

13-е Черенковские чтения “Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц”, ФИАН, Москва

Эксперимент НЕВОД-ДЕКОР по измерению энерговыделения групп мюонов космических лучей

Е.А. Юрина от коллаборации НЕВОД-ДЕКОР

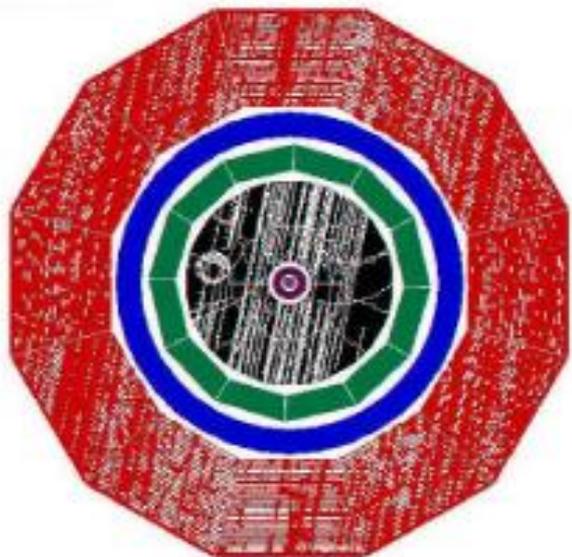
Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

14 апреля 2020

Содержание

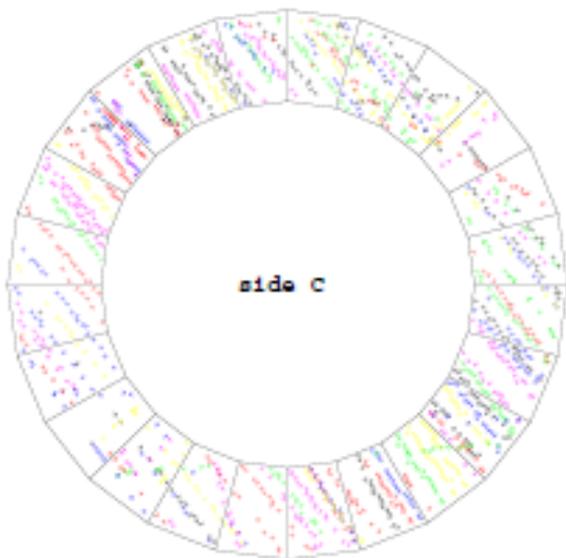
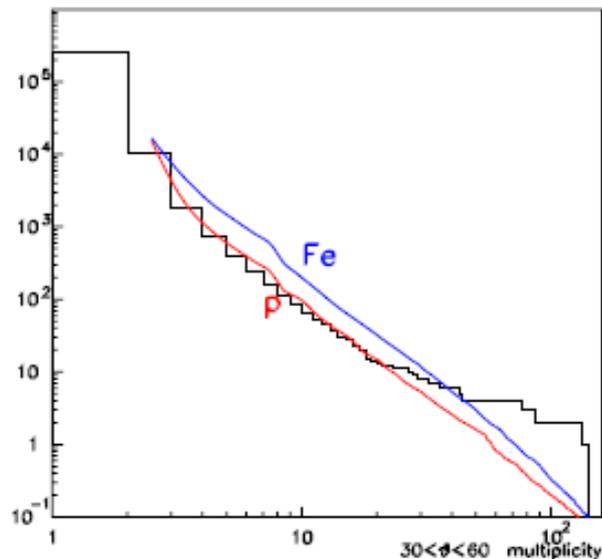
- Мюонная загадка в космических лучах
- Подход к решению мюонной загадки
- Экспериментальные данные 2012-2013 и предварительные результаты
- Экспериментальные данные 2013-2019 (новая статистика) и результаты анализа
- Заключение

Мюонная загадка в космических лучах



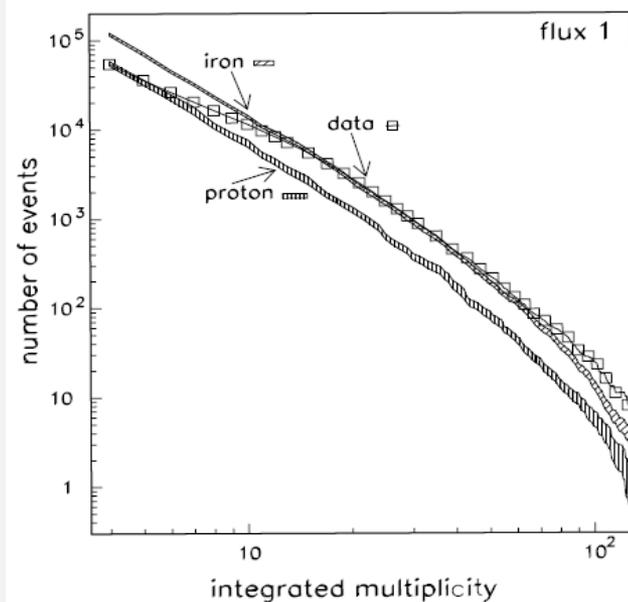
ALEPH

C. Grupen et al.,
Nucl. Phys. B (Proc.
Suppl.) 175-176
(2008) 286



DELPHI

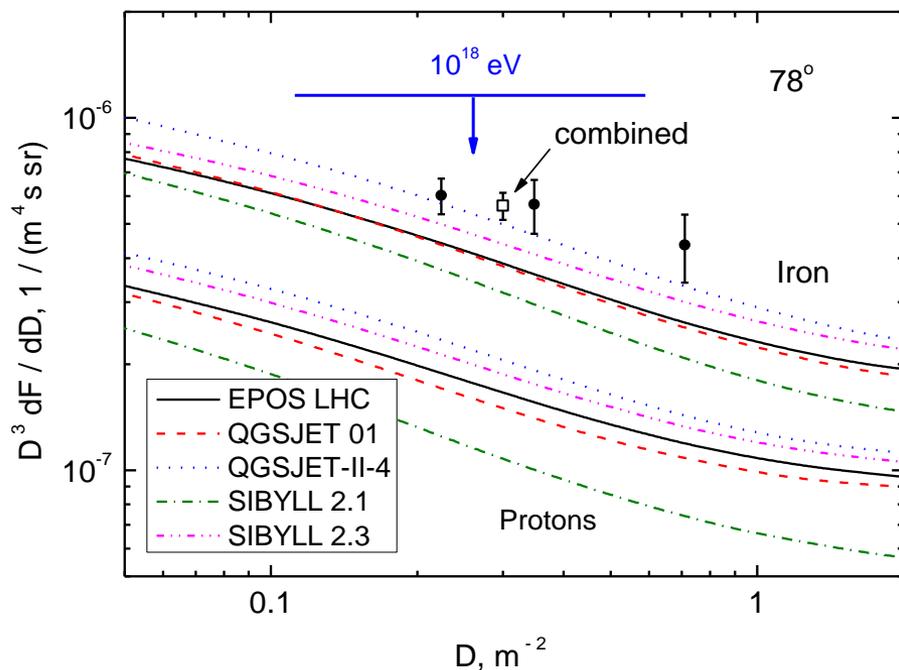
J. Abdallah et al.,
Astroparticle
Physics 28 (2007)
273



Мюонная загадка в космических лучах

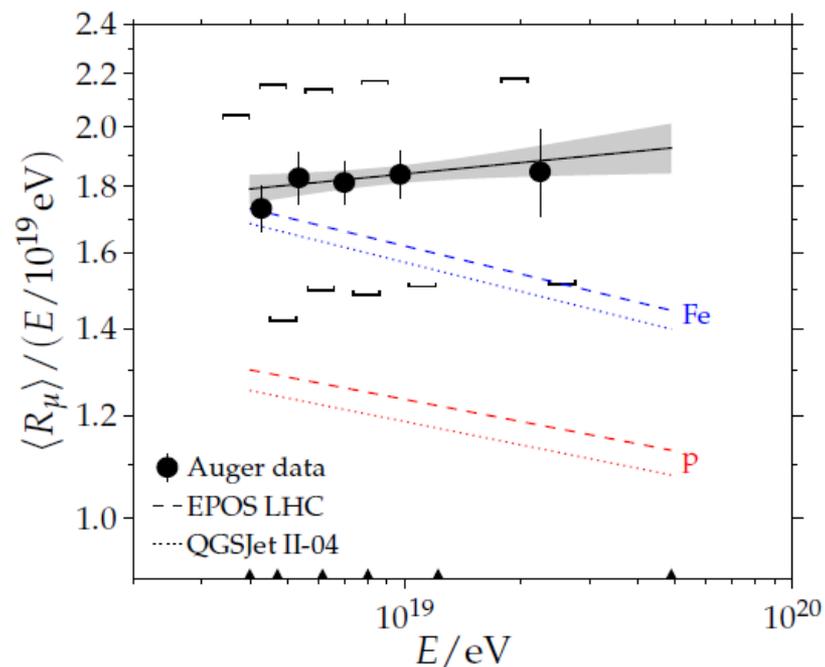
Данные ДЕКОР 2002-2016

A. G. Bogdanov Astropart. Phys., 98 (2018) 13–20



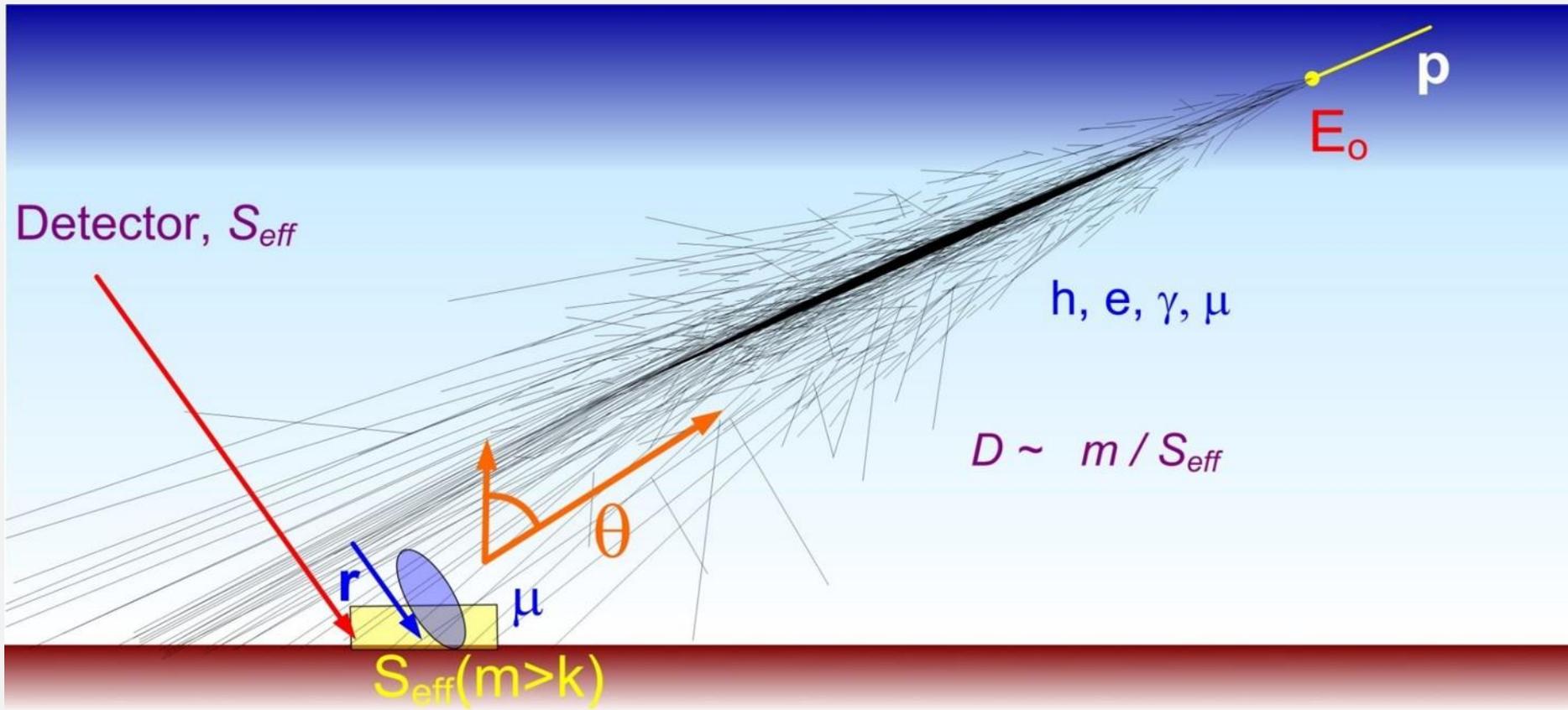
Pierre Auger Observatory

A. Aab et al. Phys. Rev. D 91, 032003 (2015)



Подход к анализу наклонных мюонных групп

A.G. Bogdanov et al., Physics of Atomic Nuclei. 2010. V. 73. N 11. P. 1852



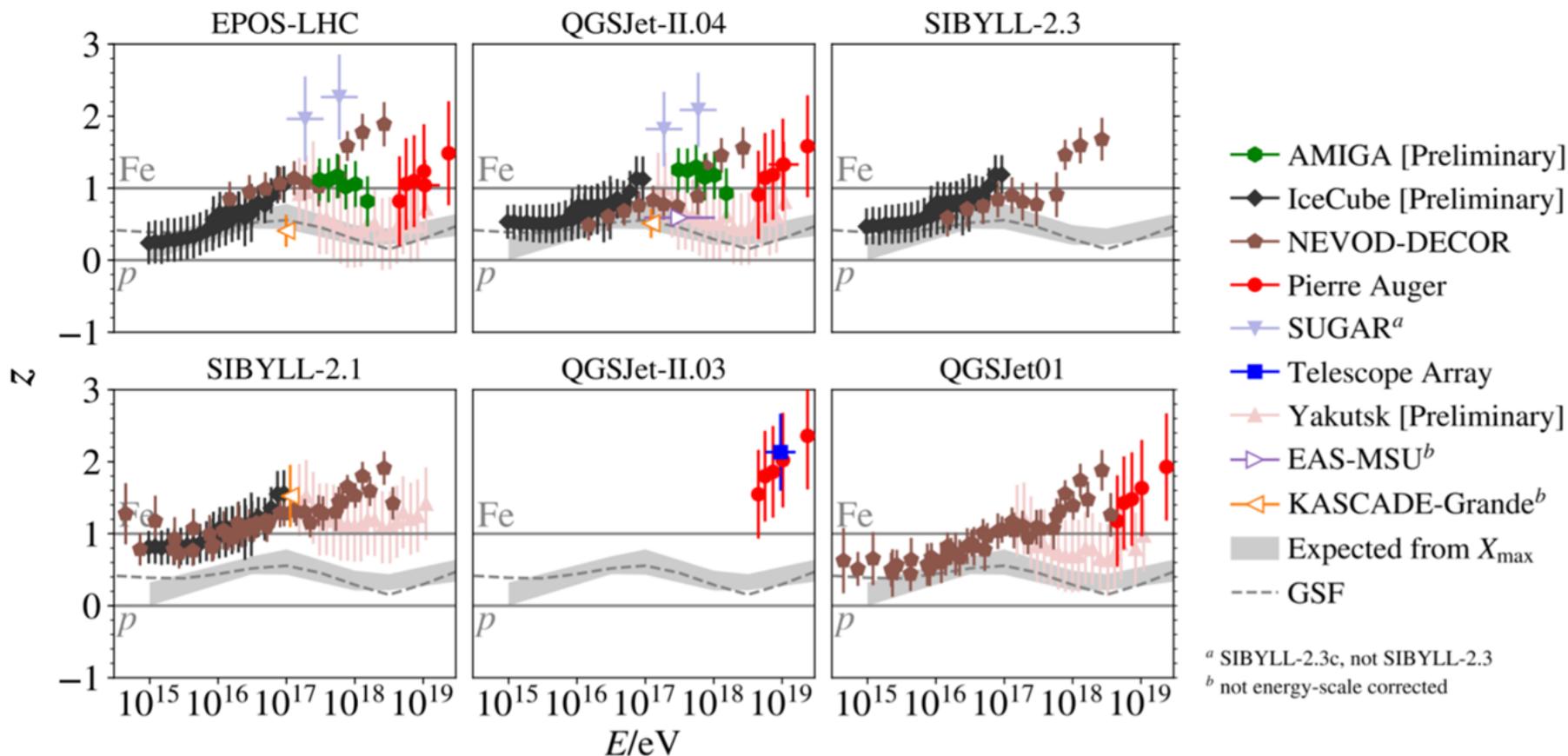
В индивидуальном событии с группой мюонов измеряется локальная плотность мюонов D под зенитным углом θ . По величинам D и θ оценивается величина энергии первичных частиц, ответственных за такие события.

Мюонная загадка в космических лучах

Объединение мюонных измерений

Dembinski H.P. et al. <https://arxiv.org/pdf/1902.08124.pdf>

$$z = \frac{\ln(N_{\mu}^{\text{det}}) - \ln(N_{\mu p}^{\text{det}})}{\ln(N_{\mu\text{Fe}}^{\text{det}}) - \ln(N_{\mu p}^{\text{det}})}$$

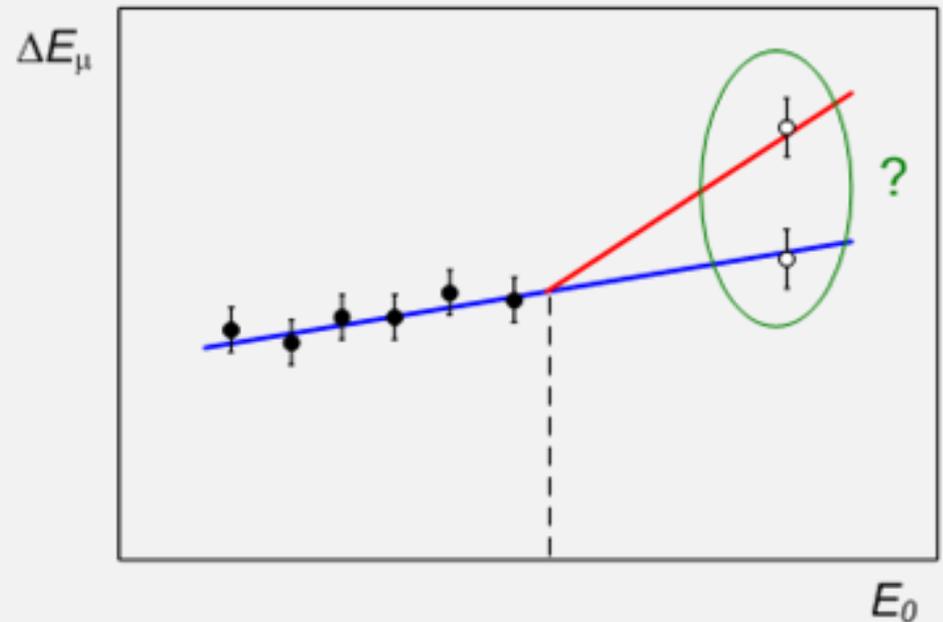


Подход к решению мюонной загадки

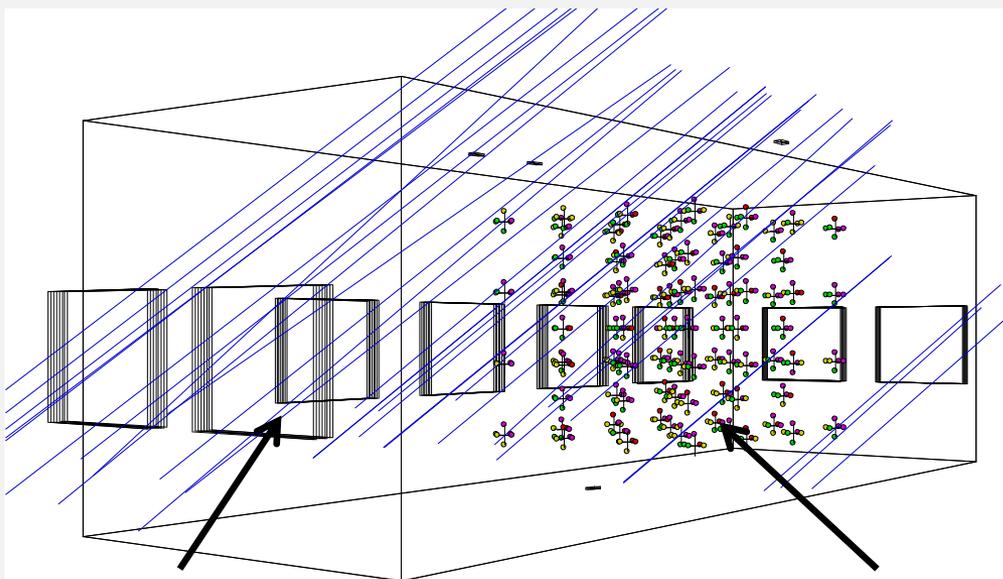
Чтобы решить “мюонную загадку”, необходимы измерения энергетических характеристик мюонной компоненты. Возможный подход: измерение энергосвыделения групп мюонов в веществе детектора. Средние энергетические потери мюонов в веществе практически линейно зависят от энергии мюонов:

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

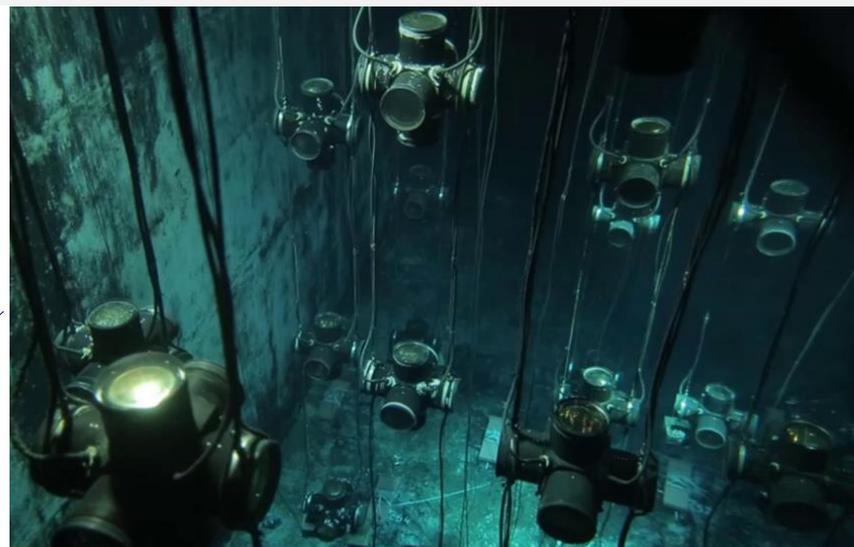
Если появляется избыток мюонов высоких энергий, это должно отразиться на зависимости энергосвыделения от энергии первичных частиц.



Экспериментальная установка



Координатно-трековый детектор
ДЕКОР



Черенковский водный калориметр НЕВОД (2000 м³)

Локальная плотность мюонов в событии и направление их прихода измеряются по данным ДЕКОР. Энергия первичной частицы оценивается по этим данным. Энерговыделение групп мюонов измеряется в черенковском водном калориметре НЕВОД.

Данные первой экспериментальной серии (2012-2013)

03.05.2012 – 20.03.2013; живое время: 5542 ч

$m \geq 5$, $\theta \geq 40^\circ$, два 60-градусных сектора по φ – 24496 событий.

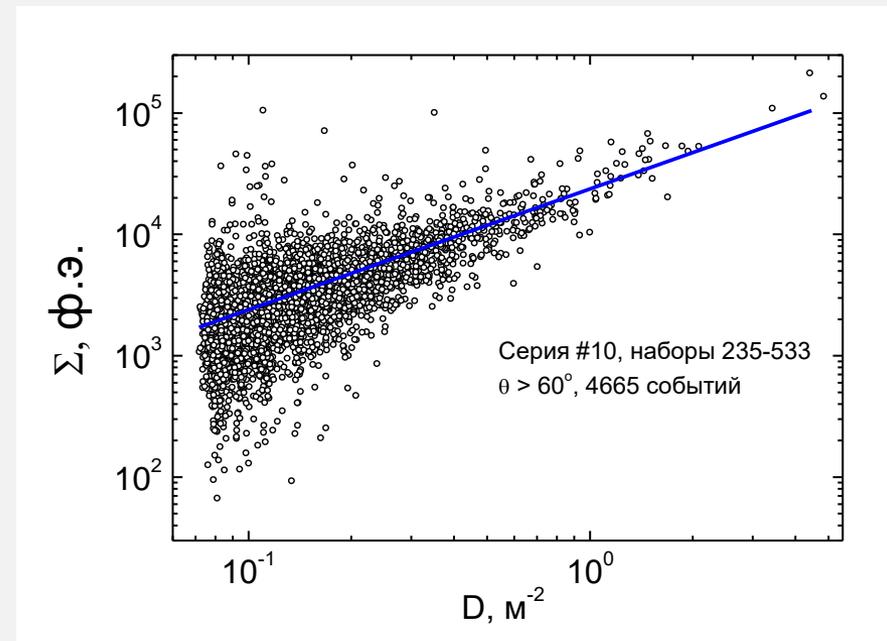
Локальная плотность мюонов рассчитывалась по формуле:

$$D = (m - \beta) / S_{\text{дет}}$$

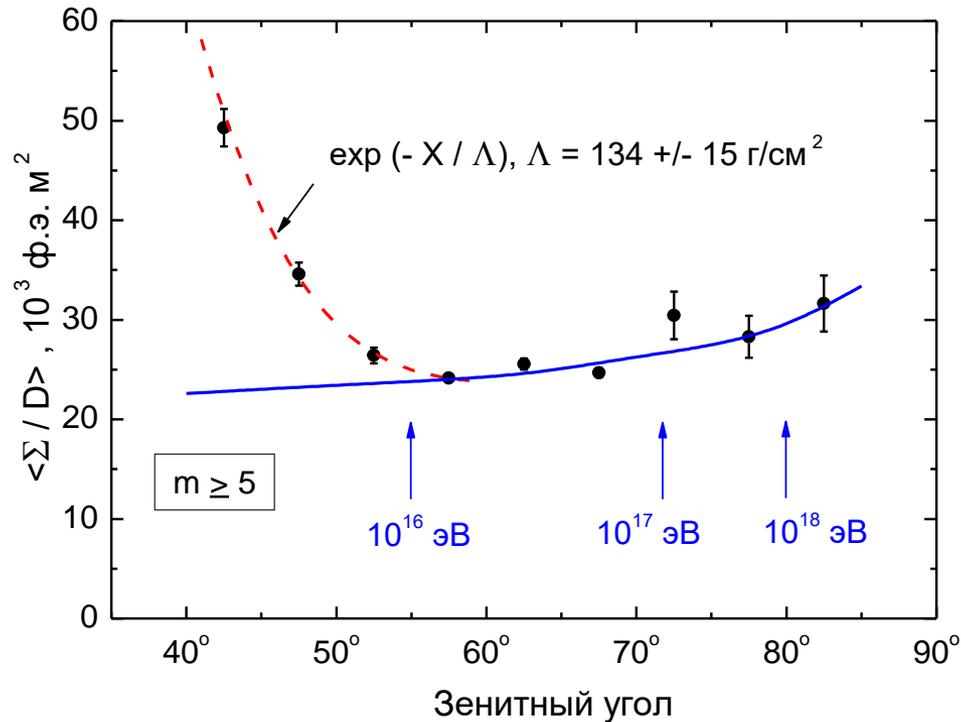
где m – количество мюонов в группе, $\beta \approx 2.1$ – наклон интегрального СЛПМ, $S_{\text{дет}}$ – эффективная площадь СМ ДЕКОР для заданного направления прихода группы.

Суммарное энерговыделение (сумма сигналов всех ФЭУ Σ в фотоэлектронах) пропорционально локальной плотности мюонов, поэтому в дальнейшем рассматриваем удельное энерговыделение Σ/D (отклик нормированный на плотность мюонов).

Корреляции суммарного отклика ЧВК с локальной плотностью мюонов



Зависимость среднего удельного энергосодержания от зенитного угла (данные 2012-2013)



При умеренных зенитных углах остаточный вклад электрон-фотонной и адронной компонент ШАЛ в отклик неэкранированного водного калориметра является значительным. При $\theta \geq 55^\circ$ остаются практически чистые мюоны.

Экспериментальные данные 2013-2019 (новая статистика)

Две серии измерений (с июля 2013 г. по апрель 2019 г.)

“Живое” время измерений составило 39131 ч

$m \geq 5$, $\theta \geq 55^\circ$, два 60-градусных сектора по ϕ : 66571 событие

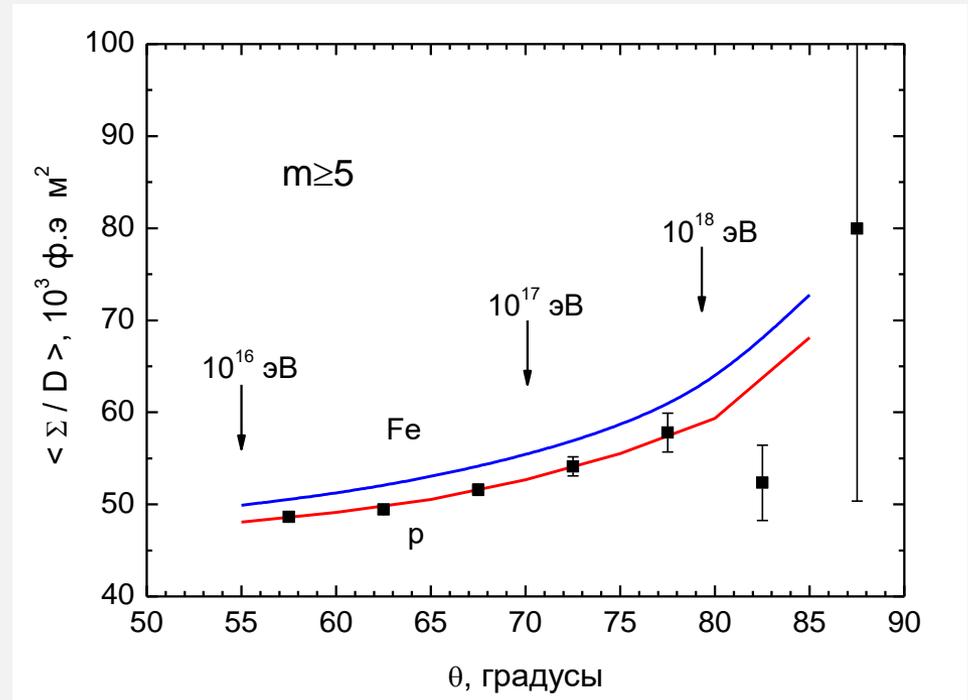
Новая система водоочистки: длина поглощения черенковского света увеличилась в несколько раз и достигла около 10 м (больше, чем поперечный размер резервуара с водой). Как результат:

- Количество зарегистрированных фотоэлектронов для одиночных мюонов и групп мюонов увеличилось более, чем в два раза;
- В то же время, некоторые нетривиальные эффекты (такие как вклад света, отраженного от поверхности воды в ЧВК) стали существенными.

Зависимость среднего удельного энерговыделения от зенитного угла (данные 2013-2019)

Кривые представляют ожидаемые зависимости средних потерь энергии мюонов в группах от зенитного угла (CORSIKA, QGSJet II-4 + FLUKA). Кривая протонов нормирована на данные между зенитными углами 55° - 65°.

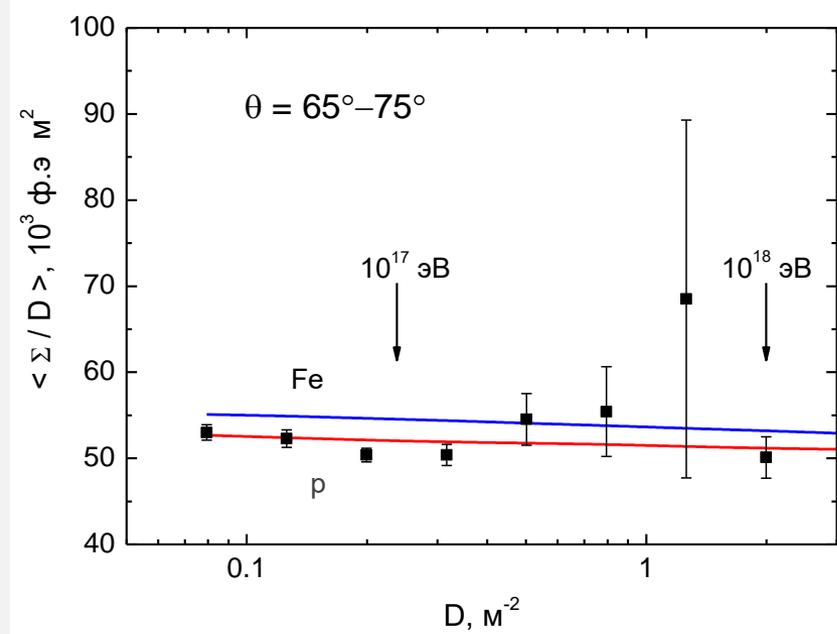
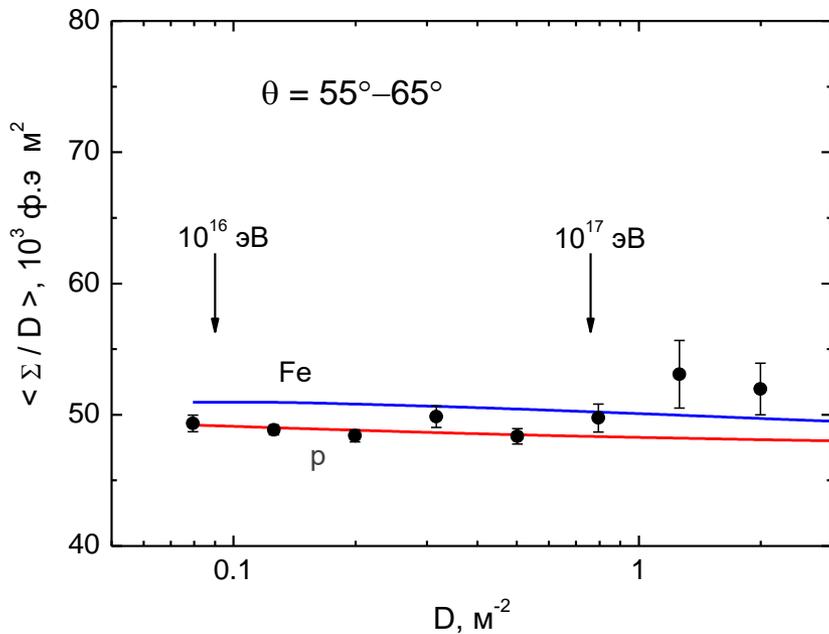
Данные скорректированы на вклад света, отраженного от поверхности воды (на основе моделирования Geant4).



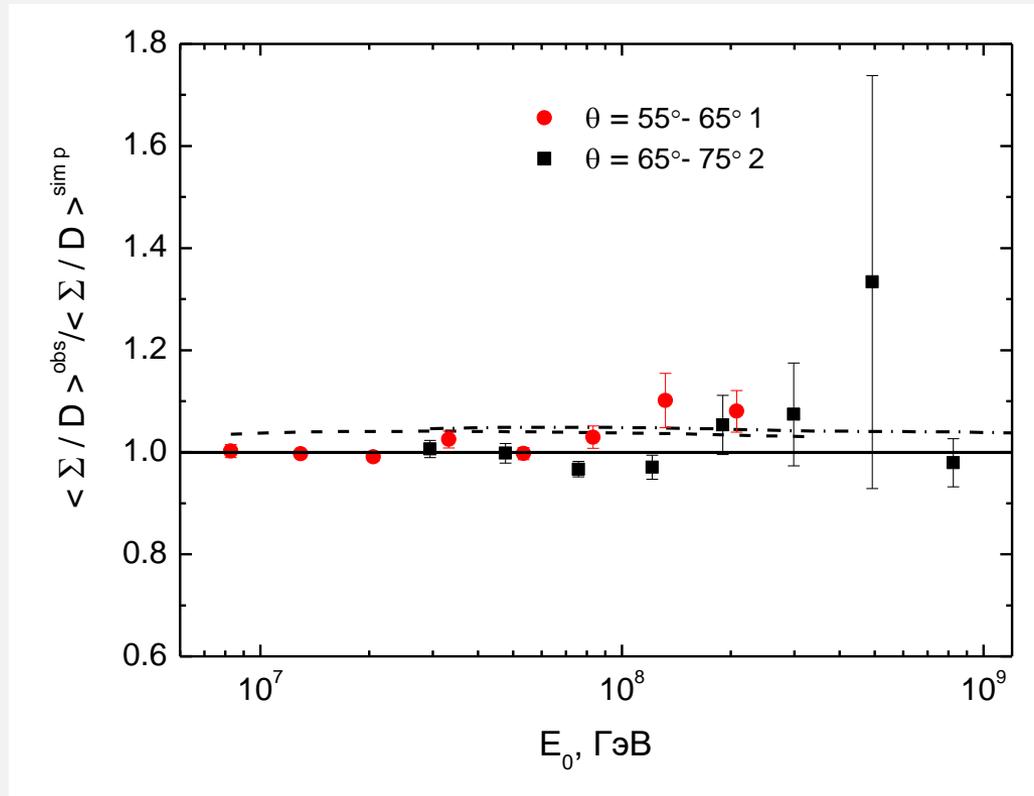
Увеличение энерговыделения с увеличением зенитного угла отражает увеличение средней энергии мюонов в группах.

Зависимость среднего удельного энергосвечения от локальной плотности мюонов (данные 2013-2019)

Результаты моделирования показывают тенденцию к медленному уменьшению энергии мюонов в группах с увеличением энергии первичных частиц. Напротив, данные указывают на некоторое увеличение среднего удельного энергосвечения при больших плотностях мюонов (что соответствует эффективным энергиям первичных частиц более 10^{17} эВ).



Зависимость отношения измеренного удельного энергосвечения к моделированному энергосвечению для первичных протонов от энергии первичной частицы



Отношения экспериментального удельного энергосвечения (1 и 2: интервалы зенитных углов $55^\circ \leq \theta < 65^\circ$ и $65^\circ \leq \theta < 75^\circ$) к моделированному для первичных протонов. Пунктирная и штрихпунктирная кривые – отношения ожидаемого удельного энергосвечения для ядер железа к энергосвечению для первичных протонов для средних значений зенитных углов $\theta = 59^\circ$ и $\theta = 69^\circ$ соответственно.

Заключение

1. Проводятся исследования энерговыделения наклонных групп мюонов широких атмосферных ливней в широком диапазоне энергий первичных частиц 10^{16} - 10^{18} эВ на установках НЕВОД-ДЕКОР.
2. Получена зависимость среднего удельного энерговыделения (нормированного на плотность мюонов) от зенитного угла. Измеренная зависимость подтверждает рост средней энергии мюонов в группах с увеличением зенитного угла и хорошо согласуется с результатами моделирования на основе программы CORSIKA.
3. В зависимости среднего удельного энерговыделения от локальной плотности мюонов обнаружено увеличение среднего удельного энерговыделения групп мюонов для первичных энергий между 10^{17} и 10^{18} эВ, что свидетельствует о возрастании средней энергии мюонов в группах в этой области энергий по сравнению с ожиданием.

Благодарю за внимание!