

СЛАБЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Springer Tracts in Modern Physics (Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften) (G. Höhler, Ed.), vol. 52 (214 pp.), vol. 53 (106 pp.), Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1970.

52-й и 53-й тома серии «Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften» посвящены слабым взаимодействиям. Это — сборники лекций, прочитанных во 2-й международной летней школе теоретической физики при Университете Карлсруэ (июль 1969 г.). Сборники охватывают практически все аспекты и методы современной теории слабых взаимодействий. Авторы лекций — известные теоретики, работающие в научных центрах Западной Европы и США. Для обоих сборников характерны методическое единство, четкость и ясность изложения. Это обстоятельство значительно увеличивает ценность издания, поскольку в большинстве случаев речь идет о точках роста развивающейся теории.

52-й том открывается лекцией С. Газиоровича (S. Gasiorowicz) «Обзор слабых взаимодействий». В обзоре кратко обсуждается эволюция фундаментальных представлений теории слабых взаимодействий: универсальность, $(V - A)$ -вариант слабого тока, сохранение векторного тока, несохранение четности и T -инвариантность — и их экспериментальные основания. Далее автор дает представление о симметриях адронного тока, гипотезе частичного сохранения аксиального тока, низкоэнергетических теоремах. Обзор Газиоровича задуман как введение к обоим сборникам.

Лекция В. Мюллера (V. F. Müller) «Полулептонные распады» посвящена лептонным распадам барионов. Стандартное полуженуменологическое описание здесь дополнено гипотезами об унитарной симметрии адронного тока и о частичном сохранении аксиального тока. Основное внимание уделено получению следствий из этих гипотез — соотношений типа Гольдбергера — Треймана. Кроме того, дается подробный вывод теоремы Адемолло — Гатто о влиянии нарушения симметрии на свойства барионных формфакторов.

В лекции Б. Штеха (B. Stech) «Нелептонные распады» речь также идет о распадах барионов и предполагается T -инвариантность. В основном здесь обсуждается полюсная модель распадов — сначала феноменологически, как хороший способ подгонки под экспериментальные данные, а затем — в связи с низкоэнергетическими теоремами как следствие точной унитарной симметрии. Дело в том, что эти два метода приводят к противоречащим результатам, и до сих пор не ясно, в каком пункте требуется модификация. Наконец, несколько слов говорится, в рамках полюсной модели, о возможной роли членов, нарушающих правило $|\Delta I| = 1/2$.

Лекция Б. Реннера (B. Renner) «Алгебра токов и слабые взаимодействия» представляет собой последовательный анализ физических предположений, следующих для слабых взаимодействий из постулатов алгебры токов, и их экспериментальных обоснований. Обсуждаются: квантовые числа слабого и электромагнитного токов, принадлежность изовекторной части электромагнитного и сохраняющей странность части слабого векторного токов одному изотриплету, их сохранение, эквивалентность схемы Кабиббо и точной унитарной симметрии, а также прямые следствия коммутационных соотношений алгебры. В последнем случае речь идет о правилах сумм для реакций с нейтрино, соотношении Адлера — Вайсбергера и низкоэнергетических теоремах

для распадов K_{13} и K_{14} . Автор подробно разбирает методы экстраполяции амплитуды к физическим значениям масс, необходимой для сравнения низкоэнергетических теорем с экспериментом.

Лекция «Распад системы $K_0 - \bar{K}_0$ » прочитана Х. Дошем (H. G. Dosch). В ней последовательно излагается метод описания распадов, предложенный Вайскопфом и Вигпером. При этом особое внимание уделяется условиям применимости метода; продемонстрировано, что система $\bar{K}_0 - K_0$ удовлетворяет всем этим условиям. В конце лекции дается простая формулировка проблемы неэкспоненциальных распадов.

Название лекции П. Кабира (P. Kabir) «Вопросы, возникшие в связи с CP -несохранением», говорит само за себя. В первой ее части дается феноменологический анализ распада нейтральных K -мезонов, причем выводятся удобные критерии TCP - и T -инвариантности, использующие условие унитарности. Следующий за этим анализ экспериментальных данных (в терминах отношения амплитуд распада долгоживущей и короткоживущей компонент) по распаду $K \rightarrow 2\pi$ свидетельствует о сохранении TCP и несохранении T . Для физической интерпретации всего анализа рассматривается простая модель, предложенная С. Вайнбергом, в которой состояния K_L и K_S обладают лишь одним самосопряженным каналом распада. Во второй части лекции П. Кабира обсуждаются возможные динамические причины CP -несохранения. В соответствии с интенсивностью CP -неинвариантного взаимодействия и его типом автор подразделяет обсуждаемые им варианты на три группы: сверхслабые, миллислабые и миллисильные теории. В последнем случае значительное внимание уделяется роли гипотетических a -частиц, не меняющих заряда под действием операции зарядового сопряжения. Отметим, что П. Кабир обсуждает далеко не все схемы динамического CP -несохранения, предложенные к 1969 г.

В лекции В. Куммера (W. Kummer) «Соотношения для полулептонных слабых взаимодействий с участием фотонов» низкоэнергетические теоремы применяются для описания ситуации, в которой заряженные компоненты изовекторного слабого тока не сохраняются в присутствии фотонов. Здесь возникают условия типа «частичного сохранения» изовекторного тока, приводящие в предположении точной унитарной симметрии к соотношениям для матричных элементов распадов. Такие соотношения анализируются для распадов $\pi \rightarrow e\nu\gamma$ и $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e\nu\gamma$.

Автор обширной лекции «Радиационные поправки к слабым распадам с участием лептонов» Риазуддин (Riazuddin) рассматривает поправки второго порядка по e к процессам в первом порядке по G , трактуемым в рамках обычной схемы Кабиббо. Учет радиационных поправок необходим прежде всего для экспериментальной проверки универсальности слабых взаимодействий, в частности, равенства констант связи μ -распада и β -распада нейтрона. Главная трудность здесь связана с ультрафиолетовой расходимостью. Автор приводит подробный расчет поправок к μ -распаду, показывая, что для $V - A$ -варианта слабых взаимодействий ультрафиолетовые расходимости взаимно сокращаются. Напротив, для процессов типа β -распада адронов такого автоматического сокращения не происходит, и результаты зависят от произвольного параметра обрезания.

Описывающий радиационные поправки матричный элемент стандартным для алгебры токов образом выражается через одновременной коммутатор электромагнитного и слабого адронного токов и не зависит от деталей сильных взаимодействий. Однако этот коммутатор можно найти лишь в рамках конкретной модели. Автор рассматривает модель алгебры полей, а также различные модели, в которых токи строятся из фундаментального триплета спинов (кварки, модель Сакаты и пр.). Сокращения ультрафиолетовых расходимостей можно добиться весьма искусственным способом, а именно — взять в качестве двух членов фундаментального триплета изодублет с гиперзарядом -1 . В общем же случае величина радиационных поправок, а следовательно, и вычисленная константа связи для β -распада зависит как от конкретной модели, так и от обрезания. Впрочем, зависимость от обрезания оказывается весьма слабой: при вариации параметра обрезания от $300 Mэв$ до $1 Gэв$ значение косинуса угла Кабиббо меняется от 0.968 до 0.98. Во всех случаях вычисленные значения констант связи и угла Кабиббо лежат в пределах экспериментальных ошибок.

Наилучшие сведения о $e - \mu$ -универсальности дает отношение постоянных распадов π_{e2} и $\pi_{\mu 2}$. После учета радиационных поправок оказывается, что константы связи для электронного и мюонного токов отличаются менее чем на 1%. В заключение лекции автор кратко описывает дополнительные трудности в вычислении радиационных поправок к распадам с изменением странности.

Лекция И. Ротляйтнера (I. Rothleitner) «Радиационные поправки к слабым взаимодействиям» трактует три отдельных частных вопроса. Во-первых, автор доказывает конечность радиационных поправок к μ -распаду в произвольном порядке по e . Он основывается на предположениях: 1) электромагнитное взаимодействие мультипликативно перенормирует слабый лептонный ток; 2) соответствующая константа перенормировки, как и константа перенормировки волновой функции лептонов, логарифмически расходится. После этого остается лишь заметить, что в матричные элементы слабого тока входят лишь отношения этих констант. Во-вторых, автор пытается

интерпретировать расходимости радиационных поправок к упругому рассеянию нейтрино на лептоне. В-третьих, он рассматривает влияние радиационных поправок на спектр электронов в β -распаде.

В лекции Дж. Сегре (G. Segre) «Нестандартные модели слабых взаимодействий» речь идет о теориях с промежуточным бозоном. Сначала описывается перенормируемая модель с тремя скалярными бозонами (два заряженных и нейтральный) и двумя дополнительными нейтральными лептонами. В такой модели матричный элемент μ -распада совпадает с обычным с точностью до членов порядка $(m_0/M)^2$ и pp'/M^2 , где M — масса бозона, m_0 — масса нейтрального лептона, а p и p' — импульсы мюона и электрона. Чтобы аналогичным образом воспроизвести слабый ток адронов, необходимо ввести еще один нейтральный фермион f , не участвующий в сильных взаимодействиях; поправки к обычному матричному элементу порядка $(M_N/M)^2$ и $(M_f/M)^2$. Однако нелептонные распады с $\Delta S = 1$ оказываются в этом случае полуслабыми: безразмерная константа имеет порядок $3 \cdot 10^{-4} M/M_N$. Чтобы подавить ее, в модель вводится еще один промежуточный нейтральный фермион. Но даже это не ликвидирует трудности со слишком сильным — также полуслабым — несохранением четности. Автор кратко описывает еще одну перенормируемую модель со скалярными бозонами, но без дополнительных нейтральных фермионов. Поскольку в таком случае промежуточные бозоны должны нести как барионный, так и лептонный заряд, в этой модели трудности начинаются уже при попытке построить сохраняющийся векторный ток.

Остальные обсуждаемые Дж. Сегре модели — перенормируемые, с обрезанием. В каждой из них ликвидируется лишь какая-либо одна из трудностей теории с промежуточным векторным бозоном. Например, экспериментальная разность масс долгоживущего и короткоживущего K_0 -мезонов требует обрезания порядка $3-4 G_{\text{эв}}$, в то время как нижний предел массы промежуточного бозона — порядка $2 G_{\text{эв}}$, так что обрезание теряет смысл, если только оно не обеспечивается сильным взаимодействием промежуточного бозона с адронами. Далее, эксперимент показывает, что матричные элементы нелептонных распадов представляют собой почти чистый унитарный октет. В то же время в теории с промежуточным векторным бозоном они на равных правах должны содержать и 27-плет: в теорию вводятся дополнительные бозоны, обеспечивающие динамическое подавление лишних компонент. В конце лекции Дж. Сегре упоминает о перенормируемом варианте теории с неэрмитовым гамильтонианом взаимодействия и индефинитной метрикой.

Х. Пичман (H. Pietschmann) в лекции «Слабые взаимодействия на малых расстояниях» вводит формфактор в гамильтониан слабого взаимодействия, так что связь ток — ток становится нелокальной. Пичман выясняет, что влияние этой нелокальности доступно исследованию на сегодняшнем уровне эксперимента разве что для спектра электронов в μ -распаде.

Последняя лекция 52-го тома, «Физические симметрии в рамках квантовой теории поля», прочитанная Я. Лопушаньским (J. T. Lopuszański), выпадает из общей темы сборников. В ней сформулированы достаточные условия того, что симметрия, понимаемая как унитарное линейное преобразование асимптотических полей, генерируется зарядом — интегралом по пространству от нулевой компоненты сохраняющегося векторного тока.

53-й том открывается небольшой лекцией А. О. Барута (A. O. Barut) «Об S -матричной теории слабых взаимодействий». Автор отмечает, что со времен Ферми (1934 г.), который правильно угадал кинематическую структуру матричных элементов в слабых взаимодействиях, а всю динамическую информацию сосредоточил в константе связи G , никакого прогресса в создании динамической теории не произошло. Динамика, основанная на известном выражении для лагранжиана слабого взаимодействия типа ток — ток, дает удовлетворительные результаты лишь в первом порядке по константе связи, да и то при не слишком высоких энергиях. Введение промежуточного векторного бозона не облегчает дела, поскольку соответствующая теория также оказывается перенормируемой.

В связи с этим А. О. Барут предлагает вернуться к первоначальному подходу Ферми и относиться к лагранжиану взаимодействия только как к выражению, подсказывающему структуру амплитуд соответствующих процессов. Общее выражение для скалярной амплитуды процесса $G(s, t)$ определяется обычными требованиями инвариантности и возможными симметриями, условием унитарности и предположениями об аналитических свойствах (короткодействие и т. п.). Рассмотрение проводится для чисто лептонного взаимодействия $e\nu \rightarrow e\nu$ и по духу близко к выводу соотношения Гольдбергера — Треймана. В результате оказывается, что амплитуда $G(s, t)$ при больших s убывает по крайней мере как $(s \ln s)^{-1}$, тогда как теория возмущений приводит к неограниченно растущей функции.

Вторая лекция 53-го тома — лекция Г. Примакова (H. Primakoff) «Слабые взаимодействия в ядерной физике». Интерес к этой теме оправдан теми перспективами, которые открывает использование для изучения слабых взаимодействий адронов с барионным числом больше единицы, т. е. атомных ядер. В отличие от нуклонов, нуклонных изобар и мезонов, ядра обладают более богатыми спектрами масс, спинов,

зарядов, изоспинов и времен жизни, что облегчает поиск правильной теории. Основное внимание автор сосредоточил на обсуждении полулептонных слабых взаимодействий ядер.

Сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами показывает, что соответствующие свойства ядер нельзя интерпретировать только на основе нейтрон-протонной модели ядра. Иначе говоря, ядерный β -распад не сводится только к переходам между нуклонами типа $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$. Для объяснения возникающих расхождений необходимо, по мнению автора, привлечь два эффекта: обмен пионами и существование нуклонных изобар в ядре. Иначе говоря, помимо β -распада нуклона необходимо учитывать процессы типа $n \rightarrow n + \pi^+ + e^- + \bar{\nu}$ или $N^* \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$. В этом случае, в частности, должны оказаться наблюдаемыми некоторые процессы с участием мюонов, осуществление которых с точки зрения чистой нейтрон-протонной модели ядра маловероятно.

Далее рассматривается вопрос о проверке закона сохранения лептонного числа в двойном β -распаде ядер. Если предположить, что нейтрино являются частицами Майораны, то интерпретация некоторых экспериментов с ядрами допускает предположение о несохранении лептонного числа. В частности, сравнение экспериментальных и теоретических данных по временам жизни двойных β -распадов ядер Te^{130} и Te^{128} приводит к значению параметра несохранения лептонного числа $\eta \approx 10^{-3}$.

Если же допустить, что параметр η является к тому же комплексным, то появляется возможность для изучения T -инвариантности на большом материале о распадных свойствах ядер, а не только на примере экзотической системы K_L^0 - и K_S^0 -мезонов. В частности, хорошим пробным камнем для этих целей может послужить распад $P^{32} \rightarrow S^{32}$.

Наконец, большое внимание Г. Примаков уделяет распространению на ядра соотношений Гольдбергера — Треймана, Адлера — Вайсбергера и Вайнберга — Томозавы и, в частности, выяснению роли вклада пионного полюса в дивергенцию аксиального тока. Существующие экспериментальные данные и их обработка в духе правила сумм Гольдбергера — Миязавы — Оме приводят к выводу о том, что предположение о решающем вкладе в дивергенцию пионного полюса в случае ядер менее оправдано, чем в случае нуклонов. Однако окончательный вывод о справедливости гипотезы частично сохраняющегося аксиального тока в применении к ядрам можно будет сделать лишь после уточнения расчета соответствующего дисперсионного интеграла и получения более точных экспериментальных данных по длинам рассеяния пионов на ядрах. В заключение лекции автор обсуждает возможность проверки несохранения четности в нелептонных процессах в ядрах.

В лекциях Г. Гелена (G. V. Gehlen) «Слабые взаимодействия при высоких энергиях» главное внимание сосредоточено на проблеме промежуточного векторного бозона (для простоты автор предполагает существование лишь двух заряженных бозонов W^\pm). В начале лекций делаются обычные оценки пределов возможных значений массы и времени жизни промежуточного векторного бозона ($m_W > 1 \text{ Гэв}$ и $\tau_W < 10^{-18} \text{ сек}$) и подчеркиваются трудности непосредственного наблюдения этой частицы.

В связи с этим обсуждаются возможности обнаружения W -мезонов в опытах по рассеянию нейтрино на ядрах при высоких энергиях. Указывается на трудности, возникающие при выделении распадов W -мезонов на фоне конкурирующих распадов пионов и каонов. Автор показывает, что гипотеза о W -мезоне позволяет дать естественное объяснение различию между электронным и мюонным нейтрино.

По установившемуся сейчас мнению, единственным процессом, в котором необходимо вести расчеты во втором порядке по слабому взаимодействию, является переход $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$, ведущий к различию в массах между K_L^0 - и K_S^0 -мезонами. Поскольку теория с промежуточным векторным бозоном, как и исходная теория четырехфермионного взаимодействия, является неперенормируемой, возможность эффективных расчетов в старших порядках связана в ней с введением подходящего обрезającego множителя. Г. Гелен обсуждает возможность использования для этой цели эффектов сильного взаимодействия. Им показано, что учет сильного взаимодействия действительно позволяет сделать матричные элементы слабого взаимодействия во втором порядке конечными. В случае четырехфермионного взаимодействия необходимость в таком учете также обнаруживается, но при гораздо более низких энергиях.

Приведенные оценки показывают, что уже при энергии в несколько Гэв в слабых взаимодействиях можно ожидать появления новых интересных эффектов. Существенной проблемой по-прежнему остается большая величина массы W -мезона. Согласно предположению Маршака, это свидетельствует о наличии у него наряду со слабым и сильным взаимодействием. Не исключено, что это сильное взаимодействие как раз и порождает формфактор, который играет роль обрезającego множителя в расчетах высших порядков.

Более половины объема 53-го тома занимает лекция Р. Гатто (R. Gatto) «Угол Кабиббо и нарушение $SU_2 \times SU_2$ -симметрии». В ней впервые со всей подробностью

излагается идея неопубликованной работы автора, Г. Сартори и М. Тонина о том, что нарушение симметрии адронного тока может привести к компенсации части расходимостей теории с промежуточным векторным бозоном, а единственный контрчлен, компенсирующий оставшиеся расходимости, связывается с углом Кабиббо.

Главные расходимости, отвечающие обмену виртуальным бозоном в низшем порядке по слабой константе, с помощью стандартной техники алгебры токов выражаются через матричные элементы одновременных коммутаторов слабых токов и их дивергенций. Далее Р. Гатто показывает, что подбором формы нарушения унитарной симметрии действительно можно свести проблему расходимостей низшего порядка к выбору единственного контрчлена, связанного с углом Кабиббо.

Все дальнейшее изложение посвящено разработке этой основной идеи. При переходе к высшим порядкам возникает ряд новых проблем. Прежде всего математические особенности задачи изучаются на частных примерах моделей сильных и слабых взаимодействий. Простейшая из них — это модель свободных кварков, которые взаимодействуют с W -мезоном через ток Кабиббо. Результаты оказываются, вообще говоря, несправедливыми для других моделей. Однако автору удается найти такой класс моделей (в схемах алгебры токов), в котором результаты модели свободных кварков удается воспроизвести либо в первоначальном виде, либо несколько обобщив их. С точностью до четвертого порядка строго доказано, что все эти результаты можно получить в специальном варианте лагранжевой теории (близкой к алгебре полей Ли, Вайнберга и Зумино), который напоминает теорию составных частиц. Интуитивно кажется, что приведенное доказательство будет справедливо и в высших порядках.

Рассматриваемый автором подход является самосогласованным, поскольку введение одного-единственного контрчлена исключает главные расходимости, а угол Кабиббо оказывается как раз таким, каким ему следует быть, чтобы обеспечить максимально простой выбор этого контрчлена. Такой метод мог бы показаться неудовлетворительным, поскольку он основан на введении контрчлена, да еще в простейшей форме. В связи с этим Р. Гатто обсуждает другие возможные методы вычисления угла Кабиббо. Однако эти методы, несмотря на привлекательность с физической точки зрения еще далеки от завершенности.

В сборники не вошли несколько лекций школы в Карлсруэ, содержащих новые экспериментальные данные по слабым взаимодействиям.

В. П. Павлов, А. Д. Сузанов