1973 г. Декабрь *Том 111, вып. 4*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

539.12

ОТКРЫТИЕ НЕЙТРАЛЬНЫХ ТОКОВ

В последние годы нейтральные токи в слабом взаимодействии являются объектом активных экспериментальных поисков. Это связано с тем, что ряд теоретических моделей слабого взаимодействия предсказывает существование таких токов. В частности, это относится к единым теориям слабого и электромагнитного взаимодействий, в которых слабые нейтральные токи служат для того, чтобы сделать такие теории перенормируемыми, подобно обычной квантовой электродинамике.

Напомним, что стандартная схема универсального слабого взаимодействия исходит из того, что все слабые взаимодействия возникают при взаимодействии четырех заряженных токов: двух лептонных ($\bar{e}\nu_e$, $\bar{\mu}\nu_\mu$) и двух адронных, один из которых сохраняет странность, а другой меняет ее на единицу (в модели кварков они имеют вид $\bar{p}n$ и $\bar{p}\lambda$ соответственно). Например, взаимодействие токов $\bar{e}\nu$ и $\bar{\mu}\nu$ дает распад мюона, $\bar{e}\nu$ и $\bar{p}n$ — β-распад ядер, а $\bar{p}\lambda$ и $\bar{p}n$ — нелептонные распады странных частиц. Нейтральные токи, о которых идет речь, имеют вид $\bar{e}e$, $\bar{\mu}\mu$, $\bar{\nu}\nu$, $\bar{e}\mu$ для лептонов и $\bar{p}p$, $\bar{n}n$, $\bar{\lambda}\lambda$, $\bar{n}\lambda$ для адронов. 23 июля 1973 г. в журнал «Physics Letters» было направлено сообщение [1] о том, что в ЦЕРН на пузырьковой камере «Гаргамель», по-видимому, обнаружено взаимодействие тока $\bar{\nu}_\mu\nu_\mu$ с нейтральным адронным током, сохраняющим странность (он представляет собой некоторую суперпозицию токов $\bar{p}p$, $\bar{n}n$ и $\bar{\lambda}\lambda$). Авторы этого сообщения — 55 физиков, представляющие 7 институтов ФРГ, Бельгии, Швейцарии, Франции, Италии и Англии.

Камера «Гаргамель» имеет форму цилиндра длиной 4,8 *м* и диаметром 1,85 *м*, наполненного фреоном (CF_3Br). Большой удельный вес фреона (1,5 *т/м*^{3}) и наличие в нем брома ($Z = 35$) приводит к тому, что в нем как ядерный пробег ($L = 60$ *см*), так и радиационная длина ($x_0 = 11$ *см*) малы по сравнению с размерами камеры. Камера помещена в магнитное поле 20 *кгс* и стоит в нейтринном пучке ЦЕРН. К лету 1973 г. на ней было получено свыше 700 000 фотографий.

Нейтральные токи были обнаружены при анализе 83 000 фотографий, снятых в пучке нейтрино, и 207 000 фотографий, снятых в пучке антинейтрино. В объеме 3 *м*^{3} были обнаружены события двух типов:

1) обычные нейтринные события, обусловленные заряженными токами (CC), в которых ν (или $\bar{\nu}$), сталкиваясь с нуклоном, превращается в мюон и рождает при этом некоторое количество адронов:

$$\nu/\bar{\nu} + N \to \mu^- \mu^+ + \text{адроны} \quad (\text{CC}), \tag{1}$$

2) нейтринные события, обусловленные нейтральными токами (NC).

$$\nu/\bar{\nu} + N \to \nu/\bar{\nu} + \text{адроны} \quad (\text{NC}). \tag{2}$$

Для ν было обнаружено 102 события NC и 428 CC, для $\bar{\nu}$ — 64 NC и 148 CC.

Основываясь на этих данных, авторы приводят для отношения числа событий NC и CC следующие значения:

$$(\text{NC/CC})_\nu = 0{,}21 \pm 0{,}03, \quad (\text{NC/CC})_{\bar{\nu}} = 0{,}45 \pm 0{,}09.$$

Таким образом, сечения процессов, в которых ν и $\bar{\nu}$, возбуждая нуклоны, не дают заряженных лептонов, не намного меньше сечений обычных процессов с заряженными лептонами в конечном состоянии. Основная проблема в доказательстве того, что события без мюонов в конечном состоянии действительно вызваны реакцией NC, заключается в возможном фоне: ведь $\nu/\bar{\nu}$ ни в начальном, ни в конечном состоянии не видны. Главными фоновыми процессами, которые наиболее подробно обсуждаются авторами, являются реакции под действием быстрых нейтронов:

$$n + N \to \text{адроны}. \tag{3}$$

© «Успехи физических наук», 1973.

При этом основным источником энергичных нейтронов являются реакции типа CC в защите, окружающей камеру. Чтобы уменьшить этот фон, отбирались лишь такие события NC и CC, в которых полная энергия, уносимая адронами, была не меньше 1 *Гэв*. При этом, согласно расчетам, выполненным авторами, ни число событий типа NC, ни их равномерное распределение по объему камеры не может быть объяснено реакцией (3). Из-за малой длины пробега нейтронов распределение событий типа (3) должно быть неравномерным (в основном они были бы вблизи стенок камеры), а их ожидаемое число существенно меньше наблюдавшегося числа NC-событий. Авторы рассматривают и другие возможности: проникающие частицы (кроме ν и $\bar{\nu}$), рождаемые непосредственно в мишени, образование пучком нейтрино тяжелых нестабильных лептонов, которые быстро распадаются без испускания мюонов. Против этих возможностей имеются серьезные возражения, но авторы не считают их окончательно исключенными.

В «Гаргамели» на материале 375 000 ν- и 360 000 $\bar{\nu}$-фотографий та же группа (51 автор) обнаружила одно событие, которое интерпретируется ею как реакция [2]

$$\bar{\nu}_\mu + e \to \bar{\nu}_\mu + e. \qquad (4)$$

Такое упругое рассеяние на электроне мюонного антинейтрино (и нейтрино) запрещено согласно теории, в которой есть лишь заряженные токи, но предсказывается теориями, в которых есть нейтральные токи; оно возникает от взаимодействия двух нейтральных токов ($\bar{\nu}_\mu \nu_\mu$) и ($\bar{e}e$). Ожидаемый фон в этом случае оценивается авторами как 0,03 $\pm$ 0,02 события. Разумеется, по одному событию, которое выглядит в камере как одиночный электрон, летящий в направлении $\bar{\nu}$-пучка с энергией 385 $\pm$ 100 *Мэв*, нельзя заключить, что обнаружена реакция (4). Чтобы найти еще несколько событий, необходимо несколько миллионов фотографий.

Открытие нейтральных токов в нейтринных опытах могло бы оказаться блестящим подтверждением единой модели слабого и электромагнитного взаимодействий, предложенной в конце 1967 г. Вайнбергом [3]. Вместе с тем эта модель и различные ее модификации (см. обзор А. И. Вайнштейна и И. Б. Хриплович, который УФН предполагают опубликовать в первом полугодии 1974 г.) предсказывают не только нейтральные токи, но и другие не менее серьезные изменения в сегодняшней картине элементарных частиц. В частности, согласно этим теориям, должны существовать так называемые промежуточные бозоны (заряженные $W^\pm$ и нейтральные Z^0) с массами в несколько десятков *Гэв*. В модели Вайнберга, например $m_{W^\pm} \geqslant 37$ *Гэв*, $M_{Z^0} \geqslant 74$ *Гэв*.

Кроме того, указанные модели содержат дополнительные, не обнаруженные пока на опыте адроны (так называемые суперзаряженные частицы, «очаровательные» частицы, или «цветные» частицы). Существование таких частиц постулируется в рамках этих моделей для того, чтобы объяснить то обстоятельство, что распады типа $K^+ \to \pi^+ e^+ e^-$, $K^+ \to \pi^+ \nu\bar{\nu}$, которые могли бы идти, если бы существовал нейтральный странный ток (типа $\bar{n}\lambda$), подавлены на опыте в сотни тысяч раз (а распад $K_L^0 \to \mu^+\mu^-$ даже в сотни миллионов раз) по сравнению с аналогичными распадами, идущими под действием заряженных токов. В ряде моделей предсказывается также существование тяжелых лептонов, заряженных и нейтральных, с массами порядка и больше 1 *Гэв*.

Нейтральные токи могли бы существовать и вне связи с едиными теориями слабого и электромагнитного взаимодействия, например как динамическое проявление таких сохраняющихся величин, как барионный, лептонный или мюонный заряды.

Если вернуться теперь к результатам, полученным на «Гаргамели», то следует подчеркнуть, что окончательно поверить в то, что открыты нейтральные токи, можно будет лишь после того, как эти результаты будут подтверждены другими авторами.

На Международном симпозиуме по электронным и фотонным взаимодействиям, который состоялся в Бонне 27—31 августа 1973 г., был представлен рапортерский доклад Майета, посвященный нейтральным токам. В этом докладе были приведены дополнительные данные, полученные на ускорителях в Батавии и в Аргонне. В Батавии отношение $(NC/CC)_\nu$ оказалось равным 0,3 $\pm$ 0,1 (эксперимент со счетчиками). В Аргонне в 12-футовой водородной камере было получено, что отношение $(\nu p \to \nu\Delta^+)/(\nu p \to \mu^-\Delta^{++})$ порядка 0,23 $\pm$ 0,17. Эти результаты находятся в качественном согласии с результатами, полученными в ЦЕРН.

Л. Борисов

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. F. J. Hasert et al. (54 соавтора), Phys. Lett. **B46**, 138 (1973).
2. H. Faissner et al. (50 соавторов), ibid., p. 121.
3. S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. **19**, 1264 (1967); A. Salam, Proc. of the 8th Nobel Symposium, Stockholm, 1968, p. 367.