

ЗАГАДКИ СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО

Ю.И. Стожков, А.Б. Струминский

Анализируются экспериментальные данные Cl-Ar детектора солнечных нейтрино, их временные вариации и возможная связь этих вариаций с солнечной активностью и космическими лучами.

Регулярные наблюдения потока высокоэнергичных солнечных нейтрино начались на хлор-аргоновом детекторе Р. Девисом и его коллегами в 1970 г. и продолжаются по настоящее время. Для детектирования нейтрино используется реакция ${}^{37}\text{Cl}(\nu, e^{-}){}^{37}\text{Ar}$, имеющая энергетический порог $E_{\nu} = 0,831$ МэВ /1/. С 1987 г. имеются данные японской установки "Камиоканде-II", которая регистрирует высокоэнергичные солнечные нейтрино по их упругому рассеянию на электронах /2, 3/. В стадии запуска находятся две Ga-Ge установки (ФРГ и СССР – США). Эти установки дадут возможность регистрировать низкоэнергичные солнечные нейтрино из pp-реакции водородного цикла (порог реакции ${}^{71}\text{Ga}(\nu, e^{-}){}^{71}\text{Ge}$ $E_{\nu} = 0,233$ МэВ) /4/.

К настоящему времени одним из основных результатов, полученных на хлор-аргоновой установке (подтвержденным установкой "Камиоканде-II"), является существенно меньшая величина потока солнечных нейтрино по сравнению с расчетной из стандартной солнечной модели (CCM). Согласно /3/, отношения скоростей счета хлор-аргоновой установки $Q(\text{Cl-Ar})$ и установки "Камиоканде-II" $Q(\text{Кам. II})$ к скорости счета, ожидаемой из стандартной солнечной модели $Q(\text{CCM})$, равны:

$$0,39 \pm 0,1 \leq \frac{Q(\text{Cl-Ar})}{Q(\text{CCM})} \leq 0,53 \pm 0,1; \quad \frac{Q(\text{Кам. II})}{Q(\text{CCM})} = 0,46 \pm 0,2.$$

Несмотря на многочисленные попытки объяснить расхождение теории и эксперимента, вопрос остается открытым по настоящее время /4/ и составляет одну из загадок солнечных нейтрино. Другими необъясненными особенностями данных хлор-аргонового эксперимента являются 11-летние вариации скорости счета и их возможное увеличение во время мощных солнечных вспышек. Остановимся на рассмотрении этих двух вопросов.

В работах /6, 5/ показано, что скорость счета хлор-аргонового детектора меняется в 11-летнем цикле солнечной активности в противофазе с числом солнечных пятен или их групп. Данные, полученные за последние годы наблюдений, подтверждают этот вывод. На рис. 1 показаны среднегодовые значения скорости Q образования радиоактивных атомов ${}^{37}\text{Ar}$ в хлор-аргоновой установке, число групп солнечных пятен η /7/ и поток космических лучей N_m , полученный в стратосферных измерениях. В среднегодовых значениях Q не учтены сеансы № 19, 27, 71, во время которых произошли мощные вспышки солнечных космических лучей. Коэффициенты корреляции $R(Q, \eta)$, $R(Q, N_m)$ и $R(N_m, \eta)$ для различных временных сдвигов ΔT между исследуемыми величинами приведены на рис. 2. Обращают на себя внимание следующие факты:

$R(Q, \eta)$ является отрицательной величиной и имеет минимальное значение $-0,64 \pm 0,13$ при $\Delta T = T_{\eta} - T_Q = -0,5$ года (кривая а);

$R(N_m, \eta)$ также является отрицательной величиной и имеет минимальное значение $-0,83 \pm 0,07$ при $\Delta T = T_{\eta} - T_N = -0,5$ года (б),

$R(Q, N_m)$ является положительной величиной с максимумом $0,47 \pm 0,18$ и $0,61 \pm 0,14$ при $\Delta T = T_N - T_Q = 0$ и $\Delta T = 11$ годам соответственно (в).

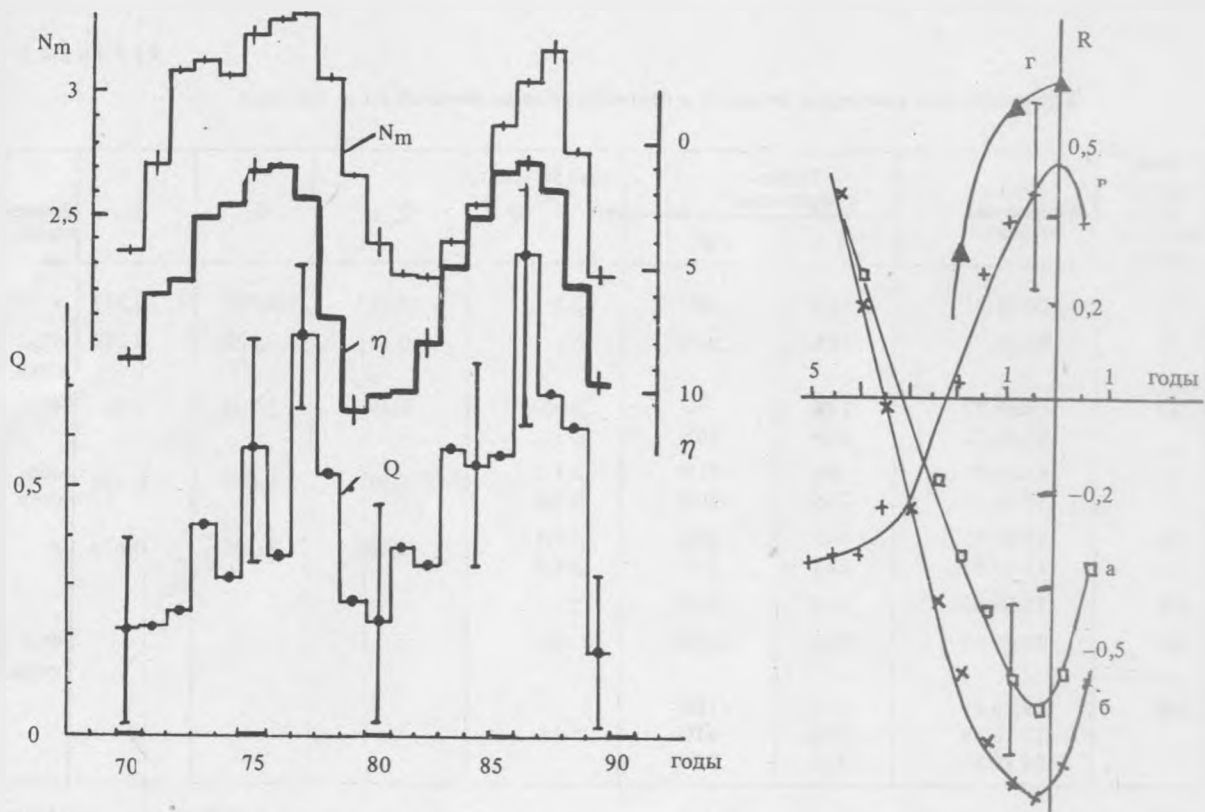


Рис. 1. Среднегодовые значения скорости счета хлор-аргонового детектора Q (ат./сутки), числа групп солнечных пятен η (сутки $^{-1}$) и потока галактических космических лучей в максимуме кривой поглощения в стратосфере N_m (см $^{-2}$ с $^{-1}$).

Рис. 2. Зависимость коэффициентов корреляции R от временного сдвига ΔT : а – $R(Q, \eta)$; б – $R(N_m, \eta)$; в – $R(Q, N_m)$; г – $R(Q, I_e)$.

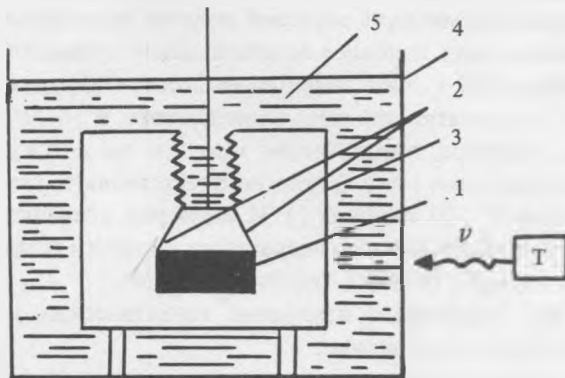


Рис. 3. Схема нейтринного калориметрического эксперимента: образец (1), облучаемый потоком нейтрино от тритиевого источника (Т), подвешен на нитях (2) в вакуумном сосуде (3); последний находится в криостате (4) с жидким гелием (5).

На этом же рисунке показана корреляция величины Q с потоком галактических электронов I_e ($E_e = 0,6 - 1$ ГэВ). Величина $R(Q, I_e)$ положительна и имеет максимальное значение $0,62 \pm 0,15$ при $\Delta T = 0$ (кривая г). Данные по электронам взяты из работы /8/ и относятся к периоду с 1967 по 1986 годы.

В работах /6, 9/ показано, что мощные вспышки солнечных космических лучей дают возрастание скорости счета хлор-аргонового детектора. Это свойственно только тем вспышкам, которые произошли на видимой стороне солнечного диска. Вспышки, возникшие за солнечным лимбом, не вызывают увеличения значения Q , несмотря на то, что на Солнце были генерированы значительные потоки заряженных частиц с достаточно жесткими энергетическими спектрами. В табл. 1 приведены основные характеристики

Таблица 1

Характеристики солнечных вспышек и соответствующие значения I и Q (ат./сут.)

№№ п/п	№№ сеансов Cl-Ar экспери- мента	Дата солнечной вспышки	Гелио- координаты		$I(\geq 150 \text{ МэВ}),$ $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$	Q_{-1}	Q_0	Q_{+1}	Приме- чания
			λ	φ					
1	19	24.01.71	16N	49W	≥ 3	0,214	0,490	0,349	+
2	21	01.09.71	12S	130W	≥ 6	0,349	0,000	0,289	обр. стор.
3	27	04.08.72	14N	8E	≥ 90	0,497	1,226	0,00	+
		07.08.72	14N	36W	≥ 3				
4	51	19.09.77	8N	57W	$\geq 1,7$	0,910	0,849	0,588	обр. стор.
		24.09.77	10N	120W	$\geq 1,6$				
5	71	07.10.81	19S	88E	$\geq 0,4$	0,081	1,209	0,636	+
		12.10.81	22S	35E	$\geq 4,0$				
6	106	15.08.89	18S	84W	~ 5				
7	107	29.09.89	26S	105W	~ 90				обр. стор.
8	108	19.10.89	27S	10E	~ 15				
		22.10.89	27S	31W					
		24.10.89	30S	57W					

солнечных вспышек, средние за вспышку потоки солнечных космических лучей I у Земли и значения Q (Q_0 — для сеанса со вспышкой, Q_{-1} и Q_{+1} — для пред- и послевспышечных сеансов) согласно /10/. Знак "+" в графе "примечание" указывает на возрастание величины Q_0 . Пропуски в таблице, относящиеся к сеансам наблюдения № 106–108, объясняются тем, что данные хлор-аргонового детектора пока отсутствуют.

В сентябре и октябре 1989 г. на Солнце произошли мощные солнечные вспышки космических лучей, причем вспышка 29 сентября 1989 г. несмотря на то, что она имела место на обратной стороне солнечного диска, по потоку заряженных частиц, наблюдаемых у Земли, была наиболее мощной после вспышки 23 февраля 1956 г. Серия трех вспышек 19, 22 и 24 октября 1989 г. дала значительный поток частиц с очень жестким энергетическим спектром. Основываясь на результатах анализа, проведенного в /6, 9/, мы полагаем, что в сеансе наблюдений хлор-аргонового детектора, включающем мощную по потоку частиц солнечную вспышку 29 сентября 1989 г., увеличение скорости счета Q должно отсутствовать, так как эта вспышка произошла на обратной стороне Солнца (сеанс № 107 таблицы 1). И, наоборот, вспышка 15 августа 1989 г. и серия вспышек 19, 22 и 24 октября 1989 г. должны вызвать возрастание скорости счета хлор-аргонового детектора относительно соседних сеансов (сеансы № 106 и 108 таблицы 1)*.

Анализ многолетних данных хлор-аргонового детектора, временных изменений галактических и солнечных космических лучей приводит к следующим интересным заключениям.

1. Наблюдаются 11-летние изменения данных хлор-аргонового детектора, которые находятся в фазе с 11-летним ходом галактических космических лучей. Величина Q имеет максимальный коэффициент корреляции с потоком галактических электронов при временном сдвиге между двумя рядами данных $\Delta T = 0$. С потоком галактических протонов максимальный коэффициент корреляции наблюдается при временном сдвиге $\Delta T = 11$ годам. Так как положительные и отрицательные частицы в гелиомагнитосфере модулируются по-разному, то полученный результат указывает на возможную связь скорости счета хлор-аргонового детектора с отрицательно заряженными частицами в гелиосфере.

* На видимой стороне Солнца 21 и 25 мая 1990 г. произошли мощные вспышки космических лучей, от которых также можно ожидать увеличения величины Q .

2. Для объяснения дефицита потока солнечных нейтрино было предложено много гипотез. Однако их трудно проверить экспериментально. Предположение о возможном взаимодействии нейтрино с веществом с предельно малыми передачами энергии (импульса) в каждом акте было сделано в /9/. В этом случае для объяснения дефицита потока солнечных нейтрино необходимо иметь потери энергии в солнечном веществе $\Delta E_\nu/\Delta x \approx 5 \cdot 10^{-5}$ эВ·см²/г на одно нейтрино.

3. Гипотезу о предельно малых потерях энергии нейтрино можно проверить экспериментально. Суть эксперимента состоит в следующем (рис. 3). Образец, находящийся в вакуумном сосуде, облучается потоком нейтрино от тритиевого источника, сосуд погружен в жидкий гелий, и сам образец охлажден до температуры жидкого гелия. Измеряется температура образца до и во время облучения его источником. Изменение температуры образца будет свидетельствовать в пользу выдвинутой гипотезы. Предлагаемый эксперимент не накладывает каких-либо ограничений на механизм взаимодействия нейтрино с веществом и величину передаваемой энергии в одном акте взаимодействия *.

4. Данные о скорости счета хлор-аргонового детектора в сеансах с мощными солнечными вспышками космических лучей дают увеличенные значения Q (см. сеансы № 19, 27, 71 в таблице). Обращает на себя внимание тот факт, что значения Q₀ не превышают 1,2 атом ³⁷Ag/сутки, что соответствует потоку солнечных нейтрино, следующему из стандартных моделей Солнца. Возможно, что мощные вспышки солнечных космических лучей представляют собой глубинный процесс, открывающий каналы для свободного выхода нейтрино из ядра Солнца.

Таким образом, рассмотренные результаты можно объяснить, сделав следующие предположения.

Хлор-аргоновый детектор регистрирует поток нейтрино от Солнца, существенно меньший ожидаемого за счет потерь энергии нейтрино в веществе $\Delta E_\nu/\Delta x \approx 5 \cdot 10^{-5}$ эВ·см²/г. (В этом случае галий-германиевые установки будут регистрировать только фоновые события.)

Переменная составляющая в данных хлор-аргонового эксперимента, имеющая 11-летний период, определяется потоком отрицательно заряженных частиц неизвестной природы, которые модулируются в гелиосфере.

* Во время мощных вспышек СКЛ происходит образование канала, обеспечивающего свободный выход нейтрино из ядра Солнца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Davis R., Cleveland B.T., Rowley J.K. Underground Physics, 87, Moscow, "Nauka", 1988, p. 6.
2. Koshiya M. Physics Today, December 1987, p. 38.
3. Hirata K.S. et al. Phys. Rev. Lett., 63, № 1, 1619 (1989).
4. Bahcall J. Neutrino Astrophysics. Cambridge University Press, 1989.
5. Davis R. et al. 21 ICRC, 1990, Adelaide, Australia, v. 7, p. 155.
6. Базилевская Г.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 35, 273 (1982)
7. Солнечные данные. Ленинград, Наука, 1960–1989 г.г.
8. Garcia-Munoz M. et al. 20 ICRC, Moscow, 1987, v. 3, p. 303
9. Базилевская Г.А. и др. Ядерная физика, 39, 856 (1984).

Поступила в редакцию 23 марта 1990 г.

* Авторы /9/ несколько лет назад провели такой эксперимент и получили положительный результат. Однако Б.С. Неганов с сотрудниками (ОИЯИ) повторили опыт с лучшей точностью и получили отрицательный результат. По мнению авторов, необходимо продолжение такого рода экспериментов.