

КОРРЕЛЯЦИЯ ПОТОКОВ НЕЙТРИНО В СТАНДАРТНОЙ СОЛНЕЧНОЙ МОДЕЛИ БАКАЛЛА-УЛЬРИХА И ПРОБЛЕМА СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО

А.В.Копылов

Институт ядерных исследований РАН

117312, Москва, Россия

Поступила в редакцию 9 декабря 1992 г.

Показано, что отношения потоков солнечных нейтрино от CNO-цикла и борных нейтрино являются менее модельно зависимыми, чем сами потоки в стандартной солнечной модели Бакалла-Ульриха. Приводятся рассчитанные неопределенности для указанных отношений на уровне трех стандартных отклонений и обсуждается их значение в общей постановке задачи по регистрации солнечных нейтрино.

Проблема солнечных нейтрино, инициированная обнаруженным в эксперименте Дэвиса ¹ дефицитом солнечных нейтрино, является в настоящее время одной из наиболее интересных проблем современной нейтринной астрофизики. Дело в том, что для согласования полученных в настоящее время экспериментальных данных ¹⁻⁴ наиболее естественно предположить, что наблюдается значительное подавление потока солнечных нейтрино от распада ⁷Be, частичное подавление потока борных нейтрино, в то время как поток *pp*-нейтрино весьма близок к предсказанному теорией, что позволяет зафиксировать параметры нейтринных осцилляций для МСВ-эффекта ⁵ или для длинноволновых вакуумных осцилляций ^{6,7}. И хотя для исчерпывающего решения проблемы солнечных нейтрино необходимо значительно улучшить точность измерений и расширить спектр проводимых исследований, открывающиеся перспективы весьма впечатляют.

Задача нейтринной спектроскопии Солнца, как она была сформулирована в работах Зацепина и Кузьмина ⁸, а также Дж.Бакалла ⁹, с самого начала включала измерение потоков солнечных нейтрино от CNO-цикла, главным образом для исследования роли CNO-цикла в полной картине термоядерных реакций на Солнце, а также для изучения распределения тяжелых элементов в центральной области Солнца. Следует заметить однако, что потоки нейтрино от распада ¹⁵O и ¹³N имеют примерно такую же температурную зависимость, что и борные нейтрино, при этом их интенсивности примерно в 100 раз выше, а средние энергии в десять раз меньше, чем у борных нейтрино. Поэтому, если поток борных нейтрино ниже предсказанного теорией вследствие более низкой температуры в центре Солнца, то и потоки нейтрино от CNO-цикла должны быть соответственно ниже. Если же причиной подавления потока борных нейтрино являются нейтринные осцилляции, то факторы подавления для борных нейтрино и нейтрино от CNO-цикла могут существенно отличаться вследствие большого различия в энергиях нейтрино. По этой причине измерение потоков нейтрино от CNO-цикла является весьма перспективным для решения проблемы солнечных нейтрино.

Рашающим моментом при формулировании окончательных выводов является точность имеющихся экспериментальных данных и модельные неопределенности теоретических предсказаний величин потоков солнечных нейтрино. Согласно 1000 разыгранным вариантам (реализациям) стандартной солнечной модели

Бакалла и Ульриха были получены следующие модельные неопределенности на уровне 3σ ¹⁰:

Таблица 1.

Потоки солнечных нейтрино

Источник	Энергия, МэВ	Поток ($10^{10}\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$)
<i>pp</i>	$0 \div 0,42$	$6,0(1 \pm 0,02)$
<i>pep</i>	1,44	$1,4 \cdot 10^{-2}(1 \pm 0,05)$
Be-7	0,86	$4,7 \cdot 10^{-1}(1 \pm 0,15)$
B-8	$0 \div 14$	$5,8 \cdot 10^{-4}(1 \pm 0,37)$
N-13	$0 \div 1,2$	$6,1 \cdot 10^{-2}(1 \pm 0,50)$
O-15	$0 \div 1,73$	$5,2 \cdot 10^{-2}(1 \pm 0,58)$

Как видно из данных таб.1, потоки борных нейтрино, и в особенности потоки нейтрино от CNO-цикла, характеризуются сильной модельной зависимостью, что весьма затрудняет однозначную интерпретацию экспериментальных данных. Однако можно предположить, что, поскольку многие входные параметры солнечной модели входят в рассчитанные величины потоков примерно одинаковым образом, то при вычислении отношений этих потоков такие неопределенности должны взаимно погашаться, что должно приводить к меньшей модельной зависимости отношений потоков нейтрино. Проведенные нами расчеты по данным 1000 реализаций стандартной модели Бакалла-Ульриха подтвердили это предположение. Согласно этим расчетам отношения потоков нейтрино составляют:

$$\Phi(^{15}\text{O})/\Phi(^8\text{B}) = [0,95 \pm 0,25(3\sigma)] \cdot 100$$

$$\Phi(^{13}\text{N})/\Phi(^8\text{B}) = [1,13 \pm 0,28(3\sigma)] \cdot 100.$$

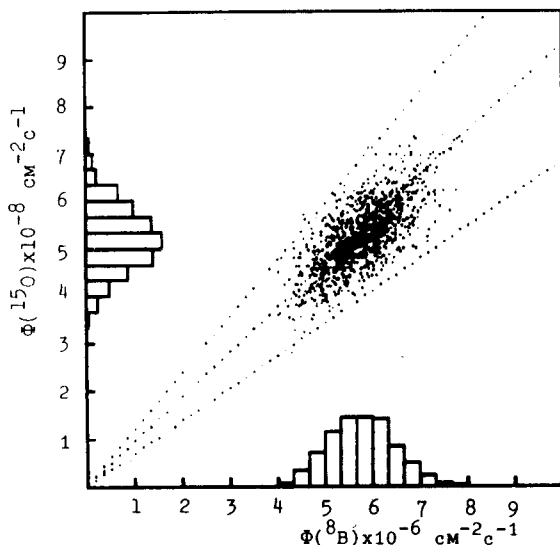


Рис.1. 1000 реализаций стандартной солнечной модели Бакалла-Ульриха на плоскости $\Phi(\text{O} - 15) - \Phi(\text{B} - 8)$. Точки - величины потоков нейтрино, гистограммы - соответствующие частоты в относительных единицах, прямые линии соответствуют интервалу на уровне 3σ для отношений потоков нейтрино

Приведенные здесь неопределенности соответствуют 3σ , что при статистике 1000 розыгрышей означает, что за пределами указанных интервалов могут

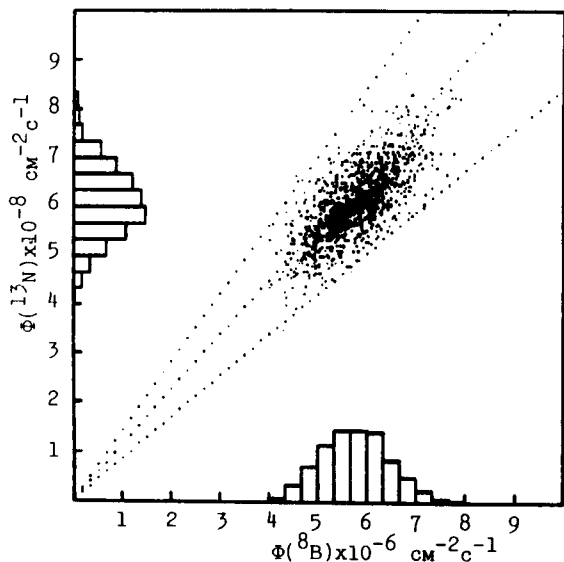


Рис.2. 1000 реализаций стандартной солнечной модели Бакалла-Ульриха на плоскости $\Phi(N-13) - \Phi(B-8)$. Обозначения те же, что и на рис.1

находиться лишь несколько точек. Сравнение полученных неопределенностей для отношений потоков с соответствующими неопределенностями для самих потоков однозначно указывает на то, что отношения потоков существенно менее модельно зависимы, а их неопределенности почти в два раза меньше неопределенностей для самих потоков. Рис.1 показывает семейство 1000 точек на плоскости $\Phi(^{15}O) - \Phi(^8B)$, рис.2 – на плоскости $\Phi(^{13}N) - \Phi(^8B)$. Видна четкая корреляция между потоками борных нейтрино и нейтрино от CNO-цикла и видно, что температурные зависимости этих потоков близки. Последнее обстоятельство позволяет рассчитывать, что и для нестандартных моделей их отношение будет менее модельно зависимым, чем сами потоки.

Наиболее перспективным детектором нейтрино от CNO-цикла является литиевый детектор. В таб.2 приведены скорости захвата солнечных нейтрино для различных детекторов согласно предсказаниям стандартной модели Бакалла-Ульриха¹¹.

Таблица 2.

Скорости захвата солнечных нейтрино

Источник нейтрино	Хлор СНЕ	Галлий СНЕ	Литий СНЕ
<i>pp</i>	0,0	70,8	0,0
<i>pep</i>	0,2	3,1	9,2
Be-7	1,2	35,8	4,7
B-8	6,2	13,8	22,1
N-13	0,1	3,0	2,1
O-15	0,3	4,9	10,6
Сумма	$8,0 \pm 3,0$	$131,5 \pm 20$	$48,7 \pm 15$

Здесь 1 СНЕ (солнечная нейтринная единица) соответствует одному захвату нейтрино в секунду 10^{36} атомами мишени. Видно, что на долю нейтрино от CNO-цикла в литиевом детекторе приходится 12,7 СНЕ, на долю борных

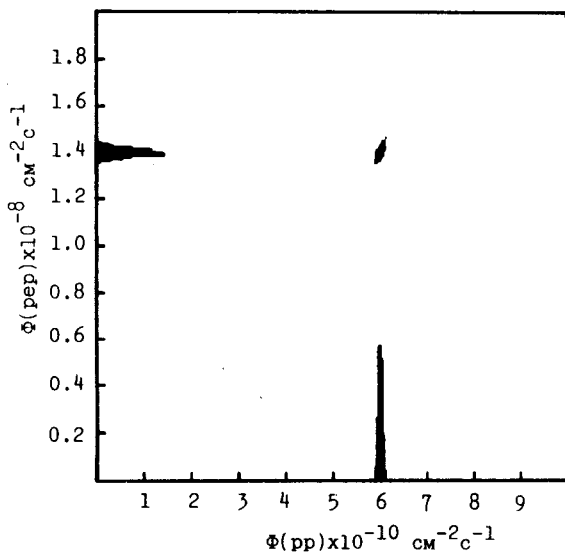


Рис.3. 1000 реализаций стандартной солнечной модели Бакалла-Ульриха на плоскости $\Phi(per) - \Phi(pp)$. Пятно на плоскости - область локализации 1000 точек, по осям - соответствующие частоты в относительных единицах

нейтрино, если учесть по меньшей мере двухкратное подавление потока борных нейтрино согласно данным экспериментов Дэвиса и КАМИОКАНДЕ, не более 10 СНЕ, остальное дают *per* и Ве-7. Чтобы получить эффект от СНО-нейтрино, необходимо из суммарного эффекта вычесть эффект от борных, *per* и Ве-7 нейтрино. Строящиеся в настоящее время супердетекторы солнечных нейтрино, такие как Супер-Камиоканде ¹², SNO ¹³, BOREXINO ¹⁴, а также большой хлор-аргоновый нейтринный телескоп с 3000 т перхлорэтилена ¹⁵ и другие, позволят по совокупности полученных результатов определить потоки борных нейтрино и нейтрино от Ве-7. По мере набора статистики в GALLEX и SAGE станет возможным с достаточно высокой точностью определить поток *pp*-нейтрино. На рис.3 показано семейство 1000 точек стандартной модели Бакалла-Ульриха на плоскости $\Phi(per) - \Phi(pp)$. Видно, что в стандартной модели эти 1000 точек локализованы в очень ограниченной области на плоскости и, следовательно, по результату галлиевого эксперимента можно определить вклад *per*-нейтрино в литиевом детекторе как в отсутствие нейтринных осцилляций, так и при фиксированных параметрах МСВ-конверсии. Таким образом, сопоставляя данные, полученные на различных нейтринных телескопах, можно определить эффект в литиевом детекторе от СНО-нейтрино, а также найти отношение потоков СНО- и борных нейтрино. Конечно, важнейшим моментом здесь будет точность полученных экспериментальных данных.

Заключение. Показана имеющаяся корреляция потоков борных нейтрино и нейтрино от СНО-цикла в стандартной солнечной модели. Найдены неопределенности на уровне трех стандартных отклонений для отношений потоков нейтрино от ¹⁵O(¹³N) и от ⁸B, которые однозначно доказывают меньшую модельную зависимость отношений потоков нейтрино, чем самих потоков. Это обеспечивает большую достоверность при анализе экспериментальных данных, чтобы получить ответ на главный вопрос, является ли причиной дефицита солнечных нейтрино МСВ-конверсия или более низкая температура в центре Солнца. Наиболее перспективным, с этой точки зрения, является радиохими-

ческий литиевый детектор.

Автор выражает глубокую признательность Дж.Бакаллу за любезно предоставленные данные потоков солнечных нейтрино, полученных по 1000 розыгрышей стандартной солнечной модели, и Г.Т.Зацепину за полезное обсуждение данной работы.

-
1. R.Davis, D.C.Harmer, and K.C.Hoffman, *Phys. Rev. Lett.* **20**, 1205 (1968).
 2. K.Hirata, et al., *Phys. Rev. D* **44**, 2241 (1991).
 3. P.Anselmann, et al., *Phys. Lett. B* **285**, 376 (1992).
 4. A.I.Abazov, et al., SAGE collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 3332 (1991).
 5. С.П.Михеев, А.Ю.Смирнов, *ЯФ* **42**, 1441 (1985).
 6. V.Barger, R.J.N.Philips, and K.Whisnant, *Phys. Rev. Lett.* **65**, 3084 (1990).
 7. A.Acker, S.Pakvasa, and J.Pantaleone, *Phys. Rev. D* **43**, 1754 (1991).
 8. V.A.Kuzmin and G.T.Zatsepin, *Proc. of 9-th ICRC, London*, 1023, (1965).
 9. J.N.Bahcall, *Phys. Rev. Lett.* **13**, 332 (1964).
 10. N.Bahcall and R.K.Ulrich, *Rev. Mod. Phys.* **60**, 297 (1988).
 11. J.N.Bahcall, M.H.Pinsonneault, Preprint IASSNS-AST, 92/10, 92/15.
 12. Y.Totsuka, *Proc. of the International Symposium on Underground Physics Experiments*, ed. by K.Nakamura (ICRR, University of Tokyo), 129, (1990).
 13. G.T.Ewan, *Physics in Canada* **48**, 112 (1992).
 14. R.S.Raghavan, *Proc. 25th Int. Conf. High Energy Physics, Singapore*, ed. K.K.Phya and Y.Yamaguchi (World Scientific, Singapore), 1, 482 (1990).
 15. A.V.Kopylov, *Proc. Int. School (LEWI'90), JINR, Dubna*, 79 (1991).