

LVD — МНОГОЦЕЛЕВОЙ РОССИЙСКО-ИТАЛЬЯНСКИЙ ДЕТЕКТОР

© 2022 г. Н. Ю. Агафонова^{1)*}, **О. Г. Ряжская¹⁾**
(от имени коллаборации LVD)

Поступила в редакцию 20.06.2021 г.; после доработки 20.06.2021 г.; принята к публикации 20.06.2021 г.

Представлены избранные результаты многоцелевого Детектора Большого Объема (LVD). Исследования ведутся по программе непрерывного поиска нейтрино от вспышек Сверхновых в нашей галактике, мюонной и нейтронной физике. Установка LVD на сегодня является крупнейшим сцинтилляционным детектором, обладающим уникальными возможностями для исследований в области подземной физики.

DOI: 10.31857/S0044002722010032

1. ВВЕДЕНИЕ

В лаборатории ЭМДН Института ядерных исследований РАН членом-корреспондентом РАН Ряжской Ольгой Георгиевной и ее сотрудниками был разработан сцинтилляционный счетчик — модуль объемом 1.5 м³, оснащенный тремя фотоумножителями с диаметром фотокатода 15 см и обладающий высокой эффективностью регистрации нейтронов ~70%. Жидкий сцинтиллятор, разработанный при участии О. Г. Ряжской [1], обладающий высоким пропусканием на длине волны излучаемого света $\lambda = 420$ нм, обеспечивает эффективную регистрацию гамма-квантов низких энергий выше ~1 МэВ. Размер счетчика (1.5 × 1.0 × 1.0 м³) позволяет смонтировать установку любого объема, форма и размеры которой ограничиваются лишь размерами помещения. Сгруппированные вместе в большой детектор счетчики дают возможность измерять энергию высокоэнергичных частиц, электромагнитных и адронных каскадов по их полному энерговыделению, т.е. придают ему свойства калориметра. Таким образом, детектор такого типа позволяет проводить эксперименты в экстремально широком диапазоне энерговыделений от единиц МэВ до сотен ГэВ.

Этот счетчик был разработан для долговременного подземного эксперимента LSD (Liquid Scintillation Detector) под Монбланом на глубине 5200 м в.э. [2] по поиску всплеска нейтринного излучения, возникающего при гравитационном коллапсе звездного ядра. Основными реакциями регистрации нейтрино являются:

а) реакция обратного β -распада в сцинтилляторе (реакция Райнеса–Коуэна): $\bar{\nu}_e p \rightarrow n e^+$, $E(e^+) = 5-100$ МэВ, $np \rightarrow D\gamma$, $E(\gamma) = 2.2$ МэВ.

б) реакции νe , $\nu^{12}\text{C}$, $\nu^{56}\text{Fe}$ взаимодействия нейтрино с электронами и ядрами по заряженным и нейтральным токам в веществе установки, основными продуктами этих реакций являются электроны (e^\pm) и γ -кванты с ожидаемыми энергиями в диапазоне 2–60 МэВ.

Международным научным комитетом в 1984 г. был принят к реализации проект установки LVD (Large Volume Detector) в подземной лаборатории Гран-Сассо на глубине 3650 м в.э. (Италия). Проект LVD [3] был разработан совместно сотрудниками лаборатории Ряжской О. Г. и Института космогеофизики Италии, его сцинтилляционная часть являлась расширенным вариантом LSD.

Анализ первых данных со сцинтилляционных счетчиков LVD в Гран-Сассо начался в 1992 г. В 2000 г. было закончено строительство третьей башни. Полный размер детектора, состоящего из 840 счетчиков (1010 т сцинтиллятора), составляет 22.7 × 13.2 × 11 м³. Установка включает также железные конструкции общей массой 1000 т и трековую систему, работавшую до 2002 г.

2. НА СТРАЖЕ ВСПЫШЕК СВЕРХНОВЫХ

Гравитационные коллапсы звезд — это астрофизические события, вызывающие большой интерес. Из-за сложности их наблюдений моделирование физических процессов все еще находится в стадии эволюции, но в целом принято считать, что роль нейтрино критически важна для образования сверхновой звезды в результате коллапса [4]. Единственное подтвержденное обнаружение нейтринного сигнала от SN 1987A ознаменовало начало

¹⁾Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия.

*E-mail: Agafonova@inr.ru

новой эры в нейтринной астрофизике (например, в [5]), несмотря на некоторые нерешенные разногласия [6].

Все эксперименты, нацеленные на обнаружение нейтринных всплесков от сверхновых, образовавшихся при коллапсе ядра, сталкиваются с чрезвычайно низкой частотой таких событий, одно в 30–50 лет [7]. Это вызывает необходимость установки детекторов, которые прослужат в стабильном режиме достаточно долго. LVD — один из немногих таких детекторов.

Основная задача LVD — регистрация нейтринных вспышек от коллапсирующих звезд. Преимущество LVD перед большими водяными детекторами заключается в наличии углерода в сцинтилляторе и железа, что позволяет разделять разные типы нейтрино. Детектор способен зарегистрировать как электронные антинейтрино ($\bar{\nu}_e p \rightarrow n e^+$), так и мюонные и тау-нейтрино и антинейтрино (реакция на углероде и железе). Для первого процесса при взрыве сверхновой в центре Галактики (8.5 кпк) ожидается от 300 до 600 событий. Другие процессы дадут гораздо меньше событий. Например, в отсутствие осцилляций будут регистрироваться всего шесть событий от взаимодействий электронных нейтрино с углеродом сцинтиллятора. Выход мал в основном из-за того, что слишком малы энергии электронных нейтрино. Но осцилляции преобразуют мюонные и тау-нейтрино, которые генерируются с более высокими энергиями (примерно в 2 раза выше), в электронные нейтрино. Выход увеличится до нескольких десятков событий. Еще больше событий в детекторе и большая энергия нейтрино будет, если реализуется другой механизм взрыва сверхновой, например, [8]. Таким образом, регистрация нейтрино от сверхновых может дать полезную информацию о физике нейтрино, в основном о смешивании, и, кроме того, об астрофизике коллапса.

Весьма важным будет сравнение данных, полученных на различных детекторах, которые имеют разную чувствительность к энергии и ароматам. Сейчас создана глобальная международная сеть SNEWS (SuperNova Early Warning System) из различных детекторов для слежения за коллапсами звезд. В нее входят вместе с LVD [9] детекторы Super-K, IceCube, Borexino, KamLAND, HALO, Daya Bay и несколько гравитационных антенн. Цель SNEWS — предоставить астрономическому сообществу раннее предупреждение о вспышке сверхновой в нашей Галактике с тем, чтобы экспериментаторы могли наблюдать астрономические следствия гравитационного коллапса звезд. SNEWS увеличивает достоверность событий, детектируемых одновременно несколькими детекторами на пороге их чувствительности.

Основой поиска нейтринных всплесков является идентификация кластеров событий с низкой вероятностью имитации событий за счет флуктуации фона. В течение 28 лет поиска таких кластеров на LVD, т.е. наблюдений гравитационных коллапсов, в том числе скрытых (без сброса оболочки), в Галактике и Магеллановых Облаках не обнаружено. По данным работы нейтринного телескопа LVD за 28 лет работы (1992–2020 гг.), получено экспериментальное ограничение на частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звезд в Галактике: менее 1 события за 12.2 г. на 90%-ном уровне достоверности.

3. МЮОННАЯ ФИЗИКА

Детектор имеет модульную структуру. Счетчики сгруппированы в портатанки по восемь штук и образуют в одной башне пять колонн и семь уровней. Всего три башни. Модульная структура позволяет проводить регламентные работы без отключения детектора и отбирать мюоны “по геометрии” расположения счетчиков.

Длинная ось установки ориентирована на ЦЕРН, короткая ось — на северо-восток. Форма горы позволяет регистрировать мюоны с разных направлений θ : от 0° до 90° и глубин грунта H от 3 км в.э. (минимальная глубина) вплоть до 20 км в.э. [10].

С помощью программы реконструкции мюонных событий были получены распределения по кратности мюонных групп (рис. 1а), распределение мюонных пар по расстоянию между мюонами — декогерентная кривая (рис. 1б) и зарядовое отношение мюонов [11]. Максимальная кратность мюонов через две башни LVD составляла 27 мюонов в одном мюонном пучке.

Зависимость расстояний между мюонами в группе дает информацию о поперечных импульсах. Вместе с кратностью мюонов можно получить и информацию об энергетическом спектре адронов. Измерения спектров и распределений атмосферных мюонов по расстояниям дают возможность проверки моделей ядерного каскада в атмосфере, т.е. параметров первичного космического излучения (энергетический спектр и химический состав) и взаимодействий частиц при высоких энергиях.

В 2009 г. возник интерес к сезонным вариациям мюонов под землей. Это было связано с публикациями эксперимента DAMA [12] по поиску сигналов от взаимодействия темной материи. Мы провели долговременный анализ интенсивности LVD мюонов и получили амплитуду вариации, которая составила 1.5% при описании данных гармонической функцией. Фаза — максимум интенсивности, соответствует 185 дню с начала года [13]. Был

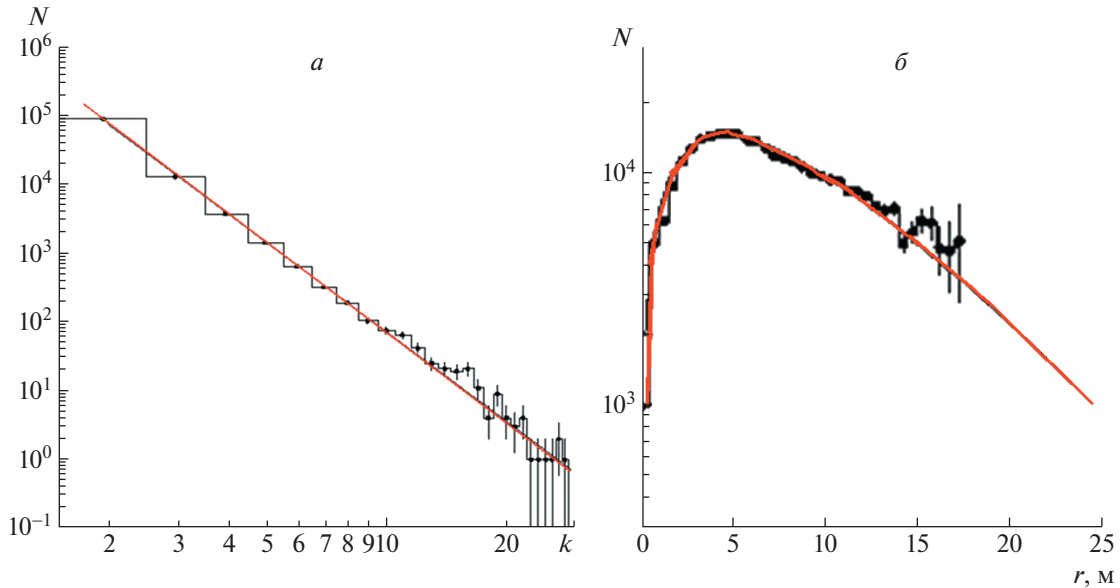


Рис. 1. *а* — Распределение мюонных групп, измеренных LVD, по множественности $N(k)$. Функция, аппроксимирующая распределение, имеет вид $dN/dk = Ak^{-B}$, где $A = 0.148 \times 10^7$, $B = 4.32$. *б* — Распределение мюонных пар по расстоянию между мюонами. Кривая — аппроксимация вида $f(r) = (Ar/r_0^2) \exp(-r/r_0)$, где $A = 4.728 \times 10^4$, $r_0 = 2.61$.

изучен спектральный состав временного ряда интенсивности мюонов с помощью Ломба—Скаргла-анализа. Он свидетельствует о периодичности в 1 год, а также указывает на другие, как более короткие, так и более длительные периоды. Можно заметить, что эта серия не является чистой синусоидальной волной. Поэтому мы впервые охарактеризовали наблюдаемую модуляцию с точки зрения амплитуды и положения максимума и минимума по годам [14].

4. НЕЙТРОННАЯ ФИЗИКА

Размеры и структура детектора LVD, состав его вещества: сцинтиллятора и железа — позволяют с высокой эффективностью регистрировать нейтроны, генерируемые мюонами в установке (рис. 2).

Нейтроны регистрируются по гамма-квантам, испускаемым после радиационного захвата тепловых нейтронов в основном протонами сцинтиллятора ($n + p \rightarrow D + \gamma$) с энергией $E_\gamma = 2.2$ МэВ и временем захвата $\tau \approx 180$ мкс, а также ядрами железа ($n + {}^{56}\text{Fe} \rightarrow {}^{57}\text{Fe} + \Sigma\gamma$) в структуре LVD, $\langle E_\gamma \rangle = 7$ МэВ, $\tau \approx 100$ мкс. Определение числа нейтронов происходит по временному распределению захватных гамма-квантов.

Мы определили такие важные характеристики нейтронов, как выход нейтронов (удельное число нейтронов, генерированных одним мюоном на единице длины пробега мюона) в сцинтилляторе и железе; энергетический спектр нейтронов и их пространственное распределение; сезонные вариации нейтронов.

Выход нейтронов от мюонов был измерен на LVD в сцинтилляторе $Y_n(C_n H_{2n}) = 3.6 \pm \pm 0.01(\text{стат.}) \pm 0.3(\text{сист.}) \times 10^{-4}$ $n/\mu/\text{г}/\text{см}^2$ [15]. Сложным оказалось разделение долей нейтронов, генерированных мюонами в смешанном веществе (сцинтиллятора и железа). Выходы нейтронов в железе и свинце измерялись методом добавления в структуру установки, в пространство между счетчиками, дополнительного вещества [16]. Разработанная методика измерения позволяет измерять выход нейтронов в разных веществах. Ограничением является конструкторская особенность пространства между счетчиками (10 см). Этот недостаток можно компенсировать а) величиной статистики, б) вещество можно добавлять между колоннами и выбрать тогда наклонные мюоны.

Измерение выхода нейтронов в разных веществах согласуется с зависимостью: $Y_n(E_\mu, A) = b_n A^\beta E_\mu^\alpha$, $\alpha = 0.78$, $\beta = 0.95$ [17], где A — атомный номер вещества, E_μ — средняя энергия мюонов на глубине измерений, выраженная в ГэВ, $b_n = 4.4 \times 10^{-7} (\text{г}/\text{см}^2)^{-1}$.

Знание энергетического спектра нейтронов, генерируемых мюонами космических лучей под землей, очень важно при регистрации редких событий. Измерение энергетического спектра нейтронов непосредственно в ливне, созданном мюоном, практически невозможно, однако благодаря большому пробегам нейтроны выходят из ствола ливня и становятся “изолированными”. Поток и спектр таких частиц хорошо измеряется. Впервые эти характеристики были исследованы в 80-х гг. прошлого века с помощью детектора АСД [18] и установки

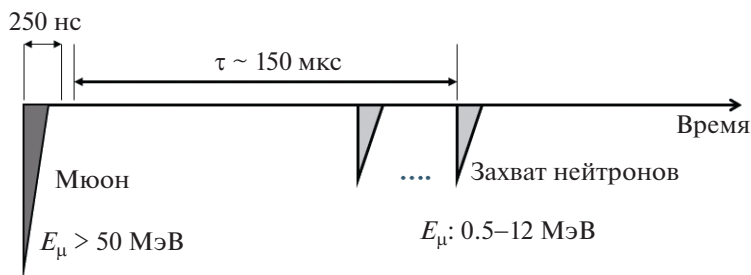


Рис. 2. Схема регистрации нейтронов в LVD.

Бартона [19]. Такие эксперименты важны также для того, чтобы понять, с какими спектрами в источнике рождались нейтроны и как они проходят через различные материалы.

Измерение спектра нейтронов в области 20–150 МэВ и, особенно, при энергиях более 150 МэВ, представляет собой довольно сложную экспериментальную задачу. Энергия нейтрона определяется по энерговыделению протонов отдачи, а также вторичных частиц, рождаемых при взаимодействии нейтрона с ядром углерода. Поэтому для энергий до ~150 МэВ на измерения влияет процесс концентрационного тушения светового выхода от протонов и α -частиц, при энергии выше 150 МэВ основной проблемой становится эффективность регистрации полной энергии нейтрона.

Мы определили дифференциальный энергетический спектр изолированных нейтронов в диапазоне 20–450 МэВ, генерируемых как непосредственно мюонами, так и в em - и h -каскадах, производимых мюонами в веществе детектора LVD. Спектр таких нейтронов имеет двухкомпонентную форму. Форма этих компонент T_n^{-1} и T_n^{-2} с перегибом при энергии $T_n^{cr} \approx 60(A^{0.25} - 0.67)$ МэВ ≈ 100 МэВ [20].

Пространственное поперечное распределение нейтронов измерялось на LVD, используя две разные методики, для исключения краевого эффекта. Один метод ($T1 + T2$) применялся с использованием двух башен LVD и трековой системы (работавшей до 2002 г.). Мюоны, пересекающие башню, восстанавливались по данным трековой системы. Расстояние R_{\perp} вычислялось от центра счетчика, зафиксировавшего нейтрон, до центра ближайшего к нему счетчика из всех сработавших вдоль мюонного трека (рис. 3, черные заполненные точки). Регистрацией нейтрона счетчиком являлось появление на выходе счетчика пары импульсов — триггерного с $E > 5$ МэВ (в основном от протона отдачи np -рассеяния) и γ -кванта 2.2 МэВ от np -захвата во временном окне ~ 1 мс после триггера. С учетом квантинга сцинтиллятора “видимая” энергия протона отдачи 5 МэВ соответствует энергии нейтрона ~ 20 МэВ.

Другой метод ($T1 - CI$) основан на регистрации нейтронов, генерированных мюонами вертикального направления в одной колонне (CI). Этот метод определения расстояния R_{\perp} по дальнему от колонны CI счетчику аналогичен методу “последнего столкновения”, развитому для расчета угловых распределений и потоков быстрых нейтронов, падающих на плоские защиты [21]. В нем предполагается, что направление и энергия рассеянных быстрых нейтронов, проходящих через слой вещества, зависят только от последнего столкновения. В нашем случае в самом удаленном от колонны CI счетчике, выработавшем триггерный импульс, и происходит последнее столкновение, в результате которого нейтрон теряет энергию и изменяет направление своего движения настолько, что не способен проникнуть в следующий, более удаленный от CI счетчик. Результаты измерений приведены на рис. 3 (пустые точки).

График на рис. 3 демонстрирует согласие полученных поперечных распределений, измеренных двумя методами ($T1 + T2$) и ($T1 - CI$), между собой и законом $N(R_{\perp}) \propto R_{\perp}^{-2.3}$ [15] в области $R_{\perp} > 2.0$ м от мюонного трека.

В области расстояний R_{\perp} менее 2 м поперечное распределение имеет максимум вблизи трека мюона и формируется испарительными нейтронами адронных и электромагнитных ливней [15].

За 16 лет работы детектора с 2001 по 2017 гг. были измерены сезонные вариации удельного числа нейтронов, генерированных мюонами [22]. Амплитуда вариаций нейтронов составила 7.7%, что позволило определить вариации энергии атмосферных мюонов под землей [15].

5. ФОН ДЕТЕКТОРА

Еще одной интересной задачей, решаемой на LVD, является исследование низкоэнергетического фона под землей. Изменения этого фона важны для экспериментов по поиску редких событий, например, темной материи и безнейтринного бета-распада.

Ведется постоянный контроль темпа счета на LVD с целью изучения вариации концентрации

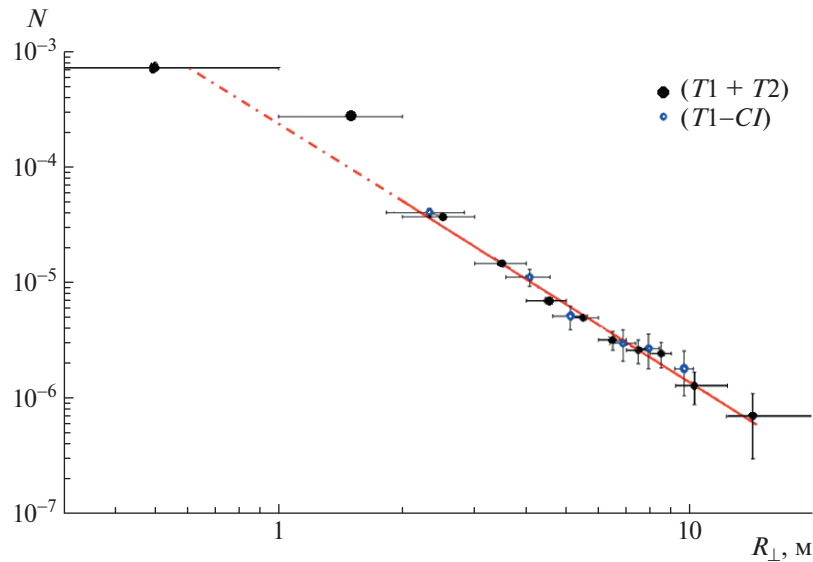


Рис. 3. Пространственно-поперечное распределение нейтронов, измеренное на двух башнях детектора ($T1 + T2$) и на одной башне ($T1 - CI$). Штрихпунктирная линия — закон $R_{\perp}^{-2.3}$, сплошная — диапазон фитирования от 2.0 до 14.5 м.

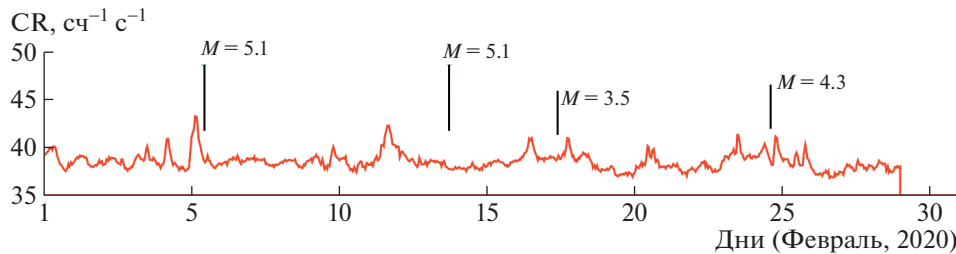
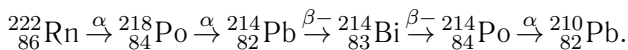


Рис. 4. Скорость счета низкоэнергетических импульсов LVD в феврале 2020 г. Рисками указаны моменты сильных землетрясений в итальянском регионе и в Средиземном море.

радона, выходящего в атмосферу подземного помещения из горных пород перед землетрясениями. Радон образуется в грунте в результате деления и распадов элементов уранового и ториевого рядов и выходит в атмосферу подземного помещения через множественные микротрещины в породе или из воды, насыщающейся радоном (радон хорошо растворяется в воде) на пути через скальную породу до подземного зала. Поскольку количество микротрещин увеличивается при деформациях земной коры перед землетрясениями, то усиливается и испускание радона.

Установка LVD регистрирует гамма-кванты от распадов дочерних ядер радона, период полураспада которого 3.8 сут. Наиболее вероятная цепочка радиоактивных распадов:



Гамма-излучение создается в основном ядрами висмута, за счет бета-распада превращающимися в полоний с характерным временем 19.7 мин. Энергетический спектр гамма-излучения охватывает диапазон от 0.6 до 2.5 МэВ.

В поведении фона были найдены составляющие сезонной вариации (фаза которой приходится на начало сентября), недельные и дневные вариации [23]. Установка LVD может наблюдать выбросы радона, связанные с сейсмической активностью в регионе (рис. 4). Эти исследования могут помочь геофизикам, быть еще одним инструментом для успехов в предсказании разрушительных землетрясений.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня можно подводить итоги 30-летней работы детектора LVD.

В настоящей работе мы кратко описали последние результаты, полученные с помощью многоцелевого детектора LVD. Они охватывают широкий круг проблем подземной физики в области астрофизики и физики космических лучей. Коротко описана методика получения результатов и указаны ссылки на подробные описания измерений.

Статья написана по материалам доклада, сделанного на научной сессии, посвященной юбилею одного из авторов — члена-корреспондента РАН

Ряжской Ольги Георгиевны, состоявшейся 12 мая 2021 г. Ряжская является руководителем эксперимента LVD с российской стороны. Под ее руководством разработан высокопрозрачный сцинтиллятор, построен детектор и получены научные результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. В. Воеводский, В. Л. Дадыкин, О. Г. Ряжская, ПТЭ № 1, 143 (1970).
2. G. Badino *et al.*, Nuovo Cimento **7C**, 573 (1984).
3. G. Bari, M. Basile, G. Bruni, G. Cara Romeo, A. Castelvetti, L. Cifarelli, A. Contin, C. Del Papa, P. Giusti, G. Iacobucci, G. Maccarrone, T. Massam, R. Nania, V. O'Shea, F. Palmonari, E. Perotto, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **277**, 11 (1989).
4. H. A. Bethe and J. R. Wilson, Astrophys. J. **295**, 14 (1985).
5. K. Hirata, T. Kajita, M. Koshiba, M. Nakahata, Y. Oyama, N. Sato, A. Suzuki, M. Takita, Y. Totsuka, T. Kifune, T. Suda, K. Takahashi, T. Tanimori, K. Miyano, M. Yamada, E. W. Beier, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **58**, 1490 (1987); R. M. Bionta, G. Blewitt, C. B. Bratton, D. Casper, A. Ciocio, R. Claus, B. Cortez, M. Crouch, S. T. Dye, S. Errede, G. W. Foster, W. Gajewski, K. S. Ganezer, M. Goldhaber, T. J. Haines, T. W. Jones, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **58**, 1494 (1987); E. N. Alekseev *et al.*, JETP Lett. **45**, 589 (1987).
6. M. Aglietta, G. Badino, G. Bologna, C. Castagnoli, A. Castellina, V. L. Dadykin, W. Fulgione, P. Galeotti, F. F. Kalchukov, B. Kortchaguin, P. V. Kortchaguin, A. S. Malguin, V. G. Ryassny, O. G. Ryazhskaya, O. Saavedra, V. P. Talochkin, *et al.*, Europhys. Lett. **3**, 1315 (1987).
7. R. Diehl *et al.*, Nature **439**, 45 (2006).
8. В. С. Имшенник, Д. К. Надежин, УФН **156**, 561 (1988); В. С. Имшенник, О. Г. Ряжская, Письма в Астрон. журн. **30**, 17 (2004) [Astron. Lett. **30**, 14 (2004)].
9. P. Antonioli, R. T. Fienberg, F. Fleurot, Y. Fukuda, W. Fulgione, A. Habig, J. Heise, A. B. McDonald, C. Mills, T. Namba, L. J. Robinson, K. Scholberg, M. Schwendener, R. W. Sinnott, B. Stacey, Y. Suzuki, *et al.*, New J. Phys. **6**, 114 (2004).
10. M. Aglietta *et al.* (LVD Collab.), Phys. Rev. D **58**, 092005 (1998).
11. Н. Ю. Агафонова, Дис. ... канд. физ.-мат. наук, ИЯИ РАН (Москва, 2015).
12. R. Bernabei, P. Belli, F. Cappella, R. Cerulli, C. J. Dai, A. d'Angelo, H. L. He, A. Incicchitti, H. H. Kuang, X. H. Ma, F. Montecchia, F. Nozzoli, D. Prosperi, X. D. Sheng, and Z. P. Ye, Eur. Phys. J. C **67**, 39 (2010).
13. C. Vigorito (on behalf of the LVD Collab.), in *Proceedings of 35th ICRC, Bexco, Busan, Korea, Jul. 12–20, 2017*.
14. N. Agafonova *et al.* (LVD Collab.), Phys. Rev. D **100**, 062002 (2019).
15. А. С. Мальгин, Дис. ... д-ра физ.-мат. наук, ИЯИ РАН (Москва, 2018).
16. Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, В. Л. Дадыкин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, А. С. Мальгин, В. В. Мануковский, О. Г. Ряжская, В. Г. Рясный, И. Р. Шакирьянова, А. В. Юдин, В. Ф. Якушев (Коллаборация LVD), Изв. РАН. Сер. физ. **79**, 436 (2015) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **79**, 401 (2015)]; N. Agafonova (on behalf of the LVD Collab.), in *Proceedings of the Seventeenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics "Particle Physics at the Year of Light", Moscow, Russia, Aug. 20–26, 2015*, Ed. by A. I. Studenikin (World Sci., Singapore, 2017), p. 374.
17. N. Yu. Agafonova and A. S. Malgin, Phys. Rev. D **87**, 113013 (2013).
18. F. F. Kalchukov *et al.*, in *Proceedings of the XX ICRC, Moscow (1987)*, Vol. 2, p. 266.
19. J. C. Barton, in *Proceedings of the XIX ICRC, San Diego (1985)*, Vol. 8, p. 98.
20. А. С. Мальгин, ЖЭТФ **152**, 863 (2017) [JETP **125**, 728 (2017)].
21. Т. А. Гермогенова, С. Ф. Дегтярев, В. В. Орлов, А. П. Суворов, В. К. Тихонов, С. Г. Ципин, *Перенос быстрых нейтронов в плоских защитах* (Атомиздат, Москва, 1971).
22. Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, А. С. Мальгин, О. Г. Ряжская, И. Р. Шакирьянова, В. Ф. Якушев (от имени Коллаборации LVD), ЯФ **81**, 85 (2018) [Phys. At. Nucl. **81**, 95 (2018)].
23. Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, А. С. Мальгин, К. Р. Рудаков, О. Г. Ряжская, И. Р. Шакирьянова, В. Ф. Якушев и коллаборация LVD, Изв. РАН. Сер. физ. **83**, 673 (2019) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **83**, 614 (2019)].

LVD IS A MULTIPURPOSE RUSSIAN-ITALIAN DETECTOR

N. Yu. Agafonova¹⁾, **O. G. Ryazhskaya**¹⁾

on behalf of the LVD Collaboration

¹⁾ *Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Selected results from the multipurpose Large Volume Detector (LVD) are presented. Research is being carried out under the program of continuous search for neutrinos from supernova explosions in our galaxy, muon and neutron physics. The LVD facility is currently the largest scintillation detector with unique capabilities for research in the field of underground physics.