

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

# Постепенное исчезновение трех проблем солнечных нейтрино<sup>1</sup>

Д. Р. О. Моррисон

*Считается, что существуют три проблемы солнечных нейтрино. Во-первых, в течение 20-ти лет утверждалось, что поток нейтрино высоких энергий существенно меньше по сравнению с предсказанием эволюционных солнечных моделей. Во-вторых, было заявлено о существовании значительных флуктуаций в потоке нейтрино высоких энергий и их корреляций с солнечным циклом. В-третьих, были получены доказательства того, что, возможно, существует дефицит нейтрино низких энергий. Показано, что вторая проблема противоречит фундаментальным представлениям и не согласуется с последними результатами эксперимента Камиокаде. В отношении двух других проблем показано, что они постепенно исчезают со временем. Это связано не с каким-то одним новым фактом, а с последовательным улучшением начальных данных моделей, более тщательной оценкой неопределенностей, которые раньше иногда значительно недооценивались. Кроме того, некоторые значения, измеряемые в этих экспериментах, увеличились со временем, указывая на то, что эти весьма сложные эксперименты с очень низкой статистикой находились в наладочном периоде большее время, чем предполагалось. Окончательно сделан вывод, что основания для существования проблемы солнечных нейтрино в настоящее время не столь очевидны<sup>2</sup>.*

PACS numbers: 96.60.Kx

## Содержание

1. Введение. Три проблемы (579).
  2. Эволюционная модель Солнца (580).
    - 2.1. Стандартная солнечная модель. 2.2. Неопределенности.
    - 2.3. Раннее Солнце, содержание элементов. 2.4. Плазменные эффекты. 2.5. Реакция  ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ , фактор  $S_{17}$ . 2.6. Диффузия.
    - 2.7. Новая эволюционная модель Ковеца и Шавива. 2.8. Статья Дара и Шавива. 2.9. Выбор модели для сравнения и учета неопределенностей. 2.10. Зависимость потока от скорости счёта-порога. 2.11. Гелиосейсмология. 2.12. Заключение.
  3. Эксперименты (586).
    - 3.1. Четыре эксперимента. 3.2. Может ли эксперимент быть неправильным? 3.3. Существуют ли вариации нейтринного потока с солнечным циклом? 3.4. Скорость взаимодействия в Хлорном эксперименте. 3.5. Эксперимент Камиокаде. 3.6. Советско-американский галлиевый эксперимент (САГЭ). 3.7. Эксперимент Галлекс. 3.8. Сравнение результатов галлиевых экспериментов с моделями.
  4. Выводы (590).
- Список литературы (590).

D.R.O. Morrison. European organization for nuclear research CERN, Geneva 23, Switzerland  
E-mail: morrison@vxprlx.cern.ch

Статья поступила на английском языке 20 сентября 1994 г.;  
перевод поступил в редакцию 23 января 1995 г.  
Перевел И.Р. Барабанов

## 1. Введение. Три проблемы

Здравый смысл в течение приблизительно двадцати лет говорил, что существует расхождение между предсказанным потоком нейтрино от Солнца и результатами Хлорного эксперимента. Предсказание Бакалла с сотрудниками для потока нейтрино, ожидаемого в радиохимическом эксперименте Рея Дэвиса, использующего соединение хлора в шахте Хоумстейка, приводило к серьезному расхождению. Так как это относится главным образом к нейтрино высоких энергий от распада бора-8, мы будем называть это первой проблемой — проблемой нейтрино высоких энергий. Один из основных

<sup>1</sup> Статья написана на основе доклада, представленного на 27-ой Конференции по физике высоких энергий (Глазго, Шотландия, 20–27 июля 1994 г.).

<sup>2</sup> Начиная с 1970 г., в астрофизике возникла и существует вот уже более двадцати лет так называемая "Проблема солнечных нейтрино" — расхождение между экспериментальными данными по регистрации солнечных нейтрино и предсказаниями "Стандартной солнечной модели". В последние годы появились данные, свидетельствующие о том, что, во-первых, расхождения между предсказаниями моделей и результатами экспериментов стали меньше и, во-вторых, неопределенности в предсказаниях моделей оказались больше, чем предполагалось ранее. В статье Д.Р.О. Моррисона подробно анализируются эти вновь появившиеся факторы и делается вывод, что основания для проблемы в настоящее время не столь очевидны. Однако следует отметить, что существует и другая точка зрения, которой в настоящее время придерживается, по-видимому, большинство физиков и астрофизиков, — что проблема по-прежнему остается и решить ее на основе только существующих данных невозможно (см., например, Bahcall J.N. *Phys. Lett.* **338** (2, 3) 270 (1994)). (Примеч. переводчика.)

ключевых моментов в этой проблеме — экстраполированное сечение реакции  ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$  — постоянно сдвигалось в сторону меньших значений, особенно в результате эксперимента в Рикене (Япония), что значительно уменьшило актуальность проблемы.

В 80-х годах Дэвис с сотрудниками заявил, что большие флуктуации, наблюдаемые в нейтринном потоке, коррелируют в противофазе с активностью солнечных пятен. Это неожиданное заявление о вариации потока с солнечным циклом будем называть второй проблемой.

В 1990 г. начались радиохимические эксперименты с использованием галлия. Их важность определяется тем, что в них измеряются главным образом низкоэнергетические нейтрино, образующиеся в основной протон-протонной реакции. Самые первые результаты Советско-американского галлиевого эксперимента (САГЭ) дали поток, близкий к нулю. Эту проблему потока нейтрино низких энергий будем называть третьей проблемой.

Основываясь на этих трех расхождениях, многие физики предложили решения, включающие новую физику. Кроме того, началась подготовка экспериментов второго поколения для получения данных с более высокой точностью и более высокого качества в попытке решить эти три проблемы. Однако с 1990 г. появилась серия статей, из которых следовало, что появление новой физики не столь неизбежно. В этой статье будут критически проанализированы теоретические оценки и экспериментальные результаты и будет показано, что по мере того, как появлялись новые данные, теоретические и экспериментальные значения начали сближаться, и, кроме того, выяснилось, что теоретические ошибки были больше, чем предполагалось. Таким образом, свидетельства в пользу существования трех проблем солнечных нейтрино со временем становились все меньше и в настоящее время само наличие этих проблем не столь очевидно.

Недавно Ковец и Шавив [2] сделали новые вычисления солнечной модели с рядом уточнений по сравнению с предыдущими. На основе этих вычислений Дар и Шавив [3] показали с учетом новых данных, что Стандартная солнечная модель (ССМ) согласуется с наиболее надежными экспериментальными результатами. Этот вывод энергично оспаривался Бакаллом и др. в публикации посредством электронной почты, на что Дар и Шавив [5] дали столь же энергичный ответ посредством той же техники. По поводу этого спора будут даны краткие комментарии, но следует иметь в виду, что независимо выполненный в этой статье анализ предшествовал дискуссии между Даром и Шавивом с одной стороны и Бакаллом с другой. Таким образом, вывод о постепенном исчезновении трех проблем солнечных нейтрино независим от этих последних статей.

## 2. Эволюционная модель Солнца

### 2.1. Стандартная солнечная модель

В 1957 г. Шварцшильд [6] впервые построил Эволюционную модель Солнца, в которой судьба Солнца прослеживалась от газового облака 4,5 миллиарда лет назад до настоящего момента. Модель построена таким образом, чтобы получить современные значения светимости  $L_0$ ,

массы  $M_0$  и радиуса  $R_0$ . Был оценен состав Солнца в момент его образования. Решение уравнений, определяющих модель, осуществлялось численно путем разбиения объема Солнца на ряд оболочек различного радиуса с учетом четырех уравнений, задающих непрерывность параметров и баланс энергии на границах. Аналогично прослеживалась эволюция во времени — путем разбиения всего периода эволюции на ряд конечных временных интервалов, в течение которых параметры Солнца считались постоянными. (См. обзор [7].) С 1964 г. эта модель называется Стандартной солнечной моделью (ССМ). Однако следует иметь в виду, что под именем ССМ было сделано много различных расчетов. Рассмотреть все расчеты и оценить, какая из моделей наиболее подходит для сравнения с экспериментальными измерениями, действительно сложно.

Начиная с 1964 г., много вычислений и улучшений в модели было сделано Джоном Бакаллом. Вначале эффект, предсказанный для Хлорного эксперимента был очень высок, но в 1968 г. в работе Бакалла и Шавива эффект опустился ниже  $10 \text{ SNU}^3$  и остался на этом уровне до настоящего момента.

### 2.2. Неопределенности

Так как "проблемы" солнечных нейтрино высоких и низких энергий возникают при сравнении теории и эксперимента, необходимо знать ошибки как теоретические, так и экспериментальные.

Иногда подразумевается, что исходными данными являются только  $L_0$ ,  $M_0$  и  $R_0$  и первоначальный состав элементов, однако фактически используется большее количество исходных данных плюс ряд предположений, что не всегда ясно указывается. Некоторые из этих предположений могут быть главным источником ошибок и теоретические ошибки для предсказаний ССМ могут быть значительно больше, чем ошибки от экспериментальных исходных величин. Это важно, так как часто используемые оценки Бакалла с сотрудниками имеют неоправданно низкие ошибки, главным образом из-за нестандартной и, на наш взгляд, неудачной процедуры — "правило большого пальца" [8], использованной для расчета теоретических ошибок. Процедура состоит в прослеживании вариаций каждой теоретической величины со временем и эти вариации считаются источником ошибок. Это выглядит прекрасно, но если автор использует всегда те же самые теоретические гипотезы, то результирующая теоретическая ошибка не будет изменяться. Следовательно, Бакалл с сотрудниками всегда предполагают, что теоретическими ошибками можно пренебречь, так как основные неопределенности, сделанные в теоретических предположениях, не менялись со временем. По этой причине другие авторы, например Турк-Киез и др. [9] дают большие теоретические ошибки, так как они уделяют большее внимание неопределенностям, например тому, какой тип экранирования использовать. Они заявляют, что их ошибки являются минимальными, так как могут быть другие неучтенные неопределенности. Такой подход является

<sup>3</sup> Эффект радиохимических экспериментов измеряется в произведении потока нейтрино на сечение реакции в единицах SNU (Солнечная нейтринная единица)  $1 \text{ SNU} = 1 \cdot 10^{-36} \text{ c}^{-1}$ . Наряду с обозначением SNU в русской научной литературе иногда используется эквивалентное обозначение С.Н.Е. (Примеч. переводчика.)

более здравым и реалистичным и мы будем использовать их оценки ошибок.

### 2.3. Раннее Солнце, содержание элементов

До последнего времени в большинстве ССМ начинали рассматривать Солнце после того, как оно становилось звездой, и пренебрегая его ранней историей. Первоначально Солнце было звездой типа  $\tau$  Тельца, которая вращалась очень быстро и затем потеряла момент количества движения из-за излучения интенсивного солнечного ветра. Полагают, что первоначально Солнце имело ядро<sup>4</sup>.

Главная проблема вычислений ССМ состоит в том, как тепло от ядерного горения ускользает из ядра. Это осуществляется почти полностью фотонами, которые испускаются, взаимодействуют и поглощаются много раз — типичное время диффузии фотона из ядра к поверхности составляет  $10^7$  лет. По этой причине многие были удивлены идеей о том, что нейтрино из ядра Солнца могут иметь флуктуации с периодом порядка 10 лет. Это является фундаментальной проблемой и противоречит предположению, что нейтринный поток может меняться с солнечным циклом.

Двумя главными проблемами являются: первое — знание содержания всех элементов и их изотопов 4,5 миллиардов лет назад; второе — вычисление их состояний ионизации на различных радиусах. Суть дела в том, что фотоны взаимодействуют с большей вероятностью с ионами, имеющими электроны, чем с ионами, полностью лишенными электронов — и в центре Солнца все элементы не имеют электронов, за исключением очень тяжелых, таких, как железо. Эта проблема известна как "непрозрачность" среды и вычисления ее очень сложны. В 1982 г. было осознано, что используемая тогда непрозрачность была по всей видимости не верной и только в 1992 г. в Ливерморе были изданы новые таблицы [10], которые также могут быть несовершенны. Почти вся непрозрачность возникает из-за тяжелых элементов, главным образом из-за железа, и изменение в содержании железа [11] привело к уменьшению на 15–20 % предсказываемого потока нейтрино от  $^8\text{B}$ .

Определение содержания элементов 4,5 миллиардов лет назад — деликатный вопрос, так как мы способны изучать главным образом поверхность Солнца, и сюрпризы в будущем здесь не исключены (например, неожиданное увеличение в 10 раз содержания дейтерия по измерениям в работе [12], которые, однако, требуют подтверждения). Проверка может быть сделана путем тщательного изучения определенных метеоритов, которые, как полагают, образовались в досолнечную эпоху. Согласие между солнечными и метеоритными данными очень хорошее [13] за исключением  $^7\text{Li}$  (которого на Солнце в 100 раз меньше, чем в метеоритах),  $^9\text{Be}$  (меньше в 2 раза) и  $^3\text{He}$  (различие небольшое).

### 2.4. Плазменные эффекты

Вещество в центре Солнца находится в состоянии плазмы с температурой и давлением, существенно отличающимися от тех, которые изучаются на Земле. Однако специалисты по плазме (В.Н. Цытович и др. [14]) предположили, что коллективные эффекты, релятивистское доплеровское уширение и сдвиг резонанса Рамана из-за

экранирования электронным облаком могут быть существенны. Из результатов их первых вычислений следует, что эти эффекты делают Солнце более прозрачным, и при данной центральной температуре светимость будет больше, или, так как светимость задана, температура будет ниже. Вспомним, что уменьшение температуры снижает потоки нейтрино от  $^7\text{Be}$  и  $^8\text{B}$ , соответственно, как  $T^8$  и  $T^{18}$ . Для галлия, однако, поток увеличится, как  $T^{-1.2}$ . Детальные расчеты этого важного эффекта еще впереди.

### 2.5. Реакция $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$ , фактор $S_{17}$

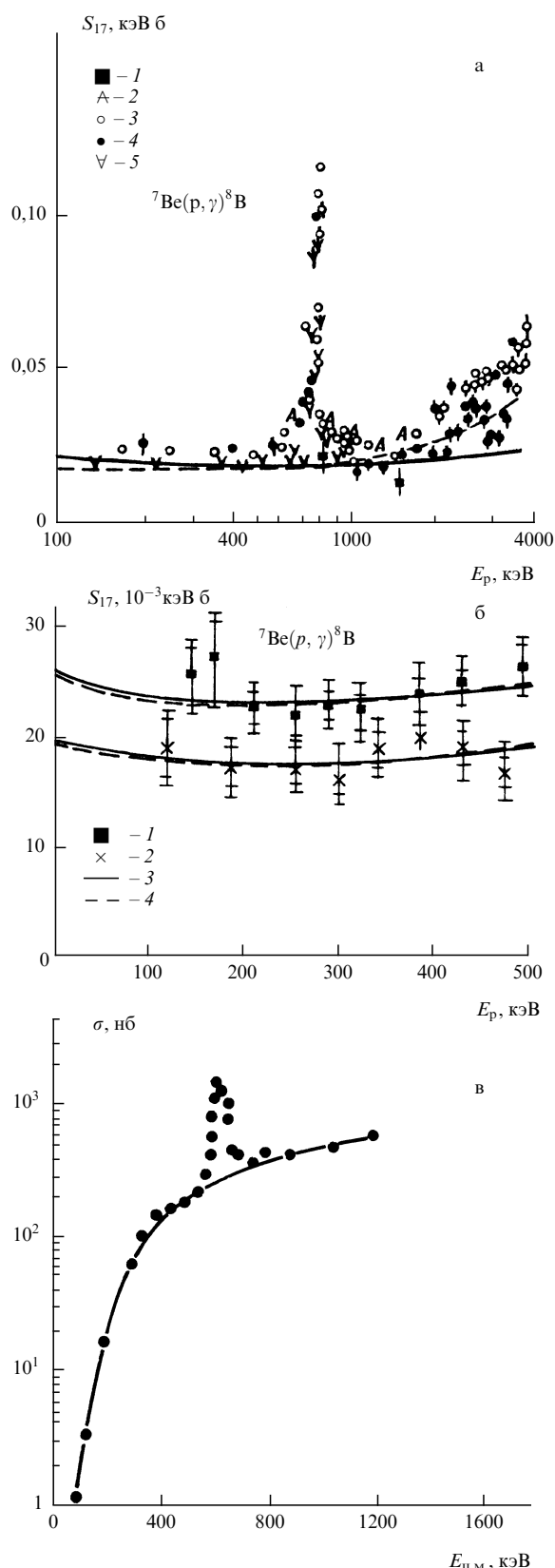
Нейтрино от распада бора-8 составляют почти всю долю солнечных нейтрино, детектируемых в эксперименте Камиоканде, и около 80 %, детектируемых Хлорным экспериментом. Поэтому вопрос, как часто образуется  $^8\text{B}$ , является фундаментальным. Он образуется в цепочке реакций, которая составляет только малую долю — несколько миллионных долей — от числа основных реакций; поэтому изменение в скорости образования  $^8\text{B}$  существенно не изменяет солнечную светимость.

Существенно, что реакция  $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$  не измеряется в лабораторных условиях в области энергий от 1 до 10 кэВ, которая важна для Солнца. Измерения выполнены при гораздо более высоких энергиях. Самая низкая энергия, при которой выполнены измерения, составляет 117 кэВ. При этой энергии сечение равно всего 3 нб, а затем быстро спадает из-за фактора проникновения через кулоновский барьер, как показано на рис. 1в. Это делает экстраполяцию трудной. Поэтому искомое сечение разделяется на два сомножителя — вероятность проникновения через барьер и астрофизический фактор  $S$ , включающий ядерные эффекты, которые, как надеются, меняются медленно при этих очень низких энергиях. Для этой реакции этот фактор называется  $S_{17}$ .

Обзор Джонсона с соавторами [15] показывает всю сложность вопроса. Из двух их графиков на рис. 1а и рис. 1б видно, что при энергии 640 кэВ существует сильный резонанс, и экстраполяция к низким энергиям должна включать, как было указано Турк-Киез с соавторами [16] в 1988 г., помимо s-волны, и d-волну. Чтобы избежать эффекта резонанса в работе [15] использовали только данные ниже 500 кэВ, где имеются всего лишь две серии экспериментов, и получили среднее значение, придавая обоим экспериментам одинаковый вес. Такой подход является неадекватным, поскольку эти два эксперимента не могут рассматриваться как равноценные. Эксперимент Каванаги [17] выполнен в 1969 г. на 14 лет раньше эксперимента Филиппоне и др. [18], а долгий опыт учит [19], что техника сильно меняется за такой длительный период и, что более важно, существует правило компиляции данных — использовать в компиляции только данные, полностью описанные в рецензируемых журналах. Результат Каванаги описан только в абстракте в 12 строчек, тогда как работа Филиппоне описана полностью. Так как два эксперимента несовместимы на более чем три стандартных отклонения, следуя правилу мы должны отбросить результаты Каванаги и др. Это снижает экстраполированную величину  $S_{17}$  от 22,4 эВ б до 20,0 эВ б. Важно отметить, что Джонсон и др. [15] говорят, что их модель не удовлетворительная, так как не согласуется с другими экспериментальными данными.

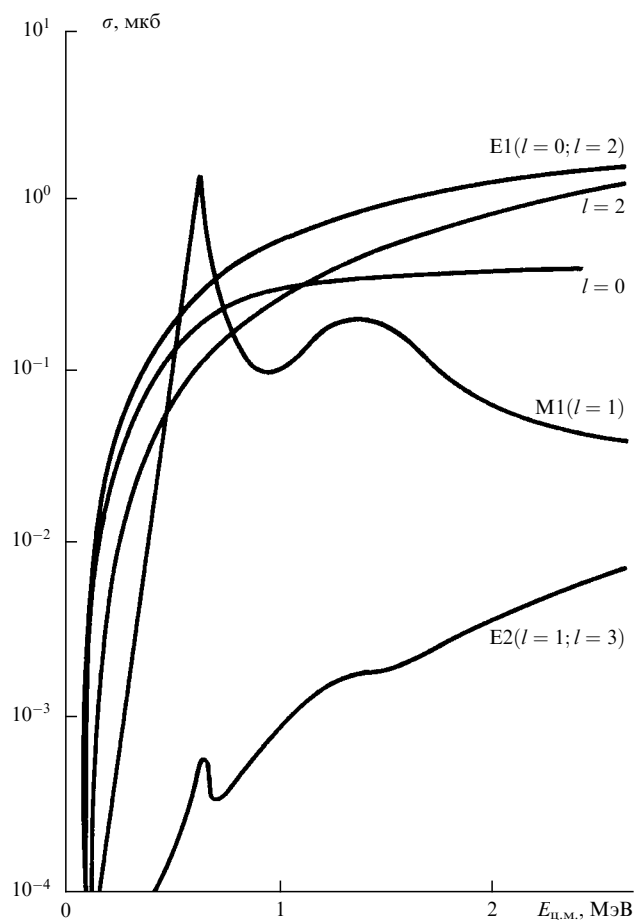
Основное уменьшение в  $S_{17}$  исходит из нового эксперимента, выполненного в Рикене Мотобаяши Т. с

<sup>4</sup> Имеется в виду конвективное ядро. (Примеч. переводчика.)



**Рис. 1.** (а) Астрофизический  $S$ -фактор,  $S_{17}$  для реакции  ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ . Сплошная линия — описание данных  $s$ -волной, пунктирная линия —  $s$ - и  $d$ -волнами, 1 — Kavanagh (1960), 2 — Parker (1968), 3 — Kavanagh et al. (1969), 4 — Vaughn et al. (1970), 5 — Filippone et al. (1983); (б) то же, что и (а) для данных ниже 450 кэВ 1 — Kavanagh et al. (1969) и 2 — Filippone et al. (1983); (в) сечение для реакции  ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$

соавторами [21]. Они измерили обратную реакцию  ${}^8\text{B}(\gamma, p){}^7\text{Be}$  — расщепление в кулоновском поле  ${}^8\text{B}$ , направляя пучок ионов  ${}^8\text{B}$  на свинцовую мишень. В результате обмена виртуальным фотоном с ионом свинца возникают  ${}^7\text{Be}$  и  $p$ , которые детектируются. Результаты вычислений мультипольных и парциальных волн, дающих вклад в реакцию  ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ , представлены на рис. 2. Магнитная дипольная составляющая  $M1$ , из-за которой возникает резонанс при 640 кэВ, не дает вклада в обратную реакцию. Результаты Мотобаяши и соавторов показаны на рис. 3. Видно, что их результат ниже предыдущих значений (также не наблюдается резонанс). Их значение для  $S_{17}$  на 20–30 % ниже величины 22,4 эВ б, используемой Бакаллом и Пинсоннеалом [22] и Турк-Киез и др. [9].



**Рис. 2.** Вклад различных мультипольных и парциальных волн для реакции  ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$

Существует другая важная проблема, связанная с экстраполяцией  $S_{17}$  от измеренных величин к солнечным энергиям. В ядерной физике установлено, что ядра, обогащенные нейтронами, имеют нейтронное гало — нейтроны находятся на больших расстояниях от центра ядра, чем ожидается. Русаджер и Дженсен [23] указывают, что поскольку  ${}^8\text{B}$  является ядром, обогащенным протонами (5 протонов и только 3 нейтрона), следует ожидать, что протонная волновая функция простирается до значительно больших расстояний. Из их вычислений следует, что радиус последнего протона составляет 3,75 фм, тогда как для среднеквадратичного радиуса ядра  ${}^8\text{B}$

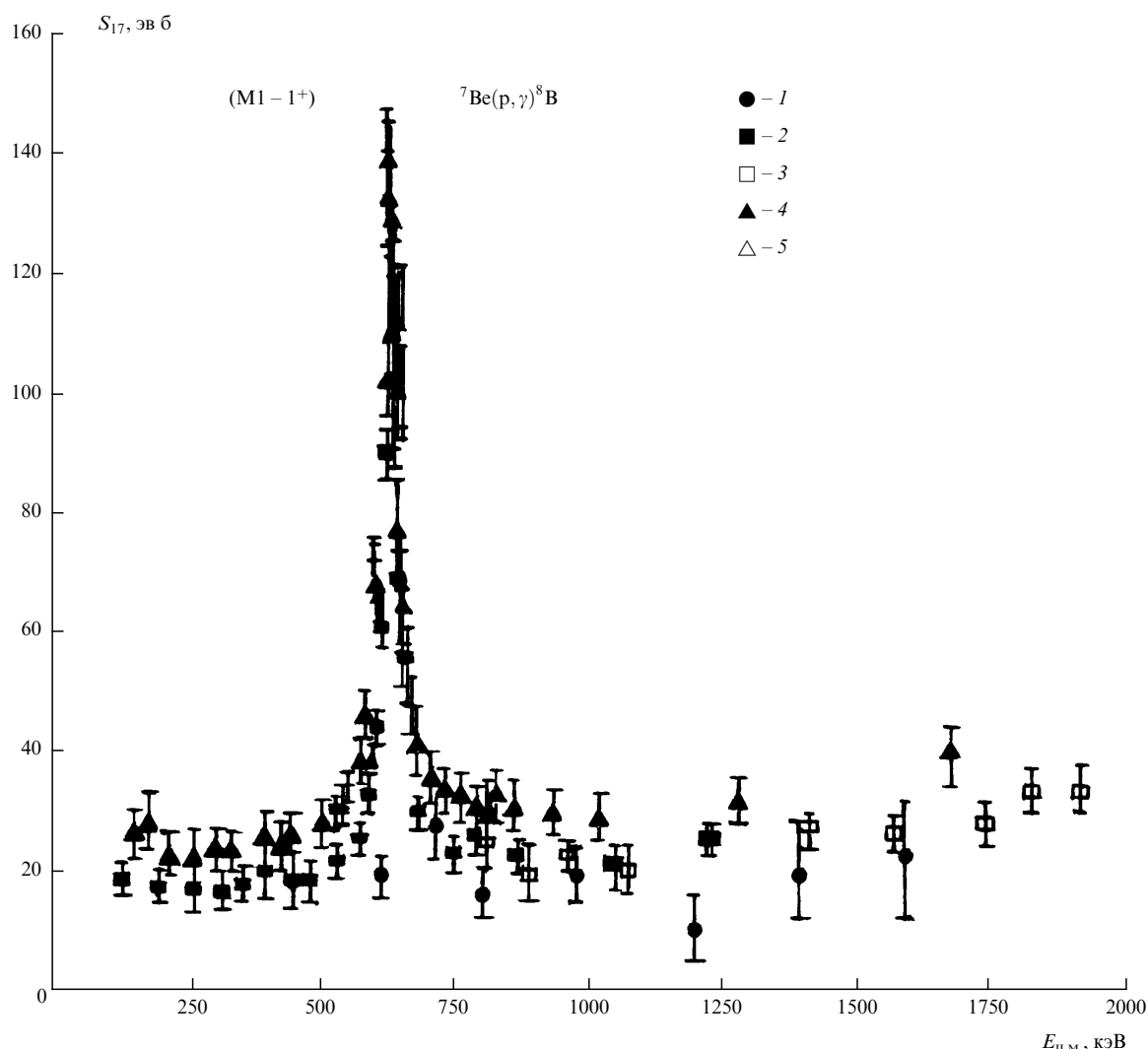


Рис. 3. Сравнение величины  $S_{17}$ , полученной из реакции кулоновского расщепления (Мотобаяши и др. [21]), с другими данными, 1 — Motobayashi et al. (1993), 2 — Filippone et al. (1983), 3 — Vaughn et al. (1970), 4 — Kavanagh et al. (1969), 5 — Parker (1966)

обычно принимается значение 2,51 фм. Поскольку характерные расстояния для реакции  ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$  составляют около 50 фм, ясно, что эффект обогащения протонами должен быть принят во внимание. Сложность процедуры экстраполяции иллюстрируется рис. 4, где числа на кривых соответствуют различным энергиям расщепления. Ими сделан вывод, что для данных Филиппоне и др. [18] экстраполированная величина  $S_{17}$  должна быть ниже в области 12–17 эВ б, но неопределенности велики и их нелегко устранить. Заметим, что рассматриваемый эффект обогащения протонами независим от нового уменьшения  $S_{17}$  Мотобаяши и др. и далее снизит значение  $S_{17}$ . В обсуждении вопроса о постоянстве исходных величин ССМ интересно отметить, что экстраполированная величина  $S_{17}$  изменилась больше, чем полная ошибка от всех источников, составляющая 11 % по оценке Бакалла и др. [24]. В последовательных статьях 1982, 1988 и 1992 гг. Бакалл с сотрудниками использовали величины 27, 24,3 и 22,4 эВ б соответственно, тогда как в настоящее время лучшая оценка составляет 17 эВ б из результатов Мотобаяши и, возможно, еще ниже с учетом эффекта обогащения протонами. Таким образом, один этот входной параметр упал на 40–50 %, т.е. неопределенность в оценке одного этого параметра

оказалась намного больше, чем по оценке Бакалла неопределенность от всех входных параметров и теоретических неопределенностей. Это поддерживает аргументы против "правила большого пальца" Бакалла оценки ошибок и оправдывает точку зрения Турк-Киез и др. [9], что минимальная величина ошибки для потока нейтрино от  ${}^8\text{B}$  составляет 25 %.

## 2.6. Диффузия

Внутри солнечного ядра и радиационной зоны ожидаются эффекты двух типов: турбулентные и нетурбулентные; первые, как ожидается, должны уменьшить поток нейтрино, тогда как вторые увеличить. Бакалл и Пинсоннеалт [22] рассмотрели нетурбулентную диффузию, увеличив таким образом предсказываемый ими поток нейтрино.

## 2.7. Новая эволюционная модель Ковеца и Шавива

Ковец и Шавив создали новую эволюционную модель Солнца, используя новую программу с рядом улучшений. Плюс к этому при решении они использовали намного больше дискретных шагов по радиусу внутри Солнца и по времени в сравнении с предыдущими вычислениями. Ковец и Шавив проследили судьбу всех

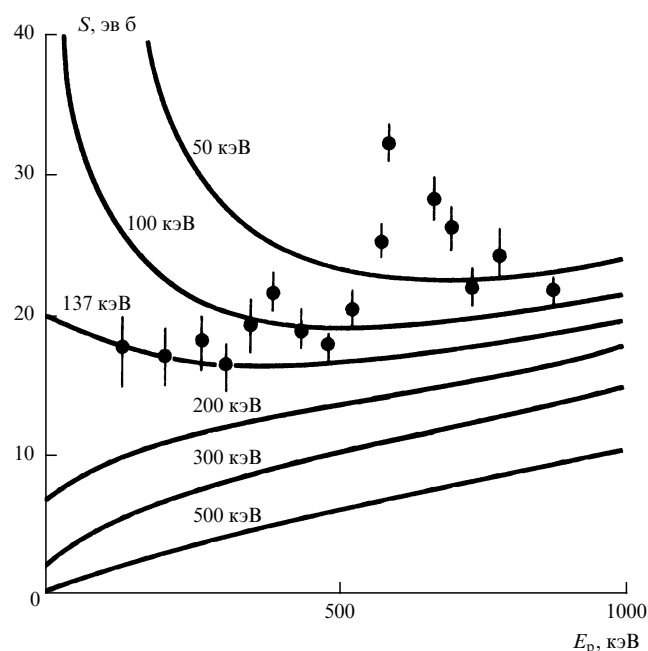


Рис. 4.  $S_{17}$  фактор для реакции  ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$  как функция энергии в системе для различных энергий разделения  ${}^8\text{B}$  (цифры на кривых). Расчеты включают s- и d-волны, но не учитывают резонанс при 640 кэВ [23]

элементов при диффузии и при ядерных реакциях в отличие от большинства предыдущих вычислений, в которых учитывали только водород, гелий и тяжелые элементы и считали элементы полностью ионизованными, что, вообще говоря, несправедливо. Последнее важно, поскольку учет связанно-связанных и связанно-свободных столкновений существует.

Как следствие учета судьбы каждого элемента и отсутствия предположения о состоянии равновесия ядерных реакций, Ковец и Шавив получили, что поток нейтрино от CNO цикла (главным образом от  ${}^{13}\text{N}$  и  ${}^{15}\text{O}$ ) меньше по сравнению с предыдущими предсказаниями. С первого взгляда кажется, что этот вывод приведет к разногласию с наблюдениями для более массивных звезд, для которых CNO цикл является основным, но различие состоит в том, что в то время как реакции CNO цикла не находятся в состоянии равновесия в Солнце, они будут в равновесии в более массивных звездах [26].

## 2.8. Статья Дара и Шавива

В статье, озаглавленной "Решение проблемы солнечных нейтрино со стандартной физикой найдено?", Дар и Шавив [3] ввели в модель Ковеца и Шавива [2] несколько новых "наилучших" значений для входных величин: солнечную светимость  $L_0$ ,  $S_{17}$ ,  $S_{34}$  (реакция  ${}^3\text{He}({}^4\text{He}, p){}^7\text{Be}$ ) и эффекты CNO цикла. Следствия таковы:

Для нейтрино от  ${}^8\text{B}$ :  $L_0$  изменилось (от 3,86 до 3,826)  $10^{33}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ , приводя к уменьшению на 6 %;  $S_{17}$  изменилось от 22,4 до 17 эВ б, приводя к уменьшению на 24 %;  $S_{34}$  изменилось от 0,533 до 0,45 кэВ б, приводя к уменьшению на 13 %.

Объединение этих трех уменьшений дает результирующее уменьшение на 38 % по сравнению с [9] и [22] для нейтрино от  ${}^8\text{B}$ .

Для Хлорного эксперимента: Дар и Шавив предсказывают значение 4,2 SNU.

Отметим, что если в качестве первого приближения взять величину Турк-Киез и др. [9] для Хлора — 6,4 SNU и уменьшить ее на 38 %, это даст 4,0 SNU (приблизительно, так как вклад нейтрино от  ${}^8\text{B}$  составляет только 80 %, а нейтрино от  ${}^7\text{Be}$  уменьшаются на 19 %).

Для Галлиевого эксперимента: в результате уменьшения потоков нейтрино от  ${}^8\text{B}$ ,  ${}^7\text{Be}$  и CNO Дар и Шавив дают 113 SNU по сравнению с 132 SNU у Бакалла и Пинсоннеалта [22] и 122,5 SNU у Турк-Киез и Лопеца [9].

Дар и Шавив, по-видимому, еще не сделали серьезных вычислений своих погрешностей, поэтому будет разумно использовать для настоящего анализа погрешности Турк-Киез и Лопеца, которые равны: 25 %, 22 % и 6 % для Камиоканде, Хлорного и Галлиевого экспериментов соответственно (это фактически только нижние пределы).

Статья Дар и Шавива встретила резкую критику Бакалла и др. [4]. Эта критика была распространена посредством электронной почты и получила быстрый ответ тем же методом от Дара и Шавива [5]. Возможно, что Бакалли и др. не поняли полностью статью Дара и др. Помимо этого они сделали элементарную ошибку при сравнении теории с экспериментом: они учли только экспериментальные неопределенности и не включили теоретические — это существенная ошибка, так как теоретические неопределенности больше экспериментальных в некоторых случаях. Таким образом, они пришли к выводу, что результат Хлорного эксперимента отличается от их модельных предсказаний на 14 стандартных отклонений. Это будет обсуждаться в разделе 3.4 и будет найдено несколько меньшее число стандартных отклонений.

На последней конференции "Нейтрино-94" ожидали детального ответа Бакалла, но он не последовал. Однако стало известно, что в модели Ковеца и Шавива для первоначального содержания гелия-4 получается значение 29 %, что довольно много.

У нас нет намерения полностью входить в дискуссию Бакалл — Дар; следует подчеркнуть, что вывод этой статьи об отсутствии веских доказательств для всех трех проблем не зависит от этих дебатов.

## 2.9. Выбор модели для сравнения и учета неопределенностей

Если мы хотим анализировать расхождения между эволюционной моделью и экспериментальными значениями, то прежде всего необходимо выбрать наилучшую модель.

В настоящий момент это сделать нелегко. Модель Бакалла и др. не подходит из-за аномально малых неопределенностей, увеличившихся со временем, например, для Камиоканде с 10 до 14 %. Неопределенности Турк-Киез и Лопеца [9] кажутся разумными и, более того, они разумно даны как нижние пределы из-за недостаточного знания источника теоретических неопределенностей. Мы примем эти неопределенности, которые равны: 6 %, 22 % и 25 % для Галлиевого, Хлорного и Камиоканде экспериментов соответственно.

Поскольку дискуссия между Бакаллом и Даром еще не окончена, выбирать какую-либо из их моделей сейчас преждевременно.

Пока определенности нет, мы примем величины Турк-Киез и Лопеца [9], но с одной поправкой: учитывая эксперимент Мотобаяши [21], предсказания для Хлорного и Камиоканде экспериментов будут уменьшены на 25 %.

По-видимому, необходимо введение и других поправок (например,  $S_{34}$ ,  $L_0$ , диффузия), но они еще не включены окончательно.

Таким образом, наилучшие предсказания для данного момента:

Галлиевый эксперимент =  $122,5 \pm 7$  SNU

Хлорный эксперимент  $6,4 - 1,6 = 4,8 \pm 1,1$  SNU

эксперимент Камиоканде  $(4,4 - 1,1)10^6 = (3,3 \pm 0,8) \times 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

## 2.10. Зависимость потока от скорости счета–порога

Принято писать (например, Бакалл [27]), то Хлорный эксперимент регистрирует нейтрино с энергией намного меньшей, чем Камиоканде. Это основано на утверждении, что порог хлорного детектора 0,8 МэВ, тогда как самый низкий сообщенный порог Камиоканде почти на порядок выше — 7 МэВ. Это утверждение, хотя и правильное, может ввести в заблуждение, поскольку в данном случае присутствуют и другие факторы. Это различие в порогах было бы понятным, если бы не смешивание понятий *поток* и *скорость счета*.

Поток, вычисленный Бакаллом и Ульрихом [24], показан на рис. 5. Скорость счета есть произведение потока на сечение. Для эксперимента Камиоканде скорость счета плавно меняется с энергией. Однако это не имеет места для Хлорного эксперимента, поскольку в ядре  $^{37}\text{Ar}$  должно быть возбужденное состояние, играющее важную роль. Поскольку возбужденные состояния в реакции  $^{37}\text{Cl}(\nu, e)^{37}\text{Ar}$  не могут изучаться прямо, они исследуются экспериментально в изобар-аналоговых состояниях из распада  $^{37}\text{Ca}$  в  $^{37}\text{K}$ . Основные результаты показаны на рис. 6. Самый последний эксперимент Гарсиа в ЦЕРНе выявил 11 возбужденных состояний, увеличивающих интенсивность на 0,3 SNU. Видно, что вблизи порога 0,8 МэВ мало возбужденных состояний и они существенно не увеличивают скорость счета. Реакция идет главным образом (69 %) через возбужденное состояние 4,99 МэВ, соответствующее энергии нейтрино 5,8 МэВ, что не далеко от порога Камиоканде 7 МэВ. Таким образом, указание только порога без рассмотрения скорости счета и возбужденных состояний может ввести в заблуждение.

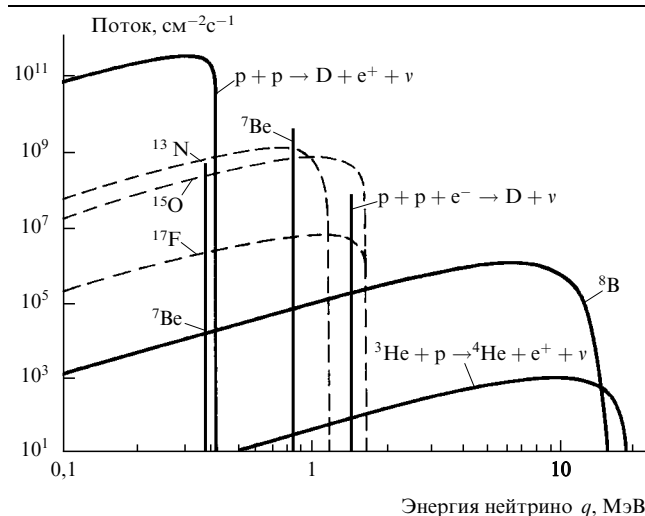


Рис. 5. Энергетический спектр солнечных нейтрино по расчетам Бакалла и Ульриха [24]. Значения для  $^3\text{He} + p$  увеличены в шесть раз [22]

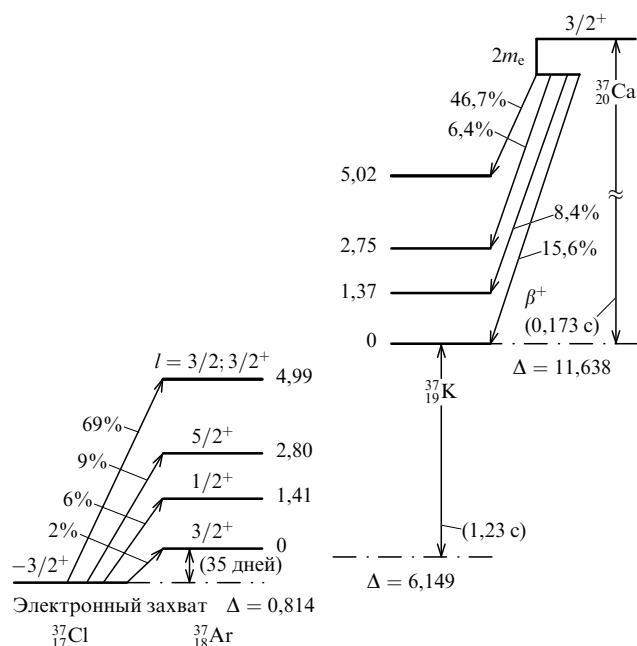


Рис. 6. Уровни энергии для ядер с  $A=37$ , хлор, аргон, калий и кальций, единицы в МэВ

## 2.11. Гелиосейсмология

Солнце является резонансной полостью с миллионами мод колебаний, десятки тысяч из которых измерены с высокой точностью, например Либбрехт и Вудвод [29]. Колебания имеют период около 5 минут и вызваны волнами упругости, так называемые р-волны. Они позволяют измерить скорость звука в зависимости от радиуса. Имея эту зависимость, можно решить обратную задачу (с разумными предположениями) — получить температуру и давление как функцию радиуса. Результаты находятся в хорошем согласии с эволюционной моделью. Пример показан на рис. 7, где измеренное значение  $C^2$  сравнивается с предсказанием Турк-Киез и др. [9]. Из гелиосейсмологии найдена граница между конвективной зоной, где существенна турбулентность, и радиационной зоной, где перемещения малы, —  $0,715R_0$  в хорошем

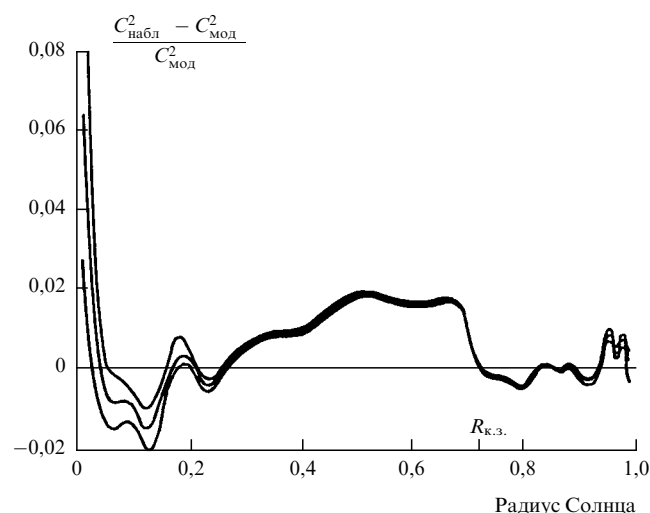


Рис. 7. Различие между наблюдаемой и вычисленной скоростью звука в квадрате как функция радиуса Солнца.  $R_{\text{к.з.}}$  — граничный радиус между конвективной зоной и радиационной зоной [9]

согласии с моделями. К сожалению, р-волны дают мало информации о ядре Солнца, где рождаются нейтрино, но общее согласие дает сильную независимую поддержку звездным эволюционным моделям. Предпринимаются попытки измерить волны гравитации или g-волны, поскольку они несут информацию о ядре, но это сложная задача.

## 2.12. Заключение

Подводя итог, можно сказать, что солнечные и звездные эволюционные модели работают достаточно хорошо и независимые подтверждения этого исходят из гелиосейсмологии, хотя и остается ряд проблем, таких как расхождение в 100 раз содержания Li, в 2 раза Be (причем существует по крайней мере три различных теории для объяснения этого расхождения).

Потоки солнечных нейтрино из различных моделей согласуются в пределах фактора два. Существует или нет расхождение для нейтрино от  $^8\text{B}$ , которые составляют только 0,3 % всех нейтрино, зависит от того, какие предположения и расчеты выбрать для сравнения с экспериментом. Большая разница брать ошибку в 10 % или 25 % при сравнении с экспериментом, ошибки которого составляют около 10 %. Значения входных параметров, такие как  $S_{17}$ , продолжают меняться со временем;  $S_{34}$  также постоянно снижается со временем. Относительно некоторых теоретических исходных предположений продолжают оставаться неопределенности, в частности, в эффектах экранирования.

Появились новые факторы — коллективные эффекты в плазме — которые могут оказаться важными, и могут изменить теоретические предсказания и улучшить согласие с экспериментом.

## 3. Эксперименты

### 3.1. Четыре эксперимента

Солнечные нейтрино в настоящее время измеряют непосредственно в четырех экспериментах. Три из них являются радиохимическими экспериментами, в которых посредством ( $\nu$ , e) реакции в мишени образуется новый элемент. Этот элемент извлекается из мишени и измеряется посредством детектирования его распада. Для хлора образуется  $^{37}\text{Ar}$ , который распадается с периодом полураспада 35 дней, испуская электрон<sup>5</sup> с энергией 2,8 кэВ. Рэй Дэвис был первым, кто наблюдал такой распад и заслуживает поздравления за первые наблюдения солнечных нейтрино непосредственно. Два галлиевых эксперимента — САГЭ и ГАЛЛИКС — наблюдают распад  $^{71}\text{Ge}$  с периодом полураспада 11,4 дня. В результате этого распада образуется либо один электрон<sup>6</sup> с энергией 10 или 1,3 кэВ (К- или L-оболочка соответственно), либо электрон с малой энергией (1,1 или 1,2 кэВ) плюс рентгеновские кванты, возникающие в результате заполнения вакансии на К-оболочке. Поскольку порог галлия достаточно низок (0,2 МэВ)<sup>7</sup>, эти эксперименты измеряют нейтрино от основной р-р-реакции.

<sup>5</sup> Точнее, несколько электронов в результате оже-эффекта. (Примеч. переводчика.)

<sup>6</sup> См. предыдущую сноску. (Примеч. переводчика.)

<sup>7</sup> Точное значение 0,233 МэВ. (Примеч. переводчика.)

В четвертом эксперименте (Камиоканде) с черенковским детектором, содержащим 3000 т воды, наблюдают электрон-нейтринное рассеяние. Фон достаточно высок, но отчетливый пик в направлении на Солнце виден. Это единственный эксперимент, который имеет такой направленный сигнал.

Подводя итог, можно сказать, что солнечные нейтрино определенно наблюдаются и измеряются.

### 3.2. Может ли эксперимент быть неправильным?

Я был воспитан в школе Резерфорда, где экспериментальные результаты считались основополагающим фундаментом, которым следовало доверять. Однако спустя некоторое время в результате опыта осознаешь, что не все эксперименты правильны. Например, несколько экспериментов в различных лабораториях обнаружили доказательства существования нейтрино с массой 17 кэВ, и был написан ряд статей, которые предлагали решение проблемы солнечных нейтрино на основе этого результата. Однако второе поколение экспериментов не нашло эффекта, открыватели обнаружили ошибки в своих экспериментах и признали их. В настоящее время признано, что таких нейтрино не существует [30].

Нет ничего необычного в ситуации, когда между теорией и экспериментом существует разногласие и теория хорошо обоснована большим числом других экспериментов. Часто полезно использовать бритву Оккама [31] и прийти к простейшему решению, что один эксперимент неправилен, в то время как большое число экспериментов, на которых основана теория, правильны. Примером является история с  $^6\text{He}$ .

Из истории пионерских нейтринных экспериментов мы знаем, что часто полученные в них численные значения не выдерживали испытания временем и сильно изменялись. Это ни в коей мере не умаляет заслуги осуществления пионерского эксперимента, но просто следует соблюдать осторожность в обращении с численными величинами, полученными в пионерских экспериментах.

### 3.3. Существуют ли вариации нейтринного потока с солнечным циклом?

Было заявлено, что существуют значительные флуктуации нейтринного потока, измеряемого в Хлорном эксперименте, и они коррелируют в противофазе с солнечной активностью. Утверждалось, что эффект составляет пять стандартных отклонений.

Как было сказано в разделе 2.3, такая периодичность со временем порядка 10 лет находится, по-видимому, в противоречии с другими основополагающими фактами.

Не касаясь графических зависимостей, утверждалось, что эффект во время минимумов 21-го и 22-го циклов солнечной активности составлял  $4,1 \pm 0,9$  и  $4,2 \pm 0,7$  соответственно, тогда как в максимумах этих циклов  $0,4 \pm 0,2$  и  $1,2 \pm 0,6$ . Величина для 21-го максимума —  $0,4 \pm 0,2$ , соответствующая ранам<sup>8</sup> 61–66, поразительно низка, если сравнить ее со средним значением в период с 1970 по 1992 гг. —  $2,55 \pm 0,25$  [32]. Различие равно  $2,15 \pm 0,30$ , что составляет семь стандартных

<sup>8</sup> Раном принято называть один полный цикл радиохимического эксперимента, состоящий из времени экспозиции мишени, извлечения образовавшегося под действием нейтрино изотопа и его счета. (Примеч. переводчика.)



отклонений для этого одного года (раны 61–66)<sup>9</sup>. Если сравнить этот год со средним значением за период от 1986–1988 гг. до 1992–1994 гг. —  $2,81 \pm 0,38$  SNU (согласно [32] к настоящему моменту возможно  $2,9$  SNU), то разница составляет  $2,41 \pm 0,38$  SNU, что опять равно шести (или семи) стандартным отклонениям.

Интересно отметить, что после первых двух лет работы Хлорный эксперимент давал только верхний предел около 1 SNU, что также, по-видимому, противоречит двум вышеприведенным величинам  $2,55 \pm 0,25$  или  $2,81 \pm 0,32$  SNU.

С 1987 г. солнечный нейтринный поток измеряется экспериментом Камиоканде. В этом эксперименте не найдено доказательств существования каких-либо существенных вариаций потока, связанных с солнечным циклом или каким-нибудь другим временным масштабом. Более того, в эксперименте не наблюдалось таких низких значений, как в Хлорном эксперименте.

Поскольку энергия нейтрино, регистрируемых в этих экспериментах, приблизительно одинакова, как показано в разделе 2.1, то кажется, что результаты противоречат друг другу.

Мы стоим перед выбором:

а) предположить, что результаты Камиоканде не верны. Но поскольку эксперимент осуществлен высококвалифицированной, хорошо финансируемой группой, выполнившей много проверок, то это кажется маловероятным. Более того, существование цикла с периодом в 10 лет требует нетривиального объяснения, поскольку, как показано в разделе 2.3, характерное время составляет  $\sim 10^7$  лет. Таким образом, это предположение маловероятно;

б) предположить, что результаты Камиоканде правильны, а в Хлорном эксперименте могут быть временные проблемы. Это предположение не требует никаких нетривиальных теоретических интерпретаций.

В этом случае выбор решения б) по принципу бритвы Оккама кажется намного более вероятным.

Таким образом, мы приходим к выводу, что свидетельства в пользу второй проблемы — существования больших вариаций потока с периодом солнечного цикла — не убедительны и фактически крайне маловероятны.

### 3.4. Скорость взаимодействия в Хлорном эксперименте

В течение времени работы Хлорного эксперимента было несколько неожиданных изменений скорости эффекта. Первые несколько лет были исключены из анализа, поскольку было найдено, что фон может быть существенно уменьшен путем регистрации различия между быстрым фронтом нарастания импульса от точечной ионизации в результате распада  $^{37}\text{Ar}$  и медленным фронтом от протяженного трека релятивистских частиц фона. В 1972 г. для величины эффекта был получен только верхний предел 1 SNU [34]. В течение периода с августа 1970-го по март 1984 г. средняя скорость была  $2,08 \pm 0,25$  SNU [33]. В этот момент в эксперименте наступил перерыв в связи с выходом из строя насосов. С августа 1986-го по март 1992 г. эффект был  $2,81 \pm 0,32$  SNU [34]. Эти изменения эффекта во времени показаны

на рис. 8а. Они дают основания предположить существование наладочного периода.

На рис. 8а также представлены предсказания модели Турк-Киез и Лопеца, где  $2\sigma$  и  $3\sigma$  соответствуют значениям в 2 и 3 стандартных отклонения. Видно, что результаты за последние пять с половиной лет не находятся в существенном противоречии с этой моделью.

Если в качестве предсказываемого значения взять  $4,8 \pm 1,1$  SNU, как найдено в разделе 2.9, то отличие от среднего значения за весь период будет  $2,25 \pm 1,1$  SNU, т.е. около двух стандартных отклонений. Следует отметить, что это существенно меньше, чем 14 стандартных отклонений, полученных Бакаллом и соавторами в [4].

Из вышеприведенного анализа флуктуаций эффекта мы заключаем, что в некоторые моменты времени эксперимент давал аномально низкие значения эффекта,

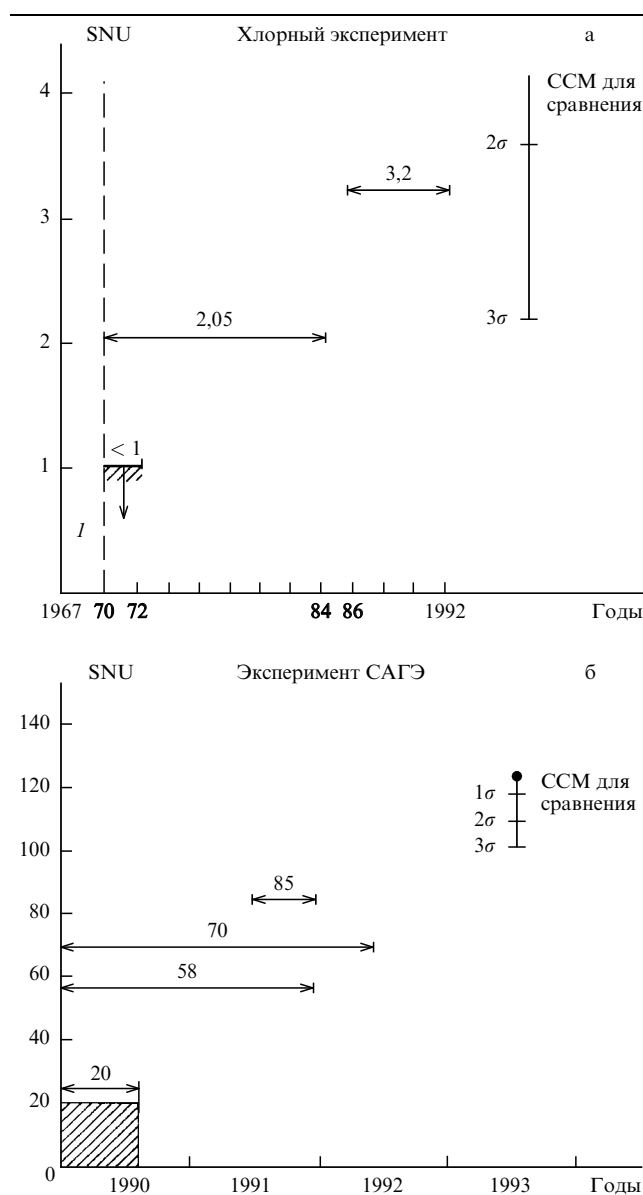


Рис. 8. Изменения измеренного потока солнечных нейтрино на март 1994 г. для (а) Хлорный эксперимент, 1 — данные за период с 1967-го по 1970 г. исключены, поскольку в них не использовался анализ формы импульса; (б) эксперимент САГЭ. Для сравнения используется модель Турк-Киез и Лопеца [9]

<sup>9</sup> Год максимума активности 21-го солнечного цикла. (Примеч. переводчика.)

что обусловило снижение среднего значения. Подобных флуктуаций, по-видимому, не было после замены насосов. В заключение следует сказать, что наряду с похвалой в адрес Хлорного эксперимента за первую попытку наблюдения солнечных нейтрино, анализ результатов показывает, что в эксперименте были временные проблемы в получении самосогласующегося набора данных (это объясняет заявленные флуктуации) и в результате среднее значение оказалось заниженным. Другими словами, экспериментальные данные указывают, что использовать данные Хлорного эксперимента до перерыва в 1984–1986 г. небезопасно.

### 3.5. Эксперимент Камиоканде

Группа, работающая в эксперименте Камиоканде, представила внутренне согласованные результаты, которые были тщательно проверены.

Однако казалось, что их первые результаты находились в существенном расхождении с моделью. Они были представлены в виде:

$$\text{Данные/CCM} = 0,46 \pm 0,08.$$

Если представить их в виде:

$$\text{Данные} - \text{CCM} = 0,54 \pm 0,08, \text{ то}$$

они соответствуют семи стандартным отклонениям.

Предсказание CCM здесь взято из статьи Бакалла и Ульриха [24], равное 7,9 SNU с ошибкой 11 %. Но вышеприведенное значение учитывает только экспериментальную ошибку в 17 % и пренебрегает теоретической. Если учесть теоретическую ошибку, то получим

$$\text{Данные} - \text{CCM} =$$

$$= (1,00 \pm 0,11) - (0,46 \pm 0,08) = 0,54 \pm 0,15,$$

т.е. только 3,6 стандартных отклонения.

Если для сравнения взять предсказание Турк-Киез с соавторами [16] 1988 г., составляющее 5,8 SNU с ошибкой 22 %, то отношение 0,46 увеличится до 0,70 и получим:

$$\text{Данные} - \text{CCM} =$$

$$= (1,00 \pm 0,22) - (0,70 \pm 0,11) = 0,30 \pm 0,24,$$

что составляет 1,3 стандартных отклонения и можно считать не существенным. Это показывает важность учета *всех* ошибок как экспериментальных, так и теоретических.

Самые последние данные эксперимента Камиоканде за 627 дней работы с более высокой эффективностью и меньшим порогом дают

$$\text{Данные/CCM} = 0,54 \pm 0,85,$$

где CCM снова значение Бакалла и Ульриха.

Если вместо этого взять величину Турк-Киез и Лопца [9] 1992 г. и учесть все ошибки, то различие будет составлять 1,5 стандартных отклонения.

Самые последние данные Камиоканде за 1670 дней с января 1987 г. по июль 1993 г. дают

$$\left(2,89^{+0,22}_{-0,21}\right) \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1},$$

что соответствует половине стандартного отклонения от предсказываемой величины  $(3,3 \pm 0,8) \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Следует отметить, что они представляют свой результат [35] в виде — Данные/CCM =  $0,54 \pm 0,04 \pm 0,06$ , где CCM — значение Бакалла и Пинсоннеалта [22], не учитывая существенных теоретических ошибок и новое более низкое значение  $S_{17}$ . Это, по-видимому, объясняет заявление Бакалла и др. [4], что "поток нейтрино от  $^8\text{B}$  в пяти хорошо обоснованных солнечных моделях отли-

чается от результата Камиоканде на  $4\sigma - 6\sigma$ ". Это противоречит найденному выше значению расхождения в  $0,5\sigma$ .

### 3.6. Советско-американский галлиевый эксперимент (САГЭ)

САГЭ вступил в строй в 1990 г., когда пять месячных экспозиций (ранов) в январе, феврале, марте, апреле и июле были признаны удовлетворительными. Полученный результат — 20 SNU с верхним пределом в 72 SNU — вызвал большое удивление и мог рассматриваться как важное свидетельство в пользу новой проблемы солнечных нейтрино, на этот раз для нейтрино низких энергий. Однако величина была столь низкой, что она противоречила всем моделям и в том числе самой минимальной модели, предполагающей только, что светимость обусловлена p-p реакцией. Интересно рассмотреть исходные данные, полученные в каждом из пяти месяцев отдельно — они показаны на рис. 9. На рис. 9 на временной шкале отмечены значения  $1\tau$ ,  $2\tau$  и  $3\tau$ , где  $\tau$  — период полураспада  $^{71}\text{Ge}$  — 11,4 суток. Следовало ожидать спад скорости счета в результате распада  $^{71}\text{Ge}$  и в дальнейшем плоскую кривую фона. На самом деле, однако, графики не показывают подобной зависимости. Три из них (январь, апрель и июль) дают отрицательную скорость счета для эффекта.

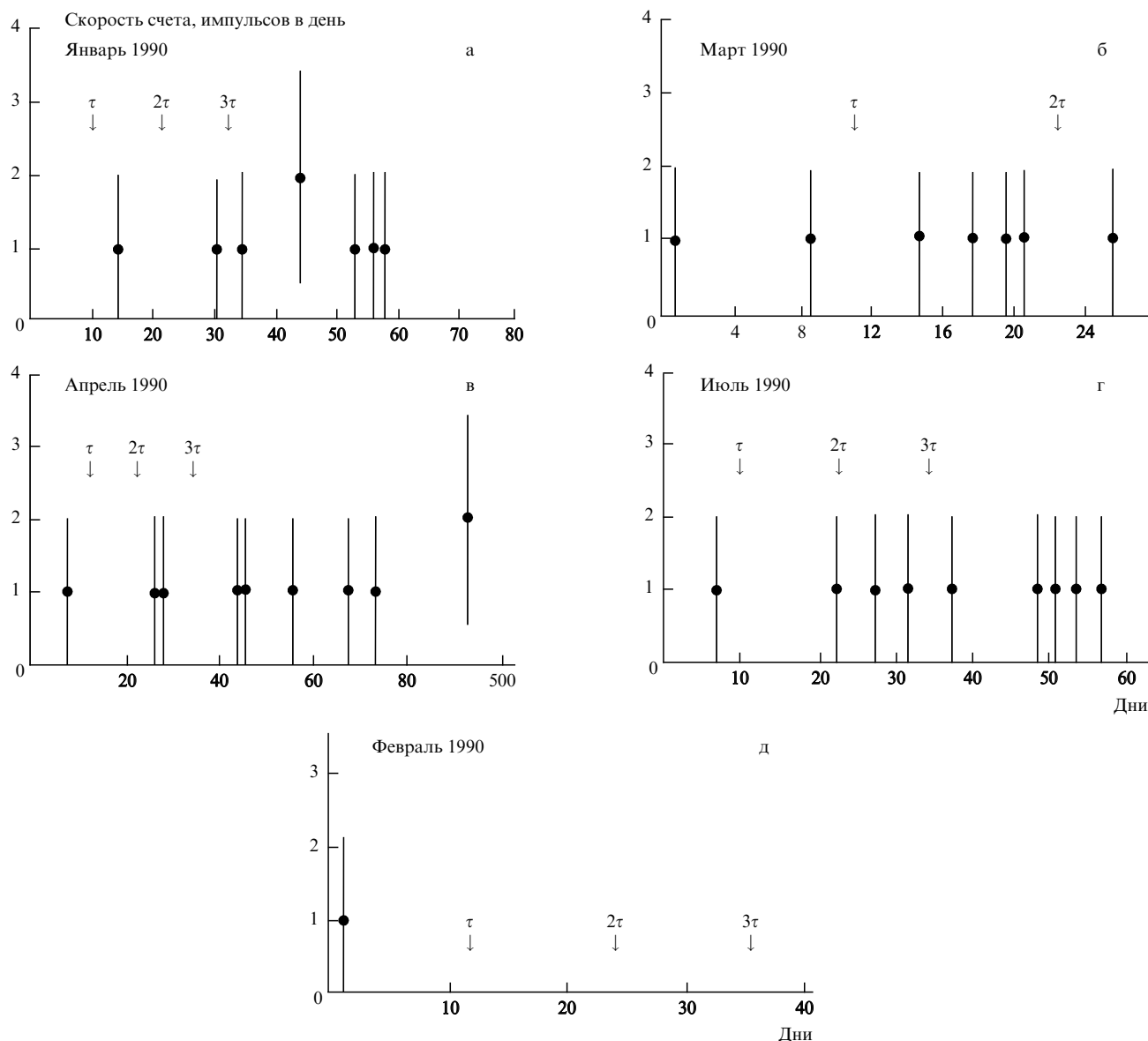
Было решено, что отрицательное значение является не физическим и скорости счета было приписано нулевое значение. Многие полагают, однако, что возможны статистические флуктуации, и отрицательные значения должны допускаться — в этом случае среднее за 5 месяцев, по-видимому, близко к нулю SNU. Необычной также выглядит картина для февраля — один импульс был зарегистрирован в первый день и не было ни одного события в последующие 61 день. Позднее данные были повторно проанализированы — и для февраля, и для марта были увеличены до 94 и 109 SNU соответственно, а трем оставшимся ранам по-прежнему приписаны нулевые значения. Вторая переоценка [36] дала значения 80 и 100 SNU и среднее по всем пяти ранам  $40^{+31}_{-38}$  SNU. Хотя новое значение увеличилось в 2 раза, оно согласуется с первоначальным в пределах неопределенностей. Изменение значений в процессе повторных анализов возникало в результате изменений разрешенного окна на графике, где показано время нарастания в зависимости от амплитуды.

Продолжение экспериментов в 1991 и 1992 гг. дало значение около 85 SNU и известные результаты на март 1994 г. суммированы на рис. 8б, и опять они больше похожи на наладочный этап.

Однако в мае 1994 г. были представлены результаты нового анализа данных [36] со значениями для 1991, 1992 и 1993 гг.  $(100^{+31}_{-38})$  SNU,  $(62^{+29}_{-27})$  SNU и  $(76^{+26}_{-19})$  SNU соответственно со средним значением для периода с 1990-го по 1993 г.  $(74^{+13}_{-12} \text{ стат.}; ^{+5}_{-7} \text{ сист.})$  SNU.

Так как больше не нужно объяснять аномально низкую величину 1990 г. (верхний предел 72 SNU), то нет необходимости использовать бритву Оккама и предполагать, что этот период просто связан с наладкой. Учитывая результаты за весь период, мы можем просто принять для величины эффекта значение  $74 \pm 14$  SNU.

Дальнейшие планы САГЭ состоят в калибровке детектора искусственным источником нейтрино  $^{51}\text{Cr}$  в 1994 г.



**Рис. 9.** Отсчеты, зарегистрированные в эксперименте САГЭ в первых пяти ранах в 1990 г., (а) январь 1990 г., наиболее вероятное значение 0,0 SNU; (б) март 1990 г., наиболее вероятное значение 88,8 SNU; (в) апрель 1990 г., наиболее вероятное значение 0,0 SNU; (г) июль 1990 г., наиболее вероятное значение 0,0 SNU; (д) февраль 1990 г., наиболее вероятное значение 35,8 SNU. Стрелки соответствуют одному, двум и трем периодам полураспада,  $\tau = 11,4$  суток

### 3.7. Эксперимент Галлекс

Эксперимент Галлекс осуществляется высококвалифицированной коллаборацией с хорошим финансированием, работающей при почти идеальных условиях в Гран Сассо. Две выполненные серии экспозиций [37] дали почти одинаковый эффект (81 и 78 SNU) со средним значением  $79 \pm 10 \pm 6$  SNU. Хотя у них только 30 т галлия, они имеют сравнительно высокую скорость счета, так как измеряют электроны не только с энергией 10,3 кэВ, но и электроны с энергией 1,1; 1,2 и 1,3 кэВ. Важным достоинством эксперимента является то, что выполнено 19 проверочных бланковых ранов.

Поскольку результат Галлекса ниже предсказаний всех солнечных моделей, важной проверкой будет контрольный эксперимент с искусственным источником нейтрино  $^{51}\text{Cr}$  порядка МКи, который планируется начать в июне.

### 3.8. Сравнение результатов галлиевых экспериментов с моделями

Если сравнить результаты эксперимента Галлекс с величиной  $122,5 \pm 7$  SNU, предсказываемой выбранной в разделе 2.9 моделью сравнения, то различие будет составлять 2,9 стандартных отклонения. Для САГЭ различие примерно такое же — около трех стандартных отклонений.

Таким образом, для нейтрино низких энергий свидетельства в пользу существования проблемы нельзя считать решающим, но их можно назвать интересными и многое будет зависеть от результатов калибровочного эксперимента с источником  $^{51}\text{Cr}$ .

Однако следует отметить, что выбор наилучшей теоретической величины остается неопределенным и необходимо решить вопрос о причинах расхождения между Бакаллом и Даром.

## 4. Выводы

- 1) Эксперименты сложны и статистика часто очень мала.
- 2) Есть указания, что эксперименты находятся еще в стадии наладки.
- 3) Вторую проблему существования флуктуаций с периодом солнечного цикла порядка десяти лет, по-видимому, можно считать исключенной.
- 4) Есть основания полагать, что в Хлорном эксперименте до 1985 г. есть периоды с очень низкими значениями и использовать данные за это время небезопасно.
- 5) Нейтринные потоки в каждом из четырех экспериментов, рассматриваемых отдельно, не расходятся существенно с наилучшими модельными предсказаниями, хотя для галлиевых экспериментов желательно продолжение набора статистики.
- 6) Различие между теорией и экспериментами постоянно исчезает со временем.
- 7) Результаты всех экспериментов ниже модельных предсказаний. В моделях по-прежнему значительные неопределенности. Одним из возможных объяснений могут быть когерентные эффекты в плазме, но они требуют дальнейшего изучения до того, как окончательное заключение может быть сделано.
- 8) Основания для существования любой из трех возможных проблем солнечных нейтрино не столь очевидны.
- 9) Желательна лучшая статистика, которая будет доступна в следующем поколении экспериментов.

Независимо от проблемы солнечных нейтрино всестороннее изучение Солнца, являющегося единственной расположенной близко к нам звездой, должно быть выполнено столь тщательно, насколько это возможно.

Я хотел бы выразить благодарность за многочисленные плодотворные дискуссии многим людям, включая Дж.Н. Бакалла, Т. Боулса, С. Чарбонелла, А. Дара, М. Гая, В.Н. Гаврина, Т. Кирстена, К. Ланде, А. Мандера, М.Х. Пинсоннеалта, Г. Шавива, А. Сузуки, У. Сузуки, У. Тотсуки и С. Турк-Киез. Однако они не несут ответственность за выводы этой статьи.

## Список литературы

1. Morrison D R O *Intl. Conf. on High Energy Phys.* (Eds K K Phua, Y Yamaguchi) (Singapore: World Scientific, 1990) 676–680; *Particle World* **3** 30 (1992); *Intl. J. of Mod. Phys.* **D1** 281 (1992); CERN-PPE/93-196; XXIII Intl. Symp. on Multiparticle Dynamics, Aspen, Sept. 1993; 3rd Nestor Workshop, Pylos, October 1993
2. Kovetz A, Shaviv G *Astrophys. J.* (в печати)
3. Dar A, Shaviv G *Phys. Rev. Lett.* (в печати)

4. Bahcall J N et al. E-mail; Inst. for Adv. Studies, Princeton preprint, IASSNS-AST 94/13
5. Dar A, Shaviv G E-mail; Technion preprint
6. Schwartzchild M et al. *Astrophys. J.* **125** 233 (1957)
7. Turck-Chieze S et al. *Phys. Rep.* **230** 57 (1993)
8. Bahcall J N *Neutrino Astrophysics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1989) p. 319 [Перевод на русский язык: Дж. Бакал *Нейтринная астрофизика* (М.: Мир, 1993)]
9. Turck-Chieze S, Lopez I *Astrophys. J.* **408** 347 (1993)
10. Roberts F J, Inglesias C A *Astrophys. J. Suppl.* **79** 507 (1992)
11. Courtaud D et al. *Solar Phys.* **128** 49 (1990)
12. Sonaglia et al. *Nature* (London) **368** 599 (1994)
13. Anders E, Grevesse N *Geochim. Cosmochim. Acta* **53** 197 (1989)
14. Tsytoich V N et al., "Collective Plasma effects in the Radiative Transport in Solar Interior", in *Proc. Intl. Topical Workshop on Solar-Neutrino Problem* (Eds V Berezhinsky, E Fiorini) (Gran Sasso, 1994)
15. Johnson C W et al. *Astrophys. J.* **392** 320 (1992)
16. Turck-Chieze S et al. *Astrophys. J.* **355** 415 (1988)
17. Kavanagh R W et al. *Bull. Am. Phys. Soc.* **149** 1209 (1969)
18. Filippone B W et al. *Phys. Rev. Lett.* **50** 412 (1983); *Phys. Rev. C* **28** 2222 (1983)
19. Baldini A, Flaminio V, Morrison D R O, Moorhead W G "Total Cross Sections for Reactions of High Energy Particles" *Landolt-Bornstein New Series* **12a**; **12b** (1987); Ezhela V V et al. "Electron-Positron Interactions" *Landolt-Bornstein New Series* **14** (1992)
20. Particle Data Group *Phys. Rev.* **D45** (11) Part II (1992)
21. Motobayshi T to be publ. *Phys. Rev. Lett.* (1994)
22. Bahcall J N, Pinsonneault M H *Rev. Mod. Phys.* **64** 885 (1992)
23. Russager K, Jensen A S Aarhus preprint, IFA-93-1 (1993)
24. Bahcall J N, Ulrich R K *Rev. Mod. Phys.* **60** 297 (1988)
25. Nordlinger P D *Astron. Astrophys.* **57** 407 (1977)
26. Shaviv G (частное сообщение)
27. Bahcall J N Inst. For Adv. Studies, Princeton preprint IASSNS-AST 93/69 (1993)
28. Garcia A et al. *Phys. Rev. Lett.* **67** 3654 (1991)
29. Liebrecht K G, Woodward M F *Nature* (London) **345** 779 (1990)
30. Morrison D R O *Nature* (London) **366** 29 (1993)
31. William Ockham (c 1280–1349), "Pluralites non est ponenda sine necessitate", translated by the *Encyclopaedia Britannica* as "Multiplicity ought not to be posited without necessity" or more colloquially, "Don't assume New Physics if known ideas will explain"
32. Lande K данные представленные на конференции "Нейтрино 94" (Eliat, May 1994)
33. Lande K февраль 1994 (частное сообщение)
34. [8] p. 319
35. Suzuki Y Конференция "Нейтрино 94" (Eliat, May 1994)
36. Gavrin V N et al. (SAGE) *Phys. Rev. Lett.* **67** 3332 (1990)
37. Gavrin V N (SAGE) Конференция "Нейтрино 94" (Eliat, May 1994)
38. Anselmann P et al. (GALLEX) *Phys. Lett.* **B327** 377 (1994)
39. Christensen-Dalsgaard J "Seismology of the Sun and Sun-like Stars" (Ed. E J Rolfe) ESA SP-286, 431 (1988)

## THE STEADY VANISHING OF THE THREE SOLAR NEUTRINOS PROBLEMS

D.R.O. Morrison

European Organization for Nuclear Research

CERN, Geneva 23, Switzerland

E-mail: morrison@vxprix.cern.ch

Three problems have been claimed for solar neutrinos. Firstly it has been said for over 20 years, that the flux of high energy neutrinos was substantially less than that predicted from solar evolutionary models. Secondly it was claimed that there were violent fluctuations in the high energy neutrino flux and that their periodicity was close to that of the sunspot cycle. Thirdly, recently evidence was presented that low energy neutrinos may also have a flux deficit. The second problem is shown to be unreasonable and in disagreement with the more recent Kamiokande experiment. The other two problems of flux are shown to be vanishing with time. This is not from a single cause but from a series of improvements of the input data to the models, to a better appreciation of the errors which had sometimes been significantly underestimated, and also some of the experimental values have increased with time indicating a learning curve for some of these very difficult experiments with very low statistics. Finally it is concluded that the evidence for any solar neutrino problem is 'not compelling'.

PACS numbers: 96.60.Kx

Bibliography — 39 references

Received 20 September 1994, translation 23 January 1995