

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 1995

Нейтрино: от полтергейста к частице

Ф. Райнес

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 1995 г.)

PACS numbers: 13.15. + g

Вторая мировая война оказала огромное влияние на жизнь и карьеру очень многих из нас, для кого это были годы формирования личности. Во время войны и затем сразу после ее окончания я был вовлечен в испытания ядерных бомб. Некоторые из нас хотели знать, как эта рукотворная звезда может продвинуть наше понимание физики. На первый взгляд этот необычный объект приводил к множеству процессов деления атомов и, следовательно, являлся очень интенсивным источником нейтрино. Я не раз размышлял над этим, но не предпринимал никаких действий.

Затем в 1951 г. после испытаний на атолле Эниветок (Eniwetok) в Тихом океане я решил, что действительно хотел бы заняться фундаментальной физикой. Поэтому я обратился к моему шефу, руководителю теоретического отдела в Лос-Аламосе, Дж. Карсону Марку (J. Carson Mark), и попросил у него отпуск, чтобы иметь возможность все обдумать. Он согласился. Я перебрался в совершенно пустой офис и погрузился на несколько месяцев в чистый блокнот, стараясь найти проблему, стоящую того, чтобы потратить на нее всю жизнь. Это было очень трудное время. Прошли месяцы, а я смог додуматься лишь до того, что бомба может быть использована для непосредственной регистрации нейтрино. В конце концов, это устройство обеспечивало чрезвычайно интенсивный импульс нейтрино, и поэтому давало возможность отличить нейтринный сигнал от фона. Некоторые грубые оценочные вычисления привели меня к заключению, что бомба является лучшим источником нейтрино. Все, что было нужно — это детектор, позволяющий производить измерения в объеме одного кубического метра или около того. Итак, подумал я, нужно обсудить это с настоящими экспертами.

Так случилось, что летом 1951 г. в Лос-Аламосе находился Энрико Ферми (Enrico Fermi). Я робко постучал к нему в дверь и сказал: "Я хотел бы погово-

рить с Вами несколько минут о возможности регистрации нейтрино". Он был очень приветлив и ответил: "Хорошо, расскажите мне, что у Вас на уме?" Я сказал: "Во-первых, что касается источника нейтрино, я думаю, что бомба подходит лучше всего". После коротких раздумий он ответил: "Да, бомба — лучший источник". До сих пор все было хорошо! Тогда я предложил: "Но нужен очень большой детектор. Я не знаю, как сделать такой детектор". Он подумал немного и сказал, что он тоже не знает. Это заявление Мастера меня потрясло. И я оставил эту идею до случайного разговора с Клайдом Коуэном (Clyde Cowan). Мы находились на пути в Принстон для переговоров с Лиманом Шпитцером (Lyman Spitzer) об управляемом синтезе, когда из-за поломки двигателя аэроплан приземлился в Канзас-Сити. Во время вынужденного простоя мы бродили вокруг места посадки и обсуждали, что интересного можно сделать в физике. "Давай займемся какой-нибудь действительно важной проблемой", — сказал я. Он ответил: "Давай работать над позитронием". Я возразил: "Нет, позитроний — очень хорошая вещь, но этот вопрос полностью контролирует Мартин Детч (Martin Deutsch). Поэтому давай не будем работать с позитронием". Затем я предложил: "Клайд, давай работать над проблемой нейтрино". Его мгновенный ответ был: "Замечательная идея!" Он знал о нейтрино так же мало, как и я, но он был хорошим экспериментатором и отчаянно храбрым человеком. Поэтому мы ударили по рукам и приступили к работе над нейтрино.

Необходимость непосредственной регистрации

Прежде, чем продолжить этот рассказ, наверно будет уместно напомнить о свидетельствах, подтверждавших существование нейтрино в то время, когда я и Клайд приступали к изучению этого вопроса. Нейтрино Вольфганга Паули (Wolfgang Pauli) [1] было постулировано для того, чтобы объяснить очевидную потерю энергии-импульса в процессе ядерного бета-распада. В своем знаменитом письме к Тюбингенскому конгрессу (Tübingen congress) в 1930 г., он написал: "Я допускаю, что мой

прием может на первый взгляд показаться довольно невероятным, потому что, если бы нейтрон¹ существовал, он был бы давно открыт. Тем не менее, кто не рискует, тот не выигрывает. Поэтому мы должны серьезным образом обсуждать любой путь к спасению".

Вплоть до 1951 г. все свидетельства в пользу существования нейтрино были получены, так сказать, "на месте преступления", так как не было зарегистрировано взаимодействие нейтрино с другими частицами. В 1930 г. такой авторитет, как Нильс Бор (Niels Bohr), указывал [2], что не существует "ни экспериментальных, ни теоретических" доказательств, подтверждающих справедливость закона сохранения энергии в этом случае. На самом деле он хотел учесть возможность того, что придется отказаться от закона сохранения энергии в мире ядер.

Однако, как бы ни была привлекательна идея нейтрино для объяснения бета-распада, необходимо было получить доказательство его существования не в точке распада, а в другом месте — нейтрино необходимо было обнаружить в свободном состоянии в результате взаимодействия с веществом в удаленной точке.

Следует отметить, однако, что теория была столь притягательна в своем объяснении бета-распада, что независимо от регистрации взаимодействия свободного нейтрино с веществом, вера в нейтрино, как нечто реально существующее, была всеобщей. Несмотря на всеобщую веру в нейтрино, то, что оно не было зарегистрировано, придавало ему имидж неуловимой частицы или полтергейста.

Таким образом, почему мы хотели зарегистрировать свободное нейтрино? Потому что все говорили, что это сделать невозможно. Не очень разумно, но мы были захвачены этим вызовом. В конце концов, у нас была бомба, являвшаяся прекрасным интенсивным источником нейтрино. Поэтому, может быть, мы имели преимущество перед другими. Итак, обладая изрядной долей нахальства, но тем не менее испытывая определенное уважение к некоторым авторитетам, я объяснил что-то в этом духе Ферми, и он одобрил. Формально комментарии сводились к следующему. Если удастся продемонстрировать существование нейтрино в свободном состоянии, т.е. путем регистрации в отдаленной точке, то диапазон применимости фундаментальных законов сохранения будет расширен на ядерную область. С другой стороны, если не удастся обнаружить эту частицу в предсказываемом диапазоне, возникнут очень большие проблемы.

Полагают, что это Бор сказал: "Глубокий вопрос — это вопрос, на который интересен как отрицательный, так и положительный ответ". Я считаю, что вопрос существования нейтрино можно отнести к глубоким вопросам.

Как обстояли дела с регистрацией? Мы долгое время топтались вокруг да около, пока не добрались до существа вопроса. Наконец, мы решили искать реакцию $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$. Если свободное нейтрино существует, то такая реакция обратного бета-распада должна существовать, как указывали Ханс Бете (Hans Bethe) и Рудольф Пайерлс (Rudolf Peierls), и как, я уверен, сделал бы Ферми, если бы ему подвернулся случай написать это

ранее. В то время еще не было известно, отличаются ли $\bar{\nu}_e$ и ν_e . Мы решили исследовать эту реакцию, потому что, если мы верили в то, что называется сейчас "перекрестной симметрией", то, подставив измеренное значение времени жизни нейтрона, мы могли определить сечение взаимодействия для данной реакции, т.е. получить прекрасный чистый результат. (В действительности, как мы поняли через несколько лет из работы Ли и Янга, из-за несохранения четности и спиральности нейтрино, сечение взаимодействия оказалось в два раза больше.) Отлично, мы приступили к рассмотрению вопроса регистрации нейтрино. Какого размера детектор нам нужен? Как много событий мы надеемся зарегистрировать? Какие характерные черты взаимодействия мы используем для регистрации сигнала? Бете и Пайерлс в 1934 г. [3], почти сразу после статьи Ферми о бета-распаде [4], оценили, что при энергии порядка нескольких МэВ сечение взаимодействия, с которым придется работать, составляет около 10^{-44} см². Чтобы понять, как мало это взаимодействие, заметим, что средний свободный путь нейтрино в жидком водороде составляет 1000 световых лет. Во время посещения Калтеха (Caltech) Паули кратко выразил свои сомнения, заметив: "Я совершил ужасную вещь. Я ввел частицу, которую невозможно зарегистрировать". Неудивительно, что Бете и Пайерлс в 1934 г. пришли к заключению, что "не существует способа обнаружения нейтрино, реализуемого на практике" [3]. Через 20 лет я напомнил Бете об этом официальном заявлении, и он ответил с присущим ему чувством юмора: "Вам не следует верить всему, что Вы читали в статьях".

Техника эксперимента

Согласно теории Паули–Ферми (1930–1934 гг.), должен был существовать процесс обратного бета-распада:

$$\nu + A^z \leftrightarrow A^{z-1} + e^+ \quad \text{или} \quad \bar{\nu} + A^z \leftrightarrow A^{z+1} + e^- \quad (1)$$

Мы решили сфокусировать наше внимание на конкретной реакции

$$\nu + p \rightarrow n + e^+$$

из-за ее простоты и нашего знания о том, что сцинтилляционная органических жидкостей, открытая недавно Колманном (Kallmann) и др. [5], могла бы быть использована в больших объемах (~ 1 м³), соответствовавших нашим потребностям. (В то время, когда Коуэн и я приступили к работе, "большим детектором" считался детектор объемом в 1 л или около того. Несмотря на то, что детектор, который мы себе представляли, был больше по объему на 3 порядка величины, этот подход казался нам интересным и достойным внимания.) Идея состояла в том, чтобы просматривать большой объем жидкого сцинтиллятора с помощью множества фотоумножительных трубок, расположенных на его границе. Тогда нейтрино образовывали бы позитроны, которые ионизировали бы среду, вызывая вспышки света, которые, в свою очередь, могли бы быть зарегистрированы фотоумножителями и преобразованы в электрические импульсы.

Мысль, что такой чувствительный детектор мог бы работать в непосредственной близости (в пределах

¹ Когда нейтрон был открыт Чадвиком (Chadwick), Ферми переименовал частицу Паули в "нейтрино".

100 метров) от наиболее разрушительного взрыва, произведенного человеком, была отчасти эксцентричной, но у нас был опыт работы с бомбами, и мы чувствовали, что сможем спроектировать соответствующую систему. В нашем бомбовом предложении детектор можно было подвесить в вертикальном вакуумном резервуаре в непосредственной близости от ядерного взрыва, и он свободно падал бы в течение нескольких секунд, пока проходила бы ударная волна. Он собирал бы данные до тех пор, пока огненный шар, несущий продукты деления источника нейтрино, поднимался бы в небо. Мы рассчитывали зарегистрировать несколько событий, учитывая, что сечение предсказывалось на уровне 10^{-43} см² протон⁻¹, но оценки фона показывали, что необходимая чувствительность не может быть гарантирована для сечения меньше 10^{-39} см² протон⁻¹, т.е. на четыре порядка величины больше! Надо отдать должное мудрости директора университета в Лос-Аламосе Норриса Брадбери (Norris Bradbury), одоббившего попытку эксперимента, полагаясь на то, что нам удастся улучшить чувствительность еще примерно в 1000 раз.

Я вспоминаю беседу с Бете, в которой он спрашивал, как мы предполагаем отличать нейтринные события от других событий, обусловленных бомбой. Я сказал, что в дополнение к использованию большого щита, который бы экранировал гамма-лучи и нейтроны, для идентификации нейтринного взаимодействия мы могли бы использовать задержанные по времени совпадения между сигналами регистрации позитрона и нейтрона. Только через несколько месяцев мы с Клайдом установили, что это требование значительно понижает и другие фоны, так что вместо бомбы в качестве источника мы можем использовать ядерный реактор. Я удивлен, почему мы так долго шли к этому очевидному сейчас выводу, и как это ускользнуло от других, несмотря на то, что мы неоднократно описывали суть проблемы людям, окружавшим нас. Но в одной вещи я уверен: открытое, свободное обсуждение наших идей было лучшим стимулятором для нас и сыграло значительную роль в нашем последующем успехе. В нашем общении мы не были скованы опасениями, что кто-то опередит нас с публикацией результатов. Работы по регистрации нейтрино были не популярны в 1952 г.

Мы послали Ферми письмо о наших планах использования ядерного реактора:

"4 октября 1952 г.

Дорогой Энрико,

Мы полагаем, что Вам будет интересна последняя версия нашего эксперимента по регистрации свободного нейтрино, поэтому мы посылаем это письмо. Как Вы помните, из-за трудностей с фоном, мы планировали использовать ядерный взрыв в качестве источника нейтрино. Неделю назад мы поняли, что если регистрировать только совпадения между позитронным импульсом и импульсом поглощения нейтрона, можно снизить фоновые проблемы до уровня, при котором достаточно использование хенфордского (Hanford) реактора. Вы помните, что мы планируем использовать реакцию $p + \bar{\nu} \rightarrow n + \beta^+$. Бор, добавленный в жидкий сцинтиллятор, позволяет регулировать среднее время T между этими двумя событиями, и мы собираемся работать с $T \sim 10$ мкс. Наш детектор представляет из себя цилиндр размером в 10 кубических футов, наполненный флюоресцирующим веществом, вокруг которого расположено 90

фотоумножительных трубок (5819-х), сгруппированных в две большие трубы — по 45 штук в каждой. Эти две группы скомплектованных трубок, изотропно распределенных вокруг изогнутой цилиндрической стены, работают в режиме совпадения, чтобы избежать срабатывания от шума в отдельной трубке. Внутренняя поверхность стены будет покрыта диффузным отражателем, и мы ожидаем, что система будет чувствительна к выделенной энергии и не чувствительна к положению точки взаимодействия внутри сцинтиллятора. Эта чувствительность к энергии будет использована для дальнейшего подавления фона. В дополнение к ртути и свинцу, для защиты от естественной радиоактивности будут использованы антисовпадения для космических лучей. Мы планируем погрузить весь детектор в большой объем с раствором бора, потому что нам необходимо дополнительно уменьшить реакторный фон ниже того уровня, который обеспечивает хенфордский экран.

К счастью, быстрый реактор здесь, в Лос-Аламосе, создавал такой же поток утечки, как в Хенфорде, так что мы могли испытать наш прибор до того, как ехать в Хенфорд. Далее, если достаточное количество быстрых нейтронов из быстрого реактора попадет в наш детектор, мы сможем моделировать двойные импульсы с помощью импульса протона отдачи, который следует за захватом нейтрона. Мы ожидаем, что скорость счета в нашем детекторе, расположенном приблизительно в шести футах от поверхности реактора в Хенфорде, будет составлять порядка 1/5 срабатывания в минуту, а фон будет несколько меньше этой величины.

Вы можете себе представить, как мы взволнованы всем этим, прекратили приготовления к использованию бомбы и работаем, как сумасшедшие, чтобы осуществить идеи, описанные выше. Из-за существенного упрощения эксперимента мы уже далеко продвинулись в создании электронного прибора и связанного с ним оборудования и ожидаем, что через несколько месяцев мы будем в Хенфорде ловить увертливую частицу. Мы были бы благодарны за любые комментарии, которые Вы посчитаете нужным сделать.

Искренне Ваши, Фред Райнес, Клайд Коуэн".

8 октября 1952 г. Ферми прислал ответ:

"Дорогой Фред,

Спасибо за Ваше с Клайдом Коуэном письмо от 4 октября 1952 г. Я очень заинтересовался Вашими новыми планами по регистрации нейтрино. Конечно, Ваш новый метод гораздо легче осуществить, и большое преимущество этого метода заключается в том, что измерения могут быть повторены любое количество раз. Я очень хотел бы посмотреть, как будет работать Ваш сцинтилляционный счетчик размером в 10 кубических футов, хотя я не знаю ни одной причины, которая может помешать этому.

Удачи.

Искренне Ваш,
Энрико Ферми".

Размышляя над тем, что позволило нам перейти от бомбы к реактору, я прихожу к выводу, что именно наше упорство привело нас от фактически невыполнимого эксперимента к очень перспективному. Открытия деления ядер и органических сцинтилляторов создали плацдарм для регистрации нейтрино, а наиболее важным барьером на пути была всеобщая вера в то, что нейтрино не регистрируемо.

Хенфордский эксперимент

Первую попытку регистрации нейтрино мы провели на одном из хенфордских реакторов, которые Вашингтон построил во время второй мировой войны для производства плутония, используемого в атомной бомбе.

По сравнению с современными, контролируруемыми компьютерами килотонными детекторами, дворцами из кристаллов натриевого иода, гигантскими ускорителями и группами в несколько сотен человек, наши усилия по регистрации нейтрино кажутся весьма умеренными. Однако в начале 1950-х гг. наша работа считалась крупномасштабной. Идея использования 90 фотоумножительных трубок и детекторов, достаточно больших, чтобы окружить человека, рассматривалась как очень необычная. Мы столкнулись с множеством вопросов без ответа. Являются ли сцинтилляторы достаточно прозрачными для того, чтобы передать свет на необходимое нам расстояние в несколько метров? Какой коэффициент отражения у краски? Можно ли добавить ловушку для нейтронов так, чтобы не отравить сцинтиллятор? Не замаскируют ли сигнал шумы трубок и послеимпульсы от такого большого количества фотоумножительных трубок? И кроме того, не монополизировали ли мы рынок фотоумножительных трубок?

Вскоре стало ясно, что новый детектор, спроектированный для регистрации нейтрино, обладал необычными свойствами также по отношению к другим частицам. Например, эффективность регистрации нейтронов и гамма-лучей составляла почти 100 %. Мы обнаружили, что детекторы этого типа могут быть использованы для изучения таких различных характеристик, как множественность нейтронов в процессах деления, захват мюона, время жизни мюона и естественная радиоактивность людей. Спроектированный нами детектор оказался достаточно большим, так что человек, согнувшись, мог втиснуться внутрь него. Заинтригованные этим, мы провели измерения полной K^{40} радиоактивности у двух человек. До создания нашего детектора для измерения K^{40} радиоактивности человека было необходимо превратить в пепел объект исследований или уменьшить фон, поместив счетчики Гейгера глубоко под землю. Хотя это был прекрасный детектор нейтронов и гамма-лучей, мы противились искушению отклониться в сторону и использовать его характеристики для чего-то еще кроме поиска нейтрино.

Наше оборудование прибыло в Хенфорд весной 1953 г. Какие результаты мы получили конкретно в этом реакторном эксперименте? У нас было 300 литров жидкого сцинтиллятора, просматриваемого с помощью 90 двухдюймовых фотоумножительных трубок. Фон причинял нам много беспокойства, и, для того чтобы оптимизировать защиту, нам пришлось нагромождать и убирать сотни тонн свинца. Мы работали круглыми сутками, борясь с грязными сцинтилляционными трубками, белой отражающей краской, которая отслаивалась от стенок под действием сцинтиллятора на основе толуола и кадмиевого проприоната нейтронной ловушки, и т.д. и т.д. Мы набирали данные с работающим и выключенным реактором и трудились до тех пор, пока не оказались абсолютно истощенными.

Но несмотря на наши усилия, фон от космических лучей и электрического шума при выключенном реак-

торе сводил на нет наши усилия по достижению необходимой чувствительности.

После нескольких месяцев работы мы пришли к выводу, что сделали все, что могли в борьбе с огромным, не связанным с работой реактора, фоном. Мы свернули наше оборудование и сели на поезд, идущий назад в Лос-Аламос.

По пути домой мы анализировали данные. Мы проверили с помощью нейтронного источника и испытаний с защитой, что сигнальный след $0,4 \pm 0,2$ события мин^{-1} , не являлся следствием утечки нейтронов в детектор. Этот незначительный результат только возбудил наш аппетит. Мы поняли, что должны работать еще лучше.

По возвращении домой мы пытались разгадать причину возникновения сигнала, не связанного с работой реактора. Был ли он от "естественных" нейтрино? Мог ли он быть связан с быстрыми нейтронами, возникающими в результате ядерного захвата мюонов из космических лучей? Простейший путь узнать это — поместить детектор под землю. Поэтому в Лос-Аламосе мы провели подземные испытания, которые показали, что фон был действительно от космических лучей. Пока мы занимались этими фоновыми испытаниями, ходили слухи, что некоторые теоретики конструировали мир, сделанный в основном из нейтрино!

Эксперимент в Саванна Ривере

Вдохновленные хенфордскими результатами, мы изучали, как построить детектор, которой бы еще более эффективно отсекал фон. Мы руководствовались тем, что нейтроны и позитроны легко отличить друг от друга, и мы могли бы для этого лучше использовать их характеристики.

Схема регистрации, использованная в новом эксперименте, была следующей. Антинейтрино от продуктов деления в реакторе попадает на водяную мишень, содержащую хлорид кадмия. Как было отмечено ранее, в реакции $\bar{\nu}_e + p$ образуются позитрон и нейтрон. Позитрон замедляется и аннигилирует с электроном, образуя два гамма-луча по 0,5 МэВ, которые проникают через водяную мишень. Лучи регистрируются двумя большими сцинтилляционными детекторами, расположенными на противоположных сторонах мишени и работающими в режиме совпадений. Нейтрон замедляется водой и захватывается кадмием, производя многочисленные гамма-лучи, которые тоже регистрируются двумя сцинтилляционными детекторами. Таким образом, признаком антинейтрино являются совпадения между быстрыми импульсами, произведенными e^+ аннигиляцией, и импульсами, возникающими через несколько микросекунд в результате захвата нейтрона в кадмии.

Эти идеи были воплощены в металл и сопутствующую электронику с помощью различных групп поддержки в Лос-Аламосе. Тогда, в конце 1955 г., по предложению и при большой моральной поддержке Джона А. Вилера (John A. Wheeler), детектор был поставлен на новый, мощный (700 МВт в то время) компактный тяжеловодный реактор на заводе в Саванна Ривере в Айкене, Южная Каролина (the Savannah River Plant in Aiken, South Carolina).

Этот реактор отлично подходил для изучения нейтрино, благодаря наличию хорошо экранированного помещения, расположенного в массивном здании в

11 метрах от реактора и на глубине 12 метров под землей. Интенсивный поток $\bar{\nu}$ ($1,2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$) и уменьшение фона от космических лучей внесли существенный вклад в успех эксперимента, который даже при этих благоприятных условиях потребовал 100 дней измерений в течение одного года.

Регистрация нейтрино

В Саванна Ривере мы выполнили серию измерений, чтобы показать, что [6]:

а) связанный с реактором сигнал согласовывается с теоретическими ожиданиями;

б) первый импульс сигнала обусловлен позитронной аннигиляцией;

в) второй импульс сигнала обусловлен захватом нейтрона;

г) величина сигнала зависит от количества протонов в мишени;

д) с помощью эксперимента поглощения исключается возможность регистрации излучения отличных от нейтрино частиц.

Мы руководствовались правилом: для того, чтобы сделать вывод о том, что мы действительно наблюдали нейтрино Паули–Ферми, каждая проверка должна была принести ожидаемый для нас результат. Неожиданный результат подразумевал бы либо экспериментальную ошибку, либо необходимость внесения корректив в наш взгляд на нейтрино.

Скорость счета

Мы получили связанный с реактором сигнал: $3,0 \pm 0,2$ события в час. Этот результат приводил к очень благоприятной последовательности отношений сигнала к фону: отношение сигнала к суммарному случайному фону равнялось 4/1, сигнала к коррелированному (как в случае захвата нейтрона) независимому от реактора фону — 5/1 и сигнала к связанному с реактором случайному фону — больше 25/1. Определив эффективности регистрации позитрона и нейтрона с помощью радиоактивного источника и используя известный (грубо) поток $\bar{\nu}$, мы получили, что сечение взаимодействия $\bar{\nu}_e$ с протоном равняется

$$\bar{\sigma}_{\text{exp}} = (12_{-4}^{+7}) \times 10^{-44} \text{ см}^2$$

в сравнении с ожидаемым

$$\bar{\sigma}_{\text{th}} = (5 \pm 1) \times 10^{-44} \text{ см}^2.$$

Первый и второй импульсы

Изменяя толщину свинцового листа, расположенного между водяной мишенью и одним из жидких скинтилляторов, и уменьшая таким образом эффективность регистрации позитронов в одной из детекторных триад (но не в остальных), мы показали, что первый импульс обусловлен позитроном. Сигнал, как и ожидалось, уменьшился в триаде со свинцом, но остался неизменным в триаде без свинца. Дальнейшая проверка спектра первых импульсов показала, что он лучше согласуется с распределением, полученным для позитронного тестового источника, чем с фоновым распределением.

Меняя концентрацию кадмия в водяной мишени, мы показали, что второй импульс обусловлен нейтроном. Как ожидалось для нейтрино, удаление кадмия приводит к исчезновению коррелированного счета, оставляя счет

выше случайного на уровне $0,2 \pm 0,7 \text{ час}^{-1}$. Спектр временных интервалов между первым и вторым импульсами согласуется со спектром, ожидаемым для фотонов, испускаемых при захвате нейтрона. С помощью нейтронного источника было получено, что последовательность ложных импульсов, в которых и первый импульс также вызван нейтроном, не может привести к наблюдаемому сигналу — быстрые нейтроны в первую очередь вызывают увеличение случайного счета, а не коррелированного, что несовместимо с наблюдаемой связанной с реактором скоростью счета.

Сигнал как функция числа протонов в мишени

Изменение числа протонов в мишени достигалось без заметного изменения эффективности регистрации детектора как для фона, так и для $\bar{\nu}_e$ событий. Проверка осуществлялась с помощью смешивания легкой и тяжелой воды в приблизительно равных количествах. Измеренная скорость счета для разбавленной мишени была $0,4 \pm 0,1$ от скорости счета для 100 % H_2O мишени, что согласуется с ожидаемой величиной 0,5.

Проверка на поглощение

Вклад других известных частиц, образуемых в процессе деления, был исключен с помощью экрана для нейтронов и гамма-лучей. Было получено, что при добавлении большой защиты, которая понижает чувствительность к нейтронам и гамма-лучам по крайней мере на порядок величины, сигнал оставался постоянным, т.е. связанный с реактором сигнал составлял $1,74 \pm 0,12 \text{ час}^{-1}$ с экраном и $1,69 \pm 0,17 \text{ час}^{-1}$ без защиты.

Наша телеграмма Паули

Проверки были завершены, и мы обрели уверенность в результате [7]. Это было великолепное ощущение непосредственного участия в процессе познания. В июне 1956 г. мы решили, что пришло время сообщить о наших результатах человеку, который и начал все это, когда молодым написал свое знаменитое письмо, в котором ввел нейтрино, сказав для большего эффекта, что не может прийти на заседание и рассказать об этом лично, потому что должен идти на танцы.

Наше сообщение было переправлено в ЦЕРН, где Паули прервал заседание, для того чтобы зачитать телеграмму участникам совещания (и затем экспромтом сделал несколько замечаний, касающихся открытия): "Мы счастливы сообщить Вам, что мы определенно зарегистрировали нейтрино от фрагментов деления путем наблюдения обратного бета-распада протонов. Полученное сечение хорошо согласуется с ожидаемыми шестью умноженными на десять в минус сорок четвертой степени сантиметрами в квадрате". Позже мы узнали, что Паули с друзьями выпили ящик шампанского в честь этого события.

Через много лет (примерно в 1986 г.) К.П. Энц (C.P. Enz), студент Паули, прислал нам копию письма, написанного ночью в 1956 г., которое никогда не было нами получено: "Спасибо за сообщение. Все приходит к тому, кто умеет ждать. Паули".

Проблема была решена, брошенный вызов встречен. Оставалось только ждать независимого подтверждения результата другими экспериментаторами. Как оказалось, мы были правы, но проверка существования,

ставшая побочным продуктом нейтринных экспериментов на ускорителе, заняла около восьми лет [8]. Я подозреваю, что такая задержка была вызвана в основном тем, что наш результат не был неожиданным.

Около 20 лет спустя другая группа, вдохновленная возможностью существования нейтринных осцилляций, также зарегистрировала $\bar{\nu}_e + p$ на реакторах [9].

Что дальше?

После регистрации нейтрино возник вопрос: "Что дальше?" Как писал Луис Альварес (Luis Alvarez) мне в то время: "Что предполагается делать на "бис"?". Ревизия старых записей показала разнообразие возможностей, простирающихся от изучения непосредственно нейтрино до его использования в качестве инструмента в изучении слабых взаимодействий.

Упругое рассеяние нейтрино на электроне

Вопрос, который я нашел особенно привлекательным: "Существует ли процесс прямого рассеяния нейтрино на электроне

$$\bar{\nu}_e + e^- \xrightarrow{?} \bar{\nu}_e + e^-,$$

т.е. с помощью магнитного момента?" Этот вопрос был очень интересен в силу различных причин, которые не были до конца разумны. Во-первых, не существовало теоретического указания на то, что такая реакция между двумя "легчайшими" частицами существует, и, во-вторых, как и во время переговоров с Ферми о нейтрино из бомбы, у меня не было идеи, как построить подходящий детектор. Несмотря на прекрасные причины для того, чтобы выбрать более разумную проблему, я решил работать над этой.

Суть проблемы регистрации состояла в том, чтобы отличить электрон из предполагаемого упругого процесса рассеяния от электрона, образованного гамма-лучами или в результате бета-распада. Разделение таких процессов занимало меня и моих последователей на протяжении двадцати лет [10]. Ключом к решению стало понимание в 1959 г. того, что если выбрать среду с малым Z , большая часть фона от гамма-лучей возникла бы от комптоновских электронов отдачи, тогда как рассеяние $\bar{\nu}_e$ происходило бы только однажды. Таким образом, было возможно, в принципе, построить детектор, который выделял бы пространственные антисовпадения последовательных комптоновских электронов, уменьшая таким образом этот источник фона. Пока шла трансформация этой идеи в экспериментальную реальность и затем в окончательную регистрацию, в физике слабых взаимодействий появлялись различные теоретические модели. По мере развития теории, делались предсказания, простирающиеся от неясных качественных предположений о магнитном моменте (1934 г.) к утверждению, что взаимодействие равно нулю [11] (1957 г.), что оно задается с помощью $V-A$ (1958 г.) [12] и что оно не определено. Теоретическая ситуация окончательно определилась в 1976 г. с появлением теории Вайнберга, Салама, Глэшоу (Weinberg, Salam, Glashow).

Этот же год ознаменовал и окончание наших интенсивных двадцатилетних усилий [13]. Процесс упругого рассеяния нейтрино на электроне имеет наименьшее сечение из когда-либо измеренных процессов. Измере-

ние обеспечило также одно из самых ранних определений слабого смешивания или угла Вайнберга (Weinberg); он отличается только на 1,2 стандартных отклонения от текущего среднемирового значения.

Снова, как и в случае обратного бета-распада, даже до экспериментального подтверждения существования реакции упругого рассеяния, теоретики, в частности астрофизики, признали ее существование и использовали при создании моделей звезд. Мне кажется интересным поразмышлять о возможных последствиях тесного соединения эксперимента и теории в этом случае. Если бы я ставил теорию на первое место, я никогда бы не стал рассматривать возможность проведения эксперимента по рассеянию. Если бы я следовал по пути, проложенному теоретиками, я должен был бы пожертвовать непоколебимостью цели, которая, по существу, привела к решению. Это не значит, что экспериментатор должен существовать независимо от теории, но это действительно предполагает, что контакт не должен быть слишком тесным.

Взаимодействие нейтрино с дейтронами

В 1956 г. мы начали другое длительное исследование, которое было посвящено изучению взаимодействия нейтрино с дейтронами. В 1969 г. мы наконец зарегистрировали [14] так называемую реакцию "заряженного тока"

$$(\bar{\nu}_e + d \rightarrow n + n + e^+)$$

и в 1979 г. [15] — реакцию "нейтрального тока"

$$(\bar{\nu}_e + d \rightarrow n + p + e^+).$$

Реакция нейтрального тока была до этого открыта на ускорителе в ЦЕРНе в 1973 г. с помощью мюонных нейтрино, но тем не менее нам было очень приятно увидеть, что $\bar{\nu}_e$ вело себя ожидаемым образом.

Регистрация атмосферных нейтрино

В начале 1960-х гг. многие авторы вычислили поток высокоэнергичных нейтрино, которые, как ожидалось, возникали от распадов K и π мезонов и мюонов, образовавшихся в атмосфере Земли в результате взаимодействия первичных космических лучей. Основной экспериментальный вопрос был: "Как можно зарегистрировать эти атмосферные нейтрино?" Казалось, что единственный реализуемый на практике метод состоял в регистрации мюонов, образовавшихся в результате одного из редких взаимодействий нейтрино с веществом. Но это значит, что необходимо размещать детектор глубоко под землей, чтобы уменьшить основной фон — поток мюонов, образовавшихся непосредственно в атмосфере.

Поэтому в 1963 г. мы начали построение детектора на глубине около двух миль под землей в золотодобывающей шахте около Йоханнесбурга (Южная Африка). Разработка и создание самого большого в мире в то время детектора частиц — 180 футов длиной, 20-тонный разделенный на сегменты массив сцинтилляционных счетчиков — заняли удивительно короткое время, около одного года. Этот эксперимент был выполнен нами в коллаборации с Технологическим институтом в Кейзе (Case Institute of Technology, Cleveland, Ohio, сейчас Case-Western Reserve University) и Йоханнесбургским университетом (University of Witwatersrand, Johannesburg).

23 февраля первое "настоящее" нейтрино (т.е. нейтрино не из сделанного человеком ядерного реактора) было обнаружено. Всего было зарегистрировано 167 таких событий.

Стабильность нейтрино и его осцилляции

Когда мы впервые включили детектор в Саванна Ривере в конце 1955 г., мы не увидели никакого сигнала. У нас промелькнула отчаянная мысль: нейтрино могло быть испущено в результате процессов деления, но не выжило во время 11-метрового пути от реактора к детектору. Возможно, нейтрино не стабильно! Мы находились в сильном волнении до тех пор, пока не провели настройку нашей аппаратуры, и нейтриноподобный сигнал не начал проявляться. Черда ошибок привела к появлению в моей записной книжке заметки, в которой предлагалось сделать проверку меняющейся по закону обратных квадратов зависимости нейтринного сигнала от расстояния между реактором и детектором. Но в любом случае у нас в то время не было теоретической базы для ответа на вопрос о стабильности нейтрино. Напомним еще раз, что эксперимент должен быть окончательным судьей в этих вопросах. Я считал, что идея нейтринной нестабильности была "отвратительной", но тем не менее представил себе, какие бы могли образоваться продукты распада, если бы нейтрино действительно было нестабильным. В 1974 г. мы получили предел на время жизни $\bar{\nu}_e$ [17]. В этом эксперименте искали радиационный распад нейтрино в ядерном реакторе.

Еще до этого, Понтекорво, Накагаво и др. (Pontecorvo, Nakagawa, et al.) [18] предположили, что нейтрино может осциллировать из одного сорта в другой, пока оно путешествует от места образования к месту регистрации. Представим себе, что в нулевой момент времени собака покидает свой дом и начинает прогулку вдоль улицы к дому другой собаки, живущей в конце квартала. В то время, когда она передвигается по улице, происходит превращение — ее внешность постепенно трансформируется (*à la Escher*) из собак в кошачью. На полпути превращение завершается, и прежняя собака — теперь кошка — продолжает кошачье путешествие. Но превращение продолжается, и, *mirabile dictu*, до прибытия в дом второй собаки прежняя собака, превратившаяся в кошку, снова становится собакой. Обнаружение такого причудливого поведения у нейтрино явилось бы доказательством наличия у нейтрино структуры. Тогда можно было бы заключить, что нейтрино всех сортов построены из общих строительных блоков, перестройка которых *en route* приводила бы к наблюдаемо разным комбинациям.

Было проведено много экспериментов по поиску нейтринных осцилляций. Первый такой эксперимент был выполнен в 1979 г., но он не дал окончательного ответа; это был эксперимент аналогичный тому, в котором мы впервые измерили сечение взаимодействия нейтрино с дейтроном, обусловленное нейтральным током [15]. Так как реакция нейтрального тока может быть вызвана нейтрино любого сорта, а реакция заряженного тока может быть вызвана только электронным нейтрино, то отношение сечений реакций заряженного и нейтрального токов чувствительно к нейтринным осцилляциям, если длина волны осцилляции достаточно короткая, чтобы осцилляционный процесс достиг равновесия раньше, чем нейтрино достигнет детектора. По

результатам этого эксперимента (1979 г.) было предположено, что такие осцилляции могли бы существовать.

Другие нейтринные эксперименты

Необходимо подчеркнуть, что это великое приложение усилий, которое мы называем сейчас физикой нейтрино, было осуществлено многими группами. Уже в 1970 г. в мире существовало несколько таких групп: одни использовали ядерные реакторы, другие — ускорители, третьи — космические лучи. Мы приведем здесь только несколько выдающихся результатов, которые были получены.

В 1961 г. в эксперименте на AGS в Брукхейвене (Brookhaven AGS) было идентифицировано мюонное нейтрино [19]. Это открытие ознаменовало начало плодотворного использования высокоэнергичных пучков нейтрино на ускорителях.

В 1973 г. в ЦЕРНе было измерено сечение упругого ν_μ -е рассеяния [20], что послужило вехой на пути к открытию слабых нейтральных токов.

С конца 70-х гг. был достигнут значительный прогресс в изучении структурных функций нуклона при исследованиях глубоко неупругого рассеяния нейтрино и антинейтрино на нуклонах, которые дополняют исследования глубоко неупругого электронного и мюонного рассеяний. Нейтрино взаимодействует с составляющими ядра по-разному, и поэтому, благодаря несохранению четности, можно отличить кварки от антикварков.

Поиски осцилляций вакуума были проведены на реакторах и ускорителях, а с середины 80-х гг. поиски осцилляций вещества проводились в потоках солнечных и атмосферных нейтрино. На настоящий момент нет определенных доказательств существования нейтринных осцилляций.

Неожиданной удачей для нейтринной физики явился взрыв сверхновой звезды 1987A [21]. Стандартная теория сверхновой предсказывает, что сверхновая аналогичная 1987A, уносит 3×10^{53} эрг (99 % своей связанной гравитационной энергии) во вспышке нейтрино через несколько секунд после взрыва. На Земле в двух больших черенковских детекторах, каждый из которых содержал несколько тысяч тонн воды, было зарегистрировано 19 нейтрино низкой энергии. Все эти события были зарегистрированы в течение 10 секунд; счет от фоновых событий составлял всего несколько штук в день [22].

Многие результаты по определению свойств нейтрино — масса, заряд, время жизни, магнитный момент, число сортов и т.д. — были извлечены из данных, полученных из исследования сверхновой. Кроме того, оказалось, что некоторые основные элементы динамики сверхновой находятся в удивительно хорошем согласии с предсказаниями теории. Одним из интересных следствий явилась проверка принципа эквивалентности Эйнштейна. Тот факт, что фермионы (нейтрино) и бозоны (фотоны) достигают Земли с разницей во времени менее трех часов, обеспечивает условия для уникальной проверки принципа эквивалентности общей теории относительности. Наблюдения доказали, что обусловленные гравитацией временные задержки нейтрино и первых зарегистрированных фотонов совпадали с точностью до 0,5 % [23].

Описывая нейтрино, прибывшие на землю из космоса, мы хотим вспомнить интригующую историю изучения солнечных нейтрино. После 20 лет наблюдений Рея Дэвиса и др., а также в результате работы 4-х

детекторов, получающих результаты в настоящее время, было установлено, что поток нейтрино, прибывающих на Землю от Солнца значительно меньше, чем ожидается в стандартной солнечной модели [24]. Мы еще не знаем, говорит ли нам этот факт что-либо новое о Солнце или о свойствах нейтрино.

В конце 80-х гг. было проведено несколько экспериментов по определению числа сортов легких нейтрино. Это число было получено из многих источников, включая космологический предел, нейтрино от сверхновой 1987А, рр коллайдер и e^+e^- коллайдер. В то время стало окончательно ясно, что существует только три сорта легких нейтрино [25].

Конечно, самая длинная серия экспериментов связана с попытками измерения массы нейтрино. Старт этим исследованиям дал в 1930 г. Паули своей оценкой того, что "масса нейтрона (нейтрино) должна быть того же порядка величины, что и масса электрона, и во всяком случае не больше, чем 0,01 от массы протона". С тех пор для измерения массы нейтрино использовалось множество различных методик: ядерный бета-распад (особенно трития), сверхновая 1987А, космологические ограничения, радиационный захват электронов ядром, а для τ и мюонного нейтрино — распады частиц.

Будущее нейтринной физики

Годы становления физики нейтрино были чрезвычайно плодотворны. Принимая во внимание все важные достижения, спросим: "Остались ли какие-нибудь вопросы для будущего?" Совершенно определенно — да.

Мы, конечно, будем свидетелями все более точного измерения всех присущих нейтрино характеристик. Кроме того, из поисков безнейтринного двойного бета-распада [26] мы сможем скоро получить ответ на наиболее фундаментальный вопрос: "Является ли нейтрино майорановской частицей или дираковской?"

Также мы с волнением ожидаем открытия τ нейтрино путем регистрации в точке, отдаленной от места его возникновения.

Существует также несколько важных спорных вопросов в астрофизике и космологии. Например: "Являются ли нейтрино важной составляющей "Скрытой материи"? И как здорово будет, если удастся зарегистрировать реликтовые нейтрино, оставшиеся со времени Большого Взрыва.

Когда через несколько лет будут сконструированы большие нейтринные телескопы, мы сможем наконец увидеть нейтрино, приходящие от космических источников таких, как другие звезды и действующие галактические ядра.

Я не думаю, что это чересчур — надеяться на то, что в течение нескольких лет мы сможем найти решение загадки солнечных нейтрино. Если нам повезет, то те же самые детекторы, которые изучают солнечные нейтрино, смогут зарегистрировать одну-две сверхновые.

Я уверен, что будущее нейтринной физики будет таким же ярким и плодотворным, как и прошлое.

Благодарности

Моя деятельность в течение последних 40 лет не увенчалась бы успехом, если бы я работал один. Она требовала преданной и безустальной поддержки многих талантливых коллаборантов. В частности, я должен упомянуть моего очень хорошего друга и коллегу Клайда Коузена,

который был моим равным партнером в экспериментах по открытию нейтрино. Я сожалею, что он не прожил достаточно долго, чтобы разделить со мной эту честь. Я хочу также поблагодарить весь персонал в Саванна Ривере и их менеджеров, во-первых, корпорацию ДюПонт (DuPont Corp.) и, во-вторых, корпорацию Вестингхауз (Westinghouse Corp.) за их постоянное гостеприимство, интерес и выдержку в течение 35 лет. Я с благодарностью вспоминаю также гостеприимство в течение 30 лет, проявленное Мортон-Тиокол (Morton-Thiokol) на их шахте Феапорт (Fairport Mine). Я благодарен за поддержку американскому департаменту энергетики (U.S. Department of Energy) и его предшественнику, американскому агентству по атомной энергии (U.S. Atomic Energy Agency).

(Перевод с англ. С.В. Семенова)

Список литературы

1. Pauli W Jr *Address to Group on Radioactivity* (Tubingen, December 4, 1930) (unpublished); *Rapports. Septiemes Conseil Phys. Solvay* (Bruxelles, 1933) (Paris: Gautier-Villars, 1934)
2. Bohr N J. *Chem. Soc.* 349 (1932)
3. Bethe H A, Peierls R. *Nature* **133** 532 (1934)
4. Fermi E Z. *Physik* **88** 161 (1934)
5. Kallmann H. *Phys. Rev.* **78** 62 (1950); Agena M, Chiozotto M, Querzoli R. *Atti Acad. Naz. Lincei (R.C. Cl. Sci. Fis. Mat. Nat.)* **6** 626 (1949); Reynolds G T, Harrison F B, Salvini G. *Phys. Rev.* **78** 488 (1950)
6. Reines F et al. *Phys. Rev.* **117** 159 (1960)
7. Cowan C L Jr et al. *Science* **124** 103 (1956)
8. Block M M et al. *Phys. Lett.* **12** 281 (1964); Bienlein J K et al. *Phys. Lett.* **13** 80 (1964)
9. Reines F, Sobel H W, Pasierb E. *Phys. Rev. Lett.* **45** 1307 (1980); Boehm F et al. *Phys. Lett. B* **97** 310 (1980)
10. Reines F. *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **10** 1 (1960)
11. Salam A. *Nuovo Cimento* **5** 299 (1957)
12. Feynman R P, Gell-Mann M. *Phys. Rev.* **109** 193 (1958); Marshak R E, Sudarshan E C G. *Phys. Rev.* **109** 1860 (1958)
13. Reines F, Gurr H S, Sobel H W. *Phys. Rev. Lett.* **37** 315 (1976)
14. Jenkins T L, Kinard F E, Reines F. *Phys. Rev.* **185** 1599 (1969)
15. Pasierb E et al. *Phys. Rev. Lett.* **43** 96 (1979)
16. Greisen K, in *Proceedings of the International Conference on Instrumentation for High-Energy Physics* (Berkeley, California, September 1960) (New York: Interscience Publishers, Inc., 1961) p. 209; Markov M A, Zheleznykh I M. *Nucl. Phys.* **27** 385 (1961); Zatsepin G T, Kuz'min V A. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **41** 1818 (1961) [Translation: *Sov. Phys. JETP* **14** 1294 (1962)]; Cowsic R, in *Proceedings of the Eighth International Conference on Cosmic Rays* (Jaipur, India, December 1963) (Eds R R Daniels et al.)
17. Reines F, Sobel H W, Gurr H S. *Phys. Rev. Lett.* **32** 180 (1974)
18. Pontecorvo B. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **53** 1717 (1967) [*Sov. Phys. JETP* **26** 984 (1968)]; Nakagawa M, Okonogi H, Sakata S, Toyoda A. *Prog. Theor. Phys.* **30** 727 (1963)
19. Danby G et al. *Phys. Rev. Lett.* **9** 36 (1962)
20. Hasert F J et al. *Phys. Lett. B* **46** 121 (1973)
21. Kielczewska D. *Int. J. Mod. Phys. D* **3** 331 (1994)
22. Bionta R M et al. *Phys. Rev. Lett.* **58** 1494 (1987); Hirata K et al. *Phys. Rev. Lett.* **58** 1490 (1987)
23. Longo M J. *Phys. Rev. Lett.* **60** 173 (1988); Krauss L M, Tremaine S. *Phys. Rev. Lett.* **60** 176 (1988)
24. Bahcall J N et al. *Nature* **375** 29 (1995)
25. See for example: Denegri D, Martinelli G, in *Neutrino Physics* (Ed. K. Winter); *Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics, and Cosmology* (Cambridge University Press, 1991)
26. Moe M, Vogel P. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **44** 247 (1994)