

Измерение сезонных вариаций нейтронов от мюонов окологоризонтального направления

Н.Ю. Агафонова, В.В. Ашихмин, Е.А. Добрынина, Р.И. Еникеев,
А.С. Мальгин†, О.Г. Рязская О.Г., И.Р. Шакирьянова, В.Ф. Якушев
от имени коллаборации LVD.

Сезонные вариации мюонов

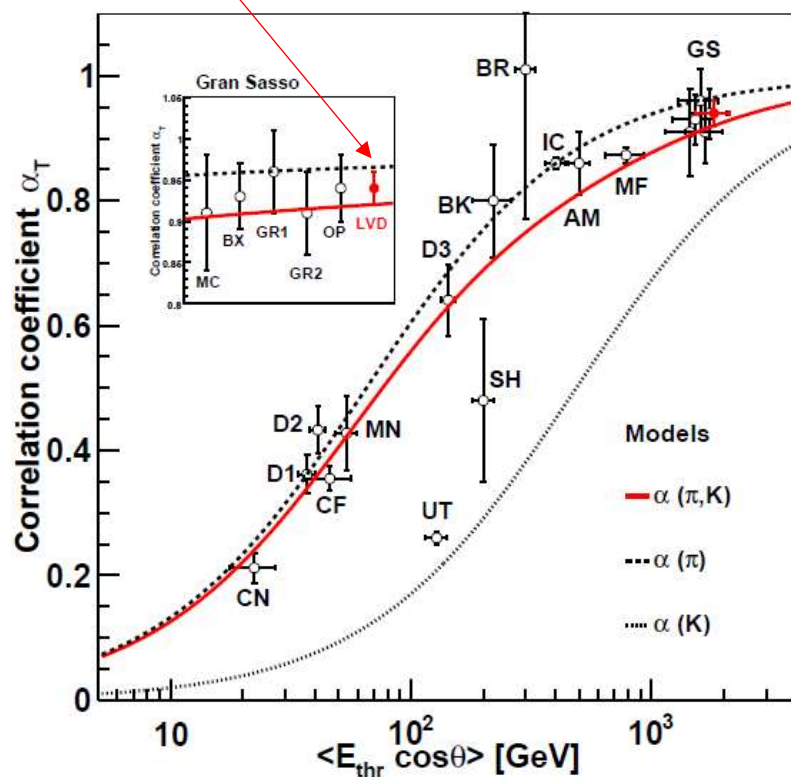
- Причиной сезонных вариаций мюонов является положительный температурный эффект, приводящий к изменению плотности атмосферы и ее высоты в результате нагрева летом и остывания зимой.
- Мюоны, регистрируемые в подземных лабораториях, продуцируются главным образом при распаде пионов и каонов, генерируемых во время взаимодействий первичных космических лучей с верхними слоями атмосферы.
- IceCube, Daya Bay, Double Chooz, Amanda, MINOS, а также детекторы Лаборатории Гран Сассо - Gerda, MACRO, LVD, OPERA, изучали данный эффект.

Температурный эффект

Для мюонов больших энергий (~ 280 ГэВ), которые мы регистрируем под землей, наблюдается положительный температурный эффект.

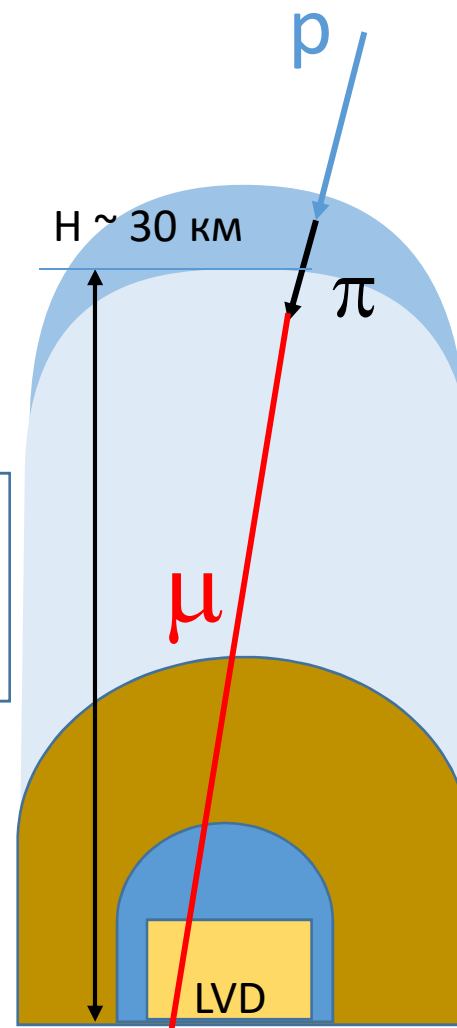
Это связано с тем, что больших глубин достигают, главным образом, мюоны от распадов пионов первого поколения генерации, число которых (распадов) увеличивается при расширении атмосферы и падении ее плотности в верхних слоях (на высоте ~ 30 км).

$$\alpha_T = 0.93 \pm 0.02$$



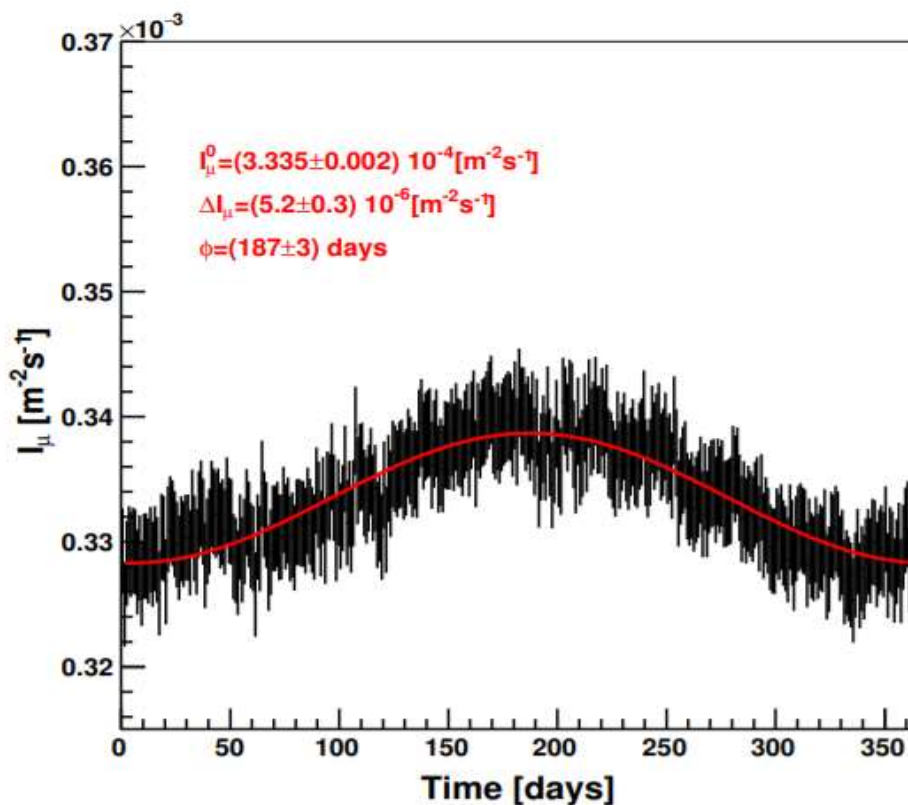
Связь изменения
интенсивности мюонов с
изменением температурного
коэффициента

$$\Delta I_\mu / I_\mu^0 = \alpha_T \frac{\Delta T_{eff}}{T_{eff}^0}$$



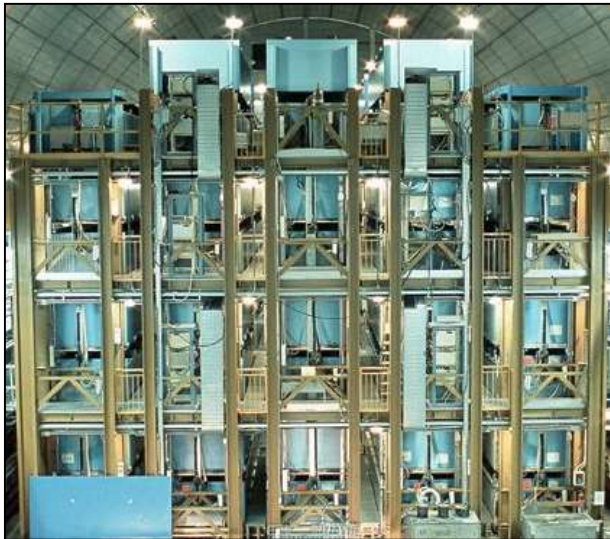
Сезонные вариации мюонов

- Результат на самой высокой статистике ($5,5 \cdot 10^7$ мюонов) был получен детектором LVD – за 25 лет работы (с 1992 по 2016 г.)

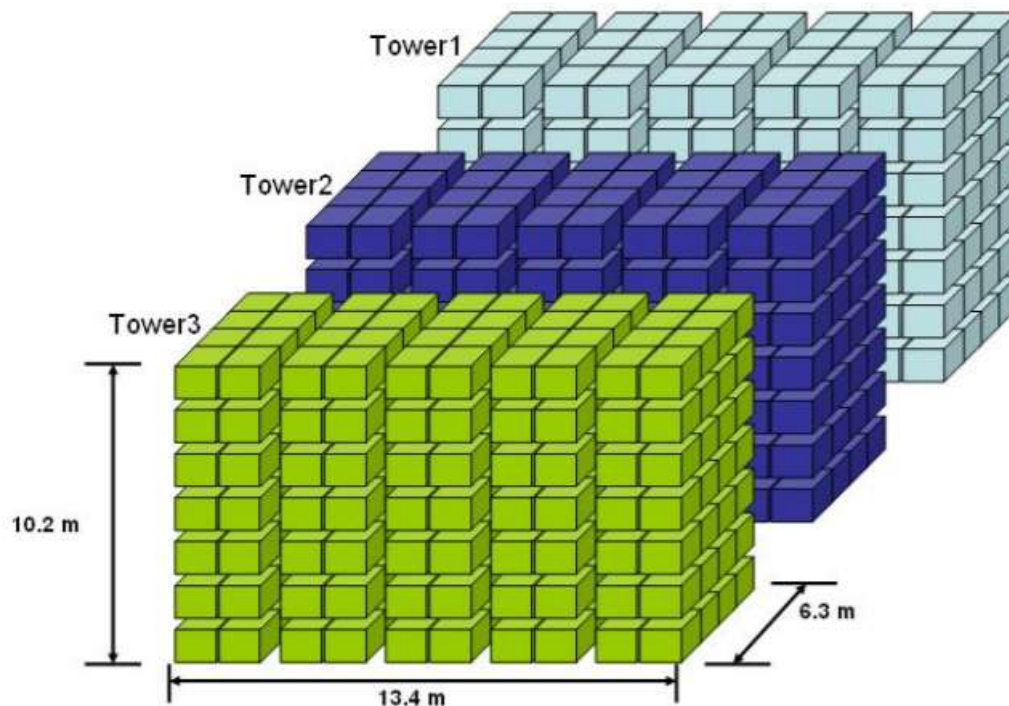
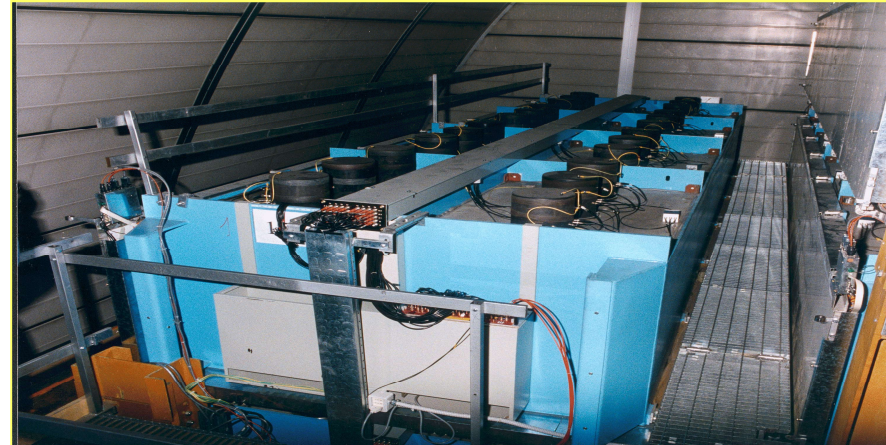


$\delta I_\mu \sim 1.5 \%$

C. Vigorito on behalf the LVD collaboration, Underground flux of atmospheric muons and its variations with 25 years of data of the LVD experiment, Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference, July 12-20, Bexco, Busan, Korea (2017).



LVD



Детектор состоит из 3 башен, разделенных коридорами шириной 2 м, по 5 колонн в каждой. Масса железа и сцинтиллятора в установке составляет по 1 кт.

LVD состоит из 840 сцинтилляционных счетчиков, которые представляют собой контейнеры из нержавеющей стали размерами $100 \times 100 \times 150 \text{ см}^3$, заполненные жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита

Отбор мюонных событий

Большая часть горизонтальных мюонов в детекторе проходит из долины Терамо (с юго-востока). Это направление соответствует небольшим глубинам грунта (Н около 5 км в.э.), но большим азимутальным углам $\langle\theta\rangle = 65 - 90^\circ$.

При установлении характеристик потока горизонтальных и вертикальных мюонов использовался мюонный годоскоп из двух счетчиков или метод «равного аксептанса», который заключается в отборе мюонов парами счетчиков.

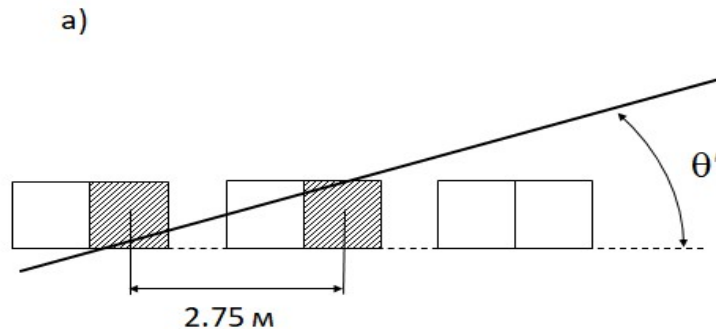
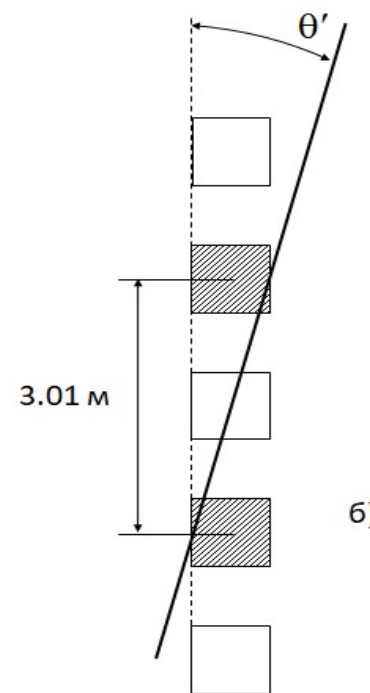


Схема годоскопов из двух счетчиков
а) для горизонтального направления,
б) для вертикального направления.



б) Метод равного аксептанса позволяет избежать расчета аксептанса детектора в целом и использовать постоянный аксептанс элементарного годоскопа. Максимальное число пар счетчиков в трех башнях детектора могло быть 672 и 600, для горизонтального и вертикального потока мюонов, соответственно.

Отбор мюонных событий

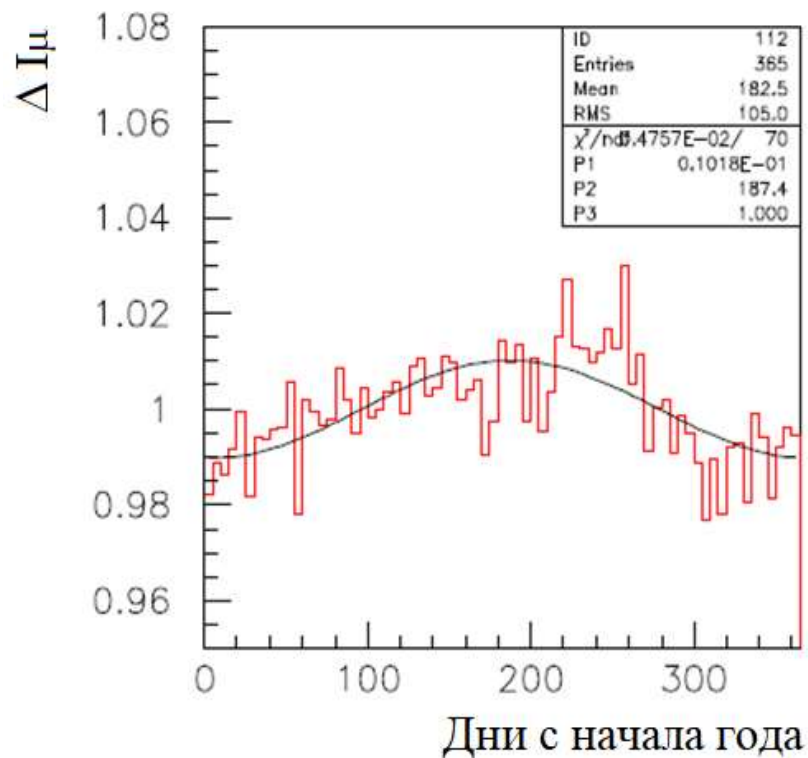
- «Хорошими» считались счетчики, вариации темпа счета которых не превышали 10%.
- Энерговыделение мюона в счетчике пары должно было превышать 50 МэВ.
- Мюонным считалось событие, когда срабатывали 2 и более счетчиков во временном диапазоне 250 нс.
- Среднее энерговыделение мюона в одном счетчике составляет около 175 МэВ, которое соответствует длине ~ 1 м прохождения мюона.
- Число отобранных мюонных событий за месяц приводилось в расчете на пару в сутки.
- Фиксировались отобранные пары счетчиков за каждый месяц.

Проверка метода элементарных годоскопов

- Метод элементарных независимых годоскопов был проверен на реконструированных мюонных событиях вертикального и горизонтального направлений в период, когда работала трековая система с 1999 по 2002 год.
- Получено, что метод выделяет околгоризонтальные мюоны с углами θ от 69° до 90° градусов. С привлечением карты горы Гран Сассо была определена также средняя глубина грунта над установкой для горизонтальных мюонов $\langle N^h \rangle = 4.98 \pm 0.25$ км в.э.
- Число таких мюонов в полном количестве мюонных событий составляет около $N_h/N_{\text{tot}} = 2.6\%$, темп счета – 0.66 мюона/день на пару.
- Для выделенных околоректальных мюонов с зенитными углами θ от 0° до 22° средняя глубина грунта $\langle N^v \rangle = 3.57 \pm 0.18$ км в.э. ($N_v/N_{\text{tot}} = 21.7\%$), их темп счета – 3.28 мюона/день на пару.

Вариации вертикального потока мюонов

- Пороговая энергия (50% вероятности выживания) мюонов на уровне моря для вертикальных мюонов $E_{\mu}^{\text{th}} \approx 1.8$ ТэВ.
- Вариации темпа счета вертикальных мюонов с 01/01/2004 по 31/12/2018.

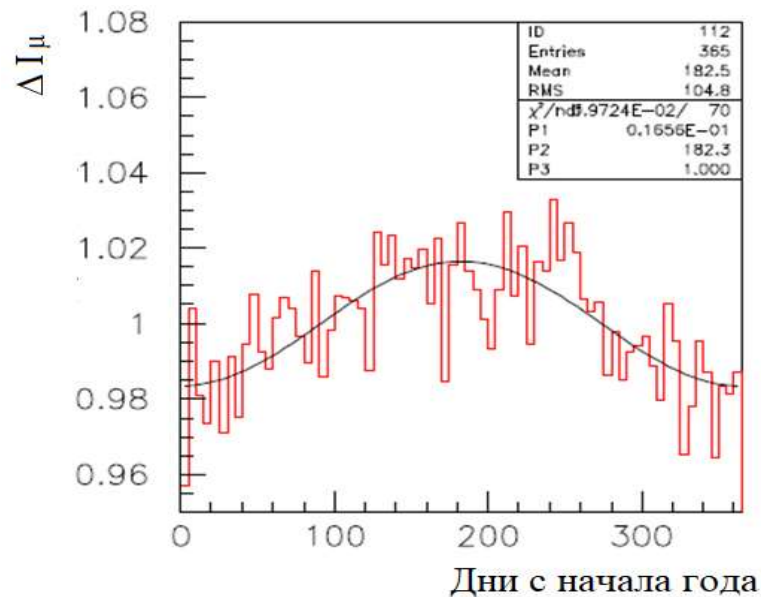


Аппроксимация обеих гистограмм гармонической функцией дает амплитуду вариации темпа счета $\delta I_{\mu}^{\text{v}} = 1.0 \pm 0.2$ % и фазу на $\varphi^{\text{v}} = 187 \pm 5$ дней от начала года.

Величина $\delta I_{\mu}^{\text{v}} = 1.0$ % меньше амплитуды $\delta I_{\mu}^{\text{tot}} = 1.5\%$ для всех мюонов, регистрируемых установкой LVD. Это связано с очевидным фактом – меньшей средней энергией мюонов вертикального направления по сравнению со средней энергией всех мюонов.

Вариации околгоризонтального потока МЮОНОВ

- Пороговая энергия мюонов на уровне моря для околгоризонтальных мюонов $E_{\mu}^{th} \approx 4,7$ ТэВ.
- Вариации темпа счета горизонтальных мюонов, метод наложения эпох. Бин – 5 дней. Кривая – аппроксимация $f(t) = 1 + P1\cos(2\pi(t-P2)/365)$.



Значение вариации $\delta I_{\mu}^h = 1.7 \pm 0.3\%$.
Максимум интенсивности приходится на
 $\phi^h = 182 \pm 5$ день от начала года.

*Н.Ю. Агафонова, и др. "Измерение сезонных вариаций
горизонтальных мюонов на подземном детекторе
LVD", ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2020, том 83, № 1, с. 70–75,*

Отбор нейтронных событий

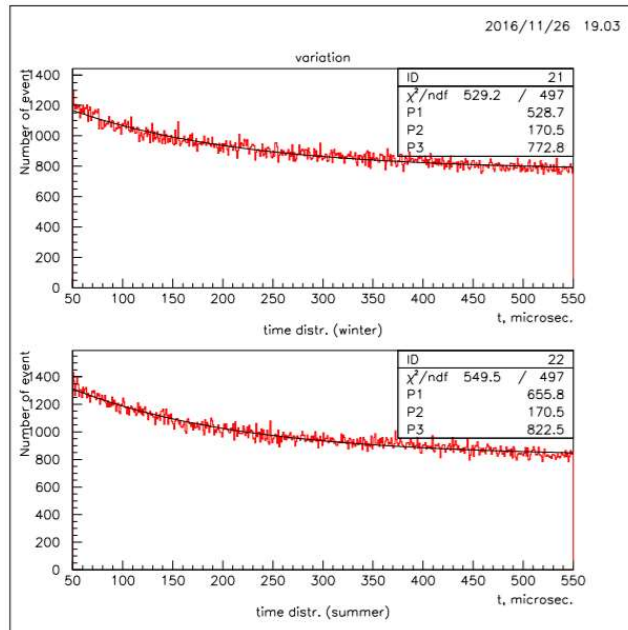
Нейтроноподобными импульсами считались события, которые удовлетворяли следующим условиям:

- временной интервал составляет от 50 до 550 мкс после мюонного триггера
- сигнал должен в том же самом счетчике, в котором был зарегистрирован сигнал от мюона
- энерговыделение соответствует интервалу от 1 до 12 МэВ
- отбирались нейтроны за $18 \times 3 = 54$ летних (июнь, июль, август) и 54 зимних (декабрь, январь, февраль) месяцев.
- Временные распределения аппроксимировались законом $N_n(t) = N_0 \cdot \exp(-t/\tau) + B$, где $\tau = 170$ мкс – время захвата термализованного нейтрона в сцинтилляторе, B – константа, зависящая от фоновых условий счетчика, $N_0 \cdot \tau$ – полное число нейтронов.

Временные распределения гамма-квантов от захватов нейтронов в веществе детектора

летом – $N_n/N_{tr}^s = 8112/340172 = 0.02385$

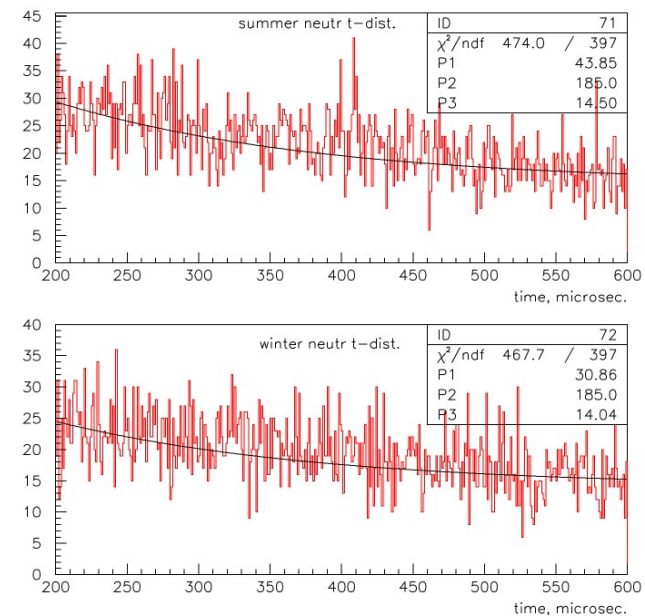
зимой – $N_n/N_{tr}^w = 5709/324334 = 0.01760$



вертикальный поток мюонов

$$\delta N_n/N_n = 7.7 \%$$

Ранее полагалось, что сезонные вариации потока нейтронов должны совпадать с сезонными модуляциями потока мюонов

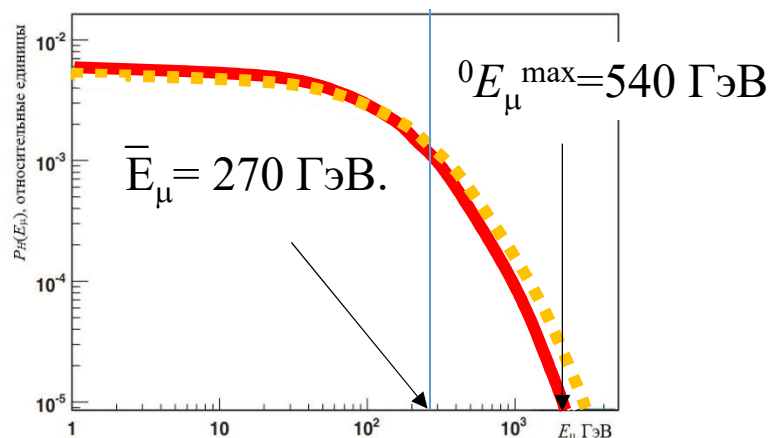


горизонтальный поток мюонов
(предварительный результат)

$$\delta N_n/N_n = (N_n/N_{tr}^s - N_n/N_{tr}^w)/(N_n/N_{tr}^s + N_n/N_{tr}^w).$$

$$\delta N_n/N_n = 15.1 \%$$

- Зависимость $N_n \propto \bar{E}_\mu^{0.78}$ связывает вариации нейтронов с вариациями средней энергии мюонов. Отсюда следует, что температурный эффект, влияющий на генерацию мюонов, изменяет не только их интенсивность, но и среднюю энергию.
- В летний сезон максимальная энергия мюонов на уровне моря возрастает на 5.3%, что соответствует возрастанию максимальной энергии мюонов под землей (для глубин 3.1 км в.э.) на 10%.
- Вариации средней энергии мюонов определяются вариациями критической энергии для пионов. Т.е. критическая энергия пионов возрастает от общегодового значения с 4.98 ТэВ до 5,24 ТэВ летом.



Сезонные вариации мюонов на границе атмосферы проявляются также в вариациях жесткости их спектра на уровне моря и вариации формы квазиступенчатого спектра мюонов под землей.

Сезонная трансформация формы спектра мюонов – качественное представление. Красная кривая – среднегодовой спектр ${}^0P_H(E_\mu)$, пунктирная – летний спектр ${}^sP_H(E_\mu)$.

О механизме температурных вариаций средней энергии мюонов на больших глубинах

[Агафонова Н.Ю.](#), [Мальгин А.С.](#)

ЖЭТФ Поступила в редакцию: 11 Августа 2020

$$\frac{{}^s\bar{E}_{\mu,LVD}}{{}^0\bar{E}_{\mu,LVD}} = \frac{{}^0\gamma_{\mu,sl} - 2}{{}^s\gamma_{\mu,sl} - 2} = 1.1.$$

летом показатель $\gamma_{\mu,sl}$ уменьшается на 4.3 %

Заключение

Более высокая амплитуда сезонных вариаций космогенных нейтронов по сравнению с амплитудой вариаций интенсивности мюонов была обнаружена с помощью измерений на детекторе LVD.

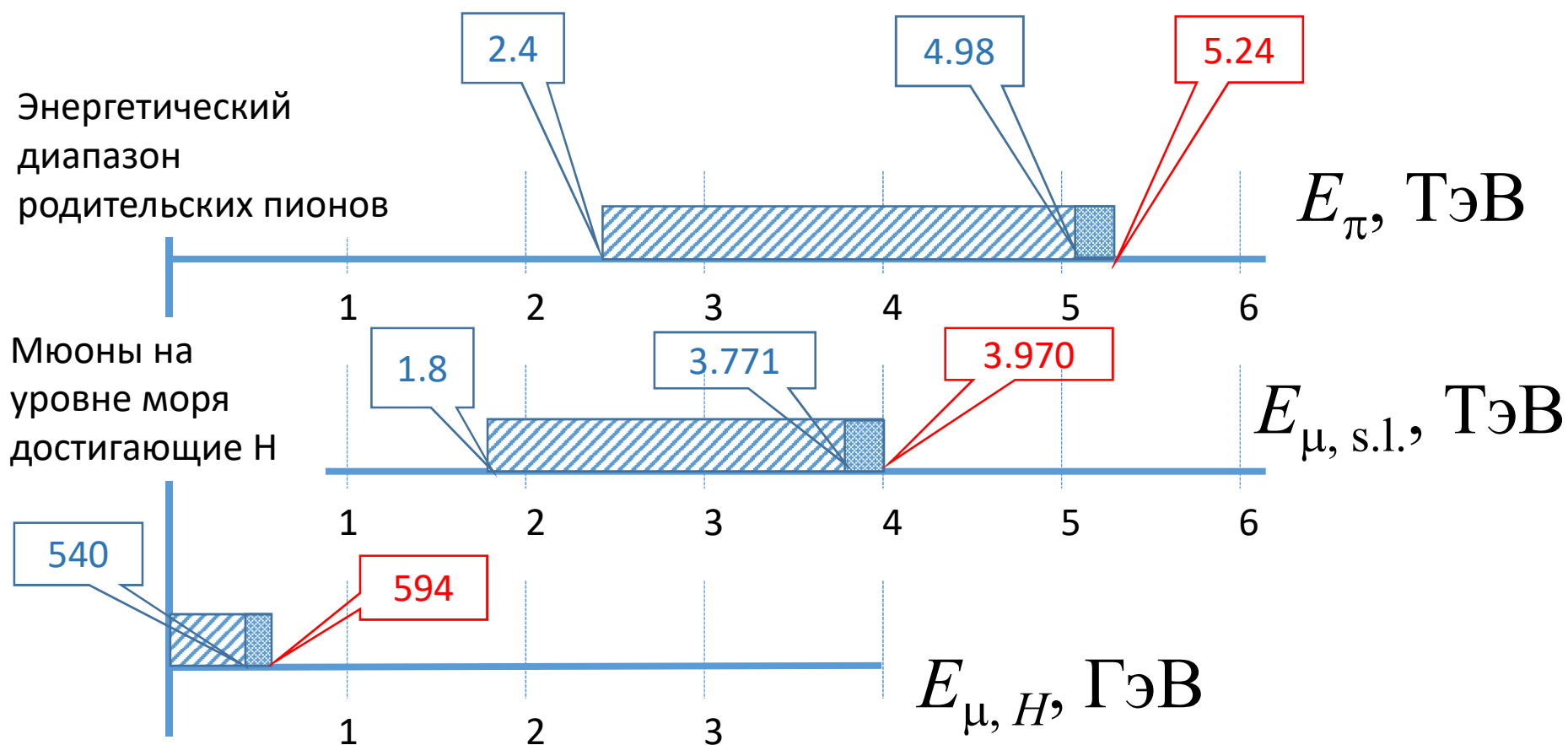
Зависимость $N_n \propto \bar{E}_\mu^{0.78}$ связывает вариации нейтронов с вариациями средней энергии мюонов. Отсюда следует, что температурный эффект, влияющий на генерацию мюонов, изменяет не только их интенсивность, но и среднюю энергию.

Сезонные вариации средней энергии атмосферных мюонов являются новым эффектом в мюонной физике.

В нашей новой экспериментальной работе на LVD мы попытались получить зависимости вариаций нейтронов (и следовательно энергии мюонов) в зависимости от глубины (большого угла). Получены предварительные результаты.

Спасибо за внимание

Вариации энергетического спектра



$$E_{\mu,H}^{av} = (E_{\mu,sl} + \epsilon_{\mu}) e^{-bH} - \epsilon_{\mu}$$

Формула, связывающая энергию мюонов под землей и на поверхности

$$H^{\min} = 3.1 \text{ km w.e.}$$

$$E_{\mu,sl}^{\min} = 1.3 \text{ TeV,}$$

$$E_{\mu,sl}^{\text{th}} = 1.8 \text{ TeV}$$

$$\epsilon_{\mu} = a/b = 667 \text{ GeV}$$

$$a = 280 \text{ GeV/km w.e.}$$

$$b = 0.42 / \text{km w.e.}$$

$$H = 3.1 \text{ km w.e.}$$

Распределение вероятности для мюона с энергией 10 ТэВ на уровне моря иметь энергию от E до $E + 0.1$ ТэВ на глубине 5, 4, 3, 2, 1 км в.э. (цифры у кривых).

Принята в печать

ЖЭТФ

О МЕХАНИЗМЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВАРИАЦИЙ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ МЮОНОВ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

Н. Ю. Агафонова^{a*}, А. С. Мальгин^a

^a Институт ядерных исследований РАН, Москва, 117312, проспект 60-летия Октября, д.7а

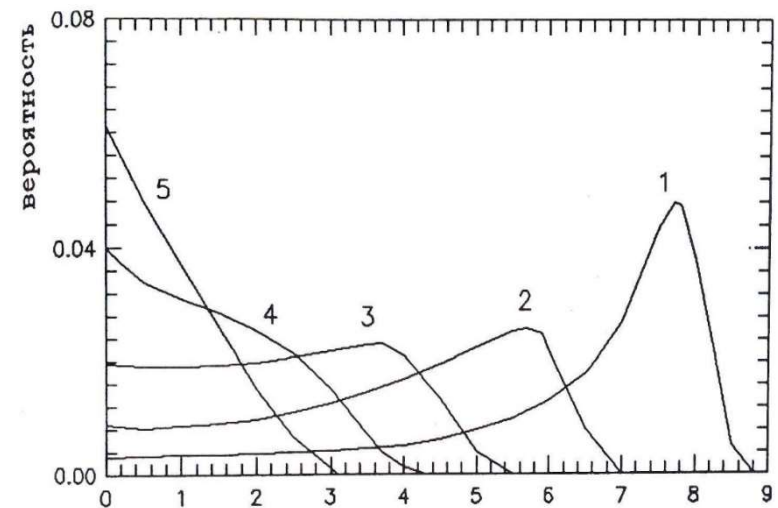
Рассмотрены источники сезонных температурных вариаций средней энергии потока мюонов, обнаруженные в эксперименте LVD. Показано, что вариации связаны с процессами генерации мюонов в верхних слоях атмосферы и прохождения мюонами слоя грунта большой толщины.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сезонные вариации атмосферных мюонов на больших глубинах под землей до сих пор остаются в поле зрения исследователей, главным образом как содержащие информацию, во-первых, о циклических процессах в верхних слоях атмосферы и, во-вторых, о характеристиках и временном поведении фона в низкофоновых подземных экспериментах.

Мы остановимся на втором аспекте исследований вариаций потока мюонов. На больших глубинах причиной сезонных вариаций мюонов является по-

ток мюонов. В §2 мы приводим общие соотношения, характеризующие связь спектра мюонов на глубине эксперимента LVD со спектром мюонов на уровне моря (s.l.); в §3 мы находим энергетические спектры потока LVD-мюонов и их сезонные вариации под землей и на уровне моря. В §4 обсуждаются процессы генерации мюонов высокой энергии, создающие сезонные вариации потока мюонов; в §5 и Заключение проводится сравнение результатов LVD и Bogexino и оценивается точность определения величины δE_{μ} .



Энергия мюонов, ТэВ