12-е Зацепинские чтения, 27 мая 2022 г.

Средняя энергия мюонов в группах при больших зенитных углах

Р.П. Кокоулин (НИЯУ МИФИ) от сотрудничества НЕВОД-ДЕКОР

E-mail: rpkokoulin@mephi.ru

"Мюонная загадка": растущий с энергией первичных частиц избыток мюонов в широких атмосферных ливнях по сравнению с результатами расчетов

Dembinski H.P. et al. EPJ Web Conf. 2019. V. 210. P. 02004 (Working Group on Hadronic Interactions and Shower Physics) Объединены данные 9 экспериментов по мюонам ШАЛ. Z-шкала:

InN^{sim}_{uFe} -



z = 0 для протонов; z = 1 для ядер железа Исследование мюонной загадки в комплексе НЕВОД. Основные установки:

Черенковский водный калориметр НЕВОД Координатно-трековый детектор ДЕКОР





2000 м³ объем, 546 ФЭУ, 91 КСМ

~ 70 м² площадь, 8 СМ по 8 плоскостей

Взаиморасположение детекторов комплекса



Что мы регистрируем? Группы мюонов в наклонных ШАЛ. Используется феноменология спектров локальной плотности мюонов (СЛПМ).



В индивидуальном событии с группой мюонов оценивается локальная плотность мюонов *D* в точке наблюдения. Распределение событий по оценке *D* (*F*(>*D*) или d*F*/d*D*) формирует СЛПМ.

Отклик координатно-трекового детектора ДЕКОР для события с группой мюонов



В качестве водораздела между экспериментом и расчетом используются спектры локальной плотности мюонов.

Экспериментальные спектры получаются путем восстановления dF(D,θ)/dD (в виде, не зависящем от детектора) из экспериментальных распределений характеристик событий N (m, θ, φ).

Ожидаемые спектры dF(D,θ)/dD рассчитываются на основе моделирования мюонной компоненты ШАЛ с помощью CORSIKA.

Ожидаемые СЛПМ зависят от предположений о <u>модели</u> взаимодействия адронов, о первичном <u>составе</u> и энергетическом <u>спектре</u> первичных частиц.

После этого проводится сопоставление экспериментальных и расчетных СЛПМ.

Спектры локальной плотности мюонов (ICRC 2021)

Точки: эксперимент (130 тыс. событий)

Кривые: расчет

- Кусочно-степенная аппроксимация первичного спектра.
- Два варианта состава: чисто протоны и чисто ядра железа.
- Две модели взаимодействия:
 QGSJET II-04 и SIBYLL 2.3с (сплошная и штриховая).

Стрелки указывают типичные энергии первичных частиц.



Сравнение в z-шкале, введенной группой WHISP:

$$z = (\log F^{\text{obs}} - \log F_{\text{p}}^{\text{sim}}) / (\log F_{\text{Fe}}^{\text{sim}} - \log F_{\text{p}}^{\text{sim}})$$

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



Быстрый рост вблизи 10¹⁷ эВ и выше.

Z ~ 1 при 10¹⁸ эВ (чистое железо?) Противоречит измерениям X_{max} !

Измерение энергетических характеристик мюонов в группах

Избыток мюонов может быть объяснен как космофизическими, так и ядернофизическими причинами. Для разделения этих гипотез необходимо исследовать энергетические характеристики многомюонных событий и их изменения с энергией первичных частиц.

В ЭК НЕВОД реализован новый подход к исследованию энергетических характеристик мюонной компоненты ШАЛ, основанный на измерении энерговыделения групп мюонов в черенковском калориметре НЕВОД с одновременным определением числа мюонов в группах и направления их прихода по данным ДЕКОР.

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

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

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

Экспериментальная установка и событие с группой мюонов



Мера энерговыделения: суммарный сигнал Σ всех сработавших ФЭУ НЕВОД

Оценка плотности мюонов: $D = (m - \beta) / S_{det}; \beta$ - наклон СЛПМ

В первом приближении, энерговыделение пропорционально плотности мюонов в событии. Поэтому для анализа мы используем удельное энерговыделение Σ / D, нормированное на плотность мюонов.

Статистика: июль 2013 – март 2021, ~ 53 тыс. часов, ~ 90 тыс. событий.

Калибровка математической модели НЕВОД в Geant4 по отклику на одиночные окологоризонтальные мюоны (Е~ 100 ГэВ)



Зависимость среднего отклика КСМ от расстояния до трека мюона.

Распределение событий по полному числу фотоэлектронов.

Переход от среднего удельного энерговыделения к средней энергии мюонов в группах

Черные точки – измеренное удельное энерговыделение групп, красные – моделирование для групп мюонов с энергией 100 ГэВ Средние потери энергии мюонов в воде, нормированные к потерям при Еµ = 100 ГэВ

$$\mathbf{R} = \left\langle \Sigma \,/\, D \right\rangle^{\text{obs}} \,/\, \left\langle \Sigma \,/\, D \right\rangle^{\text{sim}}_{100 \,\text{GeV}}$$



Зависимости средней энергии мюонов в группах от зенитного угла и локальной плотности мюонов (для θ = 65°-75°)

Кривые на рисунках: результаты моделирования мюонной компоненты ШАЛ, образованных первичными протонами (нижние пары кривых) и ядрами железа (верхние пары) в программе CORSIKA. Использованные модели адронных взаимодействий: QGSJET-II-04 (сплошные кривые) и SIBYLL-2.3c (штриховые).



В области *E*₀ > 10¹⁷ эВ имеется указание на превышение средней энергии мюонов в группах по сравнению с предсказаниями рассмотренных моделей (~ 3.8 о над расчетом для первичных протонов и ~ 2.6 о для ядер железа).

Заключение

- На ЭК НЕВОД проводятся исследования, направленные на решение мюонной загадки – растущего с энергией первичных частиц избытка мюонов в ШАЛ.
- Реализован оригинальный подход к исследованию энергетических характеристик групп мюонов, основанный на измерении энерговыделения групп мюонов в ЧВК с одновременным определением их направления и количества мюонов в ДЕКОР.
- Разработана методика перехода от измеряемых удельных энерговыделений к средним энергиям мюонов, регистрируемых в составе групп.
- Впервые получены экспериментальные оценки средних удельных энерговыделений и средней энергии мюонов в группах в наклонных ШАЛ, генерируемых первичными космическими лучами с энергиями от 10 до 1000 ПэВ.
- Для больших зенитных углов и локальных плотностей, соответствующих энергиям первичных частиц выше 10¹⁷ эВ, обнаружено указание на 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.

Спасибо за внимание!