

ФИЗИКА

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1985/7

А.А. Боровой
12 ШАГОВ
НЕЙТРИННОЙ
ФИЗИКИ



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

ФИЗИКА

7/1985

Издается ежемесячно с 1967 г.

А. А. Боровой

12 ШАГОВ НЕЙТРИННОЙ ФИЗИКИ

Издательство «Знание» Москва 1985

БОРОВОЙ Александр Александрович — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института атомной энергии им. И. В. Курчатова.

Рецензент: **Домогацкий Г. В.** — доктор физико-математических наук.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
1. Рождение нейтрино	5
2. Теория Ферми	8
3. Нейтрино зарегистрировано!	10
4. Небольшое отступление. Фои в нейтринном эксперименте	14
5. Нейтрино и антинейтрино	16
6. Двухкомпонентная теория	18
7. Закон сохранения лептонного заряда	23
8. Электрослабое взаимодействие	28
9. Земные и космические нейтрино	32
10. Солнечные нейтрино	39
11. Поиск массы	42
12. Двойной β -распад	46
13. Нейтринные осцилляции	51
14. Реактор в «нейтринном свете»	57
Заключение	63
Литература	64

Боровой А. А.

Б 82 12 шагов нейтринной физики. — М.: Знание, 1985. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика»; № 7).
11 к.

Брошюра посвящена важнейшим этапам развития физики нейтрино от момента открытия вплоть до исследований самых последних дней.

Брошюра рассчитана на научных работников, преподавателей вузов и техникумов, а также на тех читателей, которые интересуются успехами современной физики.

1704010000

ББК 22.3
53

ПРЕДИСЛОВИЕ

Существование нейтрино было предсказано немногим более 50 лет назад. К этому моменту семейство элементарных частиц насчитывало всего три члена: электрон, протон и фотон. В отличие от них, а также от частиц, открытых вслед за нейтрино, а ими были нейтрон и позитрон, самого нейтрино никто не наблюдал ни с помощью счетчиков Гейгера, ни в камере Вильсона. Его открытие — один из ярких примеров «открытий на кончике пера».

Изучая β -распад, физики выяснили, что при этом процессе бесследно исчезает часть энергии. Было высказано (и обосновано) предположение, что эту энергию уносит некая гипотетическая частица, нейтрино, которая вылетает при распаде. Основным свойством ее должна была быть ничтожно малая вероятность взаимодействия с веществом — огромная проникающая способность. Это свойство и мешало обнаружить новую частицу.

Однако нужно было убедиться, что гипотеза о нейтрино не является попыткой прикрыть новым термином нарушение закона сохранения энергии в микромире. Частицу надо было обязательно зарегистрировать, найти потерянную энергию.

Попытки сделать это оказывались безрезультатными до тех пор, пока исследователи не получили в свои руки мощные источники нейтрино — ядерные реакторы — и не создали чувствительные и огромные, по прежним меркам, детекторы. Через четверть века после своего рождения нейтрино было зарегистрировано в опытах Ф. Рейнеса и К. Коуэна и обрело все права истинной частицы.

С 1962 г. нейтринные эксперименты ведутся на ускорителях высоких энергий. В 70-х годах физики научились регистрировать космические и солнечные нейтрино.

Постановка нейтринных опытов — одна из самых сложных и интересных проблем экспериментальной физики.

Чувствительные объемы нейтринных детекторов должны быть несравненно больше, чем для регистрации других частиц. Количественные проблемы заставляют искать новые качественные пути. Так, например, появилось предложение использовать для исследования космических нейтрино участок Мирового океана размерами $1 \times 1 \times 1$ км, находящийся на глубине нескольких километров. А в качестве детекторов ливней заряженных частиц, рождаемых при взаимодействии нейтрино, — чувствительные гидрофоны. Сейчас проект ДЮМАНД (глубоководное детектирование мюонов и нейтрино) находится в стадии подготовки.

Наиболее трудная проблема нейтринных экспериментов — проблема фона. Дело в том, что, кроме нейтрино, детекторы регистрируют и другие частицы, например частицы космического излучения, причем регистрируют их с вероятностью, иногда в миллионы раз превышающей вероятность нейтринного процесса. Чтобы из этой лавины выделить процесс, вызванный именно нейтрино, надо подавить потоки постороннего излучения. Для этого детекторы экранируют различными поглотителями — водой, сталью, другими специальными детекторами, настроенными на фоновые частицы. Если это возможно, нейтринные установки опускают под землю, в самые глубокие из существующих шахт.

Успехи экспериментальной нейтринной физики позволили проверять теорию и ставить перед ней новые, порой совершенно неожиданные задачи.

Шло время, и место, отводимое этой частице (точнее — типу частиц, поскольку сейчас семейство нейтрино насчитывает шесть членов) в общей картине как микро-, так и макромира, становилось все значительнее. Что касается микромира, то за эти годы представления физиков об элементарности частиц претерпели значительные изменения. Большинство из них (несколько сот), в том числе протоны и нейтроны, рассматриваются сейчас как составные, состоящие из кварков. Нейтрино же остается фундаментальным кирпичиком материи, и тем важнее изучение его свойств.

Значительную роль оно играет и в макромасштабах, например в эволюции звезд. А если окажется, что его

масса составляет несколько десятков электронвольт, то именно нейтрино будут определять среднюю плотность вещества во Вселенной, ее возраст и дальнейшую судьбу.

Еще несколько лет назад планы практического использования нейтрино показались бы фантастикой. Сейчас же сделаны первые успешные шаги в этом направлении, и показано, что нейтринное излучение может служить для контроля за работой ядерных реакторов.

Из всего сказанного выше читатель может понять, что в небольшой брошюре нет возможности затронуть все вопросы, которыми занимаются нейтринная физика и астрофизика. Автор выбрал лишь несколько из них, условно разделив материал на 12 этапов развития, 12 шагов нейтринной физики.

Для более широкого ознакомления с вопросом можно использовать литературу, список которой приведен в конце брошюры.

1. РОЖДЕНИЕ НЕЙТРИНО

Как почти все в физике ядра, так и понятие о β -распаде восходит к Э. Резерфорду. В 1896 г. он изучал состав радиации, испускаемой солями урана, и установил, что она состоит по крайней мере из излучений двух типов: легко поглощаемых тяжелых частиц — α -излучения и более проникающих легких частиц — β -излучения. Дальнейшие опыты показали, что β -частицы — это поток электронов, вылетающих непосредственно из атомных ядер.

Прошли еще годы, стало ясно, что ядра состоят из протонов и нейтронов, определился и механизм β -распада. Он становится возможным тогда, когда при замене в ядре нейтрона на протон получающееся новое ядро имеет меньшую массу покоя. Избыток энергии ($E=mc^2$) распределяется между продуктами распада. Для другого ядра может быть энергетически выгодно превращение протона в нейтрон.

В первом случае ядро претерпевает β^- -распад, при котором излучается отрицательно заряженный электрон e^- . Заряд ядра увеличивается на единицу.

Во втором случае ядро либо испытывает β^+ -распад (излучается позитрон e^+), либо захватывает один из ближайших атомных электронов. В этих процессах, как

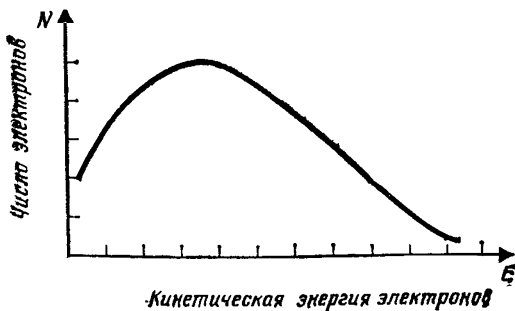


Рис. 1. Пример β -спектра

уже говорилось, протон переходит в нейтрон, а заряд ядра соответственно уменьшается на единицу.

Процесс β -распада таил в себе многие загадки. На первых порах, еще до создания протонно-нейтронной модели ядра, такой загадкой стал непрерывный энергетический спектр испускаемых электронов.

Чем определяется кинетическая энергия E , с которой электрон вылетает из ядра? Казалось бы, ясно — разностью энергий покоя материнского (E_1) и дочернего (E_2) ядер, энергией покоя электрона ($m_e c^2$) и энергией отдачи ядра. Последняя столь мала, что ее можно не принимать во внимание. Тогда $E = E_1 - (E_2 + m_e c^2)$, т. е. величина, постоянная для всех вылетающих β -частиц. На опыте ожидали увидеть частицы одной энергии, а регистрировали все E от весьма малой до некоторой граничной, как раз равной $E_{\text{гр}} = E_1 - (E_2 + m_e c^2)$ (рис. 1).

Для объяснения непрерывности β -спектра высказывались самые различные гипотезы, в том числе и такая радикальная, как несохранение энергии в акте β -распада. Она принадлежала Н. Бору (и впоследствии часто ставилась ему в упрек). Предлагалось и более простое объяснение. Для того чтобы исследовать спектр электронов, необходимо иметь источник излучения — кусочек материала с β -активными атомами. Электроны, вылетающие с поверхности источника, не теряют своей энергии. Те же, что летят из глубины материала, теряют часть энергии на ионизацию и возбуждение атомов. В результате первоначальный линейчатый спектр размывается, сдвигается в сторону меньших энергий, становится непрерывным.

Казалось, можно утоньшать источник, уменьшать количество вещества в нем, но тогда уменьшалась интенсивность β -излучения и технические трудности не позволяли аккуратно измерять спектр.

Для проверки последнего предположения несколько групп экспериментаторов (К. Элис и У. Вустер и др.) поставили так называемые калориметрические опыты. Радиоактивный препарат помещался в калориметр с настолько толстыми стенками, что β -частицы полностью в них поглощались. Это позволяло измерить полную энергию, выделяемую за определенное время (в том числе и теряемую в источнике) по повышению температуры калориметра. Зная активность препарата и тем самым полное число испускаемых за это время β -частиц, можно рассчитать энергию, приходящуюся на одну частицу. Ожидалось, что она совпадает с $E_{\text{гр}}$, но, многократно повторяя свои опыты, экспериментаторы каждый раз получали величину, равную средней (а не максимальной) энергии β -спектра.

Выход нашел молодой, но уже известный теоретик В. Паули. Он высказал предположение, что, кроме электрона или позитрона, в β -распаде испускается еще одна частица, обладающая очень большой проникающей способностью. Стенки калориметра не представляют для нее препятствия, и частица уносит с собой ту часть энергии, импульса и момента импульса, которая недоиссчитывалась у электрона. Новая частица была названа «нейтрино», ν . Автором названия был итальянский физик Э. Ферми, а означает оно «маленькая нейтральная частица».

Теперь уравнения β -распада для нейтронов или протонов (нуклонов) в ядре следовало записать следующим образом:

$$n \rightarrow p + e^- + \nu, \quad \beta^- \text{-распад}, \quad (1)$$

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu, \quad \beta^+ \text{-распад}, \quad (2)$$

$$p + e^- \rightarrow n + \nu, \quad \text{электронный захват}. \quad (3)$$

Паули наделил новую частицу свойствами, весьма неприятными для тех, кто попытался бы ее зарегистрировать. У нейтрино должен быть нулевой заряд, а масса, если и конечная, то много меньшая, чем масса электрона. Иначе в спектре электронов не было бы частиц с энергией, близкой к $E_{\text{гр}}$. Предполагалось также, что

нейтрино имеет нулевой магнитный момент и собственный момент импульса, спин, равный $\hbar/2$ или во всяком случае полуцелый¹.

Поначалу сообщение об открытии новой частицы далеко не у всех вызвало энтузиазм. Гипотеза о существовании нейтрино казалась слишком радикальной. К тому же дело шло об объекте, который вряд ли мог быть скоро обнаружен. Поэтому даже такой далекий от научного консерватизма человек, как Н. Бор, предпочитал отмалчиваться. По этому поводу можно привести отрывок из воспоминаний Х. Казимира: «Однажды пришло письмо от Паули, и Бор, не решаясь что-либо высказать по поводу изложенных в нем мыслей, попросил свою жену написать Паули, что «Нильс ответит в понедельник». Спустя три-четыре недели пришло новое письмо от Паули, на этот раз адресованное госпоже Бор. «С Вашей стороны было очень умно, — писал Паули, — что Вы не сообщили, в какой именно понедельник Бор собирается ответить. Однако он ни в коей мере не должен чувствовать себя обязанным ответить именно в понедельник. Письмо, посланное в любой другой день, доставило бы мне не меньшее удовольствие». Насколько мне известно, в своем письме, на которое Бор так медлил с ответом, Паули высказывал мысль о спасении закона сохранения энергии при β -распаде путем введения нейтрино».

Сам автор гипотезы, хотя и, безусловно, верил в существование нейтрино, был настроен довольно пессимистично по поводу возможности прямо обнаружить эту частицу. Он даже поспорил на бутылку шампанского, что при его жизни этого не случится.

2. ТЕОРИЯ ФЕРМИ

В 1933 г. на VII Соловеевском конгрессе — форуме крупнейших физиков мира — обсуждалась возможность существования нейтрино, а в конце того же года в итальянском журнале «*Ricerca Scientifica*» появилась статья Э. Ферми «Попытка построения теории испускания бета-лучей». Это была количественная теория β -распада, исходившая из того, что он обуславливается

¹ Частицы с полуцелым спином называются фермионами, с целым — бозонами.

новым видом сил, которые позднее стали называть слабыми силами.

Итак, число известных взаимодействий в природе достигло четырех. Это:

1. Силы тяготения (гравитационное взаимодействие).
2. Электромагнитные силы (электромагнитное взаимодействие).
3. Ядерные силы (сильное взаимодействие).
4. Слабые силы (слабое взаимодействие).

Разные виды сил часто сравнивают по времени протекания процессов, в которых они проявляются. Характерные «ядерные» времена — 10^{-22} — 10^{-23} с, т. е. время, за которое частица, движущаяся со скоростью, близкой к скорости света, сместится на расстояние, равное радиусу ядра, $\sim 10^{-15}$ м.

Гораздо медленнее идут реакции, вызванные электромагнитными силами: распад частиц — за $\sim 10^{-20}$ с, излучение γ -квантов из ядра — за 10^{-15} — 10^{-5} с.

Что касается процессов, обусловленных действием слабых сил, то им соответствует время $\sim 10^{-10}$ с. Это — для распада частиц. Самый быстрый β -распад ядер происходит за десятые доли секунды.

Видно, что слабые силы уступают электромагнитным много порядков.

Теория β -распада Ферми строилась по аналогии с квантовой электродинамикой, которая к этому моменту была достаточно разработана. Механизм распада описывался следующим образом: под действием слабых сил один из нуклонов ядра переходит в состояние, характеризующееся другим зарядом, например, нейтрон превращается в протон. При этом рождаются электрон и нейтрино. Точно так же, как атом, переходя из возбужденного состояния в основное, рождает электромагнитные кванты, которых раньше в атоме не было.

Для описания слабого взаимодействия Ферми ввел константу G , которая играет роль, аналогичную роли заряда для e электромагнитных сил. Теория Ферми позволяет рассчитать форму β -спектров, связать граничную энергию распада со временем жизни радиоактивного ядра. На ее основании можно было предсказать вероятность взаимодействия нейтрино с веществом. Вероятность эта оказалась еще на много порядков меньше, чем сначала предполагал Паули. Так, для поглощения нейтрино с энергией ~ 1 МэВ (типичной для распа-

да ядер) потребовался бы слой воды толщиной, в сотни миллионов раз превышающий расстояние от Земли до Солнца.

Теория предсказывала увеличение вероятности взаимодействия с ростом энергии нейтрино.

Аналогия слабого и электромагнитного взаимодействий была гениально угадана ученым и, как мы увидим, получила полное подтверждение уже в наши дни. Этой теории, созданной на базе весьма немногих экспериментальных данных, в дальнейшем была уготована неспокойная судьба. Уж слишком она казалась простой и не полной. Периодически, основываясь на результатах опытов, теорию дополняли и усложняли. А затем более тщательные эксперименты опровергали предыдущие, и все снова возвращалось к первоначальному варианту. «...Наши знания с тех пор возросли в огромной степени; однако все (или почти все) новые факты удивительным образом укладываются в картину, нарисованную Ферми», — пишет Б. Понтекорво.

Шло время, и с каждым годом увеличивался круг проблем, которые затрагивала нейтринная физика. Это и реакции синтеза ядер, и распады μ - и π -мезонов, и распады странных частиц. Но мы пока сосредоточимся на одном направлении — попытках зарегистрировать свободное нейтрино.

3. НЕЙТРИНО ЗАРЕГИСТРИРОВАНО!

Какие доказательства существования нейтрино требовались для того, чтобы оно стало полноправным членом семейства элементарных частиц? Казалось, что опыты, произведенные уже через два-три года после создания теории Ферми, еще раз подтвердили, что в β -распаде участвует «нечто», уносящее энергию и импульс.

Но это были лишь косвенные свидетельства. «Нейтрино» все еще могло оказаться просто удобной словесной ширмой, скрывающей за собой нарушение законов сохранения в слабом взаимодействии. Прямое доказательство мог дать опыт, в котором частица была бы зарегистрирована. Однако, как уже говорилось, выполнить такой эксперимент было необычайно трудно. Отсутствие у нейтрино каких-либо электромагнитных свойств делало невозможной прямую регистрацию этой частицы (поскольку детекторы элементарных частиц

«чувствуют» только электромагнитные взаимодействия). Она могла быть обнаружена только в том случае, если бы путем слабого взаимодействия передала часть своей энергии заряженным частицам, и уж те были зарегистрированы. Оставалось найти подходящий процесс.

В 1934 г. впервые было обращено внимание на реакцию, при которой нейтрино взаимодействует с водородом (протоном) и рождает нейтрон и позитрон:

$$\nu + p \rightarrow n + e^+. \quad (4)$$

Этот процесс обратен β^- -распаду свободного нейтрона

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}. \quad (5)$$

Реакция (4) по многим признакам была очень привлекательна.

Во-первых, она обязана была происходить (а про многие другие процессы с нейтрино это заранее не было известно). Согласно самым общим физическим принципам, если возможен процесс (5), то обязательно существует и обратная ему реакция.

Во-вторых, нейтрон и позитрон, вылетающие в результате реакции, легко зарегистрировать.

В-третьих, теория Ферми позволяла вычислить вероятность обратного процесса (1), и она оказалась больше, чем для обратных процессов, в которых нейтрино взаимодействует с ядрами, более тяжелыми, чем протон.

Тем не менее вероятность процесса (4) очень мала. Чтобы заметить его, необходимо было создать мощные источники нейтрино, чувствительные детекторы, содержащие большие объемы вещества. Наконец, экспериментаторам необходимо было научиться подавлять фоновые процессы.

Первые попытки обнаружить взаимодействие нейтрино с веществом делались при помощи источников, которые обладали естественной радиоактивностью (М. Намиас, Ц. Ву и др.). Часто в них использовались огромные (по тем временам) активности. Однако опыты не принесли успеха.

Создание в 40-х годах ядерных реакторов дало в руки физиков очень мощные искусственные источники нейтрино. В реакторе ядро урана-235 (или плутония-239) после захвата нейтрона делится на два осколка. Образовавшиеся осколки сначала излучают нейтроны и γ -

кванты, а затем приходит черед β -распада. В среднем каждый из осколков претерпевает β -распад три раза, следовательно, при одном делении шесть нейтронов превращаются в шесть протонов, шесть электронов и излучается шесть нейтрино.

Их энергии простираются от 0 до 10 МэВ, но число частиц с большой энергией крайне мало. Если мощность реактора составляет 1000 МВт (не особенно много по современным масштабам), то в окружающее пространство каждую секунду испускается $N=2 \cdot 10^{20}$ нейтрино. Около 50 МВт уносится этим излучением. На детектор, расположенный на расстоянии 10—15 м от центра активной зоны, падает поток нейтрино, равный $\sim 3 \cdot 10^{13}$ $\nu/\text{см}^2 \cdot \text{с}$.

Не следует думать, что строительство ядерных реакторов сразу же поставило вопрос о регистрации нейтрино. «В 1946 г. нейтрино рассматривалось, вообще говоря, как недетектируемые частицы. Многие уважаемые физики придерживались того мнения, что даже сам вопрос о детектировании свободных нейтрино просто бессмыслен (и не только из-за временных трудностей) так же, как, скажем, бессмыслен вопрос, бывает ли в сосуде давление, меньшее чем 10^{-50} атмосферы», — пишет Б. Понтекорво.

Именно он впервые обратил внимание на «нейтринные возможности» реактора.

Впервые зарегистрировали нейтрино вдали от места его рождения американские физики Ф. Рейнес и К. Коуэн в опытах 1953—1956 гг. Источником нейтрино служил мощный ядерный реактор в Лос-Аламосе.

Для обнаружения нейтрино была использована реакция $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$, которую мы обсуждали выше. Схема установки представлена на рис. 2. Нейтрино от реактора попадает в бак, вмещающий 200 л воды. При взаимодействии $\bar{\nu}$ с водородом (p) образуются позитрон и нейтрон. Первый практически мгновенно замедляется, сталкиваясь с электроном среды, и обе частицы превращаются в два γ -кванта (аннигилируют). Мишень сделана достаточно тонкой, чтобы вылетевшие из нее кванты попали в детекторы — баки с жидким сцинтиллятором², установленные по обе стороны от нее.

² Сцинтиллятор — вещество, в котором энергия, потерянная заряженной частицей, преобразуется в свет.

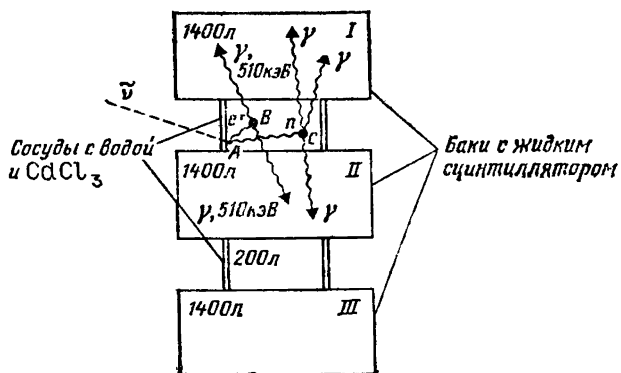


Рис. 2. Схема опыта Рейнса и Коуэна: А — точка поглощения нейтрино и появления позитрона и нейтрона В — точка аннигиляции позитрона; С — точка захвата нейтрона атомом кадмия

Первое известие о нейтрино подают одновременно зарегистрированные в двух детекторах вспышки света, вызванные аннигиляционными квантами. Нейтрон замедляется в воде и может быть захвачен ядрами кадмия, соль которого растворена в баках. В результате захвата излучается несколько γ -квантов. Они также регистрируются сцинтилляционными детекторами.

Таким образом событие, вызванное нейтрино, обнаруживалось по следующим признакам:

1. В детекторах одновременно возникают импульсы, соответствующие по энергии аннигиляционным квантам.
2. Через определенный промежуток времени (время жизни нейтрона в баке с водой), тоже одновременно, детекторы регистрируют импульсы от γ -квантов, рождающихся при захвате нейтрона.

Довольно сложная система отбора, но она необходима, чтобы подавить фон.

Остановимся на этом вопросе чуть подробнее. Детектор регистрирует нейтрино (эффект) и постороннее излучение (фон). Для того чтобы определить эффект, надо провести эксперимент при работающем реакторе, измерить эффект+фон, затем при выключенном реакторе измерить фон и взять разность числа отсчетов в этих двух опытах. Все было бы просто, если бы эффект и фон

были строго постоянными величинами. Но они флуктуируют относительно среднего значения. Поэтому если фон превышает эффект в десятки тысяч раз (а как раз такая ситуация возникает, если регистрировать процесс взаимодействия нейтрино с протоном лишь по одной частице), эффект буквально потонет во флуктуациях фона. Определить его не представится возможным.

Экспериментаторам пришлось придумать систему отбора, при которой фоновым частицам, чтобы быть зарегистрированными, пришлось бы имитировать все характерные особенности продуктов нейтринной реакции. Вероятность этого очень мала.

Надо отметить, что отбор проходили далеко не все события, вызванные нейтрино. Причины могли быть разные. Например, один из квантов мог не попасть в сцинтиллятор или потерять по дороге часть энергии и вызвать слишком слабую вспышку света и т. п. В результате эффективность регистрации детектором реакции нейтрино с протоном уменьшалась, и вместо возможных 2000 нейтрино в сутки регистрировалось только 40. Зато фон был меньше эффекта, и его флуктуации не маскировали последний.

Доказательства существования нейтрино, полученные в опытах Рейнеса и Коуэна, были столь убедительны, что Паули ничего не оставалось сделать, как признать свое поражение. Проигранное шампанское было торжественно выпито.

4. НЕБОЛЬШОЕ ОТСТУПЛЕНИЕ. ФОН В НЕЙТРИННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Описывая опыт Рейнеса и Коуэна, так же как и последующие нейтринные эксперименты, мы постоянно будем возвращаться к проблеме фона. Поэтому представляется полезным сделать небольшое отступление, чтобы поговорить о природе фоновых процессов.

Первый вид фоновых процессов связан с космическим излучением. Потoki частиц из космоса падают на границу земной атмосферы. Те из них, которые обладают достаточной энергией и могут избежать ловушки магнитного поля Земли, устремляются к поверхности, рождая при взаимодействии с ядрами кислорода и азота новые частицы. В лаборатории исследователь видит три компоненты космического излучения — мягкую

(электроны, позитроны, γ -кванты), ядерную (нуклоны, π -мезоны) и жесткую (μ -мезоны). Мягкую компоненту легко поглощает слой свинца толщиной 10—15 см; для поглощения ядерной нужен слой вещества, эквивалентный 15—20 м воды или ~ 10 м грунта. Поэтому там, где это возможно, экспериментаторы стремятся разместить детекторы нейтрино в подземных помещениях. При таких условиях непоглощенными остаются только μ -мезоны (мюоны), которые проникают глубоко под землю.

Вторая составляющая фона — естественная радиоактивность. Радиоактивные элементы находятся в рассеянном виде во всех деталях и материалах установки, в воздухе, стенах здания и т. п.

Фон может быть связан и с самим источником нейтрино, в нашем случае — с реактором. Сквозь его биологическую защиту проникают быстрые нейтроны и γ -кванты. Если считать, что в защищенных помещениях число быстрых нейтронов в 100 раз менее принятой биологической нормы, в детекторе с органическим сцинтиллятором их будет регистрироваться все еще в миллион раз больше, чем нейтрино. Эту разницу приходится уничтожать дополнительной защитой, тем более что фон, связанный с работой реактора, — один из самых неприятных: его нельзя измерить отдельно от эффекта, выключив реактор, как это обычно делается для других видов фона.

В опытах Рейнеса и Коуэна, для того чтобы показать, что эффект вызван именно нейтрино, а не нейтронами реактора, между активной зоной и измерительной установкой помещалась массивная дополнительная защита. Потоки всех частиц, кроме нейтрино, должны были ею ослабляться. Эффект тем не менее остался на уровне 40 событий в сутки — это доказывало его «нейтринное происхождение».

Для того чтобы увидеть события, вызванные нейтрино, надо всеми возможными способами уменьшать фон и для этого использовать все специфические признаки продуктов нейтринной реакции, отличающие их от фоновых событий. Это означает введение дополнительных критериев отбора — по энергии, времени, иногда по форме регистрируемого импульса.

Трудности постановки нейтринных экспериментов на реакторах оказались столь значительными, что в течение четверти века сначала Рейнес и Коуэн, а затем груп-

па физиков во главе с Рейнесом были практически монополистами в этой области. Они исследовали взаимодействие нейтрино с протоном, дейтоном, электроном. Но те же трудности (а отчасти, может быть, и монополия) приводили к ошибкам. Рейнесу несколько раз приходилось уточнять свои результаты или вовсе отказываться от них. Поэтому опыты эти следует рассматривать лишь как качественные.

5. НЕЙТРИНО И АНТИНЕЙТРИНО

В 1928 г. П. Дирак вывел свое знаменитое уравнение. Оно не только описывало поведение элементарных частиц со спином $\hbar/2$ (фермионов), но и предсказывало, что у каждой такой частицы есть своя античастица. Последняя должна иметь те же массу и спин, что и частица, но отличаться от нее знаком заряда и магнитного момента (если у частицы магнитный момент направлен по спину, то у античастицы — против).

Первая античастица — позитрон (e^+) — была открыта в 1932 г. Затем, более чем через 20 лет, были открыты антипротон и антинейтрон. Дальнейшее продвижение в антимир шло более быстрыми темпами.

Физикам известны и частицы, тождественно совпадающие со своими античастицами. Примеров можно привести довольно много: фотон, π^0 -мезон, ω^0 -мезон, ρ^0 -мезон и т. д. Эти частицы можно назвать истинно нейтральными. Правда, все такие частицы имеют целочисленный спин и не подчиняются уравнению Дирака.

Нейтрино оказалось некоей двойственной частицей. С одной стороны, оно относится к семейству фермионов и должно описываться уравнением Дирака. С другой стороны, отсутствие у него заряда и магнитного момента делает достаточно непонятным отличие частицы от античастицы.

Теорию, описывающую электрически нейтральные фермионы как истинно нейтральные, не имеющие античастиц, создал в 1937 г. итальянский физик Э. Майорана. А вот вопрос, какая же нейтрино частица — дираковская или майорановская, разные ли частицы излучаются при β^+ -распаде (электронном захвате) ядра $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ (нейтрино) и при β^- -распаде $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ (антинейтрино) или ν идентично $\bar{\nu}$, предоставили решать экспериментаторам.

Метод исследования был найден Б. М. Понтекорво. Мы уже упоминали, что еще в 1946 г. он размышлял над возможностью регистрации нейтрино от ядерного реактора.

«В то время сцинтилляторы, которые много лет спустя были так успешно использованы Рейнесом и Коуэном для детектирования реакторных антинейтрино, еще не были созданы, и мне пришло в голову, что проблема может быть решена радиохимическими методами, т. е. путем химической концентрации изотопа, образующегося при обратном β -процессе из очень большой массы вещества, облучаемого нейтрино. При внимательном осмотре знаменитой таблицы искусственных изотопов Сиборга нашлось несколько возможных кандидатов на мишень, среди которых наиболее подходящими оказались соединения хлора. Соответствующая реакция выглядит следующим образом:

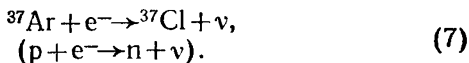


где ${}^{37}\text{Ar}$ распадается путем электронного захвата...

Я написал здесь «нейтрино», а не $\bar{\nu}$, потому что вопрос о том, отличается ли ν от $\bar{\nu}$, был еще неясен».

Позднее именно процесс (6) был использован для доказательства отличия ν и $\bar{\nu}$.

Напишем реакцию прямого процесса — электронного захвата



Аргон-37 распадается со временем жизни около 30 дней, превращаясь в хлор-37 и излучая нейтрино.

Обратная реакция (6) представляет собой превращение нейтрона в ядре хлора-37 в протон опять-таки под действием нейтрино $\nu + n \rightarrow p + e^-$.

А в ядерном реакторе при распаде осколков генерируются антинейтрино — частицы, сопутствующие электрону $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$. Поэтому процесс (6) может идти с полной вероятностью только в случае тождественности нейтрино и антинейтрино.

Эксперименты были поставлены группой американских физиков под руководством Р. Дэвиса. Они проводились сначала на Брукхейвенском реакторе (1955 г.), затем на реакторе в Саванна-Ривер (1956—1959 гг.).

Схема опыта состояла в следующем. Бак, содержащий несколько кубометров перхлорэтилена (C_2Cl_4), помещался под землей недалеко от работающего реактора. В него предварительно вводился 1 см³ обычного аргона. Газ этот в дальнейшем мог служить носителем образующихся радиоактивных атомов ³⁷Аг.

Один, иногда два месяца жидкость выдерживалась под нейтринным облучением для накопления аргона-37, а затем начиналась процедура его извлечения. В течение нескольких часов через объем бака пропусклся гелий. Он в виде мелких пузырьков проходил через жидкость и «вымывал» из нее атомы аргона. Затем гелий поступал в ловушки, заполненные активированным углем и охлажденные до температуры жидкого воздуха. Аргон конденсировался и захватывался на поверхности угля, а гелий свободно проходил через ловушку. После нескольких циклов такого процесса ловушка отделялась от системы, соединялась с детектором и нагревалась. Уголь выделял захваченный аргон, и последний поступал в счетчик.

Зарегистрированная в этих экспериментах активность была почти в 10 раз меньше, чем ожидалось в случае, если бы нейтрино и антинейтрино были одинаковы. Она объяснялась фоновыми процессами, главным источником которых были быстрые космические частицы, попадающие в мишень и образующие аргон-37.

Результат экспериментов указывал на отличие ν и $\bar{\nu}$. Но значило ли это, что нейтрино — дираковская частица? Оказалось, что слишком торопиться с выводами не следует.

6. ДВУХКОМПОНЕНТНАЯ ТЕОРИЯ

Опыты Дэвиса еще продолжались, когда в физике слабых взаимодействий произошло крупнейшее событие — было открыто несохранение четности. Чтобы рассказать о нем, нам придется напомнить читателю о законах сохранения и их связи со свойствами пространства и времени.

В классической механике известны три закона сохранения: энергии, импульса и момента импульса. Как было доказано Э. Нетёр (1918 г.), эти законы есть следствие симметрии пространства и времени.

Уравнения движения тел не меняются, если перенести начало отсчета времени. Результаты опыта останутся теми же, независимо от того, сегодня вы его провели или вчера, важно только, чтобы условия эксперимента не изменились. Все сказанное выше есть следствие того, что время обладает определенной симметрией — оно однородно. Ни один его промежуток ничем не выделен по отношению к другим. И из этого, по теореме Нетёр, следует закон сохранения энергии. Свойством однородности обладает и пустое пространство. Перенос начала координат в пространстве не меняет физических результатов. Из однородности пространства вытекает закон сохранения импульса.

Кроме того, пустое пространство изотропно. Это означает, что в нем нет выделенных направлений, все направления равноправны. Поворот координат на любой угол не повлияет на результат опыта. Из изотропности пространства следует закон сохранения момента импульса.

Можно провести и еще одно преобразование — сразу изменить направление всех координатных осей на противоположное. Это эквивалентно тому, что мы отражаем происходящий процесс в зеркале.

Физики были уверены, что такое отражение тоже ничего не изменит.

Под «ничего» следует понимать физическое явление, результаты эксперимента. Конкретная величина при таком преобразовании может и изменить знак. Любой вектор — скорость, импульс, сила, напряженность электрического поля и т. п. — меняет знак при отражении на противоположный. Существуют и псевдовекторы — момент импульса (в частности, спин), магнитная индукция и т. п. Псевдовекторы знака не меняют, поскольку их направление связано с направлением вращения (массы, электрического заряда) по или против часовой стрелки. А при отражении в зеркале направление вращения не изменяется.

Так вот, векторы и псевдовекторы входят в формулы, описывающие какие-либо процессы, таким образом, что при «переходе в зеркальный мир» результаты этих процессов не меняются.

Простой пример. Положительный заряд влетает в электрическое поле напряженностью E , летит по направлению поля и разгоняется в нем. При отражении вектор

Е меняет свой знак, но меняет знак и скорость заряда. Он снова летит по полю и разгоняется.

Пока речь шла об электромагнитном и сильном взаимодействиях, все это строго выполнялось. Никакие опыты не помогли бы отличить «наш» мир от «зеркального», правое направление от левого.

В квантовой механике (а именно для нее важно такое «скачкообразное» преобразование пространства, как отражение) появляется новый закон сохранения. Он носит название закона сохранения пространственной четности и является следствием зеркальной симметрии пространства (Е. Вигнер, 1927 г.).

Итак, все было ясно вплоть до 1956 г., когда необычное поведение К-мезонов заставило усомниться в том, что для слабого взаимодействия закон сохранения пространственной четности выполняется столь же строго, как для электромагнитного и ядерного. Сомнения высказали два американских физика, китайцы по национальности, Ли Тзун-дао и Янг Чжень-инь³. В своей статье они предложили возможные схемы опытов для проверки этой гипотезы, и сразу же такая проверка начала осуществляться несколькими группами экспериментаторов.

Первой добилась успеха группа, работавшая под руководством Ву Цзянь-сюн, китайки, сотрудницы Колумбийского университета (США), одной из самых талантливых и результативных экспериментаторов, работающих в области β -распада.

Идея опыта состояла в следующем. Если ядра атомов вещества, способного к β -распаду, выстроены таким образом, что их спины направлены в одну сторону, то вылетающие из них электроны должны с одинаковой вероятностью лететь как по, так и против спина ядер. Так гласит закон сохранения пространственной четности. Если же вероятности вылета в противоположных направлениях окажутся различными, закон будет нарушен. Ведь если в нашем мире существует такое явление, как преимущественный вылет частиц по одному из направлений (скажем, против спина), то при простран-

³ Они первыми обнародовали «письменное» сомнение. «Устное», по-видимому, первым высказал крупнейший американский теоретик Р. Фейнман на Рочестерской конференции 1956 г. Интересно, что поддержал его Е. Вигнер, который впервые использовал в квантовой механике закон сохранения четности.

ственном отражении процесса спин ядра не изменится, а вектор скорости переменит знак и в зеркальном мире преимущественный вылет электронов будет происходить по спину ядра.

Мы сможем отличить наш мир от зеркального, а это противоречит закону сохранения четности.

Опыты, потребовавшие применения самой современной экспериментальной техники, полностью подтвердили гипотезу Ли и Янга. Сохранение четности нарушалось в процессах, которыми управляло слабое взаимодействие.

Почти сразу же выяснилось, что это открытие самым непосредственным образом коснулось нейтрино. Оказалось, что если рассмотреть решения уравнения Дирака для частицы с нулевой массой при условии нарушения пространственной четности, то такая частица должна быть полностью поляризована — ее спин всегда и строго направлен по (или против) импульса. Соответствующая ей античастица отличается противоположным знаком поляризации.

Если раньше решение уравнения Дирака для нейтрино включало четыре различных состояния, четыре компоненты (частица и античастица, и у каждой два возможных направления спина — по и против импульса), то теперь число состояний уменьшилось до двух. В соответствии с этим новая теория получила название двухкомпонентной. В ее создании приняли участие физики-теоретики из разных стран: Л. Ландау (СССР), А. Салам (Пакистан), Т. Ли и Ч. Янг (США). Поставленные опыты подтвердили, что нейтрино поляризовано и что спин антинейтрино направлен по импульсу частицы, а нейтрино — против.

Поведение полностью поляризованной частицы напоминает движение винта или буравчика, если уподобить спин вращению рукоятки, а направление импульса — направлению закручивания винта. Так же, как у частицы, поступательное и вращательное движение винта жестко связаны. При этом аналогом антинейтрино $\bar{\nu}$ является винт с правой резьбой, закручивающийся по часовой стрелке, а нейтрино ν — винт с левой резьбой.

При отражении в зеркале нейтрино изменит знак импульса на обратный, а направление спина не изменится. В результате из левого винта мы получим пра-

вый, из частицы — античастицу. Раньше это запрещал закон сохранения пространственной четности, теперь ограничение было снято. Образовалась явная несимметрия между «нашим» и «зеркальным» мирами.

Л. Д. Ландау предположил, что слабое взаимодействие обладает более сложным типом симметрии, чем просто зеркальное отражение. Нашему миру симметричен не просто зеркальный мир, а зеркальный антимир, в котором все частицы заменены на античастицы, нейтрино — на антинейтрино. Только такие миры неразличимы.

В теории двухкомпонентного нейтрино отрицательный результат опытов Дэвиса вытекал из поляризации. Действительно, чтобы вызвать процесс на хлоре-37, требовалось нейтрино «левый винт», а реактор излучает антинейтрино — «правый винт». И реакцию обратного β -распада этим частицам так же невозможно вызвать, как завинтить такой винт в отверстие с левой резьбой.

Отметим еще, что степень поляризации легких частиц e^- (e^+) и $\bar{\nu}$ (ν) оказалась тесно связанной с наличием у них массы. Действительно, если полная поляризация нейтрино есть фундаментальное внутреннее свойство частицы, отличающее ν от $\bar{\nu}$, то такая частица обязана (!) иметь нулевую массу и двигаться со скоростью v , равной скорости света c . В противном случае всегда найдется система отсчета, которая движется со скоростью $v > v$, (но в то же время $v < c$), и в этой системе нейтрино полетит в обратную сторону, а направление спина частицы не изменится. Это будет означать, что внутреннее свойство частицы зависит от системы отсчета, чего быть не должно. Поэтому скорость нейтрино v , должна быть точно равна скорости света c и масса его m , равна нулю.

Что касается электронов и позитронов, масса которых конечна, то степень их поляризации в β -распаде определяется отношением скорости частицы v к скорости света c и меняется в зависимости от энергии распада.

Насколько точно можно считать нейтрино полностью поляризованной частицей, насколько строго подтверждалась двухкомпонентная теория?

Результаты прямых опытов (М. Гольдгабер и др.,

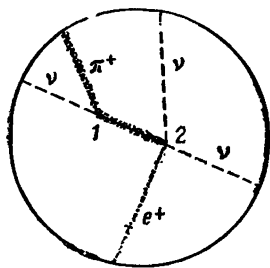


Рис. 3. Следы процесса $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ в фотоэмульсин

1958 г.) давали возможность отклонения поляризации от полной вплоть до 20%. На основании более поздних экспериментов можно было считать, что этот диапазон не более 10%. Что касается опытов Дэвиса, то, как мы видели, они допускали 10% отклонения. Это в том случае, если отличие нейтрино от антинейтрино объяснялось бы только поляризацией частиц.

Вместе с тем красота двухкомпонентной теории оказывала сильнейшее (иногда почти гипнотическое) влияние на общественное физическое мнение. И действительно, с 1957 до 1980 г. не было ни одного опытного факта, который противоречил бы полной поляризации нейтрино.

7. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЛЕПТОННОГО ЗАРЯДА

Число реакций, идущих с участием нейтрино, значительно расширилось после того, как началось изучение распадов космических частиц и частиц, рождающихся в опытах на ускорителях высоких энергий.

Обратимся для примера к рис. 3, где приведена микрофотография распада $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$, зарегистрированного в специальной эмульсии.

В точке 1 π^+ -мезон останавливается и распадается. Отрезок между точками 1 и 2 — это след родившегося мюона. Длина его следа на фотографиях всегда одинакова, из чего можно сделать вывод, что и энергия мюонов, образующихся при распадах π -мезонов, постоянна. Закон сохранения импульса требует, чтобы в сторону, противоположную движению μ , вылетало «что-то», что компенсирует его импульс, а постоянство энергии мюонов и отсутствие следов в эмульсии говорят, что это всего одна нейтральная частица.

Поскольку спин π^+ -мезона равен нулю, мюона — $\hbar/2$, то согласно закону сохранения момента импульса спин вылетающей частицы должен быть полуцелым. Дальнейшие исследования показали, что распад π^\pm -мезона выглядит так: $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu(\bar{\nu})$.

Теперь обратимся к точке 2. Здесь мюон останавливается и распадается. При этом вылетает позитрон, который может иметь разную энергию — от фотографии к фотографии длина его следа меняется. Из этого следует вывод о присутствии в распаде нескольких нейтральных частиц. Окончательно $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu + \bar{\nu}$.

Можно привести примеры и других распадов, идущих с участием нейтрино: $K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu(\bar{\nu})$, $K^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu$ и т. п.

Вместе с тем физики обратили внимание на то, что часть процессов, которые, казалось бы, не нарушали никаких законов сохранения, не наблюдалась. Так, для μ^\pm -мезона энергетически возможно несколько схем распада:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}, \quad (8)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma, \quad (9)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + e^+ + e^-. \quad (10)$$

Осуществлялась же только одна — первая. Теория не находила удовлетворительного объяснения этому факту. Ведь процесс (9) можно представить себе как некое продолжение процесса (8). При этом ν и $\bar{\nu}$ исчезают — аннигилируют в момент своего рождения, как частица и античастица, а вылетающий электрон излучает γ -квант. Расчетная вероятность W -распада $\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$ по отношению к распаду $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$ составляет $10^{-3} - 10^{-4}$, но запретов на его существование нет.

Тем не менее поиски процесса (9) не привели к положительным результатам. Со временем ограничения на вероятность все уменьшались: меньше 10^{-4} , меньше 10^{-5} , 10^{-7} , 10^{-10} (1979 г.). Природа преспятствовала мюону распадаться на электрон и γ -квант, запрещала аннигилировать ν и $\bar{\nu}$. Попытки объяснить запрет реакций (9) и (10) привели ученых к идее о существовании двух типов нейтрино. Одно сопутствует электрону — электрон-

ное нейтрино ν_e , другое — мюону, мюонное нейтрино ν_μ . В распаде нейтрона и π -мезона возникают разные нейтрино

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu,$$

а реакцию распада π -мезона следует писать в виде

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \tilde{\nu}_\mu + \nu_e.$$

Гипотеза должна была быть проверена экспериментом.

Опыт по изучению различия (или единства) ν_e и ν_μ был первым из нейтринных экспериментов, поставленных на ускорителях высоких энергий. Осуществить его предлагали несколько ученых — Б. М. Понтекорво, М. А. Марков, М. Шварц. Выполнен этот эксперимент был впервые в 1962 г. на Брукхейвском ускорителе (США) и через год повторен в ЦЕРНе.

Идея опыта заключалась в следующем. Пучок протонов, разогнанных в ускорителе, в определенный момент отклонялся мощным импульсом магнитного поля. Он выходил из камеры ускорителя и попадал на мишень, в которой при взаимодействии протонов с веществом рождались быстрые π - и K -мезоны. Вылетев из мишени и распадаясь на лету в специальном пролетном туннеле, мезоны излучали нейтрино и мюоны высоких энергий. Дальше пучок попадал в слой стали (в Брукхейвене использовалась броня, снятая со старого военного корабля) общей толщиной около 13 м, где практически поглощались все сильно взаимодействующие частицы (π -, K -, ρ -мезоны и т. п.).

Мезоны, остановившиеся в защите, тоже излучали при распаде нейтрино. Среди них и электронные, например при распаде мюонов. Но эти нейтрино обладали существенно меньшей энергией, чем родившиеся на лету, и не играли роли для проводившегося эксперимента. Если существуют два сорта нейтрино, ν_e и ν_μ , то ускоритель — практически чистый источник ν_μ .

Пучок нейтрино попадал в детектор, где во взаимодействиях с веществом могли рождаться электроны и мюоны. Если электронные и мюонные нейтрино неразличимы, то число зарегистрированных электронов и мюонов должно было быть одинаковым. Но в опытах регистрировались практически одни мюоны, и это служило прямым доказательством различия ν_e и ν_μ . Чуть

позже эксперименты, поставленные на ускорителях, позволили доказать различие и нейтрино, сопровождающих μ^+ - и μ^- -мезоны, т. е. различие мюонных нейтрино и антинейтрино.

Теперь семейство этих частиц насчитывало уже четыре члена: ν_e , $\bar{\nu}_e$, ν_μ и $\bar{\nu}_\mu$. Увеличившееся семейство близнецов согласно классификации элементарных частиц относилось к лептонам.

Эта классификация связана с участием частиц в одном или нескольких взаимодействиях: электромагнитном, слабом или сильном (в гравитационном участвуют все частицы).

Специальный класс отведен одной-единственной частице — фотону (от греческого «свет») — кванту электромагнитного поля.

Следующий класс образуют лептоны (от греческого «мелкий, легкий»). К ним относятся электрон, позитрон, мюоны обоих знаков и семейство нейтрино. Заряженные лептоны участвуют в электромагнитном и слабом взаимодействии, нейтрино — только в слабом.

В третий класс входит многочисленная группа частиц, которые получили название «адроны» (от греческого «большой», «массивный»). Они участвуют во всех видах взаимодействий, в том числе и в сильном. Протон, нейтрон, π - и K -мезоны, гипероны, сотни резонансов — в 60-х годах казалось, что физика начинает тонуть в адронном море. Справиться с ними удалось только в последние годы, когда стало ясно, что адроны — составные частицы, и состоят они из небольшого числа более фундаментальных частиц — кварков.

Для частиц, входящих в класс лептонов, введено некое правило (или запрет), с помощью которого можно описать существование четырех различных типов нейтрино и отсутствие ряда распадов лептонов. Правило получило название закона сохранения лептонного заряда (основополагающие работы в этой области принадлежат Я. Б. Зельдовичу, Е. Конопинскому и Х. Махмуду).

Предполагается, что каждый лептон обладает так называемым лептонным зарядом, причем зарядов этих два вида — электронный (l_e) и мюонный (l_μ). Для всех частиц, кроме лептонов, этот заряд равен нулю, а для лептонов указан в таблице.

	ν_e	$\bar{\nu}_e$	e^-	e^+	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	μ^-	μ^+	
l_e	1	-1	1	-1	0	0	0	0	0
l_μ	0	0	0	0	1	-1	1	-1	0

Далее, считается, что во всех процессах сохраняется неизменной сумма электронных и мюонных зарядов частиц. Постулируются два закона сохранения — l_e и l_μ . Выполнение их можно проверить, например, по реакции

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \quad (l_e = 0 \rightarrow 0 + 1 - 1)$$

или

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \bar{\nu}_e, \quad \begin{pmatrix} l_e = 0 \rightarrow +1 + 0 - 1 \\ l_\mu = 1 \rightarrow 0 + 1 + 0 \end{pmatrix}$$

Процессы распада мюона на позитрон и γ -квант (9) или на электрон и два позитрона (10) запрещены новым законом. В этом смысле он аналогичен закону сохранения электрического заряда, который тоже гласит, что при всех процессах, происходящих в системе, ее полный заряд остается постоянным. Однако между двумя зарядами, электрическим и лептонным, есть и существенное различие: первый определяет степень участия частицы в электромагнитных процессах, второй с взаимодействием лептонов непосредственно не связан.

Внутри одной группы частиц разные лептонные заряды соответствуют дираковскому подходу — частица и античастица отличаются знаком лептонного заряда, и в реакциях их нельзя заменять одну другой. Введение электронного и мюонного зарядов запрещает замену ν_e на ν_μ , т. е. переходы между двумя группами лептонов.

В последнее время к семейству лептонов добавился новый член, открытый в опытах на ускорителе высокой энергии — τ -мезон (хотя считать его легкой частицей можно весьма относительно, поскольку масса этой частицы почти в 17 раз больше массы мюона и соответственно в 3500 раз больше массы электрона). В ядерных реакциях τ -мезону сопутствует нейтрино, данных о котором пока существенно меньше, чем о ν_e и ν_μ . τ -мезо-

ну и т-нейтринно можно сопоставить еще один тип лептонного заряда — l_τ .

8. ЭЛЕКТРОСЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

В 1979 г. три физика-теоретика — С. Вайнберг, А. Салам и Ш. Л. Глэшоу — были удостоены Нобелевской премии за создание единой теории электромагнитных и слабых взаимодействий (ее часто называют теорией электрослабых взаимодействий).

Давно уже делались попытки найти изначальное единство различных сил природы, и создание теории электрослабых взаимодействий было значительным шагом в этом направлении. Прежде чем немного рассказать об этом событии, напомним, как представляет себе физика механизм электромагнитных процессов. Процессы, в которых происходит взаимодействие квантов с зарядами или зарядов между собой посредством обмена квантами.

Электромагнитное поле заряда — это совокупность квантов — фотонов, которые он непрерывно излучает и поглощает. Такое представление о «мерцающем свете», окружающем отдельный заряд, опирается на квантовую механику, а конкретнее — на принцип неопределенности, связывающий энергию и время.

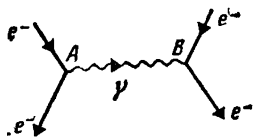
Откуда, например, покоящемуся электрону взять энергию для излучения кванта? Оказывается, закон сохранения энергии ограничивает время Δt между испусканием и поглощением фотона и его энергию ΔE соотношением $\Delta t \cdot \Delta E \approx h/2\pi = \hbar$. Это и есть принцип неопределенности для времени и энергии.

Частицы, существование которых обеспечивается им, носят название виртуальных (возможных). Прямо зарегистрировать их нельзя. Но стоит сообщить заряду достаточную энергию — и кванты станут реальными.

На рис. 4 показано взаимодействие двух электронов — один рассеивается на другом. Происходит это путем обмена фотоном. Первый электрон его испускает, второй — поглощает. Возможен обмен и несколькими квантами, но многочастичные процессы менее вероятны.

За время Δt излученный квант, движущийся со скоростью света c , пролетает расстояние $\Delta l = c\Delta t$. При этом $\Delta t = \Delta l/c$ и $\Delta E \approx \hbar c/\Delta l$. Масса покоя фотона равна нулю, и его энергия ΔE может быть сколь угодно малой, а

Рис. 4. Рассеяние электрона на электроне. Один электрон в точке A испускает виртуальный γ -квант, второй — в точке B его поглощает



расстояние Δl — большим. Отсюда — дальноедействие электромагнитных сил, хотя и спадающее с расстоянием (с ростом Δl энергия кванта должна уменьшаться).

Если виртуальные частицы — переносчики взаимодействия — имеют энергию покоя mc^2 (например, π -мезоны для ядерных сил), то радиус их действия становится ограниченным, поскольку такая частица не может существовать дольше, чем время $\Delta t \approx \hbar/mc^2$ и «улететь» дальше, чем на расстояние $l \approx c\Delta t \approx \hbar/mc$.

Мы уже говорили, что Э. Ферми построил теорию β -распада по аналогии с электродинамикой. Шло время, и постепенно выяснялись черты как сходства, так и различия между двумя типами сил. К первым прежде всего надо отнести «универсальность» обеих теорий. Все электромагнитные процессы характеризуются единой величиной элементарного электрического заряда e . По мере изучения распадов частиц стало ясно, что большинство процессов также можно описать, используя всего одну постоянную — фермиевскую константу слабого взаимодействия G . В этом и есть проявление «универсальности».

К отличиям относится то обстоятельство, что в электромагнитных процессах пространственная четность сохраняется, а в слабых — нарушается. Кроме того, электромагнитное взаимодействие дальноедействующее, а радиус слабого взаимодействия много меньше размеров нуклона.

Если, буквально понимая слова «теория рассматривает...», представить себе нечто вроде микроскопа, сквозь который физика рассматривает тот или иной процесс, то в теории Ферми увеличение микроскопа не позволяло увидеть тонкую структуру слабого взаимодействия. Согласно ей превращение нейтрона в протон и рождение электрона и нейтрино происходят в точке. Для относительно низких энергий частиц при β -распаде (≤ 10 МэВ) и соответственно больших (по сравнению даже с размерами ядра) длин волн нейтрино такое приближение работает хорошо,

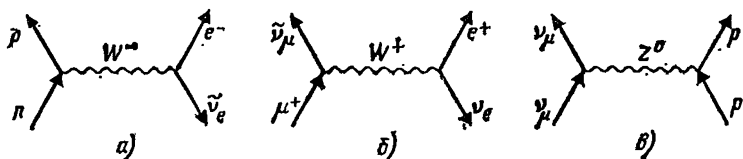


Рис. 5. а — распад нейтрона происходит через промежуточный векторный бозон (заряженный ток); б — распад положительного мюона (заряженный ток); в — процесс рассеяния нейтрино на протоне. Он осуществляется путем обмена нейтральным бозоном (нейтральный ток)

Но при увеличении энергии и соответственно уменьшении длины волны частиц необходимо знать структуру слабого взаимодействия. Нужна новая теория, общая, которая включала бы в себя теорию Ферми как первое приближение. Нужен микроскоп с большим увеличением.

Таким прибором и стала теория Вайнберга—Салама—Глэшоу. Для нее действие может разыгрываться в области пространства, в тысячи раз меньшей, чем атомное ядро. Здесь β -распад нейтрона выглядит так, как это показано на диаграмме (рис. 5).

Нейтрон, превращаясь в протон, излучает частицу — квант слабого поля, так называемый векторный бозон W^- . Эта частица переносит отрицательный заряд и распадается на электрон и нейтрино. Радиус слабого взаимодействия мал, и это означает, что масса W -бозона очень велика ($\sim 10^5$ МэВ).

Второй член семейства векторных бозонов W^+ можно увидеть на следующей диаграмме, изображающей распад μ^+ -мезона. Наконец, в теории возникли еще две частицы — массивная нейтральная частица Z^0 и знакомый нам γ -квант с нулевой массой покоя.

Пока расстояния между частицами малы, обмен W^- , W^+ - и Z^0 -бозонами или γ -квантами приводит к одинаковой силе взаимодействия. В этом сказывается единая природа слабых и электромагнитных сил. Они описываются единым по величине зарядом e , связанным с фермиевской константой слабого взаимодействия и массой бозона соотношением $G \sim e^2/M_W^2$.

Но вот расстояние между частицами стало больше радиуса слабых взаимодействий. Обмен виртуальными

бозонами теперь затруднен. Принцип неопределенности запрещает этим массивным частицам долгое существование, и они не проникают на большие расстояния. Но на безмассовые γ -кванты этот запрет не распространяется. Единые по природе электромагнитное и слабое взаимодействия выглядят «со стороны» как разные виды сил.

Успех единой теории состоял в том, что она смогла решить еще многие сложные вопросы, рассказ о которых увел бы нас далеко от темы нашей книги.

Процессы, которые можно объяснить обменом заряженными бозонами W^- и W^+ , наблюдались и были изучены до создания единой теории. Она просто позволила взглянуть на них с новой стороны. Но вот что касается нейтрального тяжелого Z^0 -бозона, то схема Салама—Вайнберга предсказала и его существование, и целый ряд процессов с его участием, которые еще не наблюдались на опыте. Эти реакции получили название процессов с нейтральными токами, поскольку Z^0 -бозон не переносит заряд.

Нейтральные токи были открыты в опытах на ускорителях в 1973 г. А еще через десять лет, в январе 1983 г. на семинаре Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) профессор К. Руббиа сообщил о том, что на установке UA-1 физики наблюдали векторные бозоны в свободном состоянии. Достаточно скоро и вторая группа исследователей из ЦЕРНа, работавшая на установке UA-2⁴, обнаружила эти фундаментальные частицы.

Создание электрослабой теории — крупнейшее достижение теоретической физики, потребовавшее концентрации усилий десятков выдающихся ученых. Не менее значительным и трудным для экспериментальной физики стало открытие векторных бозонов. Для того чтобы они могли рождаться в свободном состоянии, оказалось необходимым создать специальный ускоритель — так называемый pp-каллайдер (от *to collide* — сталкиваться).

Идея создания такого ускорителя на базе существовавшего в ЦЕРНе суперпротонного синхротрона (SPS) была предложена Клайном, Руббиа и Макинтайром в

⁴ Название установок образовано от слов *Underground Area* — подземное помещение.

1976 г. Через два года было принято решение о строительстве такой машины, а еще через три, в 1981 г., он начал функционировать.

В pp-коллайдере сталкиваются пучки протонов и антипротонов, разогнанные до колоссальных энергий ~ 500 ГэВ. При этом происходит рождение самых различных частиц, среди них и W^\pm -бозонов. Частота появления последних — несколько штук на миллиард столкновений, а время существования — $\sim 10^{-20}$ с. Для того чтобы обнаружить бозоны по их распадам и получить неопровержимые доказательства существования новых частиц, потребовалось создать уникальные детекторы. Вес установки UA-1 достигал 2000 т, а стоимость — 65 млн. долл.

С помощью ЭВМ на экранах дисплеев вычерчивались траектории зарегистрированных частиц, и по специальным программам из них отбирались полезные события.

В работе на детекторе UA-1 принимало участие около 140 физиков из 11 научных институтов Западной Европы и США. Группа UA-2, которую возглавлял П. Дарьюла, состояла из 60 исследователей.

В экспериментах первой половины 1983 г. обеими группами было зарегистрировано 106 заряженных и 11 нейтральных бозонов. Значения их масс, полученные в эксперименте, интересно сравнить с предсказаниями электрослабой теории.

Теория	Эксперимент
$M_{W^\pm} = (82,5 \pm 2,5) \text{ ГэВ}$	$M_{W^\pm} = (81 \pm 2) \text{ ГэВ}$
$M_{Z^0} = (93,3 \pm 2,5) \text{ ГэВ}$	$M_{Z^0} = (93 \pm 2) \text{ ГэВ}$

Как видим, согласие великолепное!

Остается добавить, что теперь усилия экспериментаторов направлены на то, чтобы зарегистрировать еще один тип частиц, существование которого предсказано П. Хиггсом. В этом случае стандартная электрослабая теория получит законченное экспериментальное подтверждение.

9. ЗЕМНЫЕ И КОСМИЧЕСКИЕ НЕЙТРИНО

Мы все время говорили об искусственных, созданных руками человека источниках нейтрино. В то же время существуют многочисленные естественные источники:

нейтринное излучение земных пород, космические и солнечные нейтрино и т. п.

В глубинах Земли и на ее поверхности рассеяны радиоактивные элементы, такие, как, например, уран, торий и продукты их распада. Часть этих элементов испытывает β^- -распады, при которых возникает антинейтринное излучение. Оно проникает сквозь толщу пород и несет интересную и разнообразную информацию о составе недр нашей планеты. Увы, регистрация земных $\bar{\nu}_e$ на сегодняшний день — технически невыполнимая задача. Даже оптимистические оценки величины их полного потока, сделанные на основании теплового баланса Земли (при распадах радиоактивных элементов выделяется тепло), показывают, что этот поток на четыре-пять порядков меньше, чем от реактора. К тому же основная часть земных антинейтрино имеет совсем малую энергию, много ниже порога большинства обратных реакций. Если воспользоваться для их регистрации таким классическим процессом, как $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$, то понадобится 1000 т жидкого осциллятора, чтобы земные антинейтрино вызвали в нем хотя бы одно событие в сутки (опять-таки при оптимистических оценках). Выделить это событие среди фоновых излучений пока не представляется возможным.

Землю бомбардируют и атмосферные нейтрино, точнее, нейтрино от космических лучей. Происхождение их следующее. Быстрые космические протоны, врываясь в земную атмосферу, взаимодействуют с ядрами и рожают потоки π - и K -мезонов. Последние распадаются в основном на мюоны и мюонные нейтрино. Продукты распада наследуют энергию мезонов, которая может достигать сотен гигаэлектронвольт. А чем больше энергия нейтрино, тем больше вероятность его взаимодействия с веществом, в результате которого рождается мюон.

Теперь представим себе, что огромная толща вещества поглотит все космическое излучение, все частицы, кроме нейтрино. Они проникнут сквозь это вещество и обнаружат себя потоком сопутствующих мюонов, рожденных в поверхностном слое и сумевшем выйти наружу. Откуда же взять такую толщу вещества? Использовать нашу Землю, отвечают физики, возможно, даже целиком земной шар. При этом надо регистрировать

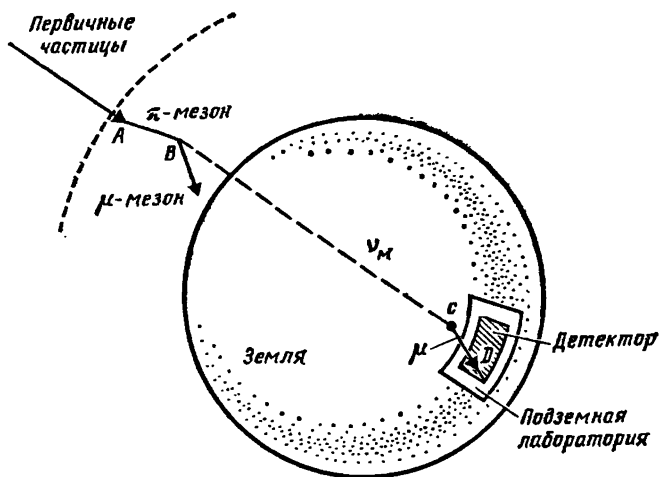


Рис. 6. Возникновение и регистрация космических нейтрино: А — точка рождения пиона; В — точка распада пиона и рождения мюона и нейтрино; С — точка взаимодействия нейтрино с веществом и рождения мюона; D — область регистрации мюона

мюоны, идущие не к Земле, а из ее глубины (рис. 6).

Предложил исследовать космические нейтрино по потоку мюонов М. А. Марков (1960 г.). В своей книге «Нейтрино» (1964 г.) он писал:

«Все известные частицы в космических лучах, кроме нейтрино, поглощаются на пути десятков километров вещества и, таким образом, полностью экранируются планетой, если глубина, на которую помещена регистрирующая установка, конечно, достаточна, чтобы можно было пренебречь маловероятным процессом рассеяния μ -мезонов большой энергии «назад», которое в принципе способно имитировать искомый эффект.

Другая, может быть, наиболее существенная особенность проявления конкретного эффекта $\nu + \text{нуклон} \rightarrow \text{нуклон}' + \mu$ в условиях космического эксперимента заключается в том, что регистрирующая установка собирает наблюдаемый эффект с грандиозных толщин вещества, лежащих под установкой...

Третья существенная особенность космического эксперимента заключается в принципиальной возможности использования в условиях хорошего экранирования подземной установки больших площадей детектирующих

устройств, порядка нескольких сотен квадратных метров.

Эти перечисленные своеобразные особенности космического эксперимента, как показывают детальные оценки, делают в принципе его возможным, хотя и трудно осуществимым.

Трудность его осуществления скорее чисто психологическая: физики, работающие на ускорителях, уже привыкли к индустриальному характеру современного эксперимента...»

Призыв к экспериментаторам, содержащийся в этих словах, был услышан. Всего через год после выхода книги были зарегистрированы первые космические нейтрино. Исследования проводились практически одновременно в двух глубочайших шахтах Южной Африки и Индии. Группа, работавшая под руководством Ф. Рейнса в Южной Африке с октября 1964 г. по август 1967 г., сообщила о регистрации 40 нейтринных событий. Второй установкой (Индия) к концу 1968 г. было зарегистрировано 9 событий.

В 70-х годах в изучение космических нейтрино включилась Баксанская нейтринная обсерватория АН СССР.

На Северном Кавказе, в Баксанском ущелье — любимом месте горнолыжников, в скалы уходит туннель. Его строительство продолжается и сейчас, и общая протяженность должна составить около 4 км, а толщина горных пород над дальним концом туннеля достигнет 2 км. По ходу туннеля располагаются экспериментальные залы — огромные искусственные пещеры и помещения меньших размеров — низкофоновые камеры. В начале туннеля, на расстоянии 550 м от входа, в первом экспериментальном зале работает установка для регистрации космических нейтрино — сцинтилляционный телескоп, созданный коллективом физиков под руководством А. Е. Чудакова. Он расположен на глубине 300 м под скалой, что в тысячи раз ослабляет поток космических частиц, попадающих в телескоп «сверху» и не позволяет полезным сигналам утонуть в море фоновых.

Площадь телескопа 16×16 м. Он размещен в четырехэтажном здании высотой 11 м и содержит более 3000 отдельных детекторов. Каждый из них — это стопятидесятилитровый бак с жидким сцинтиллятором. Баки расположены четырьмя горизонтальными слоями (по

слою на этаже) и вертикальными слоями вдоль стен дома.

Быстрая заряженная частица вызывает последовательные вспышки света в нескольких баках. Световые сигналы преобразуются в электрические импульсы и поступают в ЭВМ, которая определяет и запоминает направление полета частицы, ее скорость и т. д. Таким образом можно выделить мюоны, летящие из нижней полусферы, и зарегистрировать события, связанные с космическими нейтрино, на фоне других сигналов, частота которых в миллионы раз больше.

Надо отметить, что скинтилляционный телескоп — многоцелевой прибор. На нем ведутся самые разные исследования в области астрофизики и физики элементарных частиц, в том числе и поиски нейтрино от галактических объектов. Что это за объекты?

С солнечными нейтрино мы познакомимся в следующем разделе. Что касается других звезд, то они слишком далеки от Земли, чтобы можно было надеяться зарегистрировать приходящий от них поток нейтрино. Даже от ближайшей звезды он в $10''$ раз меньше, чем от Солнца. Но это в том случае, когда звезда находится в обычном «спокойном» состоянии и энергия, уносимая нейтрино, составляет $1\div 2\%$ от всей излучаемой ею энергии.

Так бывает не всегда. Порой нейтрино начинает играть ведущую роль в гигантских перестройках небесных тел. Хотя это продолжается недолго, но всепроникающее излучение успевает унести огромную энергию. Такая перестройка звезды — ее быстрое сжатие — носит название гравитационного коллапса. Он может сопровождаться выбрасыванием в пространство части звездного вещества, гигантской вспышкой, когда видимая яркость звезды возрастает в миллиарды раз. Тогда говорят: «вспыхнула сверхновая».

Автор позволит себе сделать небольшое отступление. Название «сверхновые» впервые появилось в работе двух астрономов В. Бааде и Ф. Цвирке. В. Бааде, внесший большой вклад в изучение светил, судьба которых во многом определяется нейтрино, в молодости подружился с В. Паули и одно время жил вместе с ним. Так В. Бааде оказался первым человеком, который слышал о существовании новой частицы. Однажды вечером В. Паули вошел со словами: «Я сделал сегодня не-

что ужасное. Физику-теоретика никогда не следует делать такого. Я предположил нечто, что никогда нельзя будет проверить экспериментально». В. Паули и не подозревал, какой хороший подарок он сделал своему другу.

Вернемся к гравитационному коллапсу. Сжатие звезды начинается тогда, когда внутри нее термоядерные источники энергии исчерпают все свои ресурсы. Если до этого существует равновесие между давлением нагретого газа ядра звезды и гравитационными силами, стремящимися сжать небесное тело, то после понижения температуры центральных областей равновесие нарушается. Вещество звезды устремляется к центру, она сжимается, а это снова приводит к повышению температуры ядра. Казалось бы, дальнейший процесс сжатия должен идти постепенно. Так и происходит для медленно вращающихся звезд с массой близкой или меньшей солнечной. Для более массивных светил картина эволюции может быть другой, а процесс сжатия — приобретать взрывной характер. Очевидно, что при этом выделяющаяся энергия должна каким-то образом весьма эффективно и быстро покидать ядро, понижая его температуру.

Один из механизмов утечки энергии с помощью нейтринного излучения был придуман Г. Гамовым и М. Шенбергом и получил от них название «урка-процесс». Столь необычная для астрофизики лексика имеет два распространенных объяснения. Первое основывается на том, что Г. Гамов родился и вырос в Одессе и поэтому использовал для похитителей энергии это колоритное определение. Второе, существенно более respectable, связано с проигрышем авторов в казино в Рио-де-Жанейро. После того как деньги перешли сначала в жетоны, а затем легко покинули физиков, им пришлось в голову, что энергия посредством нейтринного излучения способна проделать такую же шутку со звездой. Казино имело звучное название «Казино де Урка».

Урка-процесс может происходить внутри звезды при огромных температурах и плотностях вещества. Он состоит в захвате электронов большой энергии ядром, сопровождающимся испусканием нейтрино $e^- + A(Z, N) \rightarrow A(Z-1, N+1) + \nu$, затем образовавшееся ядро испытывает β -распад $A(Z-1, N+1) \rightarrow A(Z, N) + e^- + \bar{\nu}$. Так

энергия горячего электронного газа «перекачивается» в энергию ν и $\bar{\nu}$, которые могут унести ее из звезды.

Рассматривались и многие другие механизмы охлаждения звездного ядра.

Для нас существен тот факт, что постепенное сжатие ядра может перерасти в процесс, идущий с огромной скоростью и сопровождающийся гигантским всплеском нейтринного излучения. В течение очень короткого времени это излучение способно вырываться из глубин звезды, но со стремительным ростом плотности звездного вещества оно становится непрозрачным даже для нейтрино. И последние попадают в космическое пространство только из внешних слоев. По расчетам астрофизиков за несколько десятков секунд звезда излучает $\sim 10^{58}$ ней-

трино всех сортов ($\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$). Средняя энергия нейтрино составляет $10 \div 15$ МэВ, а их поток на поверхности Земли при коллапсе звезды в центре нашей Галактики равен 10^{12} $\nu/\text{см}^2$ за время $10 \div 30$ с. Эти оценки остаются справедливыми для всех современных моделей развития гравитационного коллапса.

Вспышки сверхновых в нашей Галактике не такое уж редкое явление. По разным оценкам продолжительность времени между ними колеблется от 15 до нескольких десятков лет. Коллапсы, не сопровождающиеся сбросом оболочки звезды, как при вспышке сверхновой (их называют «беззвучными»), должны происходить чаще.

Регистрация нейтрино от гравитационного коллапса — вполне реальная задача. Наиболее удобный метод

детектирования — использование реакции $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ (4). В этом случае полное число полезных событий в 100 т водородсодержащего жидкого цинтиллятора составит несколько десятков.

Для уменьшения фона необходимо разместить установку глубоко под Землей, использовать тот факт, что продолжительность серии нейтринных сигналов составляет всего несколько десятков секунд и, наконец, регистрировать нейтрино одновременно несколькими детекторами, расположенными в разных местах.

Эта программа сейчас осуществляется. В Советском Союзе, США, Италии создается целая служба наблюдения за нейтринным излучением галактических объектов. Так в СССР, кроме сцинтилляционного телескопа

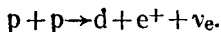
в Баксанской нейтринной лаборатории, на «прием» этих нейтрино настроен и детектор, расположенный в соляной шахте, недалеко от г. Артемовска. Его чувствительная часть состоит из 100 т жидкого сцинтиллятора, в котором галактические $\bar{\nu}_e$ могут регистрироваться по реакции (4).

10. СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО

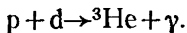
Опыты по регистрации солнечных нейтрино обнаружили еще один сюрприз, еще одну загадку, к сожалению, пока не разгаданную, но вызвавшую к жизни многочисленные и интересные гипотезы.

Нейтрино рождаются в недрах звезды, где при огромных температурах и давлениях идут термоядерные реакции синтеза тяжелых ядер из легких. Основным процессом является «горение» водорода и образование из него гелия. Как пример приведем реакции наиболее продуктивного, так называемого водородного, цикла.

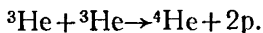
1. Два протона превращаются в ядро тяжелого изотопа водорода — дейтон



2. Протон и дейтон образуют ядро атома гелия-3



3. Наконец, два ядра гелия-3 сливаются и превращаются в гелий-4 и 2 протона



Конечный результат состоит в превращении четырех протонов в одно ядро гелия-4, выделении энергии (~ 25 МэВ) и испускании нейтрино с граничной энергией спектра $\sim 0,4$ МэВ. Поток этих мягких нейтрино на Земле составляет $\sim 6 \cdot 10^{10} \nu_e/\text{см}^2\text{с}$, около 95% полного потока. В спектре солнечных нейтрино лишь малая часть ν_e имеет энергию, большую 1 МэВ. Среди них особенно выделяются частицы, возникающие в термоядерных реакциях, в которых синтезируются ядра бора-8. При β -распаде этих ядер граничная энергия ν_e достигает ~ 15 МэВ, но в полном потоке нейтрино на Земле они составляют всего 10^{-4} часть.

Мягкий спектр — отсюда и малая вероятность взаи-

модействия с веществом (даже по нейтринным меркам), и невозможность использовать большинство обратных реакций из-за их нечувствительности к солнечным нейтрино (высокий энергетический порог) — вот трудности, возникающие перед экспериментаторами. Но вместе с тем нейтрино — единственная частица, для которой звездное вещество прозрачно. Они несут информацию о состоянии материи во внутренних областях Солнца и о процессах, происходящих там.

Опыты по регистрации солнечных нейтрино были выполнены группой исследователей, возглавляемой уже известным нам Р. Дэвисом. Измерения продолжались более 15 лет — своеобразный рекорд для экспериментальной физики.

Дэвис и его сотрудники использовали хлор-аргоновый метод Б. М. Понтекорво, тот самый, с помощью которого было доказано различие нейтрино и антинейтрино. Солнечные нейтрино должны вызывать реакцию (ведь это именно $\bar{\nu}_e$, а не ν_e !) $\bar{\nu}_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$.

Ее порог составляет 0,8 МэВ. Ожидалось, что в 1 т вещества (C_2Cl_4) образуется 1 атом аргона в год, при этом 80% всех событий в детекторе будут вызваны нейтрино, испущенными при распаде бора-8. Из этой оценки очевидна огромная масса мишени и необходимость самых интенсивных мер для борьбы с фоновыми процессами.

Поэтому Дэвис расположил свою аппаратуру на глубине, эквивалентной по массе вещества почти 4,5 км воды, в золотой шахте штата Южная Дакота. В подземном зале была установлена в горизонтальном положении цистерна с 380 000 л перхлорэтилена (C_2Cl_4), окруженная со всех сторон слоем воды. Этот слой дополнительно снижал поток фоновых частиц от стенок зала. Система извлечения аргона из гелия и его очистки от посторонних примесей занимала второй подземный зал. С большой изобретательностью был сконструирован и миниатюрный (объемом менее 1 см³) счетчик, в котором происходила регистрация излучения от распада ${}^{37}\text{Ar}$.

Уже первые годы исследований принесли неожиданный результат. Оказалось, что скорость счета нейтринных событий во много раз меньше, чем ожидали теоретики. Пришлось приступить к корректировке расчетных моделей, но полного согласия теории и эксперимента

добиться не удалось. Сейчас, после многих лет кропотливых измерений, усредненный экспериментальный эффект составляет $\sim 30\%$ от ожидаемого. Такое несоответствие вызвало к жизни множество гипотез.

Одни из них относились к характеру термоядерных реакций и условиям их протекания в глубинах Солнца.

Другие касались природы нейтрино. Не может ли оно быть нестабильным? Не существует ли у нейтрино необычного механизма потерь энергии весьма малыми порциями так, что пока оно «пробирается» к поверхности Солнца, его энергия уменьшается? Не переходит ли по дороге от Солнца к Земле один тип нейтрино (ν_e) в другие (ν_μ , ν_τ), такие, к которым хлорный детектор не чувствителен? (Последняя гипотеза, высказанная Б. Понтекорво, будет более подробно рассмотрена нами в разделе о нейтринных осцилляциях.)

Стоит отметить, что, несмотря на обилие предположений, ни одно из них пока не получило сколько-нибудь надежного подтверждения. Загадка солнечных нейтрино остается открытой.

Огромные трудности регистрации ν_e от Солнца, необходимость заглубления установки на километры водного эквивалента обусловили многолетнюю монополию группы Р. Дэвиса в этой области. Вместе с тем результаты опытов столь важны и, как мы видели, столь необычны, что требуют независимого подтверждения.

Исследования солнечных нейтрино в нашей стране должны начаться, когда вступит в строй вторая очередь Баксанской нейтринной обсерватории. Их цель не просто проверить результаты Дэвиса, но и провести гораздо более полное изучение потока солнечных нейтрино с использованием нескольких типов детекторов. Так, кроме хлор-аргонного метода, сейчас развивается так называемый галлиево-германиевый: $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$. Порог этой реакции 0,231 МэВ. Она имеет высокую чувствительность к нейтрино основных солнечных циклов, поток которых, как считают астрофизики, может быть сосчитан с гораздо большей точностью, чем поток борных нейтрино. Используя этот процесс (одновременно с хлор-аргонным методом), можно надеяться разобраться в степени «виновности» термоядерных реакций или самого нейтрино в «нехватке» солнечных нейтрино.

Мы видим, что нейтрино становится уникальным инструментом для наблюдения за небесными телами. Ро-

дилась новая наука — нейтринная астрофизика. И в ее создании весомый вклад советских ученых: Г. Т. Зацепина, Я. Б. Зельдович, М. А. Маркова, Б. М. Понтекоров, А. Е. Чудакова и многих других.

11. ПОИСКИ МАССЫ

Только немного успокоились страсти, вызванные проблемой солнечных нейтрино, как физический мир был захвачен следующей сенсацией — обнаружением массы у нейтрино. В Институте теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) в Москве группа ученых В. А. Любимов, Е. Т. Новиков, В. З. Нозик, Е. Ф. Третьяков и В. С. Козик в 1980 г. завершила чрезвычайно трудный пятилетний цикл исследований и пришла к выводу, что масса электронного антинейтрино не равна 0, а лежит в пределах от 14 до 46 эВ⁵.

Почему это вызвало такой интерес? Велико или мало значение массы в десятки электронвольт?

Обнаруженная масса $\tilde{\nu}_e$ приблизительно в 20 000 раз меньше, чем масса электрона, и на процессы β -распада, где выделяется энергия $\sim 10^6$ эВ, практически влияния оказать не может.

Если результаты эксперимента ИТЭФ правильны, то весьма вероятно, что ν_μ и ν_τ имеют массы и, возможно, существенно большие. (Их современные оценки $m_{\nu_\mu} < < 0,65$ МэВ, $m_{\nu_\tau} < 250$ МэВ.)

Теория двухкомпонентного нейтрино, в которой m_ν должна быть тождественно равна 0, нарушится, и поляризация окажется неполной, хотя отклонение и будет весьма мало.

Отсюда можно сделать шаг к предположению о несохранении лептонного заряда и нестабильности нейтрино, например за счет распадов $\nu_\mu \rightarrow \nu_e + \gamma$, или о существовании нейтринных осцилляций (см. ниже).

Успехи объединения слабых и электромагнитных взаимодействий в единое электрослабое вдохновили физиков на поиски так называемого Великого объединения — теории, которая объединила бы электрослабые и сильные взаимодействия. Вариантов такой теории не-

⁵ Точнее, не масса, а энергия покоя антинейтрино — $m_{\nu_e} c^2$. В дальнейшем мы будем использовать для массы именно эти единицы.

скольким, и часть из них предсказывает конечную массу нейтрино.

Таким образом, результаты опытов группы ИТЭФ могут стать подтверждением этих вариантов.

Если существование m_ν интересно и важно для физики микромира, то не менее, если не более, важно оно для астрофизики.

Мы коснемся только одного вопроса — о связи между массой нейтрино и плотностью вещества во Вселенной. Астрофизики уже давно ведут подсчеты этой плотности. Согласно их оценкам среднее число атомов во Вселенной составляет около 1 шт. в 1 м^3 , что соответствует плотности $(1-5) \cdot 10^{-31} \text{ г/см}^3$.

Вселенную заполняет и электромагнитное излучение — фотоны. Главную роль среди них играют так называемые реликтовые фотоны, оставшиеся нам в наследство от ранних стадий развития Вселенной. Реликтовое излучение «охладилось» в процессе ее расширения, и сейчас средняя его температура составляет 3 К, что соответствует энергии фотонов $\sim 10^{-3} \text{ эВ}$.

Число реликтовых фотонов в 1 см^3 составляет примерно 500 штук, их массу можно найти, используя соотношение Эйнштейна $E=mc^2$. Окончательно получается, что средняя плотность электромагнитного излучения во Вселенной $\sim 10^{-33} \text{ г/см}^3$, что на два порядка меньше плотности атомов, хотя число последних почти в миллиард раз меньше.

Если нейтрино безмассово, то реликтовые нейтрино всех сортов (а их общее количество по оценкам составляет ≈ 500 штук в 1 см^3), так же, как и фотоны, не внесут сколько-нибудь заметного вклада в общую плотность вещества. Совсем другая ситуация возникает, если масса $\nu \approx 20 \text{ эВ}$. В этом случае более 95% массы (энергии) приходится на долю нейтринного излучения. И это кардинально меняет наши представления о структуре и будущем Вселенной, поскольку эволюция Вселенной существенно зависит от плотности вещества в ней.

Если считать, что масса нейтрино равна нулю, то согласно современным представлениям Вселенная будет бесконечно расширяться. Достаточно, однако, чтобы m_ν составила десятки электронвольт, чтобы расширение через некоторое время сменилось сжатием. «Хотя это случится нескоро (расширение в течение ближайших 20 миллиардов лет нам гарантировано), вопрос о дале-

ком будущем, конечно же, является принципиально важным и волнующим» (Я. Б. Зельдович).

«Скрытая», т. е. недоступная пока нашим средствам наблюдения, масса Вселенной, связанная с нейтринным излучением, помогает объяснить и целый ряд особенностей движения и светимости больших галактик, которые до сих пор казались загадочными.

Не следует думать, что именно эксперименты группы ИТЭФ подтолкнули ученых к осознанию важности вопроса о массе нейтрино. Нет, конечно. Перечисленные проблемы уже были сформулированы и находились в центре внимания физиков. Поэтому известие об открытии массы ν и приобрело столь значительный резонанс.

Очевидно, каким абсолютно убедительным должно быть экспериментальное доказательство этого факта. Поэтому познакомимся, хотя бы кратко, с опытами, в которых определялась масса электронного нейтрино.

Указание на способ, с помощью которого это можно сделать, содержится уже в знаменитой работе Э. Ферми 1933 г.

При конечной массе нейтрино происходит изменение формы β -спектра, которое, в силу ожидаемой малости m_ν , может заметно сказаться только у его высокоэнергетической границы. На рис. 7 представлен участок спектра электронов от распада трития вблизи $E_{\text{гр}}$ (≈ 18600 эВ). Теория предсказывает, что при m_ν , равной нулю, кривая спектра будет подходить к оси энергии асимптотически. При $m_\nu c^2 = 50$ эВ (взято для примера) кривая резко падает вниз в области, отстоящей от $E_{\text{гр}}$ на величину $m_\nu c^2$.

Мы недаром привели здесь в качестве примера переход ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \nu$. Он имеет минимальное значение $E_{\text{гр}}$ и соответственно максимальную относительную чувствительность к массе нейтрино.

Первое определение m_ν по β -спектру ${}^3\text{H}$ было выполнено Г. Ханна и Б. Понтекорво еще в конце 40-х годов. Они заполняли тритием газовый счетчик и регистрировали распределение возникающих импульсов по величине. В этой пионерской работе была получена очень высокая (для такой простой установки) точность: $m_\nu c^2 \leq 1$ кэВ.

Только через 20 лет это значение было существенно уточнено. Экспериментаторы использовали для этого сложный магнитный спектрометр и комбинацию магнит-

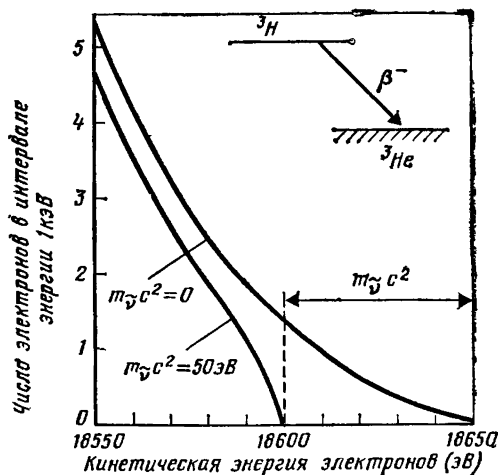


Рис. 7. Схема распада $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He}$ и кривая интенсивности электронов в области граничной энергии в зависимости от предположения о массе антинейтрино. Для двух случаев $m_{\nu}c^2 = 0$ и $m_{\nu}c^2 = 50 \text{ эВ}$

ного и электростатического спектрометров. Результаты стали $m_{\nu}c^2 \leq 200 \text{ эВ}$, затем $m_{\nu}c^2 \leq 75 \text{ эВ}$. Еще через несколько лет удалось добиться значения $m_{\nu}c^2 \leq 55 \text{ эВ}$ (К. Бергквист, 1972 г.).

В 1975 г. в ИТЭФ Е. Ф. Третьяковым был создан оригинальный магнитный спектрометр, и группа экспериментаторов приступила к измерениям β -спектра трития. За пятилетний период они провели 16 опытов и зарегистрировали около 100 000 электронов в области, отстоящей на 100 эВ от $E_{\text{гр}}$. Если просто построить участок спектра, близкий к $E_{\text{гр}}$, то за счет «размытия» энергий электронов, происходящего в источнике, самом спектрометре и т. п., определенного вывода о массе $\bar{\nu}_e$ сделать нельзя. Поэтому для получения результатов была принята следующая процедура. «Идеальный» теоретический спектр с определенным значением $m_{\bar{\nu}}$ подвергался математической обработке на ЭВМ, которая превращала его в «неидеальный», как бы прошедший весь путь от источника до счетчика (с точностью до знания экспериментальных параметров размытия). Затем обра-

ботанные спектры с разными заданными значениями $m_{\tilde{\nu}_e}$ сравнивались с экспериментальным, и искалось наилучшее совпадение. Оно получилось при $m_{\tilde{\nu}_e} c^2 = 35$ эВ. Окончательный вывод авторов: существует указание на конечную массу нейтрино, которая находится в интервале 14—46 эВ с вероятностью 99%.

Работа была опубликована, доложена на семинарах и конференциях, после чего подверглась самой придирчивой критике. Мнения о ее правильности разделились, но все сходились на необходимости дальнейшей и весьма тщательной проверки результатов в независимых экспериментах. Проведение таких экспериментов планируется несколькими группами в СССР и за рубежом, но, по-видимому, пройдет не один год, прежде чем проверка реально осуществится.

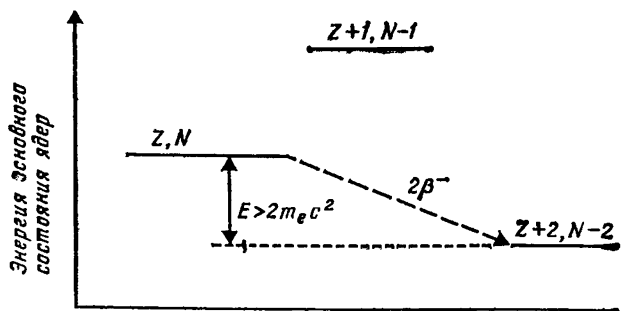
Пока же у физиков существует широкий спектр субъективных мнений — от вежливого (но твердого) отрицания до осторожного (но удовлетворенного) признания правильности величины $m_{\tilde{\nu}_e}$, полученной группой ИТЭФ.

Произошел ли еще один переворот в наших представлениях о микро- и макром мире, или на этот раз нейтрино воздержится от сюрпризов, покажет будущее.

12. ДВОЙНОЙ β -РАСПАД

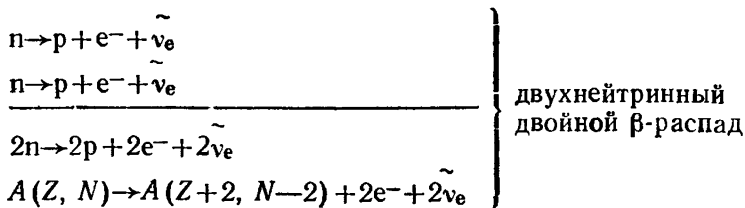
Существование двойного β -распада было предсказано чуть позже (1935 г.), чем существование нейтрино. Интерес к нему то почти совсем затухал, то вспыхивал с новой силой. Сейчас мы проходим через очередной максимум. Около десяти групп в различных странах мира заняты поисками двойного β -распада.

При обычном β -распаде в ядре A (Z, N) один нейтрон превращается в протон, ядро переходит в A ($Z+1, N-1$), испуская электрон и антинейтрино. В достаточно редких случаях оказывается энергетически выгодным двойной β -распад. При нем переход выглядит следующим образом: A (Z, N) \rightarrow A ($Z+2, N-2$). Он происходит непосредственно между этими ядрами, если энергия промежуточного ядра A ($Z+1, N-1$) выше, чем у A (Z, N) (рис. 8). Из ядра вылетают сразу два электрона. Встает, как оказалось, не праздный вопрос: вылетают ли при этом антинейтрино?

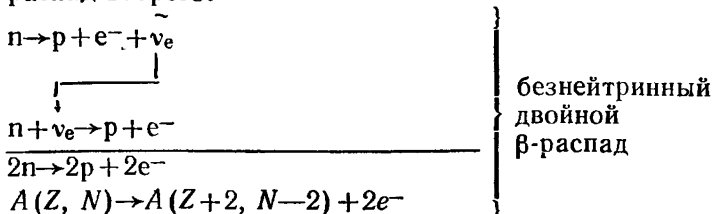


Р и с. 8. Энергетические уровни трех ядер. Ядро Z, N способно испытывать двойной β -распад

Действительно, превращение двух нейтронов в два протона может происходить независимо:



Если же предположить, что $\bar{\nu}_e$ тождественно ν_e , то этот же процесс может идти не независимо. Нейтрино, испускаемое при распаде одного нейтрона, индуцирует распад второго:



Очевидно, что в безнейтринном двойном β -распаде нарушается закон сохранения лептонного заряда, и он может происходить только при неполной поляризации ν_e . Иначе нейтрино, излученное при распаде первого нейтрона, не может поглотиться вторично. А неполная поляризация связана с конечной массой. Обнаружение

этого процесса принесло бы очень интересные результаты, поэтому так много сил и было затрачено на его поиски.

Сопоставляя между собой реакции, можно увидеть, как в экспериментах отличить двухнейтринный β -распад от безнейтринного. В последнем случае суммарная энергия электронов будет всегда постоянной — она определяется только разностью энергий основных состояний ядер $A(Z, N)$ и $A(Z+2, N-2)$. А в первом случае электроны обладают непрерывным спектром энергий, поскольку излучаются еще два антинейтрино.

Если лептонный заряд сохраняется, то безнейтринный распад запрещен, а вот если $\bar{\nu}_e$ и $\bar{\nu}_e$ тождественны, то теория предсказывает, что этот тип распада должен происходить с существенно большей вероятностью, чем двухнейтринный.

Опыт Дэвиса и другие эксперименты говорят о том, что сильного нарушения закона сохранения лептонного заряда и значительной деполяризации нейтрино ожидать нельзя. Можно надеяться обнаружить только слабый эффект. Соответственно этому безнейтринный двойной β -распад сильно заторможен по сравнению со случаем тождества электронных нейтрино и антинейтрино, и вероятность его может стать равной или меньшей, чем вероятность двухнейтринного процесса (который идет всегда, когда это энергетически возможно).

Сейчас экспериментаторы пытаются обнаружить безнейтринный процесс, идущий со временем жизни 10^{21} — 10^{22} лет. (В области $T_{1/2} < 10^{21}$ лет его уже не обнаружили.) А это значит, что в 1 г исходного вещества может происходить 1 распад за несколько лет. Как зарегистрировать такие активности?

Есть два способа, принципиально отличающиеся друг от друга. Первый, косвенный, носит название геологического. В нем исходным материалом является минерал, содержащий изотоп, способный претерпевать 2β -распад (Z, N) . Физикам необходимо обнаружить в этом минерале атомы продукта распада $(Z+2, N-2)$, накопившиеся там за миллиарды лет. Чтобы это сделать, надо, чтобы дочернее вещество возможно легче отделялось от материнского. Такому требованию удовлетворяют инертные газы, поэтому в геологических экспериментах исследовались переходы $^{128}_{23-}\text{Te} \rightarrow ^{128}_{2\beta-}\text{Xe}$, $^{130}_{2\beta-}\text{Te} \rightarrow ^{130}_{2\beta-}\text{Xe}$, $^{82}_{2\beta-}\text{Se} \rightarrow ^{82}_{2\beta-}\text{Kr}$.

Расскажем об одном из опытов, которые провела группа Т. Кирстена (США). Они взяли образцы теллуровой руды из глубинной шахты в Колорадо, чтобы иметь дело с веществом, подвергавшимся как можно меньшему воздействию космических лучей. Затем несколькими методами определили возраст образца.

Он оказался равным около 1,3 млрд. лет. Следующий шаг — размельчение образца, выделение из него газов и исследование их на масс-спектрографе. При определении изотопного состава Хе выяснилось, что содержание изотопа ^{130}Xe в десятки раз превышает обычное его содержание для атмосферного ксенона. Другие же изотопы находятся в обычной пропорции. Авторы рассмотрели все возможные процессы и реакции, которые могли бы привести к аномальному повышению концентрации ^{130}Xe , и пришли к выводу, что единственным разумным объяснением его избытка остается 2β -распад. Проанализировав возможные потери газа за период существования образца, они определили период полураспада теллура-130: $T_{1/2}^{130}\text{Te} = (2,60 \pm 0,28) \cdot 10^{21}$ лет. Другие исследовательские группы дали близкие цифры.

Существование двойного β -распада было подтверждено, но какого именно — двухнейтринного или очень подавленного безнейтринного, — этого опыты пока сказать не могли. Вопрос о механизме распада в геологических экспериментах остается открытым.

Ответ на него мог быть получен только в прямых экспериментах (второй способ), в которых наблюдались продукты распада. Как мы уже говорили, если бы сумма энергий двух зарегистрированных электронов была постоянной и равной энергии, выделяемой при распаде, это указывало бы на существование безнейтринного процесса и нарушение закона сохранения лептонного заряда. Прямые опыты проводились с самыми разнообразными типами детекторов: камерой Вильсона, фотоэмульсиями, искровой камерой, сцинтилляционными и полупроводниковыми счетчиками.

Начиная с 1951 г. и до наших дней исследователи увеличили чувствительность экспериментов примерно в 100 000 раз! Несколько раз на протяжении этих лет казалось, что безнейтринный распад обнаружен. Но через короткое время опыты, поставленные с теми же изотопами, но с более высокой точностью, опровергали эти оптимистические результаты.

В природе существуют десятки изотопов, которые способны к 2β -распаду. Однако удобных для прямых опытов переходов не так уж и много — всего четыре-пять, поскольку для них должен выполняться целый ряд условий. Здесь и достаточная распространенность изотопа в природной смеси, и возможно большая энергия перехода, и благоприятные теоретические оценки вероятности безнейтринного 2β -распада, и т. п.

Среди наиболее «любимых» экспериментаторами оказались процессы $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$ и $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$. Данные о них приведены в таблице.

Переход		Энергия перехода, МэВ	Распространенность изотопа в естественной смеси, %
$^{48}_{20}\text{Ca}$	$2\beta^- \rightarrow ^{48}_{22}\text{Ti}$	4,27	0,185
$^{76}_{32}\text{Ge}$	$2\beta^- \rightarrow ^{76}_{34}\text{Se}$	2,04	7,65

Мы ограничимся рассказом об опытах миланской группы по исследованию перехода $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$, поскольку именно в них сейчас получены рекордные ограничения на период безнейтринного распада.

Полупроводниковый счетчик — сверхчистый кристалл германия — выступал в этих опытах в качестве как источника электронов 2β -распада, так и их детектора. Частицы теряли свою энергию в кристалле, и на регистрирующую схему поступал электрический импульс, пропорциональный потерянной энергии. Спектр импульсов, набранный за весьма продолжительное время (тысячи часов!), обрабатывался. При этом исследовались события в области 2 МэВ — там, где на равномерное распределение фоновых импульсов должен был бы накладываться «пик» от двух электронов с суммарной энергией 2,045 МэВ. Отсутствие заметного «пики» позволяло ввести ограничения на период безнейтринного 2β -распада.

Сначала опыты проводились на поверхности Земли со счетчиком объемом $V=17\text{ см}^3$, а затем в низкофоновой лаборатории «Гора Капуцинов» на глубине 40 м водного эквивалента ($V=24\text{ см}^3$). Наконец, последние

эксперименты были сделаны в Международной лаборатории космических лучей, расположенной в туннеле под Монбланом на глубине 4200 м водного эквивалента ($V=68 \text{ см}^3$ и 130 см^3).

В течение всего времени проведения экспериментов — с 1967 г. по настоящее время — непрерывно улучшались условия измерений: увеличивалась защита детектора, подбирались для нее специальные материалы с малым содержанием естественной радиоактивности, совершенствовалась электроника.

Вот как изменились сами результаты:

Год	Период безнейтринного двойного β -распада
1967	$3 \cdot 10^{20}$ лет
1970	$1,2 \cdot 10^{21}$ лет
1973	$5 \cdot 10^{21}$ лет
1983	$2 \cdot 10^{22}$ лет

К каким же выводам можно прийти?

Как мы уже говорили, на безнейтринный двойной β -распад может быть наложен двойной запрет: законом сохранения лептонного заряда и полной поляризацией нейтрино (двухкомпонентной теорией).

Предположим, что лептонный заряд не сохраняется, и все отличие $\bar{\nu}_e$ от ν_e только в их поляризации. Тогда существование малой массы нейтрино могло бы внести деполаризацию и обусловить малую, но не нулевую вероятность безнейтринного 2β -распада. Какой максимальной массе соответствует $T_{1/2} \leq 2 \cdot 10^{21}$ лет? Теоретики оценивают ее весьма приближенно как ~ 10 эВ. Это значение находится как раз в наиболее «горячей» области (вспомним, что результаты группы ИТЭФ дают значения $m \sqrt{c^2} = 14-46$ эВ). Очевидно, как важно увеличить чувствительность опытов по безнейтринному 2β -распаду. Не сменится ли при этом ограничение на период знаком равенства?

13. НЕЙТРИННЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ

Один из физических институтов нашей страны прислал в подарок Б. М. Понтекорво то ли прибор, то ли

игрушку. Он состоял из двух маятников — длинных стержней с медными дисками на концах. Каждый маятник мог колебаться на оси независимо от другого.

Но вот к крючкам на стержнях прикреплялась слабая пружинка, соединяющая маятники. Теперь, если раскачать один из них (второй в этот момент неподвижен), то его колебания постепенно затухают. Зато начинает колебаться со всевозрастающей амплитудой второй маятник. Через некоторое время первый оказывается неподвижным, а размахи второго достигают максимума. Затем картина начинает изменяться в обратную сторону. Колебания как бы «перетекают» от одного маятника к другому, и так 10—15 раз, пока трение не поглотит всю начальную энергию. Подарок имел символическое значение.

Дело в том, что колебания связанных маятников описываются теми же уравнениями, что и поведение нейтрино в случае существования нейтринных осцилляций или, как их теперь все чаще называют, осцилляций Понтекорво.

Нейтринной физике трудно пожаловаться на отсутствие интересных гипотез. Но идея об осцилляциях, несомненно, одна из самых красивых и неожиданных.

Она базируется на двух предположениях. На том, что у нейтрино есть конечная масса, и на том, что закон сохранения лептонного заряда хоть немного, но нарушается. Если бы лептонный заряд сохранялся точно, электронные и мюонные нейтрино существовали бы совершенно независимо, так же, как независимы колебания двух не связанных маятников. Допустив малое нарушение закона, мы уже не сможем говорить о чистом состоянии для электронного или мюонного нейтрино, и в пучке этих летящих частиц окажутся возможными переходы одного «сорта» нейтрино в другой и назад, так же, как передаются колебания от одного маятника к другому.

Конечная масса необходима для осуществления этих переходов. Теория относительности разрешает их, только если скорость нейтрино будет меньше скорости света. Мы говорили об осцилляциях $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$, но в общем случае следует говорить обо всех возможных переходах между всеми возможными типами нейтрино. Однако для простоты далее всюду речь пойдет лишь о переходах между двумя типами нейтрино.

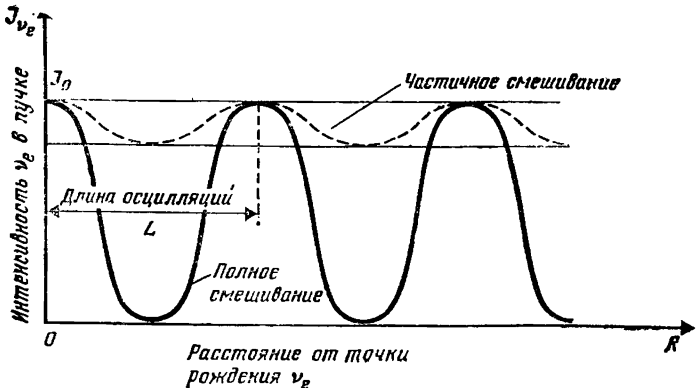


Рис. 9. Изменение интенсивности пучка нейтрино (ν_e) в зависимости от расстояния в случае существования нейтринных осцилляций

Итак, в пучке летящих ν_e начнут появляться ν_μ , и, следовательно, интенсивность потока электронных нейтрино сначала уменьшится, потом опять станет прежней (I_0) и т. д.

На рис. 9 приведен график I в зависимости от расстояния. Переход $\nu_e \rightleftharpoons \nu_\mu$ может быть частичным (пунктирная кривая); в этом случае говорят о частичном смешивании состояний. А может быть полным (сплошная кривая) — полное смешивание. Расстояние L называется длиной осцилляций и зависит от энергии нейтрино и еще одной величины, Δ^2 , которая есть функция квадратов масс нейтринных состояний и измеряется в $(\text{эВ})^2$. Чем больше энергия нейтрино, тем больше длина осцилляций, чем больше Δ^2 , тем меньше L . При нулевой массе нейтрино $\Delta^2=0$ и $L \rightarrow \infty$.

Впервые об осцилляциях говорилось в работах Б. М. Понтекорво в 1957—1958 гг. Надо сказать, что идея была встречена без особого энтузиазма. Слишком много привычных представлений должно было быть пересмотрено. Но шло время, и положение изменилось. Причинами этого прежде всего стали парадокс солнечных нейтрино и эксперимент группы ИТЭФ, в которых была обнаружена конечная масса нейтрино.

Ни один из этих опытов не может считаться прямым указанием на существование осцилляций. Мы видели, что выдвигались самые разные объяснения «нехватки» солнечных нейтрино, не связанные с осцилляциями. Ре-

зультаты измерения массы нейтрино еще должны быть подтверждены. Однако совокупность косвенных указаний вызвала в последние годы огромный интерес к осцилляциям Понтекорво. Появились десятки теоретических работ советских и зарубежных групп. В поиск осцилляций включились экспериментаторы, работающие на ускорителях высоких энергий, сильноточных протонных ускорителях, реакторах, занимающиеся космическими и солнечными нейтрино.

Каким образом можно наблюдать эффект осцилляций?

Предположим, что у нас есть источники нейтрино и детектор, расположенные на расстоянии R друг от друга. Детектор регистрирует процесс, вызываемый лишь определенным типом нейтрино, а именно тем, который излучает источник. Если осцилляций нет, счет полезных событий должен составлять I_0 событий в сутки. Существование осцилляций приведет к уменьшению числа таких событий по отношению к расчетам — ведь часть нейтрино перейдет в другое состояние, а к ним детектор нечувствителен.

Для источника, в котором рождаются нейтрино разных энергий (например, реактора), будет наблюдаться еще один эффект — искажение первоначального спектра нейтрино. Частицы с большей энергией имеют и большую длину осцилляций, их переход в другое состояние идет медленнее по сравнению с частицами меньших энергий. В итоге — падение эффекта по сравнению с расчетным и искажение спектра.

Может быть и еще один способ — появление эффекта. Для этого надо детектор «настроить» на тот тип нейтрино, который не излучается источником и может появиться только в результате осцилляций.

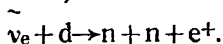
Опытов проведено уже достаточно много. Наиболее далеко (до малых значений Δ^2) удалось продвинуться в реакторных экспериментах, и на них мы остановимся.

Весной 1980 г. в кулуарах научных семинаров, заседаний, конференций начали передаваться слухи о том, что группа Рейнеса обнаружила нейтринные осцилляции. И обнаружила по результатам своих прежних ра-

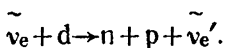
бот о взаимодействии реакторных $\bar{\nu}_e$ с ядрами тяжелого водорода — дейтонами (d), состоящими из протона и нейтрона.

Антинейтрино может реагировать с дейтоном по следующим каналам:

1. Вызвать превращение протона в нейтрон (обратный β -распад на дейтоне)



2. Разрушить, расщепить дейтон на составляющие его нуклоны



В первом случае «годится» только электронное антинейтрино: ведь речь идет об обратном β -распаде.

Во втором случае для реакции безразличен⁶ тип нейтрино. Теория предсказывала, что отношение вероятностей процессов равно $\sim 0,43$. В эксперименте получалось величина $0,17 \pm 0,09$, т. е. случаев обратного β -распада дейтона наблюдалось существенно меньше, чем следовало из расчетов. Это можно было отнести за счет пе-

реходов $\bar{\nu}_e$ в другой тип нейтрино, т. е. осцилляций.

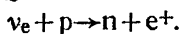
В октябре 1980 г. работа была опубликована. Но еще до публикации она подверглась критике — авторам ставилось в вину завышение точности результатов и изменение некоторых опубликованных ранее цифр. В течение нескольких лет они придерживались прежней точки зрения, но вот в обзоре Рейнеса 1983 г. мы видим уже другие, исправленные данные, которые говорят, что предсказания теории и результаты эксперимента отличаются не в $\sim 2,5$ раза, а не более чем в 1,5 раза (с учетом ошибок они могут быть и просто равны). Сильное утверждение заменено слабым подозрением.

Как уже говорилось, почти четверть века Рейнес и его сотрудники были единственными, кому удавалось проводить эксперименты с реакторными $\bar{\nu}_e$.

Но в том же 1980 г. эта монополия была нарушена группой физиков (объединение CALTECH—ISN—TUM), работавших сначала на реакторе в Гренобле, а потом в Гёзгене. Ведущую роль в этом объединении играет лауреат Нобелевской премии, иностранный член АН СССР Р. Мёссбауэр.

Для поиска осцилляций они использовали реакцию

На разных расстояниях от реактора измерялся



(4)

⁶ Если не вводить специальных предположений.

спектр. позитронов, однозначно связанный со спектром $\bar{\nu}_e$. К настоящему времени такие измерения проведены на трех расстояниях от реактора: 8,8, 38, 46 м и предполагаются на 65 м. Искажений спектра, которые могли бы указывать на существование осцилляций, в пределах ошибок измерений не наблюдалось. Это означало, что при максимальном смешивании нейтрино величина $\Delta^2 < 0,015 \text{ (эВ)}^2$ (в полном противоречии с первоначальными выводами Рейнеса).

Надо сказать, что в экспериментах группы Мёссбауэра использовался детектор, соединяющий в себе все последние достижения техники регистрации частиц: жидкостные сцинтилляционные счетчики, в которых по временной форме световой вспышки происходило разделение позитронов из реакции (4) и фоновых частиц; проволочные пропорциональные камеры, наполненные гелием-3, регистрирующие нейтроны и место их появления; сложную систему активной и пассивной защиты; самую современную электронику.

Эксперименты были поставлены тщательно, и трудно было даже предположить, что в ближайшем будущем результаты их будут сильно превзойдены или опровергнуты. Однако получилось иначе.

От объединения отделилась группа физиков, которая стала работать во Франции, в Буже (около Лиона). Они около двух лет хранили молчание, но вот на Международной конференции «Нейтрино-84» появилась работа этой группы. В аннотации к ней говорилось:

«На двух расстояниях от реактора 13,6 м и 18,3 м был измерен спектр антинейтрино от мощного реактора... Зарегистрировано 63 000 событий обратного β -распада $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$. Наблюдалась разница между скоростью счета в этих двух положениях. В работе обсуждается совместимость этих результатов с существованием нейтринных осцилляций».

Конечно, здесь подразумевается различие в скорости счета, вызванное не тривиальным обстоятельством — разным удалением от реактора и, следовательно, разными телесными углами попадания нейтрино в детектор. Это все было учтено аккуратным образом. И тем не менее счет на большем расстоянии был на $\sim 10\%$ меньше, чем ожидалось.

Отсюда Лионская группа получила значение $0,1 \text{ (эВ)}^2 \geq \Delta^2 \geq 0,04 \text{ (эВ)}^2$ в явном противоречии с группой Мёссбауэра: $\Delta^2 \leq 0,015 \text{ (эВ)}^2$. Кто прав? Действительно ли в Буже наблюдали осцилляции? Можно надеяться на то, что ответ — дело ближайшего будущего. Слишком важны эти вопросы для нейтринной физики и всей физики элементарных частиц. Советские экспериментаторы также готовы внести свой вклад в их решение. Мы обсудим это в следующем разделе.

14. РЕАКТОР В «НЕЙТРИННОМ СВЕТЕ»

Может ли нейтрино найти применение для практических целей?

Мы давно уже привыкли к тому, что физика элементарных частиц и ядерная физика овладели весьма многочисленными «рабочими специальностями». Область их простирается от большой энергетики до вирусологии, от приборов на спутниках до установок, с помощью которых ведут разведку земных глубин. Косвенным образом и нейтринная физика способствует развитию других областей науки и техники. Например, вскоре после того как были созданы большие сцинтилляционные детекторы нейтрино, на их основе удалось разработать счетчики, которые определяли активность человека. Однако прямой выход нейтрино в практику казался невозможным. Понятно, какое препятствие стояло на этом пути — огромная проникающая способность нейтрино, трудность их регистрации.

В последние годы в связи с развитием техники детектирования и появлением нового поколения нейтринных источников — реакторов и ускорителей — стали обсуждаться проекты практического применения этой частицы. Так, предлагалось с помощью нейтринного пучка, полученного на ускорителе высокой энергии, передавать сигналы подводным лодкам, находящимся на противоположной (от ускорителя) стороне нашей планеты. Предлагалось также «просвечивать» землю нейтринным пучком в поисках нефти и т. п. (По материалам иностранной печати).

Мы расскажем только об одном из проектов, поскольку именно он активно претворяется в жизнь и, как недавно было показано в демонстрационных опытах,

имеет все шансы на успех. Он был предложен в 1974—1975 гг. физиками, работающими в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова.

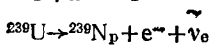
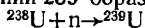
Предложение это родилось из следующих соображений. Стремительное развитие ядерной энергетики, всевозрастающее строительство атомных электростанций, атомных систем теплоснабжения, опреснительных установок и т. п. поставило на повестку дня целый ряд новых вопросов, связанных с экономикой ядерной энергетики, с экологией и другими проблемами. Новые отрасли требуют от ученых и инженеров возможно более полного и точного знания того, как происходит выработка энергии, в каком режиме работы реактора она оптимальна. Возникают и вопросы, касающиеся нераспространения ядерного оружия.

Ведь в процессе мирного использования атомной энергии накапливаются большие запасы делящихся веществ, а для создания взрывных или отравляющих устройств необходимо сравнительно небольшое их количество.

Очевидно, что отсутствие строгого и точного контроля за получением и использованием этого продукта на каждом из реакторов может привести к хищению ядерных материалов и распространению оружия.

Поэтому этим контролем занимаются и в различных странах, и в Международном агентстве по атомной энергии (МАГАТЭ). Методы основаны на измерениях и расчетах. В каждом реакторе существует сложная система датчиков, регистрирующих его тепловые характеристики, нейтронные потоки в активной зоне и т. п. Для каждого типа реакторов создана математическая программа расчетов на ЭВМ, позволяющая, опираясь на данные измерений, определить состав активной зоны: сколько там «сгорело» урана, сколько накопилось плутония⁷ и других радиоактивных элементов.

⁷ Плутоний-239 образуется в реакциях



При захвате нейтрона он делится так же, как и ^{235}U , и может служить и ядерным топливом, и ядерной «взрывчаткой».

Важно и развитие новых независимых способов внутриреакторных измерений.

И вот оказывается, что нейтрино дает уникальные возможности «заглянуть» непосредственно в активную зону работающего реактора, увидеть ее в «нейтринном свете». Оно свободно проникает через биологическую защиту и несет полезную информацию.

Во-первых, о тепловой мощности реактора. В начале этой брошюры мы уже говорили о том, что поток $\bar{\nu}_e$, рождающихся в реакторе, пропорционален числу делений, которые происходят в активной зоне. Поскольку в каждом делении выделяется определенная энергия (≈ 200 МэВ), то можно сказать, что поток антинейтрино пропорционален выделению энергии или тепловой мощности реактора. Число полезных событий, зарегистрированных в детекторе, связано с выработкой энергии (тепловой мощностью, умноженной на время) пропорциональной зависимостью. Коэффициент пропорциональности определяется геометрией установки и эффективностью детектора. Он может быть либо рассчитан, либо найден из калибровочных измерений при строго известной мощности реактора.

Итак, число зарегистрированных $\bar{\nu}_e$ дает информацию о выработке энергии.

Во-вторых, важные сведения позволяют получить наблюдения за спектром антинейтрино.

Советские физики предположили, что этот спектр от осколков деления урана-235 должен довольно сильно отличаться от спектра осколков плутония-239. Для исследования этого они провели кропотливые расчеты и поставили опыты. В опытах измерялись спектры электронов, излучаемых осколками одновременно с антинейтрино. Все подтвердилось — результаты расчетов и экспериментов совпадали и доказывали, что антинейтрино, излучаемые плутонием-239, имеют в среднем меньшую энергию. Это означало, что по мере выгорания в активной зоне урана-235 и накопления плутония-239 де-

формируется, смягчается спектр $\bar{\nu}_e$. В свою очередь, становится более мягким и спектр позитронов реакции $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$, который может быть зарегистрирован в специальном детекторе $\bar{\nu}_e$.

Остается рассчитать количественные зависимости и наблюдать непосредственно в работающем реакторе динамику горения ядерного топлива.

Надо сказать, что для 1974—1975 гг. предложение использовать антинейтрино для практических нужд казалось по меньшей мере смелым. Еще раз упомянем, что единственные, кто сумел в это время зарегистрировать $\bar{\nu}_e$ от реактора, были Рейнес и его группа. Несколько попыток других исследователей не принесли успеха. Но

даже в опытах Рейнеса по исследованию реакции $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$, в работах, публиковавшихся с 1953 по 1966 г., счет полученных событий составлял единицы, в лучшем случае — десятки в сутки.

Для задачи нейтринной диагностики надо было набирать большую статистику за относительно короткое время. Речь шла о сотнях и тысячах зарегистрированных за сутки нейтринных событиях. Опыты Рейнеса носили качественный характер. Прикладные задачи требовали точных количественных данных.

Таким образом, советским физикам предстояло не просто догнать американскую группу, но и существенным образом продвинуться вперед.

Для выполнения этого замысла решено было создать на Ровенской АЭС специальную низкофоновую нейтринную лабораторию. План был поддержан А. П. Александровым, М. А. Марковым, Б. М. Понтекорово. В создании лаборатории приняли участие проектировщики Урала, строители и энергетики Украины. Задача лаборатории — осуществить большую программу фундаментальных нейтринных исследований и одновременно начать работы по практическому использованию этой частицы.

И вот на глубине 13 м под землей, под вторым блоком Ровенской АЭС, за слоем специального «тяжелого» бетона и стали построен экспериментальный зал. Нейтроны и γ -кванты, излучаемые активной зоной реактора, гибнут в этой защите. Мягкая и нуклонная компоненты космического излучения также надежно поглощаются в толще вещества, значительно ослабляется и поток мезонов. От естественной радиоактивности грунта зал защищен стальной облицовкой стен, пола и потолка.

В зале установлен специальный домик из водяных

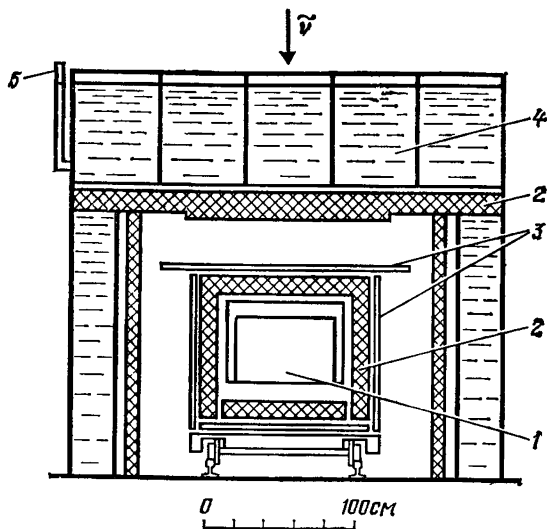


Рис. 10 Установка НД-1 внутри водяной защиты: 1 — бак с жидким сцинтиллятором; 2 — борированный полиэтилен; 3 — пластины активной защиты; 4 — баки с водой; 5 — уровнемер

баков, внутри которого и находится «сердце» установки — нейтринный детектор (рис. 10). Это прямоугольный бак из очень прозрачного пластика, наполненный 240 л жидкого сцинтиллятора, в котором растворена соль гадолиния. С торцов бак просматривается 24 фотоумножителями. Остальные стороны обернуты специальной отражающей пленкой, чтобы весь свет после отражений попал на фотоумножители.

Нейтрино взаимодействует с протоном сцинтиллятора и рождает позитрон и нейтрон. Первый импульс света в детекторе связан с позитроном и аннигиляционными квантами, второй — с γ -излучением гадолиния, захватившего нейтрон.

В память ЭВМ поступает информация об энергии позитрона, времени между первым и вторым импульсами, энергии γ -лучей захвата. Счет полезных событий составляет (250—350) шт/сутки, фон существенно меньше. Подавлению фона, кроме пассивной защиты лаборатории, способствует и активная защита — сцинтилляционные пластины, окружающие детектор. При про-

хождении через них мюона детектор на время выключается и это исключает часть космического фона.

Для того чтобы убедиться, что регистрируются именно нейтринные события, часть воды из баков, составляющих домик, выливалась. При этом счет задержанных совпадений остался прежним.

Через относительно короткое время в экспериментальном зале были смонтированы еще два детектора нейтрино. Один из них регистрирует только нейтроны от реакции (4) с помощью счетчиков, наполненных гелием-3. Второй состоит из множества кремниевых полупроводниковых счетчиков. Он создан для исследования процесса рассеяния антинейтрино на электронах.

Какие результаты уже получены в лаборатории?

Начнем с фундаментальных.

В опытах, проводившихся в 1983—1984 гг. как на сцинтилляционном спектрометре, так и на детекторе с гелиевыми счетчиками, удалось определить вероятность взаимодействия антинейтрино с протоном (сечение этого процесса) с точностью $\sim 6\%$, т. е. в 3 раза лучшей, чем это сделано в работах Рейнеса и др.

Нейтринные осцилляции пока не обнаружены. Уже можно утверждать, что осцилляции с такими параметрами, какие были получены Рейнесом и др. в экспериментах с дейтоном, не наблюдаются. А вот выбор между результатами группы Мёссбауэра и результатами физиков, работающих в Буже, сделать пока нельзя. Не хватает чувствительности. Надо продолжать опыты и совершенствовать методику (что сейчас и делается).

Теперь о прикладных исследованиях.

В экспериментах на Ровенской АЭС подтвердились выводы о возможности нейтринной диагностики. Физики построили градуировочную кривую, связывающую показания нейтринного детектора и энерговыработку реактора. Используя ее, они могли постоянно следить за уровнем мощности аппарата. Наглядной иллюстрацией этого служил тот факт, что об изменении режима работы реактора в нейтринной лаборатории узнавали сначала по показаниям своих приборов, а потом уже от диспетчеров АЭС.

Первые шаги на пути практического применения нейтрино сделаны. Но, конечно, предстоит еще очень большая работа, прежде чем нейтринный детектор станет штатным прибором атомной электростанции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Что происходит в нейтринной физике сейчас, в данную минуту?

Положение можно сравнить с накапливанием сил перед очередной атакой. Должно пройти несколько лет, и мы узнаем...

Составляет ли масса нейтрино десятки электронвольт или ее верхний предел опустится в область просто электронвольт. Тогда понадобятся новые идеи и новые методы для дальнейшего поиска этой массы.

Справедливы ли предположения лионской группы о существовании нейтринных осцилляций.

О новых результатах большой программы изучения солнечных и космических нейтрино.

Исследователи двойного β -распада продвинулись в точности своих опытов еще на порядок и будут работать в области периодов полураспада 10^{23} — 10^{24} лет.

Мы получим количественные результаты о взаимодействии реакторных $\bar{\nu}_e$ с электроном, дейтоном, более сложными ядрами.

Нейтрино начнет решать практические задачи.

Мы вправе ожидать много нового и в тех вопросах и проблемах нейтринной физики, о которых не удалось рассказать на страницах этой брошюры. Ведь мы ничего не говорили о современных нейтринных экспериментах на ускорителях высокой энергии и о планах создания новых огромных машин, о проектах подводных нейтринных опытов и о многих других проблемах.

Наконец, остается ожидать новых сюрпризов.

Заканчивая эту брошюру, я хотел бы привести две цитаты, разделенные семнадцатилетним периодом:

«Современнику трудно гадать, какое истинное место займет нейтрино в физике будущего. Но свойства этой частицы столь элементарны и своеобразны, что естественно думать, что природа создала нейтрино с какими-то глубокими, пока для нас не всегда ясными «целями».

М. А. Марков, 1964 г.

«...Всего за полвека из ускользающей сущности нейтрино превратилось в фундамент нашего существования... Произошла «нейтринная революция». Эта революция затрагивает самые фундаментальные основы мира, в котором мы живем. Она произвела переворот и в нашем подходе к физическим явлениям».

Я. Б. Зельдович, М. Ю. Хлопов, 1981 г.

ЛИТЕРАТУРА

Марков М. А. Нейтрино. М., Наука, 1964.

Понтекорво Б. М. Детство и юность нейтринной физики: некоторые воспоминания. — Природа, 1983, № 1, с. 43.

Зельдович Я. Б., Хлопов М. Ю. Масса нейтрино в физике элементарных частиц и космологии ранней Вселенной. — Успехи физических наук, 1981, т. 135, с. 45.

Микаэляни Л. А. Нейтрино. — Природа, 1979, № 6, с. 20.

Домогацкий Г. В., Зацепин Г. Т. Нейтрино и астрофизика. — В сб.: Будущее науки. М., Знание, 1980, с. 79.

Боровой А. А. Как регистрируют частицы. М., Наука, 1981.

Александр Александрович Боровой

12 ШАГОВ НЕЙТРИННОЙ ФИЗИКИ

Гл. отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*

Редактор *К. А. Кутузова*

Мл. редактор *Н. А. Сергеева*

Обложка художника *Г. Ш. Басырова*

Худож. редактор *М. А. Гусева*

Техн. редактор *Л. А. Солнцева*

Корректор *Н. Д. Мелешкина*

ИБ № 7774

Сдано в набор 25.03.85. Подписано к печати 31.05.85. Т 04122. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. 3. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,44. Тираж 34 000 экз. Заказ 783. Цена 11 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 854007.

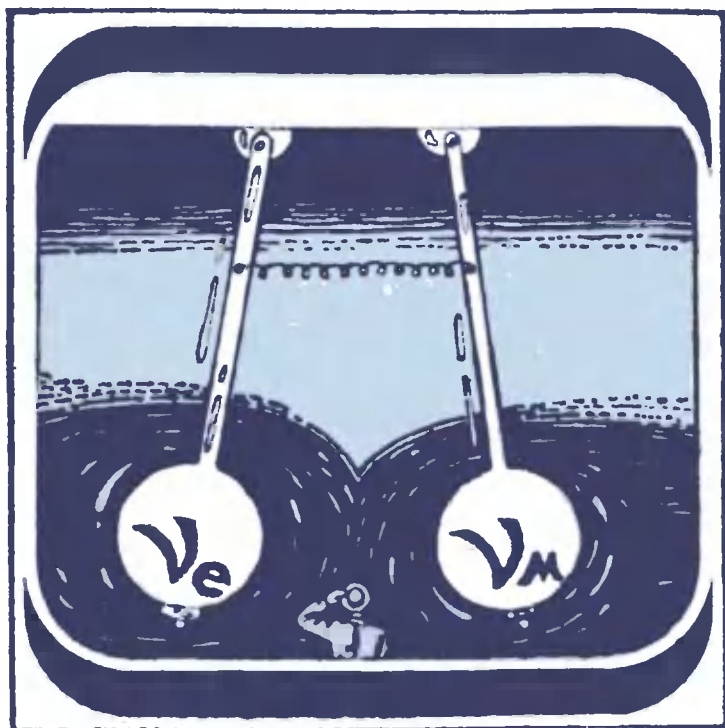
Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку. Подписка на брошюры издательства „Знание“ ежеквартальная, принимается в любом отделении „Союзпечати“.

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в „Каталоге советских газет и журналов“ в разделе „Центральные журналы“, рубрика „Брошюры издательства „Знание“.

Цена подписки на год 1 р. 32 к.



СЕРИЯ

ФИЗИКА