1970 г. Октябрь *Том 102, вып. 2*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

БИБЛИОГРАФИЯ

919.941:539.101

ФИЗИКА СЛАБЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

R. E. Marshak, Riazuddin, C. P. Ryan. Theory of Weak Interactions in Particle Physics. Interscience Monographs and Texts in Physics and Astronomy, edited by R. E. Marshak, v. 24, J. Wiley, New York — London — Sydney — Toronto, 1969, 761 pp.

«По-видимому, сейчас подходящее время для того, чтобы подготовить исчерпывающий том о современном статусе и надеждах теории слабых взаимодействий».

Р. Маршак, Риазуддин, С. Райан

Монография Маршака, Риазуддина и Райана, вышедшая в свет в конце 1969 г., подводит итоги более чем 70-летнего развития физики слабых взаимодействий, которое началось с экспериментов Беккереля (открытие ядерного β-распада, 1896 г.), было продолжено теоретическими работами Ферми (1934 г.), но проходило особенно интенсивно последние 15 лет. В начале 50-х годов было установлено, что ядерный β-распад — только один пример из большого ряда слабых процессов в физике элементарных частиц. В 1956—1958 гг. было открыто нарушение четности и зарядового сопряжения (Ли и Янг, Ву), была сформулирована V — A-теория универсального слабого взаимодействия (Сударшан — Маршак, Фейнман — Гелл-Манн), а также были сформулированы основные проблемы, стоящие перед физикой слабых взаимодействий (Марков, Понтекорво и др.). В 1964 г. открыто нарушение CP-четности в распадах K_L^0-мезонов.

Имеются монографии, отражающие достижения этого периода, в том числе на русском языке: Л. Б. Окунь «Слабое взаимодействие элементарных частиц» (1963 г.), М. А. Марков «Нейтрино» (1964 г.), Ц. Ли и Ц. Ву «Слабые взаимодействия» (1968 г.) (перевод из Annual Riview of Nucliear Science, 1965—1966 гг.).

Одним из главных преимуществ монографии Маршака, Риазуддина и Райана является то, что в ней подробно изложены как упомянутые выше проблемы, причем это сделано на основе новейших экспериментальных данных, так и достижения теории слабых взаимодействий ряда последних лет (1965—1968 гг.). В последние годы не только шло быстрое накопление экспериментальных фактов, но и было выполнено большое число теоретических работ, в которых изучается влияние сильных и электромагнитных взаимодействий на всю совокупность слабых процессов. Поэтому в монографии большое место занимает применение дисперсионных соотношений, техники SU_3-симметрии, алгебры токов и др. к динамическому описанию слабых взаимодействий с участием адронов. Вместе с тем подчеркивается важность изучения явлений слабых взаимодействий при высоких энергиях и высших порядков слабых процессов для дальнейшего развития теории.

Авторы считают, что «книга будет полезна как экспериментаторам, так и теоретикам, работающим в быстро развивающейся физике слабых взаимодействий». Чтобы сделать этот том более полезным для экспериментаторов, они включили две вводные главы: первая глава, «Физическое введение», знакомит с местом слабых взаимодействий в физике элементарных частиц (там же содержится и исторический обзор), во второй главе излагается математический аппарат, который необходим для понимания теоретических выкладок в последующих главах. Главы 3—6, охватывающие круг вопросов, касающихся лептонных, полулептонных (как сохраняющих, так и изменяющих гиперзаряд) и адронных слабых процессов, составляют основу книги, и в них описано большинство экспериментальных результатов, которые могут быть сравнены с теорией. Последнюю главу, «Гипотеза промежуточного бозона», можно было бы рассматривать как призыв к экспериментаторам, так как в ней предлагаются эксперименты, которые могли бы обеспечить проверку некоторых из недавних теоретических идей. Интересы

теоретиков учтены тем, что в книге приведены детальные выводы основных теоретических результатов, а также уточнены везде, где это удается сделать, границы приближений и указаны возможности улучшения расчетов.

Коротко изложим содержание книги по главам.

Главы 1, 2. «Физическое введение», «Математическое введение». Первая глава знакомит читателя не только с особенностями физики слабых взаимодействий, но и с планом книги, учитывающим эти особенности. Если электромагнитные и сильные взаимодействия являются взаимодействиями «юкавского типа», т. е. взаимодействиями между фермионными токами и бозонными полями, то слабые взаимодействия описываются взаимодействием между фермионными токами. $V - A$-модель слабых взаимодействий заряженных токов лептонов и адронов достигла замечательных успехов в области низких энергий. Поэтому авторы стремились изложить материал в этой книге таким образом, чтобы можно было тщательно оценить современную ситуацию и перспективы $V - A$-теории слабых взаимодействий.

Теория слабых взаимодействий с необходимостью должна учитывать эффекты сильных и электромагнитных взаимодействий. Поэтому в главе 2 излагается математический аппарат, нужный для того, чтобы выполнить в последующих главах динамические расчеты слабых процессов с участием адронов. Этот математический аппарат включает дисперсионные соотношения (для определения формфакторов), алгебру токов вместе с гипотезой частично сохраняющегося аксиально-векторного тока $PCAC$ (для определения перенормированной аксиально-векторной константы), а также технику «мягких пионов», которая позволяет найти связь между матричными элементами с различным числом π-мезонов. В главе 2 изложен метод спектральных правил сумм, служащий одним из способов исследования структуры слабых взаимодействий при высоких энергиях, а также описаны основы математического аппарата SU_3-группы.

Еще одна отличительная черта слабых взаимодействий — нарушение некоторых из симметрий. Нарушение C- и P-инвариантностей максимально в слабых взаимодействиях как лептонов, так и адронов. CP-инвариантность (и, следовательно, T-инвариантность, если считать справедливой CPT-инвариантность) нарушается на уровне 10^{-3} в адронных слабых распадах ($K_L^0 \to 2\pi$) и полулептонных слабых распадах (зарядовая асимметрия в распадах $\overline{K}_L^0 \to \pi^\pm + e^\pm + \nu_e\ (\overline{\nu_e})$). Математические детали, касающиеся дискретных преобразований, описаны в главе 2, а следствия нарушения C-, P- и CP (T)-симметрий в слабых взаимодействиях обсуждаются в главах 3—6. Описаны группы внутренних симметрий: калибровочные группы, связанные с электрическим зарядом U_1^Q, барионным, лептонным и гиперзарядовым числами (U_1^B, U_1^L, U_1^Y), и изотопическая группа SU_2^I. Слабые взаимодействия не инвариантны относительно групп U_1^Y и SU_2^I, но существуют правила отбора как по гиперзаряду $|\Delta Y| = 0{,}1$, $\frac{\Delta Y}{\Delta Q} = 1$, так и по изотопическому спину $\Delta I = \frac{1}{2}$.

Глава 3. «Лептонные слабые процессы». Если записать полный гамильтониан слабого взаимодействия в форме

$$H_w = -\frac{G}{\sqrt{2}}\{L_\lambda + J_\lambda^0 + J_\lambda^1\}\{\overline{L}_\lambda + \overline{J}_\lambda^0 + \overline{J}_\lambda^1\},$$

то член $L_\lambda \overline{L}_\lambda$ описывает чисто лептонные процессы (лептонный ток $L_\lambda = \overline{\psi}_{\nu_e}\gamma_\lambda(1+\gamma_5)\psi_e + \overline{\psi}_{\nu_\mu}\gamma_\lambda(1+\gamma_5)\psi_\mu$), $J_\lambda^0\overline{L}_\lambda$ и $J_\lambda^1\overline{L}_\lambda$ — полулептонные процессы с $\Delta Y = 0$ и $|\Delta Y| = 1$ ($J_\lambda^0 = \overline{\psi}_p O_\lambda \psi_n$, $J_\lambda^1 = \overline{\psi}_p O_\lambda \psi_\Lambda$), а $J_\lambda^1 \overline{J}_\lambda^0$ — адронные слабые процессы.

Лептонные слабые процессы дают уникальную возможность для изучения слабых взаимодействий в относительно чистом виде. В третьей главе приведен подробный анализ распада мюона и показано, что этот распад с точностью порядка нескольких процентов описывается $V - A$-взаимодействием. Принимая справедливость точной $V - A$-теории для мюона и учитывая радиационные поправки, можно получить константу слабого взаимодействия

$$G = (1{,}4350 \pm 0{,}0011)\cdot 10^{-49}\ \textit{эрг}\cdot\textit{см}^3$$

или

$$Gm_p^2 = 1{,}026\cdot 10^{-5}.$$

Из других проблем, изложенных в этой главе, следует отметить проблемы высших порядков в слабых взаимодействиях, лептонных квантовых чисел и $\mu - e$-универсальности.

Глава 4. «Полулептонные процессы с сохранением гиперзаряда». В четвертой главе подробно рассмотрены процессы, описываемые гамильтонианом взаимодействия

$-\frac{G}{\sqrt{2}} J^0_\lambda \overline{L}_\lambda$, нуклонный β-распад, распад π-мезона, μ-захват, лептонные распады странных частиц, а также нейтринные реакции с $\Delta Y = 0$. В β-распаде нуклона изучается адронный ток J^0_λ, определяемый векторной G^β_V и аксиально-векторной G^β_A константами. Большим успехом теории полулептонных процессов следует считать объяснение полученного в экспериментах соотношения $\left|\frac{G^\beta_A}{G^\beta_V}\right| = 1{,}22 \pm 0{,}02$ на основе $SU_2 \otimes SU_2$-алгебры векторных и аксиально-векторных токов и $PCAC$ (Адлер, Вайсбергер, 1965 г.).

В главе 5, «Полулептонные процессы с изменением гиперзаряда», описаны распады барионов и K-мезонов, а также нейтринные реакции, в которых гиперзаряд изменяется на единицу. Распады барионов и K-мезонов также подтверждают, что ток J^1_λ имеет (V, A)-структуру. Однако вероятности всех полулептонных процессов с $|\Delta Y| = 1$ примерно в 20 раз меньше вероятностей полулептонных распадов с $\Delta Y = 0$. В 1963 г. Кабиббо выдвинул гипотезу, что адронные токи с $\Delta Y = 0$ и $|\Delta Y| = 1$ являются членами одного и того же октетного представления группы SU_3, причем в гамильтониане слабого взаимодействия $J^0_\lambda + J^1_\lambda$ нужно заменить на $\cos\theta J^0_\lambda + \sin\theta J^1_\lambda$. Подходящим выбором θ ($\theta \approx 0{,}2$) можно объяснить не только ослабление в 20 раз вероятностей полулептонных процессов с $|\Delta Y| = 1$, но и различие между константами G^β_V и G: $\frac{G - G^\beta_V}{G} = 0{,}02$, наблюдаемое в экспериментах.

Глава 6. «Адронные процессы». Адронные распады описываются произведением тока J^1_λ с $|\Delta Y| = 1$ и с изотопическим спином $I = \frac{1}{2}$ на ток J^0_λ с $\Delta Y = 0$ и с изотопическим спином $I = 1$. Гипотеза Кабиббо вводит дополнительный коэффициент $\cos\theta \sin\theta$ в эффективный гамильтониан слабых адронных процессов.

Есть два возражения против такой формулировки слабых адронных распадов. Во-первых, предсказываемая вероятность адронных распадов гораздо ниже наблюдаемой. Во-вторых, произведение токов с $I = \frac{1}{2}$ и $I = 1$ описывает адронные распады как с $\Delta I = \frac{1}{2}$, так и с $\Delta I = \frac{3}{2}$, в противоречии с наблюдаемым правилом отбора $\Delta I = \frac{1}{2}$. Последнее правило не является абсолютно строгим, но выполняется с хорошей точностью. Однако весьма ободряющим для современной теории слабых взаимодействий является тот факт, что использование алгебры токов, $SU_3 \otimes SU_3$ и техники «мягких пионов» дает объяснение правилу отбора $\Delta I = \frac{3}{2}$ в распаде $k \to 2\pi$ (динамика распада такова, что переходы с $\Delta I = \frac{3}{2}$ подавлены).

В последней главе, «Промежуточный векторный бозон», излагаются различные гипотезы, вводящие в теорию слабых взаимодействий промежуточные бозоны. Модели промежуточных векторных бозонов весьма полезны при изучении высших порядков слабых взаимодействий, структуры слабых взаимодействий при высоких энергиях и, наконец, в поисках ответа на вопрос, может ли слабое взаимодействие «стать сильным».

В заключение еще раз подчеркнем, что книга представляет собой прекрасный полный обзор (761 стр.) экспериментальных и теоретических достижений физики слабых взаимодействий к середине 1968 г. Она будет полезна как экспериментаторам, так и теоретикам, работающим не только в области слабых, но и сильных и электромагнитных взаимодействий элементарных частиц.

Книга также может быть использована в качестве учебного пособия по физике слабых взаимодействий и физике элементарных частиц.

И. М. Железных