенная унитарность и перекрестные процессы. Одночастичные вклады.	
Глава 22. Свойства элементов S-матрицы. II. Аналитичность	378
Амплитуда рассеяния вперед фотонов на протонах. Дисперсионное соотношение. Необходимость вычитаний. Аналитичность фейнманова графа для вершины. Аномальные пороги и слабосвязанные системы. Представление Мандельстама.	
Глава 23. Пион-нуклонное рассеяние и дисперсионные соотношения для рассеяния вперед	394
Общее выражение для амплитуды. Разложение по изоспинам. Полюсные члены. Перекрестная симметрия. Разложение по парциальным волнам. Дисперсионные соотношения для рассеяния вперед. Сравнение с экспериментом. Пороговая теорема. Вещественная часть амплитуды рассеяния при высоких энергиях.	
Глава 24. Свойства амплитуд парциальных волн	418
Аналитические свойства амплитуд парциальных волн, следующие из представления Мандельстама. Поведение на пороге. Приближение эффективного радиуса. Резонансы. Решение с заданным левым разрезом. Связанные состояния. Неоднозначность Кастилехо — Далица — Дайсона (КДД). Неупругий N/D -метод. Многоканальная унитарность и поведение на пороге. Двухканальная модель в приближении нулевого радиуса.	
Глава 25. Динамическая природа резонансов	445
Левый разрез как потенциал. Статический предел пион-нуклонного рассеяния и резонанс с $T=J=3/2$. Перекрестная матрица в статическом пределе. Взаимный бутстрап. Результаты вычислений с парциальными волнами для пион-нуклонного рассеяния. Перекрестная матрица октет-октетного рассеяния. Октет-декаплетный взаимный бутстрап и отношение D/F . Рассмотрение декаплета как частицы спина $3/2$.	

Глава 26. Формфакторы 467

Общее выражение для матричного элемента тока. Значение $F_1(0)$ и $F_2(0)$. Данные по формфакторам. Дисперсионный подход к формфакторам. Доминирующая роль векторного мезона. Свойства электрического тока в теории $SU(3)$. Электромагнитная массовая формула. Магнитные моменты Λ^0 - и Σ^+ -гиперонов. набросок расчета изовекторного магнитного момента.

Глава 27. Механизм одночастичного обмена 488

Модель обмена пионом. Матрица плотности периферически рожденного ρ -мезона. Спиральное разложение амплитуд. Поправки на поглощение. Сравнение с экспериментом.

Глава 28. Упругое рассеяние при высоких энергиях 506

Модель черной сферы. Теорема Померанчука — Окуня. Доминирующая роль обмена с вакуумными квантовыми числами. Представление предельного параметра и упругое рассеяние с малыми передачами импульса. Отступление к полюсам Редже. Полюсы Редже в нерелятивистском потенциальном рассеянии. Дифракционное сужение. Модель Ван Хофа для дифракционного рассеяния. Рассеяние на большие углы и предположение Ву — Янга.

Часть IV

Слабые взаимодействия 530

Введение 530

Глава 29. «Классическая теория» бета-распада 534

Теория Ферми. Спектр нерелятивистского электрона. Члены Фирца и электрон-нейтринная корреляция. Универсальность и каналы распада пиона.

Глава 30. Четность, зарядовое сопряжение, обращение времени и экспериментальная проверка их сохранения 543

Подтверждение сохранения четности в сильных взаимодействиях. Работа Ли и Янга. Теорема PCT . Равенство масс и времен жизни частиц и античастиц. Проверка сохранения P , C и T с учетом и без учета взаимодействия в конечном состоянии.

Глава 31. Форма взаимодействия при β -распаде 556

Эксперимент с Co^{60} . Предположение о двухкомпонентности нейтрино. Данные о спиральности электрона. Измерение спиральности нейтрино. Сохранение лептонов и распад мюона. Значения констант C_V и C_A . Промежуточный векторный бозон. Два типа нейтрино.

Глава 32. Слабые взаимодействия странных частиц. I. Правила отбора, симметрии и распадные свойства нейтральных K -мезонов . . 576

Токи для распадов странных частиц. Правило $|\Delta S|=1$. Правило $\Delta S=\Delta Q$. Правило $\Delta T=1/2$. Шпурионы. Опыты с распадом Λ^0 -гиперона и тройки Σ -гиперонов. Два значения времени жизни для нейтральных K -мезонов. K_S и K_L -мезоны. Определение разности их масс. Нарушение CP -инвариантности. Трансформационные свойства тока с $T=1/2$, изменяющего странность.

<i>Глава 33. Слабые взаимодействия странных частиц. II. Анализ нелептонных и лептонных распадов</i>	594
Нелептонный распад Λ^0 -гиперона. Параметры асимметрии. Роль $SU(3)$ -симметрии в нелептонных слабых взаимодействиях. Подавление бета-распада Λ^0 -гиперона. Лептонные распады K -мезонов.	
<i>Глава 34. Сохраняющиеся и частично сохраняющиеся токи</i>	610
Слабый ток как изотопический ток. Сохраняющийся векторный ток. Бета-распад пиона. Слабый магнетизм. Физика нейтрино высоких энергий. Частично сохраняющийся псевдовекторный ток. Соотношение Гольдбергера — Треймана. Гипотеза Кабиббо. Определение угла Кабиббо. Предсказание лептонных распадов гиперонов. Связь между «слабым» и «сильным» отношениями D/F . Перестановочные соотношения токов и величина отношения C_A/C_V .	
<i>Дополнение I. Л. Ван Хов. Рассеяние сильно взаимодействующих частиц при сверхвысоких энергиях</i>	634
<i>Дополнение II. Н. Кабиббо. Слабые взаимодействия</i>	693
Литература	718