

УДК 524.1

ПОВАРЕННАЯ СОЛЬ КАК МИШЕНЬ ДЛЯ НЕЙТРИНО ОТ СВЕРХНОВЫХ¹

© 2009 г. В. В. Бояркин, О. Г. Ряжская

Учреждение Российской академии наук
Институт ядерных исследований РАН, Москва
E-mail: boyarkin@lvd.ras.ru

Согласно модели вращающегося коллапсара, гравитационный коллапс звезды является двустадийным. В первой фазе излучаются в основном электронные нейтрино со средними энергиями 30–40 МэВ, образующиеся в реакции нейтронизации ($p + e^- \rightarrow n + \nu_e$). Ранее в качестве мишени для детектирования нейтрино таких энергий рассматривалось железо.

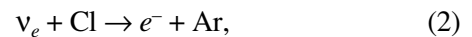
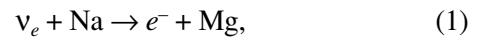
В настоящей работе показано, что добавление в структуру существующих детекторов поваренной соли может как значительно улучшить идентификацию типа нейтрино, так и увеличить активную массу существующих детекторов.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с тем что модель стандартного коллапса звезд не объясняет сброс оболочки при взрыве звезды, а также сигнал, полученный от вспышки Сверхновой SN1987A 23 февраля 1987 г. в 2 : 52 UT в эксперименте LSD [1], были разработаны другие модели гравитационного коллапса. Наиболее естественно упомянутый выше эффект объясняется в рамках модели вращающегося коллапсара, разработанной В.С. Имшенником [2], предсказывающей двустадийное излучение нейтрино: в первой фазе испускаются электронные нейтрино с $\bar{E}_\nu \approx 30\text{--}40$ МэВ [3], во второй – нейтрино всех типов. В качестве мишени для детектирования нейтрино таких энергий рассматривалось железо [3–5]. В настоящее время существуют два детектора, способные регистрировать ν_e при их взаимодействии с ядрами. Один из них – это LVD, который может детектировать ν_e по реакции на железе, другой – эксперимент “Коллапс” в соляной шахте. В установке LVD, имеющей активную массу сцинтиллятора 1000 т и такую же массу несущих железных конструкций, ожидается примерно 200 событий от взаимодействия нейтрино с железом при вспышке Сверхновой в центре нашей Галактики [5].

1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОННОГО НЕЙТРИНО С ПОВАРЕННОЙ СОЛЬЮ

Взаимодействия электронного нейтрино с поваренной солью можно регистрировать благодаря следующим реакциям:



причем необходимо учесть, что природный хлор состоит на 75.5% из изотопа с массовым числом 35 и на 24.5% – из изотопа с массовым числом 37, а природный натрий целиком состоит из изотопа с массовым числом 23. Порог реакции (1) составляет ~4 МэВ, реакции (2) для ^{37}Cl – ~800 кэВ, для ^{35}Cl – ~5 МэВ. При взаимодействии ν_e с натрием велика вероятность рождения магния в возбужденном состоянии с последующим испусканием гамма-кванта с энергией ~7.5 МэВ. Возбуждение аргона очень слабое.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ “КОЛЛАПС” АНС ИЯИ РАН

Детектор “Коллапс” ИЯИ РАН расположен в соляной шахте вблизи г. Артемовска (Украина) на глубине 570 м в.э. и представляет собой цилиндрический бак диаметром 556 см и высотой 547 см [6], заполненный 105 тоннами жидкого сцинтиллятора на основе уайт-спирита (C_nH_{2n} , $\bar{n} = 9.6$ [7]). Возможности регистрации нейтрино этим детектором рассматривались с помощью программы GEANT4.7.1 при условии взаимодействия ν_e с солью, окружающей установку.

В первом варианте моделирования учитывалось прохождение через вещество только электрона, точка рождения которого выбиралась случайным образом равномерно по всему объему соли, а направление движения считалось изотропным. Во втором варианте моделирования разыгрывались электрон и гамма-квант с энергией 7.5 МэВ с изотропно распределенными скоростями, не коррелировавшими друг с другом. В каждом событии запи-

¹ Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 06-02-16337, НШ-959.2008.2 и программы Президиума РАН “Нейтринная физика. Коллапс” 13-05-01.

Таблица 1

E_{e^-} , МэВ	<1.5 м			<1 м			<0.5 м			<0.3 м		
	Элек- трон	Элек- трон и гамма- квант	M , т	Элек- трон	Элек- трон и гамма- квант	M , т	Элек- трон	Элек- трон и гамма- квант	M , т	Элек- трон	Элек- трон и гамма- квант	M , т
40	0.016	0.026	820	0.024	0.040	529	0.05	0.075	256	0.07	0.114	150
50	0.020	0.030		0.030	0.045		0.06	0.088		0.09	0.132	
60	0.025	–		0.037	–		0.07	–		0.11	–	
70	0.029	–		0.043	–		0.08	–		0.12	–	
80	0.034	0.038		0.051	0.058		0.10	0.109		0.14	0.160	

Таблица 2

E_{e^-} , МэВ	Электрон		Электрон и гамма-квант 7.5 МэВ		Взаимодействие с железом	
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2
40	0.163	0.167	0.255	0.274	0.404	0.426
50	0.226	0.234	0.316	0.346	0.483	0.522
60	0.283	0.300	0.364	0.405	0.533	0.590
70	0.337	0.363	0.410	0.466	0.579	0.651
80	0.385	0.421	0.449	0.518	0.599	0.694

сывалась информация об энерговыделении в баке. Эффективность регистрации акта взаимодействия ϵ определялась как отношение числа событий с энерговыделением, превышающим 5 МэВ, к полному числу разыгранных событий.

Результаты моделирования приведены в табл. 1. В этой таблице также приведены значения массы соли, “участвовавшей” в розыгрыше, для различных толщин.

3. МОДИФИКАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА LVD

Детектор LVD, работающий в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия) и состоящий из 840 сцинтилляционных счетчиков объемов 1.5 м³, подробно описан в [8]. Установка состоит из трех семиэтажных башен по пять колонн в каждой. Колонна содержит по восемь сцинтилляционных счетчиков на этаже.

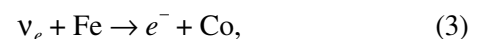
Если в проходы между колоннами шириной 0.7 м добавить соляные пласты размером 0.3 × 6.2 × 1.03 м (каждый соляной пласт весом 5.2 т), общая масса соли составит 437 т.

Моделирование взаимодействия нейтрино с веществом проводилось таким же образом, как и для эксперимента “Коллапс”.

Поскольку энергии нейтрино, рассматриваемые в расчете, достаточно велики, энерговыделение E может превышать установленный порог ($E_{\text{пор}} = 5$ МэВ) сразу в нескольких (чаще двух) счет-

чиках установки LVD, мы вводим два понятия эффективности: ϵ_1 – число событий с $E > E_{\text{пор}}$ хотя бы в одном счетчике, ϵ_2 – число счетчиков с $E > E_{\text{пор}}$ по отношению к общему числу разыгрываемых событий. Полученные значения эффективности регистрации приведены в табл. 2.

Для сравнения в двух последних столбцах приведены значения эффективности регистрации реакции взаимодействия нейтрино с железом



полученные в тех же условиях (наличие соли между колоннами).

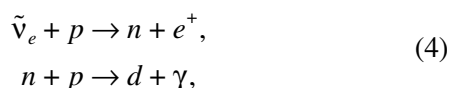
Сравнение данных в двух последних столбцах таблицы с результатами [4] показывает, что соль снижает эффективность регистрации реакции (3), однако введение солевых пластов в структуру установки LVD кажется целесообразным, так как выигрыш за счет увеличения массы мишени превосходит проигрыш за счет увеличения массы поглотителя.

Предположим, что сечения взаимодействия нейтрино с железом, натрием и хлором в расчете на один нейтрон одинаковы (для натрия скорее всего эта оценка занижена). Исходя из количества атомов железа, натрия и хлора, имеющих в “модифицированной установке LVD”, мы получим, что при количестве взаимодействий нейтрино с железом, равным 700, взаимодействий нейтрино с

натрием будет ~ 120 , а с обоими изотопами хлора ~ 200 . Из этих 1000 взаимодействий при энергии нейтрино ~ 50 МэВ можно зарегистрировать ~ 450 (что примерно на треть больше, чем в существующем детекторе), т.е. ожидаемая суммарная эффективность превысит 40%.

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ В РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЯХ

Интересно сравнить полученные значения с теми, которые были бы измерены в случае реакции обратного бета-распада в рамках стандартной модели:



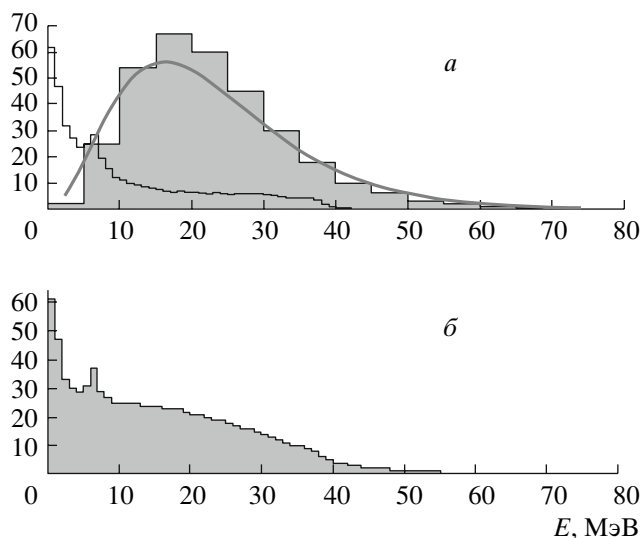
причем $E_{e^+} = E_{\tilde{\nu}} - 1.3$ МэВ и при $E_{\tilde{\nu}} \sim 20$ МэВ можно считать, что $E_{e^+} \approx E_{\tilde{\nu}}$.

Если температура нейтриносферы звезды составляет 5 МэВ, LVD должен зарегистрировать ~ 320 событий по реакции (4) со спектром, показанным на рисунке *a*. Следует принять во внимание, что только 30% таких событий будут похожи на события от взаимодействия нейтрино с солью или железом из-за отсутствия сопровождающего импульса маленькой энергии в счетчике с триггером (эффективность регистрации нейтрона, рожденного в реакции (4), тем же счетчиком составляет $\sim 70\%$). Если сложить спектр “солевых” и “железных” событий (рисунок *a*) со спектром событий от реакции (4), то суммарный энергетический спектр будет таким, как представлено на рисунке *b*.

Следует отметить, что даже в случае, когда нейтрино с энергиями ~ 50 МэВ и антинейтрино со средней энергией ~ 20 МэВ излучаются одновременно (не в модели вращающегося коллапсара!), детектор LVD способен, используя энергетический спектр событий, зарегистрировать нейтринный пик в отклике, разделив, таким образом, типы приходящих нейтрино.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Астрофизические параметры взрыва Сверхновой еще не установлены достаточно точно, поэтому существование экспериментов, чувствительных к разным типам нейтрино, очень важно. Полное ко-



a – энергетический спектр событий от реакции (4) при температуре нейтриносферы звезды 5 МэВ (заливка; также показан фит функцией вида $AE^2/[\exp(E/B) + 1]$ и полный энергетический спектр реакций (1), (2), (3) для энергии нейтрино ~ 50 МэВ гистограмма; по оси ординат – относительные единицы; *b* – сумма графиков, представленных на рис. *a* для 320×0.3 событий от реакции (4) и 450 событий от взаимодействий нейтрино с солью и железом; по оси ординат – количество событий.

личество событий вследствие взаимодействия электронных нейтрино с атомами по нейтральным и заряженным токам в сильной степени зависит от энергии нейтрино и, следовательно, от модели коллапса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рязская О.Г. // УФН. 2008. Т. 176. С. 1039.
2. Imshennik V.S. // Space. Sci. Rev. 1995. V. 23. P. 779.
3. Имиенник В.С., Рязская О.Г. // Письма в “Астрон. журн.” 2004. Т. 30. С. 17.
4. Garonov Yu.V., Ryazhskaya O.G., Semenov S.V. // ЯФ. 2004. Т. 67. С. 193.
5. Бояркин В.В., Рязская О.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 4. С. 589.
6. Береснев В.И. и др. // ПТЭ. 1981. № 6. С. 48.
7. Воеводский А.В., Дадькин В.Л., Рязская О.Г. // ПТЭ. 1970. Т. 1. С. 143.
8. Aglietta M. et al. // Nuovo Cimento. A. 1992. V. 105. P. 1793.