

В этом году исполнилось бы 80 лет Юрию Владимировичу Гапонову (1934–2009).

Ю.В.Гапонов был исключительно ярким и многосторонним человеком. Он стоял у истоков Большого физического искусства (в частности, известной оперы «Архимед»), первых в нашей стране студенческих строительных отрядов, традиции физических праздников – «Дней Архимеда» и позже «Дней физика» – на физическом факультете МГУ и в Курчатовском институте, которые затем «разошлись» по всей стране. В 1990-х годах Юрий Владимирович задумал и осуществил небывалое дело: по выражению американского историка науки Дэвида Холлоуэя, он впервые «собрал вместе воинов холодной войны». Две организованные им международные конференции, посвященные истории атомных проектов Советского союза и других стран, собрали сотни легендарных и малоизвестных участников атомных проектов, позволили опубликовать множество совершенно неизвестных до тех пор материалов.

Научные интересы Ю.В. Гапонова были связаны с ядерной и нейтринной физикой. В последние годы он нашел новый неожиданный подход в теории нейтрино, который позволил ему вплотную подойти к решению проблемы нейтринных масс и, в конечном итоге, предсказать их абсолютные значения. Оге Бор, с которым ему много приходилось общаться в том числе и по поводу своих работ по теории нейтрино и который очень ценил эти работы, однажды произнес фразу, чрезвычайно дорогую и, по-видимому, во многом символичную для Юрия Владимировича: «Вот кто Вас полностью мог бы понять – это Нильс Бор».

В октябре 2009 году мы договорились с Юрием Владимировичем заняться в ближайшие месяцы подготовкой научно-популярной статьи для «Кванта», в которой была бы изложена не только история исследований нейтрино, но и тот новый взгляд на физику нейтрино, который возникал из его собственных работ последних лет. К сожалению, этим планам не было суждено сбыться.

Публикуемый здесь очерк истории нейтринной физики представляет собой расшифровку аудиозаписи лекции Юрия Владимировича Гапонова по истории исследований нейтрино, прочитанной на физическом факультете МГУ 13 декабря 2005 года на семинаре «Физика нейтрино и взаимодействие частиц во внешних полях».

В. Птушенко

Очерк истории исследований нейтрино

Ю. ГАПОНОВ

Я ХОТЕЛ БЫ СКАЗАТЬ СПАСИБО ЗА ТО, ЧТО МЕНЯ пригласили на физфак МГУ. Я кончал физфак очень давно, в 1958 году, потом была аспирантура на физфаке, и мне очень приятно снова быть в Альма-матер и рассказывать те вещи, которые, с моей точки зрения, находятся на самом передовом рубеже современной науки.

Я начну с такого утверждения: с моей точки зрения, в физике назрела революция – в физике элементарных частиц. Эта революция произойдет, по-видимому, в ближайшие несколько лет, и связана она с физикой нейтрино. Это мое убеждение, и это подтверждает развитие событий, о котором я вам буду сегодня рассказывать. В последние несколько лет в этой области начинают возникать совершенно новые, необычные представления.

В первой части моей лекции я расскажу про историю физики нейтрино. В течение ста лет идет развитие истории, причем идет медленно, поскольку физика

нейтрино оказалась очень сложной, и происходит последовательное чередование: эксперимент, теория, эксперимент, теория. Каждый период длится приблизительно 20–30 лет. Ну, теоретический период развития занимает обычно время порядка 10 лет. И каждый раз оказывается, что наши представления, которые были сформулированы ранее, надо кардинальным образом менять.

Например, началось все с открытия бета-лучей. В течение 30 лет физики исследовали это явление, не зная, что есть нейтрино. Это был первый период. Второй период – когда родилась концепция нейтрино. Возникла парадоксальная ситуация: нейтрино (которое, кстати, было придумано Паули¹, а Бор был против этого в течение 8 лет) оказалось частицей, которую невозможно зарегистрировать. Очень смешная ситуация. В фи-

¹ См. Именной комментарий в конце статьи (расположение – по мере упоминания в тексте статьи).



Юрий Владимирович Гапонов

зике – впервые. После этого был опять большой экспериментальный период, в конце которого было зарегистрировано нейтрино. И снова возникла парадоксальная ситуация: в 1956 году, в тот же год, когда экспериментально было зарегистрировано нейтрино, выясняется, что у него совершенно необычные свойства: то, что мы называем нарушением четности² (временной четности). Иными словами, нейтрино в зеркале на себя не похоже, и когда вы обращаете время – нейтринные процессы тоже идут по-другому.

Дальше. Формулируется то, что сегодня существует и живет в физике элементарных частиц: так называемая Стандартная модель. И, казалось бы, 20 лет идет только утверждение этой модели, никаких противоречий нет, пока в начале 1990-х годов не появляются факты (в физике нейтрино), которые никак не укладываются в Стандартную модель. И сегодня, последние 2–4 года, мы вообще занимаемся только тем, что открываем явления, которые никуда не укладываются. И теории еще нет, есть только эксперимент, и еще не ясно, куда он будет развиваться дальше. Вот сегодняшняя ситуация. Об этом я вам сейчас буду рассказывать.

Давайте сначала вспомним, что было 100 лет назад. Сто лет назад Беккерелем была открыта радиоактивность. Вскоре обнаружилось, что в магнитном поле эти лучи (которые тогда считали просто жесткими рентге-

новскими лучами) расщепляются и распадаются на три разные составляющие: одна – положительного заряда (альфа-частицы), вторая – отрицательного заряда (бета-частицы) и третья – нейтральная (гамма-лучи). И так, было открыто, что бета-лучи (а это и есть начало бета-спектров, нейтринной физики) обладают зарядом. Вслед за этим было выяснено, что это быстрые электроны. А раз вы имеете быстрые электроны и магнитное поле, вы можете построить бета-спектрометр. Бета-спектрометры были построены достаточно быстро, в них сначала использовались фотопластинки, потом счетчики Гейгера. Приблизительно с 1910 по 1914 год было показано, что спектр бета-лучей очень своеобразный – это есть некий непрерывный спектр, на котором торчат пики. Причем эти пики были размыты, и считалось, что это просто экспериментальная аппаратура плохая, а то что мы называем непрерывным спектром, возможно, тоже есть артефакт, связанный с недостатками нашей аппаратуры.

И вот в это же время впервые формулируется модель атома. Как известно, сначала эксперимент Резерфорда, а потом теория Бора дали нам первую модель атома, согласно которой атом состоит из точечного ядра и очень большого облака электронов (размеры ядра порядка 10^{-14} м, размеры электронного облака – 10^{-10} м, т.е. на 4 порядка больше). Возник вопрос: откуда берутся бета-электроны? Изнутри или снаружи? Это что – те электроны, которые выбиты из атомной оболочки, или они вышли из ядра? Первый, кто произнес слово «ядро», был Нильс Бор, который сказал: бета-лучи испускаются из ядра.

Как исследовать спектры бета-распадов? Резерфорд предложил поразительно интересную идею: давайте развернем ситуацию и гамма-лучами, которые присутствуют в радиоактивном излучении, будем снова облучать это же ядро. Тогда если гамма-лучи падают на ядро, то они могут выбить внешние электроны, и можно измерить энергию гамма-лучей по энергии этих электронов (поскольку в это время не было способов измерения гамма-лучей). Когда эта идея была воплощена в эксперименте, то оказалось, что пики, которые наблюдались в бета-спектрах – они сейчас называются конверсионными линиями, – позволяют померить энергию электронов. И выяснилось, что энергия электронов (точнее, разность их энергий) довольно жестко связана с энергиями атомных спектров. Таким образом, на самом деле электроны, которые наблюдаются в спектре, вот эти пики, связаны с внешними электронами, а не с внутренними. Но каким образом они возникают? Появилась такая модель: гамма-лучи испускаются ядрами, эти гамма-лучи поглощаются электронами, которые выбивают внешние электроны, электроны оболочки. Так возникают электроны, соответствующие линиям, которые в атомной физике известны как K, L, M-линии. Но тогда ядро не является простым: оно тоже сложное, а не точка, как было у Резерфорда; на самом деле это сложное образование. Вот отсюда появляется представление о том, что ядерная физика – вещь гораздо более сложная и что у ядер есть возбужденные состояния. Однако вопрос о том, откуда берутся элек-

² Четность – свойство физической величины сохранять свой знак (или изменять на противоположный) при некоторых преобразованиях, т.е. характеристика симметрии системы уравнений, описывающих какие-либо физические законы, по отношению к этим преобразованиям. Так, пространственная четность P характеризует симметрию системы уравнений относительно знаков координат всех частиц, временная четность T – относительно направления течения времени, зарядовая четность C – относительно замены всех частиц на античастицы.

троны, остается. И возникла модель (это 1923–25 годы; эту модель особенно сильно развивал Резерфорд), согласно которой ядро состояло из протонов и электронов. Электроны, которые рождаются при бета-распаде, время от времени вылетают наружу, а протоны остаются. Заряд ядра – это есть разность зарядов протонов и электронов. Например, ядро ${}^6_3\text{Li}$ состоит из шести протонов и трех электронов. Эта модель существовала достаточно долго, до конца 1930-х годов, и возникали разные интересные вопросы. Например: если ядро испускает бета-лучи и гамма-кванты, то что раньше вылетает – бета-частица или гамма-частица? С современной точки зрения (мы теперь знаем ответ на этот вопрос), если ядро нестабильно, то сначала оно испускает бета-лучи, потом переходит в основное состояние (или в более низкое возбужденное) и испускает гамма-кванты. Как видите, идет развитие ядерной физики – и все это через бета-лучи.

Наконец, встал такой вопрос: ну хорошо, пики мы объясняем тем, что происходит выбивание электронов в оболочке; а есть ли такие бета-спектры, в которых нет конверсионных линий? Да, есть. Это спектр так называемого радия-Е. Он был известен. В нем нет конверсионных линий. Спрашивается, а как же тогда? Откуда берутся электроны? Вылетают из ядра? Но тогда они что, не квантованы? (К этому времени уже было ясно, что все в мире должно быть квантовано.) Значит, получается, что они непрерывные (в том смысле, что их энергия принимает любые значения). Как это объяснить? В этой области работали две интересные группы.

Одна группа – это группа Резерфорда, к которой потом, где-то в конце 1910-х–начале 1920-х годов, присоединился Эллис. Эллис очень забавно попал в физику. Чедвик, который делал эксперименты по бета-спектру и который открыл непрерывную часть этого спектра, в 1914 году попал в Германии в плен. Он был интернирован, и во время плена, чтобы провести как-то время, он читал лекции. Среди военнопленных, которые вместе с ним сидели, были молодые ребята, в частности был Эллис, который очень заинтересовался этой тематикой и после войны стал одним из ведущих физиков у Резерфорда. Так вот, эта группа не создавала никаких моделей, у них была идея: просто давайте исследовать, а дальше – что получится, то получится.

Вторая, немецкая группа состояла тоже из молодых в то время физиков, во главе которых были Лиза Мейтнер и Отто Ган – их знают сейчас как открывателей деления ядра в 1939 году и в честь них названы два новых элемента: хассий и мейтнерий.³ У них была

³ Это открытие чаще упоминается в литературе как открытие Гана и Штрассмана – авторов статьи 1939 года о расщеплении ядра урана, а не как результат 30-летнего сотрудничества Гана и Мейтнер. После вынужденного отъезда Лизы Мейтнер из Германии в 1938 году совместные публикации их работ были невозможны по политическим соображениям.

Для элемента 108 после синтеза в 1984 году было предложено имя оттоганий, в 1994 году – ганий, а в 1997 году утвердилось название хассий – в честь немецкой земли Гессен (лат. *Hassia*), в которой был синтезирован этот элемент.

идея, что электрон, когда он вылетает из ядра и летит сквозь электронную оболочку, где-то там теряет энергию, рассеивается на этих электронах, и поэтому получается не дискретный спектр, а непрерывный. Это была идея объяснения. Но как объяснить, что электрон пролетает сквозь практически пустое облако и так сильно рассеивается? Вот это была проблема.

Итак, к концу 1920-х годов стало ясно, что есть одна загадка – непрерывный спектр бета-лучей. Почему он непрерывный, как это объяснить? И тогда был сделан совершенно поразительный эксперимент, очень интересный, который заставил физиков серьезно задуматься. Этот эксперимент был такой: давайте померяем полную энергию всех электронов, которые вылетают. Для этого поместим наш бета-источник в термостат, и всю энергию, которая есть там, померяем. Померили. И выяснилось, что энергия бета-лучей составляет приблизительно половину средней энергии, которая выделяется в данном ядре (к этому времени была открыта верхняя граница бета-спектров, поэтому можно было сказать: верхняя граница такая-то, а вот половина этой границы). Как это объяснить? Здесь впервые физики подошли к загадке, которая решалась таким простым, но совершенно необычным способом: пришлось ввести новую частицу.

Здесь я кончаю рассказ про первую стадию, экспериментальную стадию. Давайте посмотрим, что было дальше.

К концу 1920-х годов мы приходим вот в какой ситуации. С одной стороны, уже родилась квантовая механика, известно уравнение Шредингера. Это уравнение позволяет описать атом, т.е. электрон, скачущий по своим орбитам вокруг ядра. Но никто не знает, годится ли квантовая механика для того, чтобы исследовать ядро, или нет. Кроме того, есть уравнение Дирака (это релятивистское обобщение уравнения Шредингера). Оно имеет нетривиальное свойство: у него есть два решения, одно решение с положительной энергией, другое решение – с отрицательной. Уже тогда была высказана идея, что, может быть, есть две частицы, но в эксперименте ничего не было обнаружено, был только электрон.

И еще одна проблема, которая была связана с бета-спектрами: как описать само ядро? Здесь возникают две гипотезы. Одна гипотеза – это гипотеза Нильса Бора. Бор говорил очень мудрые на самом деле слова, как мы сейчас понимаем; но, может быть, немножко по-другому они должны быть восприняты. Он говорит: хорошо, атомную физику мы знаем, вот она объясняется с помощью квантовой физики и так далее. А вот что в ядре? Может быть, там все законы нарушаются? И он говорит: я думаю, что, может быть, там нарушается закон сохранения энергии. В этом он был не прав. Но в чем-то, оказывается, он был прав – я об этом дальше скажу. А Паули предложил совершенно новую идею: до сих пор в физике были только заряженные частицы, а почему не может быть нейтральных частиц? Паули высказал эту идею приблизительно в 1929–30 годы в письмах, причем Бор настолько категорически заявил, что не хочет даже об этом слышать, что

Паули с Бором потом не переписывался. Паули писал письма Гейзенбергу, а Гейзенберг, как лучший ученик Нильса Бора, с ним разговаривал. Получал ответ Бора – писал снова Паули. Вот так эта полемика между ними шла, до 1936 года Бор не признавал идею о нейтральных частицах.

На самом деле, все оказалось не так просто. Дело в том, что то что предложил Паули, на самом деле это совсем не нейтрино. Паули предложил нейтрон. Он предположил, что в ядре есть нейтрон, который выскакивает в момент бета-распада. Но когда нейтрон был открыт, оказалось, что он тяжелый, а отнюдь не такой легкий. И поэтому, в развитие этой идеи, было сказано дальше следующее: ну хорошо, существует легонький нейтрончик – нейтрино (это Ферми так его назвал), как маленький нейтрон. И вот именно он является той самой нейтральной частицей в бета-распаде. Иными словами, на самом деле была открыта не одна, а две частицы: нейтрон (который, кстати, Резерфорд предпологал в свое время, еще в 1920-х годах, как связанное состояние протона и электрона) и нейтрино.

И еще один поворот должен был произойти, прежде чем физики начали выстраивать новую картину. Этот поворот – открытие нейтрона и позитрона в 1932 году. Совершенно потрясающий год в физике, который перевернул физику (физику ядра и физику частиц). В этот год было открыто две вещи: нейтрон (экспериментально было показано его существование) и позитрон. Кстати, позитрон наблюдал, как известно, Скобельцын в России, но он не знал, в какую сторону должен в данном магните лететь этот позитрон. Считалось, что у него другое направление поворота в магнитном поле просто потому, что он идет не сверху, из космических лучей, а из-под земли.⁴

Итак, был, открыт нейтрон. Что это означает? Я вам приводил пример ${}^6_3\text{Li}$, который с точки зрения предыдущей модели – протон-электронной – состоял из шести протонов и трех электронов. А с точки зрения нейтрона? Если есть нейтрон, то в ядре три протона, три нейтрона, и всего частиц – шесть! Это уже разная статистика⁵: в первом случае ${}^6_3\text{Li}$ имеет спин полупуцельный, а во втором – целый. А это можно проверить в эксперименте. И вот когда это было проверено, стало ясно, что нейтронная гипотеза более вероятна, чем электрон-протонная. Итак, в 1932 году рождается нейтрон-протонная модель. Кстати, в ее рождении участвовали три человека: Гейзенберг, который постоянно переписывался с Паули на эту тему,

⁴ Действительно, Скобельцын первый наблюдал позитрон, но он думал, что это электрон из земли, так как увидел, что наблюдаемая частица летит от магнита в противоположную сторону, чем летел бы электрон. А с позитроном все в порядке – у него заряд другого знака.

⁵ Поведение систем частиц, обладающих целым или полупуцельным спином, существенно различается. Так, известный принцип запрета Паули относится только к частицам с полупуцельным спином. В квантовой статистической физике частицы, имеющие целый спин (так называемые бозоны), описываются статистикой Бозе–Эйнштейна, а имеющие полупуцельный спин (фермионы) – статистикой Ферми–Дирака.

Иваненко в России, совершенно независимо, и, наконец, Майорана. Обычно про Майорана никто не знает, а он был учеником Гейзенберга и выдвинул эту идею независимо.

После того как был открыт позитрон, начала укладываться в цельную схему идея, связанная с уравнением Дирака, т.е. начала подтверждается квантовая электродинамика. Квантовая электродинамика (и с современной точки зрения, и с точки зрения, которая была сформирована в 1930 году) говорит следующее: когда два электрона рассеиваются друг на друге, между ними проскакивает гамма-квант – виртуально, как мы говорим. Или, иными словами: возникает электромагнитное поле между этими электронами. (Есть, конечно, и другой процесс, когда этот гамма-квант падает, скажем, на атом и может родить электрон-позитронную пару.) Что существенно для этой теории: в ней есть некая константа взаимодействия. Это постоянная слабого взаимодействия $e^2/(\hbar c)$, равная $1/137$, знаменитая константа, которая до сих пор правит квантовой электродинамикой и, по-видимому, имеет даже большее значение, но пока мы еще плохо понимаем, где она еще может быть применена. Во всяком случае, квантовая электродинамика полностью объясняется с помощью этой константы. Это – некая фундаментальная константа мира. И тогда в параллель этой идее Ферми предположил похожую – просто аналогичную – модель для бета-распада. Согласно этой модели, бета-взаимодействие, по Ферми, выглядит так. Летит нейтрон, потом он превращается в протон (это есть некое взаимодействие, которое можно описать чисто феноменологически, некоей константой) и вылетают электрон и нейтрино:

$${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + e^- + \bar{\nu}_e.$$

Я написал здесь антинейтрино, но это уже сегодняшний день. А в принципе – здесь нейтрино. И константа, которая описывает этот процесс, очень похожа на константу из квантовой электродинамики. Но из-за того что не известно, что здесь находится, она нормирована на массу электрона в квадрате, это 10^{-10} . Смотрите, какая маленькая константа: там $1/137$, а здесь 10^{-10} . Что это означает? Это означает, что сечение взаимодействия – совершенно фантастически маленькая величина. Ну, что такое сечение, вспомним. Возьмем пятак и бросим на него поток частиц. Как часто этот поток частиц будет взаимодействовать с этим пятаком? Все будет зависеть от того, какова площадь этого пятака в проекции на поперечное сечение потока (это и называется словом «сечение»), от величины потока и времени, в течение которого вы наблюдаете. Площадь пятака – аналог сечению взаимодействия, которое используется в физике.

⁶ Постоянная тонкой структуры, или постоянная Зоммерфельда. Выражение через фундаментальные константы приведено в системе единиц СГСЭ, используемой в квантовой электродинамике. Численное значение не зависит от выбора системы единиц.

Оказалось, что если смотреть процессы взаимодействия вещества с нейтрино, то сечение находится на уровне $10^{-43} - 10^{-46} \text{ см}^2$. В то время как сечение ядерных реакций это $10^{-24} - 10^{-28} \text{ см}^2$. Ну, легко понять эти оценки. Если размер ядра 10^{-12} см , то квадрат размера этого ядра – 10^{-24} см^2 . Вот нормальное ядерное сечение. А 10^{-28} см^2 – это очень маленькая величина. Теперь давайте представим себе, что такое 10^{-42} см^2 . Это значит, что размер области, где идет взаимодействие нейтрино с другими частицами, которые осуществляют слабое взаимодействие, примерно 10^{-21} см . Сегодня мы его немного по-другому оцениваем, как $10^{-17} - 10^{-18} \text{ см}$, но все равно получаются очень маленькие сечения – вы должны попасть вашим потоком в монетку размером порядка 10^{-20} см . Ясно, что даже по сравнению с ядерными сечениями это невероятная задача. И вот это была следующая проблема, которую нужно было решать. Но раз так, то вы никогда не сможете зарегистрировать нейтрино. Имея такие маленькие сечения, нейтрино спокойно проходит сквозь земной шар. Один раз взаимодействуя за все время движения через весь земной шар. Один раз! Как вы будете это регистрировать? Вот проблема, с которой столкнулись физики.

Чтобы кончить с этим периодом, я покажу основных участников – теоретиков, которые в этот период работали.

Дирак в 1928 году пишет свое уравнение (релятивистское волновое уравнение электрона). Кстати, у уравнения Дирака есть один интересный предельный случай: давайте в уравнении Дирака положим массу равной нулю. В результате редукции получается уравнение Вейля. Так вот, самая фантастическая, самая загадочная и странная вещь была в том, что уравнение Дирака, когда вы обращаете массу в ноль, может привести к нарушению Р-четности. Вот этот случай, уравнение Вейля (т.е. уравнение движения для безмассовой частицы со спином $1/2$, частный случай уравнения Дирака), считался нефизическим. К нему вернулись только через 20–25 лет. Получается, что сразу можно было открыть необычные свойства нейтрино, пожалуйста – Вейль написал это уравнение. Но они были такие необычные, что никто в это не поверил. Скажу больше, был эксперимент в 1929 году, который на самом деле повторил – ну, не повторил, а предшествовал экспериментам 1956–57 годов, где измерялась поляризация электронов (т.е. взаимная ориентация спина и импульса частиц), вылетающих при бета-распаде. Там нашли, что они поляризованы, но в это никто не мог поверить. Эксперимент отставили в сторону и сказали: этого не может быть. И все. Вот такая интересная штука.

Дальше – противоречия в протон-электронных моделях ядра, о которых я вам сказал. На них впервые обратил внимание Крониг. Гипотеза о нарушении сохранения энергии была предложена Бором в 1929 году, а гипотеза Паули о нейтроне – в 1930 году. Нейтрон и позитрон были открыты Чедвиком и Андерсоном в

1932 году, а протон-нейтронная модель в этом же году была построена теми тремя людьми, о которых я говорил. Была попытка построить теорию бета-распада с нарушением закона сохранения энергии, была опубликована такая работа. И Бор на нее ссылаясь! Но – до 1936 года, и она оказалась неправильной.

Нейтринная гипотеза Паули – это уже 1933 год. Как видите, сначала нейтрон, а потом нейтрино. Значит, теория Ферми тогда же была построена. Оценка сечения взаимодействия нейтрино, о которой я вам говорил и которая показала, что нейтрино не регистрируется, была проведена Бете и Пайерлсом в 1934 году.

Еще хочу вам сказать о двойном бета-распаде (т.е. таком распаде ядра, который сопровождается увеличением заряда ядра на две единицы и излучением двух электронов). Двойной бета-распад был впервые предложен Гёпперт-Майер в 1935 году. И только сегодня мы начинаем им заниматься экспериментально. Нужно было 70 лет ждать, чтобы начать им заниматься.

И самое интересное, то что мы сегодня только начинаем изучать – это гипотеза Майорана. Дело в том, что нейтрино как дираковская частица (т.е. то, что было придумано Ферми по аналогии с уравнением Дирака) имело нормальные свойства: было нейтрино, было и антинейтрино – точно так же, как существуют электрон и позитрон, есть нейтрино и антинейтрино. Однако кто вам сказал, что это единственная возможность? И вот Майорана в 1937 году, буквально за несколько месяцев до своей смерти, публикует работу, в которой предлагает следующее: он берет уравнение Дирака, делает некие математические преобразования и показывает, что в нем есть решения, в которых нейтрино может быть тождественно антинейтрино. Тогда нет никакого электронного заряда, точнее – это ноль. И такое нейтрино может существовать. Вот эта эстафета была подхвачена Понтекорво. Понтекорво был тем человеком, который слушал Майорана в 1937 году. Кстати, до сих пор судьба Майорана неизвестна; по видимому, он покончил жизнь самоубийством, буквально через несколько месяцев после того, как написал эту статью.

Вот такая загадка осталась нам с 1937 года. Надо сказать, что ее просто игнорировали в то время. Мало того что нейтрино нельзя зарегистрировать, так к тому же еще у него какие-то совсем ненормальные свойства.

Итак, с 1932–33 годов начинается совершенно новый период – экспериментальный период изучения бета-распада. До этого времени ядерной физики еще не существовало, и все, что изучали физики, это были радиоактивные ядра, которые давали электроны – т.е. происходили бета-минус распады (с нашей сегодняшней точки зрения). А с 1932 года, после того как был открыт нейтрон, начинается бурное развитие ядерной физики, открывается много разных ядер, можно нейтрон загонять в ядра и смотреть, что будет. Если вы альфа-частицу загоните внутрь ядра с помощью циклотрона, то можно находить и положительные ядра, с избытком протонов, и наблюдать бета-плюс распады.

Таким образом, возникают интересные варианты нейтринных процессов. Во-первых, бета-минус распад

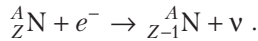
(который изучался до этого):



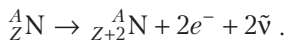
Во-вторых – бета-плюс распад, где рождаются позитроны:



Но возможен еще интересный процесс К-захвата – захвата электронов ядром, с тем чтобы появилось нейтрино:



Наконец, двойной бета-распад, о котором, я вам сказал, впервые начали думать в то время:



Оказалось, что все эти процессы очень существенны для астрофизики: для горения Солнца, эволюции звезд и даже для коллапса сверхновых – это когда у вас очень тяжелое ядро, состоящее из железа, вдруг мгновенно превращается в нейтронную звезду, коллапсирует. Эта идея, кстати, принадлежит Ландау (работа 1937 года). И еще одну интересную вещь могу вам сказать. Когда Ландау посадили в тюрьму, Бор написал письмо Сталину, и в этом письме он говорил о Ландау как о крупнейшем ученом и приводил в пример, как потрясающую работу, именно коллапс звезд. Это был аргумент Сталину для того, чтобы Ландау выпустили из тюрьмы.

А дальше начинается много открытий в космических лучах. Начали подозревать, что это некие частицы, достаточно тяжелые. Сначала думали, что это пи-мезоны; оказалось, что это мю-мезоны (по нынешним представлениям) и что эти мю-мезоны тоже радиоактивны, как тогда говорили. И эта радиоактивность мезонов совершенно необычна. Оказалось, что мезон распадается на электрон и два (!) нейтрино. Впервые был обнаружен процесс, в котором не одно нейтрино, как в бета-процессе, а два нейтрино. При этом нет такого процесса, когда бы мезон распался на электрон и гамма-квант. Затем был открыт пи-мезон, как предшественник мю-мезона. И он был открыт (не хочу сейчас залезать в детали) при исследованиях, которые были связаны с поисками причин ядерных сил. Эти пи-мезоны были обнаружены в космических лучах. Оказалось, что они распадаются на мю-мезоны; еще есть превращение в электрон и нейтрино.

Наконец, одним из самых интересных открытий того времени, по-видимому, было открытие бета-распада нейтрона. Бета-распад нейтрона был открыт в 1948 году Робсоном в Америке и Спиваком в России. Надо вам сказать, что, конечно, это открытие – Нобелевская премия, но Спивак в 1948 году работал в Курчатовском институте, в команде Игоря Васильевича Курчатова, и, конечно, эти работы не публиковались. Таким образом, мы прозевали очередную Нобелевскую премию.

И вот, в это же время, наконец, на стыке ядерной физики и техники рождается атомный реактор – ну, мы знаем, работы с 1941–43 годов начинаются в

разных странах. И становится ясно, что все-таки природа нам дает возможность попробовать найти реально и зарегистрировать нейтрино, поскольку реактор есть мощный источник нейтрино. Ну, действительно, в реакторе происходит деление ядер, возникают ядра, очень сильно избыточные по нейтронам. Они, естественно, распадаются с помощью цепочек по бета-распадам достаточно быстро. Избыточные нейтроны у вас есть, поэтому это – бета-минус распады. И количество этих распадов – фантастически большое: поток нейтрино от реактора на расстоянии около 10 метров (от самого реактора) составляет 10^{13} нейтрино в секунду через квадратный сантиметр. Это фантастические потоки! Вот те самые 20 порядков, которые нужно было скомпенсировать, чтобы уйти от сечений 10^{-43} см² на уровень 10^{-28} см² – вот вам возможность попробовать их скомпенсировать!

И первый, кто начал думать об использовании реактора для нейтринной физики, был Бруно Понтекорво. Я покажу вам его работу 1946 года. Эта работа была опубликована в Канаде – в это время Бруно Понтекорво работал еще в Канаде, в Россию он попал только в 1949 году. Он впервые задумался о том, нельзя ли использовать для регистрации нейтрино обратные процессы. До него все смотрели только на бета-распады – распады, где нейтрино появляется, и все. А тут он предложил поискать процесс обратный, когда нейтрино попадает в ядро и что-то с ним происходит. Вот процессы, которые он рассматривал: я прямо беру кусочек на английском языке из его статьи. Точнее, из его канадского препринта 1946 года. И вот он приводит примеры – те самые примеры, которыми мы сегодня занимаемся. В 1946 году он приводит пример! В качестве примера, говорит он, можно рассмотреть такую реакцию: взять нейтрино, бросить на ${}^{37}_{17}\text{Cl}$, получится β^- и ${}^{37}_{18}\text{Ar}$. А ${}^{37}_{18}\text{Ar}$ можно зарегистрировать, поскольку он превращается в хлор, время жизни 34 дня, и происходит К-захват. Это то, чем сегодня физики – в течение 30 лет даже – занимаются. Вот такая схема.

Но Понтекорво сделал еще одну поразительную вещь: дал программу исследований по физике нейтрино. Он сказал: давайте смотреть возможные источники нейтрино в мире. Такие источники могут быть следующие. Первое: нейтринные потоки от Солнца. Он их оценивал на уровне 10^{16} нейтрино (т.е. плотность потока нейтрино 10^{16} на 1 см² в 1 секунду), но сегодня мы знаем, что на уровне Земли это, самое лучшее, 10^{12} . Но все равно, не так уж плохо. – Значит, первый источник нейтрино, с которым можно работать экспериментаторам, это Солнце, – сказал в 1946 году Понтекорво. Второе – это реакторные нейтрино. Фрагменты, ядра, которые возникают после деления, являются источниками нейтрино. И, наконец, он еще предложил сам уран: металл, который вытаскивается из реактора, тоже может быть источником нейтрино. Ну, сейчас это не применяется. Во всяком случае, вот его программа (13 ноября 1946 года): давайте используем для исследования ней-

трино три типа источников – солнечные нейтрино, реакторные нейтрино и нейтрино от ускорителей.

Вот так давно была эта программа сформулирована. И действительно, в 1956 году впервые проведены эксперименты в Америке: Рейнс, был такой физик, на американском реакторе сделал эксперимент и зарегистрировал первое нейтрино от реактора.

Именной комментарий

Вольфганг Эрнст Паули (1900–1958) – австрийский физик, ввел понятие спина элементарной частицы, предсказал существование нейтрино и сформулировал «принцип запрета». Лауреат Нобелевской премии по физике за 1945 год.

Нильс Хенрик Давид Бор (1885–1962) – датский физик, один из создателей современной физики (в частности, создатель первой квантовой теории атома и активный участник разработки основ квантовой механики). Лауреат Нобелевской премии по физике за 1922 год.

Антуан Анри Беккерель (1852–1908) – французский физик, один из первооткрывателей радиоактивности. Лауреат Нобелевской премии по физике за 1903 год.

Эрнест Резерфорд (1871–1937) – британский физик, «отец» ядерной физики, создатель планетарной модели атома. Лауреат Нобелевской премии по химии за 1908 год.

Чарльз Друммонд Эллис (1895–1980) – английский физик.

Джеймс Чедвик (1891–1974) – английский физик, ученик Резерфорда; открыл нейтрон. Лауреат Нобелевской премии по физике за 1935 год.

Лиза Мейтнер (1878–1968) – австрийский физик и радиохимик.

Отто Ган (1879–1968) – немецкий химик, «отец ядерной химии», открыл расщепление урана. Лауреат Нобелевской премии по химии за 1944 год.

Эрвин Рудольф Йозеф Александр Шредингер (1887–1961) – австрийский физик-теоретик, один из создателей квантовой механики. Лауреат Нобелевской премии по физике за 1933 год (совместно с Полем Дираком).

Поль Адриен Морис Дирак (1902–1984) – английский физик, один из создателей квантовой механики. Лауреат Нобелевской премии по физике за 1933 год (совместно с Эрвином Шредингером).

Вернер Карл Гейзенберг (1901–1976) – немецкий физик, один из создателей квантовой механики. Лауреат Нобелевской премии по физике за 1932 год.

Энрико Ферми (1901–1954) – итальянский физик, один из основоположников квантовой физики. Лауреат Нобелевской премии по физике за 1938 год.

Дмитрий Владимирович Скобельцын (1892–1990) – советский физик-экспериментатор, специалист в области космических излучений и физики высоких энергий.

Дмитрий Дмитриевич Иваненко (1904–1994) – советский физик; работы в области ядерной физики, единой теории поля, теории гравитации и др.

Эttore Майорана (1906–1938) – итальянский физик; работы в области ядерной физики и теории нейтрино.

Арнольд Иоганн Вильгельм Зоммерфельд (1868–1951) – немецкий физик-теоретик; работы посвящены квантовой теории атома, спектроскопии, квантовой теории металлов, математической физике.

Герман Клаус Гуго Вейль (1885–1955) – немецкий математик; работы во многих областях математики и математической физики.

Ральф Крониг (1904–1995) – нидерландский физик; работы в области спектроскопии, квантовой механики, ядерной физики, физики твердого тела и др.

Карл Дэвид Андерсон (1905–1991) – американский физик; работы посвящены исследованию рентгеновских и гамма-лучей, физике космических лучей, физике элементарных частиц. Лауреат Нобелевской премии по физике за 1936 год.

Ханс Альбрехт Бете (1906–2005) – немецкий и американский физик и астрофизик. Лауреат Нобелевской премии по физике за 1967 год.

Рудольф Эрнст Пайерлс (1907–1995) – английский физик; работы по квантовой механике и квантовой электродинамике, ядерной физике, физике твердого тела и др.

Мария Гёпперт-Майер (1906–1972) – американский физик. Лауреат Нобелевской премии по физике (одна из двух женщин-лауреатов) за 1963 год (совместно с Хансом Йенсенсом).

Бруно Максимович Понтекорво (1913–1993) – итальянский и советский физик; работы в области нейтринной физики, астрофизики и др.

Лев Давидович Ландау (1908–1968) – выдающийся советский физик-теоретик, основатель научной школы. Лауреат Нобелевской премии по физике за 1962 год.

Джон Микаэль Робсон (1920–2000) – канадский физик; работы в области ядерной физики, физики и техники ядерных реакторов.

Петр Ефимович Спивак (1911–1992) – советский физик; работы в области ядерной физики и физики слабых взаимодействий.

Игорь Васильевич Курчатov (1903–1960) – советский физик, «отец» советской атомной бомбы, главный научный руководитель атомной проблемы в СССР.

Фредерик Рейнс (1918–1998) – американский физик. Лауреат Нобелевской премии по физике за 1995 год «за экспериментальное обнаружение нейтрино».

(Продолжение статьи –
в следующем номере журнала)

Очерк истории исследований нейтрино

Ю. ГАПОНОВ

ИТАК, К 1956 ГОДУ СТАЛО ЯСНО СЛЕДУЮЩЕЕ. Что касается квантовой электродинамики, то, в принципе, она построена, оставались только проблемы расходимостей, с которыми физика еще долго возилась и в какой-то мере продолжает возиться и сегодня. Но это уже проблемы, связанные с высокими точностями теорий. Затем впервые физики обратили внимание на так называемые дискретные симметрии – отражение пространственное, отражение временное и преобразование заряда (когда вы переходите от частиц к античастицам). Ну вот, эти идеи были развиты. Дальше – и это было самое интересное – в К-мезонах, которые в это время уже научились рождать на ускорителях, возникла совершенно новая проблема. Опять парадокс, и опять он связан в какой-то мере, как мы увидим дальше, с физикой слабого взаимодействия (в данном случае это физика слабого взаимодействия, а не совсем нейтрино, но в нейтрино имеет место то же самое). А именно, это τ - θ -проблема. Измеряя К-мезонные распады, нашли такие частицы, которые распадаются на два пиона или на три пиона (разные частицы, естественно). При этом массы этих частиц практически совпадают. Как это может быть? Вот проблема, которая мучила физиков с 1953 по 1956 год, а ответ на нее оказался совершенно уникальным: в этих распадах нарушается четность, закон сохранения четности. И вот, эта гипотеза была выдвинута в 1956 году Ли и Янгом, и буквально за год эксперимент по проверке сохранения четности в бета-распаде был сделан, это все было подтверждено, и выяснилось, что у нейтрино есть совершенно новые свойства. Сейчас я вам несколько слов на эту тему скажу.

Что такое четность? Напомню. Все физики знают, что есть векторы: радиус, скорость, импульс... Есть операция отражения. Ну вот, нарисуем, например, импульс в неких координатах x , y , z . Давайте произведем отражение. Если я сделаю полное отражение всего – и осей, и самого импульса тоже, то это будет вариант возможный, но не совсем та операция, с которой мы хотим работать. Я же хочу отразить импульс, но сохранить координаты, т.е. провести отражение в старых координатах. Ясно, что вектор при такой операции просто поменяет знак: \vec{r} поменяется на $-\vec{r}$, \vec{v} на $-\vec{v}$, \vec{p} на $-\vec{p}$. Однако существуют другие величины, типа векторного произведения двух векторов, которые имеют другие свойства. Вот, например,



Юрий Владимирович Гапонов

момент силы или момент импульса. Если вы делаете отражение, то, поскольку у вас есть два вектора и оба знак меняют, эти псевдовекторы, как мы их называем, не меняют знака. В частности, раз есть момент, то, естественно, кручение самой частицы тоже можно рассматривать как некий момент, который тоже не должен менять свой знак при отражении. И, наконец, если я ее, эту частицу, сведу в точку, сделаю ее точечной, то возникает понятие спина. Я не хочу сейчас влезать в эти понятия, физики знают, что это такое, я просто немного примитивизирую картину, чтобы вам проще было понимать ситуацию. Поляризация спин-частиц как раз имеет те же свойства, что и векторное произведение.

Давайте теперь рассмотрим такой процесс. Пускай у нас есть нейтрино, и пускай нейтрино летит по импульсу \vec{p} , а поляризовано против импульса. В действительности реальные нейтрино так и устроены – они поляризованы против своего импульса. Проведем отражение. Тогда в отражении, т.е. в зеркале, вы увидите, что импульс у вас поменялся, а спин не изменился. У вас появилась частица, у которой спин и импульс направлены в одну и ту же сторону. А с точки зрения сегодняшней физики это – антинейтрино. Значит, в

зеркале (вы смотрите в зеркало) вместо нейтрино вы видите антинейтрино, а не нейтрино. Вот парадокс, с которым столкнулись физики в 1956–57 годах. Точно так же вы можете сделать, например, такой эксперимент. Рассмотрите поляризованное ядро, которое у вас распадается, вылетают электроны под углом θ , и вы делаете отражение. У вас поляризованное ядро останется поляризовано в ту же сторону, а импульс поменяет знак. Если бы у вас закон сохранения четности выполнялся, то оба процесса были бы одинаковы. А на самом деле оказывается, что при бета-распаде частицы вылетают в основном по или против момента ядра. Вот это и есть знаменитый эксперимент Ву, который был сделан в 1957 году буквально за полгода. И было показано: да, в физике слабого взаимодействия, т.е. в нейтринной физике, нарушается четность. И вот здесь выяснилось, что Нильс Бор был прав. Действительно, Нильс Бор что говорил? Он придирился к закону сохранения энергии, но он был прав в своей логике: на уровне в 10^{-13} – 10^{-17} см законы сохранения могут быть другими. И в этом плане его идея как бы ожила заново. Ничего не пропадает, хорошие идеи сохраняются и дальше. Вот сегодняшняя точка зрения: безмассовое нейтрино поляризовано против импульса, а антинейтрино – по импульсу. Мир внутри, в слабом взаимодействии, оказывается несимметричным. В зеркале вы видите не нейтрино, а антинейтрино. И еще одно открытие было сделано вскоре после этого: процессы, связанные с направлением времени, тоже оказались разными. Были открыты процессы в распаде K^0 -мезонов, которые по времени и против (со сменой знака времени) – разные.

Итак, вот что произошло в теоретический период с 1953 по 1967 год. Ли и Янг придумали гипотезу для решения проблемы τ – θ , т.е. гипотезу о нарушении четности. Оно было экспериментально открыто в 1957 году – сначала в бета-распаде ядер, потом в бета-распаде различных частиц: μ -мезонов, π -мезонов, K -мезонов; ныне это тривиальность. И, наконец, что было действительно новостью для физиков, оно было обнаружено во взаимодействии нуклонов с нуклонами в ядрах. Кстати, это до сих пор некоторая загадка. Мы прекрасно знаем, что есть так называемые нарушающие четность ядерные силы. Эти силы существуют, они экспериментально показаны. К слову сказать, Россия здесь очень много поработала – например Лобашёв (экспериментатор) и Абов Юрий Георгиевич. Но по сию пору эта область явлений никак не связана с остальными, вы не можете рассчитать ее, исходя из элементарных частиц. Элементарная частица живет сама по себе, а ядерная физика с ее нарушением нуклон-нуклонного слабого взаимодействия живет сама по себе.

Наконец, было открыто слабое взаимодействие и в атомах тоже – взаимодействие между ядром и электронами, кроме обычного кулоновского, имеет еще некую маленькую добавку. Эта добавка связана с тем, что электрон с нуклонами еще взаимодействует слабым образом. Вот эти процессы были впервые тогда открыты. А теория, после того как было открыто, что нейтрино на самом деле имеет строго определенную поляризацию, а антинейтрино имеет совершенно дру-

гую поляризацию, вернулась к Вейлю, т.е. к тому предельному случаю, который может быть получен из уравнения Дирака и который игнорировался в 1928–29 годах. Оказалось, что нейтрино описывается именно уравнением Вейля. Возьмите уравнение Дирака, положите массу равной нулю, получите нейтрино. Все просто! Но тогда это отрицалось. Отрицалось, потому что нарушение сохранения четности было. Никто не мог в это поверить.

И вот теперь такая интересная парадоксальная вещь. Я говорю про 1956 год. Итак, вернулись к двухкомпонентному нейтрино. Была попытка Ландау ввести нарушение четности, но сохранить хотя бы идею о том, что если вы смотрите на нейтрино, то в зеркале у вас антинейтрино, т.е. ввести так называемое CP-сохранение¹. Это сохранение, к сожалению, тоже оказалось нарушенным, хотя намного в меньшей степени (так, доля распадов нейтральных K -мезонов с нарушением CP-инвариантности составляет примерно 10^{-3}). Затем, и это было сформулировано в основном Фейнманом, был реально написан гамильтониан² слабого взаимодействия с нарушением четности (так называемое V-A слабое взаимодействие³). И еще было открыто нарушение CP-четности (т.е., если хотите, T-четности⁴) в эксперименте – это следующий момент.

И, наконец, приблизительно в 1963–66 годы была сформулирована так называемая Стандартная модель⁵. Это модель, в которой (я немного дальше буду об этом говорить) объединены две вещи: электромагнитное взаимодействие и слабое взаимодействие – то, которое происходит с нейтрино. Стандартная модель была сформулирована именно в это время, но еще потребовалось достаточно большое время, порядка 20 лет, чтобы доказать, что это действительно так.

¹ CP-симметрия, или комбинированная четность, это инвариантность физических законов относительно преобразования, при котором происходит одновременно пространственное (P) зеркальное отражение физической системы и замена каждой частицы на соответствующую ей античастицу (C, зарядовое сопряжение).

² Гамильтониан – оператор полной энергии системы при квантово-механическом описании.

³ V-A-теория – универсальная теория слабого взаимодействия, учитывающая нарушение четности (P-симметрии) при слабом взаимодействии. Предложена в 1957 году М.Гелл-Манном, Р.Фейнманом, Р.Маршаком и Дж.Сударшаном.

⁴ T-симметрия, или симметрия по отношению к обращению времени, это инвариантность физических законов относительно замены времени t на $-t$. Поскольку фундаментальным качеством физических законов считается CPT-симметрия (т.е. инвариантность по отношению к одновременному пространственному зеркальному отражению физической системы, зарядовому сопряжению и обращению времени), то нарушение CP-симметрии возможно лишь при одновременном нарушении T-симметрии.

⁵ Точнее, здесь идет речь о теории электрослабого взаимодействия, которая была сформулирована в 1967 году С.Вайнбергом, Ш.Глэшоу и А.Саламом и легла в основу (наряду с квантовой хромодинамикой) созданной в течение следующего десятилетия Стандартной модели физики элементарных частиц.

Но вот что интересно: несмотря на то что, казалось бы, все сформулировано и все открыто, оставались два островка в это время, которые были не поняты. Первый – это гипотеза Понтекорво о нейтринных осцилляциях, про которые я сейчас скажу, и второй – майорановская гипотеза.

Так вот, теперь я хочу сказать несколько слов о Бруно Понтекорво и его гипотезе 1957 года. Это – гипотеза осцилляций, она была опубликована опять в препринте, только теперь в Дубне. Помня про работу Майорана (Понтекорво в какой-то мере был его учеником), он все время думал о том, нейтрино и антинейтрино это одно и то же или нет? Если это одно и то же, то получаются одни процессы, если это разные вещи, то – другие процессы. И вот, размышляя над этим, Бруно Понтекорво сформулировал такую очень любопытную гипотезу. В заключении своей статьи он пишет, что если у вас нет нейтрино и антинейтрино, а есть нарушение сохранения лептонного заряда (т.е. если нейтринный заряд не сохраняется), то при этом возможно превращение нейтрино в антинейтрино в процессе движения, ($\nu \leftrightarrow \bar{\nu}$), и тогда будут происходить процессы, похожие на те, которые были открыты в K^0 -мезонах. А в K^0 -мезонах в это время были открыты осцилляции, когда K^0 переходит в анти- K^0 и анти- K^0 переходит в K^0 . И Понтекорво написал даже, что, по-видимому, этот процесс может быть очень вероятно открыт, как минимум, в астрофизике, в астрофизических масштабах. Больше того, он даже дал оценку длины этих осцилляций. Средняя энергия нейтрино, которые, например, испускает Солнце, это 1 МэВ, и тогда длина осцилляций порядка 10^3 км. А сегодня осцилляции открыты, и их величина порядка 100–200 км. Иными словами, масса нейтрино не равна нулю (Понтекорво для массы нейтрино предположил величину 10^{-11} эВ). Таким образом, если все в это время увлекались Вейлем и считали, что масса нейтрино ноль и не о чем говорить, то Понтекорво высказал вот такую гипотезу. И я еще раз подчеркиваю, это была на самом деле линия от Майорана: гипотеза Майорана – это 1937 год, 1946 год – размышления Понтекорво относительно нейтринной физики, а в 1957 году, уже в России, он высказывает идею нейтринных осцилляций. В то время нейтрино было одно. Но, кстати, он пишет, что если нейтрино будет не одно, а нескольких типов, то тоже могут быть нейтринные осцилляции⁶. И в 1958 году Понтекорво высказывает идею, что нейтрино на самом деле не одно, а их может быть два, что возможны нейтрино, связанные с электронами, и нейтрино, связанные с мюонами. По его идее в ЦЕРНе был поставлен эксперимент, в котором были открыты два типа нейтрино: нейтрино электронное и нейтрино мюонное (1962 г.). Вот так. А потом нам говорят, что японцы в 1962 году первые сказали: «нейтринные осцилляции».

Хорошо. Пойдем дальше.

Как видите, все не просто. Стандартная модель есть, а он (Понтекорво) – все свое. Он говорит о том, что у

⁶ Осцилляции уже не между нейтрино и антинейтрино, а между двумя типами нейтрино.

нейтрино могут быть совершенно другие свойства. Это время, приблизительно с 1956 по 1966 год, – «теоретическое» время, время дискуссий, там много чего сложилось, много было высказано всяких идей. После этого теоретики затихли, начали работать экспериментаторы. Экспериментаторы за следующие 20 лет доказывают, что Стандартная модель действительно работает. Возникают три главных – теперь уже научились с нейтрино работать – направления в нейтринной физике. Во-первых, нейтрино низких энергий – реакторные нейтрино в основном или бета-распад. Идут исследования свойств нейтрино, делаются оценки на массу нейтрино, поляризацию нейтрино, ищутся доказательства того, что нейтрино не равно антинейтрино. И, наконец, был открыт так называемый нейтральный канал реакции, когда нейтрино не рождает электрон в обратном процессе, а просто рассеивается. Рассеивается, и все. Причем оно может рассеиваться на нуклонах – ну, на дейтроне, например, и на электронах. При этом оказалось, что в таких процессах физики вынуждены работать с совершенно экстремально малыми сечениями: 10^{-43} см² – это еще хорошо. Сейчас работают на грани 10^{-46} см². Фантастически малые величины – ничего ниже мы не сможем мерить. Но именно тогда это было осознано.

Второе направление – нейтрино высоких энергий. Оно возникло, в частности, в связи с тем, что физики научились работать с ускорительными пучками. В пучках пи-мезонов, например, у вас нейтрино рождаются от распада пионов, и эти нейтрино имеют энергию, уже гораздо большую – не порядка 1 МэВ, как в реакторной физике, а порядка 1 ГэВ и даже выше. А сечение взаимодействия нейтрино с нуклонами, и вообще всех слабых процессов в этой области, пропорционально квадрату энергии падающего нейтрино. Раз так, то вы теперь можете, беря пучки нейтрино достаточно высоких энергий, выходить на большие сечения. Действительно, это направление развивалось, появились новые методы регистрации нейтрино, в частности – камеры всякие, и было доказано, что нейтрино электронное не похоже на нейтрино мюонное, что нейтрино мюонное не похоже на свое антинейтрино и что существует еще третий тип нейтрино, так называемое тау-нейтрино, от распада тау-мезона. Таким образом, появились три семейства нейтрино. Были исследованы процессы рассеяния нейтрино на электронах и на нуклонах и в параллель с этим были открыты новые кварки, c , b , t , причем была найдена некая аналогия между нейтрино и кварками. Нейтрино есть трех типов, и кварков есть три семейства. Наконец, самым мощным доказательством того, что Стандартная модель реализуется в природе, было два открытия: первое – открытие нейтральных процессов⁷, которые предсказаны только в Стандартной модели, и второе –

⁷ Нейтральные токи – один из механизмов слабого взаимодействия, осуществляемый за счет обмена виртуальными Z -бозонами между кварками и лептонами без изменения электрического заряда начальных и конечных частиц. Предсказаны в 1973 году А.Саламом, Ш.Глэшоу и С.Вайнбергом, экспериментально подтверждены в 1974 году в ЦЕРНе.

открытие W - и Z -бозонов (элементарных частиц – переносчиков слабого взаимодействия), 1983 год. Причем выясняется, что их масса строго соответствует Стандартной модели. Все, физики должны были успокоиться, Стандартная модель работает.

И параллельно возникает третье направление – нейтринная астрофизика. Начинаются поиски нейтрино от Солнца, от звезд, от коллапса сверхновых, возникает идея о том, что во Вселенной существует нейтринное море – нейтрино очень низких энергий, которые образуют некий фон. Начинаются солнечные эксперименты. Один из первых экспериментов как раз велся по реакции, которую предложил Понтекорво: нейтрино падает на хлор, получается аргон. Это эксперимент Дэвиса, который делался в течение 30 лет в Хоумстейке в Америке. И, наконец, возникают подземные лаборатории и первые нейтринные телескопы.

Итак, в этот период наше знание о свойствах нейтрино расширяется до процессов рассеяния, идут исследования в рамках Стандартной модели, нейтрино превращается в инструмент исследования, появляются нейтринные пучки и нейтринные детекторы. Выявляется особая роль нейтрино в мировой картине Вселенной.

Вот такая любопытная картина возникла, если посмотреть начиная с 30-х годов. Появилась гипотеза нейтральных частиц, 1930 год, произошло открытие нейтрона. Квантовая электродинамика была сформулирована, возникла нейтрон-протонная модель ядра. И параллельно начинаются, с одной стороны, экспериментальные исследования, практически не зависящие от теоретиков, а с другой стороны, теоретические исследования. Экспериментальные исследования – бета-распад ядер, элементарных частиц, новые экспериментальные методы – идут начиная с 1930–32 годов и до конца 1956 года. Здесь возникает та самая проблема τ – θ , о которой я рассказывал. Теоретики тоже, как говорится, не дремлют, развивают свои собственные методы, размышления: Ферми придумал феноменологическую теорию бета-распада; возникает гипотеза Майорана, которая еще висит сама по себе, никто ничего не может про нее сказать. Появляется идея о том, что должна быть симметрия по отношению к пространственным преобразованиям, которая как раз здесь и нарушилась. Вот так сошлись теоретическая и экспериментальная физика.

В 1956–58 годы возникает мощный скачок, когда эксперимент нуждается в теории, а теория нуждается в эксперименте. Начинаются опять совершенно независимые процессы, я это подчеркиваю – очень мало влияющие друг на друга: с одной стороны, развитие экспериментальных методов, с другой стороны – развитие теории. Экспериментальные методы – в чистой физике высоких энергий, с астрофизическими объектами. А в плане теории – это структура частиц, Стандартная модель, новые кварки. И к середине 1980-х годов складывается вот такая ситуация: утверждена Стандартная модель и начинается поиск выхода из Стандартной модели. Вопрос – что дальше? Ну нельзя же остановиться, должно быть развитие дальше. Тогда – что? Есть ли что-нибудь вне Стандартной модели? Вот

этот вопрос себе впервые задают физики. Но для того чтобы о нем говорить, я напомним вам, что такое Стандартная модель с сегодняшней точки зрения.

Стандартная модель электрослабого взаимодействия, я буду о ней в основном говорить, с точки зрения математики – своеобразная вещь. Время от времени в физике возникают такие модели, в которых объединяются математика и физика. И это как раз особые точки, когда действительно происходит какой-то взрыв нашего понимания. Стандартная модель с точки зрения математики это так называемая $SU(2)$ – $U(1)$ симметрия, которая хорошо изучена математиками уже давно, еще с конца прошлого века. С точки зрения физики: существуют лептоны, которые образуют дублеты левых и синглеты правых частиц.⁸ Соответственно – для электронных, мюонных и тау-семейств. Вот массы этих частиц: 0,5 МэВ у электрона, 105 МэВ у мюона, 1777 МэВ у тау-частицы. Нейтрино же существуют только левые, никаких правых нейтрино нет в Стандартной модели. Есть ли масса у нейтрино? Вот первый вопрос, который возникает. По Стандартной модели, на этом уровне, нет массы, ноль, нейтрино только левые, и никаких вопросов нет.

У кварков – то же самое, есть дублеты кварков и есть синглеты, есть правые и есть левые. Есть u - и d -кварки, c - и s -кварки, t - и b -кварки. Вот массы кварков на сегодняшний день: от 2–5 МэВ для u - и d -кварков до 180 ГэВ у t -кварков. Они не так давно открыты, кстати. Оказывается (и это первый вопрос к теории), часть этих кварков, а именно d , s , b , не сами по себе входят в теорию, а смешиваются. И существует чисто феноменологическая, никак не объясняемая пока матрица Кобаяши–Маскавы, которая описывает эти смешивания. Откуда она взялась, что это такое? Вопрос. Но возникает следующий вопрос: а есть ли смешивание нейтрино?

Дальше. Все взаимодействия в Стандартной модели устроены очень просто. Есть так называемое калибровочное взаимодействие и есть константы, связывающие различные взаимодействия. В нулевом приближении в теории все безмассовое, ничего нет массивного. Затем включается механизм появления массы, так называемый хиггсовский механизм. Источник массы – вот этот бозон Хиггса, который до сих пор не открыт⁹, а дальше часть из этих частиц, в частности бозонов, получает массы. Гамма-квант остается безмассовый, а Z - и W -бозоны получают определенную массу. Значит, для того чтобы охарактеризовать эти упомянутые константы, достаточно ввести один экспериментальный угол, угол Вайнберга¹⁰. При этом впервые в физике возникает некий механизм появления массы. Мы до сих пор не знаем, правильный или неправильный механизм

⁸ Частицы с «левой» спиральностью – это те частицы, у которых спин направлен против направления движения частицы. У «правых» спин направлен по движению частицы.

⁹ Бозон Хиггса открыт экспериментально в 2012 году (был предсказан британским физиком П.Хиггсом в 1964 году).

¹⁰ Параметр в теории электрослабого взаимодействия, который определяет связь между константами слабого и электромагнитного взаимодействий.

предложен, но, во всяком случае, на том уровне, на котором мы сегодня физику понимаем, этот механизм работает.

Итак, существуют лептоны и кварки, это частицы-фермионы, т.е. частицы с половинным спином. Существуют передатчики калибровочного взаимодействия – γ -кванты, W - и Z -бозоны, и взаимодействия происходят универсально: вот у вас летит кварк или лептон, он испускает при взаимодействии один из этих бозонов и переходит в новое состояние. Это схема всех взаимодействий, которые мы сейчас знаем и которые описываются в Стандартной модели. Значит, возникает универсальная взаимосвязь всех полей, т.е. возможно, что есть даже некая общая единая константа, которая постепенно, за счет разных этапов нарушения спонтанной симметрии, переходит в другие, и источником возникновения массы является спонтанное нарушение симметрии вакуума. Вот что сегодня мы знаем.

Какие недостатки у этой теории? Прежде всего, непонятно, как эти поколения образовались, почему у них совершенно разные массы и т.п. Дальше. Какова масса нейтрино? Здесь (в Стандартной модели) она ноль, но, может быть, она не ноль? Почему происходит смешивание этих поколений? И, наконец, откуда взялись вот это нарушение и вот эта константа, которая связана с этими нарушениями (т.е. угол Вайнберга)? Здесь я хочу обратить ваше внимание на очень интересную аналогию между ньютоновской теорией, которую все знают, и Стандартной моделью. В Стандартной модели вы имеете безмассовые частицы, в нулевом приближении. Безмассовые частицы – это вещь, которая описывает геометрию. Не нужно никакой физики, чтобы описать безмассовые частицы. Чистая геометрия, с точки зрения современной высшей геометрии. Точно так же в ньютоновской теории вы имеете инерционное движение – если у вас нет никакого взаимодействия, все выключено, то частицы будут двигаться по инерции по прямым. Но прямые – это опять же чистая геометрия. В основу и той, и другой теорий положена чистая геометрия. А дальше включается физика. В ньютоновской механике включаются силы, и все частицы начинают двигаться по некоторым траекториям, т.е. начинается нарушение геометрии. Точно так же в физике элементарных частиц включаются калибровочные взаимодействия, хиггсовский механизм, и у вас все начинается, возникает физика. Физика отличается от математики тем, что в ней есть нарушение симметрии. Вот такие маленькие размышления...

Ну, теперь мы переходим, делаем шаг, к современной теории, к современной физике. С 1980-х годов теория начинает искать выход из Стандартной модели. Есть два пути, по которым идет теория. Первая идея была связана с Великим объединением. Давайте в Стандартной модели, где у нас была простейшая симметрия, введем все более и более высокие математические симметрии – вместо $SO(2)$ рассмотрим $SO(5)$ и т.д. Иными словами, математически будем все более и более расширять поле этих частиц. При этом мы начнем объединять между собой электродинамику с физикой слабого взаимодействия, затем присоединим к

ним сильное взаимодействие, потом добавим гравитацию, и таким образом у нас будет развиваться теория. Вот общая идея теории Великого объединения. Но возможен другой путь – и, скорее всего, по этому пути пошла Природа: а вдруг у нейтрино (именно у нейтрино в данном случае) есть нестандартные свойства? Например, есть майорановское нейтрино, т.е. нейтрино равно антинейтрино. Или у вас есть осцилляции – переход нейтрино электронного и мюонного в тау-нейтрино. Или осцилляции в веществе, которые были придуманы немножко позже. У нейтрино есть магнитный момент, а давайте вводить прецессию этого магнитного момента нейтрино в веществе. И так далее, т.е. второй путь – это путь, связанный с нестандартностью нейтрино.

И как на это начинают отвечать эксперименты? Надо сказать, что очень интересным моментом, связанным с развитием эксперимента, оказался взрыв сверхновой. В 1987 году, специально для физиков, в Большом Магеллановом облаке взорвалась сверхновая. В день Советской Армии, 23 февраля. Именно по этой причине российские физики не все зарегистрировали этот взрыв. Например, в Красноярске под землей был выходной день в честь 23 февраля. И впервые в истории человечества был наблюден взрыв сверхновой не только в световой области, но и в нейтринной области. А именно, было зарегистрировано приблизительно около двух десятков нейтринных вспышек, нейтринных следов в пяти основных детекторах, которые в это время работали на земле. Но даже и здесь возникла очень забавная ситуация, еще одна загадка нейтрино. Все зарегистрировали эти вспышки приблизительно в одно и то же время. Хотя, надо сказать, возникла фантастическая ситуация – у японцев(!) часы сломались. Причем не просто сломались – там на минуту где-то отличие было, хотя все вспышки в секундах считаются. Но, в конце концов, договорились, сдвинули японские часы в нужное место, и вроде все сошлось. Так вот, за пять часов до этой вспышки – это зарегистрировали пять детекторов – было зарегистрировано еще четыре события. Вот это – загадка, которая существует до сих пор, правда в последнее время мы начинаем ее разгадывать. Никто просто в это не верил в течение всех двадцати лет.

Дальше – реакторные нейтрино. К этому времени были померены взаимодействия нейтрино с протонами, с дейтронами, с электронами, измерен магнитный момент нейтрино, и начали искать нейтринные осцилляции в реакторных нейтрино. И, наконец, была придумана совсем интересная вещь. Оказывается, с помощью нейтрино можно диагностировать работу реакторов – на расстоянии 100 м поставить детекторы и смотреть, как работают реакторы. В Иране, например. И сообщать в МАГАТЭ – сегодня они нарабатывают плутоний или не нарабатывают. Это называется нейтринной диагностикой. К сожалению, она пока не реализуется, но принципиально она существует, она возможна.

Дальше – солнечные нейтрино. Первые эксперименты, как я уже говорил, это были эксперименты Дэвиса.

Солнечные нейтрино изучались с помощью хлор-аргонового метода, потом был создан большой детектор Камиоканда в Японии, и было доказано, что существует дефицит нейтрино от Солнца. Этот дефицит потом был подтвержден в экспериментах у нас на Баксане, на детекторе Супер-Камиоканда, и, наконец, в Солнечной нейтринной обсерватории в Канаде.

Дальше – ускорительные нейтрино. Действительно, в ускорителях начали работать с высокими энергиями, и был найден эффект, который до сих пор остается непонятым. В Америке, на ускорителе в Лос-Аламосе, были зарегистрированы необычные нейтринные осцилляции. Есть они или нет – мы до сих пор не знаем. Может быть, это ошибка, может быть – нет. Наконец, в ускорительных нейтрино на больших расстояниях тоже работают с осцилляциями, сегодня это уже становится тривиальностью.

Дальше – атмосферные нейтрино. Нейтрино, которые рождаются в процессах в космических лучах, можно тоже регистрировать, и в 1998–99 годах были найдены осцилляции этих нейтрино. Пока это остается загадкой, хотя идет много исследований по бета-распаду нейтрона. То он влезает в Стандартную модель, то делается следующий эксперимент и оказывается, что там расхождение на несколько сигма¹¹. И так до сих пор. До последнего времени мы были уверены, что время жизни нейтрона меряется с точностью одной секунды. А недавно Анатолий Серебров из Ленинграда сделал эксперимент и показал, что у него получилось отличие на 10 секунд.

Ну и, наконец, – масса нейтрино. Еще Понтекорво предложил использовать тритий, для того чтобы измерить массу нейтрино. Сейчас эти эксперименты ведутся, и они позволили нам сказать, что масса электронного нейтрино, которое вылетает из трития, во всяком случае меньше чем 2 эВ. Что тоже неплохо.

Я заканчиваю свой рассказ об истории развития наших представлений о нейтрино. Как видите, очень много нового и неожиданного, много ключевых для физики идей принесла эта область. Я думаю, что именно в ней нам и в будущем следует ждать сюрпризов, новых идей и поворотных моментов в развитии физики.

Именной комментарий

(расположение – по мере упоминания в тексте статьи)

Чжэндао Ли (род. в 1926 г.) – китайский и американский физик. Лауреат Нобелевской премии по физике (совместно с Ч.Янгом) «за пристальное изучение так называемых законов четности, которое привело к важным открытиям в области элементарных частиц» за 1957 год.

Чжэньнин Янг (род. в 1922 году) – китайский и американский физик. Лауреат Нобелевской премии по физике (совместно с Ч.Ли) за 1957 год.

Цзяньсюн Ву (1912–1997) – американский физик китайского происхождения, поставила знаменитый «эксперимент Ву», доказавший несохранение пространственной четности в слабых взаимодействиях.

Владимир Михайлович Лобашёв (1934–2011) – советский и российский физик-ядерщик.

Юрий Георгиевич Абов (род. в 1922 г.) – советский и российский физик, открыватель слабого взаимодействия нуклонов в ядрах.

Ричард Филлипс Фейнман (1918–1988) – выдающийся американский ученый, один из авторов знаменитых «Фейнмановских лекций по физике», прекрасный популяризатор науки. Лауреат Нобелевской премии по физике (совместно с С.Томоногой и Дж.Швингером) за 1965 год.

Раймонд Дэвис младший (1914–2006) – американский химик и физик. Лауреат Нобелевской премии по физике «за создание нейтринной астрономии» за 2002 год.

Стивен Вайнберг (род. в 1933 г.) – американский физик. Угол Вайнберга – один из параметров теории электрослабого взаимодействия Глэшоу–Вайнберга–Салама. Лауреат Нобелевской премии по физике (совместно с Ш.Глэшоу и А.Саламом) за 1979 год.

Питер Уэйр Хиггс (род. в 1929 г.) – британский физик-теоретик, член Лондонского Королевского общества. В 1960-е годы предсказал существование новой элементарной частицы, называемой теперь бозоном Хиггса. Лауреат Нобелевской премии по физике (совместно с Ф.Энгле-ром) за 2013 год.

Анатолий Павлович Серебров (род. в 1944 г.) – российский физик, специалист в области исследования фундаментальных взаимодействий и нейтронной физики.

Рекомендуемая литература

1. История уравнения Дирака и связанные с ним представления и события физики тех лет описаны самим П. Дираком в статье «Релятивистское волновое уравнение электрона» (Успехи физических наук, 1979, т. 129, в. 4, с. 681–691). В русском переводе статья доступна в интернете по адресу: http://ufn.ru/ufn79/ufn79_8/Russian/r798e.pdf

2. Об истории гипотезы Ландау о существовании «плотных звезд», которую можно рассматривать как первое предсказание нейтронных звезд (сделанное до открытия нейтрона), можно прочитать в статье Д.Г.Яковлева, П.Хэнселя, Г.Бейма и К.Петика «Л.Д.Ландау и концепция нейтронных звезд» (Успехи физических наук, 2013, т. 183, в. 3, с. 307–314). Адрес статьи в интернете: <http://ufn.ru/ru/articles/2013/3/f/>

3. Гипотеза Майорана подробно обсуждается в статье самого Э.Майорана «Симметричная теория электрона и позитрона» (Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2003, т. 34, в. 1, с. 242–256), а также в статье Ю.В.Гапонова «Начало майорановской физики. Памяти Э.Майораны» (там же, с. 240–241). Обе статьи доступны в интернете по адресам: <http://www1.jinr.ru/Archive/Pepan/v-34-1/7.htm>; <http://www1.jinr.ru/Archive/Pepan/v-34-1/v-34-1-6.pdf>

4. Об эволюции Вселенной, супергравитации и суперструнах, о квантовой хромодинамике, попытках построения единой теории поля и их создателях прекрасно написано в популярной книге Барри Паркера «Мечта Эйнштейна. В поисках единой теории строения Вселенной» (М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1991, перевод с английского В.И. и О.И.Мацарских, под редакцией Я.А.Смординского). Адрес книги в интернете: <http://www.ega-math.narod.ru/Reid/Parker.htm>

¹¹ Сигма (σ) – величина стандартной ошибки измерения.