

**THERMONUCLEAR
REACTOR
IN THE INTERIOR
OF THE SUN
AND THE PROBLEM
OF SOLAR NEUTRINOS**

G. E. KOCHAROV

The state of the art and perspective investigations of Solar neutrinos that are generated in the deep interior of the Sun are discussed.

Обсуждаются современное состояние и перспективы исследования солнечных нейтрино, которые генерируются в глубоких недрах Солнца.

**ТЕРМОЯДЕРНЫЙ КОТЕЛ
В НЕДРАХ СОЛНЦА
И ПРОБЛЕМА
СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО**

Г. Е. КОЧАРОВ

Санкт-Петербургский государственный университет

ВВЕДЕНИЕ

До начала 30-х годов нынешнего столетия никто не подозревал о существовании нейтрино. Они родились на кончике пера швейцарского физика В. Паули в трудной и неясной ситуации, царившей в физике в то время. А ситуация была такая: эксперименты показали, что при испускании электронов атомными ядрами либо не соблюдается известный всем закон сохранения энергии, либо куда-то уносится энергия. Чтобы пояснить всю остроту положения, достаточно сказать, что даже сам Н. Бор допускал возможность нарушения закона сохранения энергии в микромире. Однако Паули нашел объяснение этому парадоксу, допустив существование нейтрино — частицы, являющейся, как выяснилось позже, главным действующим лицом во многих ядерных спектаклях, происходящих как на Земле, так и в космосе. Благодаря нейтрино недостаток энергии, обнаруженный в опытах по бета-распаду, легко объяснялся: энергию уносили нейтрино. Тем самым краеугольный камень физики — закон сохранения энергии был спасен. “Крестным отцом” нейтрино стал известный итальянский физик Э. Ферми: именно он дал новой частице имя, означающее по-итальянски “малая нейтральная частица”, “маленький нейтрон”. Он же предсказал ряд ее свойств.

Около четверти века нейтрино существовали только в формулах теоретической физики. Впервые их зарегистрировали американские ученые Райнес и Коуэн, поместив сложную экспериментальную установку под “град” нейтрино, источником которых был мощный ядерный реактор. Уже первые эксперименты подтвердили свойства этих частиц, предсказанные теорией. Нейтрино перестали быть мифом и теперь являются полноправными элементарными частицами. Бурное развитие техники физического эксперимента за последние несколько десятков лет сделало возможными эксперименты по регистрации нейтрино, рожденных в естественных условиях, возникла новая область науки — нейтринная астрофизика. Первым объектом изучения стало наше Солнце.

О ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПРИРОДЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Проблема источников энергии была актуальной для человечества во все времена. Каковы бы ни были достижения науки, неистощимость Солнца всегда поражала человеческое воображение. Ведь наше светило излучает энергию миллиарды лет с поразительным постоянством. Мощность излучения составляет $4 \cdot 10^{26}$ Вт, а каждый квадратный метр поверхности Солнца в энергетическом отношении можно сравнить с электростанцией мощностью $100 \cdot 10^3$ кВт. Каким же образом генерируется столь большая мощность?

Ответ на вопрос: “Почему светит Солнце?” — простой: светит потому, что горячее. Но чтобы не остывать, Солнце постепенно должно сжиматься, при этом гравитационная энергия — энергия частиц, поднятых над центром шара, переходит в кинетическую, тепловую и восполняет потери в излучаемой энергии. Потенциальная энергия газового шара Солнца, возникшая за счет взаимного притяжения отдельных его частей, составляет $6 \cdot 10^{48}$ эрг. Поскольку в каждую секунду Солнце излучает $3,9 \cdot 10^{33}$ эрг, то запас потенциальной энергии должен быть израсходован за время $6 \cdot 10^{48} / 3,9 \cdot 10^{33}$ секунд = $50 \cdot 10^6$ лет. Так думали в прошлом столетии и считали, что возраст Земли и всей Солнечной системы не более $50 \cdot 10^6$ лет.

В самом начале XX века экспериментально было установлено, что уран пролежал в твердых породах Земли более $1 \cdot 10^9$ лет (по современным данным, $4,7 \cdot 10^9$ лет). Поскольку Солнце за счет запаса гравитационной энергии не могло светить более $50 \cdot 10^6$ лет, остро встал вопрос об источнике энергии на Солнце. В результате возникло кризисное состояние, выйти из которого помогли исследования в области ядерной физики.

В 20-х годах физики научились при помощи масс-спектрографа с высокой точностью измерять массы атомных ядер. Было установлено, что масса гелия на 0,8% (по современным данным, на 0,7%) меньше массы четырех ядер водорода (протонов), образующих, по представлениям того времени, вместе с двумя электронами ядро гелия. Английский астрофизик А. Эддингтон сразу отметил важность этого открытия для энергетики звезд. Если четыре протона превратятся в ядро гелия, то при этом должна выделиться энергия, равная разности масс четырех протонов и гелия, умноженной на квадрат скорости света, то есть $26,7 \text{ МэВ} \cong 4,3 \cdot 10^{-5}$ эрг. Таким образом, для обеспечения светимости Солнца $3,9 \cdot 10^{33}$ эрг/с необходимо, чтобы каждую секунду сгорало $4 \cdot 3,9 \cdot 10^{33} / 4,3 \cdot 10^{-5} = 3,6 \cdot 10^{38}$ протонов, что составляет 10^{-18} часть общего количества протонов, имеющихся в солнечном веществе. Это означает, что достаточно крайне незначительному количеству солнечного водорода превратиться в гелий,

чтобы обеспечить наблюдаемую светимость в течение миллиардов лет.

Таким образом, ответ на принципиальный вопрос об источнике энергии звезд был получен. Однако возникла очень трудная проблема: могут ли в звездных условиях протекать ядерные реакции превращения четырех протонов в ядро гелия?

Рассмотрим два протона. Ядерные силы притяжения между ними начинают действовать на очень близком расстоянии $\approx 10^{-13}$ см. Чтобы приблизиться протонам друг к другу на такое расстояние, нужно сообщить им энергию ≈ 1 МэВ, необходимую для преодоления взаимного электрического отталкивания. Такая энергия может появиться у протона, если солнечное вещество нагрето до температуры 10^{10} К. Поверхностная температура Солнца измерена и составляет всего 5760 К. По мере углубления внутрь Солнца температура должна возрастать, достигнув максимума в центре. Но даже здесь 10^{10} К никак не может быть. При такой температуре внутреннее давление столь велико, что гравитационные силы не в состоянии предотвратить взрыв центральной области. Поскольку же Солнце не взрывается, температура в его центре должна быть в 1000 раз меньше. Соответственно меньше будет и энергия протона — всего 1 кэВ, что в 1000 раз меньше значения, необходимого для приближения протонов друг к другу. Казалось бы, рухнули все надежды. Однако решение проблемы было найдено с открытием квантовой механики, которая предсказала для частиц микромира туннельный эффект. Г. Гамов и Э. Теллер развили теорию туннельного эффекта и показали возможность проникновения протона в “ядерную яму” как сквозь туннель в барьере. Они получили формулу для числа актов реакции между двумя заряженными частицами в 1 г звездного вещества в 1 с. Базируясь на этих достижениях, Г. Бете написал статью под названием “Генерация энергии в звездах”, которая была опубликована 1 марта 1939 года. В этой блестящей статье Бете предложил последовательность превращения протонов в гелий. В 1967 году ему была присуждена Нобелевская премия.

ГЕНЕРАЦИЯ НЕЙТРИНО В НЕДРАХ СОЛНЦА

По существующему представлению в звездах, подобных Солнцу, синтез ядер гелия из протонов должен происходить с помощью протон-протонного (p-p) или углеродно-азотного (C-N) циклов.

В первой реакции p-p цикла при столкновении двух протонов образуются ядро дейтерия и позитрон (рис. 1). Вероятность этой реакции очень мала, поскольку для совершения процесса требуется выполнение двух крайне редких условий. Во-первых, в момент столкновения протонов энергия одного из них должна быть намного больше средней тепловой энергии, чтобы преодолеть кулоновские силы отталкивания. Таких частиц очень мало. Во-вторых, необходимо, чтобы за короткое время ($\approx 10^{-21}$ с)

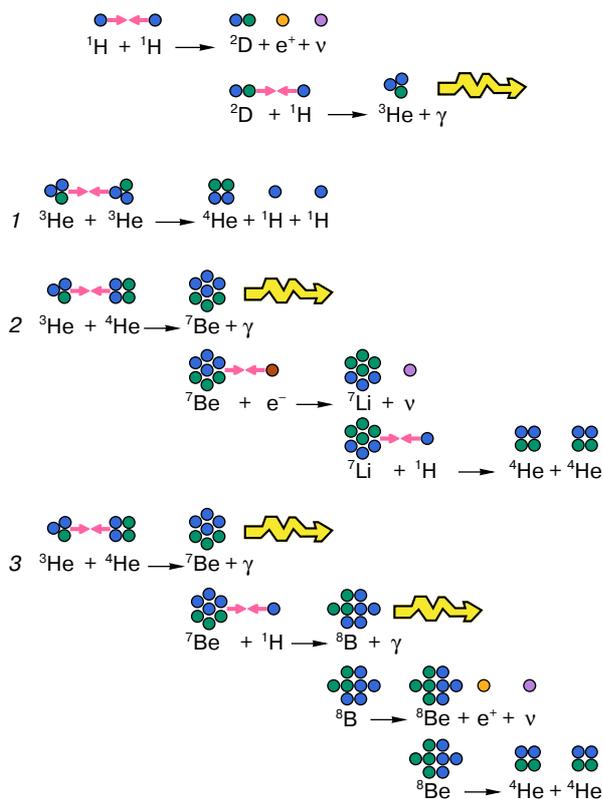


Рис. 1. Протон-протонный цикл.

один из протонов превратился в нейтрон, позитрон и нейтрино. Нейтрон соединяется с протоном с образованием дейтона, нейтрино покидает звезду, а

позитрон аннигилирует с электроном с образованием гамма-квантов, которые поглощаются в звездном веществе. Особое внимание к первой реакции протон-протонного цикла (рис. 1) обусловлено тем, что скорость энерговыделения в недрах Солнца задается именно ею, поэтому она определяет и температуру Солнца, и особенности процессов, происходящих в глубоких его недрах. Сечение этой реакции столь мало, что в ближайшем будущем вряд ли удастся в лабораторных условиях его измерить. Это сечение вычисляется теоретически.

Дейтон, возникший в первой реакции, быстро (секунды или доли секунды в зависимости от температуры) превращается в изотоп ${}^3\text{He}$, соединяясь с протоном. Дальнейшее развитие цикла протекает по различным каналам в зависимости от температуры и химического состава звездного вещества (варианты 1 – 3 на рис. 1). Установлено, что при $T < 15 \cdot 10^6 \text{ K}$ в основном реализуется вариант 1, при $15 \cdot 10^6 < T < 25 \cdot 10^6 \text{ K}$ – вариант 2, а при $T > 25 \cdot 10^6 \text{ K}$ – вариант 3 (см. [1]). Последовательность в углеродно-азотном цикле показана на рис. 2.

Какой бы из циклов ни осуществлялся, конечный итог один: четыре протона превращаются в ядро гелия-4. При этом неизбежно образуются два нейтрино и гамма-кванты, а также два позитрона, которые впоследствии, соединяясь с электронами, тоже дают гамма-излучение. При образовании одного ядра гелия-4 из четырех протонов выделяется энергия 26,7 МэВ, равная разности энергии четырех протонов и энергии ядра ${}^4\text{He}$. Эта энергия уносится электромагнитным излучением и нейтрино.

В рассмотренных выше ядерных реакциях возникают гамма-кванты, которые распространяются

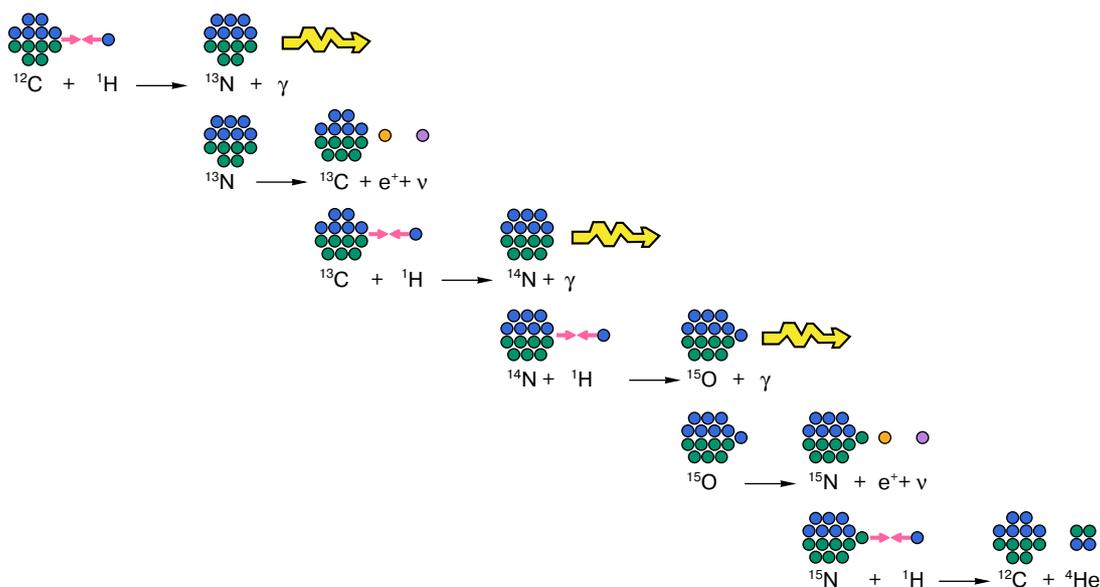


Рис. 2. Углеродно-азотный цикл.

в солнечном веществе по всем направлениям. На своем пути они взаимодействуют с атомами среды, ионами и электронами. В среднем такое взаимодействие имеет место на пути в 1 см, в то время как радиус Солнца составляет $7 \cdot 10^{10}$ см. При каждом столкновении фотоны гибнут, порождая новые. В результате энергия фотонов постепенно уменьшается. Проходят сотни тысяч лет, прежде чем “дальним родственникам” рожденных в недрах Солнца гамма-квантов удастся выбраться наружу. Но, к сожалению, они мало чем похожи на своих “предков”: в ядерных реакциях рождаются гамма- и рентгеновские кванты, а выходят из Солнца фотоны оптического и ультрафиолетового диапазона. Это излучение никак не отражает свойств среды, в которой первоначально возникли кванты.

Иное дело – нейтрино. Для того чтобы покинуть Солнце, им нужно всего ≈ 2 с. Важно и то, что, пройдя сквозь огромную толщу солнечного вещества, нейтрино сохраняют всю ту информацию, какую они получили в термоядерных реакциях. Даже ночью солнечные нейтрино приходят к нам, проходя через толщу Земли, совершенно не замечая ее существования.

Как уже отмечалось, каждую секунду в недрах Солнца сгорает $3,6 \cdot 10^{38}$ протонов. Поскольку при превращении четырех протонов в ядро гелия-4 рождаются два нейтрино, в недрах Солнца должны каждую секунду генерироваться $1,8 \cdot 10^{38}$ нейтрино. Если теперь эту величину разделить на $4\pi R^2$, где $R = 150 \cdot 10^6$ км – расстояние от Земли до Солнца, то получим величину полного потока нейтрино на Земле – $6,6 \cdot 10^{10}$ нейтрино на 1 см^2 в 1 с. Существенно отметить, что полный поток солнечных нейтрино слабо зависит от конкретных физических условий, реализуемых в глубоких недрах нашего светила. В то же время потоки отдельных групп нейтрино сильно зависят от состояния вещества в центральной части Солнца. Так, например, при изменении температуры от $12 \cdot 10^6$ до $14 \cdot 10^6$ К поток нейтрино, возникающих от распада ^8B , меняется более чем в 15 раз, а поток нейтрино углеродно-азотного цикла – более чем в 10 раз. Это обстоятельство является исключительно важным, так как по мере удаления от центра Солнца скорость генерации нейтрино при распадах ^8B , ^{15}N и ^{15}O падает настолько сильно, что их можно не учитывать. Таким образом, измерение даже одного потока нейтрино от распада ^8B позволяет судить о температуре в центральной области Солнца.

В табл. 1 представлены результаты вычислений [2] вероятностей различных реакций p–p- и C–N-циклов в недрах Солнца и теоретические значения потоков нейтрино в окрестности Земли в рамках современной модели эволюции Солнца.

Согласно последним представлениям, горение водорода в недрах Солнца осуществляется в основном (98,4 %) через протон-протонный цикл и только 1,6% – через углеродно-азотный цикл. Расчет-

Таблица 1. Теоретические значения потоков I различных групп нейтрино на Земле и скорости ξ реакции $^{37}\text{Cl}(\nu, e^-)^{37}\text{Ar}$, $\xi = I\sigma$, σ – сечение реакции (см^2)

Тип нейтрино	Поток I , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Скорость реакции $^{37}\text{Cl}(\nu, e^-)^{37}\text{Ar}$, СЕН
pp	$6,00 \cdot 10^{10}$	0
pep	$1,43 \cdot 10^8$	0,23
^7Be	$4,89 \cdot 10^9$	1,17
^8B	$5,69 \cdot 10^6$	6,20
^{13}N	$4,92 \cdot 10^8$	0,10
^{15}O	$4,26 \cdot 10^8$	0,30

Примечание. Полная скорость реакции $^{37}\text{Cl}(\nu, e^-)^{37}\text{Ar}$ равна $8,0 \pm 0,1$. Принятая единица измерения скорости реакции 1 СЕН (солнечная единица нейтрино), равная 10^{-36} с^{-1} . Размерность $[\xi] = \text{с}^{-1}$.

ное значение температуры в центре составляет $15,6 \cdot 10^6$ К, а плотность – 148 г/см^3 . Энергетические спектры нейтрино представлены на рис. 3. Рис. 4 показывает скорость генерации различных групп нейтрино в зависимости от расстояния до центра Солнца. Видно, что нейтрино разных групп отличаются характером спектра, средней энергией, потоком и эффективной областью их генерации. Область генерации термоядерной энергии практически совпадает с областью генерации p–p-нейтрино. Скорость генерации ^8B -нейтрино очень сильно зависит от температуры, поэтому поток таких нейтрино является мерилем температуры в центре Солнца. Наиболее растянутой по радиусу является область генерации нейтрино в результате реакции: $^3\text{He} + \text{p} \rightarrow ^4\text{He} + e^+ + \nu_e$ (так называемое hep-нейтрино). Две особенности являются характерными для этой группы нейтрино. Во-первых, поток этих нейтрино является индикатором концентрации гелия-3, очень хорошего термоядерного горючего. Во-вторых,

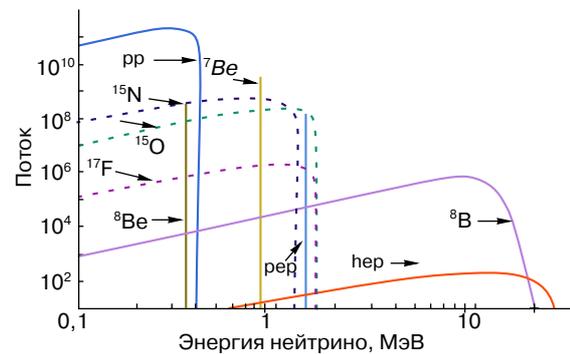


Рис. 3. Энергетический спектр солнечных нейтрино. Для нейтрино с непрерывным энергетическим спектром приведено число нейтрино на $1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{МэВ}^{-1}$ на 1 а.е., для монолинии – нейтрино на $1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

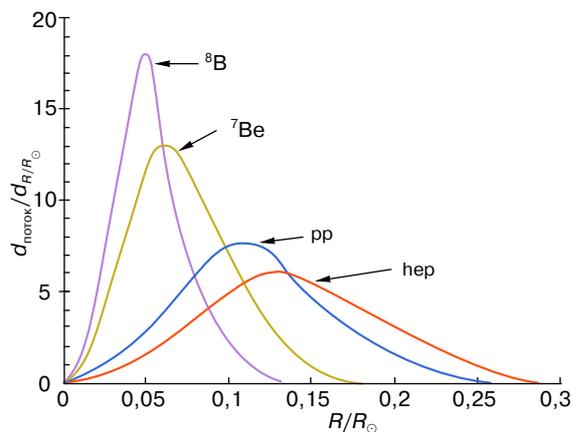


Рис. 4. Доля нейтрино, генерированных на различных расстояниях от центра Солнца, R – расстояние от центра, R_{\odot} – радиус Солнца.

энергетический спектр нейтрино простирается до высоких энергий: максимальная энергия составляет 18,77 МэВ. Такая особенность открывает уникальную возможность регистрации нейтрино этой группы. Не исключена возможность того, что горение гелия-3 в недрах Солнца является важным источником энергии.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО

Огромная проникающая способность нейтрино, с одной стороны, приводит к тому, что благодаря ей можно заглянуть в недра Солнца, с другой – делает проблему регистрации исключительно тяжелой. Теория предсказывает переход нейтронов в протон и электрон под действием нейтрино ($\nu_e + n \rightarrow p + e^-$). Поскольку нейтрон в свободном состоянии нестабилен, то создание мишени из необходимого количества нейтронов не представляется возможным. Поэтому можно использовать лишь нейтроны, находящиеся в связанном состоянии, то есть мишенью могут послужить различные ядра, состоящие, как известно, из нейтронов и протонов. Поскольку вероятность взаимодействия нейтрино с веществом мала, необходимое для эксперимента количество вещества мишени достигает десятков и сотен тонн. При этом за период наблюдений (месяцы) только незначительное количество нейтрино может вызвать ядерную реакцию. Так, например, в сотнях тонн хлорсодержащего вещества за месяц могут застрять только десятки солнечных нейтрино.

Трудность эксперимента по детектированию солнечных нейтрино обусловлена не только необходимостью использования большого количества вещества, но и сложностью регистрации продуктов реакции. Экспериментатор должен в сотнях тонн вещества мишени заметить всего лишь десятки частиц, появившихся в результате реакции. Это подоб-

но поиску иголки в стоге сена. Но если иголка магнитная, то проблема нахождения иголки не так уж и сложна. Следовательно, физикам для регистрации нейтрино необходимо было подобрать такой “магнит”. И это удалось сделать.

20 ноября 1946 года Б. Понтекорво (тогда он работал в Канаде) прочитал своим коллегам по лаборатории Чок-Ривер лекцию, в которой были заложены основы хлор-аргонного метода регистрации нейтрино. Идея метода проста и красива, она заключается в использовании реакции



Уникальные особенности этой реакции и определили ее приоритет. В чем они заключаются? Порог реакции относительно низкий (0,814 МэВ), то есть, за исключением р–р-нейтрино, все другие группы способны превратить ^{37}Cl в ^{37}Ar . Используется жидкий детектор – перхлорэтилен C_2Cl_4 , относительно дешевое вещество (обычная жидкость для химической чистки одежды).

Принципиально важным является то, что ^{37}Ar – благородный газ, он не вступает в химические реакции, поэтому образующиеся атомы ^{37}Ar не прилипают ни к молекулам C_2Cl_4 , ни к примесным молекулам, содержащимся в перхлорэтилене. Химические методы извлечения десятков атомов благородных газов из жидкости хорошо разработаны. ^{37}Ar радиоактивен, захватывает один из атомарных электронов с K - или L -оболочки и опять превращается в хлор. На освободившиеся вакансии в оболочках падают электроны с удаленных оболочек. Разность энергий связи оболочек в атоме идет либо на испускание рентгеновского излучения, либо на выброс одного из электронов внутренних оболочек атома. Такой электрон называется оже-электроном в честь ученого (Auger), открывшего этот эффект. Путем регистрации рентгеновского излучения и оже-электронов и проводится счет атомов ^{37}Ar . Энергия, излученная в виде рентгеновского излучения или оже-электронов, мала – 280 эВ, что хватает для создания всего десяти пар электронов и ионов в газе. Задача регистрации таких редких событий в области низкой энергии очень сложна. Однако в начале 60-х годов эту проблему успешно решили в России и США. Были разработаны низкофоновые установки на основе миниатюрных пропорциональных счетчиков, обеспечивающих детектирование нескольких штук атомов ^{37}Ar .

Таким образом, идея нейтринного эксперимента заключается в следующем. Глубоко под землей (что необходимо для уменьшения фона космических лучей) в течение нескольких месяцев экспонируются предварительно очищенные от примеси воздушного аргона и загрязнений, создающих фон, несколько сот тонн C_2Cl_4 . Затем вся система продувается гелием, проводится отделение аргона от гелия и, наконец, производится счет нескольких десятков атомов

^{37}Ar . Количество образовавшихся атомов ^{37}Ar и позволяет вычислить поток солнечных нейтрино.

Реакция $^{37}\text{Cl}(\nu, e^-)^{37}\text{Ar}$ может происходить в том случае, если энергия нейтрино больше 0,81 МэВ. Это означает, что наиболее интенсивная группа солнечных нейтрино (рис. 3 и табл. 1) — р-р-нейтрино — не может быть зарегистрирована в хлорном детекторе.

Первый эксперимент по регистрации солнечных нейтрино с детектором из C_2Cl_4 массой в 600 т был завершен во второй половине 1967 года. $380 \cdot 10^3$ литров C_2Cl_4 (такого количества жидкости достаточно, чтобы заполнить Олимпийский плавательный бассейн) экспонировались в течение нескольких месяцев в старой шахте, где когда-то добывали золото, на глубине 1,5 км под землей, что эквивалентно экранировке слоем воды толщиной около 4,5 км. Эксперимент был подготовлен под руководством Р. Дэвиса (Брукхейвенская национальная лаборатория, США). За прошедшие почти три десятилетия Р. Дэвис с сотрудниками выполнил более ста циклов измерений и установил следующие закономерности.

1. Средняя скорость реакции $\xi_s = 2,28 \pm 0,23$, что значительно ниже предсказания теории.

2. Имеется убедительное свидетельство того, что скорость реакции меняется в зависимости от солнечной активности: с ростом активности она уменьшается и наоборот.

Эти результаты вызвали значительный интерес (опубликовано несколько сот статей). Известно, что поток нейтрино от распада ^8B очень сильно зависит от температуры в центре Солнца. Согласно [2], зависимость различных групп нейтрино от центральной температуры следующая:

$$I(\text{pp}) \propto T_{\text{п}}^{-1,2}, \quad I(^7\text{Be}) \propto T_{\text{п}}^8, \quad I(^8\text{B}) \propto T_{\text{п}}^{18}.$$

Поэтому измерение потока ^8B нейтрино может дать самую точную величину температуры в центре Солнца. Приведенное выше экспериментальное значение ξ_s означает, что истинная температура в центре Солнца чуть-чуть меньше значения, полученного в теоретических моделях.

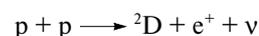
Более сложной является проблема вариации потока нейтрино от распада ^8B в течение времени. Гипотез предложено много. Представляется, что для окончательного вывода, во-первых, крайне важно иметь экспериментальные данные хотя бы за 3 — 4 цикла солнечной активности. Во-вторых, в настоящее время уже удается непосредственно детектировать нейтрино от распада ^8B в прямом эксперименте по рассеянию нейтрино на электроны (эксперимент Камиоканде). Показано, что результаты двух различных экспериментов, выполненных за один и тот же интервал времени (1987 — 1990 годы), согласуются друг с другом. Поскольку в эксперименте Камиоканде детектируются только нейтрино от распада ^8B , а в эксперименте с ^{37}Cl — в основном нейтрино ^8B , полученное согласие свидетельствует о том, что

действительно поток ^8B -нейтрино меньше предсказанного теорией значения.

В эксперименте Камиоканде впервые экспериментально было показано, что нейтрино идут именно от Солнца. Было даже показано, что характер энергетического спектра нейтрино согласуется с предсказаниями теории. Без сомнения, этот эксперимент можно считать эпохальным. Возможности нового эксперимента значительно шире с точки зрения как установления энергетического спектра нейтрино, так и значительного улучшения достоверности определения направления движения нейтрино.

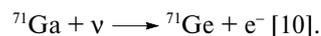
ГАЛЛИЕВЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Согласно теоретическим представлениям, горючим в недрах звезд, подобных Солнцу, является водород. Первая реакция протон-протонного цикла



является самой медленной среди всех реакций цикла, поэтому скорость термоядерного выделения энергии определяется именно этой реакцией. Ясно, что для однозначного ответа на вопрос, является ли водород горючим в недрах Солнца или нет, требуется детектирование именно нейтрино от основополагающей первой реакции протон-протонного цикла. В этой реакции генерируются нейтрино с непрерывным спектром от нуля до 420 кэВ, поэтому нужны детектор с низким порогом и выполнение следующих условий: большая масса детектора, радиоактивность ядра — продукта реакции, возможность счета небольшого числа атомов. Разумеется, как и в случае с хлорным детектором, надо уметь из большой массы вещества выделить десятки атомов, облученных нейтринным излучением.

Руководствуясь основополагающей идеей Б. Понтекорво, В.А. Кузьмин тщательно рассмотрел все возможности и в 1965 году предложил реакцию



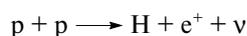
Порог этой реакции 230 кэВ, то есть почти в два раза меньше максимальной энергии спектра нейтрино. Продуктом является ^{71}Ge , который должен быть выделен из большой массы гелиевого детектора. Проблема нелегкая, но она уже решена: атомы германия удается выделить химическим методом. ^{71}Ge радиоактивный с периодом полураспада 11,4 дня. Он переводится в GeH_4 , и измеряется число атомов пропорциональным счетчиком, то есть вся идеология сохранена такой, как ее предложил Б. Понтекорво 50 лет назад.

В настоящее время функционируют в мире две крупные установки: русско-американская (с общей массой галлия в 60 т), расположенная в специальной низкофоновой лаборатории на Северном Кавказе на глубине 4700 м водного эквивалента (фоновое излучение на которой такое же, как если бы детектор находился на глубине 4700 м под водой), и

подземная лаборатория Гран-Сассо (Италия) на глубине 3300 м водного эквивалента, где проводят совместные эксперименты физики стран Западной Европы и США. Масса галлия в последней установке составляет 30 т. Обе установки функционируют около пяти лет. Были неожиданности и сенсационные результаты. В настоящее время обе установки дают практически один и тот же результат. Средняя по двум установкам скорость реакции



составляет 77 ± 10 СЕН (солнечных единиц нейтрино), что значительно ниже предсказания теории (132 ± 7 СЕН). Существенно отметить, что вклад первой реакции р–р-цикла



вместе с сопутствующей



согласно теории, составляет 74 ± 1 СЕН. Таким образом, на долю нейтрино от реакций, связанных с ${}^7\text{Be}$ -, ${}^8\text{B}$ - и CNO-циклами остается 3 ± 10 СЕН вместо 55 СЕН. Это оказалось очередным сюрпризом, преподнесенным экспериментом. С одной стороны, экспериментально подтверждено, что горючим является водород, однако как в экспериментах с хлорным детектором, так и в прямой регистрации нейтрино (Камиоканде) имеется дефицит. Получилась новая нейтринная загадка, и на первый план выдвигается эксперимент по регистрации нейтрино от реакции



Более четверти века назад Б. Понтекорво сформулировал очень смелую, далеко не стандартную идею (автору этой работы посчастливилось быть на совещании, где впервые была сформулирована эта “невероятная” идея). Он предположил, что нейтрино может иметь массу (пусть очень даже малую). Тогда на пути между Солнцем и Землей происходят специфические превращения нейтрино, различные типы нейтрино самопроизвольно могут переходить из одного состояния в другое. В настоящее время в ряде стран ведутся эксперименты по определению массы покоя нейтрино. Независимо от того, каков будет окончательный ответ, идея Б. Понтекорво была и будет эпохальной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочаров Г.Е. // Докл. АН СССР. 1964. Т. 156. № 4. С. 781.
2. Бокал Дж. Нейтринная астрофизика. М.: Мир, 1993.
3. Кузьмин В.А. // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1965. № 496. С. 1532.

* * *

Грант Егорович Кочаров, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой космических исследований Санкт-Петербургского государственного университета, научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской Академии наук. Область научных интересов: нейтринная астрофизика, физика Солнца, астрофизика космических лучей, палеоастрофизика.