

## PROBLEMS OF SOLAR NEUTRINOS

S. S. GERSHTEIN

*The thermonuclear reactions, which are the source of the Sun energy, are discussed as well as the direct experimental confirmation of the thermonuclear origin of the solar energy, which has been obtained by the detection of the neutrino flux on the Earth. It is pointed out that the deficit of the solar neutrino flux provides a possible justification in favour of the transformation, which the neutrinos themselves are subjected.*

Рассматриваются термоядерные реакции, являющиеся источником энергии Солнца. Приведены сведения о прямом экспериментальном доказательстве термоядерного происхождения солнечной энергии, полученном путем регистрации на Земле потока нейтрино от Солнца. Указано, что обнаруженный при этом дефицит в потоке солнечных нейтрино, возможно, свидетельствует о превращениях, которые испытывают сами нейтрино.

## ЗАГАДКИ СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО

С. С. ГЕРШТЕЙН

Московский физико-технический институт,  
Долгопрудный Московской обл.

### ОТКУДА БЕРЕТСЯ ЭНЕРГИЯ СОЛНЦА И ЗВЕЗД

**Что было бы с Солнцем, если бы не существовало внутреннего источника его энергии**

Наше Солнце, источник жизни на Земле, испускает каждую секунду энергию  $L_{\odot} = 4 \cdot 10^{33}$  эрг/с. Величина  $L_{\odot}$  называется светимостью Солнца. Она определена путем измерения солнечной постоянной  $q$  (энергии солнечных лучей, падающих на границу атмосферы Земли) и по расстоянию от Земли до Солнца ( $R \approx 150 \cdot 10^6$  км):

$$q = \frac{L_{\odot}}{4\pi R^2} = 8,533 \text{ МэВ}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}) \approx 2 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин}),$$

$$1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ эрг.} \quad (1)$$

Откуда берется энергия, испускаемая Солнцем, и надолго ли ее хватит? Поскольку Солнце — раскаленный газовый шар, большинство людей думают, что Солнце светит за счет содержащейся в нем тепловой энергии и с течением времени должно остывать. Однако, если бы Солнце не имело внутренних источников энергии, оно должно было бы не остывать, а нагреваться! Понять это можно на примере искусственного спутника Земли, который, теряя энергию на преодоление сопротивления остатков атмосферы, переходит на более низкие орбиты, где скорость его становится больше первоначальной. Дело в том, что полная энергия спутника складывается из кинетической энергии и потенциальной энергии притяжения к Земле. Потенциальная энергия отрицательна и по абсолютной величине вдвое превышает кинетическую, так что полная энергия тоже отрицательна, а по абсолютной величине равна кинетической. Поэтому уменьшение полной энергии (то есть рост ее абсолютной величины) приводит к росту кинетической. Такое же соотношение существует между суммарной кинетической энергией частиц Солнца (то есть его тепловой энергией) и потенциальной энергией сил гравитации, удерживающей его частицы. Поэтому Солнце при отсутствии внутренних источников энергии, испуская тепло, должно было бы нагреваться за счет работы сил гравитации, сжимающих его. Гравитационная энергия Солнца  $E \approx -\gamma M_{\odot}^2 / R_{\odot}$ , где  $M_{\odot} \approx 2 \times 10^{33}$  г — масса Солнца,  $R_{\odot} \approx 0,7 \cdot 10^6$  км — его радиус, а  $\gamma \approx 6,67 \cdot 10^{-8}$  см<sup>3</sup>/(г · с<sup>2</sup>) — гравитационная постоянная. Энергия, испущенная Солнцем за время  $\Delta t$ ,

$$L_{\odot} \Delta t = -\Delta E = -\frac{\gamma M_{\odot}^2 \Delta R_{\odot}}{R_{\odot}},$$

где  $\Delta R_{\odot}$  — изменение радиуса Солнца. Поэтому при современной светимости Солнца оно при отсутствии внутренних источников энергии должно существенно сжаться за время  $\Delta t < \gamma M_{\odot}^2 / (R_{\odot} L_{\odot}) \approx 30 \cdot 10^6$  лет. Между тем совокупность различных данных приводит к выводу, что возраст Солнечной системы составляет 4,6 млрд лет и за это время светимость Солнца существенно не изменялась. Это означает, что должен существовать какой-то внутренний источник энергии Солнца.

### Поиск источников внутренней энергии Солнца

Такой источник был указан английским астрофизиком А. Эдингтоном, который заметил, что масса ядра  ${}^4\text{He}$  меньше, чем сумма масс четырех протонов и двух электронов, и поэтому их слияние в ядро гелия должно сопровождаться, согласно формуле А. Эйнштейна, выделением энергии  $\Delta E = (4m_p + 2m_e - m_{{}^4\text{He}})c^2 \approx 26$  МэВ. (В то время считалось, что ядра состоят из протонов и электронов.) Для поддержания светимости Солнца требуется, чтобы за секунду происходило  $N = L_{\odot} / \Delta E \approx 10^{38} \text{ с}^{-1}$  реакций синтеза, то есть сгорало бы  $M \approx 4m_p N \approx 6 \cdot 10^6 \text{ т/с}$  водорода ( $m_p \approx 1,6 \cdot 10^{-24} \text{ г}$  — масса протона). Отсюда, учитывая, что Солнце на 3/4 состоит из водорода, можно заключить, что даже одной десятой его хватает на 10 млрд лет.

Современники, однако, скептически отнеслись к гипотезе Эдингтона. По законам классической механики для сближения протонов на расстояние порядка радиуса действия ядерных сил  $r_0$  необходимо преодолеть силы кулоновского отталкивания. Для этого их энергия должна превышать величину кулоновского барьера  $U_0 = e^2 / r_0$  ( $e = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE}$  — заряд протона). При  $r_0 = 3 \cdot 10^{-13} \text{ см}$  величина  $U_0 \approx 0,5 \text{ МэВ}$  и температура, при которой средняя энергия теплового движения ( $kT$ ) сравнивается с ней, составляет около 5 млрд градусов ( $k = 1,38 \times 10^{-16} \text{ эрг/град}$  — постоянная Больцмана). Между тем температура в центре Солнца примерно в 300 раз меньше<sup>1</sup>. Таким образом, Солнце казалось недостаточно горячим для того, чтобы в нем был возможен синтез гелия.

Гипотезу Эдингтона спасла квантовая механика. В 1928 году молодой советский физик Г.А. Гамов об-

наружил, что согласно ее законам частицы могут с некоторой вероятностью просачиваться через потенциальный барьер даже в том случае, когда их энергия ниже его высоты. Это явление получило название подбарьерного или туннельного перехода. (Последнее образно указывает на возможность очутиться по другую сторону горы, не взбираясь на ее вершину.) С помощью туннельных переходов Гамов объяснил законы радиоактивного  $\alpha$ -распада и тем самым впервые доказал применимость квантовой механики к ядерным процессам (почти в то же время туннельные переходы были открыты Р. Генри и Э. Кондоном). Гамов обратил также внимание на то, что благодаря туннельным переходам сталкивающиеся ядра могут вплотную сблизиться друг с другом и вступить в ядерную реакцию при энергиях, меньших величины кулоновского барьера. Это побудило австрийского физика Ф. Хоутерманса (которому Гамов рассказал о своих работах еще до их публикации) и астронома Р. Аткинсона вернуться к идее Эдингтона о ядерном происхождении солнечной энергии.

### Углеродно-азотно-кислородный цикл Г. Бете (CNO-цикл)

Одновременное столкновение четырех протонов и двух электронов с образованием ядра гелия представляет собой крайне маловероятный процесс. В 1939 году Г. Бете удалось найти цепочку (цикл) ядерных реакций, приводящих к синтезу гелия (рис. 1). К тому времени уже было известно, что атомные ядра состоят из протонов и нейтронов, а процессы  $\beta^-$ - и  $\beta^+$ -распадов сводятся к превращениям в ядрах:



Индекс  $e$  у символа нейтрино поставлен потому, что сейчас известны три типа нейтрино: электронное, мюонное и тау. Электронное нейтрино  $\nu_e$  рождается вместе с позитроном, а антинейтрино  $\bar{\nu}_e$  — вместе с электроном. Катализатором синтеза гелия в цикле Бете выступают ядра углерода  ${}^{12}\text{C}$ , количество которых остается неизменным. Если учесть, что образующиеся в процессах  $\beta^+$ -распада ядер  ${}^{13}\text{C}$  и  ${}^{13}\text{O}$  позитроны аннигилируют затем с окружающими электронами, то результатом CNO-цикла будет реакция



(нейтрино уносит при этом менее 10% энергии реакции синтеза).

### Протон-протонная цепочка

При солнечных температурах основную роль, как выяснилось, должна играть протон-протонная цепочка реакций (рис. 2) (CNO-цикл существует для

<sup>1</sup> Ее можно легко оценить. Представим Солнце состоящим из двух половинок. Сила притяжения между ними по порядку величины будет  $\gamma M_{\odot}^2 / R^2$ , а давление гравитации  $P = \gamma M_{\odot}^2 / R^4 \approx \gamma M_{\odot} \bar{\rho} / R_{\odot}$  (где  $\bar{\rho} = M_{\odot} / R_{\odot}^3$  — средняя плотность, численные множители порядка единицы опускаем). В стационарном состоянии давление гравитации должно уравновешиваться давлением газа:  $P = \rho kT / m_p$ , то есть при температурах  $T \approx \gamma M_{\odot} m_p / (R_{\odot} k) \approx 10^7 \text{ К}$ . (Современные точные расчеты дают  $T \approx (1,5-1,6) \cdot 10^7 \text{ К}$ .)

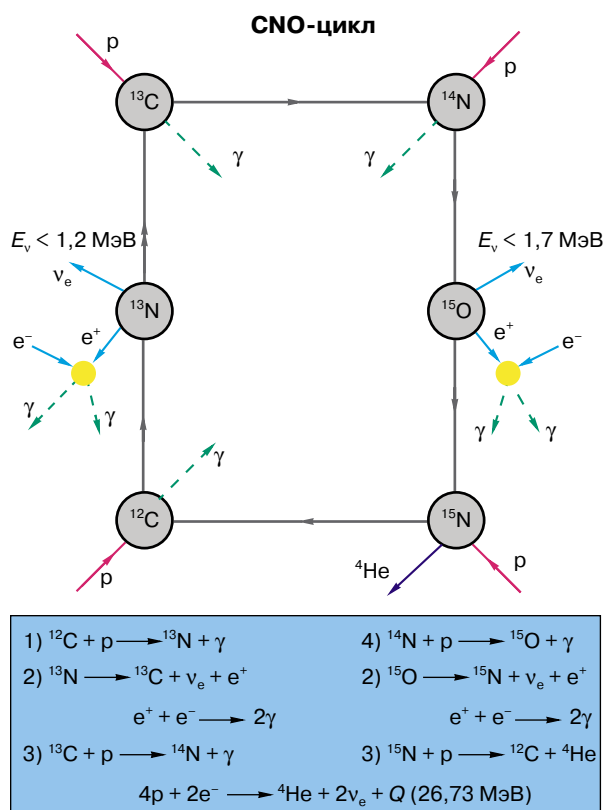


Рис. 1

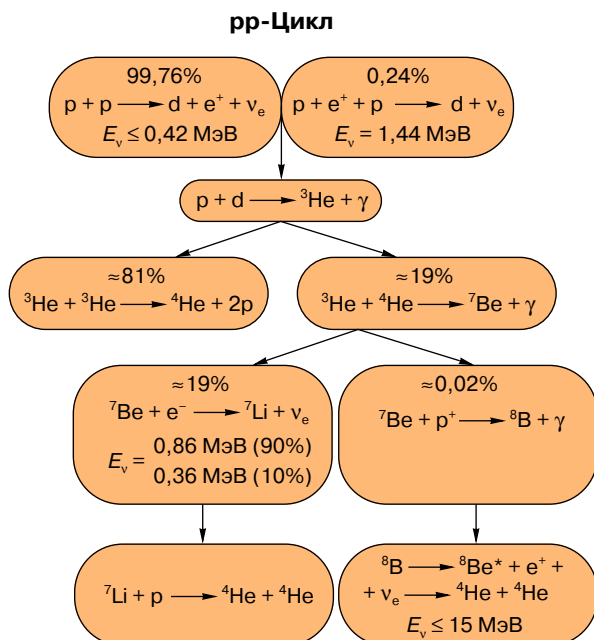


Рис. 2

звезд с большей температурой). Наиболее медленными в этой цепочке являются реакция

$$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e \quad (E_{\nu_e} < 0,4 \text{ МэВ}) \quad (3)$$

с образованием ядра дейтерия (d) и аналогичная ей реакция тройного столкновения:

$$p + p + e^- \rightarrow d + \nu_e \quad (E_{\nu_e} = 1,4 \text{ МэВ}). \quad (4)$$

Характерное время для протекания этих реакций составляет около 1 млрд лет. Это связано с тем, что они идут благодаря так называемому слабому взаимодействию<sup>1</sup>: один из протонов, сблизившись с другим, испытывает  $\beta^+$ -распад  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$  и образовавшийся нейтрон объединяется с остающимся протоном в ядро дейтерия. Затем практически мгновенно (за время порядка  $10^{-8}$  с) ядро дейтерия вступает в реакцию

$$d + p \rightarrow ^3\text{He} + \gamma. \quad (5)$$

После образования  $^3\text{He}$  цепочка ядерных реакций, ведущих к синтезу  $^4\text{He}$ , разветвляется на несколько путей. Первый из них заключается в столкновении двух ядер  $^3\text{He}$ , образующихся в реакции (5):

$$^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + p + p. \quad (6)$$

Таким путем осуществляется  $\approx 81\%$  реакций синтеза. Существует, однако, и другая возможность. Ядра  $^3\text{He}$  могут вступать в реакцию с ядрами  $^4\text{He}$  (которых много в окружающем веществе). В результате возникают ядра  $^7\text{Be}$ :

$$^3\text{He} + ^4\text{He} \rightarrow ^7\text{Be} + \gamma. \quad (7)$$

Подавляющее большинство из них захватывает окружающие электроны в реакции

$$e^- + ^7\text{Be} \rightarrow ^7\text{Li} + \nu_e \quad (E_{\nu_e} = 0,862 \text{ МэВ}), \quad (8)$$

а образующиеся ядра  $^7\text{Li}$  путем реакции  $^7\text{Li} + p \rightarrow ^4\text{He} + ^4\text{He}$  осуществляют конечный этап синтеза. Вместе с тем незначительная доля ядер  $^7\text{Be}$  посредством реакции

$$^7\text{Be} + p \rightarrow ^8\text{B} + \gamma \quad (9)$$

образует ядра бора  $^8\text{B}$ , которые в результате  $\beta^+$ -распада переходят в возбужденные ядра  $^8\text{Be}^*$ , разваливающиеся на две  $\alpha$ -частицы:

$$^8\text{B} \rightarrow ^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e \quad (E_{\nu_e} < 15 \text{ МэВ}), \quad (10)$$

$$^8\text{Be}^* \rightarrow ^4\text{He} + ^4\text{He}.$$

Таким путем оканчивается лишь 0,02% реакций синтеза, но этот путь очень важен. Он приводит к испусканию нейтрино сравнительно больших энергий, которые и удалось впервые зарегистрировать.

<sup>1</sup> См. статью И.Л. Бухбиндера "Фундаментальные взаимодействия" (Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 66–73).

## Можно ли заглянуть в центр Солнца

Термоядерное происхождение энергии Солнца и звезд позволило объяснить многие закономерности, замеченные в мире звезд, указать, как происходят эволюция звезд и образование различных химических элементов, понять в общих чертах причины таких грандиозных явлений, как взрывы сверхновых звезд. Предсказывается и судьба Солнца. За 4,6 млрд лет значительная доля водорода в центре Солнца уже сгорела в термоядерных реакциях. Оставшегося должно хватить на 2–3 млрд лет, после чего Солнце начнет сжиматься и при этом нагреваться (как отмечено в начале статьи). Неизбежно наступит момент, когда температура станет достаточной для загорания гелия. Три ядра гелия с выделением энергии будут объединяться в ядро углерода  $^{12}\text{C}$ . Температура при этом будет столь велика, что под действием светового давления раздуется внешняя оболочка Солнца, превращая его в красный гигант. Центральное же ядро Солнца станет белым карликом (то есть звездой малых размеров с огромной плотностью и высокой температурой). Чтобы экспериментально проверить всю картину термоядерных процессов внутри Солнца, надо заглянуть в его центр. Такую возможность дают нейтрино. Благодаря своей колоссальной проникающей способности они могут свободно проходить через солнечные недра, а их потоки и спектр энергии — доносить на Землю информацию о реакциях, в которых они возникают. Общее число испускаемых нейтрино можно оценить исходя из светимости Солнца. Поскольку в реакции (2) испускаются два нейтрино (каким бы путем эта реакция ни проходила), число излучаемых Солнцем нейтрино получается умножением на два общего числа реакций  $N \approx 10^{38}$  1/с, а их поток на Землю — делением его на  $4\pi R^2$  (где  $R$  — расстояние Земли от Солнца):

$$\Phi_\nu = \frac{2L_\odot}{4\pi R^2(\Delta E)} = \frac{2q_\odot}{(\Delta E)} \approx 0,6 \cdot 10^{11} \text{ в}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}). \quad (11)$$

Как же зарегистрировать на Земле поток солнечных нейтрино?

## КАК РЕГИСТРИРУЮТ СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО

Нейтрино регистрируют с помощью реакций, которые они инициируют. Во-первых, нейтрино, если они обладают достаточной энергией, могут вызвать превращение одного из нейтронов атомного ядра в протон с испусканием электрона:



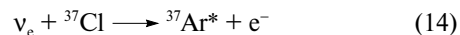
Во-вторых, нейтрино (любого типа, не только электронные) могут благодаря так называемому слабому взаимодействию с нейтральными токами (переносимому  $Z^0$ -бозонами) возбуждать ядерные переходы с последующим испусканием  $\gamma$ -кванта. В-третьих, нейтрино, сталкиваясь с электронами, могут передавать им значительную долю своей энергии:



Для электронных нейтрино процесс (13) происходит как за счет нейтральных, так и заряженных токов (вызывающих  $\beta$ -распад). Для мюонного и тау-нейтрино реакция (13) происходит исключительно за счет нейтральных токов и вероятность ее меньше, чем для электронного.

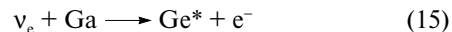
Существуют несколько способов использования указанных реакций для детектирования солнечных нейтрино.

**Радиохимический метод** предложен Б. Понтекорво в 1946 году. Измеряется количество радиоактивных ядер, возникающих в результате реакции (12) на нейтронах, входящих в состав ядер мишени. Наиболее подробно Б. Понтекорво (и независимо Л. Алварес) рассмотрел хлор-аргонный метод, когда в реакции



образуются радиоактивные ядра  ${}^{37}\text{Ar}^*$ . Этот метод имеет большие технологические достоинства, позволяющие извлекать из огромной массы жидкости (в состав которой входит хлор) отдельные атомы радиоактивного аргона. Для реакции (14) энергия нейтрино должна превышать 0,814 МэВ. Поэтому с помощью хлор-аргонного метода можно в основном зарегистрировать так называемые борные нейтрино от реакции (10). Частично регистрируются также бериллиевые нейтрино от реакции (8), ренейтрино от реакции (4), а также нейтрино СНО-цикла (табл. 2). Опыты по регистрации солнечных нейтрино хлор-аргоном методом проводятся с 1962 года группой Дэвиса в подземной лаборатории Хоум-Стэйк (США). Используемая мишень содержит 600 т жидкости (перхлорэтилена  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ ). В Баксанской нейтринной лаборатории в Приэльбрусье готовился хлор-аргонный эксперимент с мишенью в несколько раз большей (но его проведение пока задерживается).

Нейтрино низкой энергии от реакции (3), составляющие основную долю солнечных нейтрино, регистрируются с помощью галлий-германиевого способа, предложенного В.А. Кузьминым. В этом способе используется реакция



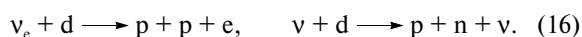
с образованием радиоактивных ядер германия, которые извлекаются из мишени и регистрируются радиохимическими методами. Для этой цели в Баксанской нейтринной лаборатории в совместном российско-американском эксперименте SAGE под руководством академика Г.Т. Зацепина используется мишень, содержащая 60 т галлия. Аналогичный эксперимент GALLEX проводится в подземной лаборатории Гран-Сассо (Италия) на 30 т галлия.

**Прямое детектирование солнечных нейтрино** было осуществлено в экспериментах KAMIOKANDE (Япония) при регистрации электронов отдачи в процессе (13). Мишенью служила обычная вода, в

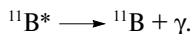
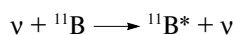
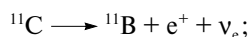
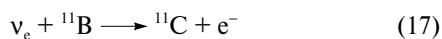


которой электроны отдачи (когда их скорость превышает скорость света в воде) испускают черенковское излучение, регистрируемое с помощью чувствительных фотоумножителей. Такой способ позволяет просматривать очень большой объем мишени. (Достаточно сказать, что в дальнейшем развитии этого эксперимента (SUPERKAMIOKANDE) используется цилиндрический бак высотой и диаметром около 40 м.) Так можно зафиксировать только наиболее энергичные (борные) нейтрино. Важнейшим качественным результатом эксперимента KAMIOKANDE явилось обнаружение того факта, что основная доля регистрируемых электронов летит в направлении от Солнца. Тем самым было непосредственно подтверждено, что регистрируемые события вызваны солнечными нейтрино.

В недалеком будущем должны вступить в строй новые гигантские установки по регистрации солнечных нейтрино. Одна из них, SNO в Канаде, использует в качестве мишени тяжелую воду ( $D_2O$ ) и будет регистрировать процессы



Другая, BOREX в лаборатории Гран-Сассо, использует изотоп бора  $^{11}B$  и способна регистрировать реакции



Важно, что в обеих установках будут регистрироваться одновременно процессы, вызываемые как заряженными, так и нейтральными токами. (В связи с этим в соответствующих процессах (16), (17) опущен индекс электронного нейтрино.)

Как же все-таки удастся детектировать солнечное нейтрино, если оно свободно проходит через Солнце? Произведем простейшие оценки. Пусть мишень для регистрации, скажем, борных нейтри-

но представляет куб со стороной 10 м. При средней длине свободного пробега борных нейтрино в  $10^{20}$  см вероятность реакции для отдельного нейтрино будет  $10^{-17}$ . Однако при потоке борных нейтрино  $6 \times 10^{10}$   $v/(cm^2 \cdot c)$  через грань куба проходит  $6 \cdot 10^{12}$   $v/c$ , так что вероятность одному из нейтрино вызвать реакцию (14) составит около  $6 \cdot 10^{-5}$  за 1 с, то есть можно ожидать несколько реакций за сутки. Такая редкость полезных событий требует защиты от посторонних фонов, какими являются космические лучи, естественная радиоактивность окружающих материалов и т.д. Поэтому нейтринные установки размещают глубоко под землей и часто снабжают активной защитой, исключающей события, вызванные заряженной компонентой космических лучей (в основном мюонами), а также нейтронами.

## ЗАГАДКА СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО

### Почему оказалось меньше борных нейтрино. Куда исчезли бериллиевые нейтрино

Регистрация на Земле четырьмя независимыми установками потока солнечных нейтрино, несомненно, подтвердила термоядерное происхождение солнечной энергии. Но результаты этих экспериментов поставили перед физикой новые проблемы. Как видно из табл. 1, число реакций, вызываемых солнечными нейтрино, оказалось в два-три раза меньше, чем следовало из расчетов, основанных на теоретических моделях Солнца и данных о вероятностях тех или иных каналов ядерных реакций. Какова же природа этих расхождений? Когда в распоряжении физиков были только данные хлор-аргонного эксперимента, большинство склонялись к мысли, что расхождение можно устранить подавив в несколько раз реакции, ведущие к испусканию борных нейтрино. Теоретически это можно сделать, например, уменьшив температуру в центре Солнца всего на 10%. Такое уменьшение температуры, согласно модели Солнца, могло быть связано с небольшим изменением концентрации тяжелых ядер

**Таблица 1.** Основные характеристики нейтринных экспериментов: метод и детектируемая реакция, минимальная (пороговая) энергия регистрации нейтрино, экспериментальные результаты (вместе со статистической и систематической ошибками) и предсказания теоретических расчетов на основе стандартной модели Солнца

| Эксперимент | Метод                                                             | $(E_\nu)_{\text{порог}}$ | Экспериментальные результаты* | Теоретические предсказания    |
|-------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Homestake   | Радиохимический $\nu_e + ^{37}Cl \longrightarrow ^{37}Ar^* + e^-$ | $>0,814$ МэВ             | $2,55 \pm 0,177 \pm 0,18$     | $9,3^{+1,2}_{-1,4}$           |
| KAMIOKANDE  | Электроника $\nu + e^- \longrightarrow \nu + e^-$                 | $>7$ МэВ                 | $2,73 \pm 0,17 \pm 0,34$      | $6,62(1,007^{+0,14}_{-0,17})$ |
| GALLEX      | Радиохимический $\nu_e + ^{71}Ga \longrightarrow ^{71}Ge^* + e^-$ | $>0,233$ МэВ             | $77,1 + 8,5^{+4,4}_{-5,4}$    | $137^{+8}_{-7}$               |
| SAGE        | Радиохимический $\nu_e + ^{71}Ga \longrightarrow ^{71}Ge^* + e^-$ | $>0,233$ МэВ             | $69 \pm 11^{+5}_{-7}$         | $137^{+8}_{-7}$               |

\* Данные радиохимических экспериментов приведены в солнечных единицах SNU. 1 SNU соответствует одной нейтринной реакции в секунду на  $10^{36}$  атомов мишени. Данные электронного эксперимента приводятся в единицах потока нейтрино  $10^6$   $1/(cm^2 \cdot c)$ .

(в основном углерода), влияющим на процессы переноса тепла из центральных областей Солнца.

Однако, когда были получены результаты с установки KAMIOKANDE, выяснилось, что их трудно согласовать с результатами хлор-аргонного эксперимента даже в рамках измененной модели Солнца. Дело в том, что в эксперименте KAMIOKANDE регистрируются только борные нейтрино, в то время как в хлор-аргонном эксперименте заметный вклад должны давать также бериллиевые нейтрино от реакции (8) (табл. 2). Если поток борных нейтрино определить из экспериментов KAMIOKANDE и вычесть его затем из данных хлор-аргонного эксперимента, то оказывается, что для бериллиевых нейтрино не остается места. Другими словами, при сопоставлении обоих экспериментов получается, что вклад бериллиевых нейтрино в процесс (14) подавлен значительно сильнее, чем борных. Но такого не может быть с теоретической точки зрения, так как, подавив реакцию (7) с образованием бериллия, мы неизбежно подавляем (по крайней мере в той же степени) реакцию с образованием бора. Ядра бериллия являются, образно говоря, родителями ядер бора (и борных нейтрино). Поэтому, убив родителей, нельзя не убить их будущих детей. Указанное обстоятельство справедливо для любой модели Солнца.

Нехватка бериллиевых и борных нейтрино особенно ярко проявилась в галлий-германиевых экспериментах. Основной поток нейтрино от pp-реакции должен по расчетам давать всего лишь около половины ожидаемых событий. Остальной вклад должны были бы вносить главным образом бериллиевые и борные нейтрино (см. табл. 2). В то же время эксперименты SAGE и GALLEX показывают, что выход реакции (15) лишь на немного превышает вклад одних только pp-нейтрино (см. табл. 1).

Таким образом, налицо противоречие между экспериментальными данными и стандартной моделью Солнца. Для его устранения предлагается много гипотез (мы не имеем возможности их здесь обсуждать). Необходимо, однако, подчеркнуть, что если в дальнейших опытах подтвердится более силь-

ное подавление потока бериллиевых нейтрино по сравнению с борными, то этот факт невозможно будет объяснить никаким изменением модели Солнца. Какой же может быть выход? Прежде чем обсуждать его, заметим, что во всех предыдущих рассуждениях мы предполагали, что с самими нейтрино на их пути от центра Солнца к Земле не происходит никаких изменений. А можем ли мы быть в этом уверены? Оказывается, нет. На возможность определенных превращений свободного нейтрино было указано еще до экспериментов с солнечными нейтрино.

### Нейтринные осцилляции. Эффект Михеева–Смирнова–Вольфенштейна (MSW)

В настоящее время известно, что существуют три типа нейтрино: электронное  $\nu_e$ , мюонное  $\nu_\mu$  и тау-нейтрино  $\nu_\tau$ , имеющие такое же лептонное число (лептонный заряд), как и лептон, которому они соответствуют, то есть электрон  $e^-$ , мюон  $\mu^-$  и тау-лептон  $\tau^-$ . Наряду с этим у каждого нейтрино существует двойник — антинейтрино, обладающее противоположным значением лептонного числа. Это означает, что при столкновении с ядрами электронное нейтрино может рождать только электрон  $e^-$ , а его антинейтрино — только позитрон  $e^+$ , мюонное нейтрино — соответственно мюон  $\mu^-$ , а его антинейтрино — антимюон  $\mu^+$  и т.д. Указанное правило хорошо выполняется на опыте. Именно эти опытные данные и послужили основой для введения особых лептонных чисел у нейтрино.

Насколько точным является закон сохранения лептонных чисел? Согласно современным теоретическим представлениям нет оснований ожидать, что закон сохранения лептонного числа (так же, как закон сохранения тяжелых частиц — барионов) должен быть точным, а не приближенным. В этом отношении лептонное число отличается от электрического заряда, сохранение которого должно быть абсолютно точным законом. Более того, современные модели великого объединения всех сил (слабых, сильных и электромагнитных) предсказывают возможность нарушения законов сохранения лептонных и барионных чисел. С нарушением барионного числа (нестабильностью протона), возможно, связана и наблюдаемая зарядовая асимметрия нашей Вселенной, то есть отсутствие в ней антивещества.

Несохранение лептонного числа может приводить к весьма своеобразному явлению — так называемым нейтринным осцилляциям. Оно заключается в том, что нейтрино какого-то определенного типа будет при своем движении в вакууме периодически переходить в нейтрино (или антинейтрино) других типов и обратно. По своему характеру нейтринные осцилляции аналогичны биениям, которые наблюдаются в системе двух одинаковых маятников, подвешенных на общем подвесе (через который осуществляется их связь). Если отклонить какой-либо из маятников, то его колебания через некоторое время

**Таблица 2.** Ожидаемые вклады в суммарный сигнал радиохимических детекторов от различных солнечных реакций (в ед. SNU)

|                   | $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \longrightarrow {}^{37}\text{Ar}^* + e^-$ | $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \longrightarrow {}^{71}\text{Ge}^* + e^-$ |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| pp                | 0,0                                                                 | 69,7                                                                |
| pep               | 0,22                                                                | 3,0                                                                 |
| ${}^7\text{Be}$   | 1,24                                                                | 37,3                                                                |
| ${}^{13}\text{N}$ | 0,11                                                                | 3,8                                                                 |
| ${}^{15}\text{O}$ | 0,37                                                                | 6,3                                                                 |
| ${}^8\text{B}$    | 7,36                                                                | 16,1                                                                |
| Сумма             | 9,30                                                                | 136,6                                                               |

передадутся другому маятнику, амплитуда колебаний которого постепенно возрастет до максимальной величины, а амплитуда первого упадет до нуля, после чего начнет падать амплитуда второго и расти амплитуда первого и процесс, если мало затухание, будет периодически повторяться. Такая аналогия нейтринных осцилляций с биениями маятников не случайна, так как по законам квантовой механики описание осцилляций и биений оказывается математически одинаковым. (На возможность осцилляций между нейтрино и антинейтрино с нарушением лептонного числа впервые указал Б. Понтекорво в 1957 году.) Если для простоты рассмотреть осцилляцию только между двумя типами нейтрино, то можно показать, что за полупериод осцилляции (отвечающий максимуму перехода) нейтрино должно пройти в вакууме от места своего рождения расстояние

$$L_0 \approx 2,5 \text{ м} \cdot \frac{P}{\Delta m^2}, \quad (18)$$

где  $P$  — импульс нейтрино, выраженный в МэВ/с, а  $\Delta m^2 = |m_2^2 - m_1^2|$  — модуль разности квадратов масс нейтрино в эВ/с<sup>2</sup>. Для того чтобы обнаружить осцилляцию, необходимо детектировать нейтрино на расстояниях  $L$  от источника, сравнимых или больших, чем длина  $L_0$ :  $L \geq L_0$ . Если массы нейтрино очень малы, то необходимое расстояние от источника становится очень большим. Детектирование солнечных нейтрино, как заметил Б. Понтекорво, дает уникальную возможность для изучения осцилляций и оценки величины масс нейтрино. При максимальном смешивании двух или трех типов нейтрино поток рождающихся в Солнце электронных нейтрино будет на Земле уменьшен в среднем соответственно в два или три раза. А так как мюонное и тау-нейтрино не могут производить реакции с образованием электрона, соответственно уменьшится число реакций (14) и (15). Неизменным, однако, окажется число реакций, протекающих за счет взаимодействия нейтральных токов, в котором  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$  участвуют одинаково. Определенный дополнительный вклад  $\nu_\mu$  и  $\nu_\tau$  будут давать и в реакцию (13). Таким образом, возникает возможность, изучая одновременно все упомянутые реакции, непосредственно проверить гипотезу нейтринных осцилляций.

Особую привлекательность этой гипотезе придает замечательный эффект, открытый С. Михеевым, А. Смирновым и Л. Вольфенштейном. Оказалось, что из-за разницы между взаимодействием электронного и мюонного (а также тау-) нейтрино с электронами солнечных недр может происходить в определенной области энергий и при определенной плотности вещества резонансное усиление перехода  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$  (и  $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ ). Благодаря этому, как показали С. Михеев и А. Смирнов, электронные нейтрино, рождающиеся вблизи центра Солнца и распространяющиеся в среде с уменьшающейся плотностью вещества, могут при определенных энергиях практически полностью и необратимо переходить в ней-

трино других типов. Очень важно, что этот эффект проявляется при очень маленьких смешиваниях и массах нейтрино, которые, согласно теоретическим моделям, являются предпочтительными. Указанный эффект может естественным образом объяснить не только наблюдаемое уменьшение числа нейтринных реакций, но и полное отсутствие электронных нейтрино средних энергий от реакции (8) и CNO-цикла. Необходимая для этого разность квадратов масс нейтрино должна составлять  $\Delta m^2 \approx 6 \cdot 10^{-6} \text{ эВ}^2$ , а смешивание (в вакууме) — около 0,5%. При таком значении  $\Delta m^2$  длина осцилляции (18) может превысить размеры Земли и обнаружение ее от земных источников становится невозможным. Нереальными будут и попытки определить массу нейтрино в лабораторных опытах, если она столь мала. (Экспериментальные пределы на массы нейтрино сейчас составляют  $m_{\nu_e} < 4 \text{ эВ}$ ,  $m_{\nu_\mu} < 300 \text{ кэВ}$ ,  $m_{\nu_\tau} < 15 \text{ МэВ}$ .) Поэтому изучение солнечных нейтрино приобретает фундаментальное значение для физики элементарных частиц. Именно исследуя нейтринные осцилляции можно получить сведения о великом объединении сил природы. Гипотеза осцилляций солнечных нейтрино, как уже отмечалось, может быть непосредственно проверена на установках нового поколения. На этих же установках возможна в принципе и проверка механизма усиления нейтринных осцилляций MSW путем измерения спектра солнечных нейтрино (по энергиям электронов и протонов в реакциях (13) и (16)). Можно надеяться, что в ближайшие годы будут получены сведения, помогающие разгадать загадку солнечных нейтрино.

*Примечание при корректуре.* К моменту появления корректуры статьи установка SUPERKAMIO-KANDE, упомянутая в тексте, уже проработала более 300 дней. Измеренный поток нейтрино составил 0,37 от ожидаемого согласно стандартной модели Солнца. В спектре нейтрино замечены интригующие особенности, которые, возможно, связаны с осцилляциями. Однако этот факт требует дальнейшей проверки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бакал Дж. Нейтринная астрофизика. М.: Мир, 1993.
2. Биленький С.М., Понтекорво Б.М. // Успехи физ. наук. 1977. Т. 123, вып. 3. С. 182.
3. Кочаров Г.Е. // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 10. С. 99–105.

\* \* \*

Семен Соломонович Герштейн, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики Московского физико-технического института, главный научный сотрудник Института физики высоких энергий (Протвино), член-корреспондент РАН. Автор более 250 научных работ и трех открытий.