

# ПРОБЛЕМА СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО И РАДИОХИМИЧЕСКИЙ ЛИТИЕВЫЙ ДЕТЕКТОР

*С.Н.Даньшин, Г.Т.Зацепин, А.В.Копылов,  
В.В.Петухов, Е.А.Янович*

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Рассмотрена проблема солнечных нейтрино по имеющимся в настоящее время экспериментальным данным, и показаны возможности радиохимического литиевого детектора для решения этой проблемы, в частности, для определения вклада от нейтрино промежуточных энергий и борных нейтрино в хлорном и галлиевом детекторах. Приведено краткое описание прототипа литиевого детектора с мишенью из 300 кг металлического лития, создаваемого в ГНЦ «ИЯИ РАН».

The problem of solar neutrinos is considered on the basis of the available experimental data and the possibilities of the radiochemical lithium detector for the solution of this problem are shown, in particular for the determination of the effect from the medium energy neutrinos and Boron neutrinos in chlorine and gallium detectors. Brief description is presented of the prototype of the lithium detector with the target of 300 kg of metal lithium, which is at the moment under construction at the INR RAS.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Прошло 25 лет с момента начала работы первого детектора солнечных нейтрино — хлор-аргонового детектора Р.Дэвиса, который впервые зарегистрировал солнечные нейтрино и впервые показал, что наблюдается существенный дефицит нейтрино высоких энергий (борные нейтрино) от Солнца [1]. Этот результат позднее получил подтверждение на установке КАМИОКАНДЕ [2] в Японии. В настоящее время работают четыре установки, регистрирующие солнечные нейтрино, три радиохимических: HOMESTAKE [3], SAGE [4] и GALLEX [5] и одна электронная — водный черенковский детектор КАМИОКАНДЕ. В работах [6—8] приведены предсказания теории по стандартной солнечной модели. Было отмечено [6], что предсказания различных авторов хорошо согласуются друг с другом, если

принимать одинаковые исходные параметры. Здесь мы будем использовать результаты работы [6].

Суммируя результаты, полученные к настоящему времени, следует отметить следующие существенные моменты: во-первых, надежно установлен сам факт более низкого потока борных нейтрино по сравнению с предсказаниями теории, во-вторых, суммарный эффект от нейтрино низких (*pp*-нейтрино) и промежуточных (*pp*-,  ${}^7\text{Be}$ , CNO) энергий ниже ожидаемого по стандартной солнечной модели. Чисто астрофизическое решение этой проблемы встречает серьезные затруднения, как это показано, например, в работах [9,10]. Предпринимались попытки найти объяснение возникшего противоречия, привлекая нейтринные осцилляции в вакууме [11-13] и резонансное превращение нейтрино в веществе (эффект Михеева — Смирнова — Вольфенштейна) [14—16]. В последнее время в ряде работ [17,18] приводятся достаточно серьезные аргументы в пользу возможной корреляции между магнитным полем на Солнце в области низких широт и наблюдаемым эффектом в хлор-аргоновом эксперименте, что означало бы спин-ароматные осцилляции нейтрино в магнитном поле на Солнце [19,20]. Однако мы все еще не в состоянии решить проблему солнечных нейтрино, т.к. для этого нам существенно недостает данных, которые позволили бы определить вклад от отдельных источников нейтрино.

Попробуем сформулировать основные вопросы, на которые нам необходимо получить ответ, чтобы можно было однозначно интерпретировать имеющиеся данные.

1. Какой вклад дают борные нейтрино и нейтрино от  ${}^7\text{Be}$  в суммарный результат хлор-аргонового детектора и какой вклад от *pp*-*pp* нейтрино и нейтрино от  ${}^7\text{Be}$  в галлиевом детекторе?
2. Если наблюдается подавление нейтрино от  ${}^7\text{Be}$ , является ли фактор подавления одинаковым для всех нейтрино промежуточных энергий?
3. Наблюдаются ли вариации солнечных нейтрино, связанные с 22-летним циклом Солнца и, возможно, с флуктуациями магнитного поля на Солнце?
4. Каков спектр борных нейтрино на Земле по сравнению со спектром генерации?
5. Имеется ли примесь нейтрино других ароматов, помимо электронных нейтрино, в потоке солнечных нейтрино на Земле?

Для решения проблемы солнечных нейтрино необходимо получить ответы на эти вопросы. Поэтому создание новых детекторов солнечных нейтрино нацелено на решение этой задачи. К 2000-му году планируется начать измерения еще на двух крупных установках: большом водном черенковском детекторе SUPERKAMIOKANDE [21] в Японии и SNO — черенковском детекторе с 1000 тонн тяжелой воды в Канаде [22]. Результаты,

полученные на этих установках, позволят, если проблемы фона будут успешно преодолены, ответить на 3, 4 и 5-й вопросы. Помимо этих установок в настоящее время активно ведется работа по созданию сцинтилляционного детектора солнечных нейтрино BOREXINO [23]. На наш взгляд, вопросы фона для сцинтилляционного детектора, который не обладает способностью выделять сигнал по направлению прилета нейтрино, как может, например, установка KAMIOKANDE, и нет возможности организовать «blank run» (который, в определенном смысле, является как бы измерением с «выключенным» Солнцем и позволяет определять фон для радиохимических установок), необычайно сложны. Нам представляется, что будет особенно трудно бороться с фоном от радиоактивных примесей с периодом полураспада от нескольких лет до нескольких сотен лет, в особенности, если это чистые бета-распадчики с формой бета-спектра, имитирующей сигнал от нейтрино от  ${}^7\text{Be}$  (в качестве примера можно привести изотоп  ${}^{113\text{m}}\text{Cd}$  с периодом полураспада 13,6 года). Сложность с этим источником фона обусловлена очень низкой (на уровне  $10^{-25}$  г/г) допустимой концентрацией таких примесей в рабочем материале детектора, что чрезвычайно осложняет задачу. Однако, если проблемы фона будут решены, детектор BOREXINO сможет дать ответ на первый вопрос. Далее, в контексте всего сказанного, мы хотели бы определить место литиевого детектора в представленной нами схеме и показать его перспективность.

## 2. ЛИТИЕВЫЙ ДЕТЕКТОР СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО

В работе [6] приведены расчеты потоков солнечных нейтрино, полученные из стандартной модели Солнца с учетом диффузии тяжелых элементов и гелия для уточненных данных, закладываемых в модель. Скорости захвата солнечных нейтрино для хлорного и литиевого детектора, согласно данным этой работы, представлены в табл.1.

Следует заметить, что нейтрино, рождающиеся на Солнце и дающие основной вклад в этих детекторах, ввиду близости порога регистрации для этих детекторов — 0,8 МэВ для хлорного и 0,86 МэВ для литиевого — можно условно разделить на две группы: нейтрино высоких энергий (борные нейтрино) и нейтрино промежуточных энергий с эффективной энергией, дающей основной вклад для лития, в районе 1 МэВ. Весьма актуальным, на наш взгляд, в особенности для выяснения, насколько реальным может быть эффект Михеева — Смирнова — Вольфенштейна (МСВ) [16], а также решения с вакуумными осцилляциями нейтрино [13], является выяснение степени подавления нейтрино высоких и низких энергий. По этой причине мы можем просуммировать эффект от нейтрино промежуточных

Таблица 1. Скорости захвата нейтрино от Солнца для хлорного и литиевого детекторов по стандартной солнечной модели

Источник нейтрино	Хлор, SNU	Литий, SNU
<i>реп</i>	0,22	9,2
${}^7\text{Be}$	1,24	10,2
${}^8\text{B}$	7,36	25,2
${}^{13}\text{N}$	0,11	2,1
${}^{15}\text{O}$	0,37	5,1
В сумме	$9,3^{+1,2}_{-1,4}$	$51,8^{+3,5}_{-4,2}$

энергий для этих двух детекторов, и тогда мы получаем систему из двух уравнений с двумя неизвестными (если измерена скорость захвата солнечных нейтрино в литии):

$$\begin{cases} 7,36 \cdot X + 1,94 \cdot Y = 2,55 \pm 0,25 \\ 25,2 \cdot X + 26,4 \cdot Y = P. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $P$  — скорость образования  ${}^7\text{Be}$  в литии,  $X$  — фактор подавления борных нейтрино,  $Y$  — фактор подавления нейтрино промежуточных энергий. В уравнения входят только ошибки измерения, неопределенности теоретических предсказаний в основном взаимно погашаются за счет перехода в факторы  $X$  и  $Y$ . Остается небольшая непогашаемая часть за счет неоднородности величин от разных источников промежуточных энергий. Из первого уравнения этой системы, описывающей результат хлор-аргонового эксперимента, мы имеем ограничения на величины  $X$  и  $Y$ :  $1 \geq Y \geq 0$ ;  $0,40 \geq X \geq 0,05$ .

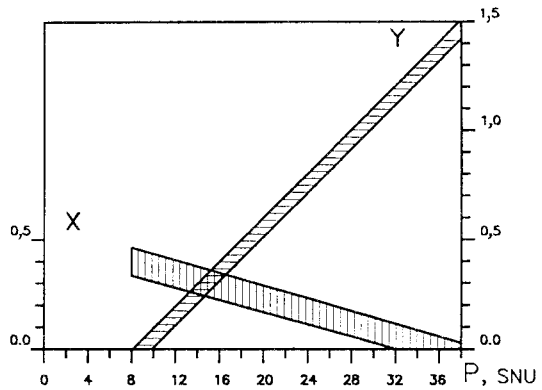
Следует отметить также, что для хлор-аргонового детектора мы приняли среднюю величину за все время измерения. Если указания на антикорреляцию с магнитным полем на Солнце найдут дальнейшее подтверждение, необходимо будет брать средние величины за более узкие интервалы времени. Однако, поскольку здесь нам важно описать в целом подход к проблеме, мы считаем излишним приводить анализ в деталях.

Система уравнений (1) имеет тривиальное решение:

$$\begin{cases} X = 0,46 \pm 0,045 - 0,013 \cdot P \\ Y = 0,05 \cdot P - 0,44 \pm 0,043. \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 1 изображены области, соответствующие этим уравнениям, откуда видно, что ожидаемый результат литиевого детектора, который можно

Рис.1. Факторы подавления для борных нейтрино и нейтрино промежуточных энергий ( $X$ ,  $Y$  — отношение измеренных величин потоков к расчетным)



совместить с результатом хлорного детектора, в рассматриваемом сценарии находится в интервале от 8 до 38 SNU. Следует заметить также, что максимальная величина  $X$ , получаемая

здесь, равна 0,4, что в пределах  $1\sigma$  совпадает с результатом ( $0,45 \pm 0,08$ ), полученным на установке KAMIOKANDE, при этом литиевый детектор должен дать 8—10 SNU от солнечных нейтрино. Этот случай, по-видимому, представляет особый интерес, т.к. означает глубокое подавление нейтрино промежуточных энергий с вытекающей отсюда возможностью зафиксировать параметры нейтринных осцилляций.

Литиевый детектор с 10 тоннами металлического лития, разрабатываемый нами в настоящее время, по оценкам позволит получить в одном измерении эффекта от солнечных нейтрино точность порядка 12%, если принять скорость захвата солнечных нейтрино равной 20 SNU. Конечно, это станет возможным, если будет успешно реализована регистрация  ${}^7\text{Be}$  с помощью криогенного детектора. Мы рассчитываем на успех этой методики регистрации, имея в виду быстрый прогресс в этой области после пионерских работ Фиорини [24]; так, например, уже в настоящее время группой профессора Витале в Генуе (Италия) показана [25] надежная регистрация  $M$ -пика  $M\mu$  от источника  ${}^{55}\text{Fe}$  с энерговыделением 82 эВ. За один год на литиевом детекторе мы планируем выполнить четыре измерения, так что в результате мы сможем получить точность на уровне 6%. Как видно из рис.1, это позволит выделить весьма узкую область по  $X$  и  $Y$ .

Полученный результат позволит внести ясность в вопрос о корректности сопоставления результатов хлорного детектора и установки KAMIOKANDE, однозначно интерпретировать результаты галлиевого эксперимента и, если к тому времени заработает установка BOREXINO, даст возможность, сопоставляя результаты, полученные на этой установке и на литиевом детекторе, выяснить, равен ли фактор подавления нейтрино промежуточных энергий фактору подавления нейтрино от  ${}^7\text{Be}$ . Таким образом, при успешной работе упомянутых нами установок мы получим ответы на перечисленные выше вопросы, что существенно продвинет исследования в

этой области. Это еще раз показывает, что в изучении солнечных нейтрино получаемые результаты имеют взаимно дополняющее значение, и только успешная работа всех установок позволяет решить проблему солнечных нейтрино.

### 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ТЕХНИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящее время на стадии отработки методики литиевого детектора нами создается прототип литиевого детектора на 300 кг металлического лития. Схема установки приведена на рис.2. На этой установке, помимо задачи чисто методического характера, планируется провести следующие измерения.

1. Измерить выход  ${}^7\text{Be}$  от адронов космических лучей на уровне моря. Эта работа станет доказательством осуществимости извлечения из металличе-

ского лития атомов бериллия, образованных в материале мишени под воздействием внешнего источника, а также позволит определить оптимальную глубину расположения этой установки для проведения последующих измерений. Это объясняется тем, что установка должна быть расположена достаточно глубоко, чтобы эффект от космических лучей не подавлял эффект от искусственного источника нейтрино, но не слишком глубоко, чтобы можно было получить калибровочную точку с хорошей статистикой для кривой фона от мюонов в зависимости от глубины.

2. Измерить выход  ${}^7\text{Be}$  от мюонов космических лучей на этой глубине.

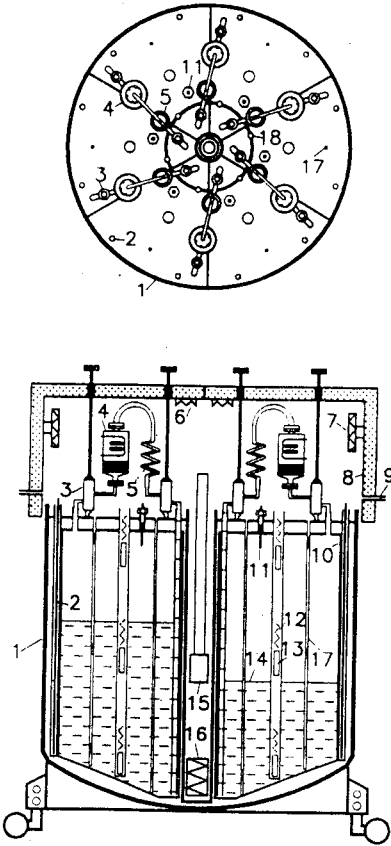


Рис.2. Упрощенная схема литиевого детектора: 1 — внешняя оболочка; 2 — нагреватели; 3 — вентили для расплавленного лития; 4 — ловушки; 5 — змеевики для теплообмена литий — воздух; 6 — термоматчики; 7 — нагреватели; 8 — термоизоляция; 9 — трубки для входа-выхода воздуха; 10 — секция для лития; 11 — индикатор уровня; 12 — термоматчики; 13 — нагреватели; 14 — расплавленный литий; 15 — нейтринный источник; 16 — нагреватель; 17 — каналы для термоматчиков

3. Провести калибровку литиевой мишени с помощью искусственного источника нейтрино на основе  $^{65}\text{Zn}$ . Здесь следует отметить, что литиевый детектор выгодно отличается от других детекторов солнечных нейтрино малой массой мишени — всего лишь десять тонн. Это обстоятельство делает его также весьма привлекательным для проведения калибровки с помощью искусственного источника нейтрино. Даже на прототипе установки с массой всего лишь 300 кг лития такой эксперимент становится возможным. При этом точность измерения составит 5% для источника с активностью всего лишь 37 кКи, который может быть получен путем облучения 3,5 кг цинка естественного изотопного состава потоком тепловых нейтронов  $3,2 \cdot 10^{15} \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$  в течение 30 дней. В табл.2 приведены расчетные характеристики для калибровки литиевой мишени на установке из шести секций, из них пять секций заполнены литием, одна секция не заполнена, что позволяет последовательным передавливанием лития из полной секции в пустую, через ловушку, где собирается бериллий, производить извлечение.

Геометрический фактор, приведенный в табл.1, есть величина  $G = \frac{1}{4\pi} \int \frac{dV}{r^2}$ , при этом для скорости образования получаем  $N = \sigma n S G$ ,

здесь  $\sigma$  — поперечное сечение ( $\nu, e^-$ )-реакции,  $n$  — количество атомов мишени в  $1 \text{ см}^3$ ,  $S$  — мощность источника. Успешное проведение эксперимента с искусственным источником нейтрино, с учетом обстоятельства, что регистрация  $^7\text{Be}$  будет проведена с помощью криогенного детектора, станет решающим свидетельством о готовности методики для проведения полномасштабного эксперимента по регистрации солнечных нейтрино.

В настоящее время работа находится на стадии сборки прототипа литиевого детектора. В конструктивном плане нами предложен и осуществляется вариант секционированного детектора в одном корпусе, позволяющий существенно ускорить процесс извлечения бериллия и имеющий ряд

Таблица 2. Основные характеристики калибровки

Масса мишени	300 кг металлического лития
Геометрический фактор	42,2 см
Активность источника	37 кКи
Сечение	$2,25 \cdot 10^{-44} \text{ см}^2$
Эффективность регистрации	71%
Время экспозиции	240(4 · 60) дней
Полное количество импульсов	400
Статистическая ошибка	5%

преимуществ в чисто техническом плане. Как уже упоминалось выше, существенным моментом здесь также является улучшение регистрации  ${}^7\text{Be}$  с помощью криогенного детектора.

Данная работа была выполнена при частичной поддержке Международного научного фонда и Российского правительства (грант MSJ300).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Davis R.Jr.** — In: *Frontiers of Neutrino Astrophysics*, ed. by Y.Suzuki and K.Nakamura, Universal Academy Press, Stanford, 1993.
2. **Suzuki Y.** — Proc. of the 6th Int. Workshop «Neutrino Telescopes», Venice, February 22—24, 1994 (ed. M.Baldo Ceolin).
3. **Cleveland B.T. et al.** — *Nucl.Phys.B(Proc.Suppl.)*, 1995, vol.38, p.47.
4. **Abdurashitov J.N. et al. (SAGE Collaboration)** — *Phys.Lett.*, 1994, vol.328B, p.234.
5. **Anselmann P. et al. (GALLEX Collaboration)** — *Phys.Lett.*, 1995, vol.357B, p.237.
6. **Bahcall J.N., Pisonneault M.H.** — *Solar Models with Helium and Heavy Element Diffusion*, Preprint IASSNS-AST 95/24, May 1995, Institute for Advanced Study, Princeton.
7. **Turch-Chieze S., Lopes I.** — *Ap.J.*, 1993, vol.408, p.347.
8. **Shaviv G.** — *Nucl.Phys.B (Proc.Suppl.)*, 1995, vol.38, p.81.
9. **Bahcall J.N., Bethe H.A.** — *Phys.Rev.D*, 1993, vol.47, p.1298.
10. **Hata N., Bludman S., Langacker P.G.** — *Phys.Rev.D*, 1994, vol.49, p.3622.
11. **Понтекорво Б.** — *ЖЭТФ*, 1957, т.33, с.549, 1958, т.34, с.247.
12. **Bilenky S.M., Pontecorvo B.** — *Phys.Rep.*, 1978, vol.41, p.225.
13. **Krastev P.I., Petcov S.T.** — Preprint IASSNS-AST 95/40, October 1995, Institute for Advanced Study, Princeton.
14. **Wolfenstein L.** — *Phys.Rev.*, 1978, vol.D17, p.2369.
15. **Михеев С.П., Смирнов А.Ю.** — *ЯФ*, 1985, т.42, с.913.
16. **Krastev P.I., Smirnov A.Yu.** — *Phys.Lett.*, 1994, vol.338B, p.282.
17. **Oakley D.S., Snodgrass H.B., Ulrich R.K., VanDeKor T.L.** — *Astrophys.J.*, 1994, vol.437, p.63.
18. **Обритко В.Н., Ривин Ю.Р.** — *Изв. РАН (сер. физ.)*, 1995, т.59, с.110.
19. **Волошин М.Б., Высоцкий М.И.** — *ЖЭТФ*, 1986, т.44, с.845.
20. **Волошин М.Б., Высоцкий М.И., Окунь Л.Б.** — *ЖЭТФ*, 1988, т.64, с.1368.
21. **Kajita T.** — *Physics with the Super Kamiokande Detector*, ICRR Report 185-89-2, 1989.
22. **Ewan G. et al.** — *Sudbury Neutrino Observatory Proposal*, SNO-87-12, 1987.
23. **Arpesella C. et al.** — *BOREXINO proposal* (eds. G.Bellini, R.Raghavan, et al.), Univ. of Milano, 1992.
24. **Alessandro A., Brofferio C., Camin D.V. et al** — In: *Proc. of Low Temperature Detectors for Neutrinos and Dark Matter III*, Gran Sasso, L'Aqu.
25. **Fontanelli F., Galeazzi M., Gatti F. et al.** — *Proc. of the Int. Conf. LTD-6*, Interlaken, Switzerland, 1995.