

УДК 524.354.6-423

## ДЕТЕКТОР LVD И НЕЙТРИНО ОТ КОЛЛАПСИРУЮЩИХ ЗВЕЗД

© 2007 г. В. В. Бояркин, О. Г. Ряжская

Институт ядерных исследований РАН, Москва

E-mail: boyarkin@lvd.ras.ru

Основной задачей российско-итальянского детектора большого объема (LVD), расположенного в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия), является поиск нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звезд. Представлены оценки числа взаимодействий нейтрино в структуре LVD при условии коллапса в центре Галактики и эффективность их регистрации для различных энергий нейтрино.

## ВВЕДЕНИЕ

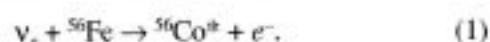
Детектор большого объема (LVD), расположенный в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия), состоит из 840 сцинтилляционных счетчиков объемом  $1.5 \text{ м}^3$  каждый, находящимися в трех башнях на семи этажах. Башни собраны из железных модулей (пять модулей на этаже) с толщиной стенок 2 см, каждый модуль содержит восемь сцинтилляционных счетчиков и снабжен стримерными камерами в виде латинской буквы L [1]. Активная масса сцинтиллятора 1000 т. Сцинтиллятор сделан на основе уайт-спирита ( $\text{C}_8\text{H}_{18}$ ,  $\bar{n} = 9.6$  [2]). Полная масса железа в модуле (портатанке) равна 9.46 т, и общее количество железа в LVD составляет 994.3 т. Энергетический порог  $E_{\text{th}} \approx 4 \text{ МэВ}$ .

Основная задача телескопа – поиск нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звезд в нашей Галактике. Сцинтиллятор может регистрировать нейтрино разных типов благодаря реакции обратного  $\beta$ -распада  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ , реакциям по нейтральным и заряженным токам на углероде  $^{12}\text{C}$  (см. часть 2) и рассеянию нейтрино на электроны. Реакция обратного  $\beta$ -распада, обладающая наибольшим сечением, идентифицируется по двум наблюдаемым сигналам в счетчиках LVD: триггерным является сигнал от позитрона (регистрируемая энергия  $E_d = E_{\nu_e} - 1.8 \text{ МэВ}$ ), за которым следует сигнал от захвата нейтрона  $np \rightarrow d\gamma$  ( $E_\gamma = 2.2 \text{ МэВ}$ , время захвата  $\Delta t \approx 185 \text{ мкс}$ ) [3].

## 1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ЖЕЛЕЗОМ

В 1995 г. была разработана модель вращающегося коллапсара [4], из которой следует, что коллапс может быть двустадийным. В первой фазе излучаются в основном электронные нейтрино со средними энергиями 30–40 МэВ [5], образующиеся в реакции нейтронизации ( $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ ), во время последней – все типы нейтрино в соответствии со сценарием “стандартного” коллапса.

Нейтрино таких энергий будут взаимодействовать с железной структурой LVD, благодаря реакции



Энергетический порог этой реакции 8.16 МэВ. Кобальт всегда рождается в возбужденном состоянии (основное состояние железа  ${}^{56}\text{Fe} - 0^+$ , а основное состояние  ${}^{56}\text{Co} - 4^+$ ). При снятии возбуждения испускаются  $\gamma$ -кванты с энергией от 1.7 до 10.7 МэВ.

Следует отметить, что критическая энергия электрона (энергия, при которой ионизационные потери равны потерям на излучение) в железе составляет 21 МэВ. Проходя через железо толщиной  $d \geq 1$   $t$ -единицы ( $t$ -единица, или радиационная единица длины для железа, равна  $13.9 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ , или 1.78 см), электрон порождает небольшой электромагнитный каскад. Основной вклад в регистрируемую энергию дают  $\gamma$ -кванты электромагнитного каскада;  $\gamma$ -кванты от снятия возбуждения кобальта также могут проникать в сцинтиллятор [5].

Отклик детектора на нейтринное излучение рассчитывался методом Монте-Карло с использованием пакета Geant4.7.1.

В общем случае число событий, зарегистрированных во время вспышки сверхновой, дается следующей формулой:

$$N_{\nu\nu} = MN_i \int_0^\infty \Phi(E_\nu) \sigma(E_\nu) \eta(E_\nu) dE_\nu,$$

где  $M$  – масса детектора в тоннах,  $N_i$  – число атомов мишени в 1 т,  $\Phi$  – нейтринный поток на Земле как функция энергии нейтрино  $E_\nu$ ,  $\sigma$  – сечение взаимодействия,  $\eta$  – эффективность регистрации. При предположении, что вращающийся коллапсар излучает моноэнергетические нейтрино с энергиями от 20 до 60 МэВ, число событий в LVD от реакции (1) будет равно

Таблица 1. Ожидаемое число событий в установке LVD от реакции (1)

Энергия нейтрино, МэВ	Сечение реакции (1), см <sup>2</sup> [6]	Число взаимодействий	Эффективность регистрации η, %	Число событий, согласно (2)
10	1.61 · 10 <sup>-42</sup>	8	0	0
20	3.75 · 10 <sup>-41</sup>	90	15	14
30	1.80 · 10 <sup>-40</sup>	290	32	93
40	4.14 · 10 <sup>-40</sup>	500	46	230
50	7.43 · 10 <sup>-40</sup>	720	58	416
60	1.17 · 10 <sup>-39</sup>	940	67	630

$$N = \eta n V \sigma \Phi = \eta \frac{M[\text{г}] N_A}{\mu[\text{г/моль}]} \sigma[\text{см}^2] \frac{E_\nu^*[\text{эВ}]}{\bar{E}[\text{эВ}]} \frac{1}{4\pi(R[\text{см}])^2}, \quad (2)$$

где  $M = 994.3 \cdot 10^6$  г – полная масса железа в структуре LVD ( $n$  – концентрация атомов железа в одном см<sup>3</sup>,  $V$  – полный объем железа),  $\mu = 56$  г · моль<sup>-1</sup> – молярная масса железа,  $N_A = 6 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – число Авогадро,  $\sigma$  – сечение взаимодействия реакции,  $R$  – расстояние до Сверхновой,  $E_\nu^*$  – полная энергия электронных нейтрино, испущенных во время коллапса,  $\bar{E}$  – энергия одного нейтрино. Значения  $N$  при  $R \approx 10$  кпк =  $3.125 \cdot 10^{22}$  см (расстояние от Солнечной системы до центра Галактики) и  $E_\nu^* = 8.9 \cdot 10^{52}$  эрг =  $5.56 \cdot 10^{64}$  эВ приведены в последнем столбце табл. 1.

Расчеты показывают, что эффективность регистрации акта взаимодействия нейтрино (отношение числа событий, в которых энерговыделение в каком-либо из счетчиков превышает порог 5 МэВ, к полному числу разыгранных событий) в сильной степени зависит от энергии нейтрино и превышает 50% для нейтрино с энергиями выше 40 МэВ.

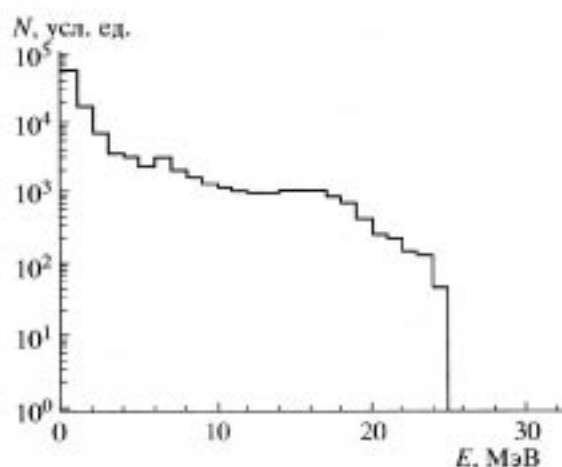
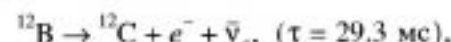
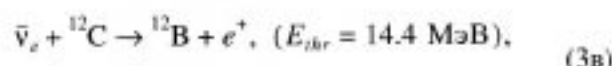
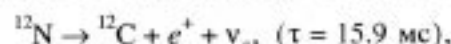
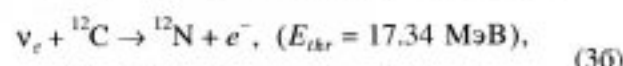
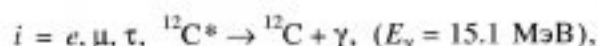
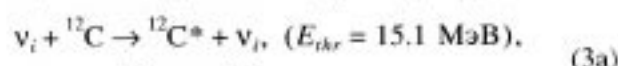


Рис. 1. Спектр энерговыделений, регистрируемых одним счетчиком LVD в случае реакции (1) ( $E_\nu = 30$  МэВ).

Спектр энерговыделений в одном счетчике приведен на рис. 1.

## 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С УГЛЕРОДОМ

Другой способ регистрации электронных нейтрино и антинейтрино от коллапсов в LVD – это реакции взаимодействия с ядрами углерода:



где  $E_{thr}$  – пороговая энергия реакции,  $\tau$  – среднее время жизни изотопов  ${}^{12}\text{N}$ ,  ${}^{12}\text{B}$ .

Сечения реакций (3a)–(3b) были рассчитаны в работах [7, 8] (см. табл. 2).

Реакция (3a) позволяет измерить полный нейтринный поток с энергией выше 15.1 МэВ в любой модели коллапса [9]. Эффективность регистрации  $\gamma$ -кванта, согласно расчетам, составляет  $\approx 60\%$ . Реакции (3b, 3в) в стандартной модели коллапса дают существенно меньший вклад в отклик детектора, если не учитывать нейтринные осцилляции. Но если рассмотреть модель вращающегося коллапсара, в которой могут появиться нейтрино с энергиями порядка нескольких десятков МэВ, значения, приведенные в табл. 2, будут представлять интерес. Спектр энерговыделений в одном счетчике показан на рис. 2.

Следует упомянуть также и о рассеянии нейтрино на электроне  $\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^-$ . Сечение этой реакции невелико:  $\sigma = 9.4 E_\nu [\text{МэВ}] \cdot 10^{-45} \text{ см}^2$ . Она даст примерно 18 взаимодействий в железе и 17 взаимодействий в сцинтилляторе независимо от энергии нейтрино. Эффективность регистрации такой реакции будет не ниже, чем для реакции (1) в случае

Таблица 2. Ожидаемое число событий в установке LVD от реакций (3а) и (3б)

$E_\nu$ , МэВ	Реакция (3а)				Реакция (3б)			
	сечение, $10^{-42}$ см <sup>2</sup>	число взаимо- действий	эффе- ктивность регистра- ции $\eta$ , %	число событий	сечение, $10^{-42}$ см <sup>2</sup>	число взаимо- действий	эффе- ктивность регистра- ции $\eta$ , %	число событий
20	0.302	3		2	0.287	3	0	0
30	2.74	20		11	5.03	38	95	36
40	7.26	41	60	22	15.1	85	95	81
50	13.1	68		40	29.2	132	96	127
60	19.5	74		43	45.2	171	97	166

железа и (3б) в случае сцинтиллятора. Вклад рассеяния нейтрино на электроны в отклик детектора будет составлять примерно 25–30 событий.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реакции (1), (3а–3в) дают разные энергетические спектры в счетчиках и в группах счетчиков: если рассматривать реакцию (1), часты события, когда сигнал появляется в двух и более счетчиках,

тогда как при регистрации реакций (3а)–(3в) срабатывает только один счетчик.

В работе было рассмотрено взаимодействие нейтрино с несущей конструкцией установки LVD. Была рассчитана эффективность регистрации возникающих в результате этой реакции заряженных лептонов и  $\gamma$ -квантов. Вклад взаимодействий нейтрино с железом может составлять 70% от общего числа событий, регистрируемых от коллапса, в основном в высокоэнергичной части спектра.

Полное количество событий вследствие взаимодействия электронных нейтрино с атомами по нейтральному и заряженному токам в сильной степени зависит от энергии нейтрино и, следовательно, от модели коллапса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 06-02-16337, НШ 5573.2006.2, SSchool-1782.2003.2), программы Президиума РАН "Нейтринная физика. Коллапс" 13-05-01, и гос. контракта № 02.434.11.7069.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *LVD Collaboration* // Nucl. Phys. B. 2005. V. 143. P. 540.
2. *Воеводский А.В., Дадькин В.Л., Рязжская О.Г.* // ПТЭ. 1970. Т. 1. С. 143.
3. *Chudakov A.E., Ryzhskaya O.G., Zaitsepin G.T.* // Proc. 13th ICRC. Denver. 1973. V. 3. P. 2007.
4. *Imshennik V.S.* // Space. Sci. Rev. 1995. V. 23. P. 779.
5. *Имшенник В.С., Рязжская О.Г.* // Письма в "Астрон. журн." 2004. Т. 30. С. 17.
6. *Garonov Yu. V., Ryzhskaya O.G., Semenov S. Y.* // Yad. Fiz. 2004. V. 67. P. 1993.
7. *Bugaev E.V., Bisnovatyi-Kogan G.S. et al.* // Nucl. Phys. A. 1979. V. 324. P. 350.
8. *Fukugita M., Kohyama Y., Kubodera K.* // Phys. Lett. B. 1988. V. 212. P. 139.
9. *Рязжская О.Г., Рязжий В.Г., Саavedра О.* // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 59. С. 29.

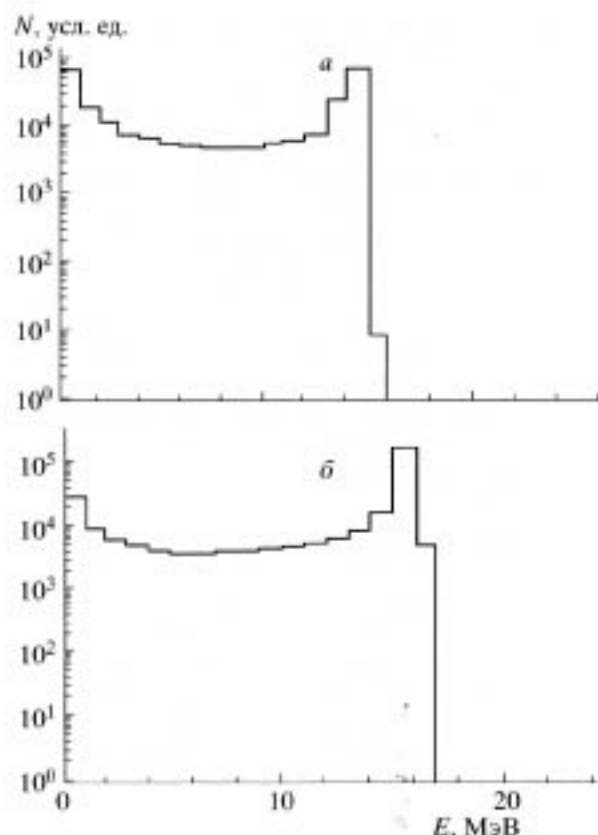


Рис. 2. Спектр энерговыделений, регистрируемых одним счетчиком LVD в случае реакции (3а) (а) и (3б) (б) ( $E_\nu = 30$  МэВ).