

Теория универсального четырёхфермионного  $S$ , в отличие от теории Ферми в ряде существ. пунктов. Эти отличия, установленные за последующие годы в результате изучения элементарных частиц, сводятся к следующему.

Слабые токи, к-рые у Ферми были векторными, представляют собой сумму векторного тока  $V$  и аксиального тока  $A$ . При преобразованиях Лоренца токи  $V$  и  $A$  ведут себя одинаково, подобно обычным четырёхмерным векторам. Однако при зеркальных отражениях (пространственной инверсии) их поведение различно, т. к. они обладают различной пространственной чётностью  $P$ . В результате слабый ток не обладает определённой чётностью. Это его свойство отражает несохранение чётности в  $S$ . Токи  $V$  и  $A$  отличаются также зарядовой чётностью  $C$ .

Гипотеза о том, что  $S$  в. не сохраняет чётность, была выдвинута Ли Цзундао (Lee Tsung-Dao) и Янг Чженнином (Yang Chen Ning) в 1956 при теоретич. исследовании распадов  $K$ -мезонов; вскоре несохранение  $P$ - и  $C$ -чётностей было обнаружено экспериментально в  $\beta$ -распаде ядер [Ву Цзяньсун (Wu Chien-Shiung) с сотрудниками], в распаде мюона [Р. Гарвин (R. Garwin), Л. Ледерман (L. Lederman), В. Телегди (V. Telegdi), Дж. Фридман (J. Friedman) и др.] и в распадах др. частиц.

Обобщая огромный эксперим. материал, М. Гелл-Ман (M. Gell-Mann), Р. Фейнман (R. Feynman), Р. Маршак (R. Marshak) и Э. Сударшан (E. Sudarshan) в 1957 предложили теорию универсального  $S$  в. — т. н.  $V-A$  теорию. В формулировке, основанной на кварковой структуре адронов, эта теория заключается в том, что полный слабый заряженный ток  $j_{\mu}$  является суммой лептонных и кварковых токов, причём каждый из этих элементарных токов содержит одну и ту же комбинацию дираковских матриц:  $\gamma_{\mu}(1 + \gamma_5)$ .

Как выяснилось впоследствии, заряд. лептонный ток, представленный в теории Ферми одним членом  $e\nu$ , является суммой трёх слагаемых:

$$\bar{\nu}_e e + \bar{\mu} \nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\tau} \tau,$$

причём каждый из известных заряд. лептонов (электрон, мюон и тяжёлый лептон  $\tau$ ) входит в заряд. ток со своим нейтрино.

Заряд. адронный ток, представленный в теории Ферми членом  $q\bar{q}$ , является суммой кварковых токов. К 1992 известно пять типов кварков [ $d, s, b$  с электрич. зарядом (в единицах  $e$ )  $Q = -1/3$  и  $u, c, s$  с  $Q = +2/3$ ], из к-рых построены все известные адроны, и предполагается существование шестого кварка ( $t$  с  $Q = +2/3$ ). Заряженные кварковые токи, так же как и лептонные токи, обычно записывают в виде суммы трёх слагаемых:

$$\bar{u}d' + \bar{c}s' + \bar{t}b'.$$

Однако здесь  $d', s'$  и  $b'$  являются линейными комбинациями операторов  $d, s, b$ , так что кварковый заряженный ток состоит из девяти слагаемых. Каждый из токов ( $\bar{\nu}_e e, \bar{\mu} \nu_{\mu}, \bar{\nu}_{\tau} \tau, \bar{u}d', \bar{c}s'$  и  $\bar{t}b'$ ) является суммой векторного и аксиального токов с коэффициентами, равными единице.

Коэффициенты девяти заряженных кварковых токов обычно представляют в виде матрицы  $3 \times 3$ , к-рая параметризуется тремя углами и фазовым множителем, характеризующим нарушение  $CP$ -инвариантности в слабых распадах. Эта матрица получила назв. матрицы Кобаяши — Маскавы (M. Kobayashi, T. Maskawa).

Лагранжиан  $S$  в. заряженных токов имеет вид:

$$L_{3T} = (G_F/\sqrt{2}) j_{\mu} j_{\mu}^{\dagger},$$

где  $j_{\mu}^{\dagger}$  — ток, сопряжённый  $j_{\mu}(\bar{\nu}_e e \rightarrow \bar{\nu}_e e, \bar{u}d \rightarrow \bar{u}d$  и т. д.). Такое взаимодействие заряженных токов

количественно описывает огромное число слабых процессов: лептонных ( $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_{\mu}, \tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_{\tau}, \nu_e + e^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$  и т. д.), полулептонных ( $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \Lambda \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, K^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_{\mu}$  и т. д.) и нелептонных ( $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0, \Lambda \rightarrow p + \pi^-, D^+ \rightarrow K^+ + \pi^+ + \pi^+$  и т. д.). Многие из этих процессов были открыты после 1957. За этот период были открыты

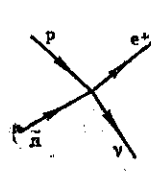


Рис. 5.

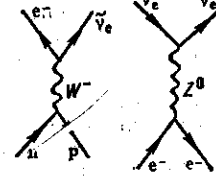


Рис. 6.

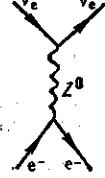


Рис. 7.

также два принципиально новых явления: нарушение  $CP$ -инвариантности и нейтральные токи.

Нарушение  $CP$ -инвариантности было обнаружено в 1964 в эксперименте Дж. Кристенсона (J. Christenson), Дж. Кропина (J. Cronin), В. Фитча (V. Fitch) и Р. Тёрли (R. Turley), к-рые наблюдали распад долгоживущих  $K^0$ -мезонов ( $K_L^0$ ) на два  $\pi$ -мезона. Позднее нарушение  $CP$ -инвариантности наблюдалось также в полулептонных распадах  $K_L^0$ . Для выяснения природы  $CP$ -неинвариантного взаимодействия было бы крайне важным найти к-л.  $CP$ -неинвариантный процесс в распадах или взаимодействиях др. частиц. В частности, большой интерес представляли поиски дипольного момента нейтрона (наличие к-рого означало бы нарушение инвариантности относительно обращения времени, а следовательно, согласно теореме  $CPT$ , и  $CP$ -инвариантности).

Существование нейтральных токов было предсказано единой теорией слабого и эл.-магн. взаимодействий, созданной в 60-х гг. Ш. Глэшоу (Sh. Glashow), С. Вайнбергом (S. Weinberg), А. Саламом (A. Salam) и др. и позднее получившей назв. стандартной теории электро-слабого взаимодействия. Согласно этой теории,  $S$  в. не является контактным взаимодействием токов, а происходит путём обмена промежуточными векторными бозонами ( $W^+, W^-, Z^0$ ) — массивными частицами со спином 1. При этом  $W^{\pm}$ -бозоны осуществляют взаимодействие заряд. токов (рис. 6), а  $Z^0$ -бозоны — нейтральных (рис. 7). В стандартной теории три промежуточных бозона и фотон являются квантами векторных, т. н. калибровочных полей, выступающими при асимптотически больших передачах четырёхмерного импульса ( $q \gg m_W, m_Z$ , где  $m_W, m_Z$  — массы  $W$ - и  $Z$ -бозонов в энергетич. единицах) совершенно равноправно. Нейтральные токи были обнаружены в 1973 во взаимодействии нейтрино и антинейтрино с нуклонами. Позднее были найдены процессы рассеяния мюонного нейтрино на электроны, а также эффекты несохранения чётности во взаимодействии электронов с нуклонами, обусловленные электронным нейтральным током  $\bar{e}e$  (эти эффекты впервые наблюдались в опытах по несохранению чётности при атомных переходах, проведённых в Новосибирске Л. М. Барковым и М. С. Золоторёвым, а также в экспериментах по рассеянию электронов на протонах и дейтронах в США).

Взаимодействие нейтральных токов описывается соответствующим членом в лагранжиане  $S$  в.:

$$L_{NT} = (G_F \rho / 2\sqrt{2}) j_{\mu}^0 j_{\mu}^0,$$

где  $\rho$  — безразмерный параметр. В стандартной теории  $\rho = 1$  (эксперим. значение  $\rho$  совпадает с 1 в пределах одного процента эксперим. точности и точности расчёта радиационных поправок). Полный слабый нейтральный ток содержит вклады всех лептонов и всех кварков: