

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 2002

Полвека с солнечными нейтрино

Р. Дэвис мл.

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2002 г.)

PACS numbers: 14.60.Lm, 95.55.Vj, 96.40.Fg, 96.40.Tv, 96.60.Vg

Нейтрино — это нейтральные, практически безмассовые частицы, движущиеся почти со скоростью света и легко проходящие через вещество. В 1930 году Вольфганг Паули (Нобелевский лауреат по физике 1945 г.) постулировал существование нейтрино как частицы, которая уносит энергию, импульс и спин при бета-распаде. В 1933 году Энрико Ферми (Нобелевский лауреат по физике 1938 г.) назвал эту частицу нейтрино (от итал. "нейтрончик") и включил ее в свою теорию бета-распада.

Солнце черпает энергию от ядерных реакций синтеза, в которых водород превращается в гелий. Каждый раз, когда четыре протона превращаются в гелий, образуются два нейтрино. Этим нейтрино требуется всего две секунды для того, чтобы выйти на поверхность Солнца и еще около восьми минут, чтобы достичь Земли. Таким образом, нейтрино говорят нам о том, что происходило в центре Солнца восемь минут назад. Солнце производит много нейтрино, порядка $1,8 \times 10^{39}$ в секунду, и даже на Земле, на расстоянии 150 млн км от Солнца, около 100 миллиардов нейтрино в секунду проходят через площадку размером с ноготь большого пальца (около 1 см²). Они проходят сквозь Землю так, как если бы ее вообще не было, и атомы человеческого тела захватывают одну такую частицу раз в семьдесят лет, т.е. раз в жизни. Как мы увидим, нейтрино захватили меня в самом начале моей карьеры.

Я получил степень доктора философии по физической химии в Йельском университете в 1942 г. [1] и сразу же попал в армию как офицер запаса. После войны я решил искать научно-исследовательскую работу в области прикладной химии для нужд ядерной физики. После двух лет работы в химической компании Monsanto (Monsanto Chemical Company) в области прикладной радиохимии, которой интересовалась Комиссия по атомной энергии, мне посчастливилось попасть в только что созданную Брукхейвенскую национальную лабораторию. Брукхейвенская лаборатория создавалась с целью поиска мирного применения атома во всех областях фундаментальной науки: химии, физике, медицине и инженерии.

Р. Дэвис мл. (R.Davis Jr.) Department of Physics and Astronomy,
University of Pennsylvania, Philadelphia, PA 19104;
Chemistry Department, Brookhaven National Laboratory, Upton,
NY 11973, USA

Когда я поступил на работу в Отдел химии в Брукхейвене, я спросил заведующего отделом Ричарда Додсона, что мне надо будет делать. К моему удивлению и удовольствию, он сказал, чтобы я пошел в библиотеку и нашел что-нибудь интересное для работы. Я нашел вдохновляющий обзор Крейна по нейтрино [2]. Следующая цитата из Крейна показывает, что физика нейтрино была широко открытой для исследований областью: "Не каждый осмелится сказать, что верит в существование нейтрино, однако с уверенностью можно утверждать, что едва ли найдется кто-то, не использующий гипотезу нейтрино при изучении теории бета-распада". Нейтрино также оказалось подходящей областью для приложения моих знаний в области физической химии. Итак, мне очень повезло, что я оказался в Брукхейвене, где мог заниматься именно тем, что мне было интересно и к тому же получать за это деньги. Крайн довольно долго изучал возможность использования экспериментов с отдачей импульса взаимодействующих частиц для изучения нейтрино. Я немедленно заинтересовался этими экспериментами (рис. 1). Я провел первый год работы, изучая отдачу атомов ^{107}Ag в распадах атомов ^{107}Cd при

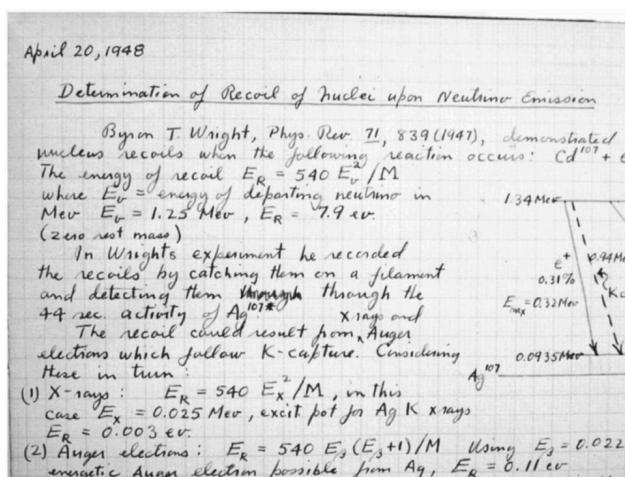


Рис. 1. Первая страница моего лабораторного журнала в Брукхейвенской национальной лаборатории. Нейтрино "запечатли" меня с самого начала.

электронном захвате, однако результаты экспериментов оказались неоднозначными.

Моим первым удачным экспериментом стало изучение энергии отдачи ядра ^7Li , приобретаемой в распаде ^7Be при электронном захвате. При распаде ^7Be испускается одно моноэнергетическое нейтрино с энергией 0,862 МэВ, поэтому образующееся ядро ^7Li должно приобретать характеристическую энергию отдачи 57 эВ. Измерение этого процесса доказывает существование нейтрино. В моем эксперименте измерялся энергетический спектр отдачи ионов ^7Li от поверхности из ^7Be . Он оказался в согласии с ожидаемым испусканием одного нейтрино [3]. Это был очень красивый результат, однако меня обошла группа из Иллинойского университета [4].

В 1951 году я начал работать над радиохимическим экспериментом по регистрации нейтрино методом, предложенным Понтекорво в [5]: захват нейтрино в реакции $^{37}\text{Cl} + v_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$. Короткая статья Бруно Понтекорво была достаточно подробной, и описанный им метод извлечения аргона с помощью продувки четыреххлористого углерода и подсчета числа атомов ^{37}Ar в газоразрядном счетчике имел много схожего с технологиями, которые я в конечном счете использовал в своих экспериментах. Эта статья была отчетом Лаборатории Чок-Ривер в Канаде и была засекречена Комиссией по атомной энергии США, так как высказывались опасения, что этот метод может быть использован для измерения выходной мощности ядерных реакторов. Луис Альварес (Нобелевский лауреат по физике 1968 г.) предложил использовать хлор-argonную реакцию для регистрации солнечных нейтрино в большом количестве концентрированного раствора хлорида натрия (соли) [6], однако он не стал добиваться постановки такого эксперимента. Казалось, что больше никто не собирался опробовать хлор-argonный метод регистрации нейтрино, и я счел естественным и своевременным начать работу по осуществлению этого эксперимента.

В методе Понтекорво нейтрино захватывается атомом ^{37}Cl с образованием ^{37}Ar — радиоактивного изотопа, который опять превращается в ^{37}Cl по каналу обратного бета-процесса со временем полураспада 35 суток. Пороговая энергия реакции захвата составляет 0,814 МэВ. Это означает, что нейтрино с энергией меньше 0,814 МэВ не будет захватываться. Существует два потенциальных источника нейтрино: ядерные реакторы и Солнце, и оба они рассматривались Понтекорво в 1946 г. как возможные объекты экспериментального исследования.

В первом эксперименте с использованием хлор-argonной реакции я пытался зарегистрировать нейтрино от ядерного реактора, при этом в качестве вещества-мишени был взят четыреххлористый углерод (CCl_4) [7]. Бак с четыреххлористым углеродом емкостью 3800 литров помещался вблизи Брукхейвенского исследовательского графитового реактора и экспонировался в течение месяца или двух. Затем выделялся аргон и небольшим счетчиком Гейгера подсчитывалось число образовавшихся атомов. Поток нейтрино от этого реактора был недостаточен для регистрации мишенью такого размера, поэтому нейтрино не были зарегистрированы. Более того, реакторы излучают антинейтрино, а для реакции $^{37}\text{Cl} - ^{37}\text{Ar}$ требуется нейтрино. Впрочем, в то время было неясно, являются ли нейтрино и антинейтрино разными частицами и как они могли бы

отличаться. В конце концов, в природе известны другие примеры тождественности частиц и античастиц, например, в случае фотонов и пи-нуль мезонов. Так как фон от космических лучей был значителен, я поместил 3800-литровый бак с четыреххлористым углеродом на глубину 5,8 метра под землей. Из темпа счета атомов ^{37}Ar , исправленного с учетом фона, мне удалось установить верхний предел потока солнечных нейтрино 40000 SNU, в 15000 раз выше моего окончательного результата 2,56 SNU (solar neutrino unit, или SNU — единица потока солнечных нейтрино, определяемая как 10^{-36} захватов нейтрино одним атомом-мишенью в секунду). Один из рецензентов моей статьи был не слишком сильно впечатлен таким верхним пределом и прокомментировал: "Всякий эксперимент подобного рода, не обладающий требуемой чувствительностью, в действительности не имеет никакого отношения к вопросу о существовании нейтрино. Для иллюстрации моей точки зрения скажу, что никто бы не стал писать научную статью, описывающую эксперимент, в котором экспериментатор, стоящий на горе с целью достать до Луны, заключает, что расстояние до Луны больше восьми футов от вершины горы". Было ясно, что Брукхейвенский реактор — недостаточно мощный источник нейтрино, поэтому в 1954 г. я провел эксперимент, в котором 3800 литров CCl_4 были установлены у основания одного из реакторов в Саванна-Ривер — наиболее мощных источников антинейтрино в мире.

Можно рассчитать полную скорость захвата атомами ^{37}Cl антинейтрино, порождаемых в реакциях ядерного деления, в предположении об эквивалентности частиц нейтрино и антинейтрино. Чувствительность регистрации нейтрино этой установкой и их поток от реакторов Саванна-Ривер были вполне достаточными для решающего эксперимента по установлению идентичности нейтрино и антинейтрино. Я не зарегистрировал от реактора ни одного нейтрино и нашел, что скорость захвата нейтрино была в пять раз ниже скорости захвата антинейтрино. Позже я провел в Саванна-Ривер эксперимент с 11400-литровой емкостью, который понизил верхний предел скорости захвата нейтрино до уровня 1/20 от скорости захвата антинейтрино [8]. Пока я находился в Саванна-Ривер, Фредерик Рейнес (Нобелевская премия по физике 1995 г.) и Клайд Кован с соавторами ставили превосходный эксперимент по первой регистрации антинейтрино [9, 10]. Этот эксперимент ясно продемонстрировал, что нейтрино, постулированное Паули, действительно было реальной частицей. Мой эксперимент показал, что нейтрино не тождественно антинейтрино.

Как я упомянул выше, энергия Солнца генерируется при слиянии четырех атомов водорода с образованием атома гелия. Сейчас я хочу рассмотреть эти реакции немного более подробно и отметить те из них, в которых рождается нейтрино с энергиями, достаточными для регистрации в хлор-argonном эксперименте. Относительные скорости ядерных реакций на Солнце основаны на детальном моделировании температур, давлений и содержания элементов в центре Солнца. В этих расчетах используются лабораторно измеренные и теоретические сечения соответствующих ядерных реакций. В таблице 1 и на рис. 2 приводятся наилучшие современные оценки этих сечений. Эти оценки меняются со временем, однако предсказанный поток солнечных нейтрино мало изменился с конца 1960-х годов.

Таблица 1. Термоядерные реакции на Солнце, в которых рождается нейтрино

	Реакция	Частота	Энергия, МэВ	Название
PPI	$p + p \rightarrow {}^2H + e^+ + \nu_e$	99,75 %	0,0–0,42	pp рр
	$p + e^- + p \rightarrow {}^2H + \nu_e$	0,25 %	1,44	
	${}^2H + p \rightarrow {}^3He + \gamma$	100 %		
PPII	${}^3He + {}^3He \rightarrow {}^4He + 2p$	85 %		7Be
	${}^3He + {}^4He \rightarrow {}^7Be + \gamma$	15 %		
PPIII	$e^- + {}^7Be \rightarrow {}^7Li + \nu_e$	99,99 %	0,86, 0,38	8B
	$p + {}^7Li \rightarrow {}^4He + {}^4He$	100 %		
	$p + {}^7Be \rightarrow {}^8B + \gamma$	0,01 %	0–14,1	
	${}^8B \rightarrow {}^4He + {}^4He + e^+ + \nu_e$	100 %		

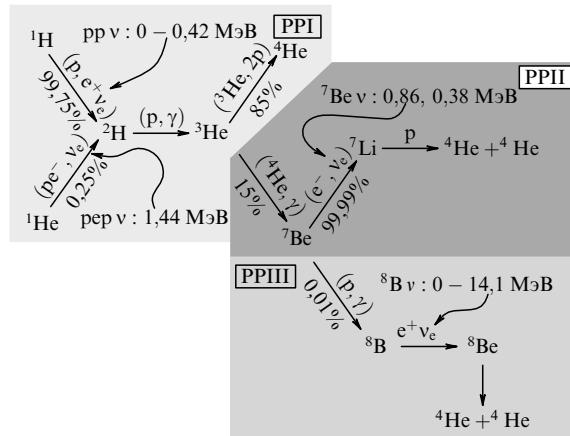


Рис. 2. Основные термоядерные реакции на Солнце и выделяющиеся в них нейтрино.

Большая часть времени уходит на взаимодействие двух протонов для образования ядра дейтерия с испусканием позитрона и электронного нейтрино, однако эти нейтрино имеют энергию ниже порога захвата атомами хлора (такие нейтрино называются pp-нейтрино). В одном из 400 случаев два протона реагируют с электроном с образованием дейтерия и нейтрино. Эти так называемые "рер-нейтрино" имеют достаточно высокую энергию, однако они не очень многочисленны. Все ядра дейтерия вступают в реакцию с протонами и образуют 3He , и большинство ядер 3He реагируют друг с другом с образованием ядра 4He и двух протонов. Последняя реакция происходит в 85 % случаев. Главная ветвь этой цепочки обычно называется PPI-цепочкой (рис. 2, табл. 1).

В пятнадцати процентах случаев, однако, ядра 3He и 4He вступают в реакцию и дают 7Be . Затем практически все ядра 7Be захватывают электрон и образуют 7Li и нейтрино. 7Li захватывает протон и образует два ядра 4He . Эта реакция замыкает так называемую PPII-цепочку, однако одно из 10000 ядер 7Be захватывает протон и образует 8B (рис. 2, табл. 1). Бор-8 распадается в 8Be , который делится на два ядра 4He , позитрон и электронное нейтрино, замыкая PPIII-цепочку. Именно эти нейтрино от 8B дают основной вклад в поток

солнечных нейтрино, который я зарегистрировал, хотя в нем есть также малая примесь рер- и 7Be -нейтрино.

В 1950-х годах полагали, что PPI-цепочка была единственным значительным источником солнечных нейтрино, однако энергия доминирующих в ней рр-нейтрино слишком мала для регистрации в реакции с ${}^{37}Cl$. Полагали, что ветвь pp-цикла, приводящая к образованию 7Be , является существенной и что реакции идут по этому каналу лишь в 0,015 % случаев. В CNO-цикле, в котором четыре протона образуют ядро 4He , могли бы рождаться высокоэнергетические нейтрино в реакциях ${}^{13}N(e^+, \nu_e) {}^{13}C$ и ${}^{15}O(e^+, \nu_e) {}^{15}N$, однако оставалось неясным, идут ли вообще реакции CNO-цикла на Солнце. Таким образом, в то время казалось, что эксперимент по регистрации солнечных нейтрино невозможен.

Ситуация резко изменилась после того, как Хольмгрен и Джонсон [11] показали, что скорость реакции ${}^3He + {}^4He \rightarrow {}^7Be + \gamma$ в 1000 раз больше, чем считалось ранее. Сразу стало ясно, что ветвь pp-цикла, ведущая к образованию 7Be , реализуется в 15 % случаев, а не в 1 из 7000 и, значит, является очень важной. Более того, 7Be мог реагировать с протоном и превращаться в 8B . Эти два радиоактивных изотопа 7Be и 8B являются источниками нейтрино с достаточно высокой энергией. Относительные скорости захвата электронов и протонов ядром 7Be в то время не были измерены, однако оценки этих скоростей допускали возможность, что практически все ядра 7Be захватят протон и превратятся в 8B . Распад 8B в 8Be сопровождается испусканием нейтрино с характерной энергией 7 МэВ. У.А. Фаулер и А.Дж.У. Камерон немедленно сообщили мне об этих результатах. Они указали [12, 13], что поток таких нейтрино от Солнца, возможно, будет легко зарегистрировать хлор-аргонным методом. Первоначальные оценки были очень оптимистичными, порядка нескольких захватов в сутки при условии, что все ядра 7Be захватывают протон и превращаются в 8B , так что мы установили 3800-литровый бак перхлорэтилена (C_2Cl_4) в известняковой шахте в Барбертоне вблизи Акрона, штат Огайо. Первые результаты нас разочаровали: ни одного сигнала от ${}^{37}Ar$, образованного при захвате нейтрино, найдено не было.

Бакол [14] рассчитал скорость электронного захвата ядром 7Be после того, как я указал на важность этого процесса. Примерно в это же время Каванах [15] измерил скорость реакции ${}^7Be(p, \gamma)$, в которой рождаются ядра 8B , и показал, что она безнадежно мала. Ничтожным было именно отношение скоростей двух реакций, в которые вступает 7Be . Если бы большинство ядер 7Be захватывали электрон и образовывали 7Li , а не протон с образованием 8B (см. рис. 2), то нам было бы чрезвычайно трудно зарегистрировать нейтрино. Рейнес [16] писал: "Вероятность отрицательного результата даже при использовании детекторов с тысячами или, возможно, сотнями тысяч галлонов перхлорэтилена разубедит экспериментаторов делать дальнейшие попытки".

Ситуация стала значительно лучше в 1963 г., после того, как Джон Бакол аккуратно рассчитал скорость захвата 8B -нейтрино и показал, что она в 20 раз выше, чем считалось ранее. На основании этого мы предложили большой хлор-аргонный эксперимент. Теоретическая и экспериментальная части были описаны в двух идущих одна за другой статьях [17, 18]. Теория давала указания, какого объема должен быть бак: предсказанная скорость

образования атомов ^{37}Ar была от 4 до 11 штук в день в 100000 галлонах (378000 литров) перхлорэтилена. Нами измерения фона космических мюонов в Барбертоне были использованы для определения надлежащей глубины установки бака.

В конце концов события 1950-х — начала 1960-х годов привели к тому, что Брукхейвенская национальная лаборатория при поддержке отделения химии Комиссии по атомной энергии США построила 100000-галлонный хлор-argonный детектор нейтрино в золотодобывающей

шахте Хоумстейк в Лиде, штат Южная Дакота. Строительство установки в 1965–1966 гг. детально описано в серии статей, опубликованных в журнале *Острые грани* (Sharp Bits), издававшемся горнодобывающей компанией Хоумстейк для своих сотрудников. На глубине 4850 футов (1478 м) под землей в шахте были вырублены большая камера и комната меньших размеров для контрольной аппаратуры. На рисунке 3 показана фотография наполовину вырубленной главной камеры. Бак был изготовлен компанией "Чикаго Бридж энд Айрон", славившейся своим изготовлением муниципальных резервуаров для воды, кожухов для ядерных реакторов, камер для проведения модельных космических испытаний и других вместительных емкостей. Заказанный резервуар должен был быть изготовлен из отдельных сегментов с размерами, проходящими через ствол шахты. На рисунке 4 показано одно из днищ емкости, разложенное как лепестки цветка на полу большой камеры. Все сварочные швы проверялись рентгеновским излучением. На рисунке 5 показано, как устанавливают рентгеновский излучатель на оси емкости. За каждым сварочным швом бака помещалась пленка, чувствительная к рентгеновским лучам, которая экспонировалась рентгеновским источником изнутри бака. Следующим шагом было испытание бака на удержание вакуума. Воздух из бака был откачен 12-дюймовым диффузионным насосом (рис. 6), а затем бак был проверен на удержание вакуума при помощи детектора утечки гелия. Для извлечения атомов аргона из бака перхлорэтилен продувался гелием. Эта процедура эффективно осуществлялась с помощью специального устройства, называемого эдуктором. На рисунке 7 показано, как его проверяют в плавательном бассейне Брукхейвенской лаборатории. Разумеется, плавательный бассейн заполнялся водой, а не перхлорэтиленом. На рисунке 8 показано положение эдуктора внутри окончательно построенного бака.

На рисунке 9 приведена схема всего эксперимента. При экстрагировании аргона, которое производилось каждые два-три месяца, два больших насоса использовались для циркуляции перхлорэтилена через эдукторы.



Рис. 3. Наполовину вырубленная большая камера для установки бака в шахте Хоумстейк (лето 1965 г.). Из сентябрьского 1965 г. выпуска бюллетеня *Острые грани*, издаваемого горнодобывающей компанией Хоумстейк.



Рис. 4. Детали одного из торцов бака разложены на полу большой камеры. Из июня 1965 г. выпуска *Острых граней*.

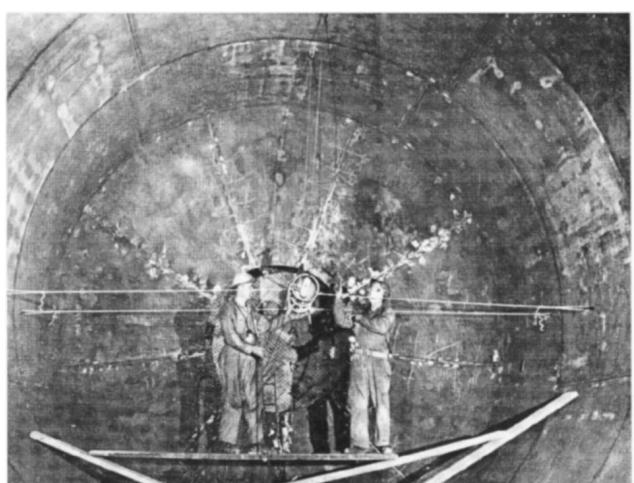


Рис. 5. Установка рентгеновского источника на оси бака. Снаружи бака за каждым сварочным швом находилась рентгеночувствительная пленка для контроля качества сварки. (*Острые грани*, июнь 1966 г.)



Рис. 6. Весь бак целиком был проверен на герметичность инженерами компании "Чикаго Бридж энд Айрон". Емкость и подводящие трубы помещались в гелиевую среду. К вакуумному насосу, который откачивал воздух из емкости, был подсоединен небольшой высокочувствительный масс-спектрометр. (*Острые грани*, сентябрь 1966 г.)

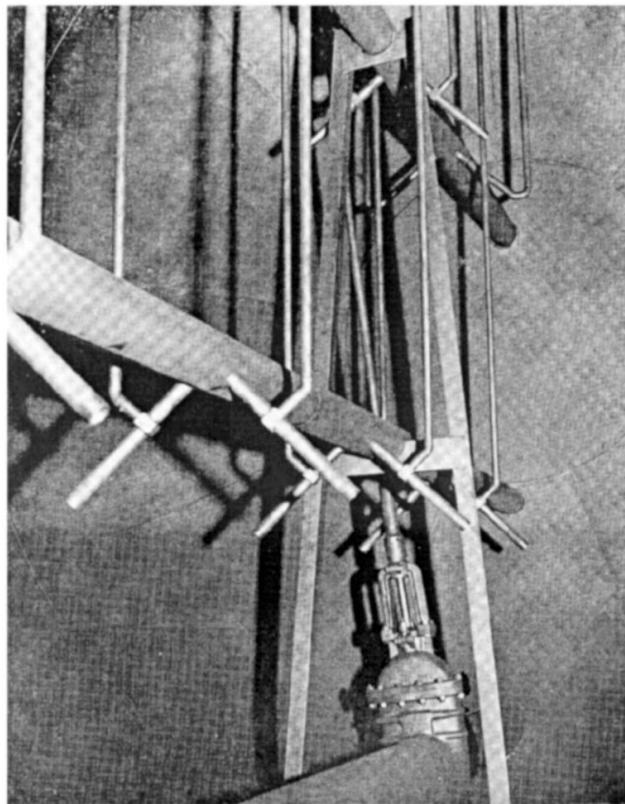


Рис. 8. Двойной ряд эдукторов, установленных внутри бака. Из сентябрьского 1966 г. выпуска *Острых граней*.

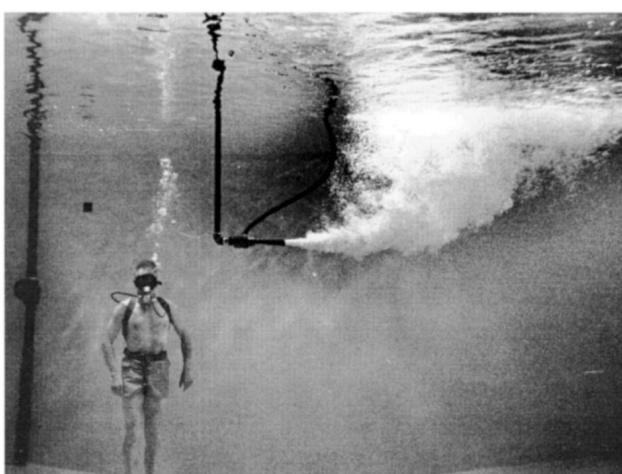


Рис. 7. Испытание эдукторов для эффективного перемешивания гелия и перхлорэтилена в плавательном бассейне в Брукхейвене (используется воздух и вода). Снимок взят с сайта Брукхейвенской национальной лаборатории (<http://www.bnl.gov/bnlweb/raydavis/images/hires/11-755-04.jpg>).

Поток перхлорэтилена был около 1500 литров в минуту. Во время гелиевых продувок перхлорэтилена гелий скапливался в верхних 5 % объема бака и прогонялся со скоростью 17000 литров в минуту через контрольную комнату, в которой осуществлялась экстракция атомов аргона. Большой конденсатор, помещенный около бака, вымораживал перхлорэтилен, а фильтр из древесного угля в контрольной комнате (рис. 10) улавливал аргон. Слежение за функционированием всей системы трубопроводов осуществлялось аппаратурой из контрольной комнаты (рис. 11). Около 95 % аргона, образующегося в баке, извлекалось за 20 часов продувки. После извлечения аргон очищался от сопутствующих примесей и помещался в маленькие пропорциональные счетчики с объемом 0,25 или 0,5 см³ (рис. 12). Поначалу образцы

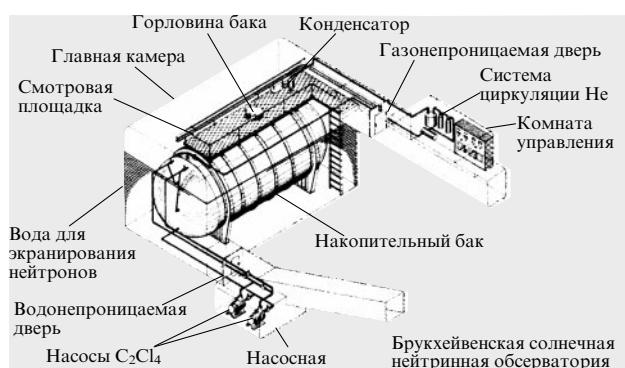


Рис. 9. Схема хлор-аргонного эксперимента. (*Острые грани*, весна 1969 г.)

доставлялись в Брукхейвен в защитных контейнерах, в качестве которых использовались пустые гильзы больших корабельных снарядов, сделанных до появления атомного оружия (рис. 13). Позднее прибор для счета распадов атомов аргона был установлен глубоко в шахте Хоумстейк с целью использования гораздо лучшей естественной защиты от космических лучей слоем горных пород.

Для наиболее точного предсказания скорости захвата солнечных нейтрино детектором в Хоумстейке нужно было измерить сечения рождения нейтрино в ядерных реакциях и рассчитать их значения для условий в недрах Солнца. Эта трудоемкая задача была в основном выполнена в Калифорнийском технологическом институте группой под руководством Уильяма А. Фаулера (Нобе-

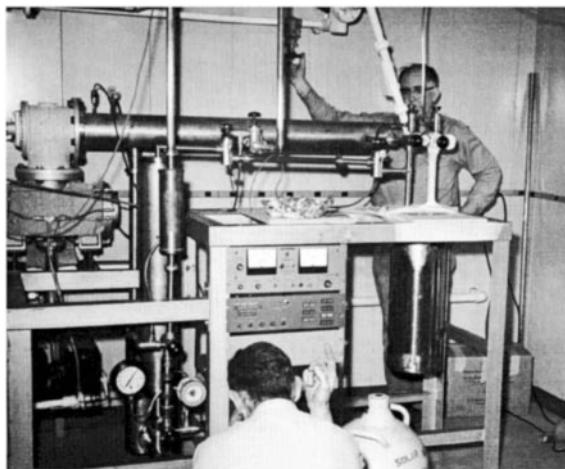


Рис. 10. Аргон задерживался большим угольным фильтром (на снимке под столом), охлаждаемым жидким азотом. (*Острые грани*, весна 1969 г.)



Рис. 11. Джон Галвин, брукхейвенский техник, проработавший со мной много лет, и автор перед панелью управления. С этого места можно было наблюдать за ходом всего эксперимента. (*Острые грани*, весна 1969 г.)

левский лауреат по физике 1983 г.). Свой вклад в изучение фундаментальных физических процессов для нужд нейтринной астрономии на первых порах внесли многие другие астрофизики и астрономы. Наша задача в Брукхейвене была куда проще и нам (Дону Хармеру, Кену Хоффману и мне) оставалось только построить большой детектор и заставить его работать.

Эксперимент в Хоумстейке начался в 1967 г. Уже после первой экспозиции стало ясно, что поток нейтрино от Солнца был ниже предсказанного. 11 августа 1967 г. я написал Вилли Фаулеру, который в то время был в академическом отпуске в Кембриджском университете, следующее письмо:

"Дорогой Вилли,

Я все-таки получил предварительный результат нашей первой хорошей экспозиции. Полученный образец привезли 22 июня, и счет распадов продолжался вплоть до сегодняшнего дня. Теперь я извлекаю образец и буду пересчитывать фон. Так что у нас есть некий результат, и за последние несколько недель я сказал об

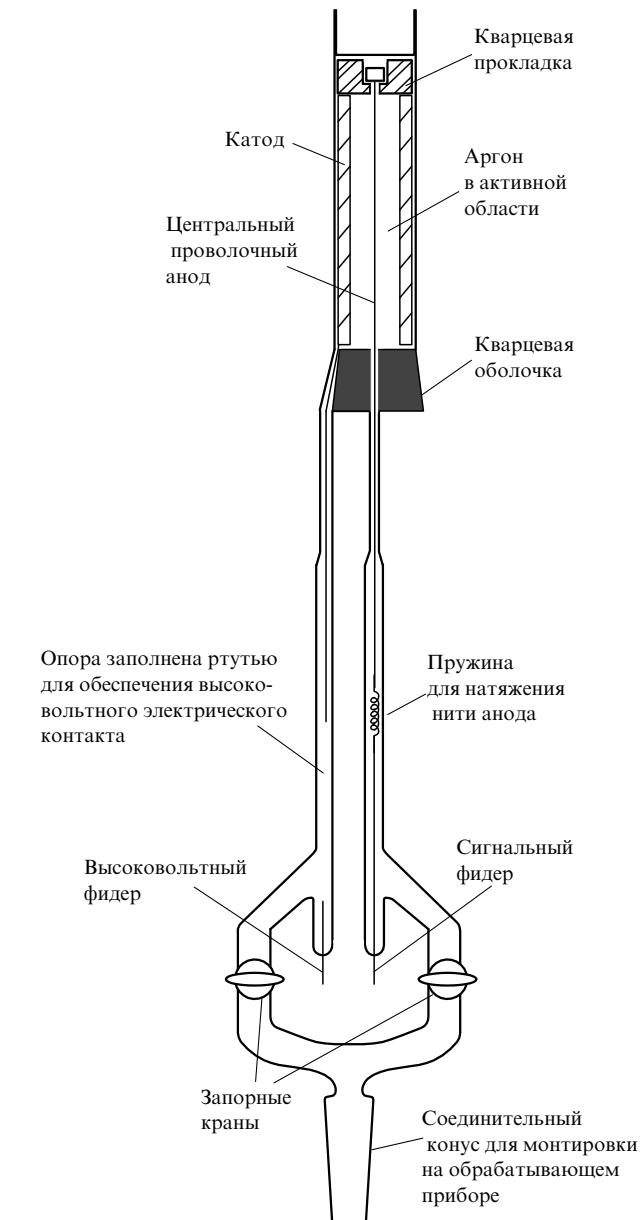


Рис. 12. Для подсчета числа образованных атомов ^{37}Ag использовались небольшие пропорциональные счетчики с характерным размером порядка 20 см и активной областью длиной 30 мм и диаметром 4,5 мм. (Из статьи [21].)

этом кое-кому из интересующихся. Разумеется, я много разговаривал по телефону с Джоном Баколом.

Кажется, бак и система очистки гелия работают достаточно хорошо. Прежде чем производить высокочувствительные измерения, первым делом надо было удалить аргон из воздуха и уменьшить его содержание до уровня порядка 1 cm^3 . В конце концов это удалось сделать, и первые хорошие измерения начались 5 мая. К этому времени доставили контейнер с Ar^{36} объемом 0,115 cm^3 , и начались первые измерения радиоактивного распада. Измерения продолжались 48 суток, и 22 июня мы посчитали количество атомов аргона-36 с 94 %-ной эффективностью. На прилагаемом графике приводится полученный спектр импульсов. Как видите, заметного пика Ar^{37} (на 3,0 кэВ) не наблюдается. На отдельном графике также приведен уровень фона в этих измерениях

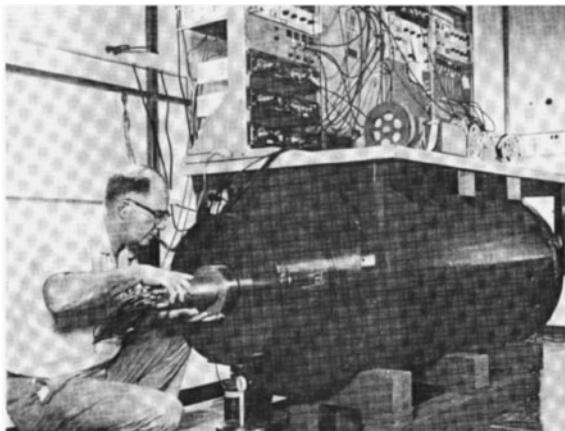


Рис. 13. В течение нескольких лет после начала эксперимента для защиты от внешнего фона счетчики помещались в пустые гильзы корабельных снарядов. На рисунке я помешаю счетчик в гильзу. (*Острые грани*, весна 1969 г.)

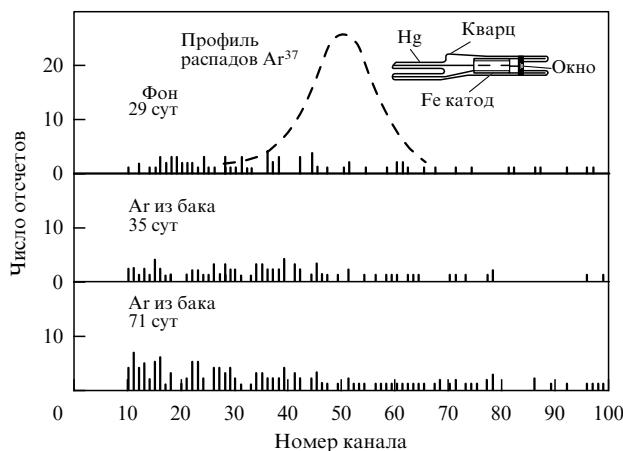


Рис. 14. Импульсный спектр первых двух экспозиций хлор-аргонного эксперимента. Ни в одной из экспозиций не было обнаружено отсчетов на уровне выше фона. Рисунок из работы [19].

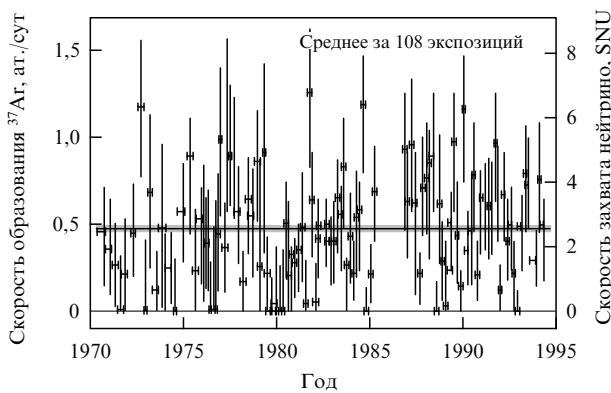


Рис. 15. Сводный результат всех экспозиций, проведенных в Хоумстейке, после внедрения системы дискриминации фоновых событий по времени фронта нарастания импульса. Фон вычен. За период времени в 25 лет было зарегистрировано 2200 атомов ^{37}Ar , что соответствует среднему значению потока нейтрино от Солнца в 2,56 SNU. Отсутствие данных в 1986 г. связано с поломкой обоих насосов для циркуляции перхлорэтилена. Основано на данных из работы [21].

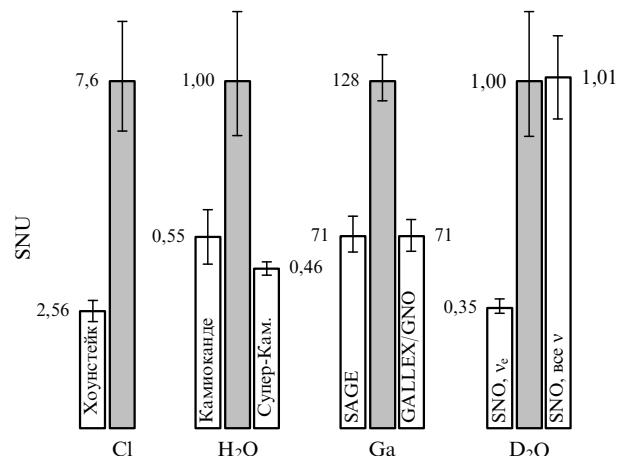


Рис. 16. Сравнение измеренного потока солнечных нейтрино в хлор-аргонном эксперименте, двух галлий-германиевых экспериментах (SAGE и GALLEX/GNO), двух водных черенковских экспериментах (Камиоканде и Супер-Камиоканде) и эксперименте на тяжелой воде D₂O в SNO с теоретическими расчетами [22]. Высота столбцов, соответствующих теоретическим предсказаниям, сделана одинаковой для облегчения сравнения с экспериментальными данными. Регистрация всех сортов нейтрино детектором SNO решила наконец "проблему солнечных нейтрино". Рисунок по схеме Джона Бакола (<http://www.sns.ias.edu/~jnb/>).

непосредственно перед помещением образца. Сравнивая эти графики, мы приходим к следующим результатам:

Аргон из 10^5 -гallonного бака = 16 ± 4 отсчета

(полная эксп. 39,7 суток)

Фон = $4 \times (39,7/11,5) = 14 \pm 4$ отсчетов (для 39,7 суток)

Увеличение = 2 ± 5 отсчетов

Используем: $2,1 \times 10^{30}$ атомов Cl³⁷ в баке

Эффективность счета $\approx 0,50$

Тогда $\Sigma\sigma = (0,2 \pm 0,4) \times 10^{-35} \text{ с}^{-1} \leq 0,6 \times 10^{-35} \text{ с}^{-1}$

Принимаем $\sigma(\text{B}^8) = 1,35 \times 10^{-42}$ (Бакол)

$\phi_{\text{B}^8} \leq 0,5 \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Этот предел достаточно низкий, однако, согласно последней работе Бакола и Шавива, поток B⁸-нейтрино равен $1,4(1 \pm 0,6) \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Я надеюсь улучшить эти результаты при уточнении фона счетчика, увеличении статистики и времени экспозиции.

Пожалуйста, рассматривайте эти результаты как очень предварительные. Существует несколько моментов, которые необходимо проверить, прежде чем принимать эти результаты за надежные наблюдения. Я начну следующую экспозицию в сентябре — мы готовы, включайте Солнце.

Надеюсь когда-нибудь показать Вам всю установку. Окружающая местность далека от английских видов, однако здесь есть свои достопримечательности".

Измеренный поток нейтрино составил одну треть от значения, предсказанного Баколом и Шавивом. Из моей шутливой просьбы к Вилли "включить Солнце" видно, как уже тогда я был озабочен этим результатом.

Наши первые результаты были доложены в сентябре на конференции Американского химического общества и впоследствии опубликованы в работе [19]. Статья называлась *Поиск солнечных нейтрино*. Как всем известно, если заглавие работы начинается со слов *Поиск...*, значит, ничего найдено не было. Верхний предел составил 3 SNU. В параллельно вышедшей работе [20] поток нейтрино в стандартной солнечной модели предсказывался на

уровне $7,5 \pm 3$ SNU. Накопление данных на протяжении почти 30 лет и 30-летнее уточнение стандартной модели Солнца значительно улучшили точность: современное значение потока нейтрино, регистрируемого экспериментом в Хоумстейке, равно 2,56 SNU [21], а теоретическое предсказание составляет 7,6 SNU [22]. Эти числа не претерпели существенных изменений: Солнце производит одну треть ожидаемых нейтрино. Таким образом, "проблема солнечных нейтрино" возникла в 1967 г. и оставалась нерешенной до конца XX века.

Аргон-37 распадается с захватом электрона на К-оболочку и испусканием оже-электрона с характерным распределением по энергиям. На рисунке 14 приведены спектры энергий электронов, измеренных пропорциональным счетчиком, из статьи [19]. Отсчеты от распадов аргона, полученного в результате двух экспозиций бака, и от фона не отличались в диапазоне энергий, соответствующих распаду ^{37}Ar . Было ясно, что единственный способ улучшить предел чувствительности детектирования солнечных нейтрино состоял в уменьшении фона.

Инженеры-электронщики из Брукхейвена Велжко Радека и Ли Роджерса нашли простое, но элегантное решение этой проблемы, разработав систему дискриминации отсчетов от распадов ^{37}Ar и фоновых событий по времени нарастания переднего фронта импульса. Когда в пропорциональном счетчике происходит радиоактивный распад (см. рис. 12), образуются пары ион-электрон, электроны быстро движутся к центральному аноду и производят электрический импульс. Ширина импульса зависит от числа образованных электронов, которое, в свою очередь, определяется энергией распада. Доминирующий канал радиоактивного распада ядра ^{37}Ar , захват вылетающего из ядра электрона на К-оболочку, приводит к выделению энергии 2,82 кэВ в газе счетчика от оже-электронов, образующихся при перестройке конфигурации атомных электронов. Энергия оже-электронов распределена вблизи 100 мкм, и они приводят к образованию примерно 100 электрон-ионных пар. Время дрейфа всех электронов примерно одинаково, поэтому фронт нарастания импульса резкий. Основной источник фона — взаимодействие гамма-лучей с газом в счетчике, приводящее к появлению комптоновских электронов. Последние генерируются вдоль всей траектории гамма-фотона внутри счетчика, поэтому фронт нарастания импульса от них более плавный. Новая электронника измеряла не только энергию каждого распада, но и время нарастания импульса. Мы начали использовать эту новую систему в 1970 г., и после года наблюдений нам удалось обнаружить четкий нейтринный сигнал. Нами были также предприняты другие меры для уменьшения фона. Так, мы установили аппаратуру для измерения распадов атомов аргона в шахте на глубине ~ 1500 м, чтобы вышележащие горные породы уменьшили фон, создаваемый космическими лучами в счетчике. Мы также заполнили комнату водой для дополнительного уменьшения фона от пород шахты.

Система определения крутизны фронта импульса вдохнула новую жизнь в эксперимент в Хоумстейке. Оказалось, что скорость образования нейтрино на Солнце действительно в три раза меньше теоретически предсказанного значения в моделях Солнца. В то время мне казалось, что наиболее разумное объяснение этому расхождению состояло в ошибочности солнечной модели. Многие физики полагали, что что-то было не

так с нашим экспериментом. Мы провели многочисленные тесты, дабы убедиться в надежности получаемых результатов и не нашли ни малейшей причины, связанной с экспериментом, которая бы уменьшила регистрируемый поток нейтрино. Например, мы поместили известное количество перхлорэтилена с изотопом ^{36}Cl в небольшой бак с обычным перхлорэтиленом. Радиоактивный хлор-36 распадается в ^{36}Ar , и мы извлекли нашим методом ожидаемое количество образовавшихся атомов ^{36}Ar . В большой бак с перхлорэтиленом в Хоумстейке может вставляться трубка. Мы поместили в нее источник нейтронов, и в результате (n, p)-реакции на ^{37}Cl образовывался ^{37}Ar . Было измерено в точности ожидаемое количество ^{37}Ar . Мы ввели 500 атомов ^{37}Ar в большой бак и подсчитали их количество нашим методом. Я не знал, сколько атомов аргона-37 было добавлено — мне сказали об этом после результатов измерений. Мы использовали аргон в качестве рабочего газа в начале каждого эксперимента и чередовали состав со стабильными изотопами ^{36}Ar и ^{38}Ar , так что имелась возможность проверки эффективности извлечения атомов ^{37}Ar после подсчета его радиоактивных распадов методом масс-спектроскопии. В атмосферном воздухе доминирует изотоп аргон-40 (99,6 % от полного количества аргона), поэтому масс-спектроскопические измерения количества ^{40}Ar проверяли наличие утечек газа из установки. Кроме того, измерялась эффективность каждого счетчика. Эти и другие тесты, а также штатный режим прохождения эксперимента описаны в статье [21].

Проблема солнечных нейтрино оставалась нерешенной с 1967 по 2001 гг. В течение этого времени как измеренный поток нейтрино, так и его теоретические оценки изменились незначительно. Я никогда не находил ошибок в своих экспериментах. Джон Бакол никогда не находил каких-либо просчетов в стандартной модели Солнца; в действительности, результаты гелиосеймологии подтвердили профиль температуры в его модели Солнца. Не было сомнений, что теория и наблюдения различались в три раза. В работе [21] суммированы все данные эксперимента в Хоумстейке. После внедрения системы дискриминации фоновых событий по фронту нарастания импульса было проведено 108 экспозиций (рис. 15). За 25 лет радиохимическим методом было извлечено и измерено 2200 атомов ^{37}Ar и получено значение потока солнечных нейтрино $2,56 \pm 0,16$ (статистическая ошибка) $\pm 0,16$ (систематическая ошибка) SNU. Современное теоретическое предсказание стандартной солнечной модели дает $7,6_{-1,1}^{+1,3}$ SNU [22].

Результаты эксперимента в Хоумстейке вызвали огромную активность теоретиков. Вот некоторые наиболее интересные и в ретроспективе забавные альтернативы стандартной солнечной модели. Фаулер [23, 24] и Шелдон [25] предложили считать, что в центре Солнца существует вековая неустойчивость темпа выделения энергии. Так как свету требуется около 10 млн лет для выхода на поверхность Солнца, а поток нейтрино дает информацию о том, что происходило в ядре Солнца всего 8 минут назад, современный темп энерговыделения может быть ниже. В 1969 году Грибов и Понтекорво [26] (и позднее Вольфенштейн [27]) предложили гипотезу нейтринных осцилляций, которая впоследствии была развита в работах Михеева и Смирнова [28] и теперь известна как МСВ-эффект. Несмотря на то, что сейчас именно осцилляции нейтрино считаются верным реше-

нием проблемы солнечных нейтрино, следует помнить, что в то время большинство физиков рассматривали эту гипотезу как элегантную, но крайне маловероятную теорию. Некоторые другие возможности более забавны, но все они предлагались уважаемыми физиками и астрофизиками. Либби и Томас [29] и Солпитер [30] выдвигали гипотезу кваркового катализа. Кочаров и Старбунов [31] предположили, что в настоящее время в Солнце есть переизбыток атомов ^3He . Циснерос [32] выдвинул гипотезу, что нейтрино может иметь значительный магнитный момент. Бакол и др. [33] предположили, что нейтрино могут распадаться. Демарк и др. [34] считали, что дефицит нейтрино может быть связан с быстрым вращением солнечных недр, которое уменьшает центральную плотность и температуру. Прентис [35] предположил, что Солнце находится на более поздней стадии своей эволюции, на которой водород в ядре почти выгорел, и ядро состоит из гелия. Клейтон и др. [36] выдвигали гипотезу, что энергия Солнца генерируется не в термоядерных реакциях, а при акреции на черную дыру в центре Солнца.

Долгое время эксперимент в Хоумстейке оставался единственным экспериментом по измерению потока нейтрино от Солнца. Пришлось ждать 23 года, прежде чем эксперимент Kamiokande подтвердил, что поток ^8B -нейтрино от Солнца действительно мал [37, 38]. В 1990-х годах начали действовать два радиохимических галлий-германиевых эксперимента, регистрирующие поток $\nu\nu$ -нейтрино путем измерения радиоактивных распадов ^{71}Ge : SAGE [39, 40] и GALLEX [41, 42]. Эти эксперименты показали, что между измеренным потоком нейтрино меньших энергий, возникающих в $\nu\nu$ -реакции, и теоретически ожидаемым значением в стандартной солнечной модели также есть расхождение примерно в два раза.

Похоже, что проблема солнечных нейтрино нашла свое решение после оглашения первых результатов экспериментов нейтринной обсерватории в Садбери (Sudbury Neutrino Observatory, SNO). На протяжении нескольких последних лет МСВ-эффект [27, 28] (возможность изменения сорта нейтрино при прохождении вещества) был наиболее привлекательным для объяснения проблемы солнечных нейтрино. Эта теория получила дополнительную поддержку в 1998 г., когда группа Супер-Камиоканда сообщила об обнаружении осцилляций атмосферных нейтрино, рождающихся в широких атмосферных ливнях [43]. В 2001 году группа из нейтринной обсерватории в Садбери обнародовала данные по регистрации электронных нейтрино от Солнца. Эти данные в сочетании с результатами Супер-Камиоканда позволили сделать вывод, что нейтрино осциллируют из одного сорта в другой [44]. В 2002 году дополнительные данные SNO убедительно доказали существование нейтринных осцилляций и привели в согласие полный поток нейтрино с теоретически ожидаемым значением [45].

На рисунке 16 приводится сравнение данных всех нейтринных экспериментов со стандартной солнечной моделью. Отметим, что только детектирование суммарного потока всех сортов нейтрино в SNO согласуется с моделью. Когда мы начинали солнечный нейтринный эксперимент в Хоумстейке, нам казалось, что мы понимаем, как устроено Солнце и что измерение потока солнечных нейтрино подтвердит теорию. Очевидно, все произошло не так, как предполагалось. Противоречие

между солнечными нейтринными экспериментами и стандартной солнечной моделью закончилось весьма эффектно: и в эксперименте, и в модели Солнца было все правильно; все дело оказалось в самих нейтрино в том смысле, что их поведение лежит за рамками стандартной модели элементарных частиц. Нейтринная астрофизика сегодня является активной областью исследований, в которой действуют несколько солнечных нейтринных экспериментов и на подходе новые эксперименты, не говоря уже о проектах по изучению нейтринных осцилляций, таких как KamLAND [46].

Благодарности. Брукхейвенская национальная лаборатория и позднее Пенсильванский университет были прекрасным местом для проведения описанных исследований, которые осуществляли не только техническую поддержку в проведении экспериментов, но и создавали благоприятную научную атмосферу для осмыслиния результатов. Эта работа была бы невозможна без поддержки со стороны Комиссии по атомной энергии и сменивших ее агентств, а также Национального научного фонда.

Особого упоминания заслуживает Джон Бакол. Он является хранителем стандартной модели Солнца на протяжении почти 40 лет и был и остается главным вдохновителем измерений сечений соответствующих ядерных реакций, проведения солнечных нейтринных экспериментов и других тестов солнечной модели. Ясно, что без точки отсчета, которую дает стандартная солнечная модель, не возникло бы проблемы солнечных нейтрино. Противоречие между теорией и экспериментом за время существования этой "проблемы" пошло на пользу как эксперименту, так и теории. Мне бы также хотелось отметить Кеннета Ланде (Kenneth Lande), который многие годы сотрудничал со мной и после того, как я ушел из Брукхейвена в 1984 г., помог мне устроиться в Пенсильванский университет, где я продолжил эксперимент в Хоумстейке. Мне бы также хотелось поблагодарить и других коллег, с которыми я долгое время сотрудничал: Bruce Cleveland, John Evans, John Galvin, Don Harmer, Keith Rowley, Raymond Stoenner, Jack Ullman и Paul Wildenhain. Я искренне благодарен моим многочисленным коллегам, с которыми работал все эти годы.

Наконец, я хотел бы поблагодарить своего сына, Эндрю М. Дэвиса из Чикагского университета за помощь в подготовке и представлений¹ этой лекции.

Перевел с английского К.А. Постнов

Список литературы

1. Davis R (Jr) "The ionization constant of carbonic acid and the solubility of carbon dioxide in water and sodium chloride solutions from 0 to 50 degrees C", PhD Thesis (New Haven, Conn.: Yale Univ., 1942)
2. Crane H R "The energy and momentum relations in the beta-decay, and the search for the neutrino" *Rev. Mod. Phys.* **20** 278 (1948)
3. Davis R (Jr) "Nuclear recoil following neutrino emission from beryllium 7" *Phys. Rev.* **86** 976 (1952)
4. Smith P B, Allen J S "Nuclear recoils resulting from the decay of Be⁷" *Phys. Rev.* **81** 381 (1951)

¹ По поручению д-ра Р. Дэвиса мл. Нобелевскую лекцию прочитал его сын А.М. Davis. (Примеч. ред.)

5. Pontecorvo B "Inverse β^- -process", Chalk River Laboratory report PD-205 (1946)
6. Alvarez L "Proposed test of the neutrino theory", Radiation Laboratory Report (Berkeley, Calif.: Univ. of California, 1949)
7. Davis R (Jr) "Attempt to detect the antineutrinos from a nuclear reactor by the $\text{Cl}^{37}(\bar{\nu}, e^-)\text{A}^{37}$ reaction" *Phys. Rev.* **97** 766 (1955)
8. Davis R (Jr) "An attempt to observe the capture of reactor neutrinos in chlorine-37", in *Proc. of the 1st UNESCO Conf., Paris* Vol. 1 (1958) p. 728
9. Cowan C L (Jr), Reines F, Harrison F B, Kruse H W, McGuire A D "Detection of the free neutrino: a confirmation" *Science* **124** 103 (1956)
10. Reines F, Cowan C L (Jr), Harrison F B, McGuire A D, Kruse H W "Detection of the free antineutrino" *Phys. Rev.* **117** 159 (1960)
11. Holmgren H D, Johnston R L " $\text{H}^3(\alpha, \gamma)\text{Li}^7$ and $\text{He}^3(\alpha, \gamma)\text{Be}^7$ reactions" *Phys. Rev.* **113** 1556 (1959)
12. Cameron A G W "Modification of the proton-proton chain" *Bull. Am. Phys. Soc.* **3** 227 (1958)
13. Fowler W A "Completion of the proton-proton reaction chain and the possibility of energetic neutrino emission by hot stars" *Astrophys. J.* **127** 551 (1958)
14. Bahcall J N "Electron capture and nuclear matrix elements of Be^7 " *Phys. Rev.* **128** 1297 (1962)
15. Kavanagh R W "Proton capture in Be^7 " *Nucl. Phys.* **15** 411 (1960)
16. Reines F "Neutrino interactions" *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **10** 1 (1960)
17. Bahcall J N "Solar neutrinos. I. Theoretical" *Phys. Rev. Lett.* **12** 300 (1964)
18. Davis R (Jr) "Solar neutrinos. II. Experimental" *Phys. Rev. Lett.* **12** 303 (1964)
19. Davis R (Jr), Harmer D S, Hoffman K C "Search for neutrinos from the Sun" *Phys. Rev. Lett.* **20** 1205 (1968)
20. Bahcall J N, Bahcall N A, Shaviv G "Present status of the theoretical predictions for the ^{36}Cl solar-neutrino experiment" *Phys. Rev. Lett.* **20** 1209 (1968)
21. Cleveland B T, Daily T, Davis R (Jr), Distel J R, Lande K, Lee C K, Wildenhain P S, Ullman J "Measurement of the solar electron neutrino flux with the Homestake chlorine detector" *Astrophys. J.* **496** 505 (1998)
22. Bahcall J N, Pinsonneault M H, Basu S "Solar models: current epoch and time dependences, neutrinos, and helioseismological properties" *Astrophys. J.* **555** 990 (2001)
23. Fowler W A, in *Contemporary Physics. Trieste Symp. Proc., 7–28 June 1968, Trieste, Italy* Vol. 1 (Vienna: International Atomic Energy Agency, 1969) p. 359
24. Fowler W A "What cooks with solar neutrinos?" *Nature* **238** 24 (1972)
25. Sheldon W R "Possible relation of a null solar neutrino flux to 11-year solar cycle" *Nature* **221** 650 (1969)
26. Gribov V, Pontecorvo B "Neutrino astronomy and lepton charge" *Phys. Lett. B* **28** 493 (1969)
27. Wolfenstein L "Neutrino oscillations in matter" *Phys. Rev. D* **17** 2369 (1978)
28. Михеев С П, Смирнов А Ю "Резонансное усиление осцилляций в веществе и спектроскопия солнечных нейтрино" *ЯФ* **42** 1441 (1985) [Mikheev S P, Smirnov A Yu "Resonant enhancement of oscillations in matter and solar neutrino spectroscopy" *Sov. J. Nucl. Phys.* **42** 913 (1985)]
29. Libby L M, Thomas F J "Solar energy without neutrinos: fusion catalysis with quarks" *Nature* **222** 1238 (1969)
30. Salpeter E E "Difficulties with fusion catalysis by quarks" *Nature* **225** 165 (1970)
31. Kocharov G E, Starbunov Yu N, in *Proc. of the 11th Intern. Conf. on Cosmic Rays, Budapest, 1969; Acta Phys. Acad. Sci. Hung.* **29** (Suppl. 4) 353 (1970)
32. Cisneros A "Effect of neutrino magnetic moment on solar neutrino observations" *Astrophys. Space Sci.* **10** 87 (1971)
33. Bahcall J N, Cabibbo N, Yahil A "Are neutrinos stable particles?" *Phys. Rev. Lett.* **28** 316 (1972)
34. Demarque P, Mengel J G, Sweigart A V "Solar rotation and the neutrino flux" *Nature* **246** 33 (1973)
35. Prentice A J R "Early inhomogeneities in composition and the solar neutrino problem" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **163** 331 (1973)
36. Clayton D D, Newman M J, Talbot R J (Jr) "Solar models of low neutrino-counting rate: the central black hole" *Astrophys. J.* **201** 489 (1975)
37. Hirata K S et al. "Results from one thousand days of real-time, directional solar-neutrino data" *Phys. Rev. Lett.* **65** 1297 (1990)
38. Fukuda S et al. (Super-Kamiokande Collab.) "Solar ^8B and hep neutrino measurements from 1258 days of Super-Kamiokande data" *Phys. Rev. Lett.* **86** 5651 (2001)
39. Abazov A I et al. "Search for neutrinos from the Sun using the reaction $^{71}\text{Ga}(\bar{\nu}_e, e^-)^{71}\text{Ge}$ " *Phys. Rev. Lett.* **67** 3332 (1991)
40. Abdurashitov J N et al. (SAGE Collab.) "Measurement of the solar neutrino capture rate by SAGE and implications for neutrino oscillations in vacuum" *Phys. Rev. Lett.* **83** 4686 (1999)
41. Anselmann P et al. (GALLEX Collab.) "Solar neutrinos observed by GALLEX at Gran Sasso" *Phys. Lett. B* **285** 376 (1992)
42. Altmann M et al. (GNO Collab.) "GNO solar neutrino observations: results for GNO I" *Phys. Lett. B* **490** 16 (2000)
43. Fukuda Y et al. (Super-Kamiokande Collab.) "Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos" *Phys. Rev. Lett.* **81** 1562 (1998)
44. Ahmad Q R et al. (SNO Collab.) "Measurement of the rate of $\bar{\nu}_e + d \rightarrow p + p + e^-$ interactions produced by ^8B solar neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory" et al. *Phys. Rev. Lett.* **87** 071301 (2001)
45. Ahmad Q R et al. (SNO Collab.) "Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory" *Phys. Rev. Lett.* **89** 011301 (2002)
46. Eguchi K et al. (KamLAND) Collab.) "First results from KamLAND: evidence for reactor antineutrino disappearance" *Phys. Rev. Lett.* **90** 021802 (2003)