

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

539 123(09)

СТРАНИЦЫ РАЗВИТИЯ НЕЙТРИННОЙ ФИЗИКИ

Б. М. Понтекоров

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	675
2. Перечисление существенных событий. Большие нейтринные установки Т а б л и ц а I: от открытия радиоактивности до гипотезы нейтрино, теории β -распада и до обнаружения ¹ свободных нейтрино (1896—1956) (677). Т а б л и ц а II: от наблюдения слабых процессов, отличных от β -распада, до открытия несохранения четности в слабых процессах, создания V — A-универсальной теории и до обнаружения PC-неинвариантности (1941—1967) (678). Т а б л и ц а III: от рождения физики нейтрино высоких энергий и открытия двух типов нейтрино до открытия нейтральных токов, τ -лептона, слабых распадов очарованных частиц и теории электрослабых взаимодействий (1959—1980). (680) Т а б л и ц а IIIa: пучки нейтрино высоких энергий (по состоянию на 1980 г.) (683). Т а б л и ц а IIIb: большие пугзрьковые камеры (по состоянию на 1980 г.) (683). Т а б л и ц а IIIв: электронные детекторы нейтрино на ускорителях высоких энергий (по состоянию на 1980 г.) (683). Т а б л и ц а IV: нейтрино в астрономии и астрофизике (1939—1980) (684).	
3. Паули	685
4. Ферми (и постферми)	687
5. Майорана	691
6. Радиохимические методы регистрации нейтрино и хлор-аргоновый метод	695
7. Осцилляции нейтрино и Солнце	697
8. Понятие слабого взаимодействия и «древнее» изучение свойств мюонов	702
9. Физика нейтрино высоких энергий	704
10. Прямые нейтрино и «бим-дамповые» опыты	705
11. Альтернативный сценарий развития нейтринной физики?	706
12. Заключение	707
Цитированная литература	707

1. ВВЕДЕНИЕ

Пять лет тому назад в день семидесятилетия Э. Амальди я был приглашен сделать обзорный доклад по нейтринной физике на международном совещании физиков, большинство из которых не были специалистами в данной области. Этот доклад однако не был опубликован в печати. В 1980 г. я прочел доклад, предназначенный для специалистов в области нейтринной физики и астрофизики, на международной конференции «Нейтрино-80»¹. Совсем недавно я представил доклад на международный Коллоквиум по истории физики элементарных частиц, состоявшийся в Париже². Редакция журнала «Успехи физических наук» предложила мне подготовить статью на основе этих докладов. Представленная здесь статья, естественно, довольно эклектична: в ней рассказывается об общеизвестных для

специалистов моментах и событиях в истории нейтринной физики и о малоизвестных эпизодах, об очень старом и иногда о совсем новом. Цитируемая литература совершенно не полная и носит довольно случайный характер ... То, о чем рассказано, не есть последовательное описание развития нейтринной физики. Это лишь несколько эпизодов из истории нейтринной физики. При этом я рассказываю только о событиях, которые оказали влияние на меня лично. Некоторые из них имеют решающее значение в истории нейтринной физики и астрофизики, другие — не так существенны, но хорошо мне известны. Все эти эпизоды я «видел» собственными глазами, либо глазами людей, которые были мне близки. Я прошу прощения у многих физиков, в том числе у некоторых моих друзей, за то, что не уделил им того внимания, на которое они имели бы право рассчитывать в объективном изложении.

Итак, мой рассказ будет очень субъективен. Он предназначен и для не специалистов, и для молодых исследователей физики нейтрино, которые хорошо информированы о сегодняшних и вчерашних событиях, но не так хорошо — о старинных. Такие физики привыкли мыслить в терминах 10^5 или 10^6 нейтринных событий. Они забыли (или никогда не знали), что через 16 лет после «изобретения» нейтрино Паули оно все-таки рассматривалось как недеклассифицируемая частица.

Физика нейтрино — почти синоним физики слабых взаимодействий, хотя разница существует. Эту разницу я учитывал не всегда.

Во второй главе настоящей статьи в форме таблиц представлено перечисление событий, произошедших в физике нейтрино. Сделано это, во-первых, с целью уменьшить каким-то образом субъективный характер рассказа. И все-таки таблицы также не объективны. В них упомянуты события, которые имели решающее значение или инициировали большое количество исследовательских работ. Вторая цель таблиц такова: даже сухое, субъективное и неполное перечисление событий даст возможность читателю быстро войти в атмосферу тех лет, о которых идет речь.

Вначале я готовил таблицы, не пользуясь литературой, просто по памяти. Когда, наконец, нужно было что-либо уточнить или дополнить, мне приходилось тратить много времени, но поправок было немного.

Таблицы относятся к четырем периодам, выбранным более или менее произвольно.

Первая — от открытия радиоактивности до гипотезы нейтрино, теории β -распада Ферми и до обнаружения свободных нейтральных лептонов (инкубационный период и детство нейтринной физики).

Вторая — от наблюдения слабых процессов, отличных от β -распада, до открытия несохранения четности в слабых процессах, $V-A$ -универсальной теории и до наблюдения нарушения PC (юность нейтринной физики).

Третья — от рождения физики нейтрино высоких энергий и обнаружения двух типов нейтрино до открытия нейтральных токов, τ -лептона, процессов распада очарованных частиц и теории электрослабых взаимодействий (зрелость нейтринной физики).

Четвертая — нейтрино в астрофизике, астрономии и космологии. В дополнительных табл. 3а, 3б и 3в приводятся некоторые сведения о нейтринных пучках и крупных нейтринных детекторах (по состоянию на 1980 г.).

Уже первый взгляд на таблицы обнаруживает, как главное, огромный рост физики нейтрино, которая стала количественной наукой, здоровой и мощной и все-таки сулящей качественные неожиданности.

2. ПЕРЕЧИСЛЕНИЕ СУЩЕСТВЕННЫХ СОБЫТИЙ. БОЛЬШИЕ НЕЙТРИННЫЕ УСТАНОВКИ

Т а б л и ц а I

От открытия радиоактивности до гипотезы нейтрино, теории β -распада
и до обнаружения свободных нейтрино (1896—1956)

Год	Событие	Авторы
1896	Открытие радиоактивности	Беккерель
1899	Открытие β -лучей	Резерфорд
1908—	Счетчики (пропорциональные и гейгеровские), способ-	Гейгер,
1928	ные регистрировать отдельные заряженные частицы	Резерфорд, Мюллер
1912	Камера Вильсона	Вильсон
1914	Непрерывный спектр β -лучей	Чадвик
1925	Метод толстых фотопластинок	Мысовский
1927	Измерение тепла, освобожденного при поглощении β -лу-	Эллис, Вустер
1927	чей	Дирак
1927	Квантовая теория излучения	Дирак
1928	Релятивистское уравнение частиц со спином 1/2	Вейль
1929	Двухкомпонентная теория фермионов с нулевой массой	Паули
1930	«Изобретение» нейтрино	Андерсон
1932	Открытие позитрона	Чадвик
1932	Открытие нейтрона	Иваненко; Гейзенберг;
1932—	Ядро состоит из нуклонов	Майорана
1933		Ферми
1933	Теория β -распада	Кюри, Жолио
1934	Искусственная радиоактивность	Кюри, Жолио
1934	β -радиоактивность с испусканием позитронов	Бете, Пайерлс
1934	Первое обсуждение обратного β -распада	Вавилов, Черенков
1934	Эффект Вавилова — Черенкова	Юкава
1935	Мезонная теория ядерных сил	Лейпунский
1935	Первый опыт по обнаружению ядра отдачи в β -распаде	Гейперт-Майер
1935	Первое рассмотрение двойного β -распада	Гейзенберг
1936	Далекоидущие следствия того факта, что константа Ферми не безразмерна	
1936	Диаграмма Кери	Кери, Ричардс, Пакстон
1936	Правила отбора Гамова — Теллера в β -распаде	Гамов, Теллер
1937	Нейтрино Майорана	Майорана
1937	Наблюдение захвата орбитальных электронов ядрами	Альварес
1937	Впервые упоминаются слабые нейтральные токи	Кеммер
1938	Открытие мюона	Андерсон, Недермейер
1939	Диффузионная камера	Лангсдорф
1939	Первое обсуждение безнейтринного двойного β -распада	Фарри
1939	Первая идея о неабелевом промежуточном бозоне	Клейн
1942	Первый ядерный реактор	Ферми
1944	Принцип автофазировки. Через несколько лет начнется эра опытов, выполненных на новых типах мощных ускорителей	Векслер; Макмиллан
1945—	Кристаллические счетчики и полупроводниковые детекторы	Ван-Гердин; Мак-Кей; Мак-Кензи; Бронлей
1959		Понтекорво
1946	Предложение зарегистрировать нейтрино низких энергий с помощью методов радиохимии	
1947	Сцинтилляционный счетчик	Кальман
1948	Наблюдение радиоактивности нейтрона	Снелъ; Робсон; Спивак
1949	Первые измерения β -спектра трития	Керран и др.; Хэнна, Понтекорво
1950	Черенковский счетчик	Джелли

Продолжение табл. I

Год	Событие	Авторы
1952 1953	Пузырьковая камера Понятие лептонного заряда	Глазер Маркс; Зельдович; Конопинский, Махмуд Райнес, Коуэн Дэвис
1953— 1956 1956	Первое наблюдение свободных антинейтрино от реактора Реакция $\bar{\nu}_e + \text{Cl}^{37} \rightarrow e^- + \text{A}^{37}$ не наблюдается	

Таблица II

От наблюдения слабых процессов, отличных от β -распада, до открытия несохранения четности в слабых процессах, создания V — A-универсальной теории и до обнаружения CP-неинвариантности (1941—1967)

Год	Событие	Авторы
1941	Прямое доказательство радиоактивности мюона и измерение его времени жизни (опыт выполнен в космических лучах)	Разетти; Росси, Неренсон
1947	Мюон — не адрон (эксперимент выполнен в области космических лучей)	Конверси, Панчини, Пиччиони
1947	«Двухмезонная» теория	Маршак, Бете
1947	Открытие пиона и распада $\pi \rightarrow \mu \nu$ (опыт выполнен в космических лучах)	Латтес, Оккиалини, Пауэл
1947— 1948	Концепция глубокой аналогии между электроном и мюоном (универсальность 4-фермионных взаимодействий) и понятие «слабых процессов»	Понтекорво; Клейн; Пунши
1947	Открытие странных частиц в космических лучах	Рочестер, Ботлер; Лепренс — Ренге
1948	Отсутствие процесса $\mu \rightarrow e \gamma$ (опыт выполнен в космических лучах)	Хинкс, Понтекорво; Сард, Алтауз; Пиччиони
1948	Наблюдение искусственных пионов. После этого знаменательного события на ускорителях точные измерения пионных, мюонных масс и времен жизни были выполнены и выполняются до сих пор. Позднее начаты количественные исследования свойств странных частиц на ускорителях во всем мире	Гарднер, Латтес
1949	В μ -распада испускаются 3 частицы, одна из которых — электрон (опыт выполнен в космических лучах)	Хинкс, Понтекорво; Андерсон; Штейнбергер; Жданов
1950	Параметр ρ , характеризующий μ — e -распад	Мишель
1950	Предложена сильная фокусировка в ускорителях	Кристофилос и др.
1952	«Остается не дающая покоя возможность того, что P и C оба являются приближенными, а PC является единственно точным законом симметрии»	Вик, Уайтман, Вигнер
1953	Адронные изотопические мультиплеты — странность	Гелл-Манн; Нишиджима
1954	Поля Янга — Милса	Янг, Миллс

Продолжение табл. II

Год	Событие	Авторы
1955— 1956 1955	Дуальные свойства и осцилляции нейтральных каонов Первое наблюдение антипротона	Гелл-Манн, Пайс-Пиччони Чемберлен, Сегре
1954	Теорема <i>CPT</i>	Людерс; Паули
1955— 1956	θ — τ -парадокс, т. е. несохранение четности в распадах странных частиц	Уайтхед и др.; Баркас и др.; Далитц и др.; Гаррис и др.; Фитч и др.
1955	Сохранение векторного слабого тока	Герштейн, Зельдович
1955	Принцип «селективного импульсного питания», на котором основана работа таких трековых детекторов, как искровые и стримерные камеры	Ковверси, Гоцини; Тянкин
1956	Открытие долгоживущего нейтрального каона	Ланде и др.
1956	Сохраняется ли четность в слабых взаимодействиях?	Ли, Янг
1957	Гипотеза <i>PC</i> -инвариантности	Ландау; Ли, Янг
1957	<i>P</i> и <i>C</i> нарушаются в распаде кобальта-60	Ву и др.
1957	<i>P</i> и <i>C</i> нарушаются в π - и μ -распадах	Гарвин, Ледерман, Вейнрих
1957	Первая модель объединения слабых и электромагнитных взаимодействий	Телегди Швингер
1957	Двухкомпонентное нейтрино	Ландау; Салам; Ли, Янг; Сакураи
1957	Наблюдение продольной поляризации β -частиц	Фрауэнфельдер и др.; Алиханов и др.; Никитин и др.
1957	Осцилляции нейтрино?	Понтекорово
1957	Универсальное слабое взаимодействие $V - A$	Гелл-Манн, Фейнман; Маршак, Судершан
1957— 1958	Измерена угловая корреляция между электроном и нейтрино в β -распаде (Ar^{35} , Ne^6). (Наконец найдено согласие с теорией $V - A$)	Хермансфельт и др.
1958	Процесс $\pi \rightarrow e\nu$, наконец, наблюден с вероятностью в согласии с теорией $V - A$	Фацини, Фидекаро и др.; Импедулья, Шварц, Штейнбергер и др.
1958	Ионизационный калориметр	Григоров, Мурзин и др.
1958— 1963	$SU(3)$ -симметрия и слабое взаимодействие, теория Кабиббо	Гелл-Манн, Леви; Кобзарев, Окунь, Кабиббо
1958	Роль сильных взаимодействий в слабых процессах. Частично сохраняющийся аксиальный ток	Гольдбергер, Тримэн
1958	Определение левой спиральности нейтрино	Гольдхабер и др.
1958	β -распад поляризованных нейтронов	Телегди и др.; Робсон и др.

Продолжение табл. II

Год	Событие	Авторы
1959	«Киевская симметрия», т. е. «предкварковая» лептон-адронная симметрия	Гамба, Маршак, Окубо
1962	Наблюдение и исследование реакции $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$ в водороде	Хильдебранд
1962	Наблюдение и исследование реакции $\mu^- + \text{He}^3 \rightarrow \text{H}^3 + \nu_\mu$	Фаломкин и др.
1962—1963	Наблюдение распада $\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e + \nu_e$	Дунайцев, Петрухин, Прокошкин и др.; Демомье, Мухин, Руббин и др.
1963	В опыте, предложенном Гелл-Манном, найдено, что в распадах B^{12} и N^{12} сохраняется векторный ток	Ли, Мо, Ву
1964	Несохранение PC	Кристенсен, Фитч, Кронин и др.
1964	Сверхслабое взаимодействие?	Вольфенштейн
1967	Зарядовая асимметрия в лептонных распадах K_L^0	Дорфан и др.; Беннет и др.
1967	Точное измерение асимметрии электронов в распаде мюонов	Гуревич и др.

Таблица III

От рождения физики нейтрино высоких энергий и открытия двух типов нейтрино до открытия нейтральных токов, τ -лептона, слабых распадов очарованных частиц и теории электрослабых взаимодействий (1959—1980)

Год	Событие	Авторы
1959—1960	Нейтрино высоких энергий. Практическое предложение нейтринных экспериментов на ускорителях, которое открыло новую область в физике слабого взаимодействия	Понтекорво, Марков; Шварц
1959	Искровая камера	Фукуи
1959—1974	Несохранение четности в атомах?	Миямото Зельдович; Бушья, Хриплович
1961—1962	Калибровочная теория электрослабых взаимодействий	Глэшоу
1962	$\nu_e \neq \nu_\mu$	Демби и др. (Брукхейвен)
1963	Магнитный «горн»	Ван дер Меер (ЦЕРН)
1963	Локализация взаимодействий нейтрино в эмульсиях при помощи искровых камер	Буроп и др.
1963	Стримерная камера	Чиковани и др.; Долгошеин и др.
1963	Первые нейтринные опыты, в которых использовалась пузырьковая камера	Блок и др.
1964—1967	Открыты на опыте слабые ядерные силы	Абов и др.; Лобашов и др.
1964	Кварки с дробными зарядами (u, d, s)	Гелл-Манн; Цвейг

Продолжение табл. III

Год	Событие	Авторы
1966— 1976	Электронное охлаждение, стохастическое охлаждение. Идея $\bar{p}p$ -коллайдера	Будкер, Скринский, Ван-дер-Меер, Руббиа, Клейн и др.
1964	Механизм, обеспечивающий возникновение конечной массы векторных мезонов благодаря спонтанному нарушению симметрии	Хиггс
1964	$\nu_\mu \neq \bar{\nu}_\mu$	Бернардини и др. (ЦЕРН)
1963— 1964	Адронное и лептонное смешивание. Теоретическое введение чарма	Маки и др.; Накагава, Оконоки, Саката, Тойода; Бьеркен, Глэшоу; Владимирский; Окунь
1964— 1965	Цвет кварков; кварки с целым электрическим зарядом	Гринберг; Боголюбов, Струминский, Тавхелидзе; Хан, Намбу; Миямото
1964— 1970	Поиски, процессов $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$ и $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$	Камерини, Клайн и др.; Клемс, Хильдербранд и др.
1965	Благодаря неупругим каналам полное сечение $\nu_\mu + p \rightarrow \mu^- + \dots$, вероятно, будет увеличиваться с энергией налетающих нейтрино, несмотря на нуклонный формфактор, который ограничивает увеличение сечения «упругого» рассеяния $\nu_\mu + p \rightarrow \mu^- + p$	Марков
1967	Квантование безмассовых полей Янга — Милса	Фаддеев Попов; де Витт
1967— 1968	Калибровочная модель электрослабого взаимодействия на основе механизма Хиггса	Салам; Вайнберг
1968	Пропорциональные и дрейфовые камеры	Шарпак
1969	Скейлинг	Бьеркен
1969	Партонная модель	Фейнман
1971	Квантование массивных полей Янга — Милса. Перенормируемость теории Вайнберга — Салама	Г. Хоофт
1971	Идея использовать мишень-калориметр в нейтринных опытах	Руббиа и др.
1972	Что нейтрино могут нам сказать относительно партонков?	Фейнман
1972	Механизм ГИМ (четвертый кварк необходим для объяснения того факта, что асимметричные диагональные нейтральные токи отсутствуют)	Глэшоу, Иллиопулос, Майяни
1972— 1980	Полные ν_μ - и $\bar{\nu}_\mu$ -сечения на нуклонах увеличиваются линейно с энергией	ЦЕРН, Гаргамель позже другие установки
1972— 1980	Кварк-партонная модель подтверждается измерениями заряженных токов в ν - и $\bar{\nu}$ -пучках	ЦЕРН, Гаргамель и позже другие установки

Продолжение табл. III

Год	Событие	Авторы
1973	Наблюдение нейтральных токов в процессе $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$	ЦЕРН, Гаргамель и позже другие установки
1973	Наблюдение нейтральных токов в безмюонных событиях $\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + \dots$	ЦЕРН, Гаргамель, Фермилаб, ГПВ и позже другие установки
1973	Распад нуклона?	Пати, Салам; Джорджи, Глэшоу
1974	J/ψ частица	Тинг и др.; Рихтер и др.
1975	Масса промежуточных бозонов > 17 ГэВ	Батавия, Калифорн. Техн. Институт Понтекорво
1975	Подробное предложение регистрировать «прямые» нейтрино для изучения образования чармированных частиц в нуклон-ядерных соударениях	
1975	Первый чармированный барион, найденный в Брукхейвенской водородной пузырьковой камере под действием нейтрино	Брукхавен, Кассоли и др.
1975	Пары $\mu^+\mu^-$, найденные в ν_μ - и $\bar{\nu}_\mu$ -событиях, показывают образование чармированных частиц нейтрино	Фермилаб — ГВПФ
1975	Первое наблюдение τ -лептона	Перл и др.
1976	Масса ν_e меньше 35 эВ (измерение спектра трития)	Третьяков, Любимов и др.
1976	Обнаружение рассеяния $\bar{\nu}_e - e$ (опыт выполнен на реакторе)	Райнс, Гур, Собель
1976	Наблюдение упругого $\nu_\mu p$ - и $\bar{\nu}_\mu p$ -рассеяния и нарушение четности в слабых адронных нейтральных токах	Брукхейвен — Гарвард — Пенсильвания — Висконсин; Колумбия — Иллинойс — Рокфеллер
1977	Предложение практического применения регистрации нейтрино в атомных станциях (измерение мощности, накопления Pu..., горения U...)	Микаэлян и др.
1977	Открытие ипсилона — мезона, связанного состояния $(b\bar{b})$ кварков	Ледерман и др.
1977	Вскоре после пуска 400-ГэВ протонного ускорителя в ЦЕРН начинается третье поколение рафинированных нейтринных опытов с высокой статистикой	ЦДГС БЭПС и позже ШАРМ
1978	Несохранение четности в атомах в согласии с моделью Вейнберга — Салама	Барков, Золотарев
1978	Рассеяние поляризованных электронов на дейтерии подтверждает модель Вайнберга — Салама и дает значение $\sin^2 \theta_w$ в согласии с наилучшими нейтринными опытами CDHS и CHARM	Прескотт и др.
1978	Масса $\nu_\mu \leq 0,57$ МэВ	Фрош и др.
1978	Устанавливаются некоторые важные свойства τ - и ν_τ -лептонов: $m_\tau = 1782_{-7}^{+2}$ МэВ $m_{\nu_\tau} < 250$ МэВ; $V - A$ вариант	Киркби и др.; Фельдман и др.

Большое количество работ, о которых я не смог упомянуть, выполнены и выполняются в настоящее время в различных лабораториях.

Ниже в табл. IIIa, IIIб, IIIв, приводятся сведения относительно нейтринных пучков и крупных нейтринных детекторов.

Таблица IIIa

Пучки нейтрино высоких энергий (по состоянию на 1980 г.)

Ускоритель	Энергия протона, ГэВ	Длина распада, м	Мюонная защита, м	Энергия нейтрино, ГэВ
АНЛ	12,4	30	13 (Fe)	0,3—6
ЦЕРН	27	70	22 (Fe)	1—12
БНЛ	29	57	30 (Fe)	1—15
ИФВЭ	70	140	62 (Fe)	2—30
ФНАЛ	300—400	340	1000 (грунт + Fe)	10—200
ЦЕРН	400	430	220 Fe + 150 грунт	10—200

Таблица IIIб

Большие пузырьковые камеры (по состоянию на 1980 г.)

Пузырьковая камера	Наполнение	Полезный объем, м ³	Вес, т
Гаргамель, ЦЕРН	CF ₃ Br	5	7—9
12' АНЛ (США)	H ₂ , D ₂	16	1—2
7' БНЛ (США)	H ₂ , D ₂	6	0,4
15' ФНАЛ (США)	H ₂	20	1,3
	H ₂ + Ne (20%)	20	7
	H ₂ + Ne (64%)	20	22
СКАТ, ИФВЭ (СССР)	CF ₃ Br	4,5	7
ВЕВС, ЦЕРН	H ₂ , D ₂ , Ne	20—25	

Таблица IIIв

Электронные детекторы нейтрино на ускорителях высоких энергий (по состоянию на 1980 г.)

Ускоритель	Сотрудничество	Полезный вес мишени, т
ЦЕРН	Аахен — Падуа	20
ЦЕРН	ЦЕРН — Дортмут — Гейдельберг — Сакле (CDHS)	900
ЦЕРН	ЦЕРН, Гамбург, Амстердам, Рим, Москва (CHARM)	100
БНЛ	Гарвард — Пенсильвания — Висконсин	30
БНЛ	Колумбия — Иллинойс — Рокфеллер	8
ИФВЭ, Серпухов	ИТЭФ — ИФВЭ	30
ФНАЛ, Батавия	Гарвард — Пенсильвания — Висконсин — Фермилаб (ГВНФ)	20
	Калифорния — Технологический институт, Фермилаб	100

Т а б л и ц а IV

Нейтрино в астрофизике, астрономии и космологии
(1939—1980)

Год	Событие	Авторы
1939	Испускание нейтрино в термоядерных реакциях Солнцем и другими звездами	Бете
1941	Сверхновые звезды и процесс «урка»	Гамов, Шенберг
1946	Предложение радиохимических методов для детектирования нейтрино, например метод $C^{37} - Ag^{37}$, использованный в нейтринной солнечной астрономии	Понтекорво
1946	Теория горячей Вселенной	Гамов
1958	B^8 как источник солнечных нейтрино относительно высокой энергии	Фаулер
1959	Испускание нейтрино горячими звездами связано с универсальным взаимодействием Ферми (процесс $\nu + e \rightarrow \nu + e$)	Понтекорво
1960	Важность выполнения опытов глубоко под землей или под водой для физики элементарных частиц и астрофизики	Марков Грейсен
1961	Феноменологическое рассмотрение возможного существования «нейтринного» моря	Понтекорво, Сморodinский
1961	Космологический верхний предел количества невидимой энергии во Вселенной	Зельдович, Сморodinский
1963	Пары $\nu\bar{\nu}$ и гипотетические нейтральные токи	Понтекорво
1963	Большой детектор (атмосф.) космических нейтрино помещен на глубину 8700 м. э. в. в Южно-Африканской шахте (8 лет измерения, 100 нейтринных событий)	Райнс и др.
1964	Нейтринные звезды?	Марков
1965	Телескопы и магнитные спектрометры, предназначенные для детектирования (атмосферных) космических нейтрино, помещены на глубину 7500 м. э. в. в золотодобывающей шахте в Южной Индии (6 лет измерений, 20 нейтринных событий)	Кришнасами Осборн и др.
1965— 1966	Нейтринные процессы в массивных звездах и сверхновые звезды	Фаулер, Хойл Колгате, Уайт
1965	Испускание регистрируемых нейтрино ($E_\nu \geq 10$ МэВ) в коллапсе холодных звезд; т. е. в процессе нейтронизации: $e^- + {}^Z A \rightarrow \nu_e + {}^{Z-1} A$	Зельдович
1965	Предложение опыта, предназначенного для регистрации нейтрино от коллапсирующих звезд	Домогацкий, Зацепин
1965	Открытие реликтового электромагнитного излучения, подтверждающее теорию горячей Вселенной и требующее присутствия аналогичного реликтового моря нейтрино	Пензиас; Вильсон; Дик и др.; Зельдович, Новиков; Вайнберг
1966	Верхний предел массы ν_μ , полученной с помощью космологических данных	Герштейн, Зельдович
1967	Необходимость выяснения вопроса о сохранении лептонного заряда (осцилляции нейтрино) для будущего нейтринной астрономии Солнца	Понтекорво
1972	Что можно ожидать из $Cl - Ag$ опыта по регистрации солнечных нейтрино, на основании солнечной стандартной модели	Бакалл
1975— 1977	Космический источник сверхвысоких энергий	Березинский, Зацепин
1977	Количественная теория сверхновых звезд, в которой тепло от нейтрино поджигает термоядерные реакции в углероде	Герштейн и др.

Продолжение табл. IV

Год	Событие	Авторы
1977	Сцинтилляционный телескоп ИЯИ АН СССР помещен на глубину 850 м. э. в. в долине Баксана, имеющий полную массу 300 т (3150 модулей)	Чудаков и др.
1977	Детектор нейтрино сверхвысоких энергий, основанный на акустических волнах	Долгошеин и др., Сулак и др.
1977	Важность нейтрино, испускаемых коллапсирующими звездами для нуклеосинтеза, особенно для объяснения содержания элементов, обогащенных протонами	Домогацкий
1978	Обнаружение солнечных нейтрино с помощью Cl — Ag метода в опыте, который продолжался более 10 лет	Дэвис и др.
1978	Черенковский водяной детектор (500 т) Пенсильванского университета, помещенный под землей в Южной Дакоте, Огайо и под Монбланом	Ланде и др.
1978	Сцинтилляционный детектор ИЯИ АН СССР (100 т) помещен в соляные шахты (600 м. э. в.) в Артемовске	Зацепин и др.
1980	Сцинтилляционные детекторы нейтрино от коллапсирующих звезд (60 модулей каждый 2 м ³) ИЯИ АН СССР помещены под Монбланом	Сотрудничество ИЯИ — Туринский университет
1980	Проект: оптико-акустический водяной детектор объемом ~1 км ³ , помещенного глубоко под водой	Проект ДЮМАНД

3. ПАУЛИ

Трудно найти пример, где слово «интуиция» характеризовало бы человеческий подвиг лучше, чем в случае «изобретения» нейтрино Паули.

Во-первых, 50 лет тому назад были известны только две «элементарных» частицы — электрон и протон, и даже мысль, что для понимания вещей необходимо ввести новую частицу, была сама по себе революционной идеей. Какая разница по сравнению с сегодняшним положением, когда масса людей при возникновении малейшей провокации готовы изобрести любое число частиц!

Во-вторых, изобретенная частица — нейтрино должна была иметь совершенно экзотические свойства, в особенности колоссальную проникающую способность. Правда, Паули не вполне осознал такое неизбежное следствие своей идеи и скромно допускал, что нейтрино может иметь проникающую способность, примерно равную или даже в 10 раз больше, чем γ -лучи. Кстати, термодинамический аргумент, основанный на соображениях размерности, показывающий, что нейтрино с энергией 1 МэВ или с соответствующей длиной волны $\lambda \approx 10^{-11}$ см должно иметь астрономически большую длину свободного пробега (скажем, равную толщине конденсированного вещества, в миллиард раз превышающей расстояние от Земли до Солнца), впервые был дан Бете и Пайерлсом ³. Они в 1934 г. рассматривали два обратных друг к другу процесса: процесс β -распада $Z \rightarrow (Z + 1) + e^- + \bar{\nu}$, происходящий с характерным временем T и обратную реакцию $\bar{\nu} + (Z + 1) \rightarrow Z + e^+$ характеризующуюся при соответствующей энергии нейтрино сечением

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

Сегодня этот аргумент очевиден (почти все хорошие доводы кажутся тривиальными а posteriori). Он сильно повлиял на меня и я не забыл его много лет спустя, когда предложил, как провести опыты для обнаружения свободных нейтрино от реакторов и Солнца ⁴.

В-третьих, из-за своей фантастической проникающей способности нейтрино казалось вначале такой частицей, которая не может быть обнаружена в свободном состоянии. О его существовании приходилось судить косвенным образом на основании законов сохранения энергии и импульса, регистрируя ядра отдачи в β -распаде с помощью метода, который сейчас всюду используется для поисков нейтральных частиц — так называемый метод недостающей массы. Опыты такого типа были предложены Паули, а первый из них был выполнен Лейпунским ⁵ в Кембридже.

Здесь я хотел бы подчеркнуть, что 50 лет назад был известен только один довольно сложный процесс с участием нейтрино — бета-распад (тяжелых ядер), в результате которого в конечном состоянии появляются три частицы. Эллис и др. показали, что средняя энергия частиц, испускаемых в бета-распаде (измерена с помощью колориметра), равна средней энергии спектра бета, измеренной с помощью магнитного спектрометра. Этот очень важный момент, вместе с фактом существования максимальной энергии β -лучей, Паули не оставил без внимания. Все другие процессы, в которых участвует нейтрино, не были тогда известны. Среди них есть несколько двухчастичных распадов заряженных частиц, остановившихся в трековой камере ($\pi \rightarrow \mu \nu_\mu$; $\mu^- + \text{He}^3 \rightarrow \text{H}^3 + \nu_\mu$. . .). Такие распады оставляют «красивые автографы», поскольку испускаемая заряженная частица всегда имеет один и тот же импульс, конечно, равный импульсу невидимого нейтрино. Сегодня примеры таких событий, конечно, хорошо известны. Если бы такие события были обнаружены в допаулевском времени, не было бы необходимости в гении Паули, чтобы придумать нейтрино. Однако я хотел упомянуть здесь, что в это время Бор думал, что непрерывный бета-спектр мог быть связан с несохранением энергии в индивидуальных процессах, так что строго говоря, для решения дилеммы — нейтрино или несохранение энергии — пользоваться законами сохранения нельзя.

Еще несколько слов по поводу истории изобретения Паули. Об этом сам Паули написал через несколько десятков лет после того, как выдвинул свою знаменитую гипотезу, которая, кстати, никогда не была опубликована в научных периодических журналах. Может быть, не все знают, что первая идея о существовании нейтрино появилась в письме Паули ⁶ группе специалистов по радиоактивности, которые должны были собраться на встречу в Тюбингене. Письмо начинается словами: «Дорогие радиоактивные дамы и господа ...» На этом совещании Паули не присутствовал, поскольку большего он ожидал от бала, на котором хотел быть в Цюрихе вечером 6 декабря 1930 г. Однако это письмо содержало не только шутки! В нем были две идеи, которые могли принадлежать только человеку с гениальной интуицией. Эти идеи я сейчас сформулирую в сегодняшней и в паулевской терминологии:

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

2. В бета-распаде совместно с электроном должна быть испущена нейтральная частица — нейтрино (Паули и ее назвал нейтроном) таким образом, что полная энергия электрона, нейтрино и ядра отдачи имеет определенное значение.

По существу, Паули, изобрел две частицы одновременно, причем обе они были очень нужны (имеется в виду, помимо прочего *), так назы-

*) Детали теоретических представлений о нейтроне до его экспериментального открытия Чедвиком (Резерфорд, Паули, Майорана) очень 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).

ваемая азотная катастрофа, т. е. полученное в классических спектроскопических исследованиях Разетти доказательство того, что ядра N^{14} подчиняются статистике Бозе, так что они вряд ли могут состоять из протонов и электронов.

По-видимому, Паули некоторое время ошибочно думал, что его частица одновременно выполняет функцию и нейтрино, и нейтрона. Скоро, однако, он изменил свою точку зрения, а именно, в своей первой официальной публикации о нейтрино на Сольвеевском конгрессе 1933 г. ⁷

Следующий колоссальный шаг был сделан Ферми.

4. ФЕРМИ (И ПОСТФЕРМИ)

Ферми познакомился неофициально с гипотезой Паули в Риме на международном Конгрессе по ядерной физике (1931 г.), на котором обсуждалась проблема бета-распада. Именно здесь Бор высказывался в пользу несохранения энергии. Большое впечатление на Ферми произвела частица Паули, которую он начал называть «нейтрино». Как уже сказано, на Сольвеевском Конгрессе 1933 г. впервые в обсуждении, которое появилось в печати, Паули рассказал о своей идее. Во время Конгресса Ферми, по-видимому, уже глубоко размышлял над проблемой нейтрино: его знаменитая статья «Попытка построения теории бета-распада» ⁸ появилась спустя всего два месяца после окончания Сольвеевского конгресса. Это — количественная теория, которая имела большое влияние на развитие физики. Без сомнения, идея о существовании нейтрино без этого вклада Ферми осталась бы туманным представлением. Теория, с относительно небольшими, хотя и важными и многочисленными дополнениями, просуществовала вплоть до объединенной теории электрослабых взаимодействий Глэшоу — Вайнберга — Салама. Я уверен, что, будь Ферми жив, он сам сделал бы большинство необходимых дополнений под давлением экспериментальных фактов. О некоторых из них я расскажу дальше.

Я хотел бы сообщить здесь некоторые курьезные факты, связанные с появлением этой теории, факты, свидетелем которых я был сам, поскольку в это время работал в Риме.

1. Журнал «Nature» отказался публиковать статью Ферми, поскольку она выглядела слишком абстрактной для того, чтобы заинтересовать читателей. Я уверен, что издатель всю жизнь раскаивался в этом.

2. Второй курьез относится к трудностям, с которыми столкнулся Ферми при построении своей теории. Это были трудности не математического характера, а физического. Необходимую математику, вторичное квантование он освоил быстро, но самым трудным для него было понимание того факта, что электрон и нейтрино рождаются, когда нейтрон переходит в протон. Конечно, сегодня это знает каждый студент: взаимодействия элементарных частиц объясняются обменом элементарными частицами. Это — квантовая теория поля, которая является неизбежным следствием квантовой теории и теории относительности. Частицы рождаются и уничтожаются. Это и вызвало затруднение у Ферми. Паули, несмотря на свою пионерскую работу по квантовой электродинамике, не сформулировал четко этот момент. Читая знаменитую статью Ферми о β -распаде, видим, как, проводя аналогию с дираковской квантовой теорией излучения (фотоны ведь рождаются и уничтожаются!), он выбрал векторный вариант β -распада.

Я все еще помню его слова: когда возбужденный атом натрия испускает линию 5890 Å, фотон не «сидел» в атоме (он рождался); точно также, когда нейтрон переходит в протон, рождаются электрон и нейтрино.

К такому же выводу о рождении электронов в бета-распаде пришел Д. Д. Иваненко ⁹ в работе, в которой недвусмысленно впервые в печати было сделано утверждение о том, что нейтрон — элементарная частица, а не связанная система протон — электрон.

По поводу массы нейтрино Перрен ¹⁰ 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 β -распада вблизи его конца. Для наиболее благоприятного случая (β -распад ядра трития) начало таким экспериментам с помощью пропорциональных счетчиков было положено в сороковые годы ¹¹. Значительного улучшения в определении верхнего предела нейтринной массы достиг Берквист ¹² с помощью магнитного β -спектрометра и очень тонкой мишени. Результатов измерений подобного рода ныне, в восьмидесятые годы, с большим возбуждением ожидает все мировое сообщество физиков после в высшей степени интересной статьи В. Любимова, Е. Третьякова и др., которые получили экспериментальное указание на конечную величину массы нейтрино ¹³. Но вернемся к теории β -распада.

В отличие от электромагнитного взаимодействия (посредством обмена фотоном), Ферми предположил, что происходит контактное взаимодействие двух токов — тока тяжелых частиц (n , p) и тока легких частиц (e , ν):

$$k (\bar{\psi}_p \gamma_\mu \psi_n) (\bar{\psi}_e \gamma_\mu \psi_\nu), \quad n \begin{cases} \rightarrow e^- \\ \rightarrow \bar{\nu} \\ \rightarrow p \end{cases},$$

где k — константа порядка 10^{-49} эрг см³ (сегодня мы все знаем, что $k = G/\sqrt{2}$, где $G = 10^{-5}/M_p^2$ называется постоянной Ферми, $\hbar = c = 1$), $\bar{\psi}_p$, ψ_n — операторы рождения протона и уничтожения нейтрона и т.д. Ферми предположил, что слабые токи, как мы их теперь называем, являются 4-векторами, как в электродинамике. Вначале Ферми полагал, что нуклонный слабый ток $\bar{\psi}_p \gamma_\mu \psi_n$ аналогичен электромагнитному току $\bar{\psi}_p \gamma_\mu \psi_p$, а лептонный слабый ток $\bar{\psi}_e \gamma_\mu \psi_\nu$ электромагнитному полю. Однако в его формулировке токи «тяжелой частицы» и «легкой частицы» (как их называл Ферми) совершенно равноправны.

Таким образом, Ферми возвел свое столь совершенное строение лишь на основе нескольких экспериментальных результатов по бета-распаду тяжелых ядер и аналогии с дираковской теорией электромагнитного излучения.

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

Вот основные постфермиевские факты.

1. Нейтрино испускаются не только в бета-распаде. Имеются и другие многочисленные процессы, в которых участвуют нейтрино: распады мюона и пиона, лептонные распады странных частиц и шармированных частиц, процессы, обратные предыдущим, вызванные пучками нейтрино, распады тауона, упругое рассеяние нейтрино электронами и нуклонами, глубоконеупругое рассеяние нейтрино нуклонами. Даже малая доля неречисленного наводит на мысль, что взаимодействие Ферми, ответственное за бета-распад, является специальным случаем более общего

4-фермионного взаимодействия. (Отдельная глава настоящей статьи как раз и посвящается возникновению понятия слабого процесса и первому изучению распада мюона и поглощения мюона нуклоном.) Далее было найдено, что имеются слабые процессы, в которых нейтрино не участвуют: нелептонные распады странных частиц и др. частиц, слабые силы между нуклонами и т. д.

2. Существуют, по крайней мере, три типа лептонов e , μ и τ и соответствующих им нейтрино — ν_e , ν_μ и ν_τ , два типа из которых наблюдались в свободном виде при изучении их соударений с нуклонами ($\tilde{\nu}_e$ от реакторов и ν_e от Солнца и ускорителей, ν_μ , $\tilde{\nu}_\mu$ — от ускорителей). (Радиохимическому методу детектирования ν_e и возникновению физики высоких энергий и посвящены две главы настоящей статьи.)

3. В слабых процессах нет инвариантности ни по отношению к изменению знаков координат P ни по отношению к изменению знаков всех зарядов C хотя законы природы (почти) инвариантны по отношению к комбинированной инверсии CP , которая одновременно меняет знаки координат и зарядов. Несохранение четности подразумевает продольную поляризацию частиц. Итак, родилась теория двухкомпонентного (или продольного) нейтрино Ландау, Ли-Янга и Салама, которая суть старая (1929 г.) теория Вейли, теперь заслужившая доверие (благодаря несохранению четности). Хорошая модель нейтрино, согласно этой теории — продольный (т. е. всегда влево или вправо вращающийся) винт. Гольдхабером экспериментально было доказано, что нейтрино — левые частицы. Антинейтрино — правые частицы. Таким образом, у нас есть только два состояния, а не четыре, как это было бы для настоящего винта (винт левый, винт правый, антивинт левый, антивинт правый).

Важность продольного (безмассового) нейтрино и состоит в том, что оно указывает нам прототип поведения всех других (массивных) фермионов в слабом взаимодействии. Простое mnemonic правило звучит так: при слабом взаимодействии все фермионы — левые, а все антифермионы — правые. Нейтриноподобное поведение фермионов — главное физическое содержание известного универсального слабого взаимодействия $V - A$ Фейнмана — Гелл-Манна и Маршака — Сударшана. Как мы видели, слабое взаимодействие по аналогии с электродинамикой описывается в терминах векторных операторов, действующих на волновые функции частиц. При этом имеются две амплитуды: V — исходная амплитуда Ферми, которая обладает свойствами пространственного преобразования полярного вектора (т. е. меняет знак при инверсии координат), в то время как другая амплитуда A имеет свойства аксиального вектора (не меняет знака при инверсии координат). Именно сосуществование V и A и означает несохранение четности.

Итак, слабый ток, который в оригинальной работе Ферми был чисто векторным, на самом деле является суммой векторного и аксиально-векторного (последний строится с помощью матрицы $\gamma_\mu \gamma_5$, где $\gamma_5 = i\gamma_0\gamma_1\gamma_2\gamma_3$).

Теперь я хотел бы на короткое время вернуться к Ферми и поставить такой вопрос: что случилось бы, если бы (в 1954 г.) судьба подарила ему еще несколько лет жизни? Думаю, что вероятнее всего он изобрел бы двухкомпонентное нейтрино, но я не уверен в этом. Однако, я совершенно уверен в том, что Ферми сделал бы следующий шаг вперед, создав теорию $V - A$. Он не только начал все это дело в 1933 г., но в середине пятидесятих годов он, будучи одновременно теоретиком и экспериментатором, лучше и быстрее других мог бы осознать, что те опыты, результаты которых были несовместимы с формулировкой универсальной теории, являлись ошибочными.

4. Адроны смешаны, т. е. в слабом взаимодействии участвуют когерентно смешанные адроны. Используя кварковые обозначения, можно записать в следующем виде адронный заряженный ток: $\bar{u}(d \cos \theta + s \sin \theta) + \bar{c}(-d \sin \theta + s \cos \theta) + \dots$, где θ — угол Кабиббо ($\sim 15^\circ$), \bar{u} — оператор рождения u — кварка, d — оператор уничтожения d -кварка и т. д.

Итак, лагранжиан слабого взаимодействия: $L_W = \frac{G}{\sqrt{2}} J_W J_W^\dagger$, где $J_W = \bar{e} \nu_e + \bar{\mu} \nu_\mu + \bar{\tau} \nu_\tau + \dots + \bar{u}(d \cos \theta + s \sin \theta) + \bar{c}(-d \sin \theta + s \cos \theta) + \dots$; $J_W^\dagger = \tilde{\nu}_e e + \bar{\nu}_\mu \mu + \bar{\nu}_\tau \tau + \dots + (\bar{d} \cos \theta + \bar{s} \sin \theta) u + (-\bar{d} \sin \theta + \bar{s} \cos \theta) c + \dots$ и каждый член — сумма V - и A -типа $\bar{e} \gamma_\mu (1 + \gamma_5) \nu_e$ и т. д. Еще раз, этот лагранжиан — обобщение фермиевского (с незначительными, но очень существенными дополнениями), в котором учитываются «постфермиевские» экспериментальные данные. Он прекрасно объясняет все данные, относящиеся к *заряженному току*, чему бета-распад а $1a$ Ферми был первым примером. Довольно вероятно, что не только кварки, но и лептоны смешаны, с важными последствиями, относящимися к вопросам о возможности существования явления осцилляций нейтрино, процесса безнейтринного двойного бета-распада и о характере (дираковском или майорановском) массы нейтрино. Две отдельные главы настоящей статьи и посвящаются этим моментам.

Здесь следует подчеркнуть, что теория продольного нейтрино с массой, тождественно равной нулю, прекрасно описывает все известные экспериментальные данные, кроме результата уже упомянутого опыта, выполненного Любимовым и др.¹³ в ИТЭФ. Нейтрино с массой меньше 50 эВ вполне допускают все без исключения опыты. При этом отличные от нуля маленькие массы нейтрино находятся в рамках современных теоретических представлений (речь идет о «великом объединении» электромагнитных, слабых и сильных взаимодействий).

5. Теперь я должен был бы упомянуть о самом важном постфермиевском открытии — открытии нейтральных токов, сделанном в ЦЕРНе и подтвержденном в Фермилаб на нейтринных пучках высоких энергий. Мне хотелось бы сказать, что нейтральные токи обсуждались давным-давно, еще до того, когда была предложена теория электрослабых взаимодействий Вайнберга — Глэшоу — Салама. Но открытие нейтральных токов было, главным образом стимулированием этой теории. Я не буду сейчас углубляться в детали: для читателя будет интереснее прочесть нобелевские доклады Вайнберга, Глэшоу и Салама.

Феноменологические же нейтральные токи симметричного типа $\bar{e}e$, $\bar{\nu}\nu$, $\bar{u}u$, ... обсуждались, например, Блудманом¹⁴. Рассмотрение симметричных нейтральных токов было естественным. Из-за подавляющего фона электромагнитных процессов никто не мог доказать, что такие токи присутствуют (за исключением как раз случая, когда рассматриваются безмюонные события под действием нейтрино — тот случай, который и привел к открытию нейтральных токов). Я обсуждал даже некоторые астрофизические следствия таких токов в 1962 г. Конечно, было ясно, что нет асимметричных недиагональных нейтральных токов (нет процессов типа $K^+ \rightarrow \pi^+ + \nu + \bar{\nu}$, $K^+ \rightarrow \pi^+ + e^+ + e^-$...). Я просто думал, что асимметричные нейтральные токи некрасивы, а симметричные — красивы. *GIM* еще не был изобретен.

Я хотел бы закончить двумя замечаниями.

а) Самый первый опыт с нейтрино высоких энергий был выполнен в Дубне с целью зарегистрировать как раз (симметричные) нейтральные

токи, правда, на уровне в 10^4 больше, чем ожидаемы от заряженных токов¹⁵. Это все, что мы могли сделать на ускорителе малой интенсивности, который был в нашем распоряжении. А надежда была на аномальное взаимодействие ν_μ с нуклонами¹⁶.

б) Нейтральные токи искали (они не были найдены!) в течение многих лет, например, в ЦЕРНе, конечно, до того, как «стратегия» Глэшоу, Салама и Вайнберга не стала популярной.

5. МАЙОРАНА

В 1937 г. Майорана поставил очень 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 слов о третьем гиганте — Этторе Майорана, личность которого может вызвать 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 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 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 окончиться не так трагически, если бы ему приходилось 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 принять участие в конкурсе на университетскую кафедру. Статью, о которой идет речь, 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. Теперь я вернусь к физике.

В конце пятидесятых и в шестидесятые годы часто высказывалось мнение, что нейтрино а la Майорана — объект, хотя и красивый и инте-

ресный, но в природе не реализуется. 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 написана только по-итальянски.

СИММЕТРИЧНАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОНА И ПОЗИТРОНА

Э. Майорана

(Nuovo Cimento, 1937, v. 5, pp. 171—184)

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 при описании новых частиц (в особенности нейтральных) предполагать существование «античастиц», соответствующих «дыркам» с отрицательной энергией.

Интерпретация так называемых «состояний с отрицательной энергией», предложенная Дираком (Dirac A.—Proc. Cambr. Phil. Soc., 1924, v. 30, p. 150; см. также Heisenberg W.—Zs. Phys., 1934, Bd. 90, S. 209), как хорошо известно, приводит к описанию электронов и позитронов, которое 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., Zs. Phys., 1928, Bd. 47, S. 63) 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 и 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 существования антинейтронов или антинейтрино. Последние действительно используются в теории бета-распада с испусканием позитронов (см. *Wick G. C.*, *Rend. Acad. 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 деятельности 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 только понятие электрического заряда. Именно Майорана первым ввел явно 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, Майорана, поставив вопрос об электрически нейтральных фермионах, описываемых либо его теорией, либо теорией Дирака, 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 явной форме понятия барионного и лептонного зарядов были введены только в 1949¹⁷ и в 1953¹⁸ гг.

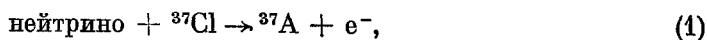
Из одной фразы Майораны, которую я цитировал выше, видно, что он определенно имел в виду следующий вопрос: может ли быть установлена с помощью современных (1937!) экспериментов природа фермионов: майорановские они или дираковские? Касаясь этого вопроса, я буду рассматривать прежде всего нейтрино, оставляя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

а) продольную поляризацию нейтрино¹⁹, связанную с несохранением четности (1957), и

б) возможность небольшого нарушения закона сохранения (лептонного) заряда и связанную с этим возможность существования нестационарных нейтринных состояний — так называемое явление осцилляций нейтрино²⁰ (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 β -лучами, поглотиться ядром

датов на мишени, среди которых наиболее подходящими оказались соединения хлора. Соответствующая реакция выглядит следующим образом:



где ${}^{37}\text{A}$ распадается путем K -захвата с высвобождением 2,8 кэВ энергии в виде рентгеновских лучей и электронов Оже. Я написал здесь нейтрино, а не ν_e , потому что вопрос о том, отличается ли ν от $\bar{\nu}$ был еще неясен *). Имеется множество практических доводов в пользу ${}^{37}\text{Cl}$ я не буду перечислять их здесь. Однако один из них не был мне известен априори, он был открыт случайно. Для испытаний будущего нейтринного детектора мы обычно в реакторе приготавливали ${}^{37}\text{A}$ 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 ${}^{37}\text{A}$ причем напряжение на счетчике было много ниже гейгеровского порога. Таким образом мы обнаружили 27 (независимо от Каррена и др. в Глазго) пропорциональный режим при очень высоком газовом усилении ($\sim 10^6$). Это было, разумеется, крайне важно с точки зрения детектирования нейтрино, поскольку позволило 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 (α -частицы и т. п.) велика, но абсурдно, если она соответствует всего нескольким парам ионов.

В моей статье ⁴ 1946 г. я уже рассматривал в качестве источников нейтральных лептонов не только мощные реакторы, а также концентрат радиоактивных элементов, извлеченных из реактора, но и Солнце.

Я обсуждал хлор-аргонный метод (включая возможности, предоставляемые Солнцем) с Ферми в Чикаго (кажется в 1948 г.) и позднее в 1949 г. на конференции в Базеле-Комо. Ферми совсем не был энтузиастом применения этого метода к нейтрино, но ему очень понравились наши пропорциональные счетчики, с помощью которых мы вместе с Ханна впервые наблюдали L -захват в ${}^{37}\text{A}$ (250 эВ, 10 ионных пар) ²⁸ и измерили спектр трития, по тем временам существенно понизив верхний предел для массы нейтрино ¹¹. Оглядываясь назад, я очень хорошо понимаю реакцию Ферми. Кажется, Сегре сказал, что Дон Кихот не был героем Ферми. Он не мог отнестись с симпатией к эксперименту, который хотя и закончился блестяще, благодаря героическим усилиям Р. Дэвиса ²², но, много, много лет спустя после того, как был задуман.

Теперь я вернусь к вопросу о том, могут ли реакторные антинейтрино вызвать реакцию (1). Как-то в 1947 или 1948 г. я проезжал через Цюрих и завтракал с Прайсверком и Паули. Я рассказал Паули о моих планах с хлор-аргонным 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 низ-

*) Вопрос до сих пор не ясен (1982), но уже на другом уровне. Сегодня «феноменологический» ответ гласит, что $\nu \neq \bar{\nu}$ в том смысле, что нейтральный лептон, испускаемый в β -распаде совместно с электроном, имеет спиральность, отличную от спиральности нейтрального лептона, испускаемого совместно с позитроном в β^+ -распаде. Однако, как показано в предыдущей главе, такой ответ не решает важнейшей проблемы современной нейтринной физики: имеет ли нейтрино майорановскую массу, иными словами, являются ли частицы, описываемые собственными состояниями масс, частицами Майораны?

ким фоном, имея в виду как эту задачу, так и проблему Солнца. Я помню, как Камерини, который в то время работал в Бристоле и был большим специалистом по «звездам», образуемым космическими лучами, помог мне рассчитать космический фон в различных хлор-аргонных 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}Ar . 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 Р. Дэвиса на конференции «Нейтрино-72» в Венгрии.

Раз уж зашла речь об интерпретации экспериментов с солнечными нейтрино, в следующей главе я расскажу о возможном явлении осцилляций нейтрино, которое, если оно существует, будет играть важную роль в физике нейтрино и в нейтринной астрономии.

7. ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО И СОЛНЦЕ

В 1957—1958 гг. я впервые рассмотрел осцилляции типа мюоний \rightleftharpoons антимюоний и мне стало ясно, что осцилляции в физике частиц могут иметь место не только в случае бозонов ($K^0 \rightleftharpoons \bar{K}^0$, $\mu^+e^- \rightleftharpoons \mu^-e^+$), но и в случае электрически нейтральных фермионов. При этом хорошим кандидатом, по моему мнению, были бы осцилляции нейтрино²⁰. В то время еще не было известно, что, по крайней мере, существует два типа нейтрино. Тогда царила теория продольного (двухкомпонентного) безмассового нейтрино, которая не допускает осцилляций. Однако если имеются отклонения от теории продольного нейтрино, то массы нейтрино конечны, и осцилляции могут иметь место. В соответствии с этим мною были рассмотрены осцилляции (максимальной амплитуды) $\nu \rightleftharpoons \bar{\nu}_{\text{стер}}$ и соответственно введено понятие стерильности нейтрино. Частицами с определенными массами в этом случае являются две частицы Майорана ν_1 , ν_2 с различными массами m_1 и m_2 при этом длина осцилляций была выражена через m_1 и m_2 и энергию нейтрино $E \gg m_1, m_2$.

К вопросу об осцилляциях нейтрино я возвратился в середине 60-х годов. В то время мне стало совершенно ясно, что возможное явление осцилляций имеет первостепенную важность для постановки опытов по проблеме конечных нейтринных масс и возможного несохранения лептонного заряда, а также для астрофизики. Я не видел принципа, требующего нулевой массы нейтрино, и поэтому малая, но конечная масса нейтрино казалась мне не менее красивой возможностью, чем нулевая масса. Выделено ли нейтрино (нулевая масса!) среди фермионов или нет (конечная масса!) — вот вопрос, который следовало решить экспериментом. В то время над проблемой осцилляций нейтрино я работал в тесном контакте с сотрудниками ИГЭФ И. Кобзаревым и Л. Окунем, которым я хочу

было дано объяснение *ad hoc* в терминах осцилляций нейтрино. Все произошло немного иначе. В действительности я, поверив в возможную реальность осцилляций нейтрино, предсказал²⁹, что может появиться нехватка вплоть до множителя $1/2$ нейтрино от Солнца в будущих опытах Дэвиса. Мне очень хотелось бы, чтобы «загадка солнечных нейтрино» была реальной, но, боюсь сегодня, как и много лет назад, что ожидаемая интенсивность нейтрино от Солнца по объективным причинам недостаточно хорошо известна для уверенного утверждения о нехватке.

Кстати, в 70-х годах я нашел дополнительным механизм³⁶ усиливающий возможную нехватку регистрируемых солнечных нейтрино. Тогда были известны только два аромата нейтрино, так как τ -лептон еще не был обнаружен. Я рассмотрел возможность существования новых лептонов и показал, что, если присутствуют N типов нейтрино, поля которых максимально смешаны, то интенсивность I детектируемых нейтрино от Солнца будет в N раз меньше ожидаемой в отсутствии осцилляций интенсивности I_0 . Эта возможность широко обсуждалась в последние годы в связи с «загадкой солнечных нейтрино». Курьезными являются заключительные слова моей оригинальной работы «Тяжелые лептоны и нейтринная астрономия» (Письма ЖЭТФ, 1971, т. 13, с. 281: «К счастью, теоретическая схема, которая могла привести к такому печальному ($I = I_0/N$ — Б. П.) для нейтринной наблюдательной астрономии следствию, эстетически непривлекательна, и можно надеяться на то, что она в природе не реализуется». Я думаю так и сегодня.

Количественно вопрос об осцилляциях в присутствии N ароматов нейтрино обсуждался Биленьким и мною³⁷ для общего случая, когда, наряду с осцилляциями аромата имеют место осцилляции лептонного числа (так что совместно с активными состояниями существуют и стерильные). Число массивных нейтрино Майорана в этом случае равно $2N$, а при максимальном смешивании может быть детектирована только доля $1/2N$ всех нейтрино. Мы знаем теперь три аромата нейтрино, так что интенсивность детектируемых солнечных нейтрино может достичь такой маленькой величины, как $1/6$ полной интенсивности. Вновь кажется маловероятным, что такая возможность реализуется в природе. В последнее время Биленький и я обсуждали более реалистичный случай³⁴, когда детектируемое число нейтрино от Солнца равно $1/2$ от полного числа нейтрино.

Следующая часть настоящей главы — полемическая по характеру. Она касается вопросов приоритета. Я написал ее для специалистов. Может быть, и не следовало об этом говорить, если бы не было игнорирования или искажения дубненских работ 50-х годов, а также 60-х и 70-х годов некоторыми физиками и авторами популярных статей. Тематика осцилляций нейтрино, точнее, вопрос о приоритете в области осцилляций, вошли в такие известные журналы, как «Physics Today», «Scientific American», «Science News» и др., а это обстоятельство, как я надеюсь, оправдывает мою смехотворную тираду!

Итак, летом 1980 г. я находился в Италии, на крупных международных конференциях по физике нейтрино в Эриче и по физике элементарных частиц в Триесте. В некоторых докладах по осцилляциям нейтрино дубненские работы отдельными авторами фактически игнорировались. Это показалось мне тем более странным, что содержание, формулы, феноменология, а иногда даже жаргон в этих докладах были в большой мере дубненскими. Я даже утешал себя мыслью о том, что наши работы так хорошо известны, что уже не цитируются. Но я ошибся. По возвращении в Дубну я начал читать литературу с весны 1980 г. Из ряда статей, опубликованных в различных серьезных научных и научно-популярных жур-

налах, я узнал, что мои статьи 50-х годов не представляют интереса и, в частности, что мне не принадлежит приоритет в осцилляциях нейтрино. В чем дело? Я понял это позже, когда мне довелось видеть транскрипцию, а позже — читать доклад Сандика Паквазы на XX международной конференции по физике высоких энергий 17—23 июля 1980 г. (Медисон, Висконсин): «моя вина» состоит в том, что в 50-х годах я не рассматривал нейтринных осцилляций аромата.

Я должен сказать здесь несколько слов, поскольку мои работы 50-х годов были представлены в докладе С. Паквазы³⁸ вводящим в заблуждение способом. Если я не отвечу, могут подумать, что я согласен с ним. Кратко, С. Пакваза утверждает, что я предлагал «настоящие осцилляции» $\nu_{eL} \rightleftharpoons \bar{\nu}_{eR}$. Но таких осцилляций нет и они не могут быть. Я никогда не выражался такими словами. Они полностью принадлежат С. Паквазе. Я хорошо понимаю, что сегодня люди не располагают временем даже для того, чтобы прочесть статьи, которые цитируют. Однако, если уж С. Пакваза хотел обсуждать содержание моей работы, имея в виду вопросы приоритета, то он был бы обязан не делать ни дополнений, ни существенных опущений. Я должен привести некоторые цитаты из моих работ 1957—1958 гг., выполненных когда был известен только один тип нейтрино, чтобы доказать, что я имею в виду.

«Если теория двухкомпонентного нейтрино оказалась бы несправедливой (что в настоящее время является мало вероятным) и если бы не имел места закон сохранения нейтринного заряда (под этим понимается закон сохранения лептонного заряда — *Б. П.*), то, в принцип переходы нейтрино-антинейтрино в вакууме возможны» (ЖЭТФ, 1957, т. 33, с. 551).

«Из сделанных предположений следует, что нейтрино в вакууме может переходить в антинейтрино, и наоборот. Это означает, что нейтрино и антинейтрино являются «смешанными» частицами, т. е. симметричной и антисимметричной комбинацией двух истинно нейтральных частиц Майорана ν_1 и ν_2 имеющих разную комбинированную четность» (ЖЭТФ, 1958, т. 34, с. 248).

«Таким образом, если R (длина осцилляций — *Б. П.*) ≤ 1 м в опыте Коуэна и Райнеса сечение для образования нейтронов и позитронов при поглощении водородом нейтральных частиц от реактора должно быть меньше сечения, ожидаемого на основании простых термодинамических соображений. Это связано с тем, что поток нейтральных лептонов, который при рождении способен с известной вероятностью вызвать реакцию, изменяет свой состав по пути от реактора до детектора. Крайне интересно было бы поставить опыт на разных расстояниях от реактора. С другой стороны, трудно предсказать влияние реальных переходов антинейтрино-нейтрино на опыт Дэвиса, так как здесь речь не идет о строго обратном бета-процессе и существенными могут оказаться такие неизвестные факторы, как поляризация и энергетическая зависимость поляризации нейтральных лептонов от реактора и от перехода $A^{37} \rightarrow Cl^{37}$ » (ЖЭТФ, 1958, т. 34, с. 248).

«Эффекты превращений нейтрино в антинейтрино могут быть ненаблюдаемы в лаборатории из-за большой величины R , но будут иметь место в астрономических масштабах» (ЖЭТФ, 1958, т. 34, с. 149).

Может быть, С. Пакваза не понял сути моих статей. Но тогда каким образом мог он стать соавтором статьи В. Баргера, Р. Ландаскера, Г. Лейвима, С. Паквазы, опубликованной в «Phys. Rev. Lett.», 1980, v. 45, p. 692? И действительно, главное содержание этой статьи — введение стерильности нейтрино, сделанное мною уже в 1958 г., и количественное описание осцилляций нейтрино в общем случае N активных и N стерильных нейтрино, уже данное в дубненских работах³⁷ 1976 г. (совместно

с упоминавшимися выше применениями к Солнцу). Кстати, эти осцилляции в 1980 г. были почему-то окрещены С. Паквазой и сотр. «осцилляциями второго рода». Самым вероятным, мне кажется, что из-за своего предвзятого мнения С. Пакваза в 1980 г. не хотел или не мог поверить в то, что в 1958 г. я придумал стерильные нейтрино и совершенно «законные» осцилляции нейтрино.

В заключение я хотел отметить, что сегодня вопрос об осцилляциях нейтрино стоит очень остро, и во всем мире выполняются и готовятся эксперименты по поискам этого явления. Теоретически конечные массы нейтрино и осцилляции нейтрино приветствовали бы адепты Великого Объединения слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий, т. е. большинство физиков. С экспериментальной точки зрения сегодня нет никаких окончательных указаний на наличие осцилляций. Будущее поколение опытов с нейтрино от Солнца — это самая обещающая перспектива.

В Дубне мы по-настоящему поверили в важность осцилляций, в частности, докладывали систематически на крупных международных конференциях³⁹ об осцилляциях, даже когда эта тематика еще не была модной. Мы не меняли нашего мнения

8. ПОНЯТИЕ СЛАБОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И «ДРЕВНЕЕ» ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ МЮОНОВ

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 Пиччони⁴⁰, и будет рассказано 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) и 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 вопросу⁴¹, я был буквально пленен частицей, которую мы теперь называем мюоном. Это была действительно интригующая частица: «заказанная» Юкавой и открытая Андерсоном, она, как обнаружили Конверси и др., в действительности не имела ничего общего с частицей Юкавы! Я почувствовал себя 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 ⁴² 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 бета-процессу, и описывается реакцией*) $\mu^- + p \rightarrow \text{нейтрино} + n$; 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» мюоном, как образно и точно выразился Вайскопф ⁴³, по какой-то причине также не достигший цели. Им является, конечно, пион. Правильный ответ был дан вскоре Маршаком и Бете ⁴⁴ в их замечательной статье «О гипотезе двух мезонов», опубликованной примерно в то время, когда произошло эпохальное открытие пиона и $\pi \rightarrow \mu + \nu$ — μ -распада (Латтес, Оккиалини и Пауэлл) ⁴⁵.

То, что процессы ядерного захвата мюона и электрона очень похожи, т.е. что оба они являются «слабыми процессами», мне, а затем и нескольким другим физикам ⁴⁶ 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 ⁴⁷, дополненной углом смешивания Кабиббо!).

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 ⁴⁸, 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 В. Саргент (физик, который открыл правило, связывающее вероятность β -распада с энергией вылетающих электронов) благожелательно относился к нашей деятельности. И все же я не могу забыть, как неохотно мы с Тедом тратили лабораторные средства и как были счастливы, когда Тед изобрел «пороговый усилитель», который сэкономил много счетчиков, позволив существенно увеличить эффективность детектирования фотонов, испускаемых

*) Потребовалось 15 лет для того, чтобы реакции $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$ и $\mu^- + \text{He}^3 \rightarrow \text{He}^3 + \nu_\mu$ определенно наблюдались, соответственно, в опытах Р. Хильдебранда и в наших экспериментах совместно с Р. Суляевым и др.

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 $\mu \rightarrow e\gamma$ не происходит (мы искали запаздывающие электрон-фотонные совпадения⁴⁹; 2) что при распаде мюона испускаются три частицы, e, ν, ν' (мы измеряли спектр электронов методом поглощения)⁵⁰; 3) что заряженная частица, испускаемая в распаде мюона, действительно является электроном (мы измеряли интенсивность его тормозного излучения)⁵⁰. Первые два результата были получены независимо от нас также другими группами авторов^{51, 52}. 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, 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 почувствовать по названию одной из наших статей: «О стабильности нейтрального мезона». В этой работе⁵³ мы показали, что нейтральный мезон, существование которого тогда считалось возможным, либо вовсе не испускается при распаде мюона, либо время жизни его при распаде на два фотона не меньше 10^{-10} с.

В заключение этих далеких не полных и субъективных воспоминаний о некоторых ранних мюонных исследованиях я должен упомянуть о теоретической работе, которая была и до сих пор остается очень важной: введении Мишелем параметра ρ для распада мюонов⁵⁴, или, в более общем смысле, описание Мишелем процессов, в которых участвуют два реальных нейтральных лептона.

После появления первых ускорителей на релятивистские энергии пионы и мюоны начали получать искусственно. В пятидесятые годы их свойства стали исследовать в условиях, несравненно более благоприятных, чем прежние, но я не собираюсь рассказывать эту историю, вершиной которой было эпохальное (теоретическое⁴⁹ и экспериментальное⁵⁵) открытие спиральности нейтрино.

9. 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 ускорителях очень высоких энергий.

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ в 1958 г. проектировался протонный релятивистский циклотрон с энергией пучка 800 МэВ и током 500 мкА. В конечном счете этот ускоритель 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 программу можно выполнить, «высаживая» протонный пучок в большом железном блоке, 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 мною более 20 лет назад для ускорителя, который так и не был построен.

Об одном из экспериментов, который предназначался для выяснения вопроса, различны ли ν_e и ν_μ , я хотел бы рассказать 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, ν и ν' 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 многие теоретики забыли об этом и некоторые из них вновь изобрели два нейтрино, но такие люди, как Бернардini, 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 ν_e всегда выступает партнером электрона, а ν_μ — мюона. Я достаточно ясно сформулировал, как осуществить решающий эксперимент, используя пучки мюонных нейтрино⁵⁶. Предполагалось искать мюоны и электроны, рождаемые в веществе мюонными нейтрино; если $\nu_e \neq \nu_\mu$, то окажется, что рождающихся электронов должно быть много меньше 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.

В 1959 г. только некоторые ученые, среди которых Я. Зельдович и Ж. Лейте Лопес, думали, что промежуточный мезон имеет массу ~ 100 ГэВ, а обычно считалось (без серьезных на то оснований), что его масса — несколько 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 энергий⁵⁷. Теоретически это предложение основывалось на том, что при достаточно больших энергиях в сечении рождения промежуточного бозона с помощью нейтрино должно появляться G вместо G^2 . Как известно, вопрос о промежуточных бозонах будет решен не в нейтринных экспериментах, а в $\bar{\nu}\nu$ -встречных пучках. Проблема же двух типов нейтрино была разрешена в Брукхейвене в блестящих экспериментах Ледермана, Шварца, Штейнбергера и др. (1962).

10. ПРЯМЫЕ НЕЙТРИНО И ОПЫТЫ «БИМ-ДАМП»

Метод «бим-дамповых» опытов состоит в том, что регистрируются «прямые» (т. е. не от распада каонов и пионов) нейтрино от лептонных распадов короткоживущих частиц, скажем, от шармированных частиц⁵⁸. В «бим-дамповых» опытах, которые были выполнены в Серпухове и в ЦЕРНе (четырьмя группами), впервые было наблюдеено и исследовано образование шармированных частиц в нуклон-нуклонных соударениях.

Это чудо, осознать которое вам поможет аналогия с другими гипотетическими случаями: когда Резерфорд впервые наблюдал β -распад ядер, представьте себе, что он не зарегистрировал электроны, но наблюдал нейтрино из источника интенсивностью $\gg 10^9$ Кюри! Или представьте себе, что Латтес, Оккиалини и Пауэл впервые наблюдали распад пиона

после того, как они спроектировали и создали современную установку для нейтрино высоких энергий (протонный ускоритель, туннель распада, железная защита и мультитонный нейтринный детектор) вместо того, чтобы просто наблюдать мюоны от распада пиона!

11. АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ СЦЕНАРИЙ РАЗВИТИЯ НЕЙТРИННОЙ ФИЗИКИ?

Теперь я хотел бы представить вам сценарий развития физики слабых взаимодействий, который не реализовался, но который, как я думаю, мог бы реализоваться. Такой сценарий, может быть, будет трепать нервы тех читателей, которые работают в области нейтринной физики очень высоких энергий. Кстати, я играю роль адвоката дьявола, поскольку сам очень люблю нейтринную физику высоких энергий.

Я знаю великого ученого, Петра Леонидовича Капицу, который сейчас думает, что, если опыт слишком дорог и громоздок, его не нужно делать: с течением времени проблема будет решена проще. Предположим, что в начале 60-х годов обществу физиков представилось бы, что нейтринные опыты при очень высоких энергиях слишком дороги и громоздки. Далее предположим, что это общество имело бы следующее мнение: физика нейтрино относительно дешевым образом может развиваться на «мезонных фабриках», которых создается все больше и больше, а также на ядерных реакторах. При этом допустим, что «всемирное министерство науки» в 60-х годах решило бы не отпускать средств на физику нейтрино высоких энергий, одновременно содействуя развитию физики нейтрино низких и средних энергий. Не надо большой фантазии, чтобы ответить на вопрос о том, какие успехи последовали бы за этим. Для сравнения рассмотрим путь, указанный существенными результатами физики нейтрино очень высоких энергий:

1. $\nu_e \neq \bar{\nu}_\mu$: этот результат был бы получен на «мезонной фабрике», правда, по крайней мере на 10 лет позже. Кстати, ν_τ был обнаружен в опытах на встречных электрон-позитронных пучках.

2. Структура нуклона: без опытов с нейтринными пучками очень высоких энергий наши знания были бы неполными. При этом, однако, не надо забывать об очень важной информации, полученной при изучении глубоконеупругого рассеяния электронов (и мюонов) на нуклонах.

3. Нейтральные токи: они обсуждались рядом физиков с феноменологической точки зрения еще до теории электрослабого взаимодействия. Эта теория, без сомнения, была создана независимо от опытов с нейтрино высоких энергий. Сохранение четности в атомах, предсказанное Зельдовичем⁵⁹, наблюдалось в Новосибирске⁶⁰ в согласии с теоретическими ожиданиями Глэшоу — Салама — Вайнберга. Это трудный и красивый опыт, но дешевый. Красивый опыт⁶¹, выполненный в СЛАКе по рассеянию поляризованных электронов на нуклонах, дал точную величину $\sin^2 \theta_W$. На реакторах и мезонных фабриках в настоящее время нейтринные опыты по нейтральным токам выполняются и планируются. Конечно, если бы в ЦЕРНе не были выполнены опыты с нейтрино высоких энергий по нейтральным токам, отсутствовали бы точные значения $\sin^2 \theta_W$, что было бы серьезной потерей.

4. Без нейтринных опытов при очень высоких энергиях не было бы исследовано образование странных и шармированных частиц нейтрино. Однако большинство наших знаний по физике, связанной с лептонными распадами странных и шармированных частиц, мы получили путем исследований на адронных пучках и на электрон-позитронных встречных пучках.

Итак, я подвожу итог: то что действительно случилось в физике нейтрино очень высоких энергий — недешево, но очень ценно. Затрата средств оправдана, но не надо ни недооценивать важность физики нейтрино высоких энергий, ни переоценивать ее. Это не пессимизм, а призыв избегать рутины.

12. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отличие от того времени, когда физика нейтрино высоких энергий только родилась, 20 лет назад, в настоящее время это здоровая и крупная область физики, в которой количественный аспект доминирует. Тот факт что нейтрино трудно зарегистрировать (в отличие от других долгоживущих частиц), приводит к тому, что исследования в физике нейтрино высоких энергий необычайно сложные и дорогие. Поэтому программу исследований на пучках нейтрино очень высоких энергий следует составлять очень тщательно.

Необходимы не только новые идеи в постановке опытов, но также новые идеи в создании пучков (меченые нейтрино?...) и детекторов (гигантские жидкостные детекторы?...).

Не случайно, что три из самых перспективных экспериментов в физике нейтрино, результаты которых ожидают с нетерпением во всем мире, находятся вне области физики высоких энергий:

1. Точное измерение бета-спектра трития.
2. Поиски безнейтринного двойного бета-распада.
3. Поиски осцилляций солнечных нейтрино.

Существование конечных нейтринных масс было бы не только важным для физики элементарных частиц, но также породило бы революцию в космологии, астрофизике и нейтринной астрономии Солнца.

Ниже перечисляются 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 майорановскую массу (в этом случае отсутствуют лептонные заряды) или все имеют дираковские массы? Может быть, некоторые нейтрино имеют майорановские массы, а другие — дираковские?

4. Сколько имеется различных типов нейтрино?

Эти вопросы стоят уже долгое время. Однако не похоже, чтобы определенные ответы на все вопросы были получены в ближайшем будущем.

Мне приятно поблагодарить Э. Белотти, К. Берквист, С. Биленького, С. Бунятова, А. Вовенко, А. Гринберга, Г. Домогацкого, Л. Окуня, С. Петкова, А. Салама, Б. Явелева, С. Ярлског за полезные замечания.

Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна (Московская обл.)

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Международная конференция по нейтринной физике и астрофизике v'80, Эриче, июнь 1980 г.
2. Международный коллоквиум по истории физики элементарных частиц. Париж, июль, 1983 г.
3. Bethe H., Peierls R.— Nature, 1934, v. 133, p. 532.
4. Pontecorvo B.— Nat. Res. Council Canada, 1946, Report PD 205.
5. Leipunsky A.— Proc. Cambr. Phys. Soc., 1936, v. 32, p. 301.

6. Паули В. Письмо от декабря 1930 г. физикам, собравшимся на встречу в Тюбингене. Среди них были Г. Гейгер и Л. Мейтнер. Содержание письма обсуждалось с 1930 г. Прочитать письмо можно, например, в статье: Brown L.— *Phys. Today*, 1978, v. 31, No. 9, p. 23.
7. Pauli W.— In: *Septieme Conseil de Physique Solvay 1933*.— P.: Gauthier-Villars, 1934.— P. 324.
8. Fermi E.— *Ricerca Sci.*, 1933, n°. 12, p. 2; *Zs. Phys.*, 1934, Bd. 88, S. 161.
9. Iwanenko D.— *C. R. Ac. Sci.*, 1932, t. 195, p. 439.
10. Perrin F.— *Ibid.*, 1933, t. 197, p. 1625.
11. Hanna G., Pontecorvo B.— *Phys. Rev.*, 1949, v. 75, p. 983.
12. Curran S. et al.— *Phil. Mag.*, 1949, v. 40, p. 53.
13. Bergkvist K.— *Nucl. Phys. Ser. B*, 1972, v. 39, p. 317.
13. Lubimov V., Novikov E. et al.— *Phys. Lett. Ser. B*, 1980, v. 94, p. 266.
Косик В. С., Любимов В. А. и др.— *ЯФ*, 1980, т. 32, с. 301.— В начале 1983 г. стало известно, что эта группа достигла выдающихся методических успехов (улучшение энергетического разрешения в два раза и большое уменьшение фона). По-видимому, в недалеком будущем вопрос о конечной массе нейтрино будет решен.
14. Bludman S.— *Nuovo Cimento*, 1958, v. 9, p. 433.
15. Vasilovsky I. et al.— *Phys. Lett.*, 1962, v. 1, p. 345.
16. Кобзарев И. Ю., Окунь Л. Б.— *ЖЭТФ*, 1961, т. 41, с. 1205.
17. Wigner E.— *Proc. Am. Phil. Soc.*, 1949, v. 93, p. 521.
См. также: Stückelberg E.— *Helv. Phys. Acta*, 1939, v. 11, p. 225.
18. Weyl H.— *Zs. Phys.*, 1929, Bd. 56, S. 330.
18. Marx G.— *Acta Phys. Hung.*, 1953, v. 3, p. 56.
Зельдович Я. Б.— *ДАН СССР*, 1952, т. 86, с. 505.
18. Konopinsky E., Mahmoud H.— *Phys. Rev.*, 1953, v. 92, p. 1045.
19. Landau L.— *Nucl. Phys.*, 1957, v. 3, p. 127.
Lee T., Yang C.— *Phys. Rev.*, 1957, v. 105, p. 1671.
19. Salam A.— *Nuovo Cimento*, 1957, v. 5, p. 299.
20. Понтекорво Б. М.— *ЖЭТФ*, 1957, т. 33, с. 549; 1958, т. 34, с. 247.
21. Roca G.— *Nuovo Cimento*, 1937, v. 14, p. 322.
22. Davis R.— *Phys. Rev.*, 1955, v. 97, p. 766.
23. Furry W.— *Ibid.*, 1938, v. 54, p. 56.
24. Furry W.— *Ibid.*, 1939, v. 56, p. 1184.— Безнейтринный двойной бета-распад. Двойной бета-распад с испусканием двух нейтральных лептонов впервые рассматривался: Goerpert-Mayer M.— *Phys. Rev.*, 1935, v. 48, p. 512.
Ранее подробные теоретические исследования безнейтринного двойного бета-распада представлены Зельдовичем Я. Б. и др.— *УФН*, 1954, т. 54, с. 121, где можно найти и предыдущие ссылки на экспериментальные работы. Для современного состояния см.: Bellotti E.— In: *Proc. of the Intern. Conference of «Neutrino'82»*.— Balatonfüred, Hungary.— Budapest, 1982.— V. 1, p. 216.
25. Gell-Mann M., Pais A.— *Phys. Rev.*, 1955, v. 97, p. 1387.
26. Cowan C., Reines F., Harrison F., Kruse H., McGuire A.— *Science*, 1956, v. 124, p. 103.
27. Kirkwood D., Pontecorvo B., Hanna G.— *Phys. Rev.*, 1958, v. 74, p. 497.
Hanna G., Kirkwood D., Pontecorvo B.— *Ibid.*, 1949, v. 75, p. 985.
Pontecorvo B.— *Helv. Phys. Acta* — См.².
28. Pontecorvo B., Kirkwood D., Hanna G.— *Phys. Rev.*, 1949, v. 75, p. 982.
29. Понтекорво Б. М.— *ЖЭТФ*, 1967, т. 53, с. 1717; также в книге: *Old and New Problems in Elementary Particles: A volume dedicated to G. Bernardini*.— N. Y.: Academic Press, 1968.— P. 251.
30. Nakagawa M., Okonogi H., Sakata S., Tojida A.— *Progr. Theor. Phys.*, 1963, v. 30, p. 727.
31. Биленький С. М., Понтекорво Б. М.— *УФН*, 1977, т. 123, с. 181; *Phys. Rept.*, 1978, v. 41, p. 225.
32. Frampton P., Vogel P.— *Phys. Rept.*, 1982, v. 82, p. 339.
33. Gribov V., Pontecorvo B.— *Phys. Lett. Ser. B*, 1969, v. 28, p. 493.
34. Bilenky S., Pontecorvo B.— *Цит. в²⁴ в сб.*— V. 1, p. 35.
35. Понтекорво Б. М.— *УФН*, 1971, т. 3, с. 104.
36. Понтекорво Б. М.— *Письма ЖЭТФ*, 1971, т. 13, с. 281.
37. Биленький С. М., Понтекорво Б. М.— В кн. *Труды XVIII Международной конференции по физике высоких энергий*. Тбилиси, 1976; *Препринт ОИЯИ Е2-10032; Lett. Nuovo Cimento*, 1976, v. 17, p. 569.
38. Pakvasa S.— In: *XX Intern. Conference on High Energy Physics*. July 17–23, 1980: University of Wisconsin, Madison; Preprint UH-511-410-80.

39. Международная конференция по нейтринной физике и астрофизике, Москва, 1968; Труды международной конференции v'72. Балатонфюред, 1972; v'75, Балатонфюред, 1975; v'77. Долина Баксана, 1977; v'82. Балатонфюред, 1982; Труды «Рочестерских» конференций по физике высоких энергий: XV.— Киев, 1970; XVIII.— Тбилиси, 1976; Европейская конференция по физике высоких энергий. Будапешт, 1977.
40. Conversi M., Pancini E., Piccioni O.— *Phys. Rev.*, 1947, v. 71, p. 209.
41. Fermi E., Teller E., Weiskopf V.— *Ibid.*, p. 314.
42. Pontecorvo B.— *Ibid.*, v. 72, p. 246.
43. Klein O., Weiskopf V.— *Ibid.*, p. 510.
44. Marshak R., Bethe H.— *Ibid.*, p. 506.
45. Lattes G., Occhialini G., Powell C.— *Nature*, 1947, v. 160, p. 453.
46. Klein O.— *Nature*, 1948, v. 161, p. 897.
Puppi G.— *Nuovo Cimento*, 1948, v. 5, p. 587.
47. Marshak R., Sudarshan E.— *Phys. Rev.*, 1958, v. 109, p. 1860.
Feynman R., Gell-Mann M.— *Ibid.*, p. 193.
48. Cosmic Radiation/Ed. by W. Heisenberg.— N.Y.: Dover Publications, 1946.
49. Hincks E., Pontecorvo B.— *Phys. Rev.*, 1948, v. 73, p. 257; *Can. J. Res. Ser. A*, 1950, v. 28, p. 29.
50. Hincks E., Pontecorvo B.— *Phys. Rev.*, 1949, v. 75, p. 698; 1950, v. 77, p. 102.
51. Sard R., Althaus E.— *Ibid.*, 1948, v. 75, p. 1251.
Piccioni O.— *Ibid.*, v. 74, p. 1754.
52. Steinberger J.— *Ibid.*, v. 75, p. 1136.
Leighton R., Anderson C., Seriff A.— *Ibid.*, p. 1432.
53. Hincks E., Pontecorvo B.— *Ibid.*, 1948, v. 73, p. 1122.
54. Michel L.— *Proc. Roy. Soc. Ser. A*, 1950, v. 63, p. 514.
55. Garwin R., Lederman L., Weinrich M.— *Phys. Rev.*, 1957, v. 105, p. 1415.
Goldhaber M., Grodzins L., Sunyer A.— *Ibid.*, 1958, v. 109, p. 1015.
Wu C., Ambler E. et al.— *Ibid.*, 1957, v. 105, p. 1413.
56. Понтекорво Б. М.— *ЖЭТФ*, 1959, т. 37, с. 1751.
57. Pontecorvo B., Ryndin R.— In: *Proc. of Kiev Intern. High Energy Physics Conference.*— 1959.— P. 233.
58. Понтекорво Б. М.— См. ³⁵, в кн.: Труды международной конференции v'75, Балатонфюред, 1975.— Т. 2, с. 124.
59. Зельдович Я. Б.— *ЖЭТФ*, 1959, т. 36, с. 964.
60. Барков Л. М., Золотарев М. С.— *Письма ЖЭТФ*, 1978, т. 26, с. 379; 1981, т. 29, с. 544.
61. Prescott C. et al.— *Phys. Lett. Ser. B*, 1978, v. 77, p. 347.