

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.123

СОЛНЕЧНЫЕ НЕЙТРИНО*)*Дж. Бакал*

Глубоко под землей установлена гигантская ловушка для захвата небольшой части нейтрино, из числа тех, которые согласно теории должны испускаться Солнцем. Регистрация этих нейтрино доказала бы термоядерную природу солнечной энергии.

Большинство физиков и астрономов полагают, что солнечное тепло образуется в результате термоядерных реакций, при которых происходит превращение легких элементов в тяжелые, сопровождаемое выделением энергии. Однако подтвердить эту гипотезу, выдвинутую 50 лет назад сэром Артуром Эддингтопом, все еще не легко. Трудность состоит в том, что солнечная термоядерная печь расположена в центре Солнца и окружена огромной массой более холодного вещества. Поэтому обычная астрономическая аппаратура, находящаяся даже на околоземной орбите, может лишь регистрировать частицы, в основном протоны, испускаемые наружными слоями Солнца.

Из всех частиц, образующихся в результате гипотетических термоядерных реакций в недрах Солнца, лишь одна частица — нейтрино — способна пройти от центра Солнца до его поверхности (расстояние около 400 000 миль) и выйти в космос. Эта частица, с равной нулю массой покоя и распространяющаяся со скоростью света, столь слабо взаимодействует, что только одна из 100 миллиардов частиц, образовавшихся в солнечной печи, останавливается или отклоняется на своем пути к солнечной поверхности. Благодаря нейтрино мы можем «заглянуть» в глубь Солнца, так как только они выходят из его недр в космос. Около 3% всей энергии солнечного излучения составляет нейтринное излучение. Поток солнечных нейтрино на земной поверхности равен примерно 10^{11} нейтрино/см²сек. К сожалению, способность нейтрино с легкостью проникать через солнечную массу означает, что и поймать нейтрино очень трудно.

Но, несмотря на это, около года назад в глубокой скальной пещере, в шахтах Хоумстейк в Лиде, была установлена гигантская нейтринная ловушка (рис. 1). Ловушка представляет собой бак, наполненный 100 000 галлонами четыреххлористого углерода (C₂Cl₄) — обычной жидкостью для очистки. Эксперименты проводятся Раймондом Дэвисом (мл.) из Брукхэйвенской национальной лаборатории и его ассистентами Кеннетом С. Гоффманом и Доном С. Хармером. В 1964 г. мы с Дэвисом

*) J. N. Bahcall, Neutrinos from the Sun, Scientific American, 224 (1), 29 (1969). Перевод Н. И. Гинзбург, примечания Г. В. Домогацкого.

Дж. Н. Бакал — профессор теоретической физики Кембриджского технологического института (США).

показали *), что можно произвести экспериментальную проверку гипотезы о ядерных реакциях в звездах. Эта идея была поддержана в числе других и Уильямом А. Фаулером из Калифорнийского технологического института, Ричардом В. Додсоном, руководителем химического отдела

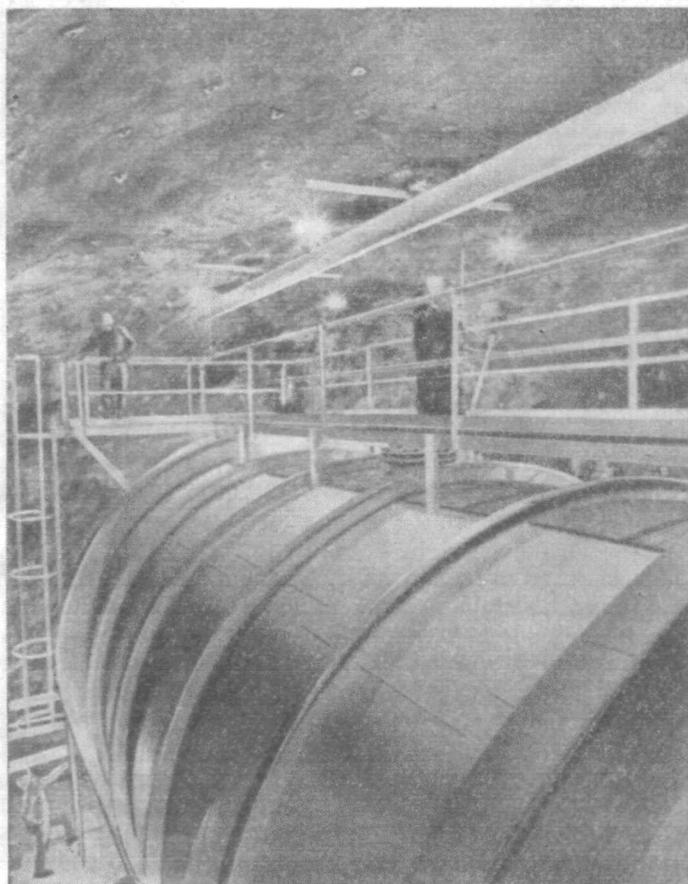


Рис. 1. Нейтринная ловушка, представляющая собой бак, наполненный 100 000 галлонами четыреххлористого углерода. Ловушка установлена в скальной пещере на глубине 4850 футов от поверхности Земли в Хоумстейкских шахтах в городе Лиде. Эксперимент проводят сотрудники Брукхэйвенской лаборатории Раймонд Дэвис (мл.), Кеннет С. Гоффман и Дон С. Хармер. Эксперимент, предложенный в 1964 г. Дэвисом и автором, начался в прошлом году. Первые результаты показали, что выход солнечных нейтрино, образовавшихся при радиоактивном распаде изотопа бора ^8B , меньше ожидаемого.

в Брукхэйвене и директором Брукхэйвенской лаборатории Морисом Голдхабером. Затем была оказана необходимая техническая помощь со стороны «Хоумстейк компани».

Первые результаты, опубликованные Дэвисом и его сотрудниками, несколько удивили астрономов и астрофизиков, поскольку уровень нейтринного потока оказался очень низким. Он был меньше половины того потока, который получили с помощью теоретических вычислений в раз-

*) Настоящая возможность рассматривалась уже гораздо раньше, с начала 50-х годов, Б. М. Понтекорво, Р. Дэвисом и целым рядом других физиков; см., например, Б. М. Понтекорво, Знание — сила, № 2 (1961); УФН 79 (1), 3 (1963).

ных моделях центральных областей Солнца при использовании «стандартных» значений величин. Мы обсудим применимость теоретических моделей ниже. Существенно, что теперь можно использовать экспериментальные данные для улучшения наших знаний о солнечной термоядерной печи.

Впервые гипотеза о существовании нейтрино была высказана в 1931 г., когда была обнаружена кажущаяся потеря небольшого количества массы при радиоактивном распаде некоторых ядер. Вольфганг Паули предположил, что масса уносится в форме энергии частиц, не обладающих массой покоя. Энрико Ферми предложил эти частицы назвать нейтрино («маленькие нейтральные»). Ферми выдвинул также количественную теорию процессов, в которых участвуют нейтрино. В 1956 г. Фредерику Райнесу и Клоду Л. Коуэну (мл.) удалось обнаружить нейтрино с помощью тщательно разработанной аппаратуры, расположенной около большого ядерного реактора. Такой реактор испускает мощный поток антинейтрино, образующихся в результате радиоактивного распада продуктов деления ядер. Для доказательства существования нейтрино пригодны, конечно, не только сами частицы, но и античастицы.

В конце 30-х годов Ганс А. Бете из Корнелльского университета, следуя предположению, высказанному Эддингтоном в 1920 г. о ядерной природе солнечной энергии, описал, как в результате термоядерных реакций Солнце и другие звезды могут сверкать в течение миллиардов лет — времени, определяемого по возрасту метеоритов и земных скальных пород. С тех пор широко изучают рождение, эволюцию и смерть звезд. Обычно предполагают, что главной исходной составляющей Вселенной являлся водород. При определенных условиях атомы водорода объединяются в облака или протозвезды, достаточно плотные, чтобы сжиматься под действием собственных сил гравитации. Сжатие продолжается до тех пор, пока давление и температура в центре протозвезды не «зажгут» ядерные реакции, в которых ядра водорода объединяются с образованием ядер гелия. После выгорания большей части водорода звезда продолжает сжиматься под действием сил гравитации, пока температура в ее центре не становится достаточно высокой для возникновения термоядерных реакций, в результате которых ядра гелия превращаются в ядра более тяжелых элементов. В процессе выгорания горючего и сжатия проходит ряд циклов.

Считают, что Солнце находится в первой стадии ядерного горения. В этой стадии четыре ядра водорода (протоны) в результате термоядерной реакции образуют ядро гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов. При этом два положительных заряда (которые несли два из четырех первоначальных протонов) испускаются в виде двух положительных электронов (античастицы обычных электронов). В результате термоядерных реакций освобождаются также два нейтрино и некоторый избыток энергии, равный примерно $25 \cdot 10^6$ эв (25 Мэв). Такая энергия соответствует потерям массы в процессе термоядерных реакций; это означает, что ядро гелия и два электрона весят немного меньше, чем четыре протона. Освободившаяся таким образом энергия, равная 25 Мэв, превращается в энергию движения газа в солнечной печи и в фотоны (кванты излучения). Эта энергия в конце концов диффундирует к поверхности Солнца и выделяется в виде солнечного света и другого излучения.

Бете и независимо К. фон Вейцеккер в Германии предложили механизм образования гелиевого ядра из четырех протонов. Этот процесс получил название CNO-цикла, так как в нем участвуют ядра углерода, азота и кислорода (рис. 2, 3). Цикл начинается с ядра обыкновенного углерода ^{12}C (обозначение соответствует ядру, содержащему 12 нуклонов,

из которых шесть протонов, остальные нейтроны). Трижды поглощается

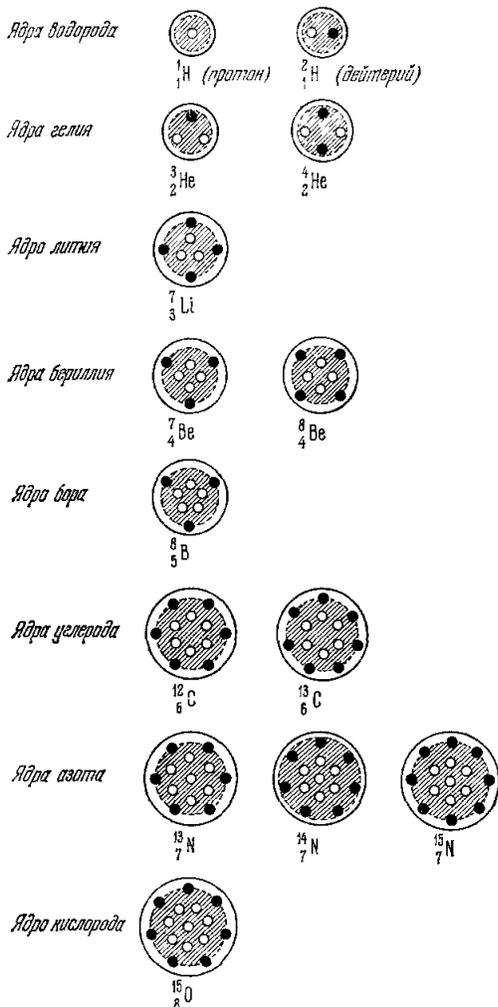


Рис. 2. Предполагают, что источниками солнечной энергии служат указанные на рисунке ядра, которые являются либо исходными либо конечными продуктами реакций, происходящих в термоядерной солнечной печи. Исходным топливом служит обычный водород ${}^1_1\text{H}$, ядра которого состоят из одного протона. В результате термоядерных реакций из 4-х протонов может образоваться ядро гелия ${}^4_2\text{He}$. Реакции могут проходить двояким образом. Одна цепь реакций носит название CNO-цикла, так как в ней участвуют ядра углерода, азота и кислорода (см. рис. 3), а другая, известная как цепь pp, включает реакции ядер гелия, лития, бериллия и бора (см. рис. 4). Произвольно расположенные протоны и нейтроны обозначены светлыми и темными кружками соответственно. В реакциях участвуют также электроны (положительные и отрицательные), фотоны и нейтрино.

по одному протону, в результате чего образуется ядро азота, содержащее 8 нейтронов и 7 протонов (${}^{15}_7\text{N}$). При поглощении еще одного протона происходит реакция, в которой образуется ${}^{13}_6\text{C}$ (исходное ядро) и ${}^4_2\text{He}$ — обычный гелий.

В каждом цикле испускаются два нейтрона с максимальной энергией больше 1 Мэв. Один нейтрон является продуктом радиоактивного распада ${}^{13}\text{N}$, а другой — продуктом распада ${}^{15}\text{O}$ (для простоты опускаем индекс, обозначающий количество протонов в ядре). Скорость протекания реакций в цикле CNO в звездах тщательно изучалась в течение последних 20 лет в Келлогской лаборатории Калифорнийского технологического института сначала под руководством Чарльза Лоуритсена, а теперь Фаулера.

Совершенно другие ядерные реакции, известные как протон-протонный цикл, рассмотренные Бете 30 лет назад, могут объяснить такое же образование гелия из четырех протонов (рис. 4). В этой цепи сначала два протона объединяются с образованием дейтерия ${}^2_1\text{H}$ — ядер тяжелого водорода. Затем дейтерий, комбинируясь с протоном, образует ядро легкого гелия ${}^3_2\text{He}$. Следующая реакция может происходить в одном из трех направлений. Мы оценили, что в толще Солнца в 91% случаев два ядра ${}^3_2\text{He}$ комбинируются с образованием ядер обычного гелия ${}^4_2\text{He}$ с освобождением двух протонов. Две другие возможные ветви реакции приводят к образованию ядер лития, бериллия и бора (${}^7\text{Li}$, ${}^8\text{Be}$, ${}^8\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$), а затем к появлению двух ядер гелия.

В то время когда Бете исследовал реакции в цепи протон-

протон, было очень мало экспериментальных данных о скоростях этих ядер-

ных реакций. С тех пор в лабораториях всего мира были получены данные, обеспечивающие понимание деталей этого цикла реакций и его нескольких ветвей. При низких энергиях, предполагаемых в солнечной печи (несколько тысяч электрон-вольт), вероятность возникновения какой-либо из реакции

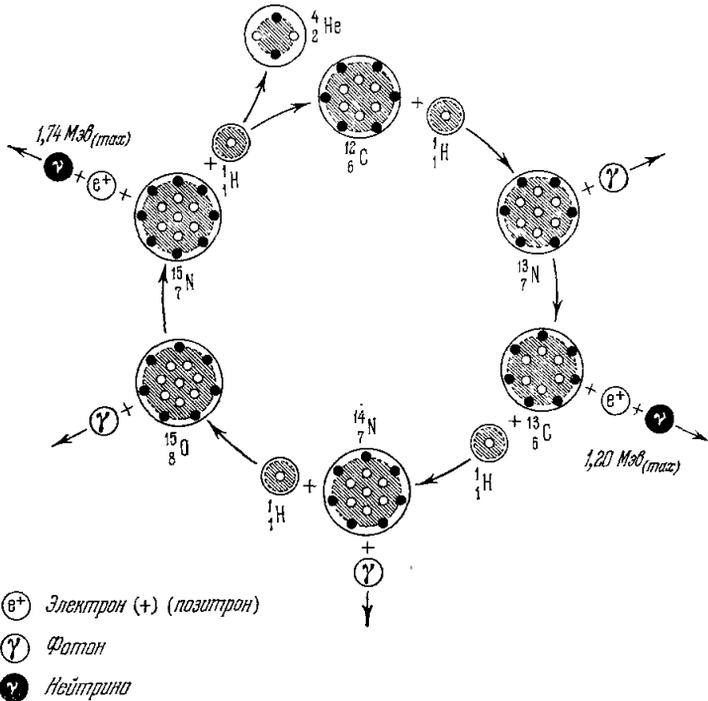


Рис. 3. Цикл CNO, при котором в результате термоядерных реакций из четырех протонов образуется ядро гелия. В реакции в качестве катализатора участвует обычный углерод ^{12}C , который восстанавливается. Нейтрино появляются на четвертом и пятом этапе цепи. Поскольку нейтрино делят энергию с одновременно испущенными положительными электронами (позитронами), энергетический спектр нейтрино непрерывен. На рисунке указана максимальная энергия нейтрино. К сожалению, многим нейтрино, образовавшимся в этом цикле, для участия в реакции с атомами ^{37}Cl недостает энергии, которая должна быть не меньше $0,81 \text{ МэВ}$.

pp-цикла низка и, следовательно, ее трудно измерить. Тем не менее экспериментальная группа в Келлогской лаборатории с помощью ряда способных аспирантов довели качество трудных измерений для такого уровня, что удалось получить информацию, необходимую для определения скорости реакций в *pp*-цикле.

Три из реакций цепи *pp* особенно важны для экспериментов с солнечным нейтрино. Это — реакция (1) (см. рис. 6), реакция протон — электрон — протон, обозначаемая (2), и распад радиоактивного изотопа бора ^8B (10). Во всех реакциях образуются нейтрино, но только во второй и третьей реакции образуются нейтрино с энергиями, достаточными, чтобы вызвать реакцию в детекторе с четыреххлористым углеродом.

В цикле *pp* реакция *pp* (1) — самая медленная и, следовательно, определяет общую скорость выделения энергии. К сожалению, реакция проходит так медленно, что не может измеряться в лаборатории; «слабое» взаимодействие, управляющее этой реакцией, как раз и представляет собой взаимодействие нейтрино с веществом. В течение многих лет теоретики производили оценки скорости упомянутых реакций в звездах. Новые

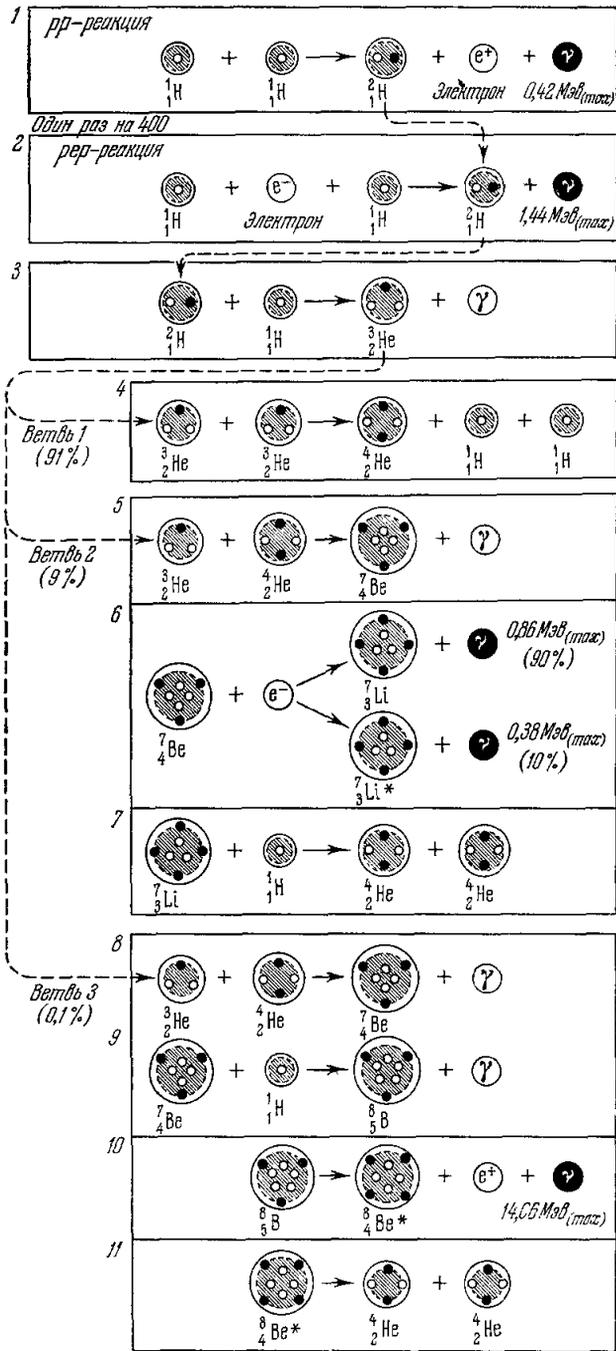


Рис. 4. Цепь реакций *pp*, которая, как предполагают, является основным источником энергии, генерируемой Солнцем. Исходная реакция (1), в результате которой образуется нейтрино, не вступающее в реакцию с *Cl*, определяет скорость всех последующих реакций. Детектируемые нейтрино появляются при *реp*-реакции (2), названной так потому, что в ней взаимодействуют протон-электрон-протон. Возникающий в этих двух реакциях дейтерий ${}^2_1\text{H}$ вступает в термоядерную реакцию с протонами с образованием легкого изотопа гелия ${}^3_2\text{He}$ (3). С этого момента цепь протон-протон разделяется на две ветви. Немного с трудом детектируемые нейтрино образуются при реакциях (6). Нейтрино с самой высокой энергией образуются в реакциях редкой ветви (10) с участием атома бора ${}^8_5\text{B}$.

оценки, произведенные в этом году мною и Робертом Мейем из Сиднейского университета верны, как мы полагаем, с точностью до 5%.

Реакция *pep* отличается от основной реакции протон-протон только присутствием отрицательного электрона в начале реакции вместо образования положительного электрона после реакции. Скорость этих реакций при солнечных плотностях и температурах меньше скорости реакций *pp*.

Из нашей оценки следует, что реакция *pep* происходит в условиях Солнца в 400 раз реже, чем реакция *pp*. Образующиеся в результате *pep*-реакций нейтрино с энергиями в 3,5 раза более высокими, чем энергии нейтрино в реакции *pp*, едва ли можно детектировать. Как мы увидим, скорость их захвата устанавливает минимальную скорость, совместимую с гипотезой о наличии в Солнце термоядерной печи.

Особенно важна третья реакция — радиоактивный распад бора, ${}^8\text{B}$, в результате которого образуются нейтрино с наибольшей энергией: их максимальная энергия равна 14,06 эв, что примерно в 10 раз выше максимальной энергии нейтрино, образующихся в *pep*-реакции. Ядро ${}^8\text{B}$ образуется при захвате бериллием ${}^7\text{B}$ одного протона. Это — реакция (9), происходящая в редкой ветви цикла *pp*. Эта ветвь начинается с термоядерной реакции легкого и тяжелого ядер гелия ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ с образованием ${}^7\text{Be}$. В 1958 г. Гарри Холмгрен и Р. Л. Джонсон из Морской лаборатории обнаружили, что такая реакция происходит значительно чаще, чем предполагалось ранее. Она происходит один раз на 1000 наиболее вероятных на Солнце реакций ${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$. Немедленно после этого открытия Фуллер и А. Г. У. Камерон предположили, что при распаде ядра ${}^8\text{B}$ должен возникнуть поддающийся изучению поток солнечных нейтрино. Сделанные мною вычисления показали, что вероятность захвата нейтрино с высокими энергиями, образовавшимися в результате радиоактивного распада ${}^8\text{B}$, в 18 раз выше вероятности, оцененной ранее. На основе этих вычислений Дэвис предложил в 1964 г. эксперимент, что и привело к установке ловушки в Хоумстейкских шахтах.

Перейдем теперь к вопросу о том, как четыреххлористый углерод может обеспечить детектирование солнечных нейтрино. Около 20 лет назад Бруно М. Понтекорво, работавший тогда в ядерных лабораториях на Чок-Ривер в Канаде, заметил, что изотоп хлора ${}^{37}\text{Cl}$ может захватывать нейтрино и превращаться в изотоп благородного газа аргона ${}^{37}\text{Ar}$ с испусканием электрона. Это предположение было затем детально рассмотрено Луисом Альваресом из Калифорнийского университета в Беркли. На основе этого рассмотрения Дэвис и Хармер попытались наблюдать аргон, сопутствующий антинейтрино, возникающим в результате распада ядер, образующихся при делении (они поместили около ядерного реактора детектор объемом в 3000 литров).

Изотоп аргона, образующийся в результате захвата нейтрино, неустойчив и переходит в ${}^{37}\text{Cl}$ путем захвата одного из собственных орбитальных электронов. Такое превращение для половины атомов ${}^{37}\text{Ar}$ в образце происходит примерно за 35 дней. При распаде из атома аргона освобождается электрон с низкой энергией, который можно детектировать с помощью счетчиков, расположенных вокруг образца. Детектирование таких электронов явилось бы признаком того, что некоторые атомы ${}^{37}\text{Cl}$ превратились в атомы ${}^{37}\text{Ar}$ в результате захвата нейтрино. Минимальная энергия нейтрино, необходимая для этой реакции, равна 0,81 Мэв (рис. 5).

Для срабатывания схемы нужно, чтобы в конце образовывалась по крайней мере дюжина атомов ${}^{37}\text{Ar}$. Из расчетов следует, что для проведения эксперимента фактически требуется детектор, содержащий 100 000 галлонов жидкости, одной из компонент которой является хлор. Таковой может быть, например, четыреххлористый углерод. (В есте-

ственном хлоре каждый четвертый атом является изотопом ^{37}Cl .) В экспериментах Дэвиса и его сотрудников этот объем четыреххлористого углерода заключен в баке диаметром 20 футов и длиной 48 футов, который расположен под землей на глубине 4850 футов (рис. 6).

Почему ловушка установлена под землей? Дело в том, что детектор нужно заэкранировать от ливня всевозможных частиц, образующихся при входе космических лучей (в основном протонов высокой энергии)

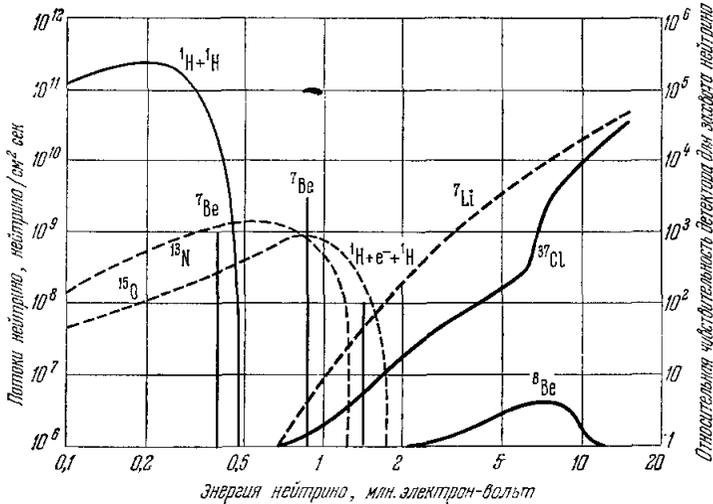


Рис. 5. Энергетический спектр солнечных нейтрино. Чувствительность используемой детектирующей системы с атомами ^{37}Cl изображена сплошной жирной кривой, а чувствительность предложенной детектирующей системы с атомами лития ^7Li изображена штриховой жирной линией. Чувствительность обеих систем недостаточна для использования их в области ниже $0,8 \text{ Mev}$, где должны лежать энергии большей части солнечных нейтрино. Однако система с литием должна быть чувствительнее системы с хлором по отношению к нейтрино, образующимся в *реп*-реакциях, $^1\text{H} + e^- + ^1\text{H}$. Можно предполагать, что большая часть нейтрино, захватываемых ядром ^{37}Cl , являются нейтрино, образовавшимися при радиоактивном распаде ядер ^8Be . Нейтрино, образующиеся в цепи реакций протон-протон, обозначены сплошными полужирными линиями, а нейтрино, образующиеся в цикле CNO — штриховой полужирной линией. Потоки нейтрино отложены в единицах: количество нейтрино на квадратный сантиметр в секунду на Mev для источников с непрерывным спектром и количество нейтрино на квадратный сантиметр для источников с линейчатым спектром.

в земную атмосферу (рис. 7). Некоторые из реакций, вызванных этими частицами, могут имитировать реакции, которые ищет Дэвис, но особенно существенно оградить бак от попадания в него свободных протонов, поскольку ^{37}Cl при захвате протона может превратиться в ^{37}Ar с освобождением электрона.

Свободные протоны не в состоянии проникнуть через толстый слой скал, но мюоны, образованные космическими лучами, обладают высокой проникающей способностью и на глубине многих футов под землей могут вызвать реакции, в которых рождаются протоны. Чтобы заэкранироваться от нейтронов, представляющих еще одну опасность, бак должен быть окружен водой со всех сторон.

В течение нескольких месяцев бак, наполненный четыреххлористым углеродом, подвергался действию потока солнечных нейтрино, чтобы аккумулировать атомы ^{37}Ar (я должен добавить, что отношение потока нейтрино, приходящего из остальной Вселенной, к потоку солнечных нейтрино такое же, как отношение света звезд к солнечному свету; следо-

вательно, потоком нейтрино из космоса можно пренебречь *). Атомы ^{37}Ag , образующиеся в результате захвата нейтрино, удаляются из жидкости с помощью пропускания через систему большого количества пузырьков

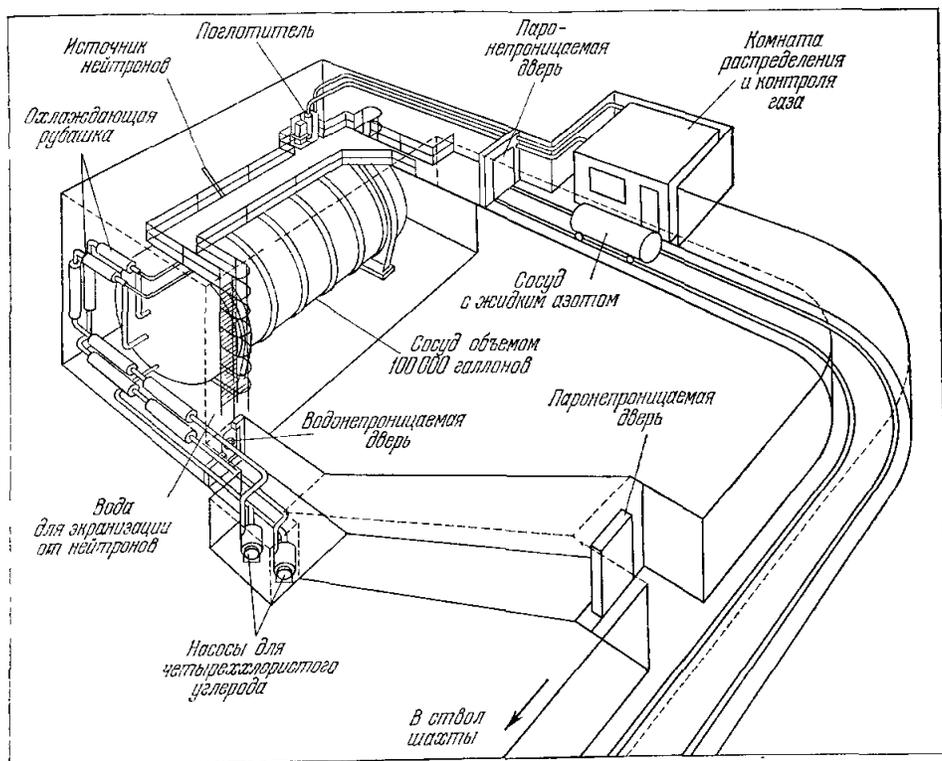


Рис. 6. Схема детектора солнечных нейтрино, представляющего собой бак диаметром 20 футов и длиной 48 футов, содержащий 100 000 галлонов четыреххлористого углерода (C_2Cl_4). В среднем каждая молекула C_2Cl_4 содержит один атом нужного изотопа ^{37}Cl (17 протонов и 20 нейтронов). В каждом из трех других атомов хлора содержится на два протона меньше и они обозначаются ^{35}Cl . Когда нейтрино соответствующей энергии вступает в реакцию с атомом ^{37}Cl , то в результате образуется атом ^{37}Ag и электрон. Радиоактивный аргон-37 накапливается в баке в течение нескольких месяцев, а затем удаляется при очистке бака с помощью газообразного гелия. Аргон поглощается в охлажденной ловушке и испытывается на радиоактивность.

газообразного гелия. Около 10 кубических футов гелия пропускается через бак за одну минуту. Аргон поглощается в угольной ловушке, имеющей температуру жидкого азота (77°K), и таким образом отделяется от гелия. Эффективность экстракции определяется в каждом эксперименте

*) Это утверждение не совсем точно. Современная теория поздних стадий эволюции звезд предсказывает, что при взрывах сверхновых огромная доля энергии $\sim (10^{51} - 10^{52})$ излучается в виде нейтрино за время $\tau \sim 2 \cdot 10^{-2}$ сек (см., например, В. С. Имшенник, Д. К. Надежин, О вспышках сверхновых. Дополнение IV в книге Я. Б. Зельдовича и И. Д. Новикова «Релятивистская астрофизика», М., 1967). Если взрыв такой звезды произойдет в нашей Галактике, то на Землю придет поток $10^{10} - 10^{12}$ нейтрино/см². Поэтому эффект, производимый этими нейтрино в установке Дэвиса, может превосходить эффект солнечных нейтрино даже при усреднении по достаточно большому промежутку времени — от нескольких часов до нескольких недель (последнее определяется многими факторами — массой звезды, расстоянием от Земли, энергией излучаемых нейтрино, отношением числа нейтрино и антинейтрино в потоке и целым рядом других обстоятельств; подробнее об этом см. Г. В. Домогацкий, Г. Т. Зацепин, Изв. АН СССР, сер. физ. 33, 1796 (1969).

с помощью добавки к 100 000 галлонам четыреххлористого углерода определенного количества (меньше кубического сантиметра) редкого нерадиоактивного изотопа ^{36}Ar . Дэвис обнаружил, что после 22-часовой очистки бака с помощью гелия обычно экстрагируется 95% атомов ^{36}Ar .

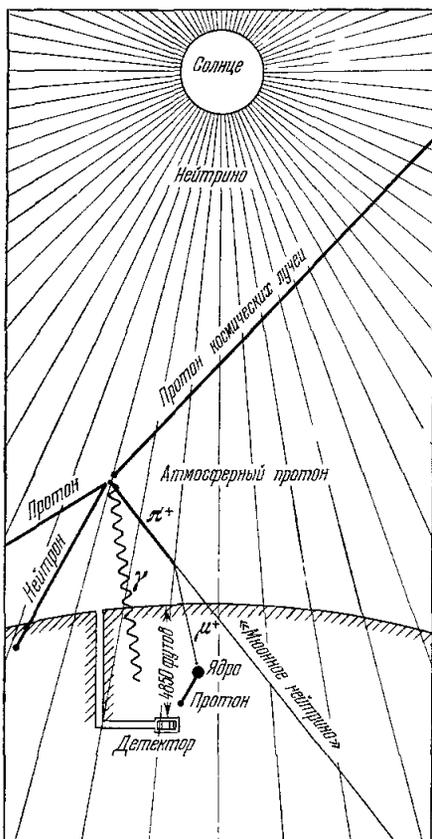


Рис. 7. Расположение установки глубоко под землей защищает детектор солнечных нейтрино от интенсивного потока быстрых частиц, образующихся при соударении протонов космических лучей с атомными ядрами в атмосфере или в толще земли. Положительный пион (π^+), образующийся при соударении в атмосфере, распадается на положительный мюон (μ^+) и «мюонное нейтрино». Мюоны с высокой энергией обладают большой проникающей способностью и могут выбить протоны из атомных ядер достаточно глубоко под землей. Если такой протон попадет в нейтринный детектор, он может имитировать солнечное нейтрино и превратить атом хлора-37 ^{37}Cl в радиоактивный атом аргона-37 (^{37}Ar).

Аргон, извлеченный из бака, состоит в основном из запущенных туда умышленно атомов ^{36}Ar вместе с двумя другими изотопами: немного атомов ^{37}Ar , связанных с солнечными нейтрино, и ничтожное количество обычного нерадиоактивного изотопа аргона ^{40}Ar , который мог проникнуть в бак из воздуха. После химической очистки образец аргона помещается в маленький счетчик, объемом 5 см^3 . Счетчик сделан маленьким, чтобы уменьшить действие на него космических лучей и других нежелательных частиц. Он защищен от внешнего излучения рядом экранов и большими счетчиками, которые регистрируют проникновение каких-либо частиц через внешнюю защиту. Форма каждого импульса, регистрируемого счетчиком, фотографируется, и необходимые данные (такие, как время появления импульсов и их энергия) накапливаются на пленке счетного устройства.

Рэй Дэвис сообщил мне, что эксперимент сам по себе очень прост («только измерения») и используемая химия «стандартна». Я должен, очевидно, ему верить, но, не будучи химиком, испытываю благоговение перед объемом его работы и точностью, с которой он ее выполняет. В баке содержится 10^{30} различных атомов. Дэвис способен найти и выделить из этого множества атомов несколько десятков атомов ^{37}Ar , могущих образоваться в баке при захвате солнечных нейтрино. Помоему, легче найти иголку в стоге сена.

Теперь остановимся на том, как была вычислена вероятность захвата одним из атомов ^{37}Cl солнечного нейтрино, попавшего в бак с четыреххлористым углеродом. Количество испускаемых определенным источником

нейтрино с энергией, заключенной в любом заданном интервале, можно определить из лабораторных опытов. Можно также вычислить с помощью теории нейтринного распада Ферми вероятность захвата атомом ^{37}Cl нейтрино с данной энергией. Вероятность захвата на пороге реакции,

т. е. для нейтрино с энергией $0,81 \text{ Мэв}$, равна нулю; относительная вероятность захвата достигает 100 для нейтрино с энергией 4 Мэв , 1000 для нейтрино с энергией 7 Мэв и 30 000 для нейтрино с энергией 14 Мэв . Таким образом, вероятность захвата нейтрино с энергией 14 Мэв , образовавшихся при распаде ядер ${}^8\text{B}$, в 3000 раз больше вероятности захвата нейтрино с энергией $1,4 \text{ Мэв}$, возникающих в реакциях *пер*.

Более того, нейтрино, образовавшиеся при распаде ядер ${}^8\text{B}$, обладают способностью, отличающей их от всех остальных солнечных нейтрино.

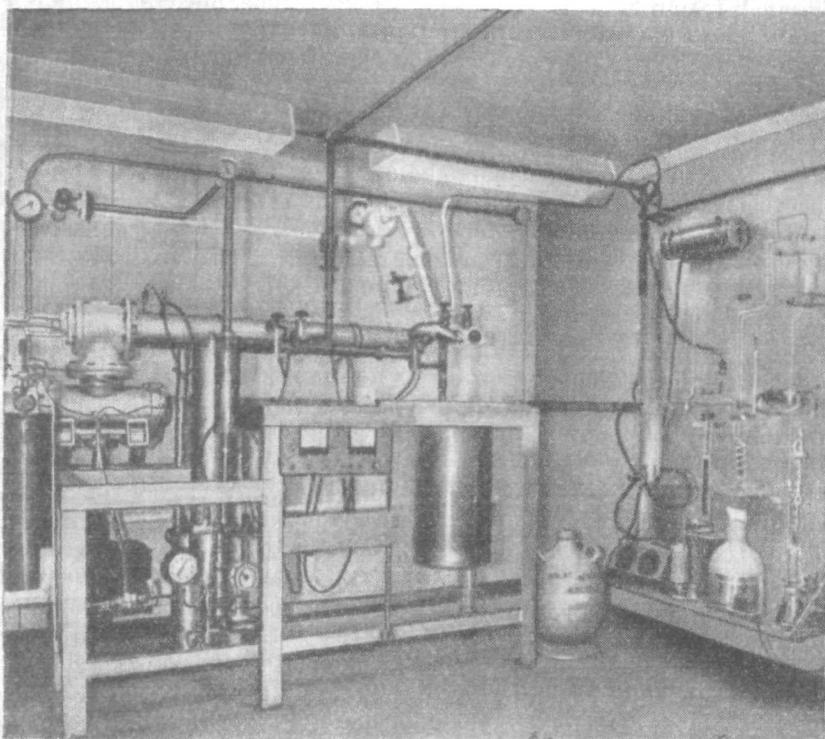


Рис. 8. Система экстракции аргона, расположенная глубоко под землей рядом с нейтринной ловушкой. Гелий, пропускаемый через бак, увлекает некоторые атомы ${}^{37}\text{Ar}$, образовавшиеся из атомов ${}^{37}\text{Cl}$. Эффективность экстракции была определена заранее с помощью ввода в бак небольшого количества атомов редкого нерадиоактивного изотопа аргона ${}^{36}\text{Ar}$. Смесь гелия и аргона пропускается через аппаратуру, изображенную в левой части рисунка. Аргон поглощается в угольной ловушке, охлажденной жидким азотом. Эта фракция аргона очищается в аппаратуре, изображенной справа. Очищенный образец отправляется в Брукхэйвен, где с помощью заэкранированных счетчиков определяется содержание ${}^{37}\text{Ar}$.

Их энергия так велика, что они вызывают образование возбужденных ядер ${}^{38}\text{Ar}$. Это означает, что внутренняя энергия этих ядер выше их энергии в основном (или нормальном) состоянии. Это важно с той точки зрения, что нейтрино, образовавшиеся из ядер ${}^8\text{B}$, в отличие от нейтрино с низкими энергиями, могут вызвать более благоприятные ядерные реакции*). Наиболее существенное возбужденное состояние ядер ${}^{37}\text{Ar}$ аналогично основному состоянию ядер ${}^{37}\text{Cl}$; оно является ядерным аналогом основного

*) На важную роль переходов на возбужденные состояния ядра ${}^{37}\text{Cl}$ впервые обратил внимание В. Ф. Mottelson (см. сноску ²⁴ в работе: J. N. Bahcall, Phys. Rev. 135, 1B, B137 (1964)).

состояния ядер ^{37}Cl . Учет возбужденных состояний привел к точному определению вероятности захвата ядром ^{37}Cl нейтрино, образовавшегося при распаде ядра ^8B .

Аргументация, основанная на свойствах симметрии ядер, содержащих одинаковое число нуклонов, такова. Ядро $^{37}_{17}\text{Cl}$ (17 указывает число протонов в ядре) должно вести себя очень схожим образом с ядром кальция $^{37}_{20}\text{Ca}$, которое еще не было известно, когда проводились первые расчеты. Из простой одночастичной оболочечной модели ядра с чистой $j - j$ -связью следовало, что ядро $^{37}_{20}\text{Ca}$ должно претерпеть радиоактивный распад в среднем за время 130 мсек с образованием возбужденного ядра калия $^{37}_{19}\text{K}$, положительного электрона и нейтрино. С ядерной точки зрения это полностью соответствует захвату нейтрино ядром $^{37}_{17}\text{Cl}$ с образованием ядра $^{37}_{18}\text{Ar}$ и электрона.

Спустя примерно год был открыт изотоп ^{37}Ca со скоростью распада, совпадающей в пределах 25%-ной точности с предсказанной величиной. Более существенны последовавшие за этим измерения Артура М. Посканцера и его сотрудников в Брукхэйвене, которые определили вероятности распадов ядра ^{37}Ca , приводящих к различным возбужденным состояниям ядра ^{37}K . Именно эти результаты были необходимы для вычисления скорости захвата нейтрино ядром ^{37}Cl с точностью, превышающей 10%.

Удобно ввести специальную единицу, чтобы выразить скорость захвата нейтрино в экспериментах по поимке солнечных нейтрино. Этой единицей является так называемая солнечная нейтринная единица, или SNU (которую мы произносили как «сниу» («snew»). Одна SNU равна 10^{-36} захватов в секунду на бомбардируемый атом. Отсюда следует, что атом ^{37}Cl должен до захвата нейтрино ждать 10^{36} сек или, грубо говоря, время в 10 миллиард миллиардов раз большее возраста наблюдаемой Вселенной. Конечно, в 100 000-метровом баке, содержащем около $2 \cdot 10^{30}$ атомов ^{37}Cl , среднее время ожидания одного захвата при скорости захвата, равной 1 SNU, равняется только $5 \cdot 10^5$ сек, что составляет примерно шесть дней на один захват.

Рассмотрим теперь, как изменяется скорость захвата в единицах SNU в зависимости от типа реакции или комбинации реакций, могущих обеспечивать термоядерную солнечную энергию (см. таблицу).

Исходное предположение	Скорость захвата, SNU
Цикл углерод-азот-кислород	35
Цепь pp (стандартные S_{17})	6
Цепь pp (косвенные S_{17})	3
Общие идеи о глубинах Солнца	1—3
Абсолютный минимум (pp -нейтрино)	0,3

Скорости захвата нейтрино вычислены при различных предположениях о термоядерных процессах в Солнце. Одна солнечная нейтринная единица (SNU) равна 10^{-36} захватов в секунду на бомбардируемый атом или, альтернативно, один захват на атом за каждые 10^{36} сек. Если бы вся солнечная энергия образовывалась за счет CNO-цикла, то скорость захвата была бы равна 35 SNU. В тексте обсуждены обоснования различных оценок скоростей захвата. Верхний предел первого экспериментального значения, полученного Дэвисом и др., равен 3 SNU.

Если доминирующим источником солнечной энергии является цепь реакций CNO, то скорость захвата равна 35 SNU. С другой стороны, если Солнце черпает свою энергию из цепи реакций pp , как предполагают теперь большинство теоретиков, то проблема определения скорости захвата усложняется. Необходимо тогда построить точную модель солнечных недр и оценить среднюю температуру солнечной печи с точностью до 0,1%, чтобы иметь возможность оценить скорость захвата с необходимой нам точностью в несколько процентов.

Уже в течение некоторого времени известны уравнения, необходимые для расчета такой модели. Первое уравнение отвечает тому, что гравитационное притяжение солнечного газа уравновешивается в каждой точке Солнца тепловым давлением частиц движущегося газа и давлением излучения (фотонов). Второе уравнение отражает тот факт, что полная энергия, испускаемая Солнцем, представляет собой сумму всех энергий, выделившихся в отдельных термоядерных реакциях. И наконец, имеется уравнение, описывающее, как переносится энергия из глубины Солнца на его поверхность. Это уравнение становится определенным при конкретном предположении о химическом составе солнечного вещества, которое определяет его непрозрачность (т. е. то, в какой мере Солнце препятствует выходу фотонов, стремящихся достичь его поверхности). Мы для удобства предположим, что химический состав, наблюдаемый спектроскопически на поверхности Солнца, не изменился с момента образования Солнца. Это предположение было, однако, поставлено под сомнение Ико Ибеном (мл) из Массачусетского технологического института, который отметил, что вычисленное содержание гелия в Солнце отличается от содержания гелия, наблюдаемого в случае некоторых звезд. Вопрос остается несколько спорным, хотя нас обнадеживает то обстоятельство, что эти модели дали возможность правильно вычислить содержание атомов гелия, наблюдаемых в космических лучах, приходящих от Солнца.

Все упомянутые выше величины — давление, скорость реакции и непрозрачность — должны вычисляться для температур примерно в 50 000 раз выше и для плотностей в 100 раз больше, чем встречающиеся на Земле. Предполагается, что температура центра Солнца равна примерно $15 \cdot 10^6$ °К, а его плотность составляет около 150 г/см^3 . Для вычисления достаточно точных значений непрозрачности звездного вещества Артуру Н. Коху и его сотрудникам из Лос-Анджелесских научных лабораторий понадобились годы.

Детальный расчет солнечной модели с помощью современной высокоскоростной вычислительной машины занимает около 10 минут. Первые вычисления потока солнечных нейтрино на основе детальных солнечных моделей были опубликованы в 1963 г. Фаулером, Ибеном, Ричардом Л. Сиерсом и мной. Из нашей модели 1963 г. скорость захвата получается равной примерно 50 SNU. Последующие ведущие работы в этой области принадлежат Сиерсу. Мной же были предприняты попытки оценить и уменьшить неопределенности в вычислениях, возникающие в силу недостаточности наших знаний о параметрах. К этой работе был привлечен ряд способных сотрудников, включая с недавнего времени Нету Бакал, Джиору Шавив и Роджера Ульриха. Для нашей лучшей солнечной модели, в которой использованы наиболее правдоподобные, с нашей точки зрения, параметры для цепи реакций pp , скорость захвата получается равной лишь 6 SNU, что почти на порядок меньше величины, получаемой из модели 1963 г. Основное различие между этими двумя моделями связано с улучшением измерений вероятностей ядерных реакций и состава Солнца (работы по измерению состава Солнца были выполнены Д. Ламбертом и Д. Вернером из Оксфордского университета). По нашему

мнению, новое значение скорости захвата справедливо, грубо говоря, с точностью до множителя 2 или 3.

Около 80% предполагаемой скорости, равной 6 SNU, составляют нейтрино, образовавшиеся при радиоактивном распаде бора ^8B , возникшем при захвате протона атомом ^7Be . Параметр, описывающий скорость этой реакции при солнечных температурах, обозначается обычно через S_{17} (цифра 1 обозначает протон, а 7 — ^7Be). «Стандартное» значение S_{17} было определено в 1968 г. Питером Д. Паркером из Йельского университета. Этому значению соответствует скорость 6 SNU. Косвенное определение S_{17} , приводящее к более низкому его значению, было сделано несколькими годами позже в Калифорнийском технологическом институте Томасом А. Томбрелло. Он использовал для этой реакции, в которых вместо ^7Be и протонов участвуют ^7Li и нейтроны. Если использовать меньшее значение S_{17} , то скорость захвата становится равной 3 SNU. Независимо от неопределенности, связанной со значением S_{17} и другими параметрами, мы установили, что из наиболее общих идей относительно недр Солнца следует скорость захвата, равная от 1 до 3 SNU.

Минимальную скорость захвата можно получить, вычисляя вклад, вносимый только лишь нейтрино, образовавшимися в результате *per*-реакций. Независимо от выбранной модели недр Солнца, отношение скорости *per*-реакций к скоростям обычных реакций цепи *pp* равно около 1/400. Более того, наблюдаемая светимость Солнца определяет скорость основной реакции *pp*. Вследствие этого скорость захвата, связанная с нейтрино, образовавшимися в *per*-реакциях, является наименьшей (с одним мыслимым исключением, которое будет упомянуто ниже), согласующейся с гипотезой о том, что излучение Солнца связано с термоядерными реакциями. Вычисления, проведенные мной с сотрудниками, показали, что эта минимальная скорость захвата равна $0,23 \pm 0,2$ SNU.

Результаты, опубликованные в этом году Дэвисом и др., показали, что скорость захвата ядрами ^{37}Cl , вероятно, меньше 3 SNU. Из экспериментально определенного значения, безусловно, следует, что менее 10% солнечной энергии образуется в результате CNO-цикла. Из эксперимента также следует, что значение, равное 6 SNU, вычисленное на основе «стандартных» параметров для цепи реакции *pp*, завышено по крайней мере вдвое. Это расхождение в два раза вызвало сильные волнения в научных кругах. Однако, как мы видим, неопределенность некоторых параметров достаточно велика, так что результаты Дэвиса не находятся в противоречии с общими идеями о солнечных недрах.

Тем не менее несколько теоретиков предложили пути для объяснения кажущегося расхождения. Д. Эзер и Камерон из НАСА (NASA) предположили, что глубинные слои Солнца каким-то образом перемешиваются с внешними слоями, что снижает различие в их составе, связанное с ядерными реакциями в недрах Солнца. Эта идея была количественно рассмотрена рядом исследователей, которые пришли к выводу, что перемешивание слоев действительно значительно снижает ожидаемый поток солнечных нейтрино. Однако предположение о перемешивании не было принято повсеместно, поскольку требуемая величина и продолжительность перемешивания слишком велики.

Наиболее радикальная идея возникла в СССР, где Б. М. Понтекорво (который предложил ранее использовать ^{37}Cl для поимки нейтрино) и В. Н. Грибов предположили, что нейтрино обладают некоторой двойственностью: примерно половину времени они являются обычными «электронными нейтрино», каковыми мы их и считаем, а вторую половину времени являются «мюонными нейтрино». Мюонные нейтрино были открыты

в Брухэйвене в 1962 г., они возникают в реакциях, в которых образуются мюоны. Мюонные нейтрино кажутся во всем идентичными с обычными электронными нейтрино, за исключением того, что при их взаимодействии с протоном или нейтроном образуется не электрон, а мюон (см. Leon M. Lederman, The two-Neutrino Experiment, Scientific American, March 1963). Можно также показать, что ионные нейтрино с низкими энергиями не взаимодействуют с атомами ^{37}Cl . Согласно Грибову и Понтекорво превращение одного типа нейтрино в другой требует времен (или расстояний) слишком больших, чтобы их можно было реализовать в лабораторных условиях, но вполне реальных для нейтрино, движущихся от Солнца к Земле. Нейтрино, достигающие Земли в виде мюонных нейтрино, нельзя детектировать, и, таким образом, все скорости захвата должны быть уменьшены примерно вдвое. Из гипотезы Понтекорво следует, что минимальная скорость захвата, обусловленная нейтрино из *per*-реакций, должна быть понижена. Такую необычную гипотезу трудно проверить, но и отвергнуть ее нелегко.

Тем временем Дэвис пытается улучшить чувствительность своего эксперимента. Если это ему удастся, то можно будет решить, связана ли причина существующих разногласий между экспериментом и теорией с какими-либо ошибками в значениях экспериментально определяемых параметров наших солнечных моделей или она является следствием неправильности основных положений теории. Кроме того, я надеюсь, что кто-либо поставит эксперимент с использованием ядер, более чувствительных к солнечным нейтрино с низкой энергией, чем ядра ^{37}Cl . Такими ядрами являются ядра обычного лития ^7Li ; при захвате таким ядром нейтрино образуется ^7Be и электрон (эта реакция обратна реакции (б) на рис. 6). Литий должен гораздо активнее, чем ^{37}Cl , взаимодействовать с нейтрино, образовавшимися при *per*-реакциях и имеющих энергию 1,4 Мэв (см. таблицу на стр. 750), а также с нейтрино малой энергии, возникшими при радиоактивном распаде ядер ^{13}N и ^{15}O в цепи CNO. Сопоставление результатов, полученных в экспериментах с использованием ядер ^{37}Cl и ^7Li , обеспечило бы надежную проверку существующих теорий о недрах звезд и о нейтринных реакциях*). Не исключено, что через несколько лет я буду писать вторую статью, объясняющую, почему результаты успешных экспериментов с ядрами ^7Li не согласуются с предсказаниями астрофизиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Schwarzschild, Structure and Evolution of Stars, Princeton University Press, 1958.
2. Y. N. Bahcall, Phys. Rev. Lett. 12 (11), 300 (1964).
3. R. Davis, Jr, Phys. Rev. Lett. 12 (11), 303 (1964).
4. J. N. Bahcall, Phys. Rev. Lett. 17 (71), 398 (1966).
5. J. N. Bahcall, N. A. Bahcall, G. Shaviv, Phys. Rev. Lett., 20 (211), 1209 (1968).
6. R. Davis, Jr, D. S. Harmer, K. C. Hoffman, Phys. Rev. Lett. 20 (21), 1205 (1968).

*) Это утверждение автора носит слишком категорический характер. Более подробное рассмотрение показывает, что в полную скорость реакции $\nu_{\odot} + ^7\text{Li} \rightarrow ^7\text{Be} + e^-$ — заметный вклад могут вносить солнечные нейтрино от реакции $e^- + ^7\text{Be} \rightarrow ^7\text{Li} + \nu$. Поэтому получение информации об относительной скорости протекания на Солнце различных термоядерных реакций с помощью лишь двух экспериментов — на основе ^{37}Cl и ^7Li , представляется сейчас более сложной задачей (см. Г. В. Домогацкий и, Препринт ФИАН № 153, 1969).