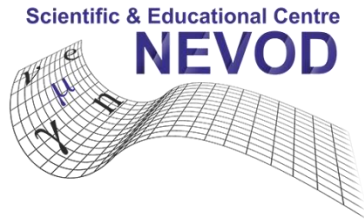


Научная сессия Секции ядерной физики ОФН РАН,  
1-5 апреля 2024, ОИЯИ, Дубна, Россия



INAF



# Современный статус мюонной загадки в космических лучах по данным эксперимента НЕВОД-ДЕКОР

А.Г. Богданов<sup>1</sup>, Н.С. Барбашина<sup>1</sup>, В.С. Воробьев<sup>1</sup>, Е.А. Задеба<sup>1</sup>, В.В. Киндин<sup>1</sup>,  
Р.П. Кокоулин<sup>1</sup>, К.Г. Компаниец<sup>1</sup>, А.Ю. Коновалова<sup>1</sup>, G. Mannocchi<sup>2</sup>, А.А. Петрухин<sup>1</sup>,  
G. Trinchero<sup>2</sup>, С.С. Хохлов<sup>1</sup>, В.В. Шутенко<sup>1</sup>, Е.А. Юрина<sup>1</sup>, И.И. Яшин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия,

<sup>2</sup> Osservatorio Astrofisico di Torino – INAF, Italy

# Установка НЕВОД-ДЕКОР

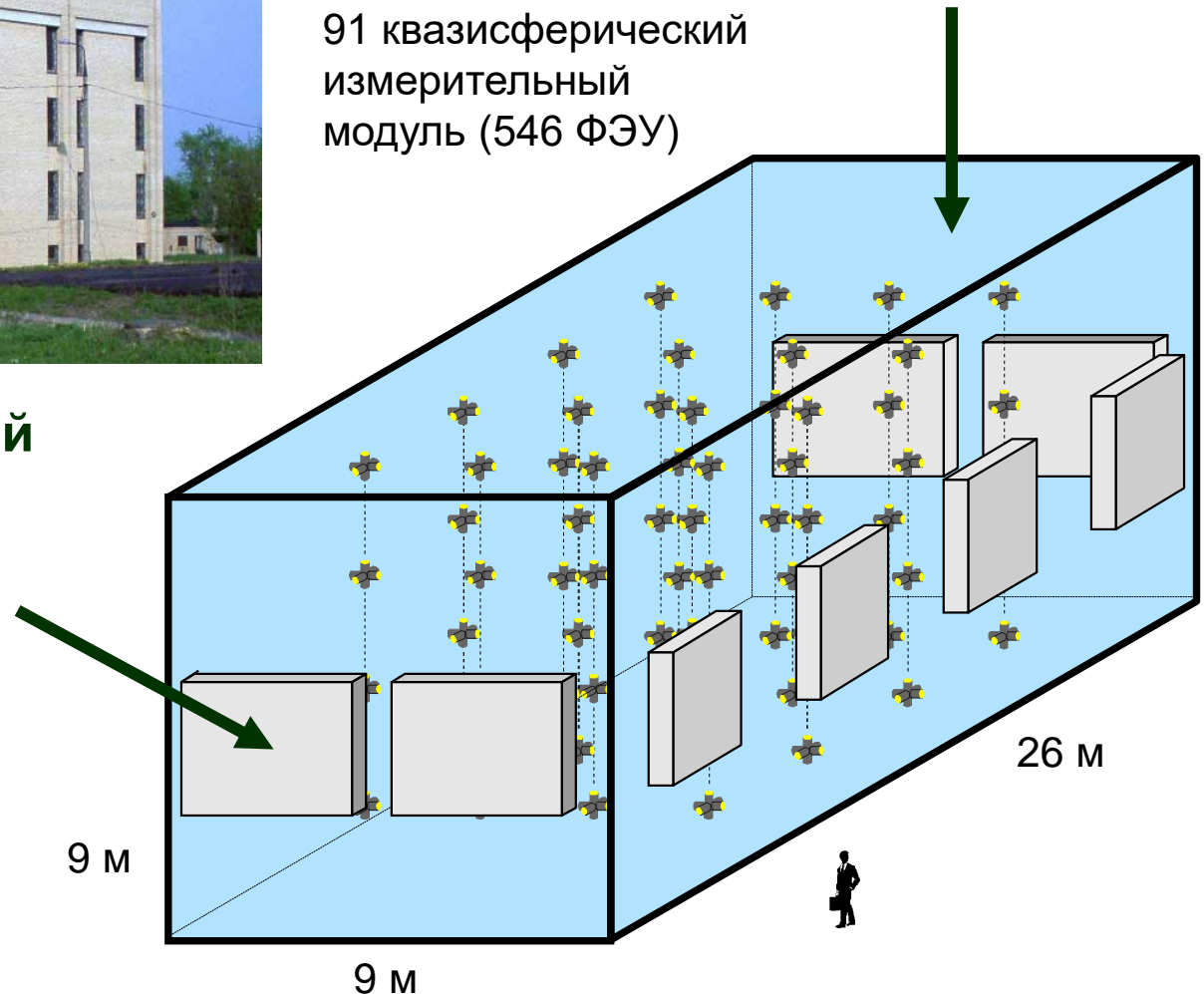


**Черенковский водный  
детектор НЕВОД  
(объем 2000 м<sup>3</sup>)**

91 квазисферический  
измерительный  
модуль (546 ФЭУ)

**Координатно-трековый  
детектор ДЕКОР  
(площадь 70 м<sup>2</sup>)**

8 вертикальных  
супермодулей  
(стримерные трубки)



# Супермодули детектора ДЕКОР в галереях вокруг водного объема детектора НЕВОД



Каждый СМ имеет эффективную площадь  $8.4 \text{ м}^2$  и состоит из 8 плоскостей по 16 камер стримерных трубок. Длина камер 3.5 м, сечение внутренних трубок  $9 \times 9 \text{ мм}^2$ . Плоскости оснащены системой внешних стрипов для считывания сигналов по двум координатам.



# Регистрирующая система черенковского водного калориметра НЕВОД



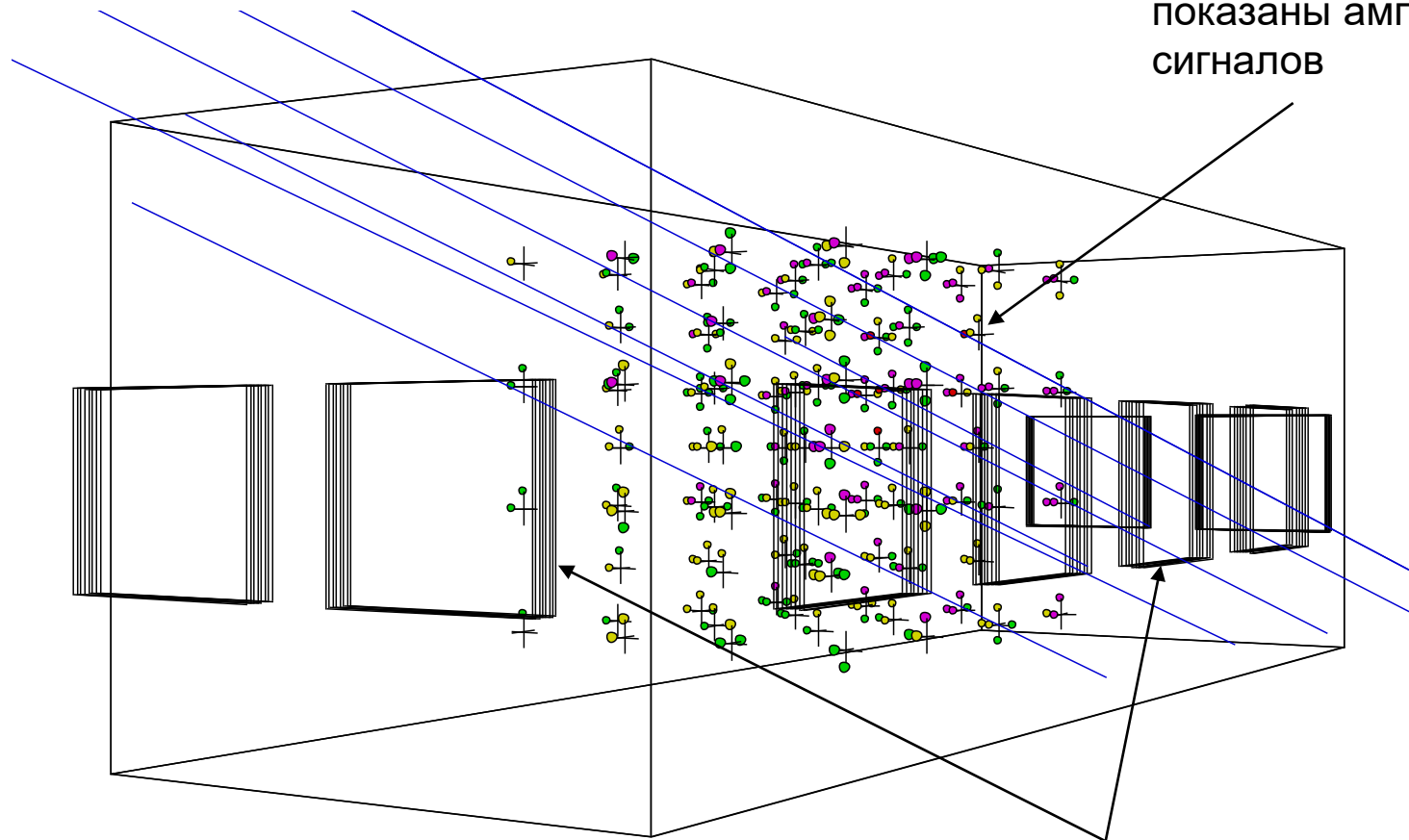
Пространственная решетка сформирована из 25 вертикальных гирлянд по 3 или 4 квазисферических модуля. Один КСМ состоит из 6 ФЭУ-200 с плоским фотокатодом ( $\varnothing$  15 см), ориентированных вдоль осей ортогональной системы координат. Динамический диапазон измерений каждого ФЭУ (от 1 до  $10^5$  фотоэлектронов) обеспечивается двухдиодным съемом сигналов и позволяет измерять энергосвыделения групп мюонов.



# Геометрическая реконструкция события с группой мюонов, попавшей в установку НЕВОД-ДЕКОР

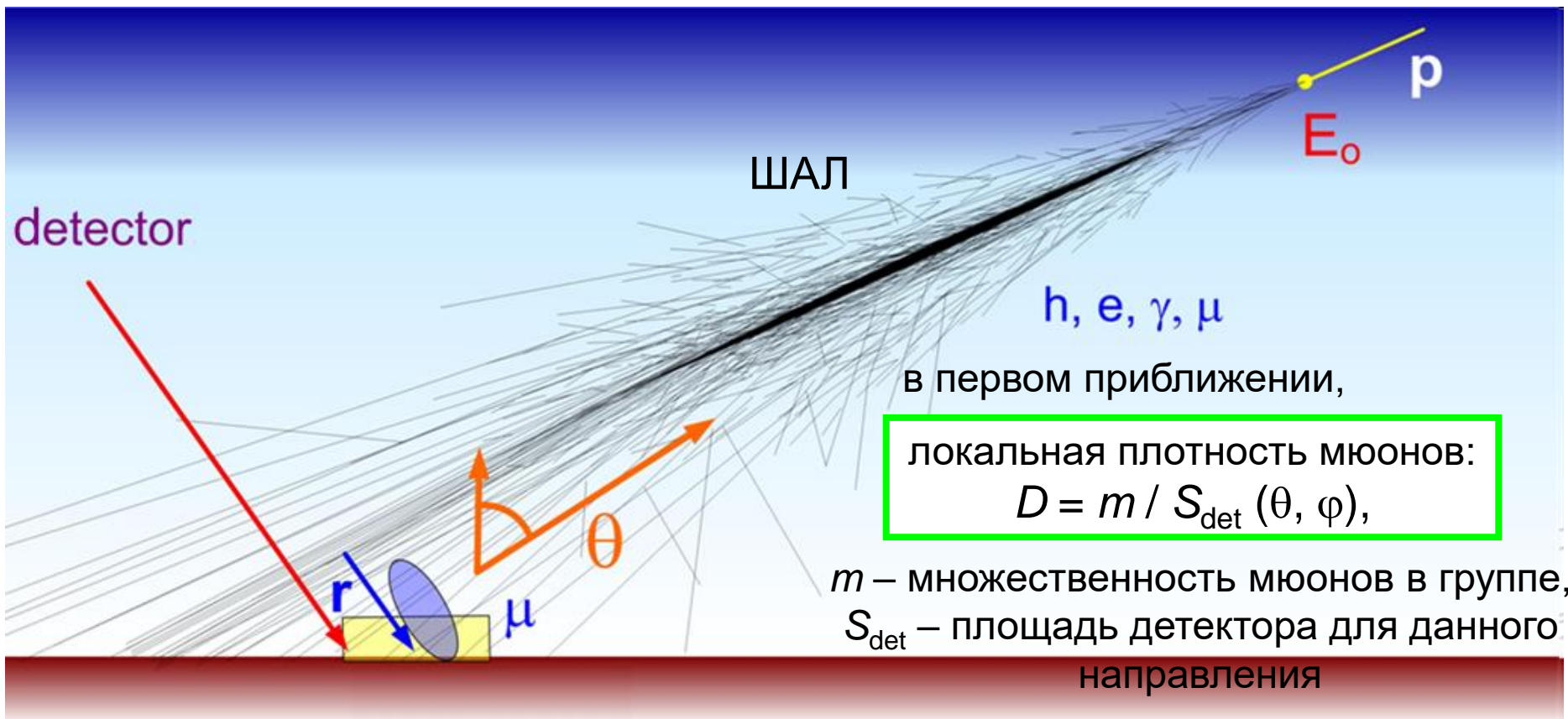
треки мюонов (линии)

сработавшие ФЭУ  
(кружки), цветом  
показаны амплитуды  
сигналов



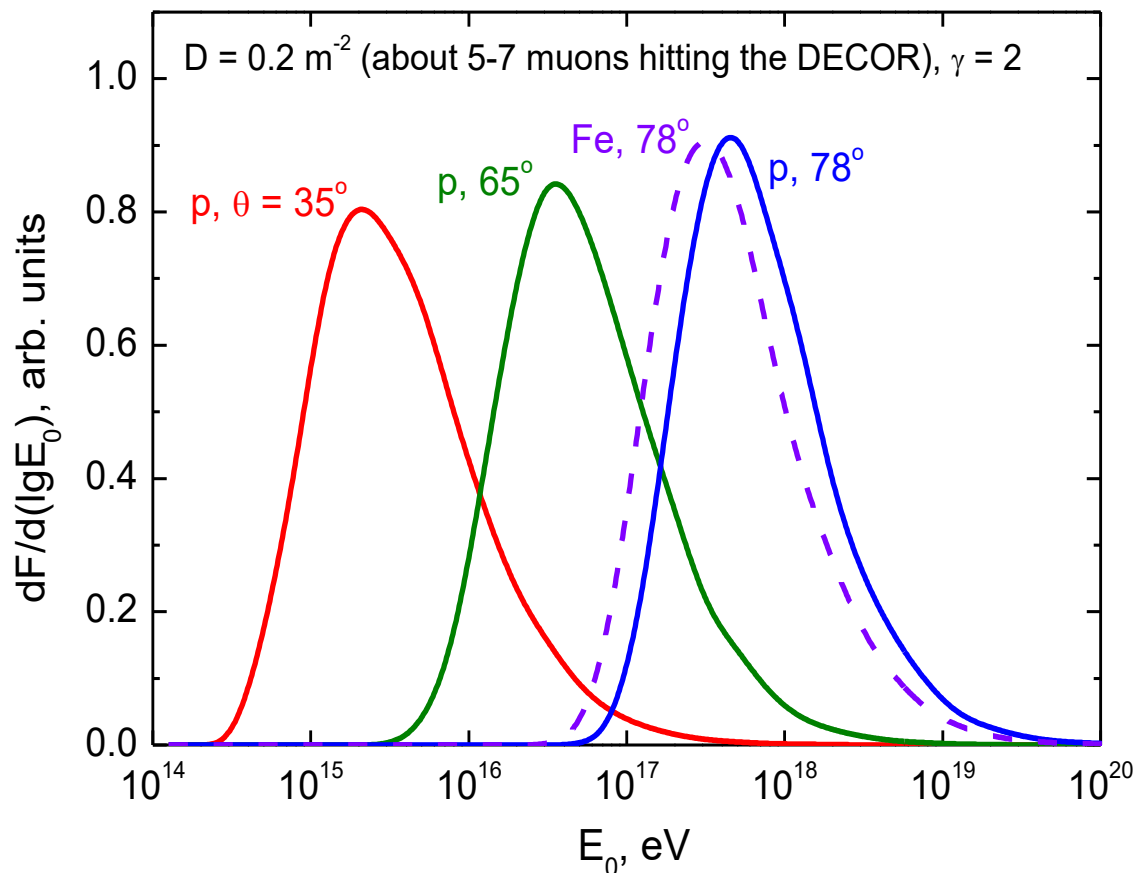
СМ детектора ДЕКОР  
(прямоугольники)

# Новый подход к анализу данных по группам мюонов: метод спектров локальной плотности (СЛПМ)



В событии с группой мюонов оценивается локальная плотность мюонов  $D$  в точке наблюдения, так как типичные размеры мюонной компоненты ШАЛ значительно превышают размеры установки. Распределение событий по  $D$  и формирует СЛПМ.

# Распределение энергий ПКЛ, дающих вклад в события с заданной плотностью мюонов при различных зенитных углах



При одинаковой плотности мюонов разным зенитным углам соответствуют на порядки отличающиеся характерные энергии первичных частиц КЛ, дающих вклад в отбираемые события, поскольку разлет мюонов в группах увеличивается с ростом зенитного угла.



# Экспериментальные данные установки НЕВОД-ДЕКОР

Период измерений: **май 2012 – июль 2023**

Критерии отбора групп мюонов космических лучей:

множественность  $m \geq 5$  и зенитные углы  $\theta \geq 55^\circ$  – **129173 соб.**

(75238 ч “живого” времени);

**дополнительно,**

$m \geq 5$ ,  $40^\circ \leq \theta < 55^\circ$  – **30 375 соб.** (6 324 ч),

$m = 4$ ,  $40^\circ \leq \theta < 55^\circ$  – **4 130 соб.** (1 043 ч).

два сектора азимутальных углов ( $105$ - $165^\circ$  и  $195$ - $255^\circ$ ) –

6 из 8 супермодулей ДЕКОРa экранированы водным объемом НЕВОДа

Процедура отбора событий:

- триггерный уровень (совпадение сигналов 3-х разных СМ в пределах 250 нс);
- программная реконструкция и отбор (соблюдение условия квази-параллельности треков в пределах  $5^\circ$  конуса);
- окончательная классификация событий и подсчет треков операторами.

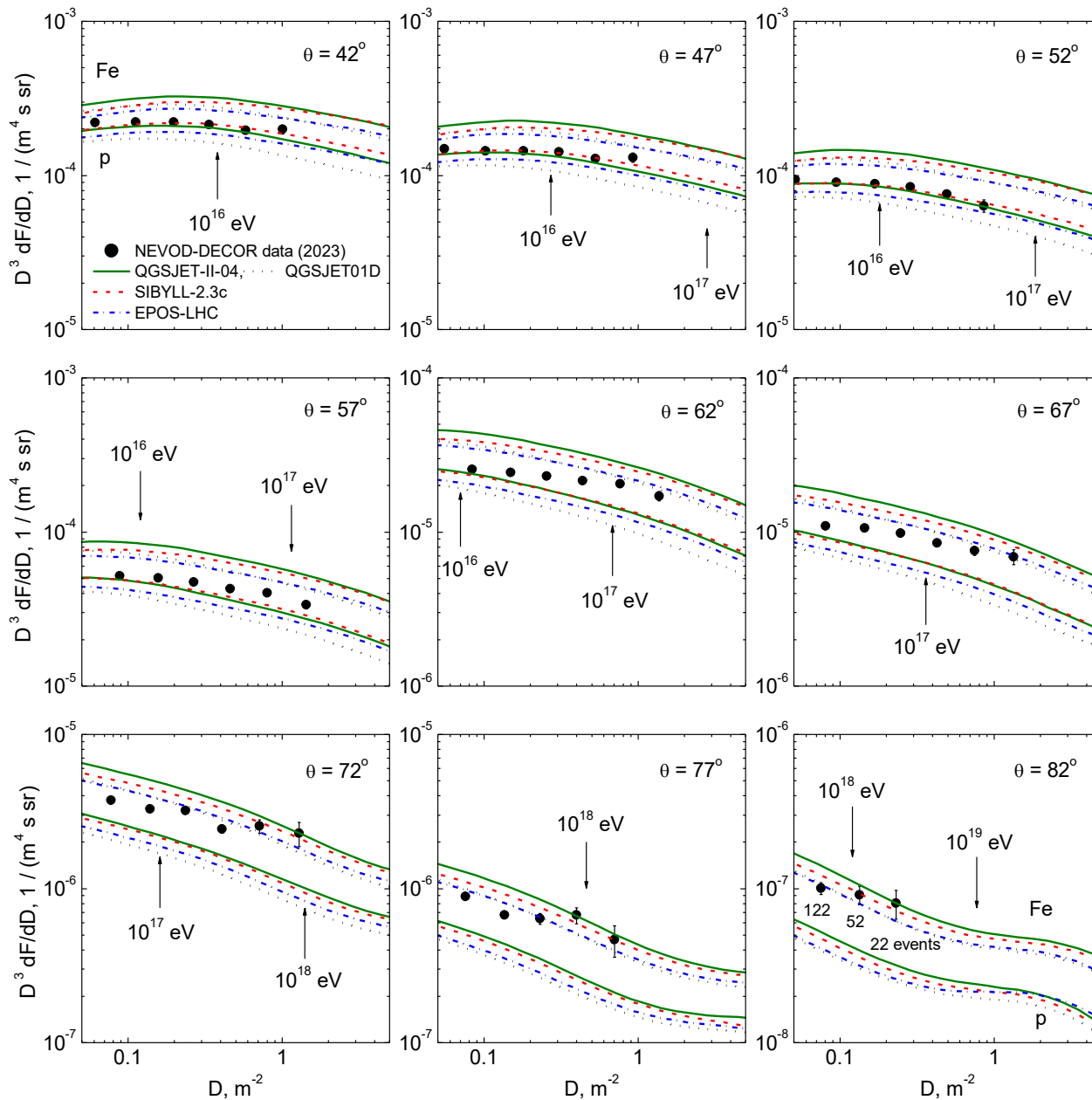
# Этапы анализа данных по локальной плотности мюонов

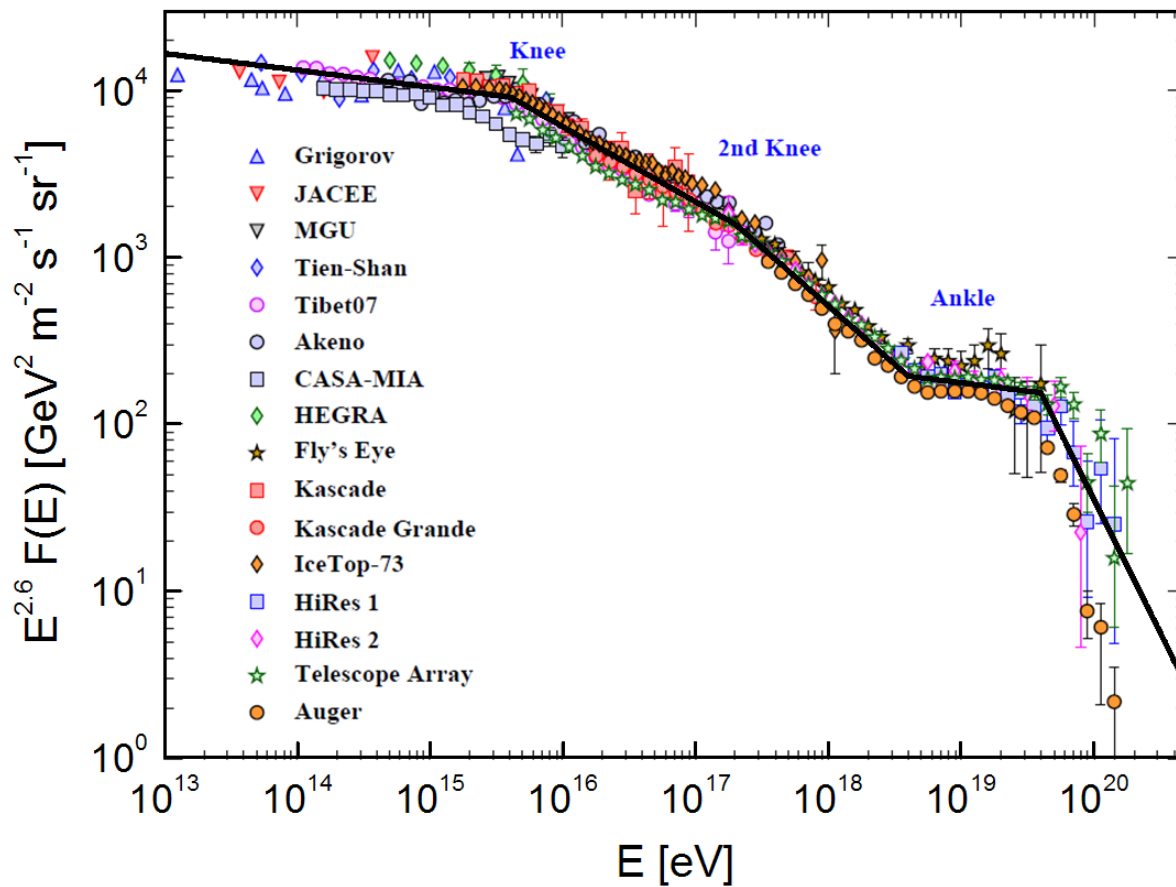
Восстановление экспериментальных СЛПМ  $dF(D,\theta)/dD$  из измеренных распределений характеристик событий  $N(m,\theta,\varphi)$  с учетом геометрии, флуктуаций, эффективности регистрации, триггерных условий и др.

Получение расчетных СЛПМ в виде свертки модели спектра ПКЛ и функций пространственного распределения (ФПР) мюонов, которые вычисляются на основе моделирования ШАЛ с помощью программы CORSIKA для заданных энергий, зенитных углов, моделей адронных взаимодействий и предположений о массовом составе ПКЛ.

Сопоставление экспериментальных и расчетных СЛПМ.

# СЛПМ для различных зенитных углов

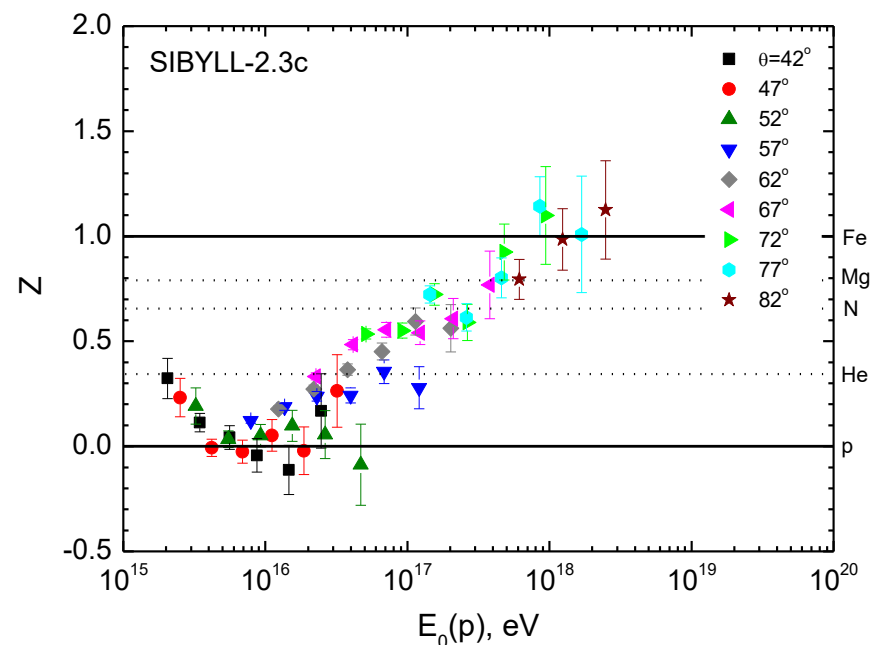
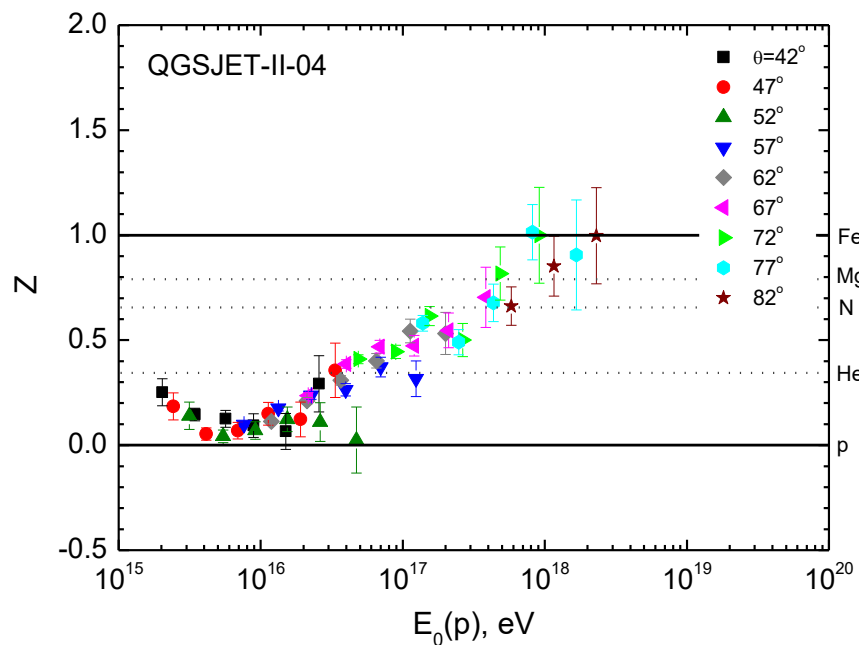




*The all-particle spectrum, PDG 2016*



# Сопоставление СЛПМ для различных зенитных углов

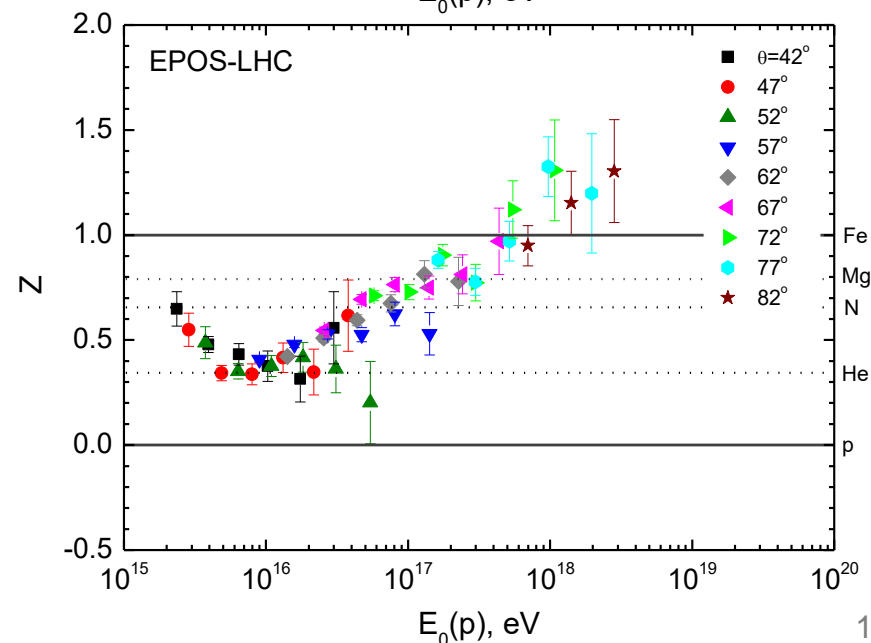


$$Z = \frac{\ln(N_{\mu}^{\text{det}}) - \ln(N_{\mu}^{\text{p sim}})}{\ln(N_{\mu}^{\text{Fe sim}}) - \ln(N_{\mu}^{\text{p sim}})}$$

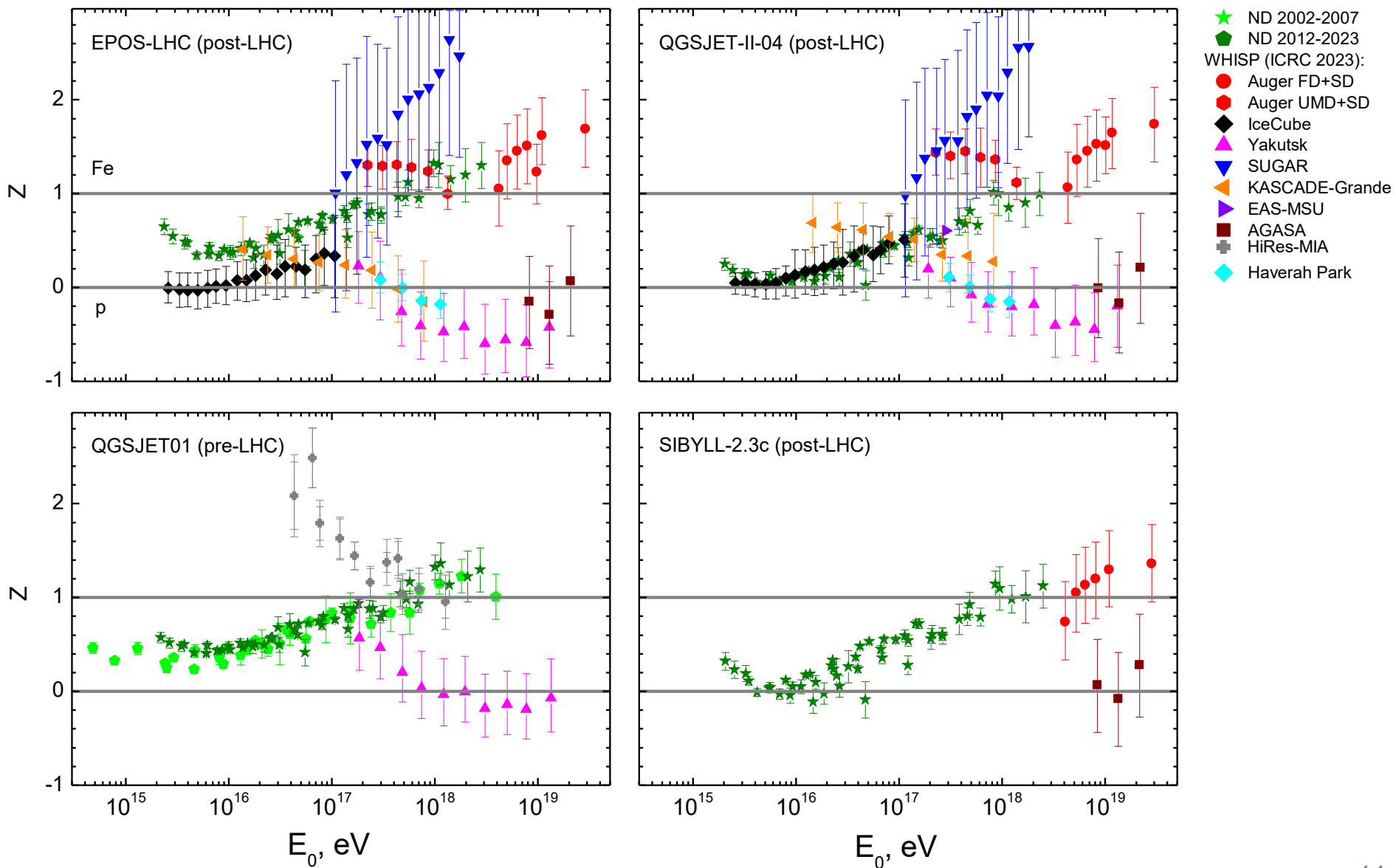
$N_{\mu}^{\text{det}}$  – экспериментальная оценка числа мюонов (плотности, СЛПМ, ...) в детекторе,

$N_{\mu}^{\text{p sim}}$  и  $N_{\mu}^{\text{Fe sim}}$  – расчетные оценки для ШАЛ, образованных протонами и ядрами железа;

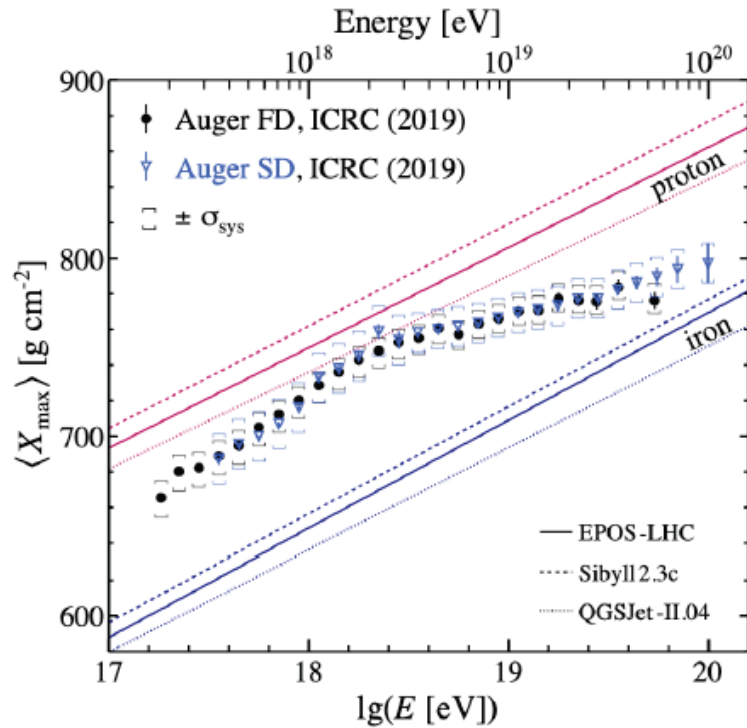
$Z = 0$  соответствует ШАЛ от протонов, а  $Z = 1$  – ШАЛ от ядер железа.



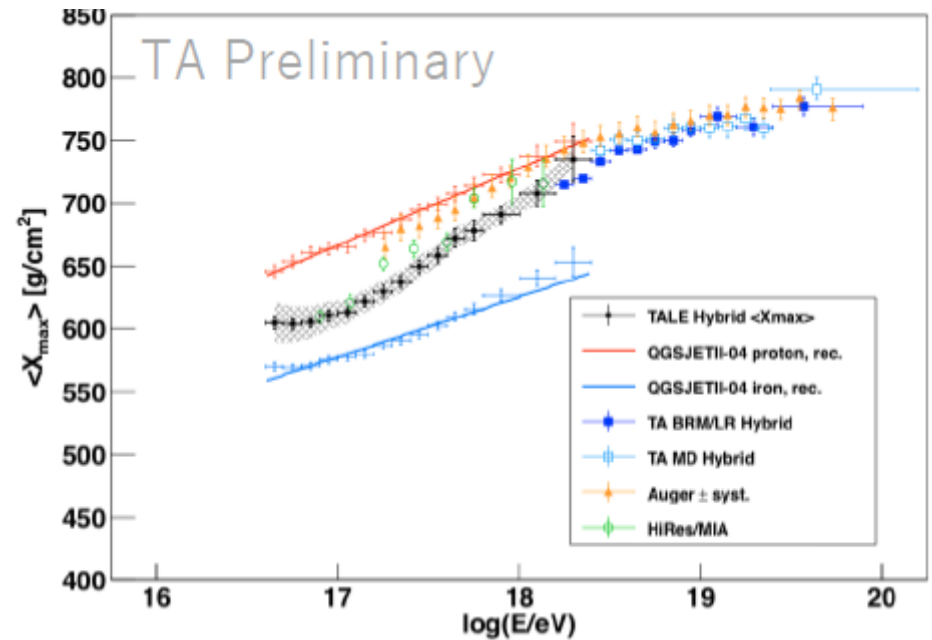
# Сравнение данных НЕВОД-ДЕКОР с результатами измерений мюонной компоненты ШАЛ в других экспериментах



# Измерения глубины максимума развития ШАЛ $X_{\max}$ флуоресцентным методом (ЭФК)



*Antonella Castellina, for the Pierre Auger Collaboration, ISVHECRI-2022*



*Hiroyuki Sagawa, on behalf of Telescope Array Collaboration, ISVHECRI-2022*

# Новый подход к решению мюонной загадки

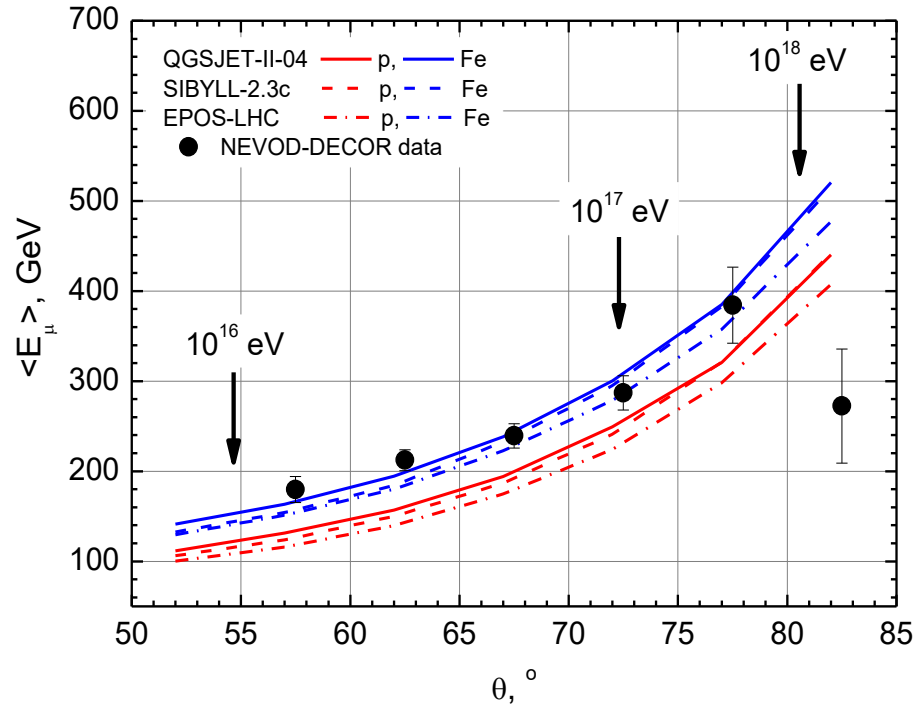
Ключом к пониманию проблемы избытка мюонов при сверхвысоких энергиях может стать изучение изменения энергетических характеристик мюонной компоненты ШАЛ с ростом энергии ПКЛ.

Один из возможных подходов – измерение энерговыделений групп мюонов в черенковском водном калориметре НЕВОД, так как средние потери мюонов в веществе практически линейно зависят от их энергии:  
 $dE/dX \sim a + bE$ .

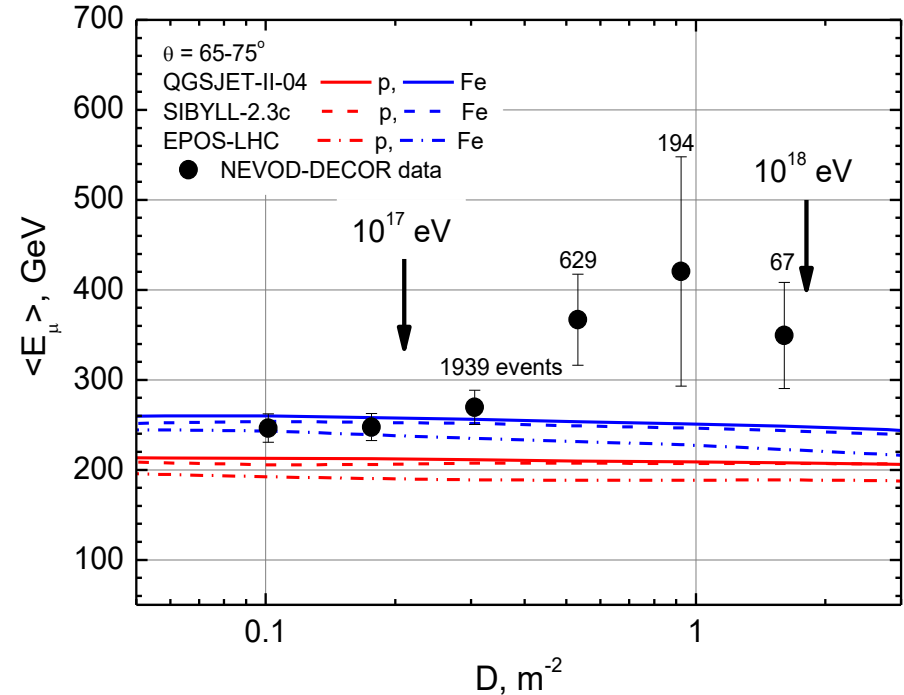
Средние энергии мюонов в группах оценивались по энерговыделениям с привлечением результатов моделирования отклика установки на прохождение мюонов на базе пакета программ Geant4.



# Зависимости средней энергии мюонов в группах от зенитного угла и локальной плотности мюонов

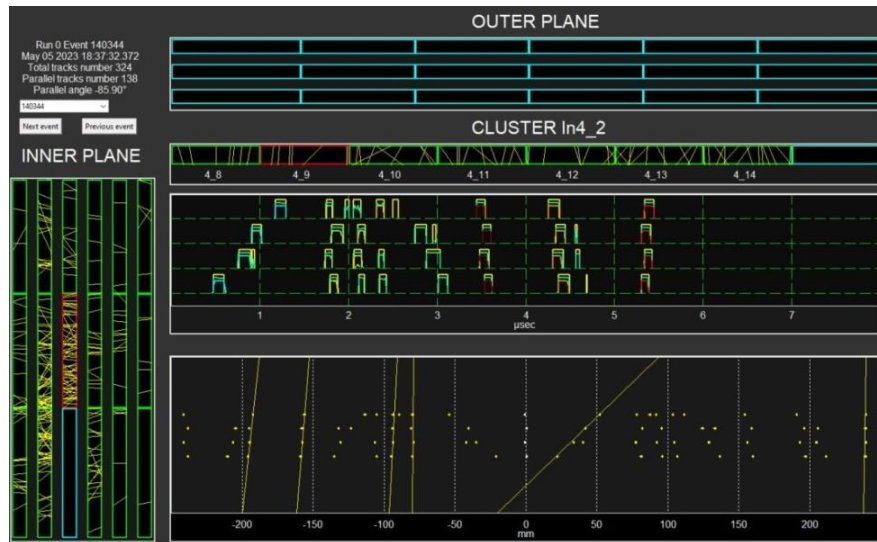
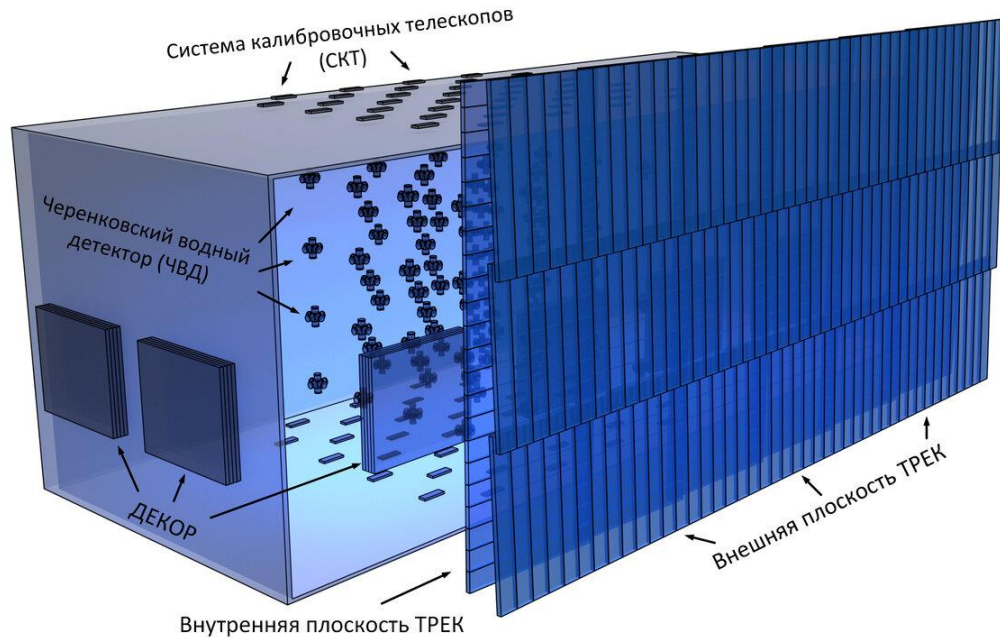


Зависимость средней энергии мюонов в группах от зенитного угла



Зависимость средней энергии мюонов в группах от локальной плотности мюонов

# Развитие ЭК НЕВОД – детектор ТРЕК



264 дрейфовые камеры (ИФВЭ),  
2 плоскости площадью  $\approx 250 \text{ м}^2$ ,  
разрешение двух треков  $\approx 3 \text{ мм}$

# Выводы

- ❑ Данные по интенсивности групп мюонов, регистрируемых в эксперименте НЕВОД-ДЕКОР, согласуются с расчетами только в предположении об экстремально тяжелом (ядра группы железа) массовом составе ПКЛ при энергиях около  $10^{18}$  эВ.
- ❑ Обнаружено увеличение средней энергии мюонов в группах по сравнению с ожидаемым в области энергий ПКЛ выше  $10^{17}$  эВ.
- ❑ Это дает основание предположить возможное появление каких-то новых физических особенностей (явлений), которые не учитываются современными моделями адронных взаимодействий при сверхвысоких энергиях.
- ❑ Создание детектора ТРЕК в составе Экспериментального комплекса НЕВОД и модернизация черенковского водного калориметра, позволят расширить исследуемый энергетический диапазон ПКЛ и улучшить точность измерений.

# Спасибо за внимание!

