

## Детство и юность нейтринной физики: некоторые воспоминания

Б. М. Понтекорво



Бруно Максимович Понтекорво, академик, начальник отдела Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (Дубна). Научные работы посвящены ядерной физике, физике высоких энергий, физике слабых взаимодействий, физике нейтрино, астрофизике. Лауреат Государственной премии СССР (1954) и Ленинской премии (1963).

### ВВЕДЕНИЕ

То, о чем я хочу рассказать, не есть полное и последовательное описание развития нейтринной физики. Это лишь несколько эпизодов из истории нейтрино. Я буду говорить о событиях, которые оказали глубокое влияние на меня лично. Некоторые из них имели решающее значение, другие были не так существенны, но хорошо мне известны и, может быть, в чем-то любопытны. Одним словом, мой рассказ в высшей степени субъективен. Все эти эпизоды я «видел» собственными глазами, либо глазами физиков, которые были мне близки. Я писал, роясь прежде всего в своей памяти и только потом (и то крайне редко) — в литературе, для проверок и уточнений.

Не думайте, что такая «стратегия» вызвана только моей ленью. Разумеется, доля истины имеется и в таком мнении, ибо латинская поговорка гласит: *excusatio non petita, accusatio manifesta* (извинения излишни, обвинение очевидно). Однако вся правда состоит в следующем: старым ученым (очевидно, я один из них) очень бы хотелось поведать людям о том, что (по их

мнению) они совершили в жизни. Обычно стесняются действовать открыто в соответствии с этим желанием, но стратегия, которую я избрал, дает хорошую возможность его удовлетворить, оставаясь при этом в рамках приличий.

Я прошу прощения у многих физиков, в том числе и у некоторых моих друзей, за то, что не уделил им того внимания, на которое они имели бы право рассчитывать в объективном изложении развития нейтринной физики.

Подчеркиваю, что по ряду причин я не буду касаться событий, которые имели место позже конца 50-х годов.

Начну с простого перечисления событий, прямо связанных с развитием нейтринной физики. Пусть даже сухое, субъективное и неполное, оно даст возможность читателю быстрее войти в атмосферу тех лет, о которых пойдет речь. Нейтринная физика прошла периоды, которым не обязательно соответствует строгая временная последовательность и которые могут быть установлены более или менее произвольно, что и сделано ниже.

### ПЕРВЫЙ ПЕРИОД (1896—1930): ЗАРОЖДЕНИЕ НЕЙТРИННОЙ ФИЗИКИ

Он включает в себя, если говорить об экспериментальных работах:

В основу публикуемой статьи положен доклад, подготовленный для Международного коллоквиума по истории физики элементарных частиц (Париж, июль 1982).— Прим. ред.

открытие радиоактивности (Беккерель, 1896);  
открытие  $\beta$ -лучей (Резерфорд, 1899);  
открытие непрерывности  $\beta$ -спектров (Чедвик, 1914);  
измерение тепловыделения, производимого  $\beta$ -лучами (Эллис и Вустер, 1927).

Если же рассматривать теоретические работы, то сюда должны быть включены:

квантовая теория излучения (Дирак, 1927);  
релятивистское уравнение для частиц со спином  $1/2$  (Дирак, 1928).

Что касается новых экспериментальных методов, то здесь следует вспомнить об изобретении:

счетчиков, способных регистрировать отдельные заряженные частицы (Гейгер, Резерфорд и Мюллер, 1908);  
первой трековой камеры (Вильсон, 1912);  
ядерных фотоэмульсий (Мысовский, 1925).  
Этого периода я не буду касаться.

## ВТОРОЙ ПЕРИОД (1930 — начало 1950-х): ДЕТСТВО НЕЙТРИННОЙ ФИЗИКИ

Среди теоретических достижений он включает:

изобретение нейтрино (Паули, 1930);  
теорию атомного ядра, составленного из протонов и нейтронов (Иваненко; Гейзенберг; Майорана, 1932);  
теорию  $\beta$ -распада (Ферми; Перрен, 1933);  
мезонную теорию ядерных сил (Юкава, 1935);  
первое обсуждение двойного  $\beta$ -распада (Гепперт-Майер, 1935);  
новые правила отбора в  $\beta$ -распаде (Гамов и Теллер, 1936);  
«истинно нейтральное» нейтрино (Майорана, 1937);  
первое рассмотрение безнейтринного двойного  $\beta$ -распада (Фарри, 1939);  
рассмотрение вопроса об испускании нейтрино при термоядерных реакциях на Солнце и других звездах (Бете, 1939);  
исследование «урка-процесса» — первое обсуждение роли нейтрино в эволюции звезд (Гамов и Шенберг, 1941);  
теорию «Большого Взрыва» (Гамов, 1946);  
введение лептонного заряда (Маркс; Зельдович; Конопинский и Махмуд, 1953).

Что касается экспериментов, то ко второму периоду следует отнести:

открытие позитрона (Андерсон, 1932);  
открытие нейтрона (Чедвик, 1932);  
открытие искусственной радиоактивности (супруги Жолио-Кюри, 1934);  
открытие испускания позитронов при  $\beta$ -распаде (супруги Жолио-Кюри, 1934);  
первые эксперименты по поиску отдачи ядер при  $\beta$ -распаде (Лейпунский, 1935);  
наблюдение захвата ядром орбитального электрона (Альварес, 1937);

открытие мюона (Андерсон и Неддермейер, 1938);  
обнаружение радиоактивности нейтрона (Снелл; Робсон, 1948);  
первое определение верхнего предела массы (анти)нейтрино из данных по  $\beta$ -распаду  ${}^3\text{H}$  (Курран и др.; Ханна и Понтекорво, 1949);  
обнаружение отсутствия взаимодействия антинейтрино с ядром  ${}^{37}\text{Cl}$  в реакции  $\bar{\nu} + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e^{-} + {}^{37}\text{Ar}$  (Дэвис, 1956);

наконец, последнее по списку, но не по важности —

регистрация свободных антинейтрино из ядерного реактора с помощью обратного  $\beta$ -процесса (Райнес и Коуэн, 1956).

Среди новых экспериментальных методов следует назвать изобретение:

диффузионной камеры (Лангсдорф, 1939);  
ядерного реактора (Ферми, 1942);  
принципа автофазировки в ускорителях высоких энергий (Векслер, Макмиллан, 1944);  
радиохимических методов детектирования нейтрино, включая хлор-аргоновый метод (Понтекорво, 1946);  
сцинтилляционных счетчиков (Кальман, 1947);  
черенковских счетчиков (Джелли, 1950);  
пузырьковой камеры (Глэзер, 1952).

Некоторые эпизоды этого периода занимают центральное место в моем рассказе.

## ТРЕТИЙ ПЕРИОД (1941—1959): ЮНОСТЬ НЕЙТРИННОЙ ФИЗИКИ

Он простирается от наблюдений и исследований нейтринных процессов иных, нежели  $\beta$ -распад, и от возникновения предположения о слабых взаимодействиях до открытия CP-нарушения, теории (V—A)-взаимодействий и рождения физики нейтрино высоких энергий. Невозможно упомянуть здесь все важнейшие работы, и мы рассмотрим только те, которые непосредственно связаны с пониманием свойств нейтрино.

Третий период включает множество экспериментов с космическими лучами: прямое доказательство распада мюона и измерение его среднего времени жизни (Разетти, 1941);  
открытие того факта, что мюон не является адроном (Конверси, Панчини, Пиччиони, 1947);  
открытие пиона и  $\pi \rightarrow \mu$ -распада (Латтес, Оккиалини и Пауэлл, 1947);  
обнаружение, что распада  $\mu \rightarrow e + \gamma$  не существует (Хинкс и Понтекорво; Сард и Альтхаус; Пиччиони, 1948);  
наблюдение испускания трех частиц при распаде мюона, одна из которых, заряженная, является электроном (Хинкс и

Понтекорво; Штейнбергер; Андерсон и др.; Жданов, 1949).

В этот же период стали получать важные экспериментальные результаты на ускорителях. К ним относятся:

наблюдение искусственных пионов на фазотроне в Беркли (Гарднер и Латтес, 1948);

наблюдение  $\tau$  и  $\Theta$  типов распада каона (Уайтхед и др.; Баркас и др.; Далитц и др.; Фитч и др.; 1956);

открытие  $P$  и  $S$  нарушения при распаде  $^{60}\text{Co}$  (Ву и др., 1957) и при распаде пиона и мюона (Гарвин и др., 1957);

измерение угловой корреляции между электроном и нейтрино в  $\beta$ -распаде  $^{35}\text{Ag}$  и  $^6\text{He}$ , наконец согласующейся с предсказаниями теории  $(V-A)$ -взаимодействия (Хермансфельт и др., 1957);

наблюдение процесса  $\pi \rightarrow e^+ \nu$  с вероятностью, также согласующейся с предсказаниями теории  $(V-A)$ -взаимодействия (Фаццини и др.; Шварц, Штейнбергер и др., 1958);

обнаружение левой спиральности нейтрино (Гольдхабер, 1958).

Среди новых экспериментальных методов третий период включает введение принципа «селективного импульсного питания» (Конверси и Гозини; Тяпкин, 1955), на котором основана работа таких трековых детекторов, как искровые камеры (Фукуни, Миямото, 1959); стримерные камеры (Чиковани; Долгошин, 1964), а также предложение, открывшее новое направление в физике слабых взаимодействий:

использование пучков нейтрино высоких энергий, образующихся в результате  $\pi \rightarrow \mu$  и других распадов (Понтекорво; Марков; Шварц, 1959).

Что касается теории, то в рассматриваемый период произошли такие события, как: формирование самого понятия слабых процессов и представления о глубокой аналогии между электроном и мюоном (Понтекорво, 1947; Клейн; Пуппи, 1948); предсказание «генетической» связи пиона и мюона (Маршак и Бете, 1947); введение параметра  $\rho$  для описания распада мюона (Мишель, 1950); обсуждение возможного нарушения четности в слабых взаимодействиях (Ли и Янг, 1956); гипотеза  $CP$ -инвариантности слабых взаимодействий (Ландау; Ли и Янг, 1957); представление о продольном нейтрино (Ландау; Ли и Янг; Салам; Сакураи, 1957); создание теории универсального слабого  $(V-A)$ -взаимодействия (Маршак и Сударшан; Гелл-Манн и Фейнман, 1958); гипотеза нейтринных осцилляций (Понтекорво, 1957); предположение, что  $^8\text{B}$  является источником солнечных нейтрино сравнительно высокой энергии (Фаулер, 1958);

«киевская симметрия», или «докварковая» лептон-адронная симметрия (Гамба и др., 1959);

испускание нейтрино горячими звездами за счет фермиевского взаимодействия (Понтекорво, 1959).

Заметим, что в этот период среднее число  $N$  авторов в типичных экспериментальных исследованиях все еще меньше 5. В следующем, четвертом периоде, который можно назвать зрелостью нейтринной физики,  $N > 10$ ! Целый ряд эпизодов третьего периода также занимает в моем рассказе центральное место.

#### ЧЕТВЕРТЫЙ ПЕРИОД (1960—...): ЗРЕЛОСТЬ НЕЙТРИННОЙ ФИЗИКИ

Он простирается от открытия двух типов нейтрино до открытия нейтральных токов,  $\tau$ -лептонов, слабых распадов очарованных частиц, до теории электрослабого взаимодействия и... Теории Великого Объединения.

Я не буду касаться этого периода, поскольку он начался в 60-е годы. Заметим, что «период зрелости» отличается от рассматриваемых ранее периодов дополнительным обстоятельством: полученный результат или планируемый эксперимент и т. п. связаны теперь, как правило, больше с названием установки (например, ЦЕРН-Гаргамель, Фермилаб-HPWF, Серпухов-СКАТ), нежели с именами авторов.

Сравнение разных периодов демонстрирует поразительно быстрый рост нейтринной физики, которая вместе со своими обширными ответвлениями в область астрофизики и космологии стала сегодня, безусловно, количественной наукой, здоровой и сильной, и тем не менее оставляющей еще довольно много места для качественных сюрпризов.

#### ПАУЛИ: ОДИН ИЗ ГИГАНТОВ

Трудно найти ситуацию, где бы слово «интуиция» так соответствовало характеру научного достижения, как в случае предсказания нейтрино Вольфгангом Паули.

**Во-первых**, 50 лет назад были известны только две «элементарные» частицы — электрон и протон, и даже идея, что для лучшего понимания природы необходимо ввести новую частицу, была сама по себе революционной. Как это отличается от положения в наши дни, когда по малейшему поводу масса людей готова изобрести любое количество частиц!

**Во-вторых**, предлагавшаяся частица, нейтрино, должна была обладать совер-



В. Паули (1900—1958).

шенно экзотическими свойствами, в особенности — огромной проникающей способностью. Правда, Паули вначале полностью не осознавал этого неизбежного следствия своей идеи и скромно допускал, что нейтрино может иметь проникающую способность, примерно равную или в десять раз большую, чем  $\gamma$ -лучи. Между прочим, довод (основанный на соображениях размерности и термодинамики) в пользу того, что нейтрино с энергией порядка 1 МэВ или длиной волны  $\lambda \sim 10^{-11}$  см должно иметь астрономически большую величину среднего свободного пробега (равную, скажем, толщине слоя воды, в миллиард раз превышающей расстояние от Земли до Солнца) был впервые высказан Г. Бете и Р. Пайерлсом<sup>1</sup>. Они рассматривали два обратных друг другу процесса (я использую современные обозначения):  $Z \rightarrow (Z+1) + e^- + \bar{\nu}_e$  (это  $\beta$ -процесс, происходящий с характерным временем  $T$ ) и обратную реакцию  $\bar{\nu}_e + (Z+1) \rightarrow Z + e^+$ , характеризующуюся при соответствующей энергии нейтрино сечением:

$$\sigma < \lambda^2 \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{\lambda}{c}.$$

Этот довод, который сегодня кажется очевидным (почти все хорошие доводы таковы а posteriori), произвел на меня глубокое впечатление. Я не забыл его и много лет спустя, когда предложил, как провести эксперименты со свободными нейтрино с помощью реакторов<sup>2</sup>.

**В-третьих**, сначала казалось, что из-за своей фантастической проникающей способности нейтрино не может быть обнаружено в свободном состоянии. О его существовании приходилось судить лишь на основании законов сохранения энергии и импульса, измеряя отдачу ядер при  $\beta$ -распаде с помощью метода, который сейчас постоянно используется при поисках нейтральных частиц (так называемый метод «недостающей массы»). Эксперименты такого рода были предложены Паули, и первый из них был выполнен в Кембридже Лейпунским<sup>3</sup>. Здесь я хотел бы подчеркнуть, что 50 лет назад был известен только один процесс с участием нейтрино —  $\beta$ -распад тяжелых ядер, в результате которого в конечном состоянии появляются 3 частицы. Чрезвычайно важные эксперименты Эллиса и др. показали, что средняя энергия  $\beta$ -лучей (измеренная с помощью калориметра) равна средней энергии  $\beta$ -спектра, измеренного магнитным спектрометром. Это важное указание (вместе с фактом существования максимальной энергии  $\beta$ -лучей, разумеется) Паули не оставил без внимания. Все остальные процессы, в которых, как мы теперь знаем, принимают участие нейтрино, в то время не были известны. Среди них есть несколько двухчастичных распадов заряженных частиц, останавливающихся в трековой камере ( $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ;  $\mu^- + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + \bar{\nu}_\mu \dots$ ). Такие распады оставляют в камере замечательные автографы, поскольку испущенная при распаде частица имеет всегда один и тот же импульс, конечно равный импульсу невидимого нейтрино.

Сегодня примеры таких процессов хорошо известны. Если бы они были открыты во времена, предшествовавшие гипотезе Паули, для «изобретения» нейтрино не потребовался бы его гений. Однако, я хотел бы здесь напомнить, что в то время Бор допускал, что непрерывный  $\beta$ -спектр может возникнуть из-за несохра-

<sup>1</sup> Bethe H., Peierls R.— Nature, 1934, v. 133, p. 689. Хочу отметить, что я не буду цитировать работ, опубликованных в 60-е годы и позже, за исключением тех, которые касаются истории физики.

<sup>2</sup> Pontecorvo B.— Nat. Res. Council Canada, 1946, Rep. PD 205; Idem.— Helv. Phys. Acta, Suppl., 1950, v. 3, p. 97.

<sup>3</sup> Leipunsky A.— Proc. Camb. Phil. Soc., 1936, v. 32, p. 301.

нения энергии в индивидуальных процессах, так что, если рассуждать строго, для решения дилеммы: нейтрино или несохранение энергии — нельзя, вообще говоря, пользоваться законами сохранения.

Еще несколько слов по поводу истории изобретения Паули, о которой он написал сам через несколько десятков лет после того, как выдвинул свою знаменитую гипотезу. (Кстати сказать, она никогда не была опубликована в научной периодике.) Может быть, не все знают, что впервые идея о существовании нейтрино была высказана в письме Паули<sup>4</sup> группе специалистов по радиоактивности, которые должны были собраться на встречу в Тюбингене. Письмо начиналось такими словами: «Дорогие радиоактивные леди и джентельмены...» На этой встрече Паули не присутствовал, поскольку он ожидал гораздо большего от бала, на котором он хотел быть в Цюрихе вечером 6 декабря 1930 г. Но в этом письме были не только шутки.

В нем содержались две идеи, которые мог иметь только человек с гениальной интуицией. Эти идеи я сформулирую, пользуясь как современной терминологией, так и терминологией самого Паули.

1. В ядре должны существовать электрически нейтральные частицы, нейтроны (Паули тоже называл их нейтронами), имеющие спин  $1/2$ .

2. При  $\beta$ -распаде вместе с электроном должна испускаться нейтральная частица, нейтрино (Паули и ее называет нейтроном), так что полная энергия электрона, нейтрино и ядра отдачи имеет определенное значение, как это и должно быть в соответствии с законами сохранения.

Таким образом Паули «изобрел» одновременно две частицы, и обе они были очень нужны (имеется в виду, помимо прочего<sup>5</sup>, так называемая азотная катастрофа, т. е. полученное в классических спектро-

скопических работах Разетти доказательство того, что ядра  $^{14}\text{N}$  подчиняются статистике Бозе, так что вряд ли могут состоять только из протонов и электронов). Некоторое время Паули думал, что он изобрел только одну частицу, а не две, поскольку ошибочно считал их идентичными. Однако уже вскоре он изменил свою точку зрения, а именно, в своей первой официальной публикации<sup>6</sup> о нейтрино (так назвал эту частицу Ферми) на Сольвеевском конгрессе 1933 г.

Следующий колоссальный шаг был сделан Ферми.

## ФЕРМИ: ЕЩЕ ОДИН ГИГАНТ

Ферми познакомился с гипотезой Паули в Риме на Международной конференции по ядерной физике (1931), на которой обсуждалась проблема  $\beta$ -распада. Как раз здесь Бор выступал в пользу несохранения энергии. Частица, предложенная Паули, произвела очень большое впечатление на Ферми; он вскоре начал называть ее «нейтрино». Очевидно Ферми уже глубоко размышлял над проблемой нейтрино во время Сольвеевского конгресса 1933 г.; его знаменитая статья «Предварительная теория  $\beta$ -распада»<sup>7</sup> появилась всего лишь через два месяца после окончания этого конгресса. Это — количественная теория, которая имела огромное влияние на развитие физики. Несомненно, идея о существовании нейтрино оставалась бы без этого вклада Ферми лишь смутным представлением. Поразительно, но эта теория со сравнительно небольшими, хотя и крайне важными и многочисленными добавлениями, просуществовала почти без изменений вплоть до объединенной теории электрослабых взаимодействий Глэшоу — Вайнберга — Салама. Я совершенно уверен, что, будь Ферми жив, большинство из этих дополнений он сделал бы сам под давлением новых экспериментальных фактов; о некоторых из них я буду говорить дальше.

Теперь я хотел бы рассказать о нескольких курьезах, связанных с появлением этой теории, свидетелем которых был я сам, поскольку в то время работал в Риме.

1. Журнал «Nature» отклонил статью Ферми, так как она выглядела слишком

<sup>4</sup> Паули В. Письмо от 4 декабря 1930 г. физикам, собравшимся на встречу в Тюбингене. Среди них были Г. Гейгер и Л. Мейтнер. Письмо было сохранено Л. Мейтнер, и его содержание обсуждалось с 1930 г. Прочсть письмо можно, например, в статье: Brown L.—Phys. Today, 1978, Sept., p. 23.

<sup>5</sup> Детали теоретических представлений (Резерфорд, Паули и особенно Майорана) о нейтроне до его экспериментального открытия Чедвиком крайне интересны, но я не имею возможности обсуждать их здесь. Я упомяну только, что Майорана, после того как он прочел знаменитую статью супругов Жолио-Кюри о выбивании протонов из вещества излучением полоний-бериллиевого источника, заметил, что это явное доказательство в пользу «нейтрального протона» (т. е. нейтрона).

<sup>6</sup> Pauli W. Septième Conseil de Physique Solvay, 1933. P., 1934, p. 324.

<sup>7</sup> Fermi E.—Ricerca Scientifica 2, 1933, № 12; Idem.—Z. Phys., 1934, B. 88, S. 161.



Э. Ферми (1901—1954).

абстрактной, для того чтобы заинтересовать читателей. Я уверен, что редактор всю свою жизнь раскаивался в этом.

2. Второй курьез связан с трудностями, с которыми столкнулся Ферми при создании самой теории. Это были трудности не математического, а физического характера. Необходимую математику, вторичное квантование, он усвоил быстро. Но самым сложным для него было осознание того факта, что при превращении нейтрона в протон происходит именно рождение электрона и нейтрино. Конечно, сегодня это знает каждый студент: частицы рождаются и уничтожаются. Взаимодействие между элементарными частицами объясняется обменом другими элементарными частицами. Это — квантовая теория поля, которая является неизбежным следствием квантовой теории и теории относительности. Все это и вызывало затруднения у Ферми. Паули, несмотря на свою пионерскую работу по квантовой электродинамике, не сформулировал четко такую точку зрения в случае  $\beta$ -распада. Читая знаменитую статью Ферми по  $\beta$ -распаду, видишь, как он использовал аналогию с дираковской квантовой теорией излучения (ведь фотоны тоже рождаются и уничтожаются)

и как по аналогии выбрал V-вариант  $\beta$ -распада.

Я все еще помню его слова: когда возбужденный атом натрия испускает линию 5890 Å, фотон не сидит в атоме — он рождается; точно так же, когда нейтрон переходит в протон, рождаются электрон и нейтрино. К такому же выводу о рождении электронов в  $\beta$ -распаде пришел ранее Д. Д. Иваненко<sup>8</sup> в работе, в которой впервые было недвусмысленно сделано утверждение, что нейтрон — элементарная частица, а не связанная система «протон — электрон».

Здесь я должен сказать, что примерно в то же время и независимо от Ферми аналогичные концептуальные трудности преодолел и Перрен<sup>9</sup>. По поводу массы нейтрино он также пришел к выводам, аналогичным выводам Ферми. Они выглядят очень современно, в том смысле, что оба — и Перрен и Ферми — поставили вопрос о массе нейтрино (первостепенный вопрос и сегодня) в абсолютно недогматичной форме и указали, что масса нейтрино (если она конечна) может быть определена путем измерения спектра  $\beta$ -распада вблизи его конца. Для наиболее благоприятного случая ( $\beta$ -распад ядра трития) начало таким экспериментам было положено в 40-е годы<sup>10,11</sup>. Результаты измерений подобного рода ныне, в 80-е годы, с большим волнением ожидает все мировое сообщество физиков после в высшей степени интересной статьи В. А. Любимова, Е. Ф. Третьякова и др., которые утверждают, что они получили конечную величину массы нейтрино. Но вернемся к теории  $\beta$ -распада.

В отличие от электромагнитного взаимодействия (посредством обмена фотоном), Ферми предположил, что происходит контактное взаимодействие двух токов — тока тяжелых частиц (п, р) и тока легких частиц (е,  $\nu$ ):

$$k(\bar{\Psi}_p \gamma_\mu \Psi_n)(\bar{\Psi}_e \gamma_\mu \Psi_\nu) \rightarrow \sum_p \frac{e \cdot \vec{v}}{p}$$

где  $k$  — константа порядка  $10^{-49}$  эрг · см<sup>3</sup> (сегодня мы все знаем, что  $k = G/\sqrt{2}$ , где  $G = 10^{-5}/M_p^2$  называется постоянной Ферми),  $\hbar = c = 1$ ,  $\bar{\Psi}_p$ ,  $\Psi_n$  — операторы рождения протона и уничтожения нейтрона и т. д. Ферми предположил, что слабые токи, как

<sup>8</sup> Iwanenko D.— C. R. Acad. Sci. Paris, 1932, v. 195, p. 439.

<sup>9</sup> Perrin F.— C. R. Acad. Sci. Paris, 1933, v. 197, p. 1625.

<sup>10</sup> Hanna G., Pontecorvo B.— Phys. Rev., 1949, v. 75, p. 983.

<sup>11</sup> Curran S. et al.— Phil. Mag., 1949, v. 40, p. 53.

мы их теперь называем, являются 4-векторами, как в электродинамике. Вначале Ферми полагал, что нуклонный слабый ток  $\overline{\Psi}_p \gamma_\mu \Psi_n$  аналогичен электромагнитному току  $\overline{\Psi}_p \gamma_\mu \Psi_p$ , а лептонный слабый ток  $\overline{\Psi}_e \gamma_\mu \Psi_\nu$  — электромагнитному полю. Однако в его формулировке токи «тяжелых частиц» (как их называл Ферми) и «легких частиц» фактически идентичны.

Таким образом, Ферми возвел свое столь совершенное строение лишь на основе нескольких экспериментальных результатов по  $\beta$ -распаду тяжелых ядер, в частности RaE, и аналогии с дираковской теорией излучения.

Я хотел бы подчеркнуть здесь, что наши знания с тех пор возросли в огромной степени; однако все (или почти все) новые факты удивительным образом укладываются в картину, нарисованную Ферми.

### МАЙОРАНА

В 1937 г. Майорана поставил наиболее важную проблему в нейтринной физике и вообще в физике элементарных частиц: проблему об истинной нейтральности электрически нейтральных фермионов. Речь идет о майорановском нейтрино (и нейтроне!).

Я чувствую, что тут уместны несколько вводных слов о третьем гиганте — Этторе Майоране, личность которого может вызывать огромный интерес не только у физиков, но и у писателей.

Когда в 1931 г. студентом третьего курса я пришел в физический институт Королевского университета в Риме, Майорана, которому в то время было 25 лет, был уже хорошо известен узкому кругу итальянских физиков и зарубежных ученых, которые работали некоторое время в Риме под руководством Ферми. Слава его была, прежде всего, отражением глубокого уважения и восхищения со стороны Ферми. Я точно помню слова Ферми: «Если физический вопрос поставлен, никто в мире не способен ответить на него лучше и быстрее, чем Майорана». Согласно шуточному лексикону, использовавшемуся в римской лаборатории, физики, разыгрывая из себя членов религиозного ордена, дали непогрешимому Ферми прозвище Папы, а устрашающему Майоране — Великого Инквизитора. На семинарах он обычно молчал, но время от времени — и всегда к месту — вставлял саркастические и парадоксальные замечания. Майорана был постоянно недоволен собой (и не только собой!). Он был пессимистом, но с очень острым чувством



Э. Майорана (1906—1938).

юмора. Трудно представить себе людей со столь различными характерами, как Ферми и Майорана. В то время как Ферми был очень простым человеком (с небольшой оговоркой: он был гением!) и считал обычный здравый смысл весьма ценным человеческим качеством (которым он, безусловно, был наделен в высшей степени), Майорана руководствовался в жизни очень сложными и абсолютно нетривиальными правилами. Начиная с 1934 г. он все реже и реже стал встречаться с другими физиками и посещать лабораторию. В 1938 г. он исчез в буквальном смысле этого слова. Вероятно, он покончил с собой, но абсолютной уверенности в этом нет. Он был довольно богат, и я не могу отделаться от мысли, что его жизнь могла бы не окончиться так трагически, если бы ему пришлось зарабатывать себе на жизнь. Таким образом, научная деятельность Майораны продолжалась менее десяти лет (1928—1937). По этой причине, а также потому, что он не любил публиковать результаты своих исследований, вклад Майораны в науку гораздо меньше, чем он мог бы быть. Например, публикации знаменитой статьи, относящейся к нейтринной физике способствовал просто счастливый случай. В 1937 г. Майорана решил при-

нять участие в конкурсе на университетскую кафедру. Статью, о которой идет речь<sup>12</sup>, он написал просто для того, чтобы повысить свои шансы на получение этой кафедры! Не будь этого случая, она, возможно, никогда бы и не появилась в печати.

Между прочим, Майорана был близким другом Э. Амальди, которому мы обязаны публикацией сборника статей Майораны, чрезвычайно интересной книги<sup>13</sup> о его жизни и работе. Теперь я вернусь к физике.

В конце 50-х и в 60-е годы часто высказывалось мнение, что нейтрино à la Майорана — объект, хотя и красивый и интересный, но в природе не реализующийся. С таким мнением сегодня согласиться, безусловно, нельзя. Наоборот, вопрос, поставленный Майораной, становится все более и более важным, и теперь это, по сути, центральная проблема нейтринной физики.

Статья 1937 г. в «Nuovo Cimento» — последняя оригинальная работа, написанная Майораной. Я хочу рассмотреть только главные физические и качественные аспекты этой статьи, которая опередила свое время примерно на сорок лет, и не буду касаться очень важных формальных ее аспектов. Может быть, самое лучшее — это перевести на русский язык аннотацию, введение и несколько основных фраз из статьи, которая, насколько мне известно, была напечатана только по-итальянски.

#### СИММЕТРИЧНАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОНА И ПОЗИТРОНА

Аннотация. Показана возможность представления квантовой теории электрона и позитрона в полностью симметричной форме с помощью нового процесса квантования. Это изменяет смысл уравнения Дирака таким образом, что нет больше причин ни говорить о состояниях с отрицательной энергией, ни предполагать при описании новых частиц (в особенности нейтральных) существование «античастиц», соответствующих «дыркам» с отрицательной энергией.

Интерпретация так называемых состояний с отрицательной энергией, предложенная Дираком (Dirac P. A.— Proc. Camb. Phil. Soc. 1924, v. 30, p. 150. См. также Heisenberg W.— Z. Physik, 1934, В. 90, S. 209), как хорошо известно, приводит к описанию электронов и позитронов, которых по существу симметрично. Такая симметрия целиком обусловлена тем обстоятельством, что указанная теория дает результаты, действительно симметричные до тех пор,

пока можно избежать трудностей, связанных со сходимостью. Однако искусственные методы, которые были предложены для того, чтобы придать теории симметричную форму, соответствующую ее содержанию, не совсем удовлетворительны, либо потому что исходная формулировка всегда несимметрична, либо потому что симметризация вводится позднее, причем методами, которых следовало бы избегать (такими как сокращение бесконечных констант). Поэтому мы попытались пойти новым путем, который более прямо приводит к требуемой цели.

Когда речь идет об электронах и позитронах, мы должны ожидать лишь формального упрощения теории; однако, по нашему мнению, важно (с точки зрения распространения теории на другие случаи), что исчезает само понятие состояний с отрицательной энергией. На самом деле мы увидим, что вполне возможно совершенно естественным образом построить теорию нейтральных частиц без отрицательных состояний.

Из первого параграфа я хотел бы процитировать следующие слова:

«...он (т. е. вновь предлагаемый метод квантования.— Б. П.) особенно важен для фермиевских полей, в то время как соображения простоты в случае электромагнитного поля позволяют ничего не добавлять к старым методам. В данном случае мы не будем заниматься систематическим изучением логических возможностей, открывающихся с нашей новой точки зрения, а ограничимся описанием процесса квантования, который, насколько можно судить, важен для реальных приложений. Этот метод, по-видимому, является обобщением метода Йордана — Вигнера (Jordan P., Wigner E.— Z. Physik, 1928, В. 47, S. 631) и дает возможность не только придать симметричную форму электрон-позитронной теории, но и построить совершенно новую теорию для частиц без электрического заряда (нейтронов и гипотетических нейтрино). Хотя, по-видимому, сегодня еще нельзя экспериментально сделать выбор между новой теорией и той, в которой уравнения Дирака просто распространяются на нейтральные частицы, нужно иметь в виду, что новая теория вводит в эту неизученную область меньшее количество гипотетических объектов...»

Из второго параграфа:

«...преимущество этого метода (т. е. теории Майораны.— Б. П.) по сравнению с традиционной интерпретацией дираковских уравнений, как мы лучше увидим ниже, в том, что больше нет никаких причин предполагать существование антинейтронов или антинейтрино. Последние, действительно, используются в теории  $\beta$ -распада с испусканием позитронов (см.: Wick G. C.— Rend. Accad. Lincei, 1935, v. 21, p. 170), однако такая теория, очевидно, может быть модифицирована таким образом, что испускание позитрона, так же как и электрона, будет всегда сопровождаться испусканием нейтрино...»

Специально для молодого читателя, который с самого начала своей деятельно-

<sup>12</sup> Majorana E.— Nuovo Cimento, 1937, v. 14, p. 171.

<sup>13</sup> Amaldi E. La vita e l'opera di Ettore Majorana. Roma, 1966.



сти привык слышать не только об электрических, но также и о других типах «зарядов» (барионном, лептонном и т. д.), я хотел бы подчеркнуть, что в 1937 г. было известно понятие только электрического заряда. Именно Майорана первым явно ввел представление об истинно нейтральных фермионах, или частицах Майораны, т. е. фермионах, которые идентичны своим собственным античастицам. Частицы Майораны были названы им «двухкомпонентными» (одна частица с двумя ориентациями спина), в то время как частицы Дирака являются четырехкомпонентными (частица и античастица, каждая с двумя ориентациями спина). Майорана рассматривал «материальные» частицы (с конечной массой покоя). Кроме того, поставив вопрос об электрически нейтральных фермионах, описываемых либо его теорией, либо теорией Дирака, Майорана в неявном виде ввел представление о зарядах, отличных от электрического. Майорановские частицы — это фермионы, которые не имеют ни электрического, ни какого-либо другого заряда. Электрически нейтральные фермионы, которые не являются частицами Майораны, описываются теорией Дирака. Они — не истинно нейтральны и обладают каким-то (не электрическим) зарядом. Заметим, что в явном виде понятие барионного<sup>14</sup> и лептонного<sup>15</sup> зарядов были введены только в 1949 и в 1953 гг.!

Из одной фразы Майораны, которую я цитировал выше, видно, что он определенно имел в виду следующий вопрос: может ли быть установлена с помощью современных (1937!) экспериментов природа фермионов — майорановские они или дираковские? Касаясь этого вопроса, я буду рассматривать прежде всего нейтрино, оставляя в стороне два очень важных обстоятельства, которые Майорана тогда не мог учитывать:

а) продольную поляризацию нейтрино<sup>16</sup>, связанную с несохранением четности (1957),

б) возможность небольшого наруше-

ния закона сохранения (лептонного) заряда и связанную с этим возможность существования нестационарных нейтринных состояний — так называемое явление осцилляций нейтрино<sup>17</sup> (1958). (В современной терминологии: собственные состояния гамильтониана слабых взаимодействий не обязательно должны быть собственными состояниями оператора массы.)

Как можно судить по одной из приведенных выше цитат, Майорана, по-видимому, думал об экспериментах, которые, в принципе, могут ответить на следующий вопрос: способны ли нейтральные лептоны, испускаемые, скажем, вместе с отрицательными  $\beta$ -лучами, поглотиться ядром с испусканием снова отрицательных электронов? Я думаю, что он не упоминал явно о такой возможности потому, что в то время детектирование нейтрино — к сожалению, и ошибочно — не считалось ни серьезным предложением, ни даже приличным предметом для обсуждения (поскольку ожидаемое сечение до смешного мало!).

Я лично сталкивался с дилеммой нейтрино Майораны или нейтрино Дирака не однажды, и каждый раз это было долго. Впервые — когда я предложил и разработал хлор-аргоновый метод детектирования нейтрино<sup>18</sup>, в другой раз — когда рассматривал возможность нейтринных осцилляций<sup>19</sup> (об этих эпизодах я буду говорить ниже, в других разделах), и снова в 60-х, 70-х и 80-х годах в связи с теорией осцилляций и двойного  $\beta$ -распада.

Рака почти немедленно реагировал<sup>20</sup> на статью Майораны и был первым, кто ясно изложил упомянутую выше идею о различном поведении дираковских и майорановских нейтрино при обратном  $\beta$ -распаде.

Поскольку ко времени появления статьи Рака урановые реакторы и методы детектирования нейтрино еще не существовали, она не оказала непосредственного влияния на развитие экспериментов со свободными нейтрино. Однако следует упомянуть, что теоретическая интерпретация «негативного» результата в успешном хлор-аргоновом эксперименте Дэвиса на реакторе<sup>21</sup> основывалась на идее, впервые высказанной Рака. На первый взгляд, резуль-

<sup>14</sup> Wigner E.— Proc. Am. Phil. Soc., 1949, v. 93, p. 521. См. также: Stueckelberg E.— Helv. Phys. Acta., 1939, v. 11, p. 225; Weyl H.— Z. Phys., 1929, B. 56, S. 330.

<sup>15</sup> Marx G.— Acta Phys. Hung., 1953, v. 3, p. 56; Зельдович Я. Б.— Доклады АН СССР, 1952, т. 86, с. 505; Konopinsky E., Mahmoud H.— Phys. Rev., 1953, v. 92, p. 1045.

<sup>16</sup> Landau L.— Nucl. Phys., 1957, v. 3, p. 127; Lee T., Yang C.— Phys. Rev., 1957, v. 105, p. 1671; Salam A.— Nuovo Cimento, 1957, v. 5, p. 299.

<sup>17</sup> Понтекорво Б. М.— ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 549; Он же.— ЖЭТФ, 1958, т. 34, с. 247.

<sup>18</sup> См. сноску 2.

<sup>19</sup> См. сноску 17.

<sup>20</sup> Rasetti G.— Nuovo Cimento, 1937, v. 14, p. 322.

<sup>21</sup> Davis R.— Phys. Rev., 1955, v. 97, p. 766.

тат Дэвиса, что антинейтрино из реактора не могут поглощаться с испусканием отрицательных электронов, может интерпретироваться (и это было именно так) как демонстрация дираковской природы нейтрино, если хотите, как демонстрация существования некоего (не электрического) заряда нейтрино. Однако, как это известно теперь, такая интерпретация преждевременна из-за важных обстоятельств а) и б), которые упомянуты выше. Об этом будет сказано несколько слов в заключение данного параграфа.

Вернемся к идее Майораны. В 1938 г. появилась статья Фарри<sup>22</sup>, которая представляется мне типичной «инкубационной» статьей. Она была стимулирована идеями Майораны и Рака и не содержала очень важных результатов. В этой статье в деталях описан ход рассуждений Рака о возможных ядерных реакциях, индуцируемых майорановскими и дираковскими нейтрино. Однако она скорее пессимистична в отношении возможности экспериментального решения дилеммы нейтрино Майораны — нейтрино Дирака и является предвестником следующей, очень умной и важной статьи Фарри<sup>23</sup>, где впервые рассматривался безнейтринный двойной  $\beta$ -распад.

В безнейтринном двойном  $\beta$ -распаде нейтральный лептон, виртуально испускаемый нейтроном совместно с отрицательным электроном, должен поглотиться другим нейтроном с испусканием второго отрицательного электрона. «Цепочка Рака» здесь присутствует, но идея эксперимента нова и в этом случае очень остроумна. Поиски безнейтринного двойного  $\beta$ -распада сегодня даже более, чем в прошлом, важны и могут дать ответ на вопрос относительно природы нейтрино (майорановской или дираковской). Безнейтринный двойной  $\beta$ -распад до сих пор еще не наблюдался: для его обнаружения проводились и проводятся сейчас смелые и важные эксперименты. Наблюдение такого распада с определенностью означало бы,

что нейтрино, соответствующие стационарным состояниям, имеют майорановскую природу. Отрицательный результат поисков безнейтринного двойного  $\beta$ -распада не легко однозначно интерпретировать из-за обстоятельств а) и б), упомянутых выше.

Здесь, по-видимому, уместно подчеркнуть, что отрицательные результаты экспериментов на ядерных реакторах с использованием хлор-аргонового метода и, в особенности, поисков безнейтринного двойного  $\beta$ -распада уже показали, что спиральность нейтрино (играющая роль лептонного заряда) почти идеальна, если не абсолютно идеальна<sup>24</sup>. Однако вернемся к Майоране и рассмотрим теперь нейтрон.

Приходится только удивляться, как много, явно или неявно, подразумевается в его знаменитой статье. Я уже подчеркивал, что там можно найти (непосредственно или между строк) электрически нейтральные фермионы совсем без заряда или с каким-либо зарядом (лептонным, барионным и т. п.). Правда, неявно все заряды предполагаются строго сохраняющимися, хотя это и не сформулировано. Теперь мы знаем, что среди бозонов, по-видимому, есть «гибридные» частицы, т. е. бозоны с нестрогим сохраняющимся зарядом<sup>25</sup>, осциллирующие между двумя различными состояниями, как нейтральные каоны. Если существуют такие электрически нейтральные гибриды среди фермионов<sup>26</sup>, то мы вправе ожидать, что они не описываются стационарными состояниями и осциллируют, переходя друг в друга. Такие частицы являются суперпозицией частиц с определенными (различными) массами, которые описываются стационарными состояниями и являются истинно нейтральными (или майорановскими) фермионами.

Теперь позвольте мне немножко пошутить — вы увидите, к чему я клоню — нейтроны и антинейтроны Майораны, описанные в статье 1937 г., явились предвестниками свежего ветра Теории Великого Объединения — с конечной массой нейтрино, осцилляциями нейтрино и нейтронов, нуклонным распадом и всем прочим!

<sup>22</sup> Furry W.— Phys. Rev., 1938, v. 54, p. 56.

<sup>23</sup> Furry W.— Phys. Rev., 1939, v. 56, p. 1184. (Безнейтринный двойной  $\beta$ -распад.) Двойной  $\beta$ -распад с испусканием двух нейтральных лептонов рассматривался М. Гелперт-Майер (Phys. Rev., 1935, v. 48, p. 512). Ранние детали теоретических исследований безнейтринного двойного  $\beta$ -распада имеются в статьях: Зельдович Я. Б. и др.— Успехи физ. наук, 1954, т. 54, с. 361; Primakoff H., Rosen S.— Rep. Prog. Phys., 1959, v. 12, p. 121. В них также можно найти ссылки на предыдущие экспериментальные работы.

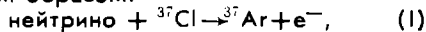
<sup>24</sup> Для ясности я хотел бы подчеркнуть здесь, что лучки «феноменологических» нейтрино и антинейтрино, те самые слова и обозначения  $\nu$  и  $\bar{\nu}$ , с которыми имеет дело каждый экспериментатор, осуждены остаться в физике на долгое время, даже если точка зрения Майораны правильна.

<sup>25</sup> Gell-Mann M., Pais A.— Phys. Rev., 1955, v. 97, p. 1387.

<sup>26</sup> См. сноску 17.

## ХЛОР-АРГОНОВЫЙ МЕТОД

Теперь я хотел бы дать субъективный отчет о нескольких страницах развития нейтринной физики, к которым я был некоторым образом причастен. В 1946 г. нейтрино рассматривались, вообще говоря, как недетектируемые частицы. Многие уважаемые физики придерживались того мнения, что даже сам вопрос о детектировании свободных нейтрино просто бессмыслен (и не только из-за временных трудностей), так же, как, скажем, бессмыслен вопрос, бывает ли в сосуде давление, меньшее, чем  $10^{-50}$  атмосфер. Я хорошо помнил об аргументе Бете и Пайерлса<sup>27</sup> и пришел к выводу, что появление мощных ядерных реакторов сделало детектирование свободных нейтрино вполне приличным занятием. Я жил тогда в Канаде и был хорошо знаком с физикой реакторов. Канадский реактор NRX, в создании которого я принимал участие, еще не работал, но мне было ясно, что под очень компактной защитой, значительно ослабляющей мягкую компоненту космических лучей, можно иметь поток нейтрино порядка  $10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . В то время сцинтилляторы, которые много лет спустя были так успешно использованы Райнесом и Коузном<sup>28</sup> для детектирования реакторных антинейтрино, еще не были созданы и мне пришлось в голову, что проблема может быть решена радиохимическими методами, т. е. путем химической концентрации изотопа, образующегося при обратном  $\beta$ -процессе из очень большой массы вещества, облучаемого нейтрино<sup>29</sup>. При внимательном осмотре знаменитой таблицы искусственных изотопов Сиборга нашлось несколько возможных кандидатов на мишень, среди которых наиболее подходящими оказались соединения хлора. Соответствующая реакция выглядит следующим образом:



где  ${}^{37}\text{Ar}$  распадается путем К-захвата с высвобождением 2,8 КэВ энергии в виде рентгеновских лучей и электронов Оже. Я написал здесь «нейтрино», а не  $\bar{\nu}_e$ , потому что вопрос о том, отличается ли  $\nu$  от  $\bar{\nu}$ , был еще неясен<sup>30</sup>. Имеется множество практических

доводов в пользу  ${}^{37}\text{Cl}$ , я не буду перечислять их здесь. Однако один из них не был мне известен а priori, он был открыт случайно. Для испытаний будущего нейтринного детектора мы на Чок Ривер обычно приготавливали в реакторе  ${}^{37}\text{Ar}$  и помещали его внутрь детектора, который, согласно нашим намерениям, должен был быть — и был фактически — счетчиком Гейгера — Мюллера. И вот однажды, взглянув на осциллограф, который был подключен к счетчику, мы увидели множество импульсов примерно одинаковой амплитуды от  ${}^{37}\text{Ar}$ , причем напряжение на счетчике было много ниже гейгеровского порога. Таким образом мы обнаружили<sup>31</sup> (независимо от Каррена и др. в Глазго) пропорциональный режим при очень высоком газовом усилении ( $>10^6$ ). Это было, разумеется, крайне важно с точки зрения детектирования нейтрино, поскольку позволяло уменьшить эффективный фон счетчика. В то время бытовало убеждение, что пропорциональные счетчики не могут работать при коэффициентах газового усиления, больших 100. Это, разумеется, справедливо, если начальная ионизация ( $\alpha$ -частицы и т. п.) велика, но абсурдно, если она соответствует всего нескольким парам ионов.

В моей статье<sup>32</sup> 1946 г. я уже рассматривал в качестве источников нейтральных лептонов не только мощные реакторы, но также и концентрат радиоактивных элементов, извлеченных из реактора, и... Солнце.

Я обсуждал хлор-аргоновый метод (включая возможности, предоставляемые Солнцем) с Ферми в Чикаго (кажется, в 1948 г.) и позже в 1949 г. на конференции в Базеле и Комо. Ферми совсем не был энтузиастом применения этого метода к нейтрино, но ему очень понравились наши пропорциональные счетчики, с по-

что  $\nu \neq \bar{\nu}_e$  в том смысле, что нейтральный лептон, испускаемый при  $\beta^-$ -распаде вместе с электроном, имеет другую спиральность, чем нейтральный лептон, испускаемый вместе с позитроном при  $\beta^+$ -распаде. Однако, как показано в предыдущем разделе, такой ответ не решает главного вопроса сегодняшней нейтринной физики: имеют ли нейтрино майорановскую массу? Другими словами, являются ли частицы, описываемые собственными массовыми состояниями, майорановскими частицами?

<sup>31</sup> Kirkwood D., Pontecorvo B., Hanna G.— Phys. Rev., 1948, v. 75, p. 497; 1949, v. 75, p. 985; Pontecorvo B.— Helv. Phys. Acta, 1950, v. 3, p. 97.

<sup>32</sup> См. сноску 2.

<sup>27</sup> См. сноску 1.

<sup>28</sup> Cowan C., Reines F., Harrison F., Kruse H., McGuire A.— Science, 1956, v. 124, p. 103.

<sup>29</sup> См. сноску 2.

<sup>30</sup> Этот вопрос неясен и до сих пор (1982), но совершенно на другом уровне! Сегодня «феноменологический» ответ, конечно, гласит,

мощью которых мы вместе с Ханна впервые наблюдали  $\bar{\nu}$ -захват в  $^{37}\text{Ag}$  ( $\sim 250$  эВ,  $\sim 10$  ионных пар)<sup>33</sup> и измерили спектр трития, по тем временам существенно понизив верхний предел для массы нейтрино<sup>34</sup>. Теперь, оглядываясь назад, я очень хорошо понимаю реакцию Ферми. Кажется, Сегре сказал, что Дон Хихот не был героем Ферми. Он не мог отнестись с симпатией к эксперименту, который хотя и закончился блестяще благодаря героическим усилиям Р. Дэвиса, но много, много лет спустя после того, как был задуман.

Теперь я вернусь к вопросу о том, могут ли реакторные антинейтрино вызывать реакцию (1). Как-то в 1947 или 1948 г., проезжая через Цюрих, я завтракал с Прайсверком и Паули. Я рассказал Паули о моих планах с хлор-аргоновым методом. Сама идея ему очень понравилась, и он заметил, что неясно, будут ли «реакторные нейтрино» достаточно эффективно вызывать реакцию (1), но, по его мнению, по-видимому, должны. (Как видите, это точка зрения Майораны.) До 1950 г. я продолжал размышлять над этой проблемой, испытывая пропорциональные счетчики с низким фоном, имея в виду как эту задачу, так и проблему Солнца. Я помню, как Камерини, который в то время работал в Бристоле и был главным специалистом по «звездам», образуемым космическими лучами, помог мне рассчитать космический фон в различных хлор-аргоновых экспериментах, которые я планировал провести. Во всяком случае, как мы знаем теперь, после недавних успешных экспериментов Дэвиса, эффективный фон в моих счетчиках был достаточно низок, чтобы можно было регистрировать солнечные нейтрино по распаду  $^{37}\text{Ag}$ . С 1950 г. я прекратил такие эксперименты, так как мне пришлось работать в ускорительной (а не реакторной) лаборатории, а также потому, что в СССР не было достаточно глубоких подземных лабораторий, пригодных для солнечных экспериментов (кстати, скоро этим можно будет заниматься на Баксанской нейтринной обсерватории в Приэльбрусье). Тем не менее все время я продолжал думать о счетчиках (...и о Солнце) и, когда я имел удовольствие встретиться с Р. Дэвисом на первой нейтринной конференции в Москве (1968), я высказал мнение, что измерение формы импульса от счетчика, в дополнение к измерению амплитуды,

должно привести к значительному уменьшению эффективного фона в таких солнечных экспериментах. Так оно и есть, как я позже узнал от Дэвиса на конференции «Нейтрино-72» в Венгрии.

Раз уж зашла речь об интерпретации экспериментов с солнечными нейтрино, я всесторонне исследовал важную роль возможных осцилляций нейтрино в солнечной нейтринной астрономии еще до первых результатов Р. Дэвиса, т. е. до того, как возникла так называемая загадка солнечных нейтрино. Я хотел бы поговорить об этом, но эта история слишком свежа, чтобы сейчас о ней рассказывать.

### СВОЙСТВА МЮОНОВ И ПОНЯТИЕ СЛАБОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Многие физики не знают, что после открытия радиоактивности понадобилось около 50 лет, чтобы зародилось и получило всеобщее признание понятие слабых взаимодействий. О коротком этапе этого периода, который связан с развитием наших знаний о свойствах мюонов и который начался со знаменитого эксперимента Конверси, Панчини и Пиччиони<sup>35</sup>, и будет сказано ниже.

Я работал в Канаде, когда впервые услышал об этом эксперименте. До 1947 г. физика космических лучей была для меня очень далекой областью. Некоторые сведения о ней я получил от моих друзей: во Флоренции от Бернардини и Оккиалини, в Париже от П. Эренфеста-младшего (многообещающего экспериментатора, который работал в группе Оже, занимавшейся космическими лучами, и безвременно погиб в горах), в Монреале от Разетти (одного из моих учителей, который в Квебеке впервые непосредственно измерил время жизни «мезотрона») и Оже (который провел такие же измерения совместно с Мазе и под руководством которого я работал в Канаде во время войны).

Итак, как только я прочел статью Конверси и др. и узнал о соображениях Ферми и др. по этому вопросу<sup>36</sup>, я был буквально пленен частицей, которую мы теперь называем мюоном. Эта была действительно интригующая частица: «заказанная» Юкавой и открытая Андерсоном, она, как обнаружили Конверси и др., «плохо себя вела», а именно: не имела ничего общего с частицей Юкавы! Я почувствовал себя

<sup>33</sup> Pontecorvo B., Kirkwood D., Hanna G.— Phys. Rev., 1949, v. 75, p. 982.

<sup>34</sup> См. сноску 10.

<sup>35</sup> Conversi M., Pancini E., Piccioni O.— Phys. Rev., 1947, v. 71, p. 209.

<sup>36</sup> Fermi E., Teller E., Weisskopf V.— Phys. Rev., 1947, v. 71, p. 314.

подхваченным антидогматическим ветром и начал задавать массу вопросов типа:

Почему спин мюона должен быть целым?

Кто сказал, что мюон должен распадаться на электрон и нейтрино, а не на электрон и два нейтрино или электрон и фотон?

Является ли заряженная частица, вылетающая при распаде мюона, электроном?

Испускаются ли при распаде мюона другие частицы, кроме электрона и нейтрино?

В какой форме высвобождается энергия при захвате мюона ядром?

На вопрос, связанный с захватом мюона, я ответил почти сразу<sup>37</sup> и, как выяснилось, правильно, отметив, что скорости ядерного захвата электрона и мюона очень близки (если принять во внимание разницу объемов, занимаемых электронной и мюонной орбитами). Ответы были таковы:

1) захват мюона должен быть процессом, практически идентичным  $\beta$ -процессу, и описываться реакцией<sup>38</sup>  $\mu^- + p = \text{нейтрино} + n$ ;

2) большая часть энергии, высвобождаемой в мюонном захвате, «невидима», поскольку она уносится в виде нейтрино — предположение, которое было подтверждено экспериментом и согласуется с первым ответом;

3) спин мюона должен быть равен  $1/2$ .

Очень трудным моментом для меня было объяснение обильного рождения мюонов космическими лучами. Я был уверен, что мюон — это фермион. Фермион не может рождаться в одиночку. Предположение об обильном рождении мюон-нейтринных пар противоречило моему основному заключению, что мюон-нейтринная связь с ядром слаба. Мне пришлось обратиться к теории Маршака о ядерных силах, возникающих за счет обмена парами заряженных лептонов. На самом деле эту теорию я не понимал и не достиг цели — не выявил истинный источник мюонов. Таким источником должен был быть объект, «беременный» мюонами, как образно и точно выразился Вайскопф<sup>39</sup>, по

какой-то причине также не достигший цели. Им является, конечно, пион. Правильный ответ был дан вскоре Маршаком и Бете<sup>40</sup> в их замечательной статье «О гипотезе двух мезонов», опубликованной примерно в то время, когда произошло эпохальное открытие пиона и  $\pi \rightarrow \mu$ -распада (Латтес, Оккиалини и Пауэлл)<sup>41</sup>.

То, что процессы ядерного захвата мюона и электрона очень похожи, т. е. что оба они являются «слабыми процессами», мне<sup>42</sup>, а затем и несколькими другим физикам<sup>43</sup> было абсолютно ясно в то время. Такая электрон-мюонная симметрия была первым намеком на универсальное слабое взаимодействие (но как далеко было до найденного в 1958 г. вида такого взаимодействия, т. е. до  $(V-A)$ -теории Маршака — Сударшана и Фейнмана — Гелл-Манна<sup>44</sup>, дополненной впоследствии идеей Кабибо о смешивании адронов!).

Что же касается вопросов, связанных с распадом мюонов, на них можно было получить ответ только с помощью соответствующих экспериментов. Я стал активно интересоваться физикой космических лучей, быстро прочел и усвоил выпущенную Гейзенбергом очень хорошую краткую брошюру по космическим лучам<sup>45</sup>, нечто вроде путеводителя для начинающих. Вместе с Тедом Хинксом, замечательным физиком, наделенным острым чувством юмора, мы начали совместные эксперименты. Это было очень дружеское, незабываемое и плодотворное сотрудничество. В короткий срок мы создали установку, достаточно сложную для того времени. Были использованы методы мгновенных и запаздывающих совпадений, и, разумеется, детекторами служили счетчики Гейгера. Мы работали в реакторной лаборатории и поэтому испытывали некоторое чувство вины, занимаясь космическими лучами. Правда, наш глава У. Сарджент (физик, который открыл правило, связывающее вероятность  $\beta$ -распада с энергией вылетающих электронов) благожелательно относился к нашей деятельности. И все же я не могу забыть, как неохотно мы с Тедом

<sup>37</sup> Pontecorvo B.— Phys. Rev., 1947, v. 72, p. 246.

<sup>38</sup> Прошло 15 лет, прежде чем реакции  $\mu + p \rightarrow n + \nu_\mu$  и  $\mu + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + \nu_\mu$  были непосредственно обнаружены в экспериментах Р. Хильдебранда и наших собственных (совместно с Суляевым и др.).

<sup>39</sup> Weisskopf V.— Phys. Rev., 1947, v. 72, p. 510.

<sup>40</sup> Marshak R., Bethe H.— Phys. Rev., 1947, v. 72, p. 506.

<sup>41</sup> Latte G., Occhialini G., Powell C.— Nature, 1947, v. 160, p. 453.

<sup>42</sup> См. сноску 37.

<sup>43</sup> Klein O.— Nature, 1948, v. 161, p. 897; Puppi G.— Nuovo Cimento, 1948, v. 5, p. 587.

<sup>44</sup> Marshak R., Sudarshan E.— Phys. Rev., 1958, v. 109, p. 1860; Feynman R., Gell-Mann M.— Phys. Rev., 1958, v. 109, p. 193.

<sup>45</sup> Cosmic radiation. Ed. by W. Heisenberg. N. Y., 1946.

тратили лабораторные средства и как были счастливы, когда Тед изобрел «пороговый усилитель», который сэкономил много счетчиков, позволив существованию увеличить эффективность детектирования фотонов, испускаемых одновременно с электронами при гипотетическом  $\mu \rightarrow e\gamma$ -распаде! А между тем суммы, потраченные на все наши исследования космических мюонов в Канаде, были бесконечно малы в сравнении с тем, что тратится сегодня на типичный эксперимент в области физики высоких энергий в течение всего нескольких часов.

Мы нашли: 1) что распад  $\mu \rightarrow e\gamma$  происходит (мы искали запаздывающие электрон-фотонные совпадения)<sup>46</sup>; 2) что при распаде мюона испускаются три частицы,  $e, \nu, \nu'$  (мы измеряли спектр электронов методом поглощения)<sup>47</sup>; 3) что заряженная частица, испускаемая в распаде мюона, действительно является электроном (мы измеряли интенсивность его тормозного излучения)<sup>48</sup>. Первые два результата были получены независимо от нас также другими группами авторов<sup>49</sup>. Третий результат был получен только нашей группой. Именно он потребовал от нас максимума усилий и изобретательности, а с нынешних позиций он может показаться наименее значительным: чем же иным, как не электроном, может быть заряженная частица в распаде мюона? Однако следует учитывать сильный «антидогматизм», свойственный тому времени. Атмосферу сомнений, в которой мы жили, можно прочувствовать по названию одной из наших статей: «О стабильности нейтрального мезона». В этой работе<sup>50</sup> мы показали, что нейтральный мезон, существование которого тогда считалось возможным, либо вовсе не испускается при распаде мюона, либо время его жизни при распаде на два фотона не меньше  $10^{-10}$  с.

В заключение этих далеко не полных и субъективных воспоминаний о некоторых ранних мюонных исследованиях я должен упомянуть о теоретической работе, кото-

рая была и до сих пор остается очень важной: введении Мишелем параметра  $\zeta$  для распада мюонов<sup>51</sup>, или, в более общем смысле, описание Мишелем процессов, в которых участвуют два реальных нейтральных лептона.

Мы уже видели, что обнаружение безнейтринного двойного  $\beta$ -распада означало бы, что нейтрино имеет майорановскую массу. А идеология Мишеля — в случае успешного эксперимента с реальными нейтрино — может позволить сделать вывод, что оба нейтральных лептона суть дираковские частицы. Это подчеркивал С. П. Розен для случая рассеяния нейтрино на электроне, но это было так недавно, что я не чувствую себя вправе останавливаться на этой работе в соответствии с выбранной мной стратегией.

После появления первых ускорителей на релятивистские энергии пионы и мюоны начали получать искусственно. В 50-е годы их свойства стали исследовать в условиях, несравненно более благоприятных, чем прежние, но я не собираюсь рассказывать эту историю, вершиной которой было эпохальное (теоретическое<sup>52</sup> и экспериментальное<sup>53</sup>) открытие спиральности нейтрино.

## ФИЗИКА НЕЙТРИНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Мой рассказ здесь снова будет очень личным. Конечно, история выглядела бы совершенно иначе, если бы ее рассказывали М. А. Марков или М. Шварц. Я собираюсь рассказать о том, как я пришел к предложению проводить эксперименты с нейтрино высоких энергий, получаемых на мезонных фабриках и мощных ускорителях.

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в 1958 г. проектировался протонный релятивистский циклотрон с энергией пучка 800 МэВ и током  $\sim 500$  мкА. В конечном счете он не был построен. Но с начала 1959 г. я начал думать об экспериментальной программе для этого ускорителя. Прежде всего мне пришло в голову, что нейтринные опыты на ускорителе вполне осуществимы и что жизнеспособную и относительно дешевую нейтринную

<sup>46</sup> Hincks E., Pontecorvo B.— Phys. Rev., 1948, v. 73, p. 257; Idem.— Can. J. Res., 1950, v. 28A, p. 29.

<sup>47</sup> Hincks E., Pontecorvo B.— Phys. Rev., 1949, v. 75, p. 698; 1950, v. 77, p. 102.

<sup>48</sup> См. сноску 47.

<sup>49</sup> Sard R., Althaus E.— Phys. Rev., 1948, v. 74, p. 1364; Piccioni O.— Phys. Rev., 1948, v. 74, p. 1754; Steinberger J.— Phys. Rev., 1949, v. 75, p. 1136; Leighton R., Anderson C., Seriff A.— Phys. Rev., 1949, v. 75, p. 1432.

<sup>50</sup> Hincks E., Pontecorvo B.— Phys. Rev., 1948, v. 73, p. 1122.

<sup>51</sup> Michel L.— Proc. Roy. Soc., 1950, v. A63, p. 514.

<sup>52</sup> См. сноску 16.

<sup>53</sup> Garwin R., Lederman L., Weinrich M.— Phys. Rev., 1957, v. 105, p. 1415; Goldhaber M., Grodzins L., Sunyer A.— Phys. Rev., 1958, v. 109, p. 1015; Wu C., Ambler E. et al.— Phys. Rev., 1957, v. 105, p. 1413.

программу можно выполнить, направляя протонный пучок в большой железный блок, который служил бы одновременно и источником нейтрино и защитой. Я сказал бы, что идеология нейтринных экспериментов на ускорителе LAMPF, которые недавно начались, очень похожа на программу, предложенную мной 20 лет назад.

Об одном из экспериментов, который предназначался для выяснения вопроса, различны ли  $\nu_e$  и  $\nu_\mu$ , я хотел бы сказать несколько слов.

Я должен вернуться далеко назад, в 1947—1950 гг. Несколько групп, среди них Дж. Штейнбергер, Э. Хинкс и я, проводили исследования распада мюона в космических лучах. В результате было обнаружено, что распадающийся мюон испускает три частицы: один электрон (это мы установили по измерению тормозного излучения электрона) и две нейтральные частицы, которые разные люди называли по-разному: два нейтрино, нейтрино и нейтретто,  $\nu$  и  $\nu'$  и т. п. Я снова говорю об этом, подчеркивая, что для людей, работавших с мюонами в прежние времена, вопрос о разных типах нейтрино существовал всегда. Правда, позже некоторые теоретики забыли об этом и вновь изобрели два нейтрино. Но такие люди, как Бернардини, Штейнбергер, Хинкс и я, никогда не забывали о проблеме двух нейтрино. Конечно, постановка вопроса становилась для меня все более точной: появилась идея о возможных партнерах, в том смысле, что  $\nu_e$  всегда выступает партнером электрона,  $\nu_\mu$  — мюона. Я достаточно ясно сформулировал, как осуществить решающий эксперимент, используя пучки мюонных нейтрино<sup>54</sup>. Следовало искать мюоны и электроны, рождаемые в веществе мюонными нейтрино: если  $\nu_\mu \neq \nu_e$ , то рождающихся электронов должно быть много меньше, чем мюонов.

В 1959 г. была очень важна другая проблема: является ли четырехфермионное взаимодействие контактным или оно обусловлено обменом промежуточным бозоном? Этот вопрос стоит еще и сегодня, но теперь у нас есть теория Глэшоу, Салама и Вайнберга, которая предсказывает, что массы промежуточных бозонов составляют около 100 ГэВ, тогда как в 1959 г. только некоторые ученые, среди которых Я. Б. Зельдович и Ж. Лейте Лопес, думали, что промежуточные бозоны имеют массу  $\sim 100$  ГэВ, а обычно считалось (без серьезных на то оснований), что их масса — не-

сколько ГэВ. Очевидно, что промежуточный бозон не мог рождаться на мезонных фабриках, и в 1959 г. на международной конференции в Киеве Рындин и я предложили вторую идею опыта: искать бозон, используя нейтринные пучки, получаемые на ускорителях очень высоких энергий<sup>55</sup>. Теоретически это предположение основывалось на том, что при достаточной большей энергии в сечении рождения промежуточного бозона с помощью нейтрино должно появляться  $G$  вместо  $G^2$ . Как известно, вопрос о промежуточных бозонах, по-видимому, будет решен не в нейтринных экспериментах. Проблема же двух типов нейтрино была разрешена в Брукхейвене в блестящих экспериментах Ледермана, Шварца, Штейнбергера и др. (1962).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ниже перечислены некоторые из главных проблем сегодняшней нейтринной физики. Эти вопросы, разумеется, связаны друг с другом.

1. Конечны ли массы нейтрино?
2. Все ли нейтральные лептоны много легче электронов?
3. Если массы нейтрино конечны, то все ли они имеют майорановские массы (в этом случае отсутствуют лептонные заряды) или все имеют дираковские массы (в таком случае существуют строго сохраняющиеся лептонные заряды)? Может быть, некоторые нейтрино имеют майорановские массы, а другие — дираковские?
4. Существует ли безнейтринный двойной  $\beta$ -распад?
5. Существуют ли нейтринные осцилляции?
6. Сколько имеется различных типов нейтрино?

Все эти вопросы стоят уже долгое время; многие поставлены еще Паули, Ферми, Перреном и Майораной. Однако не похоже, чтобы определенные ответы были получены в ближайшем будущем, хотя сегодня нейтринная физика — не только процветающая область исследований, но и «большой бизнес».

<sup>55</sup> Понтекорво Б. М., Рындин Р.— Тр. Межд. конф. по физике высоких энергий. Киев, 1959, с. 233.

<sup>54</sup> Понтекорво Б. М.— ЖЭТФ, 1959, т. 37, с. 1751.