

Анализ сезонных вариаций потока космических мюонов в детекторе LVD за период 2001 - 2008 гг.

Н.Ю. Агафонова, В.В. Бояркин, В.Л. Дадыкин, Е.А. Добрынина,
Р.И. Еникеев, Г.Т. Зацепин, А.С. Мальгин, О.Г. Ряжская, В.Г.
Рясный, И.Р. Шакирьянова¹, В.Ф. Якушев

Учреждение Российской академии наук Институт ядерных исследований РАН

¹ kaloraster@gmail.com

Аннотация

Российско-итальянский детектор большого объема LVD, расположенный в подземном помещении лаборатории Гран Сассо на глубине 3300 м.в.э., является крупнейшим в мире сцинтилляционно – железным подземным нейтринным телескопом. В 2009 году были проанализированы все данные, полученные за период с января 2001 по декабрь 2008 года для изучения сезонных вариаций интенсивности мюонов. В результате было найдено, что период вариаций составляет один год, максимум интенсивности приходится на июль, что находится в согласии с теоретическими представлениями.

Введение

Российско-итальянский детектор большого объема LVD – это уникальная многоцелевая установка, предоставляющая возможность проведения экспериментов по широкому кругу проблем подземной физики. Основная цель эксперимента - изучение нейтринного излучения от коллапсирующих звезд [1]. Работая в режиме накопления данных с 1992 года, детектор достиг своей окончательной конфигурации к концу 2000 года.

LVD является также хорошим инструментом для изучения мюонов как космических лучей (E_{μ} на поверхности > 1.3 ТэВ) [2], так и мюонов искусственного происхождения.

Мюоны, регистрируемые под землей, образуются главным образом при распаде π - и K -мезонов, являющихся продуктами взаимодействий первичных космических лучей с ядрами атмосферы. Существует положительная корреляция между интенсивностью мюонов и температурой атмосферы: чем выше температура, тем выше поток мюонов под землей [3],[4]. Зависимость потока мюонов от температуры атмосферы можно представить в виде:

$$\frac{\Delta I_{\mu}}{I_{\mu}^0} = \int_0^{\infty} dX \alpha(X) \frac{\Delta T(X)}{T(X)} \quad (1)$$

где $I_{\mu}^0 = I_{\mu}(T_0, E > E_{thr})$ - интегральная интенсивность мюонов выше пороговой энергии $E_{thr} \sim 1,3$ ТэВ при предположении, что температура атмосферы постоянна и равна T_0 . ΔI_{μ} - изменения интенсивности I_{μ} , $\alpha(X)$ - температурный коэффициент, который связывает изменение температуры в атмосфере с флуктуациями интегральной мюонной плотности в зависимости от глубины X . Интеграл берется по всей глубине атмосферы, начиная с высоты начала генерации мюонов и заканчивая уровнем моря. Для больших глубин существует положительная корреляция между подземной мюонной плотностью и температурой атмосферы (чем выше температура, тем выше поток мюонов под землей), потому что при увеличении температуры также увеличивается плотность воздуха, и происходит большее количество распадов пионов и каонов до их взаимодействия. В северном полушарии максимум мюонного потока приходится на июль, минимум – на январь.

Этот эффект ранее был измерен в таких подземных экспериментах, как MACRO[5], AMANDA[6] и MINOS[7]. Однако их данные были получены только за 4, 1 и 3 года соответственно. В настоящей работе были изучены сезонные вариации за 8 лет работы LVD с 2001 по 2008 гг.

1 Описание детектора

Детектор LVD состоит из 840 счетчиков, содержащих 960 тонн сцинтиллятора. 8 счетчиков объединены в модули, 35 модулей (5 колонн и 7 уровней) представляют из себя башню, в целом детектор состоит из 3 башен (рис. 1). Активный объем составляет $13 \times 23 \times 10 \text{ м}^3$.

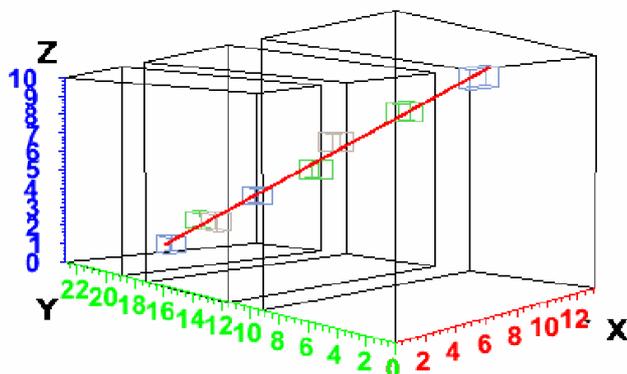


Рис. 1. Схематический вид детектора LVD.

Каждый счетчик ($1 \times 1 \times 1,5 \text{ м}^3$), изготовлен из нержавеющей стали и содержит около 1,2 тонны жидкого сцинтиллятора на основе уайт-спирита (C_nH_{2n} , где $n=9,6$) [8], и просматривается тремя фотоумножителями российского производства ФЭУ-49Б и ФЭУ-125. Запись информации осуществляется при пороговой энергии 4 МэВ. Сумма сигналов с фотоумножителей посылается на TDC-ADC (time digital converter и amplitude digital converter) модуль, записывающий эту энергию с разрешением $\sigma_E / E = 7\% + 23\% / \sqrt{E}$ и относительным временем события с точностью до 12,5 нсек. Абсолютное время каждого события обеспечивается благодаря синхронизации подземных часов с главными часами GPS во внешней лаборатории, общая точность 100 нсек.

Система DAQ подразделяет набранные события на раны, которые запускаются либо через каждые 12 часов, либо при условии изменения конфигурации установки (например, если происходит ремонт модуля или башни).

3 Анализ данных

В 2009 году были проанализированы все имеющиеся данные, полученные на детекторе LVD с января 2001 по декабрь 2008 года. Общее живое время - 2907 дней, т.е. 99,5 % от 8 лет.

Мюон в детекторе LVD пересекает несколько счетчиков и выделяет от 10 до нескольких сотен МэВ в каждом из них (наиболее вероятное энерговыделение в каждом счетчике 170 МэВ), разница во времени срабатывания счетчиков не более 250 нс (рис. 1).

В «сырых» данных, для каждого события записывается информация о числе пересекаемых счетчиков N_s , их времени срабатывания t_i и энерговыделении E_i . Каждое событие, отобранное как «кандидат на мюон» имеет не менее 2 сработавших счетчиков с энерговыделением $E_i > 10 \text{ МэВ}$ и временной разницей $\Delta t < 250 \text{ нс}$.

Заметим, что события отбирались так, чтобы имелся хотя бы один мюонный трек. Поэтому отобранные события, помимо одиночных мюонов, включают в себя также и множественные мюоны, и мюоны, сопровождающиеся электро-магнитным или адронным каскадом. Учитывая структуру детектора, возможно реконструировать события с разных направлений, включая горизонтальные треки. Угол обзора в верхнем полушарии $\Omega = 2\pi$.

Так как конфигурация установки может меняться от рана к рану по количеству и расположению активных счетчиков, и так как норма регистрируемых мюонов зависит от количества активных счетчиков, был проведен анализ методом Монте-Карло, в котором учитывалась эффективность детектора в определении мюонов. Геометрия детектора LVD детально описана в программе GEANT4 [9]. Распределение энергий мюона и направление прихода генерировалось согласно коду MUSUN [10], разработанного для грунта Гран Сассо. Отбор мюонов происходил в окружности, ортогональной к выбранному направлению и проходящей через детектор LVD: запоминалась информация о количестве пересекаемых мюоном счетчиков совместно с выделенной в них энергией и временем срабатывания каждого счетчика. Затем был проведен тот же отбор, что и с реальными данными.

Во всех сцинтилляционных счетчиках, рассматриваемых как активные, определяется геометрический фактор (средний по всем направлениям прихода мюонов в LNGS) $A=(298 \pm 3) \text{ м}^2$, в ошибке 1% преобладают систематические ошибки, допускаемые кодом MUSUN при определении направления мюона. Так как количество и расположение счетчиков, которые не участвуют в мюонном событии, меняется от рана к рану, было разыграно по 10^5 мюонов для каждого рана, выводя из анализа методом Монте-Карло счетчики, имеющие высокий темп счета или выключенные. Была вычислена эффективность детектирования мюонов η , определяемая как соотношение между числом зарегистрированных мюонов в каждой конфигурации к полному числу разыгранных мюонов.

Последняя стадия отбора мюонных данных заключалась в отсеивании из анализа событий, для которых продолжительность ранов составила менее 1 часа, или $\eta < 0,5$, или более чем в 10 счетчиках было неправильно определено время. Эти события далее не анализировались. Их доля $\sim 7\%$.

Живое время составило 2724 дня. Средний темп счета мюонов в день около 8000 ($\sim 0.1 \text{ Hz}$). Полное число отобранных мюонов за 2001 – 2008 года равно 21.5 миллионам.

4 Сезонные вариации мюонов

Интенсивность мюонов за период с 2001 по 2008 показана на рис. 2. Интенсивность определялась, как

$$I_{\mu} = \frac{N_{\mu}}{A \cdot \eta_i \cdot t_i}, \quad (2)$$

где A - геометрический фактор, η_i и t_i - эффективность и время наблюдения. При фитировании распределения функций

$$I_{\mu} = I_0^{\mu} + \delta I^{\mu} \cos\left(\frac{2\pi}{T}(t - t_0)\right), \quad (3)$$

была получена средняя интенсивность $I_0^{\mu} = (3.31 \pm 0.03) \cdot 10^{-4} (\text{м}^2\text{с})^{-1}$ и период модуляции $T = 367 \pm 15$ дней, сходный с одним годом.

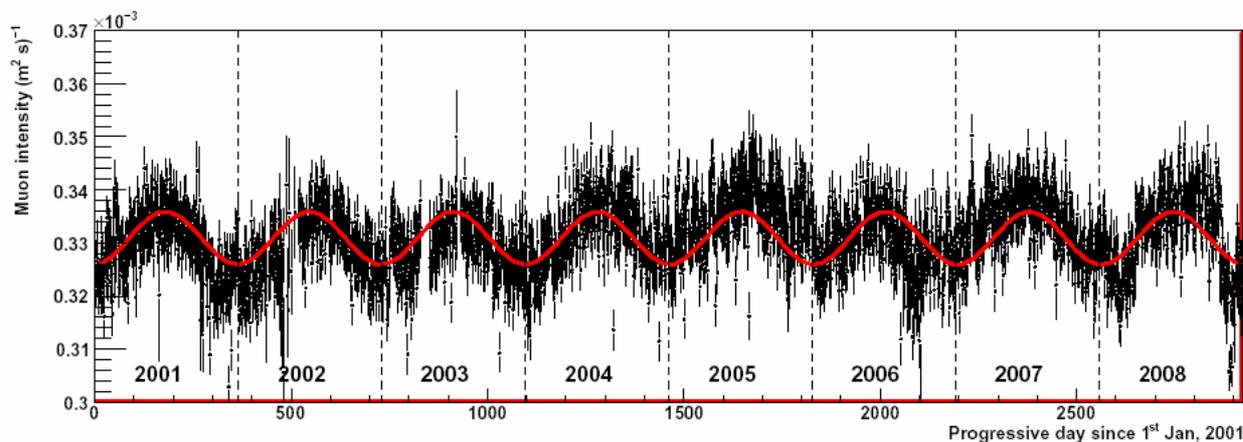


Рис. 2. Интенсивность мюонов за 8 лет работы установки LVD. Каждый бин соответствует одному дню, начиная с 1 января 2001 года по 31 декабря 2008. Приведенные ошибки – статистические. Кривая – фит данных по формуле (3).

Амплитуду модуляции I_0^{μ} и фазу t_0 с лучшей точностью можно получить при использовании метода «наложения эпох» восьми лет наблюдения на один год (рис.3). При фитировании данных снова уравнением (3) для фиксированного $T=1$, было получено $\delta I^{\mu} = (5.0 \pm 0.2) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2\text{с}^{-1}$, равное 1.5 %. Полученная фаза $t_0 = 185 \pm 15$ дней соответствует интенсивности, максимум которой приходится на июль, минимум - на начало января. Статистическая значимость полученной модуляции в области максимального отклонения превосходит среднее значение интенсивности более чем на 5σ .

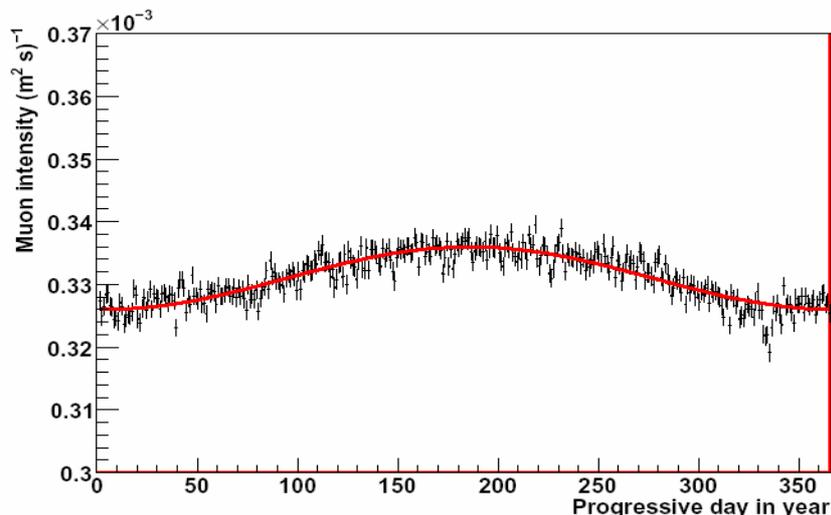


Рис. 3. Средняя дневная интенсивность за год («наложение эпох» за 8 лет набора данных).

Заключение

Проанализировано $2,5 \times 10^6$ мюонных событий, зарегистрированных детектором LVD за 2724 дня в течение 2001-2008 гг., для поиска сезонных вариаций в потоке мюонов от космических лучей ($E_\mu > 1.3$ ТэВ).

Среднее значение потока «мюонных событий» за 8 лет проанализированных данных составило $I_0^\mu = (3.31 \pm 0.03) \cdot 10^{-4} (\text{m}^2 \text{s})^{-1}$, что находится в хорошем согласии с предыдущими измерениями LNGS [2]. Основными являются систематические ошибки при определении геометрического фактора (1%), наряду с тем, что статистическая ошибка невелика (0,02%).

Вариации очевидны, период составляет 1 год, средняя амплитуда 1,5%. Максимум мюонной интенсивности в среднем приходится на июль, минимум – на январь. Статистическая значимость полученной модуляции в области максимального отклонения превосходит среднее значение интенсивности более чем на 5σ .

Заметим, что эти вариации мюонов необходимо учитывать при поиске редких процессов, таких как регистрация темной материи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 09-02-00300_а, НШ 3517.2010.2) и программы Президиума РАН «Нейтринная физика. Коллапс» 13-05-01.

Список литературы

- [1] M. Aglietta et al. (LVD collaboration). The most powerful scintillator supernovae detector : LVD. // II Nuovo Cimento. 1992. V. A105. P. 1793
- [2] M. Aglietta et al. (LVD collaboration). Muon Depth-Intensity Relation Measured by LVD Underground Experiment and Cosmic-Ray Muon Spectrum at Sea Level. // Phys. Rev. 1998. V. D 58. P. 92005.
- [3] L. Dorman. Cosmic ray variation. // State Publishing House. Moscow. 1957.
- [4] P. H. Barrett et al. Interpretation of cosmic-ray measurements far underground. // Rev. Mod. Phys. 1952. V. 24. P. 133.
- [5] M. Ambrosio et al. (MACRO collaboration). Seasonal variations in the underground muon intensity as seen by MACRO. // Astrop.Phys. 1997. V. 24. P. 109.
- [6] A. Bouchta et al. (AMANDA collaboration). Seasonal variation of the muon flux seen by AMANDA. // Proceedings of the ICRC99. HE.3.2.11
- [7] E. W. Grashorn et al. (MINOS collaboration). Observation of seasonal variations with the MINOS far detector. // Proceedings of the ICRC07. (arXiv: 0710.1616)
- [8] А.В. Воеводский, В.Л. Дадыкин, О.Г. Рязжская. Жидкие сцинтилляторы для больших сцинтилляционных счетчиков. // ПТЭ. 1970. V. 1. P. 85
- [9] S. Agostinelli et al. (GEANT4 Collaboration). GEANT4 – a simulation toolkit. // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. 2003. V. A506. P. 250.
- [10] V. Kudryavtsev. Muon simulation codes MUSIC and MUSUN for underground physics. // Comput. Phys. Commun. 2009. V. 180. P.339. (arXiv: 0810.4635)