

37 Всероссийская конференция по космическим лучам

27 июня – 1 июля 2022 г.

Средние энергии мюонов в наклонных группах по данным эксперимента НЕВОД-ДЕКОР

Юрина Екатерина от коллаборации НЕВОД-ДЕКОР

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

Астрофизическая обсерватория Турина

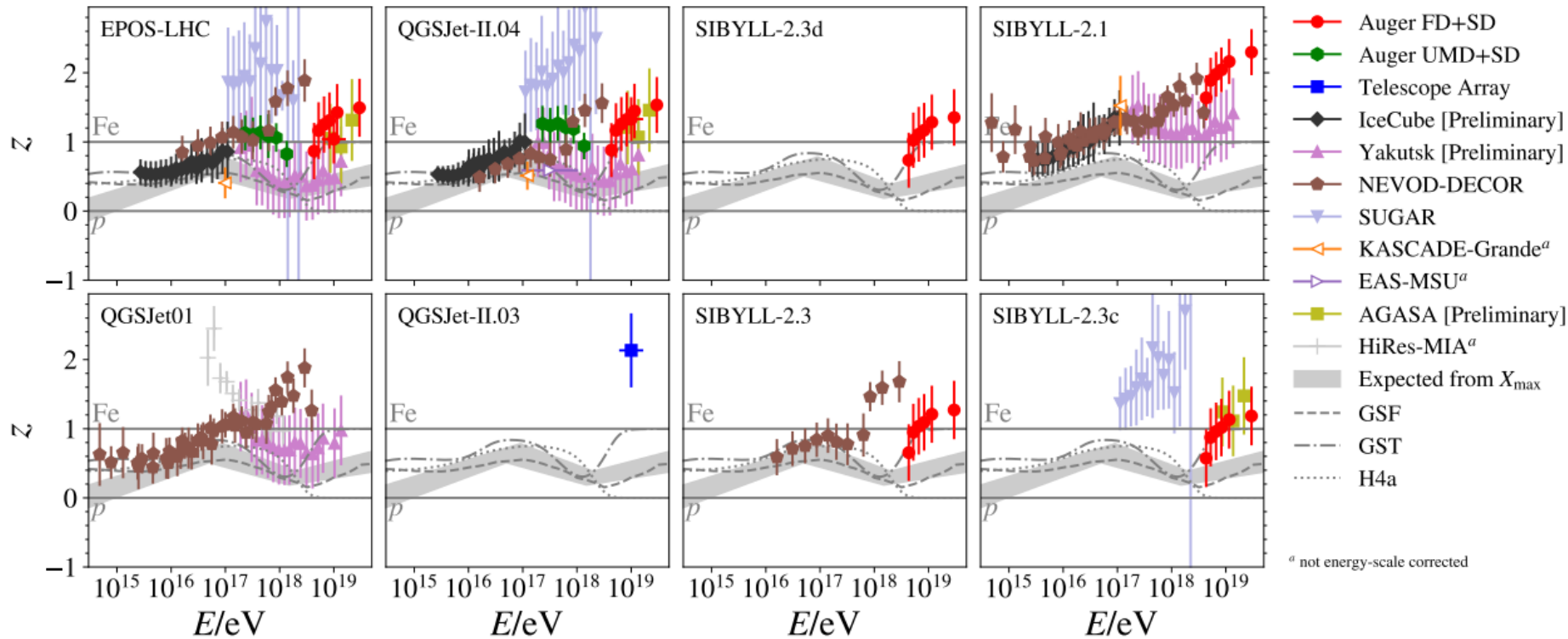
ea.yurina@mephi.ru

Москва-2022

ВВЕДЕНИЕ

“Мюонная загадка” – растущий с энергией первичных частиц избыток многомюонных событий по сравнению с результатами расчетов.

Dennis Soldin et al. PoS (ICRC2021) 349.



$$z = \frac{\ln N_{\mu}^{\text{exp}} - \ln N_{\mu p}^{\text{sim}}}{\ln N_{\mu \text{Fe}}^{\text{sim}} - \ln N_{\mu p}^{\text{sim}}}$$

$z = 0$ для протонов;
 $z = 1$ для ядер железа.

Наблюдаемый избыток может быть объяснен как космофизическими (изменение энергетического спектра и/или массового состава ПКЛ), так и ядернофизическими (генерация новых частиц или состояний материи в ядро-ядерных взаимодействиях) причинами. Для их разделения необходимо исследовать энергетические характеристики мюонных событий и их изменения с энергией первичных частиц.

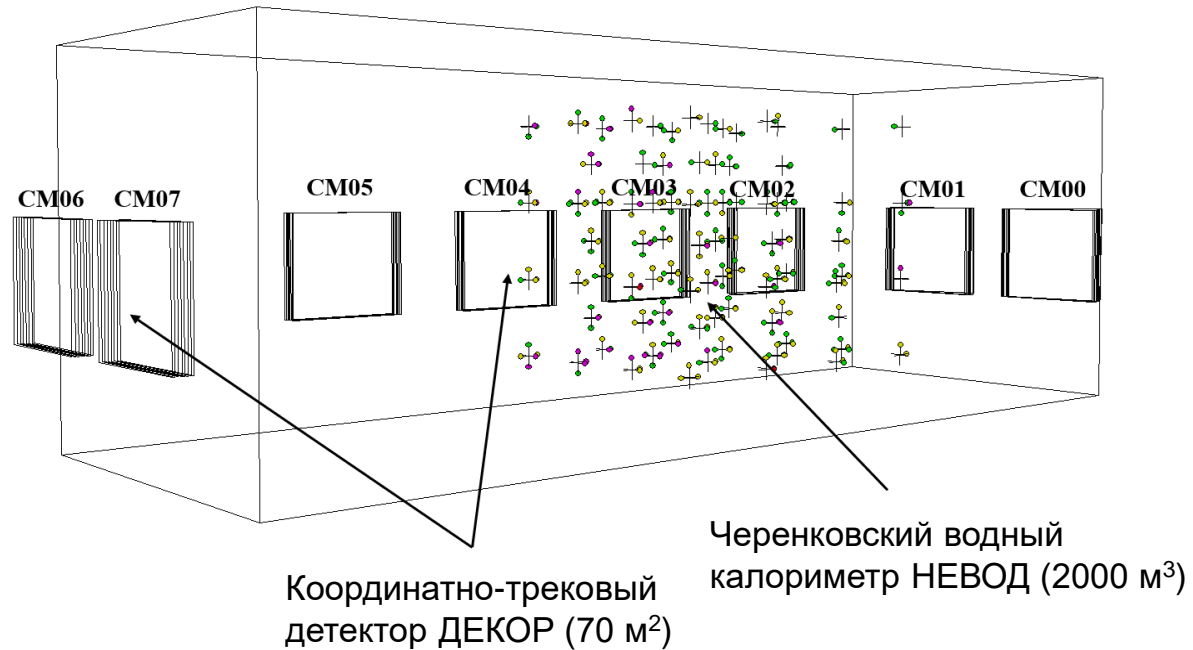
В данной работе **реализован новый подход** к исследованию энергетических характеристик мюонной компоненты ШАЛ, основанный на **измерении энерговыделения групп мюонов в черенковском водном калориметре НЕВОД с одновременным определением числа мюонов в группах и направления их прихода по данным координатно-трекового детектора ДЕКОР.**

Средние потери мюонов в веществе практически линейно зависят от их энергии:

$$\frac{dE_{\mu}}{dX} = a + bE_{\mu}.$$

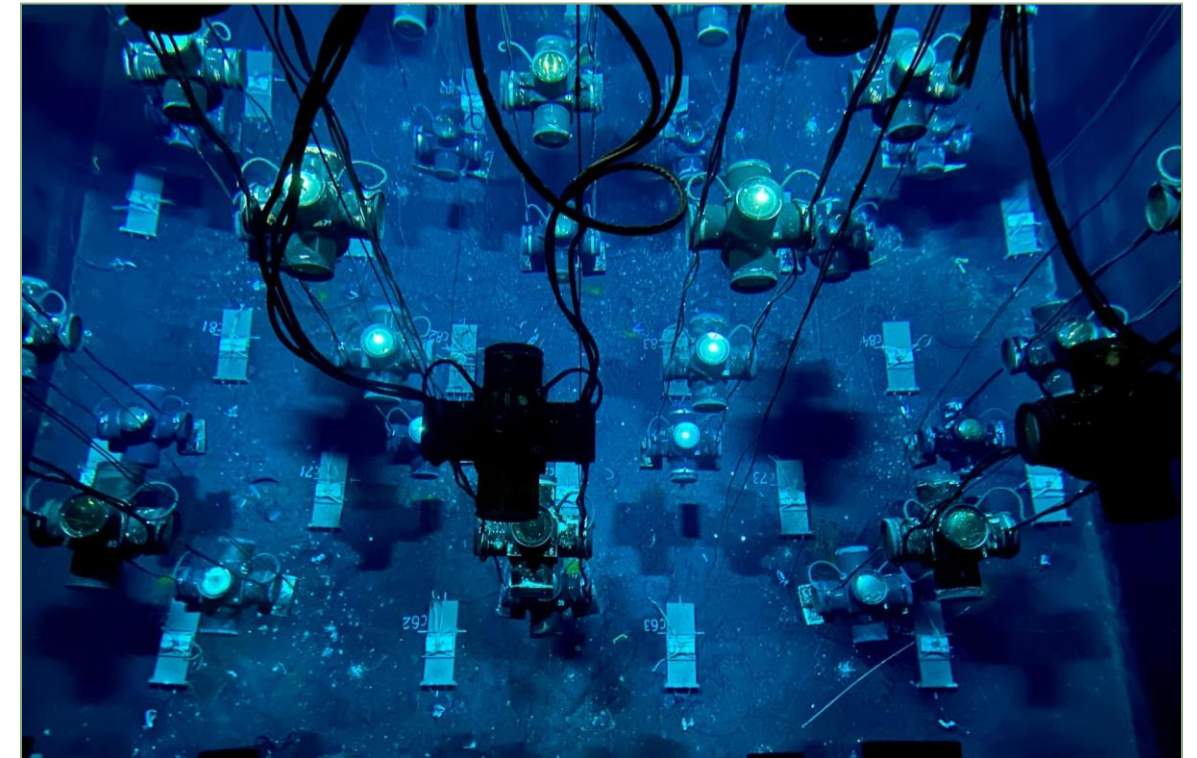
Удельное энерговыделение (нормированное на плотность мюонов в группе) дает информацию о средней энергии мюонов в группах.

ЭКСПЕРИМЕНТ НЕВОД-ДЕКОР



ДЕКОР

Супермодуль (СМ) площадью 8.4 м² состоит из 8 плоскостей стримерных трубок.
Угловая и пространственная точности реконструкции мюонных треков лучше 1 градуса и 1 см, соответственно.

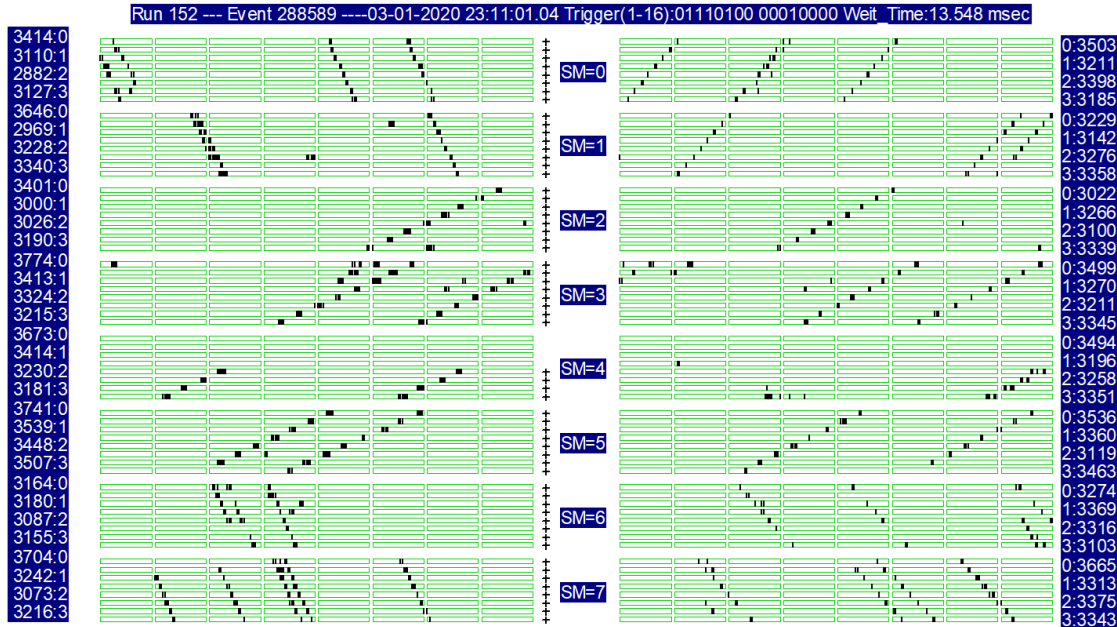


ЧВК НЕВОД

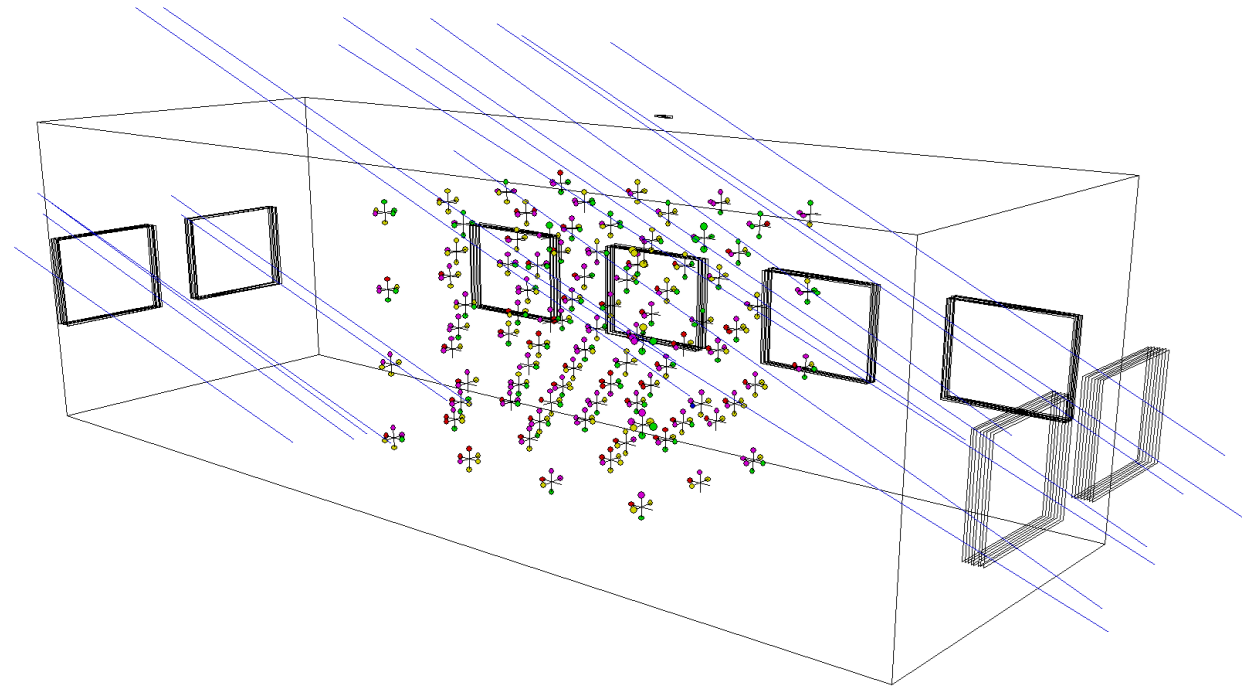
Основной регистрирующий элемент – квазисферический модуль (КСМ), состоящий из 6 ФЭУ-200.
Всего 91 КСМ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Пример зарегистрированной супермодулями детектора ДЕКОР группы мюонов. Слева – Y-проекция, азимутальный угол; справа – X-проекция, проекционный зенитный угол



Визуализация реконструированных треков мюонов



Три серии измерений (с июля 2013 г. по март 2022 г., **103 тыс. событий, 60 тыс. ч “живого” времени**)
Условия отбора групп: $m \geq 5$, $\theta \geq 55^\circ$, два 60-градусных сектора по азимуту.

Дополнительно обработана часть статистики для зенитных углов $\theta = 40^\circ - 55^\circ$ (3 тыс. ч “живого” времени).

ЛОКАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ МЮОНОВ. ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ ГРУПП МЮОНОВ

Локальная плотность мюонов в событии и направление их прихода измеряются по данным ДЕКОР. Эти величины позволяют оценить энергию первичной частицы.

Локальная плотность мюонов оценивалась по формуле:

$$D = (m - \beta) / S_{\text{дет}}$$

где m – количество мюонов в группе (множественность), $\beta = 2.1$ – показатель наклона интегрального спектра локальной плотности мюонов (СЛПМ), $S_{\text{дет}}$ – эффективная площадь СМ ДЕКОР для заданного направления прихода группы.

Характерные энергии первичных частиц (Богданов А.Г. и др. ЯФ. 2010. Т. 73. № 11. С. 1904):

$$\langle \lg(E, \text{ГэВ}) \rangle \approx 7.03 + 1.07 \lg(D, \text{м}^{-2}) + 3.80 \lg(\sec\theta).$$

Измеренный суммарный отклик ЧВК Σ (в единицах фотоэлектронов, ф.э.) всех сработавших ФЭУ детектора НЕВОД использовался в качестве меры **энерговыведения групп мюонов**.

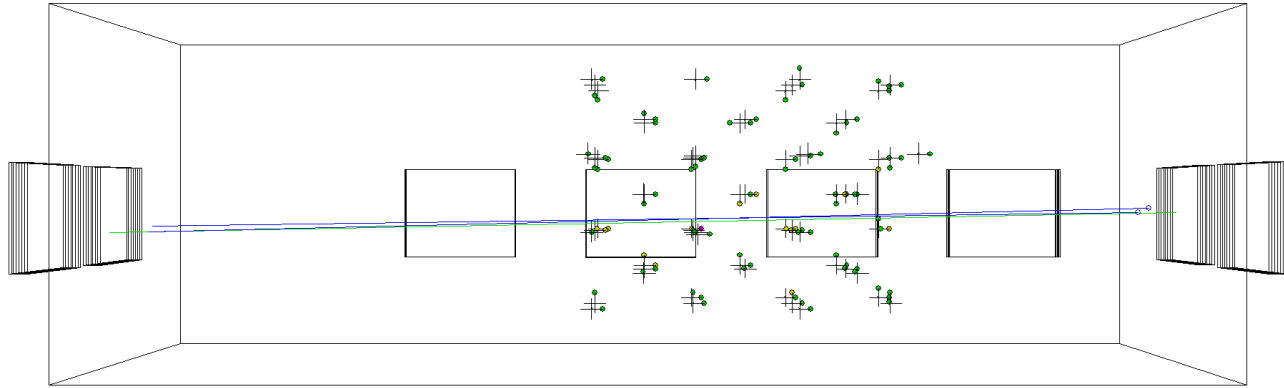
В первом приближении суммарное энерговыведение пропорционально локальной плотности мюонов, поэтому целесообразно рассматривать **удельное энерговыведение** Σ / D – число фотоэлектронов, деленное на оценку плотности мюонов в событии, полученную по данным ДЕКОР.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ОТКЛИКА УСТАНОВОК НЕВОД И ДЕКОР

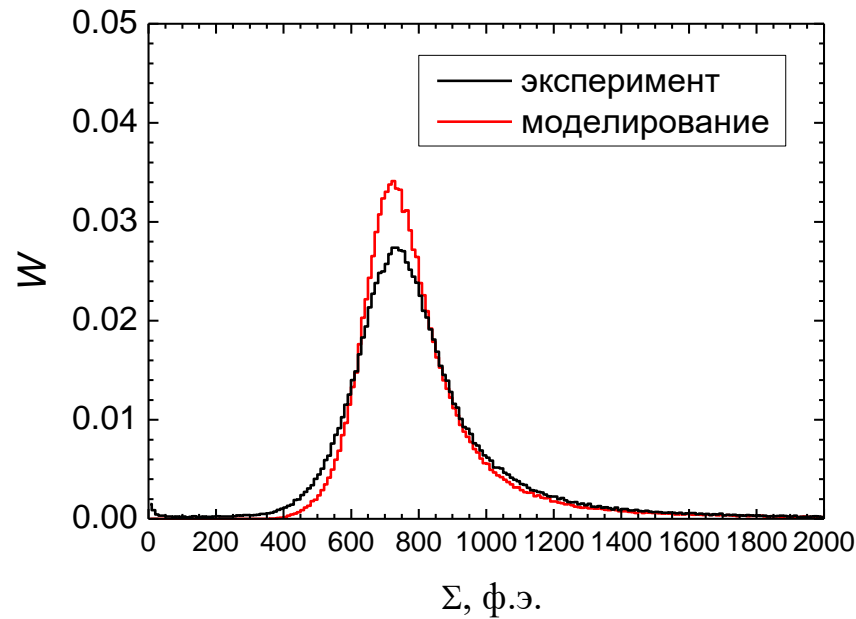
Проведено моделирование отклика НЕВОД на прохождение групп мюонов с фиксированными энергиями мюонов 100 ГэВ:

- Модель ЧВК НЕВОД была проверена и откалибрована по отклику на одиночные околоризонтальные мюоны.
- События с группами разыгрывались по спектру локальной плотности мюонов с наклоном, близким к экспериментальному.
- В моделировании учтены физические особенности установок и условия аппаратного, программного и операторского отбора событий с группами мюонов.
- Для событий, удовлетворяющих условиям отбора в ДЕКОР, рассчитывался отклик черенковского водного калориметра НЕВОД с помощью пакета Geant4.

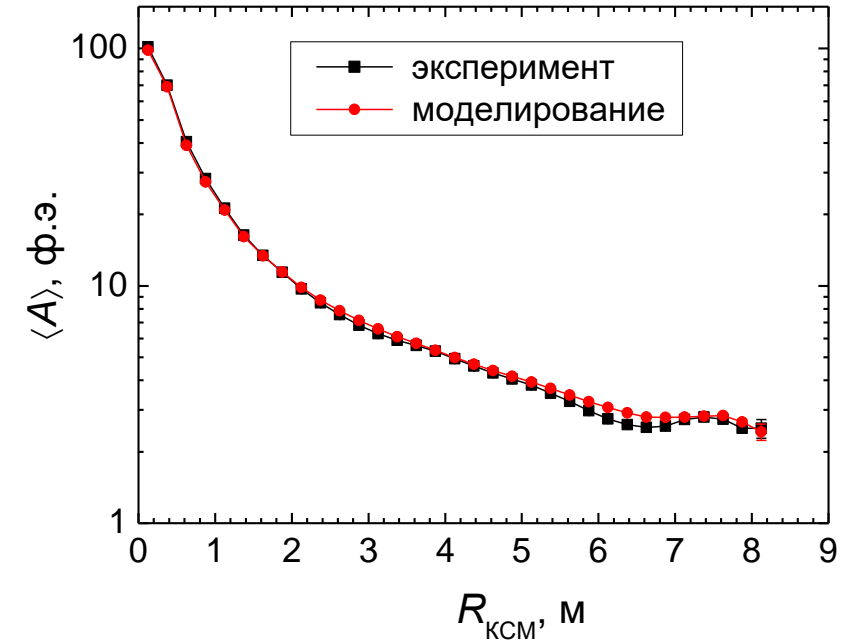
КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ ЧВК НЕВОД ПО ОТКЛИКУ НА ОДИНОЧНЫЕ ОКОЛОГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ МЮОНЫ



Распределения событий с одиночными мюонами по суммарному числу фотоэлектронов



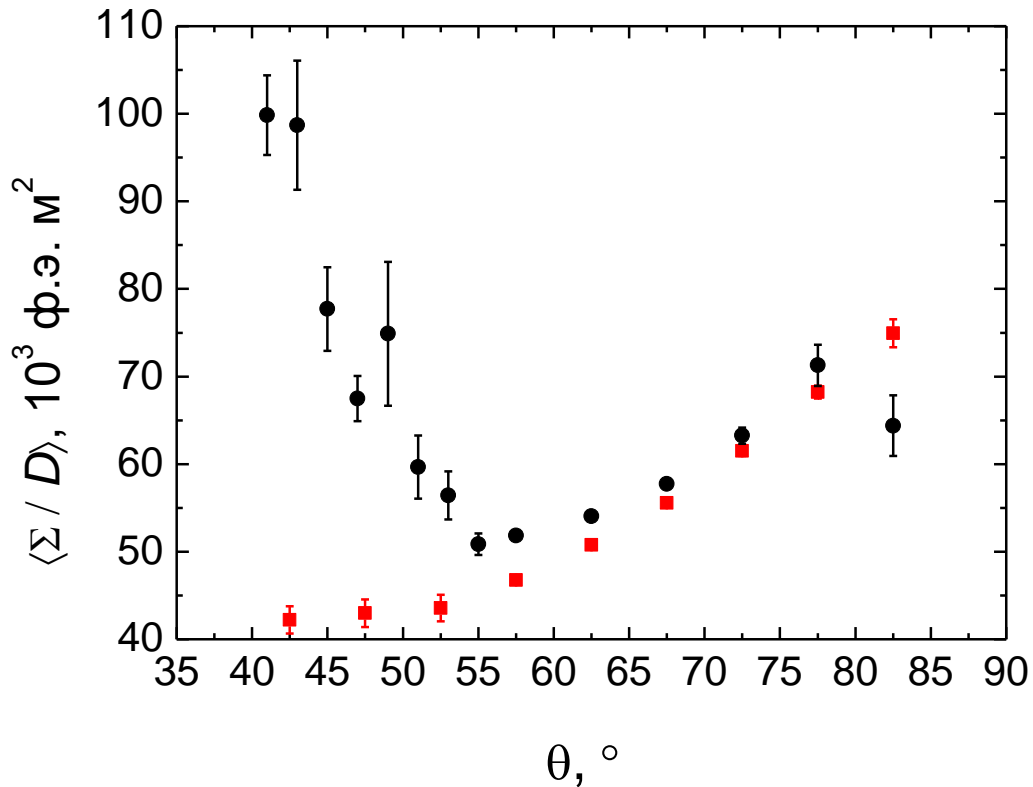
Зависимость среднего отклика КСМ от расстояния до трека мюона



Абсолютная калибровка отклика ЧВК была получена из сопоставления суммарного числа фотоэлектронов всех сработавших ФЭУ в ЧВК (энерговыведения) для эксперимента и результатов моделирования.

ОСТАТОЧНЫЙ ВКЛАД ЭЛЕКТРОННО-ФОТОННОЙ И АДРОННОЙ КОМПОНЕНТ ШАЛ В ИЗМЕРЕННОЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ

Зависимости среднего удельного энерговыведения групп мюонов от зенитного угла

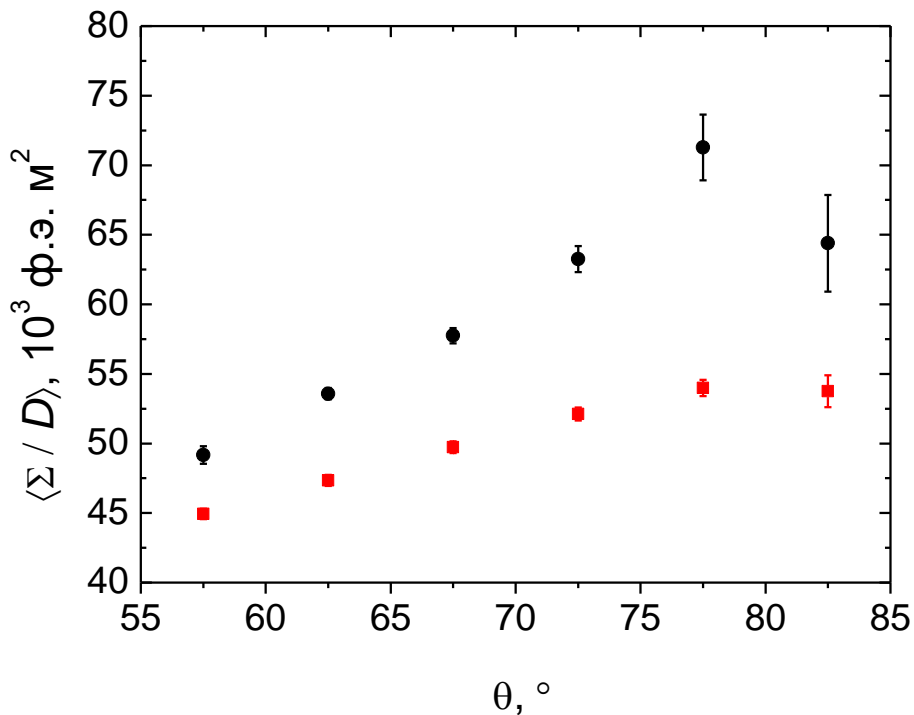


Черные кружки – измеренное удельное энерговыведение, красные квадраты – ожидаемое удельное энерговыведение от мюонов групп. Ожидаемый мюонный вклад был вычтен из экспериментальной зависимости удельного энерговыведения.

По результатам аппроксимации полученных после вычитания точек экспоненциальной функцией от $\sec\theta$ были оценены значения вклада электромагнитной и адронной компонент ШАЛ при зенитных углах 57.5° и 62.5° , которые составили $5.1 \pm 1.1 \%$ и $0.87 \pm 0.30 \%$ соответственно.

ПЕРЕХОД ОТ СРЕДНИХ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЙ К СРЕДНИМ ЭНЕРГИЯМ МЮОНОВ В ГРУППАХ

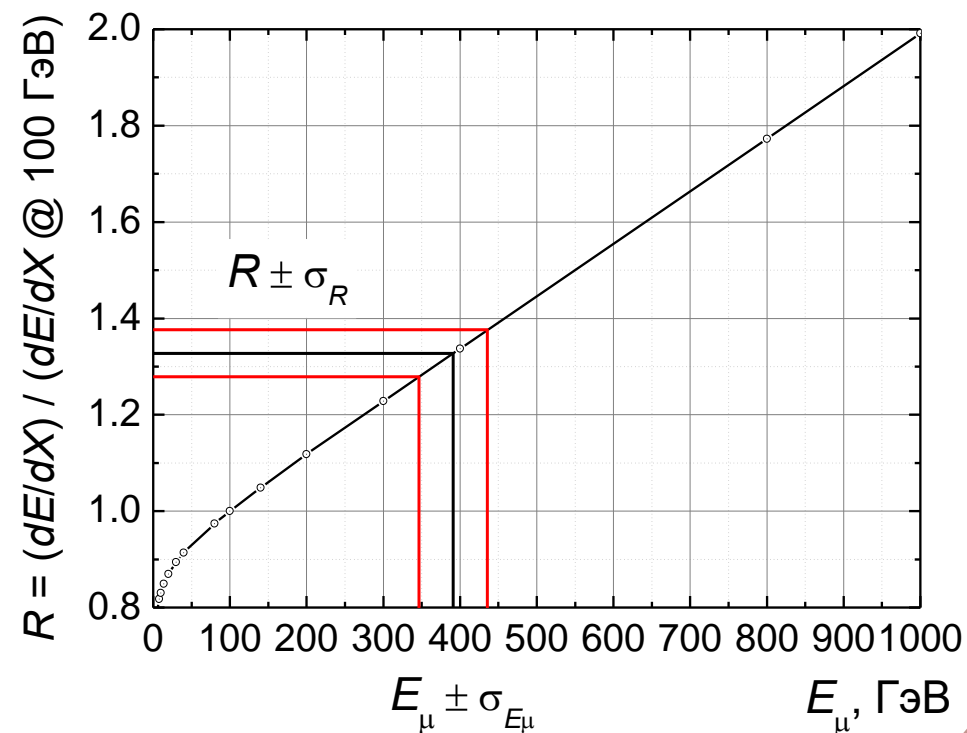
Черные кружки – измеренное удельное энерговыделение. Красные квадраты – моделированное удельное энерговыделение для групп мюонов с фиксированными энергиями мюонов 100 ГэВ.



$$R = \frac{\langle \Sigma / D \rangle_{\text{экспер}}}{\langle \Sigma / D \rangle_{100 \text{ ГэВ}}^{\text{модел}}}$$

Средние удельные потери мюонов, нормированные на потери при энергии 100 ГэВ

Groom, Mokhov, Striganov. AD&NDT-2001

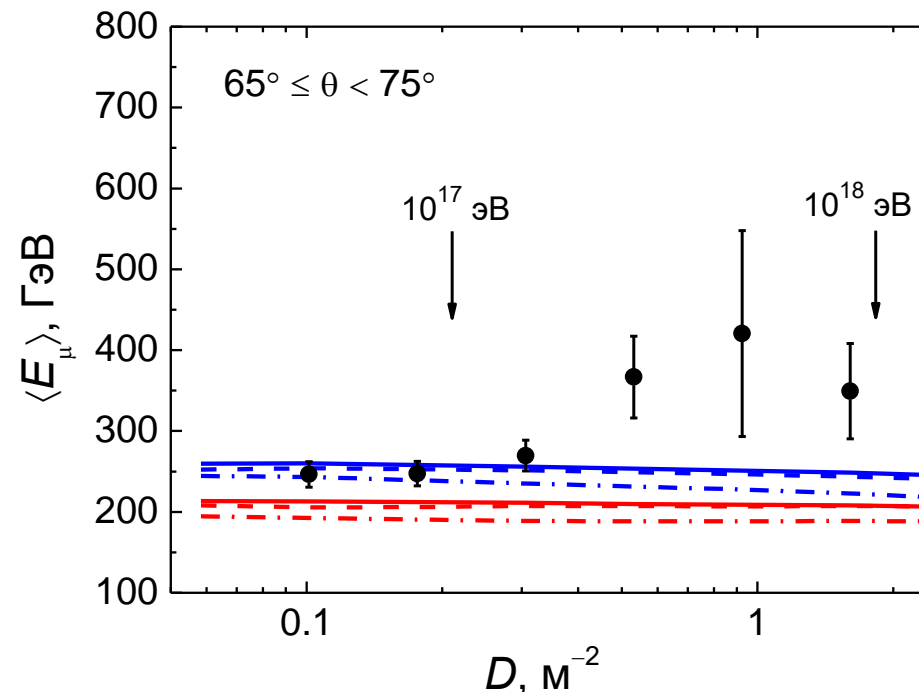
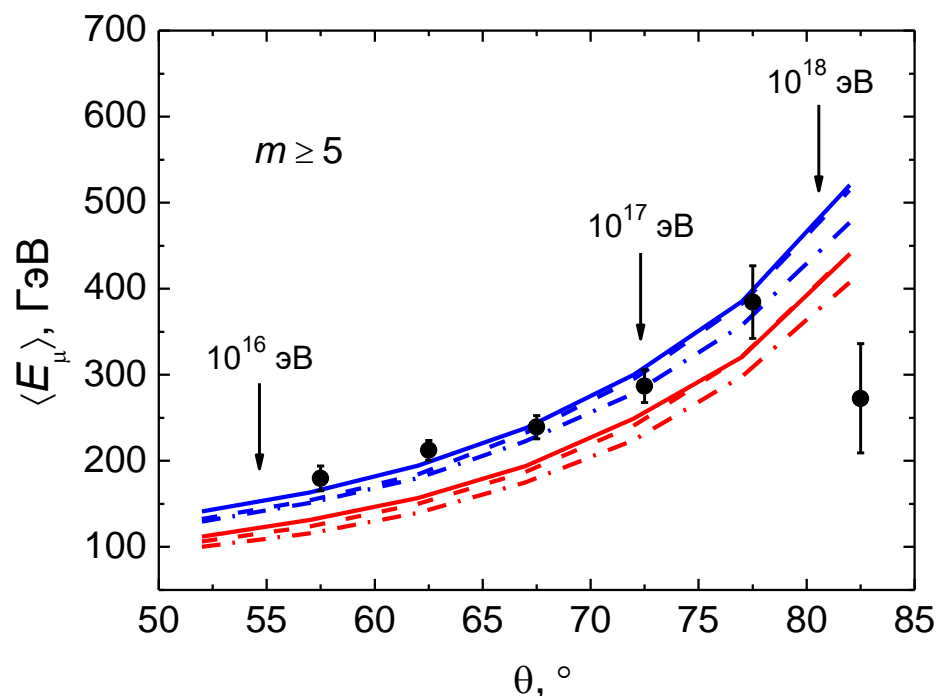


ЗАВИСИМОСТИ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ МЮОНОВ В ГРУППАХ ОТ ЗЕНИТНОГО УГЛА И ЛОКАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МЮОНОВ

Кривые – ожидаемые результаты, полученные на основе моделирования ливней в CORSIKA для моделей адронных взаимодействий **QGSJET-II-04** (сплошная), **SIBYLL-2.3c** (штриховая), **EPOS-LHC** (штрих-пунктирная).

Верхние и нижние кривые – расчеты для ядер железа и протонов ПКЛ, соответственно.

При расчете ожидаемых зависимостей использовались экспериментальные оценки наклона СЛПМ.



Для больших плотностей, соответствующих первичным энергиям выше 10^{17} эВ, превышение экспериментальных оценок средней энергии мюонов над расчетными для первичных протонов находится в пределах от 4.2σ до 4.8σ , а для ядер железа от 3.1σ до 3.7σ .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Реализован оригинальный подход к исследованию энергетических характеристик групп мюонов, основанный на измерении энерговыделения групп мюонов в черенковском калориметре НЕВОД с одновременным определением количества мюонов в координатно-трековом детекторе ДЕКОР.
- Осуществлен переход от непосредственно измеряемых удельных энерговыделений к средним энергиям мюонов, регистрируемых в составе групп в наклонных ШАЛ.
- Получены экспериментальные оценки средней энергии мюонов в группах в наклонных ШАЛ при зенитных углах от 55° до 85° , генерируемых первичными космическими лучами с энергиями от 10 до 1000 ПэВ.
- В интервале зенитных углов $65^\circ - 75^\circ$ для больших локальных плотностей, соответствующих энергиям первичных частиц выше 100 ПэВ, обнаружено увеличение средней энергии мюонов в группах по сравнению с результатами расчета с использованием post-LHC моделей адронных взаимодействий.
- Превышение экспериментальных оценок средней энергии мюонов в группах над расчетными значениями может свидетельствовать о включении нового механизма генерации высокоэнергичных мюонов при сверхвысоких энергиях ПКЛ.

Благодарю за внимание!