

УДК 539.126.33:539.125.5

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ НЕЙТРОНОВ ОТ МЮОНОВ ОКОЛОГОРИЗОНТАЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ

© 2021 г. Н. Ю. Агафонова^{1, *}, В. В. Ашихмин¹, Е. А. Добрынина¹, Р. И. Еникеев¹,
А. С. Мальгин¹, О. Г. Рязская¹, И. Р. Шакирьянова¹, В. Ф. Якушев¹ и коллаборация LVD

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: Agafonova@inr.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Проведен анализ мюонов, пересекающих детектор LVD в горизонтальном направлении за 15 лет работы установки. Горизонтальные мюоны проходят в грунте около 5 км в. э., пороговая энергия для них составляет 4.7 ТэВ. Энергетические характеристики LVD позволяют регистрировать нейтроны, образуемые мюонами в веществе детектора. Большая статистика обуславливает высокую точность определения сезонных вариаций числа нейтронов. Для установления удельного числа нейтронов использовались временные распределения импульсов с энерговыделением от 1 до 12 МэВ во временном интервале 150–650 мкс после пересечения мюоном установки.

DOI: 10.31857/S0367676521040037

ВВЕДЕНИЕ

Причина сезонных вариаций мюонов на уровне моря и под землей известна [1–3]. Это температурный эффект, приводящий к изменению плотности земной атмосферы и, соответственно ее высоты, в результате нагрева летом и остывания зимой. Уменьшение плотности верхних слоев атмосферы за счет расширения при нагреве приводит, с одной стороны, к увеличению вероятности распадов $\pi \rightarrow \mu$ заряженных пионов первых поколений и соответственному уменьшению числа пионов (и числа их $\pi \rightarrow \mu$ распадов) в последних поколениях. С другой стороны, летнее расширение атмосферы увеличивает вероятность $\mu \rightarrow e$ распадов на пути к земле мюонов с меньшими энергиями [2] (отрицательный температурный эффект – снижение летом интенсивности мюонов на уровне моря, где средняя энергия мюонов около 4 ТэВ). Увеличение вероятности $\pi \rightarrow \mu$ распадов – дает положительный температурный эффект для мюонов высоких энергий, обнаруженный в [3] на глубине 1 км в. э.

Наблюдаемые вариации мюонов определяются суммарным действием отрицательного и положительного эффектов. Отрицательное слагаемое доминирует до ~20 м в. э. С увеличением глубины его вклад падает и, начиная с ~200 м в. э. ($\bar{E}_\mu \sim 35$ ТэВ), в вариациях остается положительный температурный эффект. Глубин больше 2 км в. э. могут достичь мюоны с энергией выше 1 ТэВ, которые

образуются при энергиях pA – взаимодействия протонов первичного космического излучения порядка 10 ТэВ и выше [4].

Целью работы является получение удельного числа нейтронов для мюонов разных направлений, обладающих различными средними энергиями.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОД АНАЛИЗА МЮОНОВ

Детектор LVD в полной своей конфигурации (3 башни размером $10 \times 6 \times 12$ м³ каждая) работает с 2001 года в подземной Лаборатории Гран Сассо, Италия [5]. Средняя толщина грунта над установкой 3650 м в. э., интенсивность регистрируемых мюонов 3.35 ± 0.0005 (стат.) $\pm \pm 0.03$ (сист.) $\times 10^{-4}$ м⁻² с⁻¹ [6], средняя энергия $\langle E \rangle \sim 280$ ТэВ. Основной элемент детектора – 1.5 м³ сцинтилляционный счетчик. Счетчики сгруппированы в башни по 280 штук: 5 колонн, 7 уровней.

Сезонные вариации потока мюонов со средней энергией 280 ТэВ были изучены в период с 1992 по 2018, определены амплитуда и фаза вариаций интенсивности мюонов и установлена их связь с изменением эффективной температуры в верхних слоях атмосферы [6].

Модульная структура детектора позволяет выделять мюоны вертикального и горизонтального направлений, используя расположение счетчи-

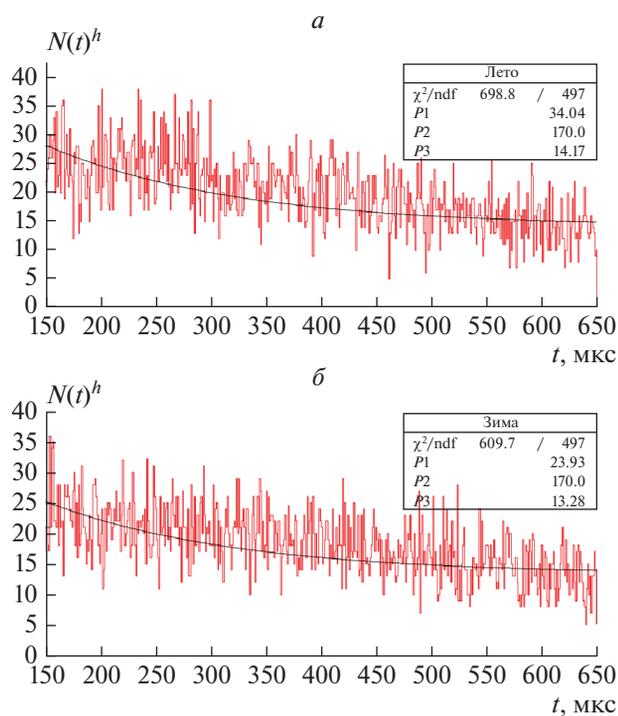


Рис. 1. Временные распределения гамма-квантов от захватов нейтронов в веществе детектора для горизонтального потока мюонов в летнее (верхняя панель) и зимнее (нижняя панель) время. Кривая – аппроксимация данных законом $f(t) = P1 \exp(-t/P2) + P3$.

ков. При установлении характеристик потока горизонтальных и вертикальных мюонов использовался мюонный годоскоп из двух счетчиков или метод “равного акцептанса”, который заключается в отборе мюонов парами счетчиков [6]. Для мюонов окологоризонтального направления ($65^\circ\text{--}90^\circ$) средняя глубина грунта составляла $\langle H \rangle^h \sim 5$ км в. э., средняя энергия мюонов $\langle E \rangle^h \sim 340$ ГэВ. Для околовертикальных мюонов ($0^\circ\text{--}30^\circ$) – $\langle H \rangle^v \sim 3.3$ км в. э., $\langle E \rangle^v \sim 260$ ГэВ.

Методом независимых простых годоскопов были определены амплитуда сезонных вариаций для потоков горизонтальных и вертикальных мюонов: $(1.7 \pm 0.3)\%$ и $(1.0 \pm 0.2)\%$, соответственно [7].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЙТРОНОВ, ОБРАЗУЕМЫХ МЮОНАМИ

Процессы, приводящие к образованию нейтронов мюонами, достаточно хорошо исследованы. Как правило, они представляют собой развитие в веществе адронных и электромагнитных ливней, инициируемых мюонами высокой энергии. Вследствие высокой энергии (до ~ 1 ГэВ) нейтроны обладают большими пробегами, а соответствующее увеличение толщины защиты экспериментов приво-

дит к возрастанию вероятности образования в ней нейтронов.

Для учета фона в подземных экспериментах по поиску редких событий и его минимизации необходимо знать характеристики потока нейтронов: величину удельного числа нейтронов от мюонов (выхода) в зависимости от вещества и энергии мюонов, энергетический спектр, пространственное распределение нейтронов и временную зависимость их потока.

В работе [8] за 18 лет работы детектора было определено число нейтронов, рожденных мюонами (удельное число нейтронов) в летние и зимние месяцы. Для измерений удельного числа нейтронов использовались временные распределения нейтроноподобных импульсов с энергосъемлением от 1 до 12 МэВ во временном интервале 50–550 мкс после мюонного триггера. “Разностный метод” анализа заключался в определении удельного числа нейтронов за $18 \times 3 = 54$ -летних (июнь, июль, август) и 54 зимних (декабрь, январь, февраль) месяцев. Временные распределения аппроксимировались законом $N_n(t) = N_0 \exp(-t/\tau) + B$, где $\tau = 170$ мкс – экспонента захвата термализованного нейтрона в сцинтилляторе, B – константа, зависящая от фоновых условий счетчика, $N_0\tau$ – полное число нейтронов.

Для полного потока мюонов разностным методом получено, что удельное число нейтронов в летние месяцы составляет $N_n/N_n(s)^l = 5.98 \cdot 10^{-3}$, зимой – $N_n/N_n(s)^w = 5.12 \cdot 10^{-3}$. Амплитуда вариаций составила: $(\delta N_n/N_n)^l = (7.7 \pm 0.2)$ (стат.) ± 1.6 (сист.)% [8]. Методом “наложения эпох” – аппроксимацией данных функцией $f(t) = 1 + (\delta N_n/N_n) \cos[2\pi(t - \phi)/T]$, была получена амплитуда $(\delta N_n/N_n) = (7.7 \pm 0.8)\%$ и фаза $\phi' \sim 7.0 \pm 0.4$ (стат.) ± 0.5 (сист.), которая соответствует июлю.

Мы применили разностный метод для определения удельного числа нейтронов для мюонов горизонтального направления. Для отобранных окологоризонтальных мюонов за 15 лет статистики было получено, что удельное число нейтронов в расчете на счетчик составляет летом $N_n/N_n(s)^h = 5780/319450 = 0.0181$, зимой – $N_n/N_n(s)^w = 4080/307294 = 0.0133$. На рис. 1 приведены временные распределения нейтронов для летних и зимних месяцев наблюдений. Для аппроксимации выбирался временной интервал 150–650 мкс, поскольку исключались импульсы, на которые действовал эффект засветки от большого триггерного импульса [8]. Получено, что величина вариаций удельного числа нейтронов для горизонтальных мюонов составляет $(\delta N_n/N_n)^h = (15 \pm 3)\%$.

Как было показано в [9] амплитуды вариаций, определяемые разностным методом, в отличие от метода наложения эпох, являются усредненными

по трем месяцам. Отличие получаемых амплитуд не превышает погрешностей их определения. Используемые методы исключают вариации фона, которые также имеют сезонный характер с относительной амплитудой $\sim 4\%$ и фазой в начале августа $\varphi = 8.1 \pm 0.4$ мес. [10].

Полученная величина $(\delta N_n / N_n)^h = (15 \pm 3)\%$ примерно в 2 раза больше, чем вариация удельного числа нейтронов для полного потока мюонов. Эта величина носит оценочный характер, требует увеличения статистики и исследования систематических ошибок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первые публикации результатов эксперимента DAMA [11] дали начало интенсивному обсуждению связи годовых вариаций темпа счета событий, наблюдаемых в экспериментах по поиску частиц темной материи, с сезонными вариациями потока мюонов под землей [12–14]. Вариации интенсивности мюонов на больших глубинах рассматриваются как возможный источник годовых модуляций числа событий в низкофоновых подземных детекторах. Предполагается, что в этих модуляциях существенную роль играют космогенные нейтроны, поток которых ставится в прямую зависимость от вариаций потока мюонов.

В нашей работе получено, что вариации числа нейтронов, генерированных мюонами, превышают вариации интенсивности мюонов более чем в 5 раз. Принимая во внимание, что поперечное распределение нейтронов на расстоянии больше 2 м от мюонного трека описывается зависимостью $R_{\perp}^{-2.3}$ [4], количественные оценки влияния нейтронного фона на измерения редких событий

необходимо уточнять в расчетах для подземных экспериментов.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-02-00064-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barrett P.H., Bollinger L. Cocconi M. et al. // Rev. Mod. Phys. 1952. V. 24. P. 133.
2. Blackett P.M.S. // Phys. Rev. 1938. V. 54. P. 973.
3. Forró M. // Phys. Rev. 1947. V. 72. P. 868.
4. Мальгин А.С. Космогенные нейтроны в низкофоновых подземных экспериментах. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. М.: ИЯИ РАН, 2018. 193 с.
5. Agafonova N.Yu., Aglietta M., Antonioli P. et al. // Astropart. Phys. 2008. V. 28. P. 516.
6. Agafonova N.Yu., Aglietta M., Antonioli P. et al. // Phys. Rev. D. 2019. V. 100. Art. No. 062002.
7. Агафонова Н.Ю., Ашихмин В.В., Добрынина Е.А. и др. // Яд. физ. 2020. Т. 83. № 1. С. 70; Agafonova N.Yu., Ashikhmin V.V., Dobrynina E.A. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2020. V. 83. No. 1. P. 69.
8. Persiani R. Measurement of the muon-induced neutron flux at LNGS with the LVD experiment. PhD thesis. Bologna: Universita degli studi di Bologna, 2011. 135 p.
9. Agafonova N.Yu. on behalf of the LVD Collaboration // arXiv: 1701.04620. 2017.
10. Агафонова Н.Ю., Ашихмин В.В., Дадькин В.Л. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 4. С. 551; Agafonova N.Yu., Ashikhmin V.V., Dadykin V.L. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 4. P. 512.
11. Bernabei R., Belli P., Cappella F. et al. // Eur. Phys. J. C. 2008. V. 56. P. 333.
12. Blum K. // arXiv: 1110.0857. 2011.
13. Bernabei R., Belli P., Cappella F. et al. // Eur. Phys. J. C. 2014. V. 74. P. 3196.
14. Davis J.H. // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 113. Art. No. 081302.

Measurement of seasonal variations of neutrons from near horizontal muons

N. Yu. Agafonova^{a,*}, V. V. Ashikhmin^a, E. A. Dobrynina^a, R. I. Enikeev^a, A. S. Malgin^a,
O. G. Ryazhskaya^a, I. R. Shakyrianova^a, V. F. Yakushev^a and LVD Collaboration

^aInstitute for Nuclear Research of RAS, Moscow, 117312 Russia

*e-mail: Agafonova@inr.ru

The analysis of muons crossing the LVD in the horizontal direction over 15 years of the detector operation is carried out. Horizontal muons pass through the depth about 5 km w. e., the threshold energy for them is 4.7 TeV. The energy characteristics of the LVD make it possible to detect neutrons produced by muons in the detector matter. The large statistics determine the high accuracy of determining the seasonal variations in the neutrons number. To establish the specific neutrons number, the time distributions of pulses with an energy release from 1 to 12 MeV were used in the time interval 150–650 μ s after the muon crossed the setup.