

На правах рукописи

Бояркин Вадим Владимирович

Поиск нейтринного излучения
от коллапсирующих звезд
с помощью детектора LVD

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте ядерных исследований РАН, Москва

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН,
профессор

О.Г. Ряжская (ИЯИ РАН)

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук *Э.В. Бугаев (ИЯИ РАН)*

Доктор физико-математических наук *Д.К. Надёжин (ИТЭФ, Москва)*

Ведущая организация: РНЦ «Курчатовский институт», Москва

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2009 г.
в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д002.119.01
Учреждения Российской академии наук Института ядерных исследова-
ний РАН.

Адрес: 117312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 2009 г.

Учёный секретарь диссертационного совета ИЯИ РАН

Кандидат физико-математических наук

Б.А. Тулупов

1. Общая характеристика работы

Работа посвящена рассмотрению отклика детектора LVD на коллапс звезды, происходящий по сценарию вращающегося коллапсара. Особое внимание уделяется регистрации электронных нейтрино по их взаимодействию с железом в структуре установки LVD. Показано, что железно-сцинтилляционные калориметры способны эффективно регистрировать электронные нейтрино с энергиями выше ~ 20 МэВ по их взаимодействию с железом. Приведены результаты обработки данных детектора по поиску нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звезд, не сопровождающихся излучением электронных антинейтрино. Также в работе содержатся расчеты, показывающие, что введение в структуру LVD поваренной соли (NaCl) приводит как к увеличению эффективности регистрации, так и сепарации разных типов нейтрино при детектировании звёздных коллапсов.

1.1 Актуальность темы диссертации

В последние годы научный интерес к поиску нейтринных всплесков от коллапсов звездных ядер сильно возрос. Это обусловлено тем, что событие, зарегистрированное детектором LSD 23 февраля 1987 года от вспышки Сверхновой SN1987A, не нашло объяснения в рамках стандартной модели гравитационного коллапса звезды. Ответы на многие вопросы, связанные с этим событием, были даны после разработки модели вращающегося коллапсара. Однако эта модель не завершена, и астрофизические параметры взрыва Сверхновой не установлены достаточно точно. Поэтому очень важно иметь детекторы, чувствительные к разным типам нейтрино, что поможет лучше понять физику гравитационного коллапса звезд.

В течение 30 лет на различных детекторах ведутся поиски нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звезд. При ожидаемой частоте коллапсов в нашей Галактике порядка одного события раз в 30–

50 лет, событий-кандидатов на нейтринные всплески от гравитационных коллапсов не обнаружено.

Детектор большого объема (LVD), работающий в лаборатории Гран Сассо в Италии с 1992 г., – это многоцелевой детектор, содержащий ~ 1 кт жидкого сцинтиллятора. Главной его задачей является поиск нейтрино от гравитационных коллапсов звезд в нашей Галактике. LVD, как и предыдущие детекторы, способен регистрировать взаимодействие электронных антинейтрино с протонами сцинтиллятора. В эксперименте можно регистрировать нейтрино всех других типов по реакциям их взаимодействия на ядрах железа и углерода, входящих в детектор.

1.2 Цель диссертационной работы

Целью диссертации является:

- расчет отклика детектора LVD на гравитационный коллапс звезды, происходящий не по модели стандартного коллапса;
- определение чувствительности детектора и поиск событий-кандидатов на нейтринные всплески от гравитационных коллапсов звезд, не сопровождающихся излучением электронных антинейтрино.

1.3 Научная новизна

Проведены подробные расчеты отклика детектора LVD на гравитационный коллапс звезды с излучением электронных нейтрино с учетом реакции взаимодействия нейтрино с ядрами железа и углерода, входящих в состав установки.

Получено экспериментальное ограничение на частоту гравитационных коллапсов звёзд, не сопровождающихся излучением электронных антинейтрино.

Рассмотрено введение поваренной соли в состав установки LVD в качестве дополнительной мишени для улучшения разделения типов нейтрино.

1.4 Результаты, выносимые на защиту

1. Программа Монте-Карло моделирования установки LVD, включающая в себя полное описание детектора.
2. Расчет отклика детектора LVD на взаимодействие нейтрино с железом и углеродом по заряженным и нейтральным токам. Вывод, что железно-сцинтилляционные калориметры способны эффективно регистрировать электронные нейтрино с энергиями выше ~ 20 МэВ.
3. Критерии офф-лайн анализа данных эксперимента LVD, позволяющие идентифицировать нейтринные всплески от коллапсирующих звезд в отсутствие антинейтринного излучения. Экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от коллапсирующих звезд для различных типов нейтрино (в отсутствие антинейтринного излучения): менее 1 события в 3,5 года на 90% уровне достоверности.
4. Вывод, что детектор LVD способен эффективно отделять события-кандидаты на всплески нейтринного излучения от гравитационных коллапсов звезд от фона.
5. Вывод, что введение поваренной соли в состав установки LVD улучшит разделение типов нейтрино, регистрируемых при нейтринном всплеске от Сверхновой, и увеличит статистику.

1.5 Апробация работы и публикации

Основное содержание работы опубликовано в [1-6]. Результаты диссертации докладывались на российской конференции ВККЛ (2006, 2008), международной школе ISAPP (2005), международной конференции ICRC (2009), на школах и семинарах ИЯИ РАН.

1.6 Личный вклад диссертанта

Автор разработал программу Монте-Карло моделирования установки LVD с помощью GEANT4, включающую в себя полное описание детектора. Им были проведены расчеты отклика детектора LVD на взаимодействие электронного нейтрино с железом и углеродом по нейтральным и заряженным токам при различных энергиях в диапазоне 10-

70 МэВ. Им разработаны критерии офф-лайн анализа данных эксперимента LVD, позволяющие идентифицировать нейтринные всплески от коллапсирующих звезд в отсутствие антинейтринного излучения, обработаны экспериментальные данные за 10 лет работы установки, а также показано, что детектор LVD способен эффективно отделять события-кандидаты на всплески нейтринного излучения от гравитационных коллапсов звезд от фона. Также автором проведены расчеты отклика установки LVD при условии её модификации, заключающейся во включении в её состав поваренной соли.

1.7 Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Её объем составляет 137 страниц, включая 39 рисунков и 9 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 92 наименования.

2. Краткое содержание диссертации

Во **введении** дана краткая историческая справка о развитии идей излучения нейтрино в ходе гравитационного коллапса звезды; обоснована актуальность рассматриваемой проблемы.

Глава 1 посвящена обзору литературы по вопросам регистрации нейтринного излучения от гравитационных коллапсов звезд. Согласно стандартной модели гравитационного коллапса, рассматривающей конечную стадию эволюции сферически симметричной, немагнитной, не вращающейся звезды, во время вспышки сверхновой излучаются нейтрино всех типов $\nu_e, \tilde{\nu}_e, \nu_\mu, \tilde{\nu}_\mu, \nu_\tau, \tilde{\nu}_\tau$ с энергиями (10 – 20) МэВ. Энергия, идущая в нейтринное излучение, составляет примерно 10% от массы центральной части сколлапсировавшей звезды и делится между шестью типами нейтрино приблизительно поровну. Ожидаемая длительность нейтринной вспышки составляет 5 – 20 сек.

Наиболее подходящей реакцией для поисковых экспериментов в рамках стандартной модели является реакция взаимодействия электронных антинейтрино с водородом

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+, \quad (1)$$

поскольку она обладает максимальным сечением.

Теоретические методы оценки частоты галактических Сверхновых предсказывают одно событие в 30 – 70 лет; экспериментальное ограничение составляет менее одного события раз в 13 лет на уровне достоверности 90%.

Первые детекторы по поиску нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд, были ориентированы на реализацию стандартного сценария и рассчитаны на регистрацию преимущественно электронных антинейтрино, $\bar{\nu}_e$. Основным эффектом ожидался от реакции обратного бета-распада (1), энергетический порог которой составляет 1,8 МэВ. Нейтрон может быть зарегистрирован благодаря реакции

$$n + p \rightarrow d^* \rightarrow d + \gamma, \quad (2)$$

в результате которой рождается гамма-квант с энергией 2,2 МэВ (среднее время захвата нейтрона $\tau_{\text{зах}} \sim 170 - 200$ мкс), который может быть измерен сцинтилляционными детекторами больших объемов, что помогает идентификации $\bar{\nu}_e$.

Другая реакция, типичная для существующих экспериментов, – это упругое рассеяние нейтрино на электроне:

$$\nu_{e,\mu,\tau}(\bar{\nu}_{e,\mu,\tau}) + e^- \rightarrow \nu_{e,\mu,\tau}(\bar{\nu}_{e,\mu,\tau}) + e^-. \quad (3)$$

Несмотря на значительно меньшее сечение по сравнению с обратным бета-распадом, в черенковских детекторах эта реакция позволяет измерить направление прихода нейтрино.

Для жидкостных сцинтилляционных детекторов следует рассматривать и реакции нейтрино с углеродом ^{12}C по нейтральным и заряженным токам:

$$\nu_{e,\mu,\tau}(\bar{\nu}_{e,\mu,\tau}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu_{e,\mu,\tau}(\bar{\nu}_{e,\mu,\tau}) + {}^{12}\text{C}^* \quad (4)$$

$$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow e^- + {}^{12}\text{N} \quad (5)$$

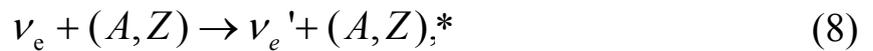
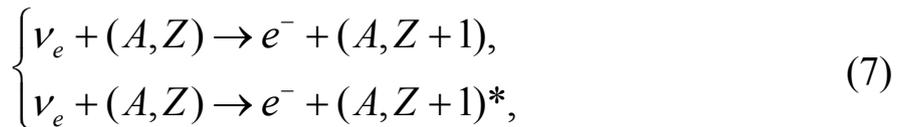


Исходя из модели стандартного коллапса, идея опыта по поиску нейтринного излучения от Сверхновых очень проста. Сцинтилляционный или черенковский детектор реагирует на позитроны, рожденные в реакции (1), и измеряет их энергию. Появление пачки импульсов с энергиями (10 – 20) МэВ во временном интервале (5 – 20) сек может быть связано с нейтринной вспышкой от гравитационного коллапса звезды.

23 февраля 1987 года была зарегистрирована вспышка сверхновой в Большом Магеллановом Облаке на расстоянии 50 кпс от Земли. Вся совокупность экспериментальных данных по регистрации нейтрино, полученных во время этой вспышки, предсказаниям модели стандартного коллапса не соответствовала.

Для решения проблемы о сбросе оболочки и непосредственной вспышки Сверхновой была сформулирована модель вращающегося коллапсара. Она предсказывает, как минимум, две нейтринные вспышки, разделенные интервалом в несколько часов. Первая состоит в основном из потока электронных нейтрино ν_e с энергиями (25 – 55) МэВ. Вторая содержит все шесть типов нейтрино с энергиями (10 - 20) МэВ.

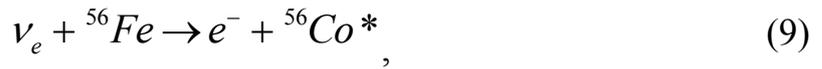
Для регистрации нейтринного излучения, вообще говоря, можно использовать любую реакцию типа



Сечение реакций (7), (8) зависит от ядра и от энергии ν_e . Для регистрации электронных нейтрино с энергиями (20 – 50) МэВ наиболее подходящими являются тяжелые нейтроноизбыточные ядра.

Относительно большим сечением обладает углерод ${}^{12}\text{C}$, его можно использовать для поиска нейтринных осцилляций во время коллапсов звезд.

Особый интерес представляют реакции нейтрино с железом, основными из которых являются



Оценки эффекта регистрации нейтринного излучения (с учетом взаимодействий (9), (10)) в первой фазе коллапса вращающейся звезды позволяют сделать вывод о совпадении сигнала, зарегистрированного всеми нейтринными детекторами вследствие вспышки Сверхновой 1987А с расчетами, сделанными по модели вращающегося коллапсара.

Глава 2 содержит описание установки LVD, расположенной в итальянской подземной лаборатории Гран Сассо на глубине 3200 м.в.э. Детектор Большого Объема (Large Volume Detector, LVD) представляет собой массив из 840 сцинтилляционных счетчиков, объёмом 1,5 м³ каждый, находящихся в модульной структуре (Рис. 1). Общая масса сцинтиллятора составляет ~1000 тонн.

Сцинтилляционные счетчики представляют собой контейнеры из нержавеющей стали размерами 100×150×100 см³, заполненные жидким сцинтиллятором, основу которого составляет уайт-спирит. Они размещены по 8 штук в несущих модулях. Модули (их размеры 6,6×2,7×1,1 м³), сгруппированные в 7 горизонтальных слоёв, образуют колонны. 5 колонн, которые разделены проходами шириной 70 см, составляют башню (Рис. 1). Детектор LVD состоит из 3 таких башен, разделенных коридорами шириной 2 м. Счетчики подразделяются на внутренние и внешние: ни одна грань внутренних счетчиков не обращена непосредственно к скальной породе (57% от общего числа счетчиков), тогда как остальные 43% являются внешними. Общая масса железа, распределенного практически равномерно по объему LVD в модулях и контейнерах счетчика, составляет примерно 1000 тонн.

Установка LVD является сцинтилляционным детектором с железно-углеводородной мишенью общей массой 2 кт.

Объем счетчика просматривается тремя фотоумножителями ФЭУ-49Б или ФЭУ-125.

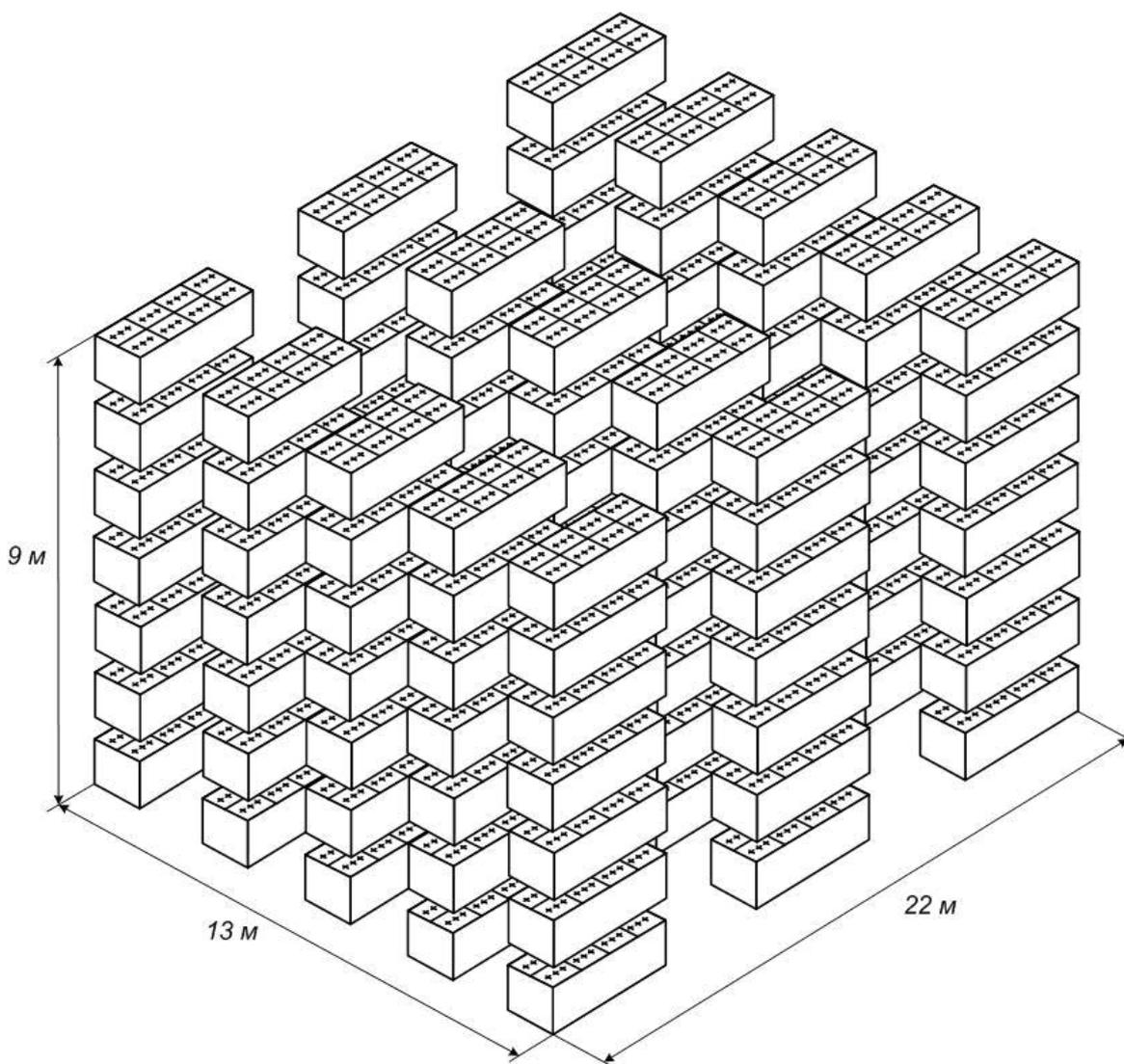


Рис. 1. Схема установки LVD

Информация с каждого счетчика считывается независимо. Импульсы с каждого ФЭУ дискриминируются по двум порогам: верхнему, соответствующему энергосвободению в счетчике 5 МэВ (ВЭП), и нижнему $\sim 0,6$ МэВ (НЭП). Триггером для регистрации импульса является совпадение импульсов выше ВЭП с трех ФЭУ в интервале 250 нс. Триггер открывает в счетчиках временные ворота длительностью 1 мс: в этот период возможна регистрация импульсов выше нижнего порога, что позволяет осуществить детектирование нейтронов по реакции (2).

Энергетическая калибровка линейных каналов ADC производится с помощью мюонов космических лучей, регистрируемых LVD. Ежемесячно автоматически осуществляется новая калибровка.

В **Главе 3** содержатся описание и результаты расчета отклика детектора на коллапс звезды в центре нашей Галактики.

Результаты, полученные во время вспышки Сверхновой SN1987A на детекторе LSD, указывают на необходимость учета влияния реакции (9) в ожидаемый отклик установки на гравитационный коллапс звезды. С развитием модели вращающегося коллапсара возникла необходимость дополнительного расчета вклада в отклик детектора реакций (3)-(5) от электронных нейтрино с предсказываемыми энергиями порядка нескольких десятков МэВ. Расчеты регистрации взаимодействия нейтрино с веществом установки LVD интересны с точки зрения любой модели, предсказывающей какой-либо существенный поток нейтрино различных типов с подобными энергиями.

Отдельной задачей является рассмотрение возможности детектора LVD идентифицировать канал нейтринного взаимодействия и измерить энергию приходящих нейтрино.

Эффективность регистрации нейтринного взаимодействия была рассчитана методом Монте-Карло с использованием пакета GEANT4. В программу моделирования было заложено полное описание реальной геометрии установки LVD.

(ν_e, Fe) взаимодействия могут быть зарегистрированы детектором LVD следующим образом. При взаимодействии нейтрино с энергией $E_{\nu_e} = 40$ МэВ с ядрами железа в слое железа толщиной 2 - 3 см, расположенного между двумя слоями сцинтиллятора, в последний попадает больше γ -квантов, чем электронов. Средняя энергия этих частиц – 7-9 МэВ. Энергетический спектр частиц, выходящих из железной пластины, показан на Рис. 2. Четко виден пик от гамма-линии кобальта 7,2 МэВ.

Определим эффективность как отношение числа событий, в которых существует счетчик с энерговыделением выше порога (5 МэВ), к общему числу разыгрываемых событий.

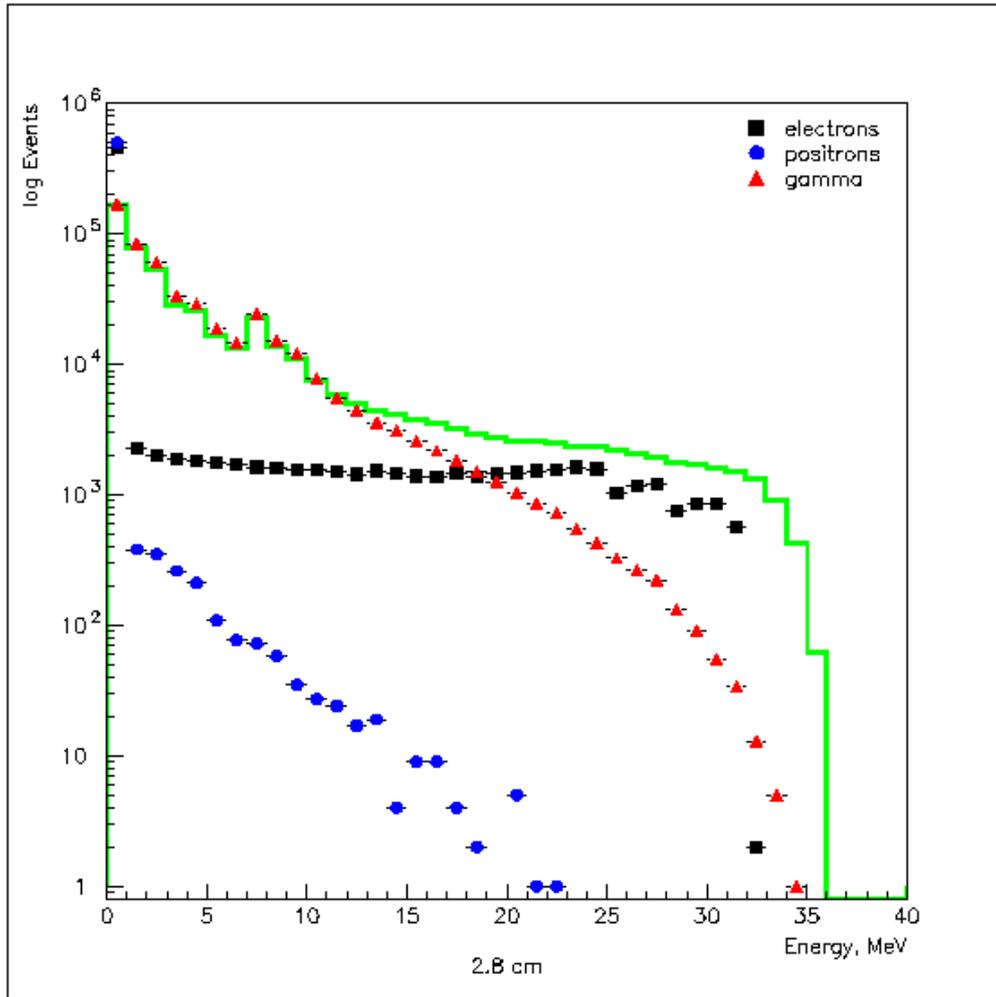


Рис. 2. Энергетический спектр продуктов реакции (9) при энергии нейтрино $E_{\nu_e} = 40 \text{ МэВ}$, выходящих из железной пластины толщиной 2,8 см. Квадраты – электроны, кружки – позитроны, треугольники – гамма-кванты. Гистограммой показана общая энергия

Если предположить, что спектр нейтрино от вращающегося коллапсара состоит из моноэнергетических нейтрино с энергиями от 20 до 60 МэВ, то число событий от реакции (9), регистрируемых детектором LVD, составит

$$N = \eta \times nV \sigma \Phi = \eta \times \frac{M[\text{г}] \times N_A}{\mu[\text{г/моль}]} \times \sigma[\text{см}^2] \times \frac{\varepsilon_{\nu}^*[\text{эВ}]}{E[\text{эВ}]} \times \frac{1}{4\pi(R[\text{см}])^2}, \quad (11)$$

где M - полная масса железа в структуре LVD (n - концентрация атомов железа в одном см³, V - полный объем железа), μ - молярная масса же-

леза, N_A – число Авогадро, σ - сечение взаимодействия реакции, R - расстояние до Сверхновой, ε_ν^* - полная энергия электронных нейтрино, испущенных во время коллапса, \bar{E} - энергия одного нейтрино. Если взять $R \sim 10 \text{ кпс} = 3,125 \times 10^{22} \text{ см}$ и $\varepsilon_\nu^* \sim 8.9 \times 10^{52} \text{ эрг} = 5.56 \times 10^{64} \text{ эВ}$, мы получим значения, приведенные в Табл. 1.

Табл. 1

Ожидаемое число событий в установке LVD от реакции (9)

Энергия нейтрино, МэВ	Сечение реакции (9), см^2	Результаты для реакции нейтрино с железом		
		Число взаимодействий	Эффективность регистрации, %	Число событий, согласно (11).
20	$3,75 \times 10^{-41}$	90	15	14
30	$1,80 \times 10^{-40}$	290	32	93
40	$4,14 \times 10^{-40}$	500	46	230
50	$7,43 \times 10^{-40}$	720	58	416

Расчеты показывают, что эффективность регистрации акта взаимодействия нейтрино превышает 50% для нейтрино с энергиями выше 40 МэВ. Спектры энергосъемлений в одном счетчике для различных энергий нейтрино приведены на Рис. 3.

Моделирование реакции (10) происходило аналогичным образом. В железе, окружающем счетчик, разыгрывалась точка рождения гамма-кванта с энергией 7,6 МэВ, распределение его скорости было изотропным. Эффективность регистрации этого гамма-кванта составляет 30%, энергетический спектр представлен на Рис. 4.

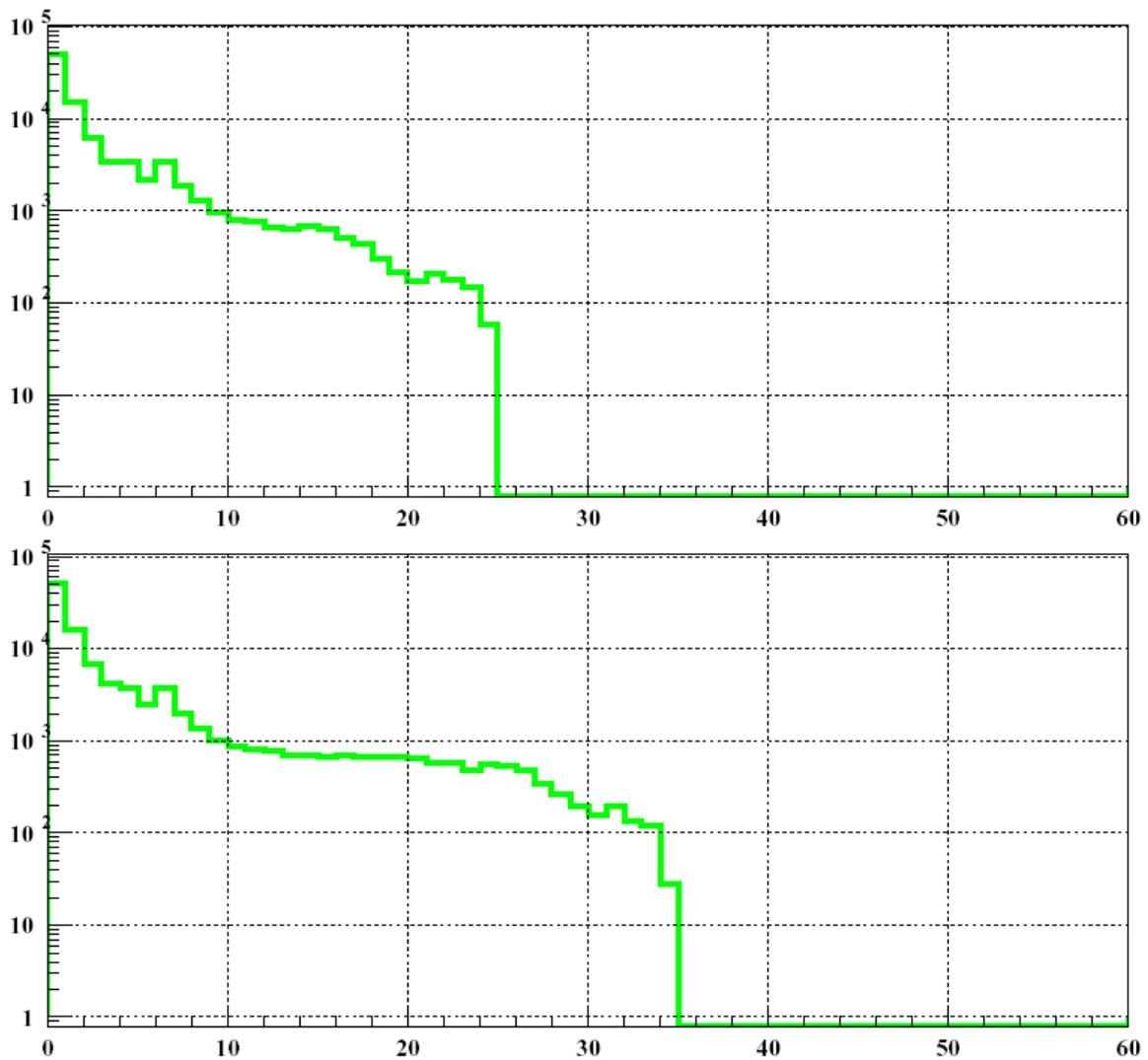


Рис. 3. Расчетный спектр энерговывделений, регистрируемых одним счетчиком LVD от реакции (9). Энергия нейтрино а) 30 МэВ, б) 40 МэВ. Ось X – энергия, регистрируемая счетчиком (МэВ), ось Y – число событий

Другой способ регистрации электронных нейтрино и антинейтрино от коллапсов в LVD – это реакции взаимодействия с ядрами углерода (4) – (6).

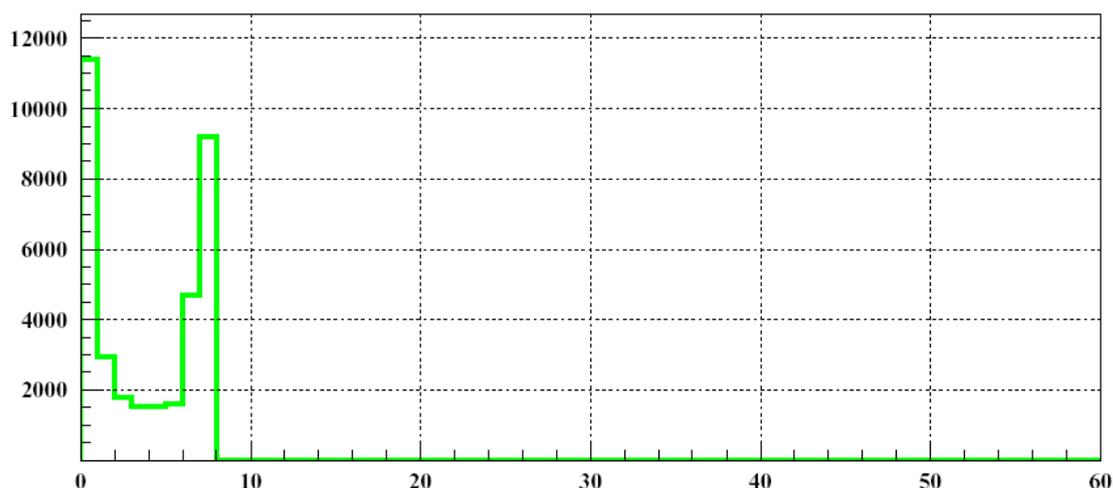


Рис. 4. Энергетический спектр событий от реакции (10). Ось X – энергия, регистрируемая счетчиком (МэВ), ось Y – число событий

Реакция (4) позволяет измерить полный нейтринный поток с энергией выше 15,1 МэВ в любой модели коллапса. Эффективность регистрации гамма-кванта, согласно расчетам с использованием GEANT4, составляет $\approx 60\%$. Реакции (5) и (6) в стандартной модели коллапса дают существенно меньший вклад в отклик детектора, если не учитывать нейтринные осцилляции. Но в модели вращающегося коллапсара появляются электронные нейтрино с энергиями порядка нескольких десятков МэВ, что даст значения, приведенные в Табл. 2.

Табл. 2

Ожидаемое число событий в установке LVD от реакций (4), (5)

E_ν , МэВ	Реакция (4)				Реакция (5)			
	Сечение, 10^{-42} см ²	Число взаимо- дейст- вий	Эффек- тивность регистра- ции, %	Число событий	Сечение, 10^{-42} см ²	Число взаимо- дейст- вий	Эффек- тивность регистра- ции, %	Число событий
20	0,302	3	60	2	0,287	3	0	0
30	2,74	20		11	5,03	38	95	36
40	7,26	41		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

Подчеркнём важность кобальтового (^{56}Co) и железного (^{56}Fe) пиков при энергии ~ 7 МэВ: это является признаком регистрации взаимодействия именно нейтрино (9), (10). Имея статистику в несколько сотен событий от реакции (9), по их энергетическому спектру можно делать выводы и об энергии приходящих нейтрино: максимальная зарегистрированная энергия соответствует максимальной энергии электронных нейтрино с поправкой на разницу энергий связи исходного и конечного ядер (см. Рис. 3).

Реакция взаимодействия электронного нейтрино с углеродом (5) из-за высокого (17,3 МэВ), по сравнению с реакцией взаимодействия нейтрино с железом (9), порога менее пригодна для измерения энергии приходящих нейтрино при $E_\nu \leq 40 \div 50$ МэВ.

Реакции по нейтральным токам на углероде (4) и железе (10) увеличивают число событий в отклике детектора на гравитационный коллапс, но не позволяют измерить энергию приходящих нейтрино. Однако при условии осцилляций $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ пик 7,6 МэВ и энергетическое распределение событий могут дать ответ на вопрос: какой тип нейтрино был зарегистрирован установкой? Для электронного нейтрино будет характерно распределение, близкое по форме к тому, что изображено на Рис. 3, а для мюонного энергетическое распределение событий будет похоже на то, что представлено на Рис. 4.

Таким образом, отклик детектора LVD на нейтринную вспышку в центре Галактики весьма чувствителен к энергии и типу нейтрино (и, следовательно, к модели коллапса звезды) и может достигать ~ 500 - 800 событий. К этой величине надо добавить ~ 300 событий благодаря реакции обратного бета-распада (1), если реализуется стандартный сценарий звездного коллапса. Даже в случае, когда электронные нейтрино и антинейтрино рождаются при гравитационном коллапсе звезды одновременно, детектор LVD способен, используя энергетический спектр событий, зарегистрировать нейтринный пик в отклике, разделив таким образом типы приходящих нейтрино.

Данный результат следует трактовать как идею создания больших железно-сцинтилляционных калориметров, способных эффективно регистрировать не только антинейтрино от коллапса Сверхновых, но и электронные нейтрино, особенно в области низких энергий ($E_{\nu_e} \leq 20$ МэВ). Подобные детекторы следующего поколения должны быть способными зарегистрировать энерговыделения около 7 МэВ с максимально возможной триггерной эффективностью.

Для обоснованного выбора между существующими и будущими моделями гравитационных звездных коллапсов желательно также иметь возможность идентификации канала нейтринного взаимодействия и измерения энергии приходящих нейтрино.

В **Главе 4** содержится анализ экспериментальных данных, полученных на LVD, по поиску нейтринных всплесков от гравитационных звездных коллапсов, не сопровождающихся излучением электронных антинейтрино.

Приведены особенности регистрации нейтринной вспышки в моделях стандартного коллапса и вращающегося коллапсара. Указаны основные источники фона.

В детекторе LVD разработан алгоритм определения нейтринных всплесков, работающий в режиме реального времени и ориентированный на стандартную модель гравитационного коллапса звезды. Основой поиска нейтринных всплесков является идентификация кластеров событий в фиксированных временных интервалах. Приведены критерии отбора сигналов и счетчиков, применяемые в этом анализе.

Алгоритм отбора кандидатов на нейтринные всплески в режиме реального времени основан на поиске кластеров, состоящих из m сигналов в течение временного окна фиксированной ширины, Δt . Каждый период наблюдения длительностью T сканируется «скользящим окном» с $\Delta t=20$ сек, таким образом, он делится на $N = 2T/\Delta t - 1$ интервалов, причем каждый последующий начинается в середине предыдущего. Частота имитации события фоном, т.е. появления кластеров длительностью 20 с и множественностью $\geq m$, равна:

$$F_{im}(m, f_{bk}, 20 \text{ c}) = N \cdot \sum_{k=m}^{\infty} P(k; 20 \cdot f_{bk} / c^{-1}) \text{ событий} \cdot \text{день}^{-1},$$

где f_{bk} – темп счета фоновых событий, $P(k; f_{bk}\Delta t)$ - пуассоновская вероятность получить кластер множественностью k за время Δt , если $f_{bk}\Delta t$ - среднее число фоновых импульсов. Для известного темпа счета фоновых событий минимальная множественность кластера m_{min} соответствует выбранной частоте имитации F_{im} , которая рассматривается как порог. Кластер будет рассматриваться как кандидат на нейтринный всплеск от Сверхновой, если его множественность $m > m_{min}$.

Если выбрать какую-либо модель излучения и распространения нейтрино, становится возможным выразить чувствительность детектора в единицах физических параметров источника, таких как расстояние или нейтринный поток. Если мы зафиксируем расстояние до Сверхновой, скажем, 10 кпс, мы можем вывести чувствительность детектора как функцию минимальной интенсивности нейтрино в источнике.

С целью поиска разных типов нейтрино от гравитационных коллапсов были дополнительно проанализированы данные эксперимента более чем за 10 лет его работы и рассмотрены два порога по энерговыделению в счетчике:

1) порог по энерговыделению составлял 5 МэВ, что позволяет зарегистрировать не только нейтринный всплеск от гравитационного коллапса звезды, протекающего по стандартной модели (реакции (1), (2)), но и гамма-кванты от снятия возбуждения ядер кобальта в реакции (9) и железа – в (10). Это послужит признаком регистрации электронного нейтрино;

2) порог по энерговыделению составлял 10 МэВ, что позволит зарегистрировать гамма-кванты от снятия возбуждения ядра углерода в реакции (4). При отсутствии сигнала, удовлетворяющего условию 1), это служит признаком регистрации других типов нейтрино – мюонного и тау.

Были рассмотрены интервалы времени 3, 5, 10 и 20 сек и определена вероятность P_N получить N одиночных триггерных импульсов во временном интервале данной длины, если за его начало брать такой же одиночный триггерный импульс. Распределения количества одиночных триггерных импульсов для всего детектора LVD с энерговыделением, превышающим 5 МэВ, во временном окне 5 и 20 сек в сравнении с рас-

пределением Пуассона приведены на Рис. 5. Построено аналогичное распределение для триггерных импульсов с энерговыделением свыше 10 МэВ во временном окне 20 с. Выбор продолжительности временных интервалов определяется теоретическими предсказаниями о длительности нейтринного всплеска: 2,4 – 6 сек в модели вращающегося коллапса, 10-20 сек в модели стандартного коллапса.

Статистического превышения количества кластеров над фоном не зафиксировано, что позволяет впервые поставить экспериментальное ограничение на частоту коллапсов, не сопровождающихся всплеском излучения электронных антинейтрино: менее 1 события в 3,5 года на 90% уровне достоверности.

В связи с отсутствием событий-кандидатов дополнительно проверим способность эксперимента зарегистрировать нейтринный всплеск от гравитационного коллапса звезды в нашей Галактике. Для этого были построены распределения, за какое время внутренние счетчики каждой башни регистрируют $N_{trig} = 5 \div 30$ триггерных импульсов с энерговыделением >5 МэВ (кластер множественности N_{trig}). Среднее по такому распределению, существенно превышающее 20 сек, позволяет с уверенностью сказать, что нейтринная вспышка от Сверхновой в нашей Галактике, когда ожидается от нескольких десятков до нескольких сотен импульсов в течение ~ 20 сек, может быть надежно отделена от фона (Табл. 3). Отметим, что форма распределений всех трех башен одинакова, различия в средних значениях объясняются темпами счета.

Табл. 3

Среднее время, за которое башня регистрирует N_{trig} импульсов, сек.

Указаны статистические ошибки

N_{trig}	Среднее время, за которое башня регистрирует N_{trig} импульсов, сек		
	T1	T2	T3
10	934±300	75±25	63±22
20	1868±435	150±38	125±33
30	2765±497	226±47	188±43

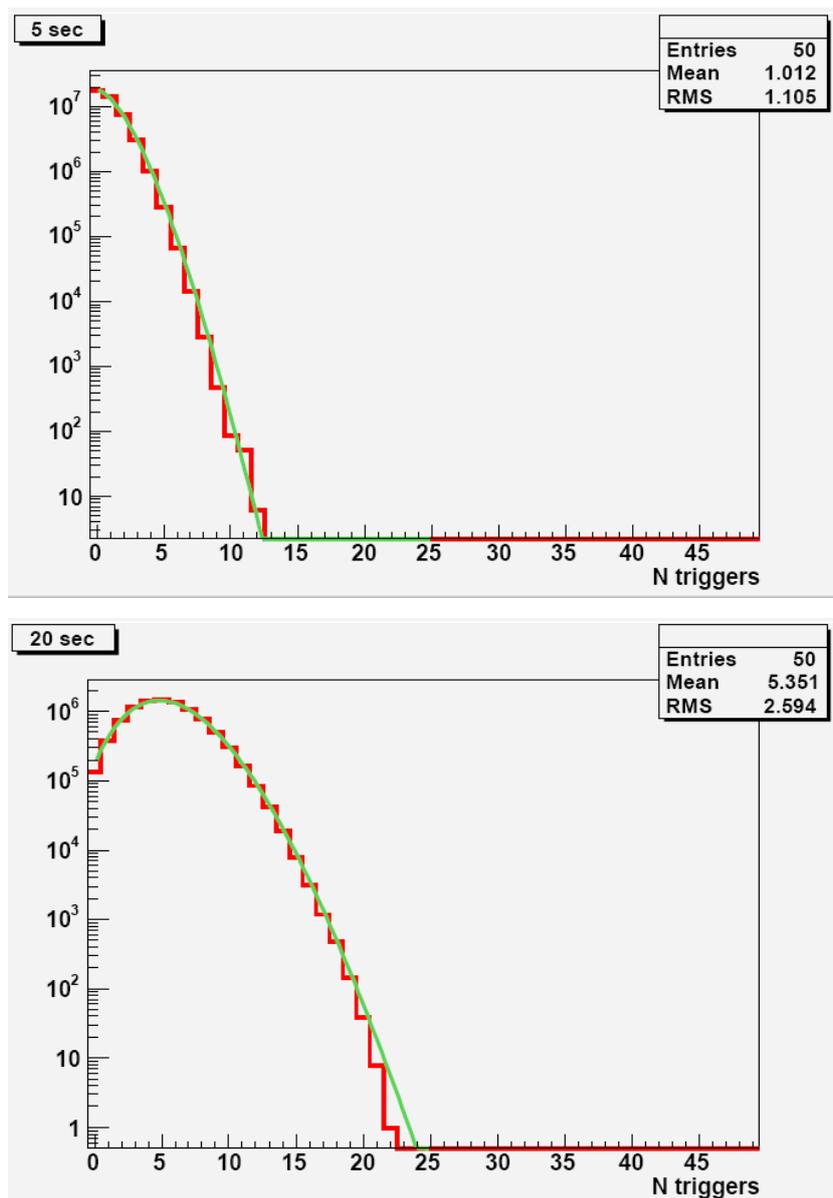


Рис. 5. Гистограмма – распределение количества триггерных импульсов с энерговыделением выше 5 МэВ установки LVD за период с 11.06.2007 г. по 02.06.2008 г. во временном окне 5 (вверху) с и 20 (внизу) с, если за его начало брать такой же триггерный импульс; кривая – фит распределением Пуассона

Отдельно изучались события, когда триггерный импульс не сопровождался в открывающихся временных воротах никаким сигналом выше НЭП – т.н. "триггеры без сопровождения". Эти события являются фоном для регистрации реакций (4), (10), когда рождается только одна частица. При регистрации взаимодействия (9) так же весьма вероятно однократное срабатывание только одного счетчика. Триггеры без со-

провожения подчиняются распределению Пуассона со средними темпами счета, приведенными в Табл. 4. Энергетическое распределение подобных событий приведено на Рис. 6. Максимум распределений находится в районе 5 МэВ и объясняется пороговым эффектом. Отметим отсутствие особенностей в спектре при интересующих нас значениях 7 и 15 МэВ.

Отдельно в Табл. 4 приведены значения темпа счета одиночных триггеров с энергией в интервале 6–8 МэВ: и в этом случае фоновые условия позволяют установке LVD регистрировать нейтринный всплеск. Фоновый эффект для реакции (4), когда наиболее вероятное энерговыделение составляет 15 МэВ, на несколько порядков ниже, чем для реакций (9), (10).

Табл. 4

Условие отбора	1/(темп счета триггеров без сопровождения), сек, по башням установки LVD		
	T1	T2	T3
все счетчики	12,4	5,3	2,8
только внутренние счетчики	24	19	9
внутренние счетчики; энергия триггера 6–8 МэВ	27,4	26	20

Детектор LVD способен эффективно регистрировать нейтринную вспышку от гравитационного звездного коллапса в нашей Галактике не только при реализации Стандартной модели, когда излучаются преимущественно электронные антинейтрино, но и в случае, когда коллапс происходит по какой-либо другой модели с испусканием нейтрино других типов.

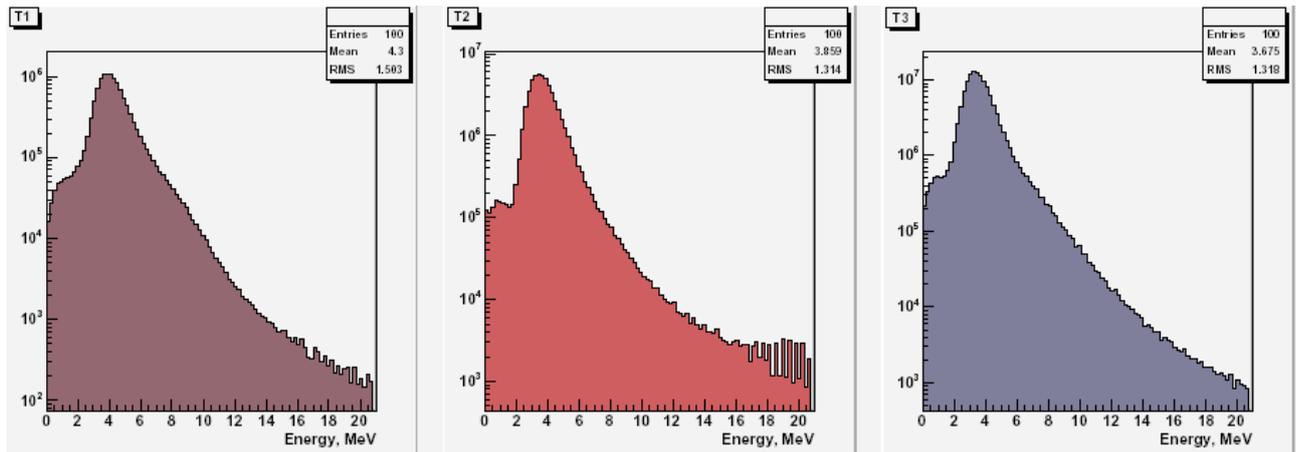


Рис. 6. Энергетическое распределение триггеров без сопровождения во всех счетчиках для трех башен установки LVD за период с 15.05.2007 г. по 08.06.2008 г.

В Главе 5 приведены расчеты улучшения детектирования и сепарации разных типов нейтрино при регистрации звёздных коллапсов путем введения в структуру детектора LVD поваренной соли (NaCl).

Если предположить, что в момент коллапса Сверхновой излучаются электронные нейтрино высоких энергий (~ 50 МэВ), можно увеличить количество наблюдаемых событий на детекторе LVD, дополнительно к железу введя в его структуру некое вещество, состоящее из элементов, обладающих большим сечением взаимодействия с нейтрино.

Этим веществом может являться поваренная соль, NaCl. Реакция взаимодействия электронного нейтрино с поваренной солью подразделяется на две:



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.

В конечном состоянии велика вероятность рождения возбужденного магния, снятие возбуждения с которого происходит путем испускания гамма-кванта с энергией $\sim 7,5$ МэВ, возбуждение аргона очень слабое.

С помощью GEANT4 было проведено моделирование эксперимента LVD, в проходы между колоннами которого были «добавлены» соляные пластины.

Взаимодействие нейтрино с веществом моделировалось двумя способами: во-первых, учитывалось прохождение через вещество только электрона, точка рождения которого выбиралась случайным образом равномерно по всему объему соли, а направление движения считалось изотропным (взаимодействие на ядрах хлора); во-вторых, разыгрывались продукты реакции: электрон и гамма-квант с энергией 7,5 МэВ, распределение скоростей которых не коррелировало друг с другом и было изотропным для обеих частиц (взаимодействие с натрием).

Поскольку рассматриваемые энергии нейтрино достаточно велики, энерговыделение может превышать установленный в 5 МэВ порог сразу в нескольких счетчиках установки LVD. Поэтому можно ввести два понятия эффективности: ε_1 – число событий, в которых существовал хотя бы один счетчик с энерговыделением выше порога, к общему числу разыгрываемых событий, ε_2 – число счетчиков с энерговыделением выше порога к общему числу разыгрываемых событий. Полученные значения эффективности регистрации приведены в Табл. 5. Для сравнения, в двух последних столбцах приведены значения эффективности регистрации реакции взаимодействия нейтрино с железом (9), полученные при условии наличия соли между колоннами.

Сравнение данных в двух последних столбцах таблицы с результатами, приведенными в табл. 1, показывает, что соль снижает эффективность регистрации реакции (9), 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 сечение взаимодействия нейтрино с железом, натрием и хлором в расчете на один нейтрон, одинаковы. 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 – 180. Из этих 1000 взаимодействий, что соответствует энергии нейтрино ~ 50 МэВ, может быть зарегистрировано ~ 450 , т.е., суммарная эффективность превысит 40%.

Энергетический спектр событий приведен на Рис. 7б. Из рисунка следует, что введение поваренной соли не только увеличит количество событий в отклике детектора (примерно на треть по сравнению с существующей конструкцией), но и улучшит разделение типов нейтрино. Подобно реакции (9), реакции (12), (13), также проходящие по заряженным токам, дают возможность определения максимальной энергии приходящих нейтрино по энергетическому спектру событий.

Табл. 5

Эффективность регистрации частиц, рожденных в соляной структуре модифицированной установки LVD

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	0,134	0,139	0,221	0,240	0,392	0,414
50	0,182	0,193	0,264	0,292	0,475	0,512
60	0,225	0,243	0,305	0,345	0,523	0,579

Интересно сравнить полученные значения с теми, которые были бы зарегистрированы от реакции обратного бета-распада (1), (2) в рамках стандартной модели.

Если температура нейтриносферы звезды составляет 5 МэВ, LVD должен зарегистрировать ~ 320 событий по реакции обратного бета-распада со спектром, показанным на Рис. 7а. Не более 30% таких событий будут похожи на события от взаимодействия нейтрино с солью или железом из-за отсутствия низкоэнергичного импульса в счетчике с триггером (эффективность регистрации нейтрона, рожденного в реакции (1), тем же счетчиком составляет $\sim 70\%$). Суммарный энергетический спектр для всех трех каналов взаимодействия (соль, железо, обратный бета-распад) представлен на Рис. 7в.

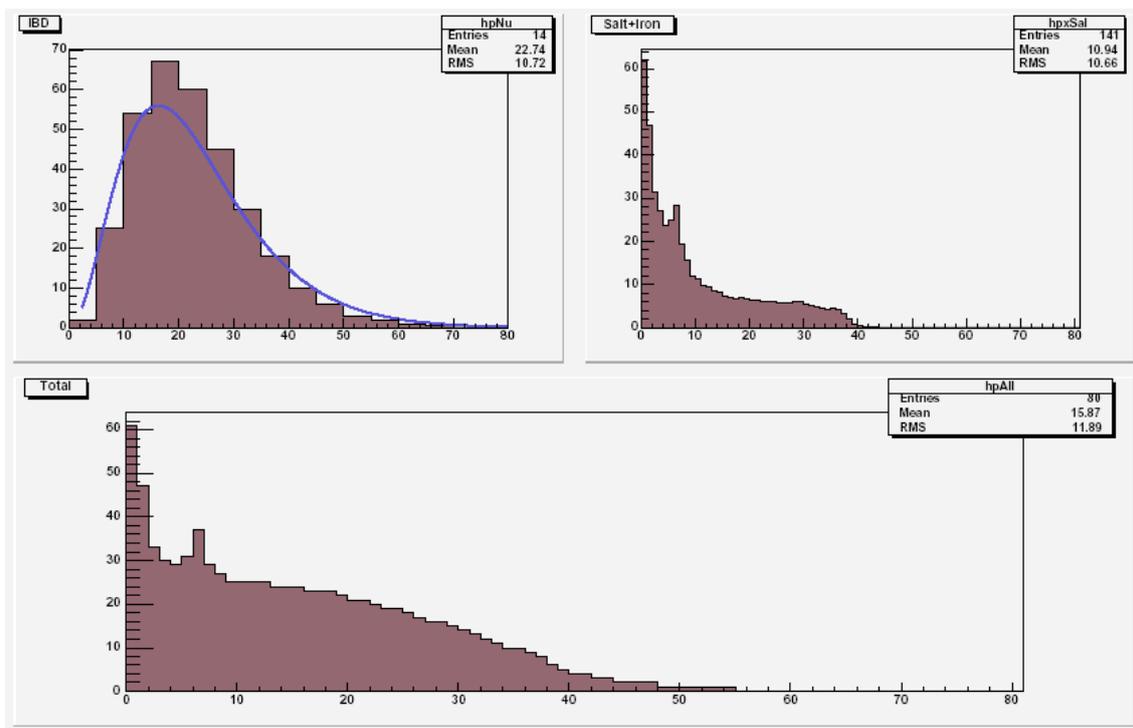


Рис. 7а) Энергетический спектр событий от реакции (1) при температуре нейтриносферы звезды 5 МэВ (показан используемый в расчетах фит функцией вида $\frac{A \cdot E^2}{\exp(E/B) + 1}$); б) полный энергетический спектр реакций (12), (13), (9) для энергии нейтрино ~ 50 МэВ (гистограмма). По оси абсцисс – регистрируемая энергия (в МэВ), по оси ординат – относительные единицы; в) сумма графиков, представленных на рис. а) и рис. б) для 320*0.3 событий от реакции (1) и 450 событий от взаимодействий нейтрино с солью и железом. По оси абсцисс – энергия (в МэВ), по оси ординат – количество событий

Даже в случае, когда нейтрино с энергиями ~ 50 МэВ и антинейтрино со средней энергией ~ 20 МэВ излучаются одновременно, детектор LVD способен, используя энергетический спектр событий, зарегистрировать нейтринный пик (~ 7 МэВ) в отклике, разделив таким образом типы входящих нейтрино.

Ядра хлора хорошо захватывают нейтроны, что позволяет повысить эффективность регистрации реакции (2) до $\sim 80\%$ и не только увеличить количество регистрируемых событий в антинейтринном канале, но и улучшить разделение типов нейтрино, используя как спектр событий,

так и характерную сигнатуру реакции (1) с последующим взаимодействием (2).

В **заключении** сформулированы следующие результаты работы:

1. Разработана программа Монте-Карло моделирования установки LVD, включающая в себя полное описание детектора.

2. Проведен расчет отклика детектора LVD на взаимодействие нейтрино по реакциям с железом по нейтральным и заряженным токам. Эффективность регистрации нейтринного взаимодействия по реакции по заряженным токам превышает 50% для энергии электронного нейтрино выше 50 МэВ.

Рассчитан отклик детектора LVD на взаимодействие нейтрино с ядрами углерода для энергий нейтрино выше 10 МэВ.

Показано, что железно-сцинтилляционные калориметры способны эффективно регистрировать электронные нейтрино с энергиями выше ~20 МэВ.

3. Разработаны критерии офф-лайн анализа данных эксперимента LVD, позволяющие идентифицировать нейтринные всплески от коллапсирующих звезд в отсутствие антинейтринного излучения. Впервые поставлено экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от коллапсирующих звезд для различных типов нейтрино (в отсутствие антинейтринного излучения): менее 1 события в 3,5 года на 90% уровне достоверности.

4. Показано, что детектор LVD способен эффективно отделять события-кандидаты на всплески нейтринного излучения от гравитационных коллапсов звезд от фона.

5. Показано, что введение в состав установки LVD поваренной соли приводит как к улучшению разделения типов нейтрино, регистрируемых при нейтринном всплеске от Сверхновой, так и увеличению статистики. Проведены расчеты отклика модифицированной установки LVD.

В **приложении** приведено описание геометрии установки LVD в существующей модификации в терминах программного пакета GEANT4.

3. Публикации автора по теме диссертации

1. Н.Ю. Агафонова, В.В. Бояркин и др. Статус эксперимента LVD // Известия РАН. Серия физическая, **71**, №4, 586 (2007).
2. N.Yu. Agafonova, V.V. Boyarkin et al., Study of the effect of neutrino oscillations on the Supernova neutrino signal in the LVD detector // Astroparticle Physics, **27**, 254-270 (2007).
3. В.В.Бояркин, О.Г. Рязская, Детектор LVD и нейтрино от коллапсирующих звезд // Известия РАН, Серия физическая, **71**, №4, 589 (2007).
4. N. Agafonova, V. Boyarkin et al., On-line recognition of supernova neutrino bursts in the LVD detector // Astroparticle Physics, **28**, 516-522 (2008).
5. Н.Ю. Агафонова, В.В. Бояркин и др., Поиск нейтринного излучения от Сверхновых с помощью детектора LVD // Известия РАН, Серия физическая, **73**, № 5, с. 688 (2009).
6. Бояркин В.В., Рязская О.Г., Поваренная соль как мишень для нейтрино от Сверхновых // Известия РАН, Серия физическая, **73**, № 5, с. 691 (2009).

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,0 Заказ № 22024 Тираж 100 экз.

Бесплатно

Отпечатано на компьютерной издательской системе

Издательский отдел

Учреждение Российской академии наук

Институт ядерных исследований РАН

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а