

Вездесущее нейтрино

А. А. СУШКО



А. А. Сушко с супругой

В 1899 г. Резерфорд открыл β -лучи, т. е. было показано, что некоторые ядра распадаются с испусканием электрона. Не составляло труда определить энергию вылетающего электрона.

Очевидно, что она должна равняться разности масс материнского и дочернего ядра за вычетом массы электрона.

Но не тут-то было. Через 15 лет после открытия Резерфорда Чадвик измерил спектр вылетающих электронов в β -распаде ядра, и результаты этих измерений привели физиков в полное изумление. Спектр оказался не монолинией, а непрерывным распределением от нулевой энергии до некоторого максимального значения.

Эти результаты заставили многих физиков задуматься: выполняется или нет закон сохранения энергии при β -распаде? Ряд физиков, в том числе и Нильс Бор, которого трудно заподозрить в незнании физики, начали склоняться к мысли о том, что тут закон сохранения энергии нарушается.

Но были физики, отстаивающие незыблемость закона сохранения энергии. Среди них В. Паули, написавший в 1930 г. известное письмо Гейгеру и Л. Мейтнер, в котором предположил, что вместе с электроном в β -распаде излучается также безмассовая нейтральная частица со спином $\frac{1}{2}$. Паули предполагал, что эта частица, названная им «нейтрон», не взаимодействует с веществом и зарегистрировать ее не удастся.

Через два года Чадвик открыл нейтрон и «монополизировал» это название. А в 1933 г. Ферми, разрабатывая теорию слабого взаимодействия, назвал частицу, введенную Паули, нейтрино, что в переводе с итальянского означает «нейтрончик».

Но при β -распаде фигурирует не нейтрино ν_e , а антинейтрино $\bar{\nu}_e$. Нейтрино появляется в обратном β -распаде или β^+ -распаде, когда испускается не электрон e^- , а позитрон e^+ . Так началась история нейтрино, которое, как выяснилось в

последующем, играет очень важную роль в ключевых вопросах современной физики.

Нет сомнения, что предположение Паули о существовании нейтрино – замечательная идея, но он дважды ошибся в предполагаемых свойствах нейтрино. Сначала в 1953–1956 гг. Ф. Райнес и К. Л. Коуэл на реакторе в Саванна Ривер (США) показали, что нейтрино можно зарегистрировать, используя реакцию $p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$ (обозначим ее – Реакция). Они показали, что нейтрино, хотя и с очень малым сечением взаимодействия $\sigma = 6,1 \cdot 10^{-41} \text{ см}^2$ (для сравнения, сечение рассеяния нейтрона на атоме $\sim 10^{-24} \text{ см}^2$), но реагируют с веществом. Отметим, что пробег нейтрино мегаэлектронвольтных энергий в воде порядка 100 световых лет.

А затем выяснилось, что нейтрино имеет массу. И вот тут началось.

В реакции с протоном участвуют антинейтрино. Нейтрино в большом количестве излучает наше Солнце. Плотность потока солнечных нейтрино на поверхности Земли $\sim 5 \cdot 10^{10} \text{ в}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Кроме того, нейтрино рождается при взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли. Причем в этих процессах появляются не только электронные нейтрино (ν_e), но и мюонные (ν_μ), т. е. нейтрино, которые рождаются в процессе распадов пионов, мюонов и каонов. Сразу возник ряд вопросов. Тожественны ли нейтрино и антинейтрино? Тожественны ли электронные и мюонные нейтрино?

В 1962 г. было показано, что электронное и мюонное нейтрино не тождественны, в 1964 г. – не тождественны мюонное нейтрино и антинейтрино.

Встал вопрос о количестве типов (ароматов или флейворов) нейтрино. Было доказано, что количество лептонов равно трем, следовательно и количество ароматов нейтрино, соответствующих этим лептонам, – тоже три. В 1975 г. был открыт τ -лептон, а в 2000 г. экспериментально зарегистрировано τ -нейтрино (ν_τ). Кажется бы, живи и радуйся. Получается красивая картина: три поколения кварков, три поколения лептонов и соответствующие им безмассовые нейтрино. Все сходится. Но нейтрино вездесуще и неуловимо: когда кажется, что все понятно, оно преподносит новый сюрприз, повергающий физиков в недоумение.

В конце 1960-х гг. начался знаменитый хлор-аргонный эксперимент Дэвиса по регистрации солнечных нейтрино на реакции $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$. Эксперимент шел тяжело, требовал невероятных усилий, многие объявленные ранее результаты исправлялись или аннулировались, но, в конце концов, был получен результат, который показал, что поток солнечных нейтрино на поверхности Земли почти в 3 раза ниже теоретических предсказаний.

Снова нейтрино заставило задуматься физиков. Вспомнили о том, что еще в 1957 г. Бруно Понтекорво высказывал идею о возможности осцилляции нейтрино, т. е. возможности перехода одного типа нейтрино в другой. Но осцилляции возможны только в том случае, если у нейтрино есть масса.

А с массой у нейтрино дела обстоят тоже интересно. Кинематическая масса нейтрино (т. е. массы ν_e , ν_μ и ν_τ) образуется в процессе смешивания трех квантовых массовых состояний m_1 , m_2 и m_3 в пропорциях, определяемых тремя углами смешивания θ_{12} , θ_{23} и θ_{13} . Образно можно представить три соединенных сосуда, заполненных массами m_1 , m_2 и m_3 , из которых массы в определенных пропорциях поступают в четвертый сосуд, и вот именно он проявляет себя в реакциях. Можно также представить флейворы ν_e , ν_μ и ν_τ как три слабо связанных осциллятора. Колебания одного осциллятора передаются другому. Так проявление массы ν_e означает «возбуждение ν_e -осциллятора» и т. п.

Исследование осцилляций нейтрино позволяет определить разности квадратов масс m_1 , m_2 и m_3 и значения углов смешивания θ_{12} , θ_{23} и θ_{13} , но не дает значений для кинематических масс нейтрино. На определение массы нейтрино было затрачено множество усилий. В настоящее время получен верхний предел на сумму масс нейтрино равный 0,3 эВ. Таким образом, масштаб массы нейтрино одного флейвора составляет 0,1 эВ.

Но не все так просто. В настоящее время известно, что $m_1 < m_2$, а вот как соотносится масса m_3 с первыми двумя пока неизвестно. Теоретические исследования показывают, если $m_1 < m_2 < m_3$ (нормальная иерархия масс), то масса нейтрино должна быть в пределах 0,01–0,1 эВ на один флейвор, и есть надежда определить ее современными методами, если же $m_3 < m_1 < m_2$ (инверсная иерархия масс), то масса нейтрино уменьшается до 10^{-3} – 10^{-5} эВ, и ее определение нужно оставить будущим поколениям.

И это еще не все. Масса нейтрино может быть дираковской или майорановской. В первом слу-

чае нейтрино не тождественно антинейтрино и они отличаются спиральностью: у нейтрино спин и импульс антипараллельны, у антинейтрино – параллельны. Во втором случае нейтрино и антинейтрино тождественны, и в этом случае существует два типа нейтрино – с правым и левым винтом. На первый взгляд может показаться, что такие предположения всего лишь игра ума, но это не так. В зависимости от того, какой тип массы у нейтрино – дираковская или майорановская, будут существенно отличаться различные физические процессы. Так, если масса нейтрино майорановская, то в рамках Стандартной модели магнитный момент нейтрино тождественно равен нулю, в случае дираковской массы магнитный момент нейтрино ненулевой и равен $\sim 10^{-19} \mu_B$ (μ_B – магнетон Бора).

Реакции двойного β -распада также идут по-разному в зависимости от того, дираковская или майорановская масса у нейтрино. Так, в случае дираковской массы излучаются два электрона и два антинейтрино или два позитрона и два нейтрино, а в случае майорановской массы – два электрона или два позитрона без нейтрино.

При этом в случае безнейтринного двойного β -распада суммарная энергия двух электронов постоянная, а в случае двухнейтринного двойного β -распада суммарная энергия двух электронов монотонно меняется от нуля до некоторого максимального значения.

Внимательный читатель задаст вопрос: о какой спиральности нейтрино можно говорить, если у него есть масса? В самом деле, спиральность сохраняется только у безмассовых частиц. Нейтрино и здесь проявляет свою «оригинальность». Дело в том, что амплитуда изменения спиральности нейтрино пропорциональна m/E , где m – масса частицы, а E – ее энергия. Учитывая тот факт, что масса нейтрино $\ll 1$ эВ, а энергии большинства нейтрино (кроме реликтовых) значительно превосходят значение в 1 эВ, можно сказать, что спиральность нейтрино практически сохраняется.

В настоящее время идет активная работа по поиску стерильных нейтрино, т. е. истинно нейтральных частиц, которые не взаимодействуют с веществом. Зарегистрировать напрямую их невозможно, поэтому регистрация производится по косвенным признакам, например, по характеру параметров осцилляций нейтрино, которые зависят от того, три флейвора нейтрино существуют в природе или больше. В случае, если удастся доказать существование стерильных нейтрино, то физика выйдет за пределы Стандартной мо-

дели, что приведет к новым фундаментальным открытиям.

Можно еще долго рассказывать о свойствах нейтрино, но давайте перейдем в практическую плоскость. Что же нам может поведать исследование потоков нейтрино от различных источников? Уже отмечалось, что пробеги нейтрино в плотном веществе огромны. Это означает, что зарегистрировать нейтрино очень сложно, но в то же время нейтринные потоки несут информацию о тех явлениях и процессах, которые исследовать с помощью других методов практически невозможно. Для нейтрино прозрачны Земля, Солнце и звезды, они несут информацию о том, что происходит в центре Земли и Солнца, что происходит при взрыве сверхновой, о далеком прошлом нашей Вселенной. Кроме того, нейтрино позволяют нам заглянуть в сердце атомного реактора и исследовать структуру атомного ядра и элементарных частиц.

Начнем двигаться от большого к малому.

Сразу же после Большого Взрыва наша Вселенная начала расширяться и остывать. В процессе первичного нуклеосинтеза было «произведено» огромное количество вещества и излучения, в том числе и нейтрино. Для излучения Вселенная стала прозрачной через ~400 тыс. лет после Большого Взрыва. Регистрация реликтового излучения (температура 2,7 К) была одним из самых замечательных событий в истории развития фундаментальной физики и космологии. Для нейтрино Вселенная стала прозрачной через ~1 с после Большого Взрыва. Представляете, сколько интересных космологических загадок можно разгадать, изучая потоки реликтовых нейтрино.

Плотность реликтовых нейтрино – 53 см^{-3} на флэйвор, их средняя кинетическая энергия $5 \cdot 10^{-4}$ эВ (температура 1,95 К). Следует отметить, что поскольку нейтрино имеют массу, то они накапливаются вокруг массивных тел, таких, например, как галактики, и их плотность в окрестностях Земли может в несколько раз превышать указанную выше.

Регистрация реликтовых нейтрино является весьма трудной и на данный момент неразрешимой задачей. Для регистрации реликтовых нейтрино предлагается реакция индуцированного β -распада (в англоязычной литературе NSB-процесс): нейтрино взаимодействует с ядром элемента, в результате вылетает электрон. Эта реакция идет для нейтрино любой энергии, вплоть до нулевой. Энергия вылетающего электрона будет на две массы нейтрино больше

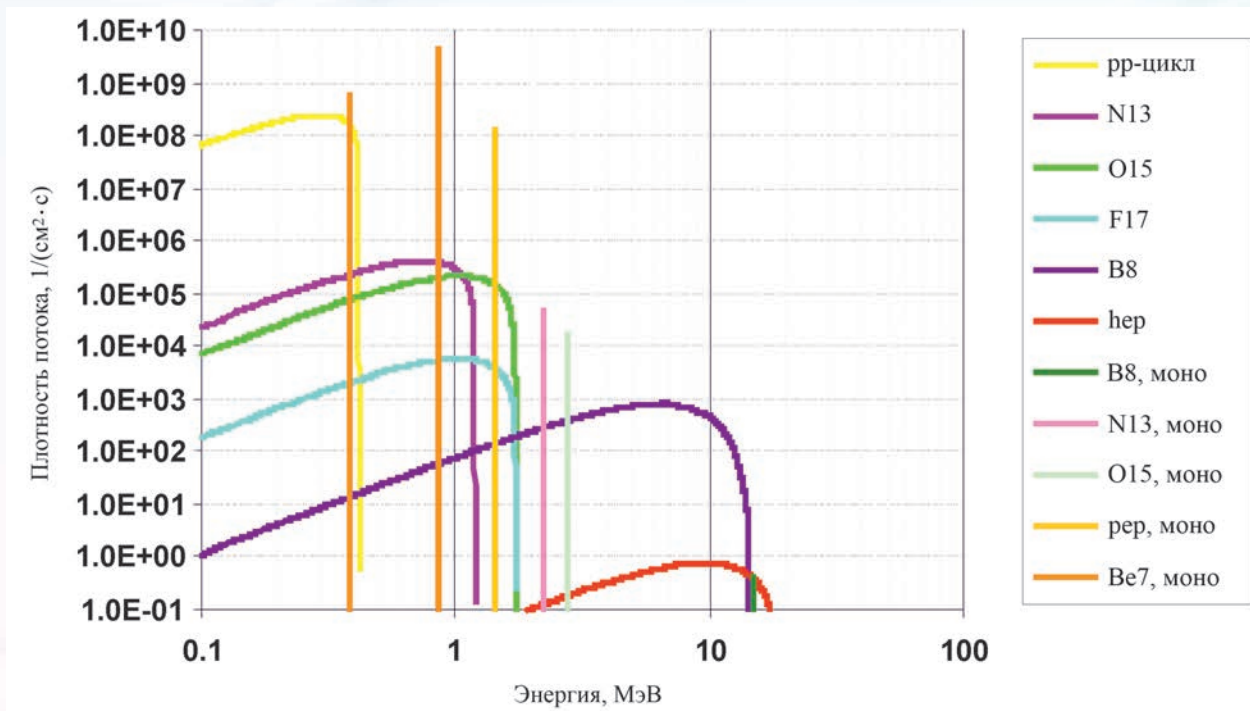
максимальной энергии электрона, рожденного в обычном β -распаде. Проблема состоит в том, что сечение данной реакции мало и за один и тот же промежуток времени количество электронов, рожденных в этой реакции, будет более, чем на 20 порядков меньше количества электронов, рожденных в обычном β -распаде. Учитывая тот факт, что энергия электронов, рожденных в этой реакции, будет больше максимальной энергии электрона, рожденного в обычном β -распаде, в лучшем случае на ~0,1 эВ сепарация электронов выглядит нетривиальной задачей.

Настоящий научный переполох случился после регистрации 23 февраля 1987 г. (пока единственного в истории физики) всплеска нейтрино от сверхновой SN1987A из Большого Магеллана Облака в 50 килопарсеках от Земли. Было зарегистрировано два нейтринных импульса на четырех нейтринных детекторах, причем первый импульс достиг Земли на несколько часов раньше ожидаемого времени. Получается, что нейтрино летят по Вселенной со скоростью больше скорости света? Для ответа на этот вопрос понадобилось кардинально пересмотреть механизм развития взрыва сверхновой, и постулат о непревышении скорости света в вакууме устоял. Отметим, что в первом импульсе было зарегистрировано всего 10 нейтрино, а во втором – 28. И это мизерное число нейтрино привело к существенному пересмотру наших взглядов на процесс гибели звезд.

В настоящее время на Земле создано значительно больше нейтринных детекторов, которые способны зарегистрировать на порядки больше нейтринных событий. Ждем взрыва сверхновой в нашей Галактике и готовимся получить массу новых данных, позволяющих приоткрыть завесу тайны над загадками астрофизики. Большое число современных нейтринных детекторов предназначены для исследования характеристик потока солнечных нейтрино. На Солнце идет реакция $4p \rightarrow \text{He}^4 + 2e^+ + 2\nu_e$.

Реакции протекают по так называемым pp-циклу и CNO-циклу, в ряде которых рождаются нейтрино с энергиями до 18,778 МэВ. Спектр солнечных нейтрино для различных реакций показан на рисунке.

Измерение характеристик потоков солнечных нейтрино проводилось различными методами. В начале использовались радиохимические методы, такие как хлор-аргонный, использующий реакцию с ^{37}Cl (порог реакции 0,814 МэВ), и галлий-германиевый, использующий реакцию: $^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow ^{71}\text{Ge} + e^-$.



Спектр солнечных нейтрино на Земле (без учета осцилляций).
Справа указаны общепринятые наименования солнечных реакций

Кроме этого, использовалась реакция рассеяния на электроне: $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$ ($x = e, \mu, \tau$). В этой реакции участвуют нейтрино всех типов, но сечение реакции с электронными нейтрино выше в 6,5 раз по сравнению с сечением реакции с мюонными и тау нейтрино. Также использовались реакции заряженного (только для электронных нейтрино, порог реакции 1,45 МэВ) и нейтрального токов (для всех типов нейтрино, порог реакции 2,23 МэВ): $d + \nu_e \rightarrow p + p + e^-$, а также $d + \nu_x \rightarrow n + p + \nu_x$ ($x = e, \mu, \tau$). Здесь d – ядро дейтерия. Все эти эксперименты показали дефицит солнечных нейтрино, что подтверждает наличие осцилляций, а следовательно и массы нейтрино.

Отметим, что ряд реакций на Солнце очень чувствительны к температуре, так поток нейтрино от реакции ${}^7\text{Be}$ пропорционален T^8 , а от реакции ${}^8\text{B}$ пропорционален T^{18} . Таким образом, измеряя потоки нейтрино от этих реакций с точностью $\pm 50\%$ можно получить значение температуры во внутренних областях Солнца с точностью до нескольких процентов. Кроме этого, потоки нейтрино несут информацию о степени обогащения Солнца элементами тяжелее гелия, о толщине конвективной зоны Солнца, о коллективных процессах в плазме, об электронно-нейтринных взаимодействиях и т. д.

Интересные результаты ожидают нас при исследовании нейтринных потоков от Земли.

В недрах Земли рождаются в основном антинейтрино в распадах радиоактивных элементов: ${}^{40}\text{K}$, ${}^{238}\text{U}$, ${}^{232}\text{Th}$, ${}^{87}\text{Rb}$. Кроме этого, ${}^{40}\text{K}$ по каналу захвата электрона рождает нейтрино.

Плотность потока антинейтрино на поверхности Земли $\sim 2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ с энергиями до нескольких МэВ, нейтрино $\sim 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ с энергией 44 кэВ. Исследование характеристик потоков геонейтрино только начинается, и их результаты принесут нам много новых данных о внутренней структуре Земли, о распределении радиоактивных изотопов в коре и мантии нашей планеты. Учитывая тот факт, что осцилляции нейтрино в вакууме и веществе идут по-разному (эффект Михеева – Смирнова – Вольфенштайна), не исключается возможность обнаружения с помощью нейтринных пучков полезных ископаемых вне зависимости от того, на какой глубине они залегают.

Регистрация потоков антинейтрино от работающего реактора позволяет отслеживать характеристики работы реактора, получить томографию активной зоны, определить обогащение активной зоны различными изотопами и т. п.

Так как количество антинейтрино в акте деления и их спектр для различных изотопов, в частности урана и плутония, отличаются, то измерение потоков нейтрино, также позволяет контролировать процесс наработки плутония в

реакторе. Заметим, что это наиболее надежный способ для контроля процесса нераспространения ядерного оружия, так как не существует способов экранировки потоков антинейтрино. Исследования потоков антинейтрино от реактора позволяет также решить ряд фундаментальных вопросов: параметры осцилляций, наличие стерильного состояния, тип массы (дираковская или майорановская) и т. п.

Для исследования характеристик потоков антинейтрино от реактора используется Реакция. Значительных успехов в исследовании реакторных потоков антинейтрино достигла коллаборация ОИЯИ (Дубна) и ИТЭФ (Москва), создавшая детектор DANSS. Многосекционный детектор DANSS создан на основе пластмассового сцинтиллятора с добавками Gd_2O_3 . Рожденный в Реакции позитрон быстро аннигилирует с электроном с образованием двух разлетающихся в противоположные стороны γ -квантов с энергиями 0,511 МэВ каждый, через 5–20 мкс нейтрон из Реакции поглощается гадолинием с испусканием γ -квантов общей энергией 8 МэВ. Комбинация этих вспышек в сцинтиляторе и будет означать регистрацию события Реакции. Секционность детектора позволяет также определить место рождения антинейтрино в активной зоне реактора.

В настоящее время активно разрабатываются детекторы на базе когерентного рассеяния нейтрино (антинейтрино) на ядрах. В случае когерентного рассеяния нейтрино рассеивается на ядре как на целом, а не на отдельных нуклонах ядра. Эта реакция позволяет регистрировать нейтрино низких энергий. Сечение реакции когерентного рассеяния на ядре $\sim N^2$, где N – число нуклонов в ядре. Недостатком этого метода является малая доля энергии, передаваемая ядру (для реакторных антинейтрино с энергией ~ 1 МэВ ядру передается энергия ~ 1 кэВ), и низкий ионизационный выход электронов – несколько штук на 1 кэВ энергии. В качестве рабочего тела таких детекторов наиболее подхо-

дящими являются инертные газы аргон и ксенон. Даже при массе мишени в 1 кг на пучке антинейтрино от реактора скорость счета будет достигать нескольких событий в сутки. Отметим также, что когерентное рассеяние рассматривается для регистрации нейтрино низких энергий от различных источников, в том числе и реликтовых.

В заключение кратко остановимся на глубоководных нейтринных процессах, в результате которых рождаются мюоны и адроны и которые позволяют определять структуру ядра, нуклона и других структурных частиц. Суть данного явления состоит в том, чтобы облучать структурные частицы бесструктурными. К бесструктурным частицам, в частности, относятся лептоны и соответствующие им нейтрино. По характеристикам частиц, рожденных при облучении, определяется структура исследуемого объекта.

Конечно, физика нейтрино затрагивает огромное количество областей, и описать ее в одной статье невозможно. Здесь представлена только небольшая часть тех физических и практических задач, которые можно решить с помощью вездесущих нейтрино.

В настоящее время нейтринная физика одна из наиболее бурно развивающихся областей исследований, поэтому научно-исследовательским институтам Росатома для того, чтобы быть на передовых позициях физических исследований, необходимо в обязательном порядке включаться в исследования в области нейтринной физики, которые, кроме ряда фундаментальных достижений, могут решить ряд важных прикладных задач.

СУШКО Андрей Алексеевич –
главный научный сотрудник ИТМФ
РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук,
лауреат премии Правительства РФ

Научно-популярный журнал для всех, кто интересуется историей создания ядерного оружия, новыми направлениями развития современной физики, наукоёмкими технологиями

Учредитель —
ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»), г. Саров. Зарегистрирован Госкомитетом РФ по печати за № 12751 от 20.07.94 г.

С содержанием журналов можно ознакомиться на сайте РФЯЦ-ВНИИЭФ www.vniief.ru

Адрес редакции:
607188, г. Саров Нижегородской обл., пр. Мира, 37, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

Тел.: (831-30) 775-85,
факс: (831-30) 776-68,
e-mail: volkova@vniief.ru

Индекс подписки
в Каталоге Роспечати 72249