

ЗЕНИТНО-УГЛОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРОВ ЛОКАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МЮОНОВ ШАЛ ВБЛИЗИ ГОРИЗОНТА

Кокоулин Р.П., Барбашина Н.С., Богданов А.Г., Воробьев В.С., Задеба Е.А.,
Киндин В.В., Компаниец К.Г., Коновалова А.Ю., Маннанова К.И.,
Маннокки Дж., Петрухин А.А., Тринкоро Дж., Трошин И.Ю., Хохлов С.С.,
Шутенко В.В., Юрина Е.А., Яшин И.И.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, Москва
Туринская астрофизическая обсерватория, Италия, Турин

E-mail: rpkokoulin@mephi.ru

Спектры локальной плотности мюонов

При больших углах поперечные размеры ШАЛ в мюонной компоненте достигают сотен метров – километров.

Детектор с размерами порядка десятков метров можно считать точечным. В эксперименте оценивается локальная плотность мюонов в поперечном сечении ливня в точке расположения наблюдателя:

$$D, \text{ размерность } [D] = \text{m}^{-2}.$$

Интегральный спектр локальной плотности мюонов (СЛПМ)

$$F(\geq D, \theta), \text{ размерность } [F] = \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$$

указывает, сколько ливней с плотностью мюонов $\geq D$ приходит в точку наблюдения в единицу времени и телесного угла с данного направления.

Как показали исследования групп мюонов на детекторе ДЕКОР, при углах $\theta \leq 80^\circ$ СЛПМ удовлетворительно описывается простой формулой:

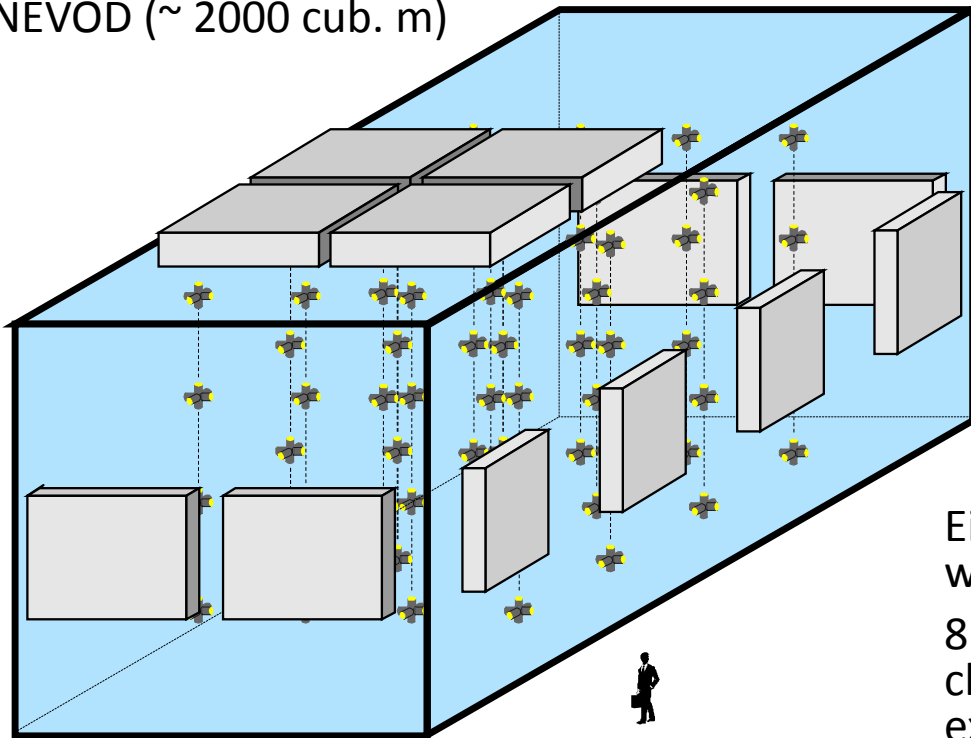
$$F(\geq D, \theta) \approx CD^{-\beta} \cos^\alpha \theta,$$

$\beta \approx 2.0 - 2.3$ показатель наклона СЛПМ, $\alpha \approx 4.5 - 4.8$ показатель степени косинуса зенитного угла. Эта формула неприменима для больших углов: из общих соображений, поток на горизонте должен быть конечным!

Цель данной работы – исследование зенитно-угловой зависимости СЛПМ при предельно больших зенитных углах (вплоть до горизонта).

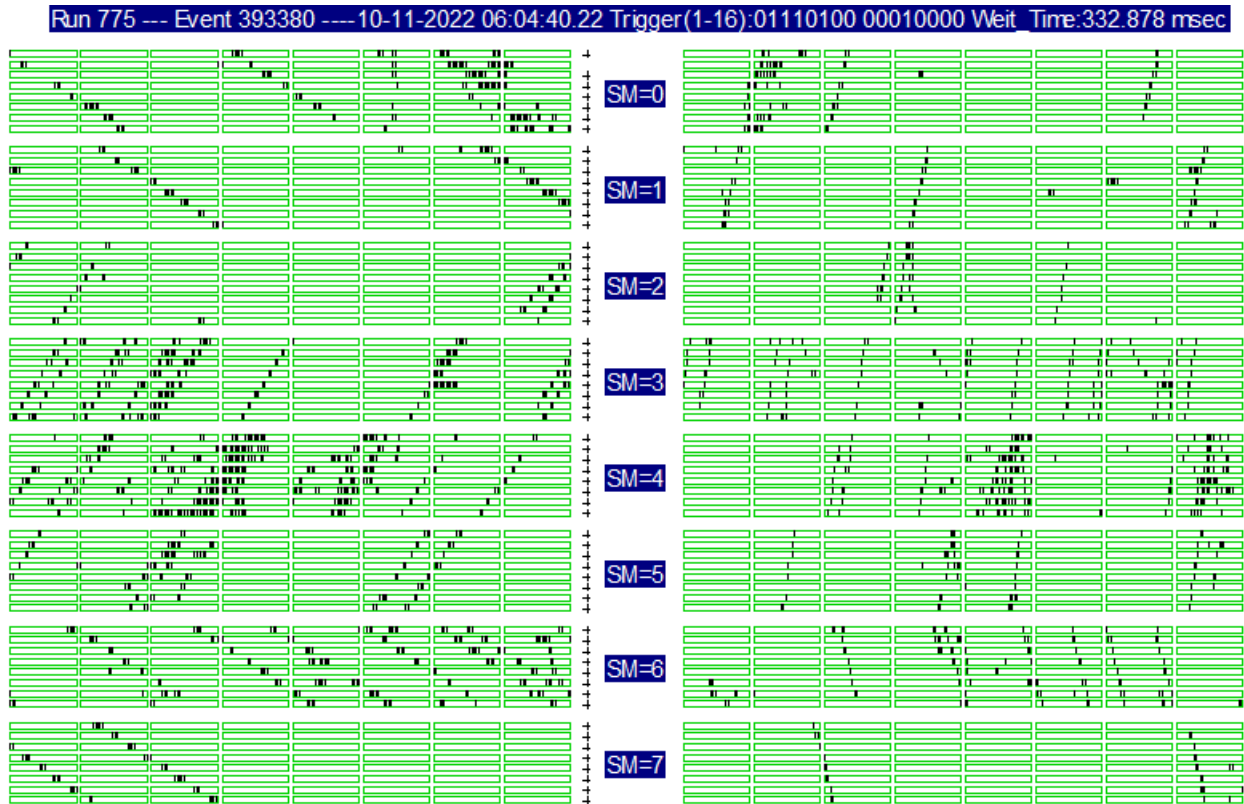
Взаиморасположение детекторов комплекса

Cherenkov water calorimeter
NEVOD (~ 2000 cub. m)



Coordinate-tracking detector DECOR
Eight vertical supermodules (SM), each
with 8.4 sq. m area,
8 planes of plastic streamer tube
chambers, with two-coordinate
external strip readout.

Одно из рекордных событий ДЕКОР (#13/775/393380) $m_6 = 33$, $\theta = 83.8^\circ$



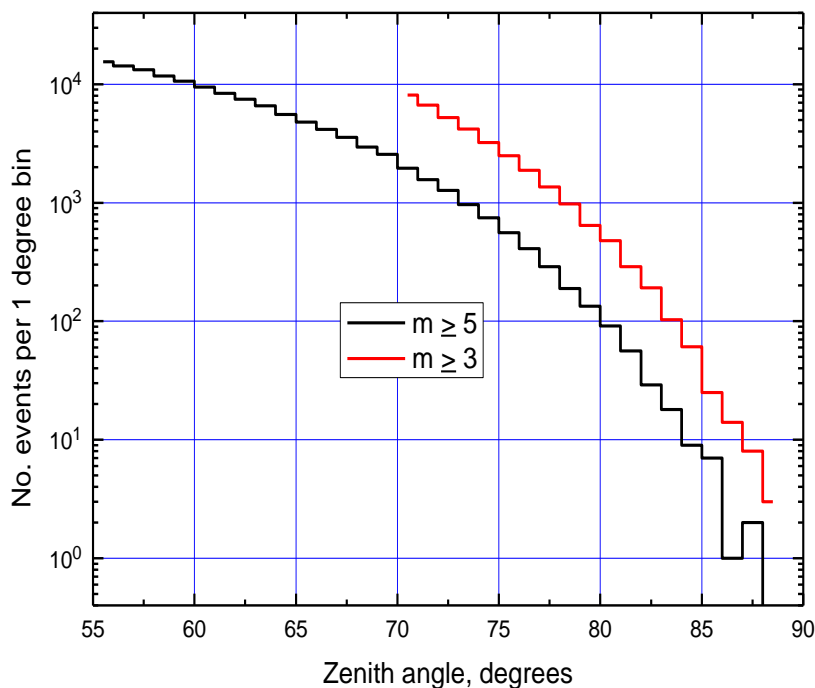
Оценка первичной энергии $\lg (E_0, \text{eV}) = 19.2 \pm 0.4$

Экспериментальные данные по группам мюонов

Используются данные ДЕКОР за период с 03.05.2012 по 04.07.2023 (75.2 тыс. часов «живого» времени измерений).

Всего в двух выборках, используемых в дальнейшем анализе, содержится:

- 1) около 129.2 тыс. событий $55^\circ \leq \theta < 88^\circ$ с кратностью треков $m \geq 5$;
- 2) около 36.0 тыс. событий Gr3s с углами $70^\circ \leq \theta < 89^\circ$ с кратностью $m \geq 3$.



Зенитно-угловая зависимость числа событий с группами мюонов для двух порогов отбора по числу треков.

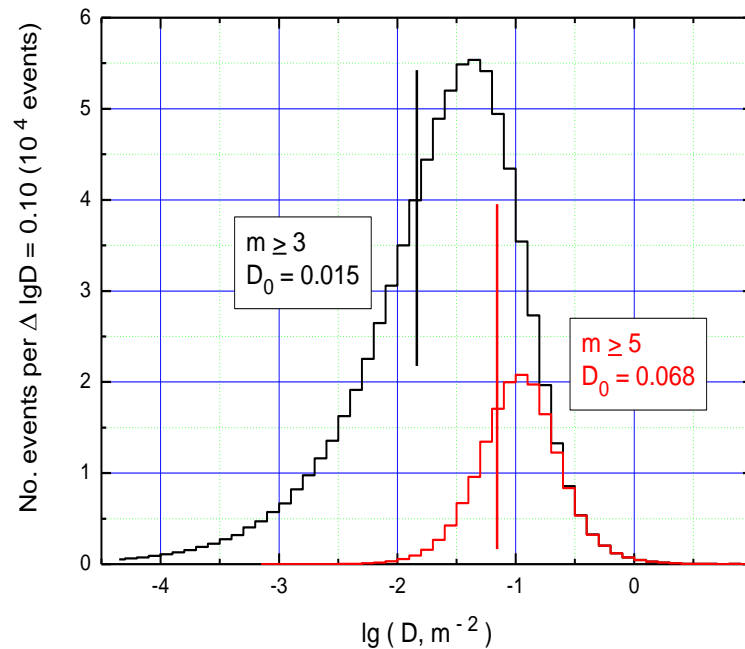
Восстановление интегральных СЛПМ

$$F_{\text{obs}}(\theta, \geq D_0^*) = (N_{\text{obs}} / N_{\text{mod}}) (T_{\text{mod}} / T_{\text{obs}}) F_{\text{mod}}(\theta, \geq D_0^*)$$

Здесь N_{obs} и N_{mod} - число зарегистрированных и моделированных (для некоторой опорной, reference, модели СЛПМ F_{mod}) событий, T_{obs} - время измерений, T_{mod} - «эквивалентное» время, определяемое статистикой моделирования и опорной моделью СЛПМ.

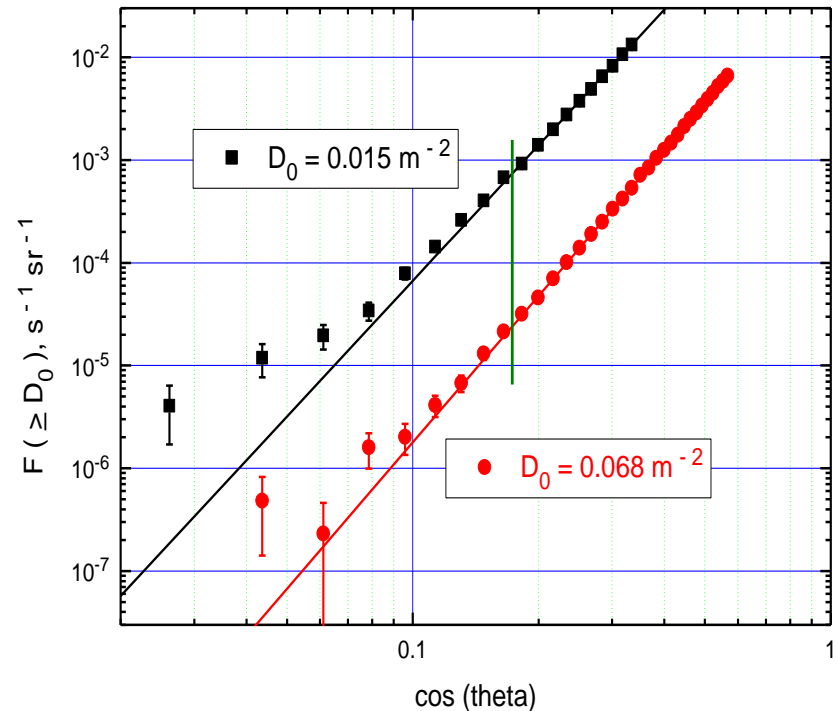
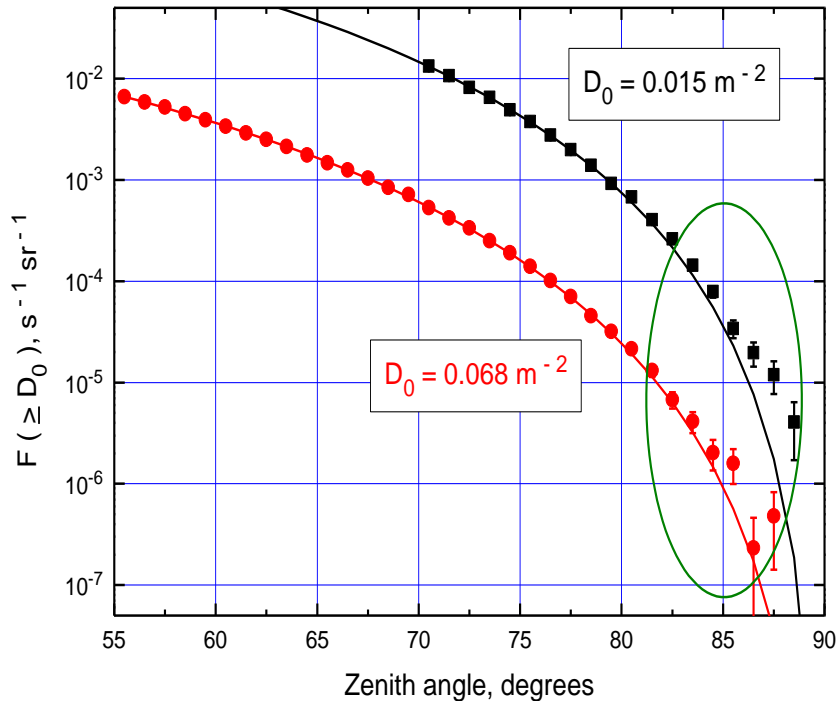
Выбор эффективного значения порога, при котором оценки интегрального СЛПМ устойчивы по отношению к вариации априорного значения β :

$$\ln D_0^* = \langle \ln D \rangle - 1 / \beta.$$



Распределения моделированных событий по локальной плотности мюонов.

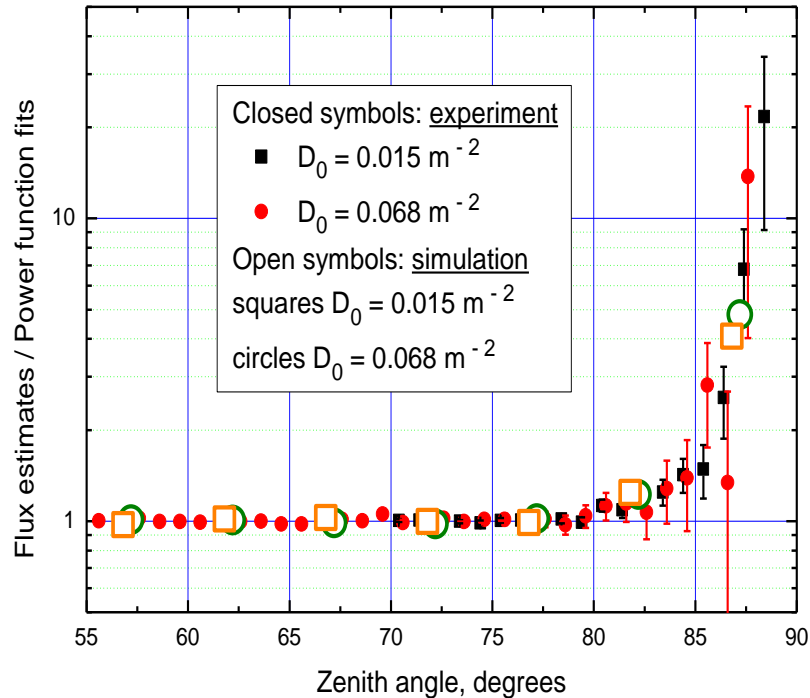
Измеренные интегральные СЛПМ для двух значений порога по плотности мюонов



Зависимость интегральных СЛПМ от зенитного угла (слева) и от косинуса зенитного угла (справа). Линии – аппроксимации степенными функциями $\cos \theta$ в интервале углов $\theta \leq 80^\circ$.

При зенитных углах более 80° заметно выполаживание зенитно-угловой зависимости СЛПМ по сравнению со степенной функцией косинуса.

Фактор «выполаживания» СЛПМ при больших углах



Сплошные точки: эксперимент.

Укрупненные светлые символы: отношения расчетных значений СЛПМ к аппроксимациям степенной функцией $\cos \theta$.

Моделирование: CORSIKA, опция CURVED, углы от 57 до 87°, три post-LHC модели взаимодействия (EPOS-LHC, QGSJET-II-4, SIBYLL-02c), первичные протоны и ядра железа, аппроксимация первичного энергетического спектра Global Spline Fit (GSF).

Влияние сферичности атмосферы

Данные и результаты моделирования демонстрируют одну и ту же тенденцию: отношение к степенной аппроксимации близко к единице для углов θ менее 80° и быстро растет при больших углах. Это позволяет сделать вывод, что выполаживание зенитно-угловой зависимости СЛПМ объясняется естественной причиной: **сферичностью земной атмосферы**.

Плоская:

$$X = X_0 \sec \theta;$$

$$L = L_0 \sec \theta;$$

$$\theta^* = \theta ;$$

X, L бесконечны для горизонта.

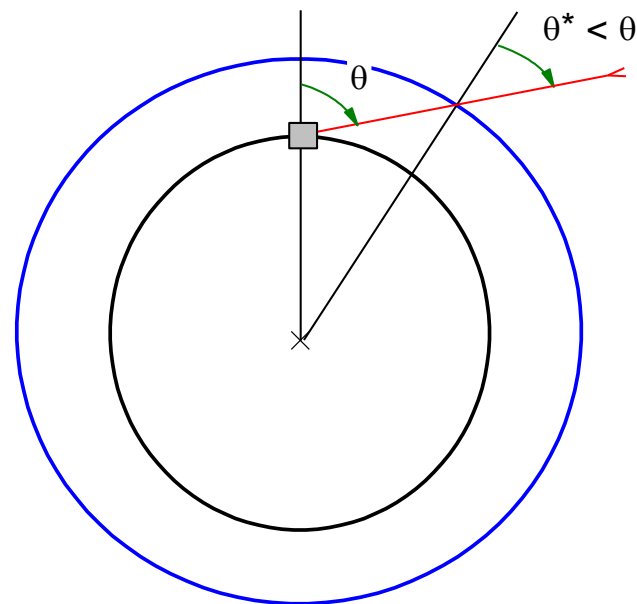
Сферическая:

$$X < X_0 \sec \theta;$$

$$L < L_0 \sec \theta;$$

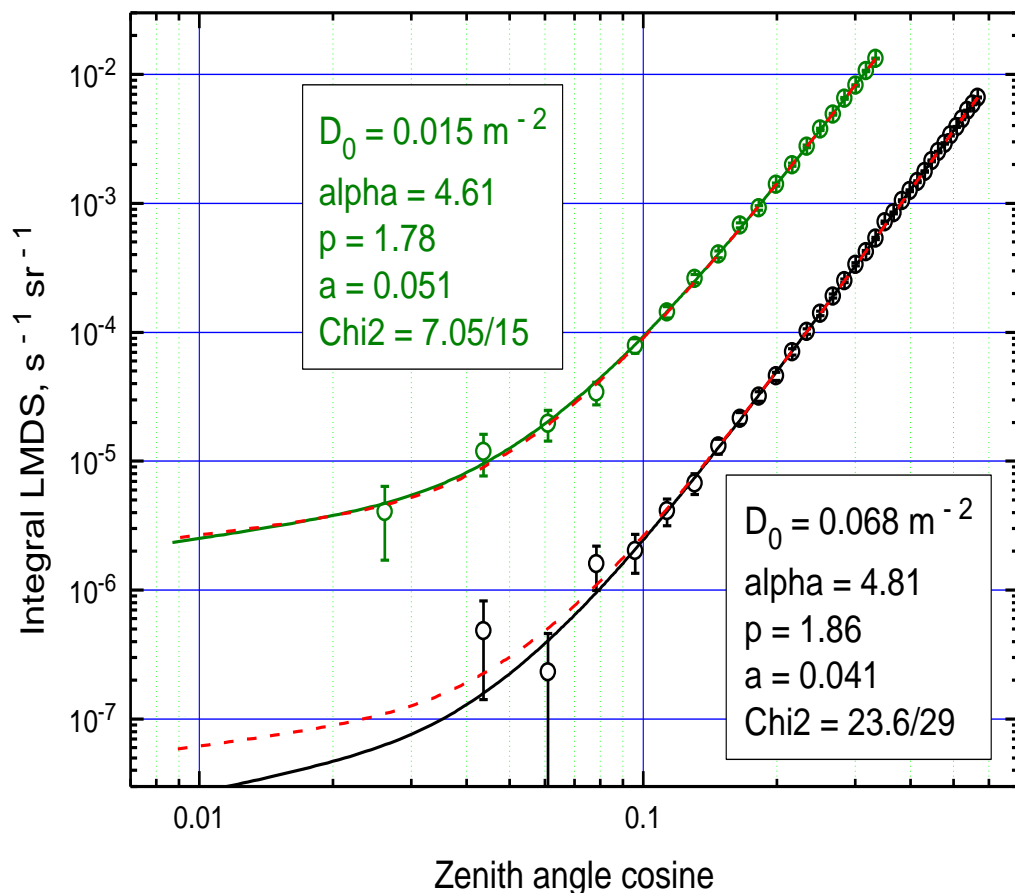
$$\theta^* < \theta ;$$

X, L конечны для горизонтального направления.



Аппроксимация интегральных СЛПМ при больших углах

$$\cos^\alpha \theta \rightarrow [(\cos^p \theta + a^p)]^{\alpha/p} \quad (\text{Дополнительные параметры: } p, a).$$



Сплошные кривые на рисунке соответствуют параметрам наилучшей подгонки.

В пределах погрешностей, можно обойтись и более простой функцией:

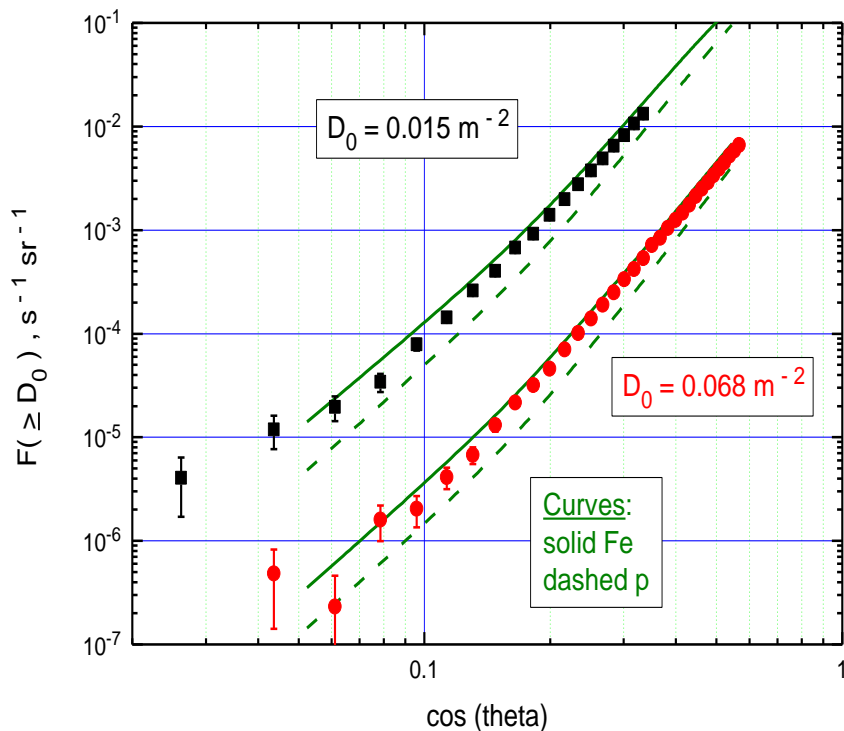
$$(\sqrt{\cos^2 \theta + a^2})^\alpha, \quad a = 0.05$$

(красные штриховые кривые на рисунке).

Сравнение измеренных СЛПМ с результатами расчетов

Расчеты: CORSIKA, опция CURVED, углы от 57 до 87°, три post-LHC модели взаимодействия (EPOS-LHC, QGSJET-II-4, SIBYLL-02c), первичные протоны и ядра железа, стандартная атмосфера (Линсли), МПЗ ($\langle \cos \lambda \rangle$), первичный энергетический спектр GSF.

Для сравнения используются усредненные по трем моделям значения.



Экспериментальные точки лежат между кривыми, рассчитанными для протонов и ядер железа (ближе – к расчету для тяжелого состава).

Данные соответствуют порогам по энергии первичных частиц $E_0 \sim 5 \times 10^{15} - 2 \times 10^{18}$ эВ.

Заключение

Отобраны группы мюонов малой кратности ($m \geq 3$ для зенитных углов $\theta \geq 70^\circ$ и $m \geq 5$ для $\theta \geq 55^\circ$) по данным ДЕКОР за период с 03.05.2012 по 04.07.2023 (более 75 тыс. часов времени измерений).

Восстановлены экспериментальные интегральные спектры локальной плотности мюонов для двух значений эффективного порога по плотности мюонов (0.015 и 0.068 м⁻²) при больших зенитных углах.

Установлено, что для углов более 80° зенитно-угловая зависимость СЛПМ не описывается простой степенной функцией косинуса зенитного угла: наблюдается эффект выполаживания СЛПМ по мере приближения к горизонту.

Наличие эффекта выполаживания подтверждается результатами моделирования мюонной компоненты ШАЛ по программе CORSIKA. Это указывает на то, что обнаруженная особенность имеет естественное происхождение и связана с геометрией развития адронного каскада в сферической атмосфере.

Экспериментальные данные по интегральным СЛПМ согласуются с результатами расчетов (для post-LHC моделей взаимодействия и GSF-модели первичного спектра) в предположении тяжелого состава первичных космических лучей.

Спасибо за внимание!