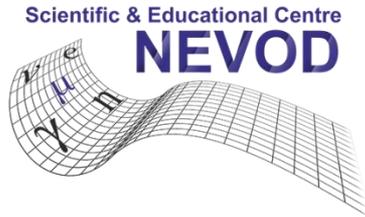


Научная сессия Секции ядерной физики ОФН РАН,
1-5 апреля 2024, ОИЯИ, Дубна, Россия



INAF



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

А.Г. Богданов¹, Н.С. Барбашина¹, В.С. Воробьев¹, Е.А. Задеба¹, В.В. Киндин¹,
Р.П. Кокоулин¹, К.Г. Компаниец¹, А.Ю. Коновалова¹, G. Mannocchi², А.А. Петрухин¹,
G. Trinchero², С.С. Хохлов¹, В.В. Шутенко¹, Е.А. Юрина¹, И.И. Яшин¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия,

² Osservatorio Astrofisico di Torino – INAF, Italy

Установка НЕВОД-ДЕКОР

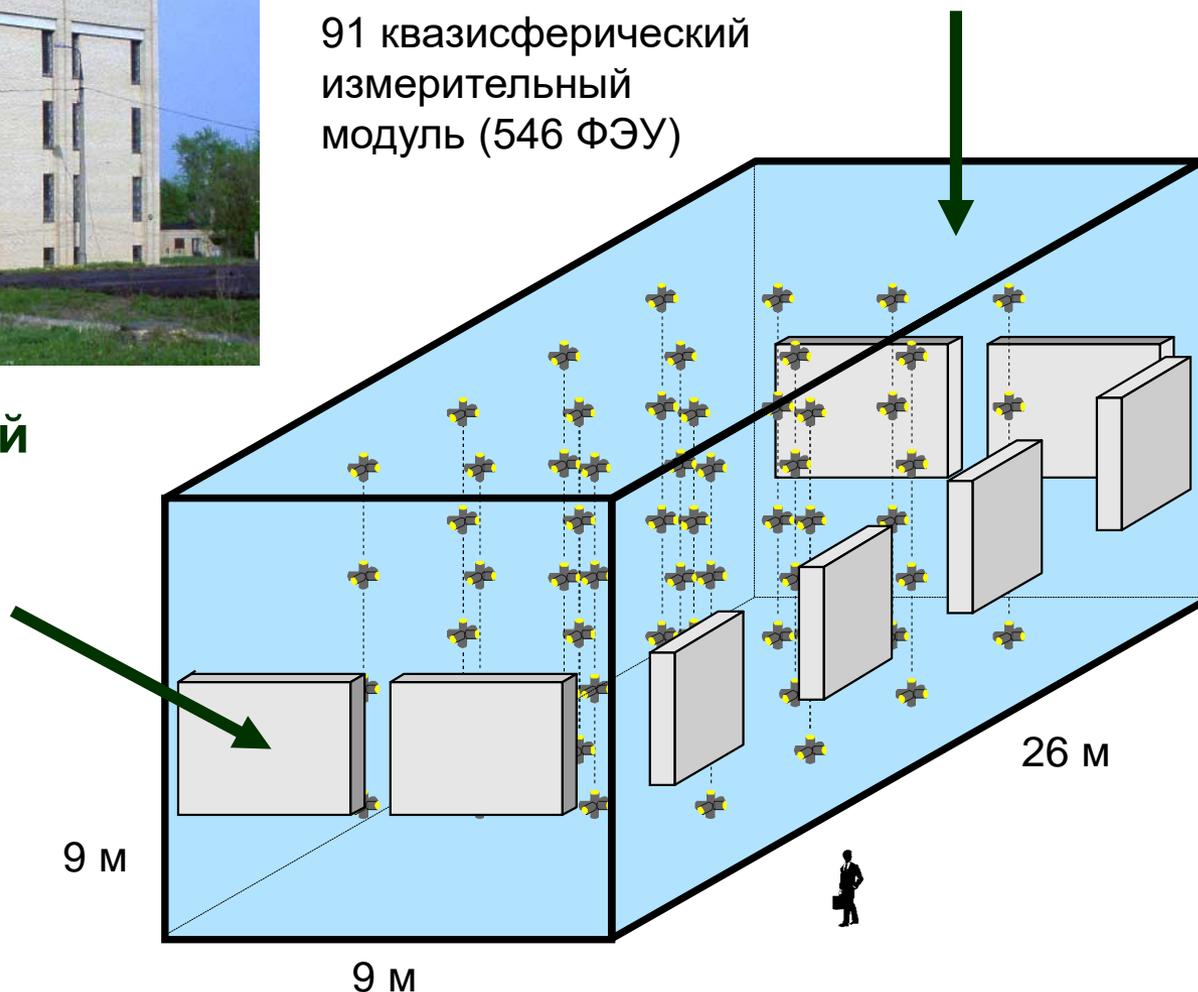


**Черенковский водный
детектор НЕВОД
(объем 2000 м³)**

91 квазисферический
измерительный
модуль (546 ФЭУ)

**Координатно-трековый
детектор ДЕКОР
(площадь 70 м²)**

8 вертикальных
супермодулей
(стримерные трубки)

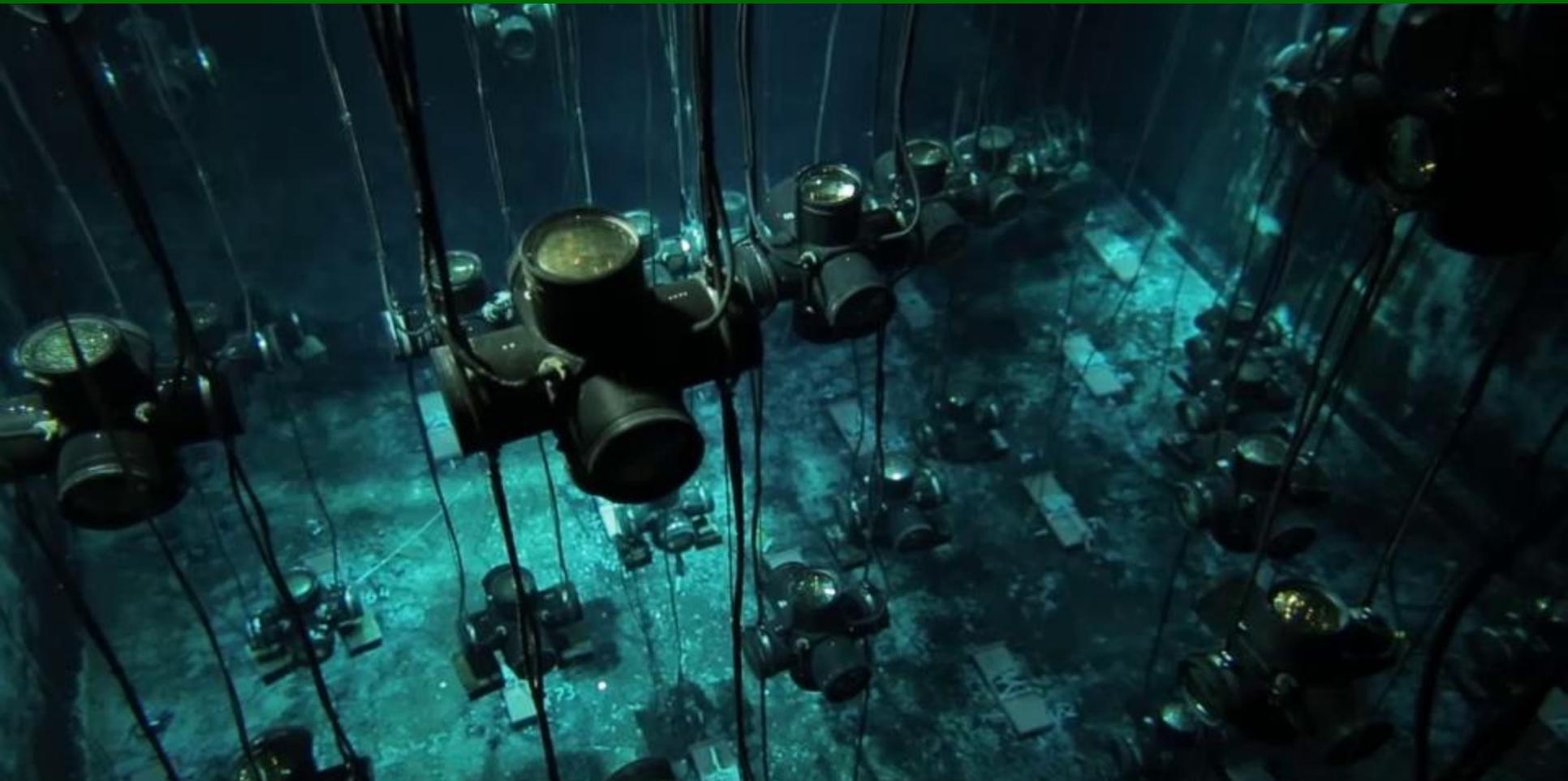


Супермодули детектора ДЕКОР в галереях вокруг водного объема детектора НЕВОД



Каждый СМ имеет эффективную площадь 8.4 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

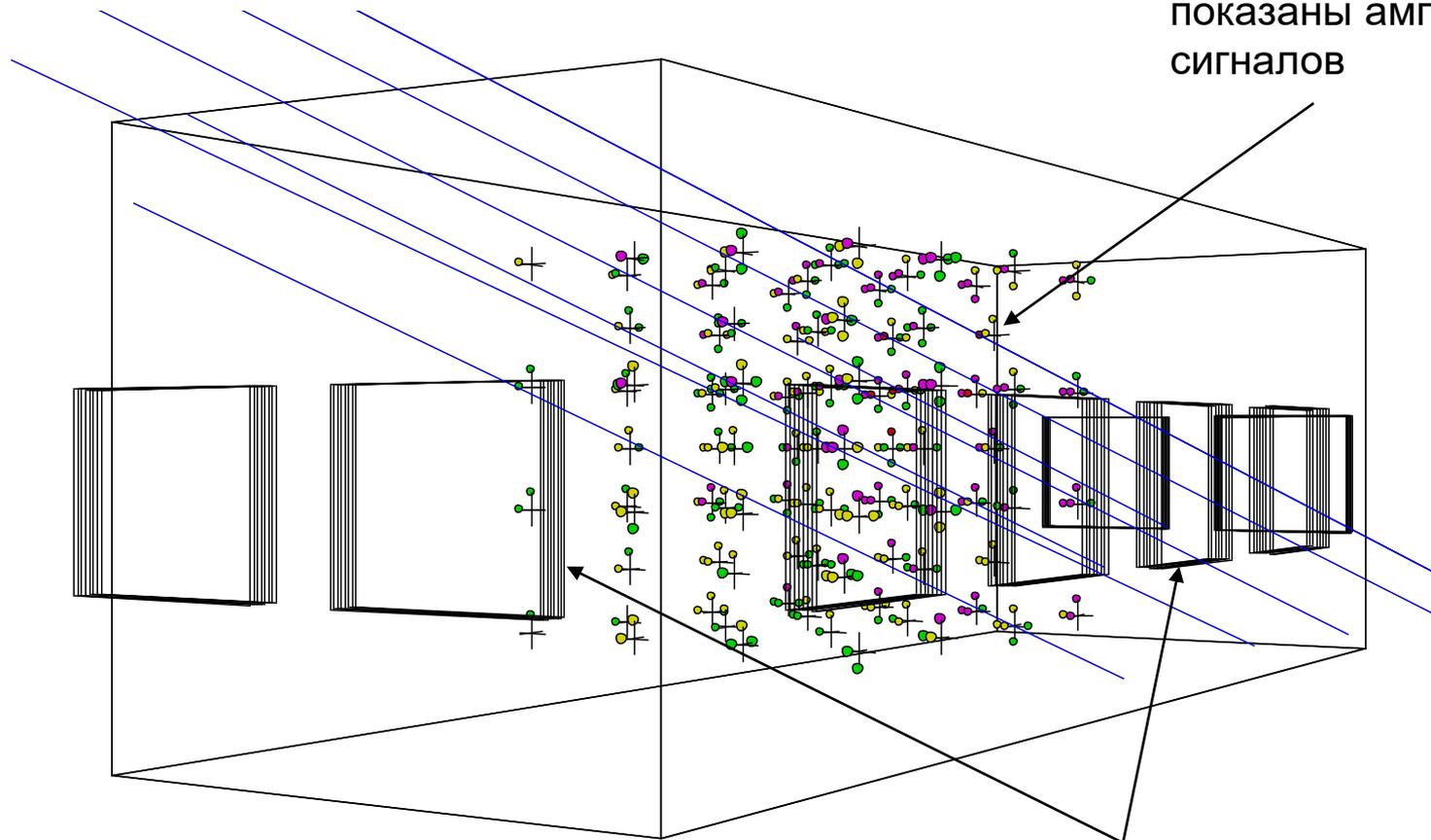


Пространственная решетка сформирована из 25 вертикальных гирлянд по 3 или 4 квазисферических модуля. Один КСМ состоит из 6 ФЭУ-200 с плоским фотокатодом (\varnothing 15 см), ориентированных вдоль осей ортогональной системы координат. Динамический диапазон измерений каждого ФЭУ (от 1 до 10^5 фотоэлектронов)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

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

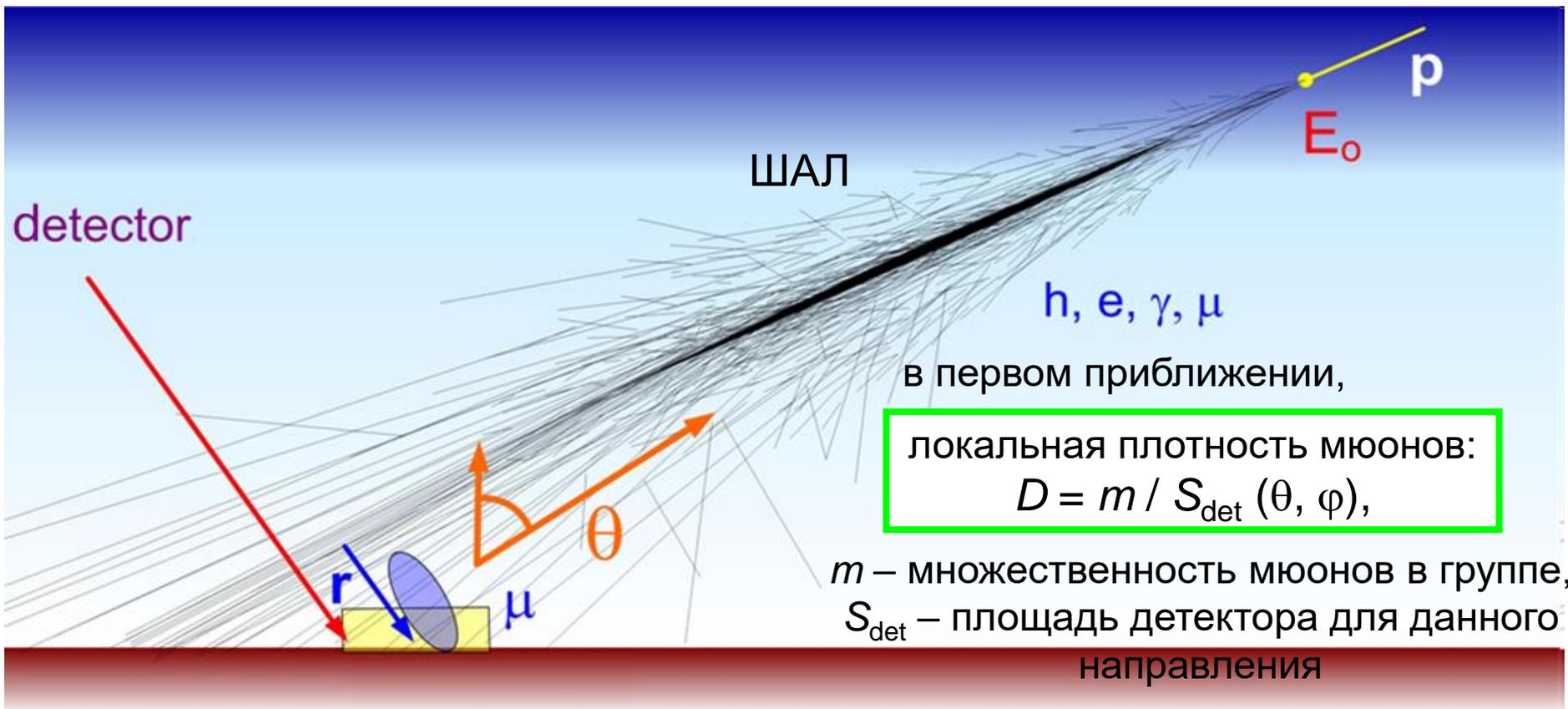
треки мюонов (линии)

сработавшие ФЭУ
(кружки), цветом
показаны амплитуды
сигналов



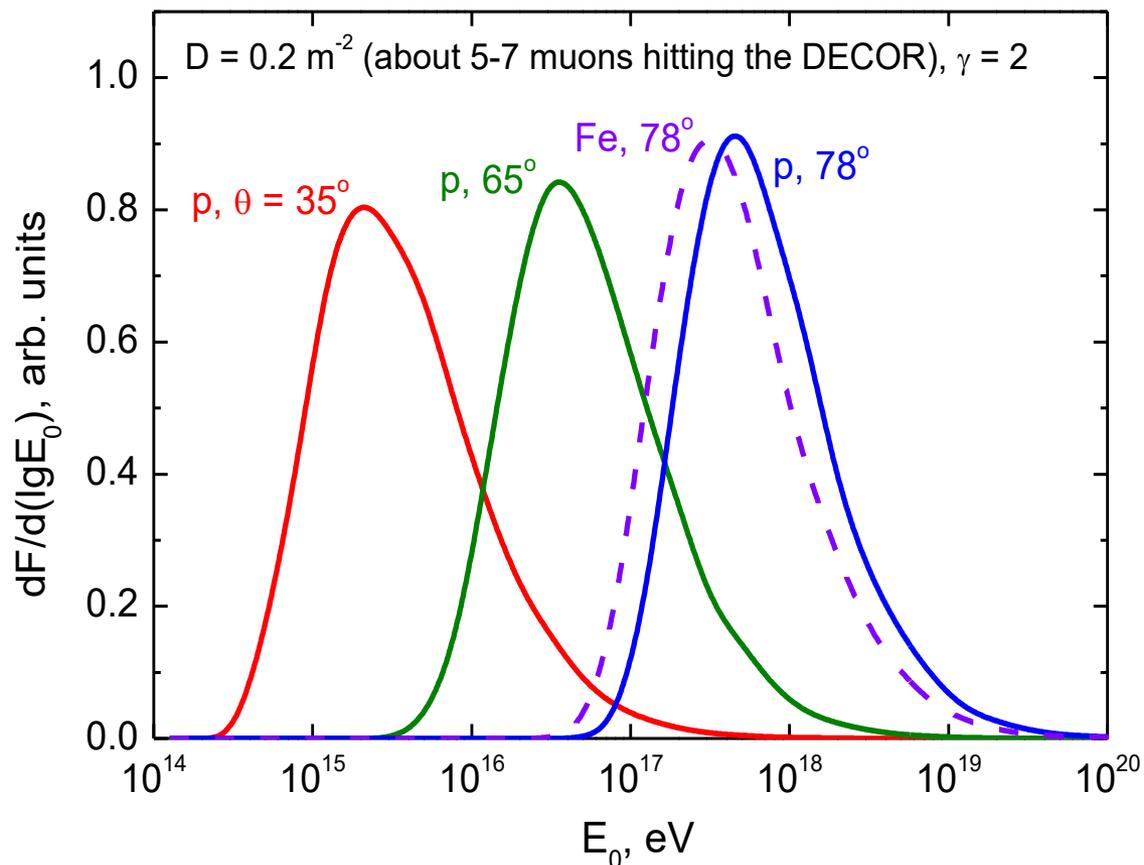
СМ детектора ДЕКОР
(прямоугольники)

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° и 195 - 255°) –

6 из 8 супермодулей ДЕКОРа 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° конуса);
- окончательная классификация событий и подсчет треков операторами.

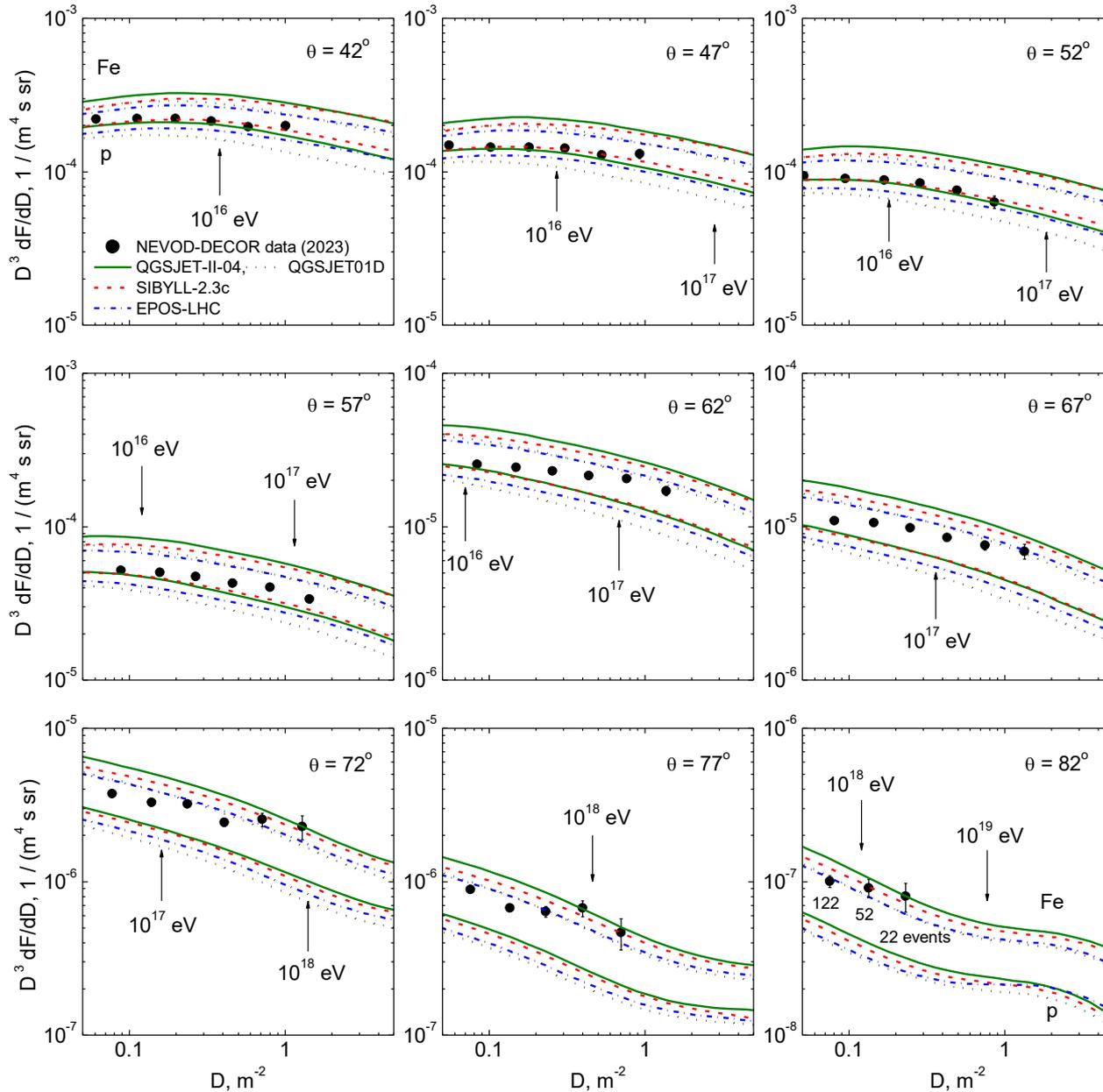
Этапы анализа данных по локальной плотности мюонов

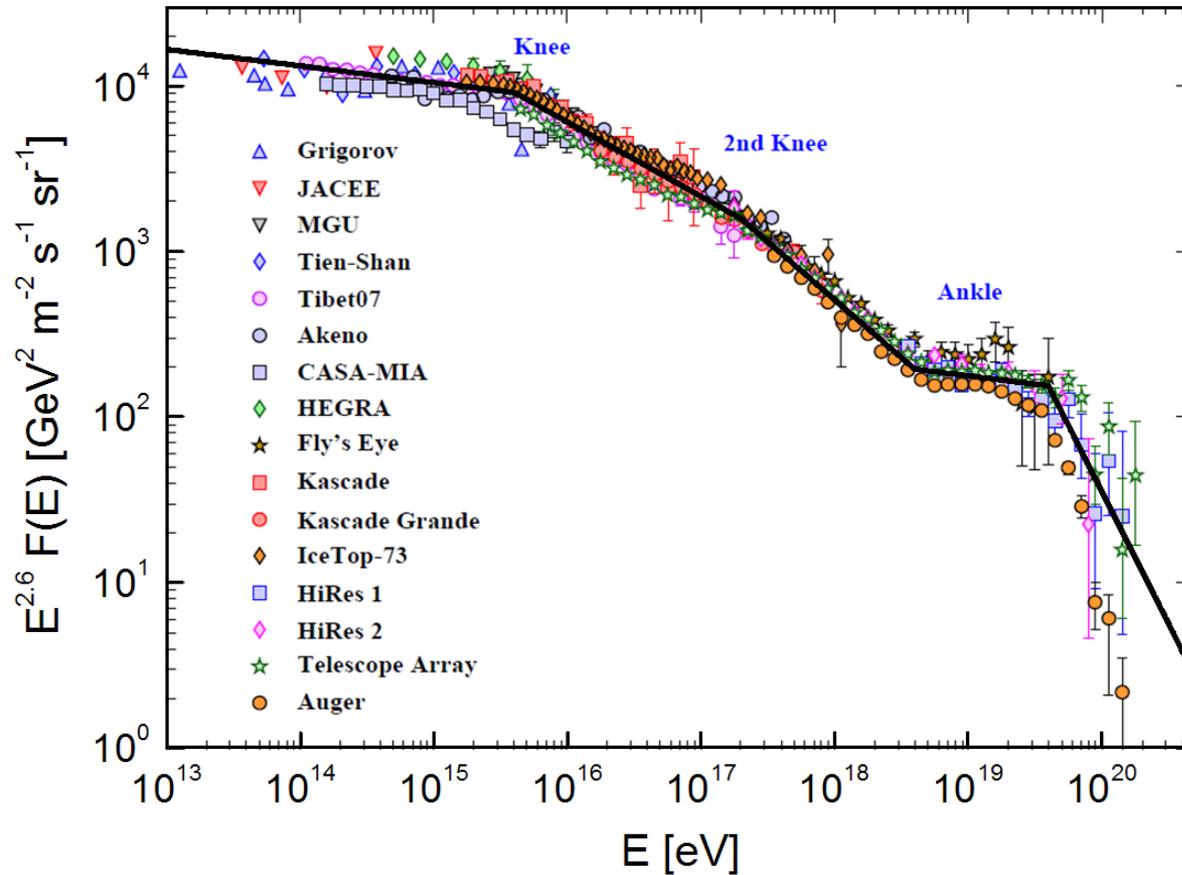
Восстановление экспериментальных СЛПМ $dF(D,\theta)/dD$ из измеренных распределений характеристик событий $N(m,\theta,\varphi)$ с учетом геометрии, флуктуаций, эффективности регистрации, триггерных условий и др.

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.

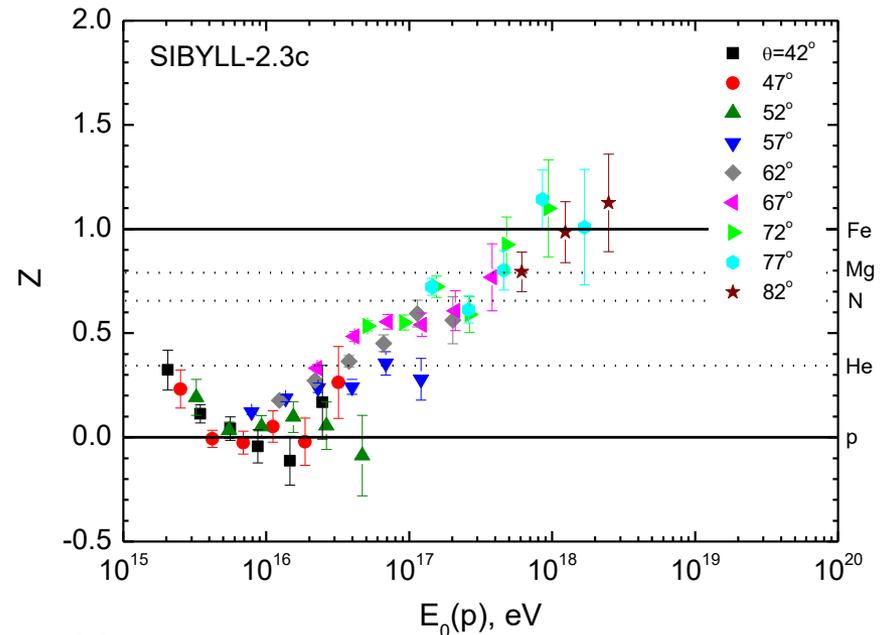
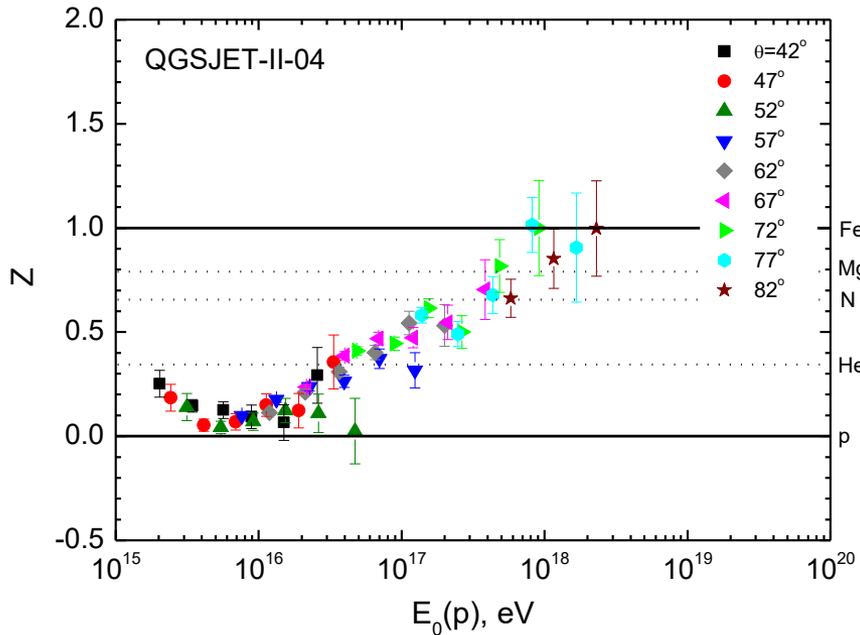
СЛПМ для различных зенитных углов





The all-particle spectrum, PDG 2016

Сопоставление СЛПМ для различных зенитных углов

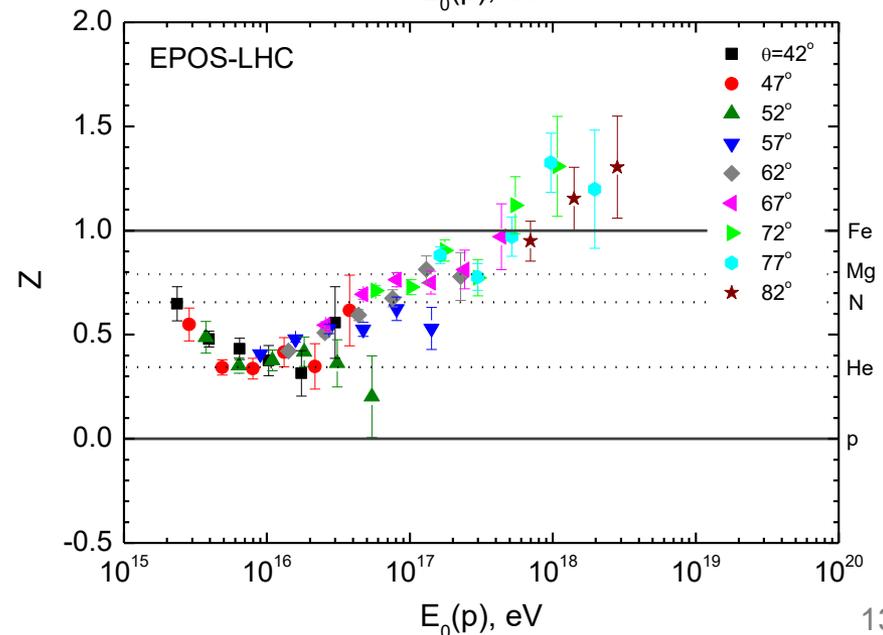


$$Z = \frac{\ln(N_{\mu}^{\text{det}}) - \ln(N_{\mu}^{\text{p sim}})}{\ln(N_{\mu}^{\text{Fe sim}}) - \ln(N_{\mu}^{\text{p sim}})}$$

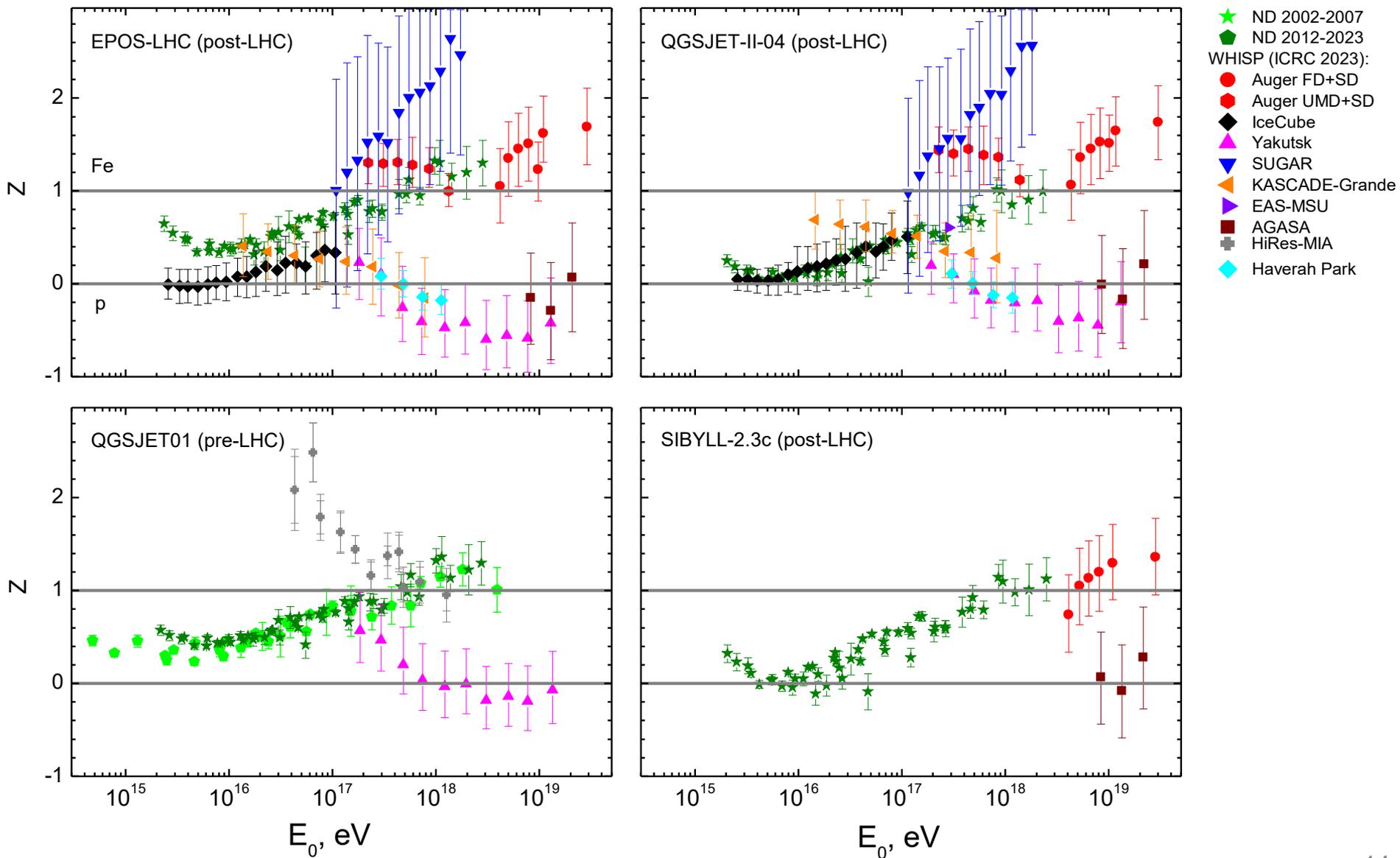
N_{μ}^{det} – экспериментальная оценка числа мюонов (плотности, СЛПМ, ...) в детекторе,

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

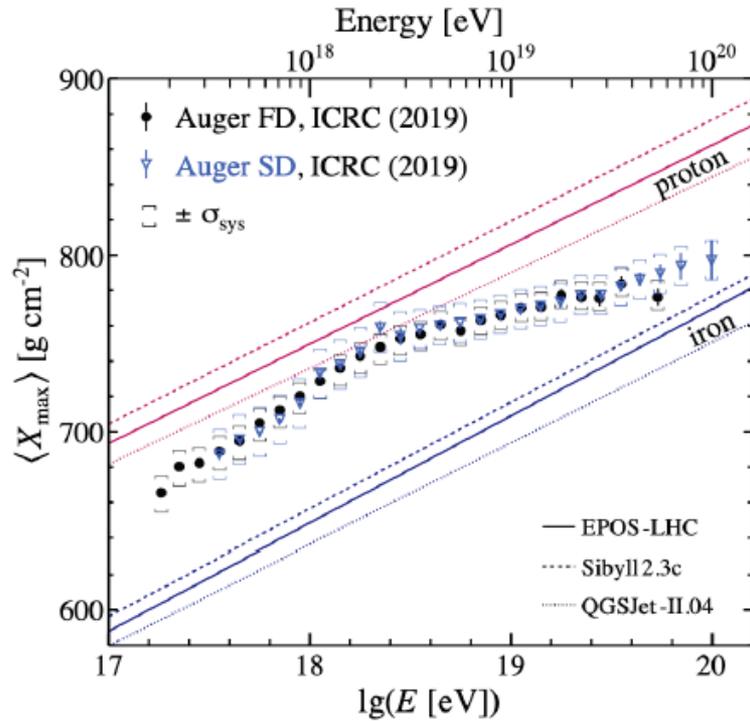
$Z = 0$ соответствует ШАЛ от протонов, а $Z = 1$ – ШАЛ от ядер железа.



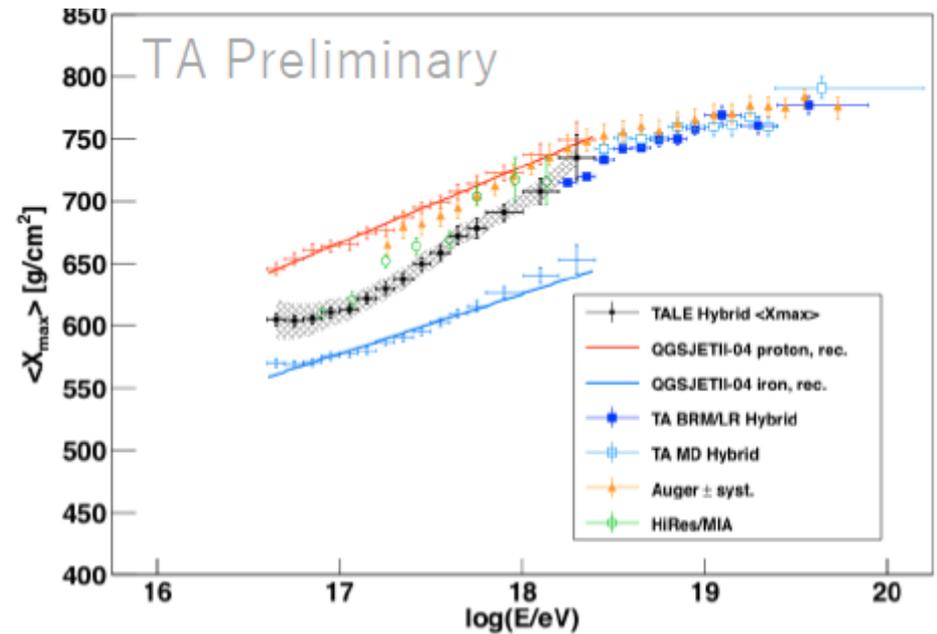
Сравнение данных НЕВОД-ДЕКОР с результатами измерений мюонной компоненты ШАЛ в других экспериментах



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

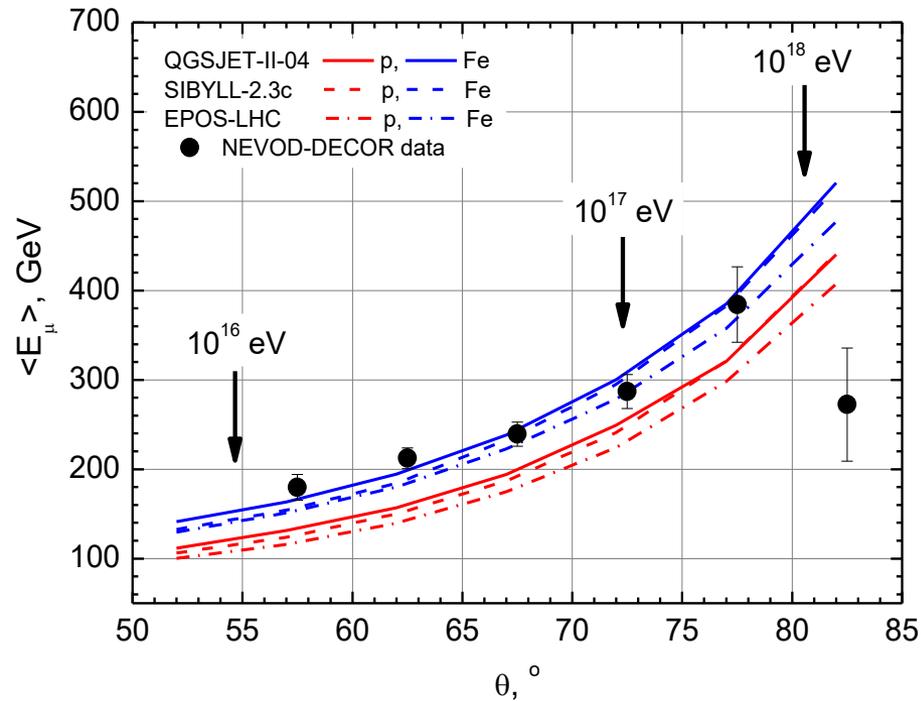
Новый подход к решению мюонной загадки

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

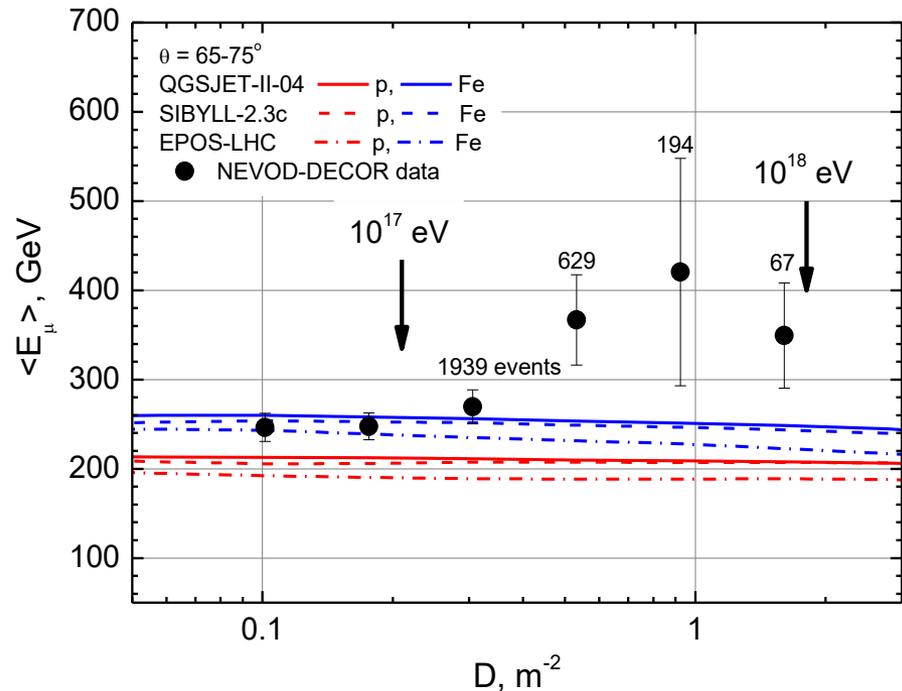
Один из возможных подходов – измерение энерговыделений групп мюонов в черенковском водном калориметре НЕВОД, так как средние потери мюонов в веществе практически линейно зависят от их энергии:
 $dE/dX \sim a + bE$.

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

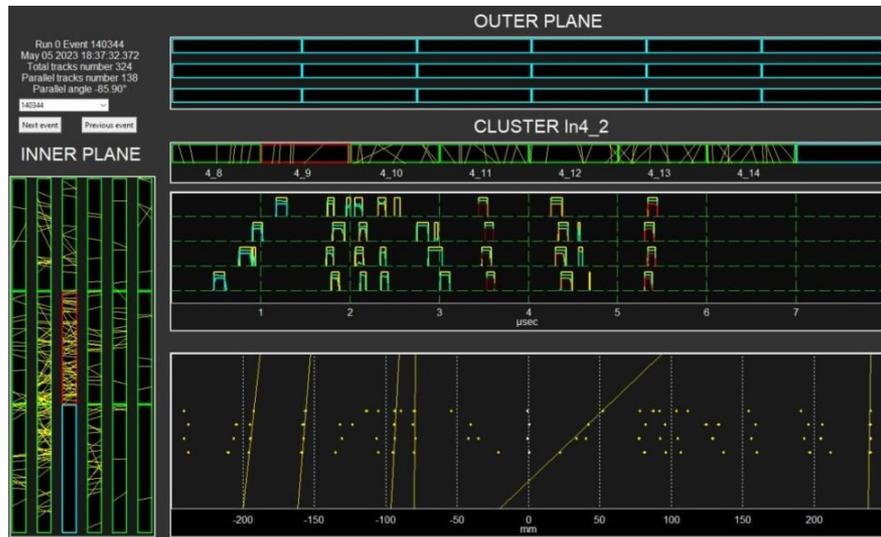
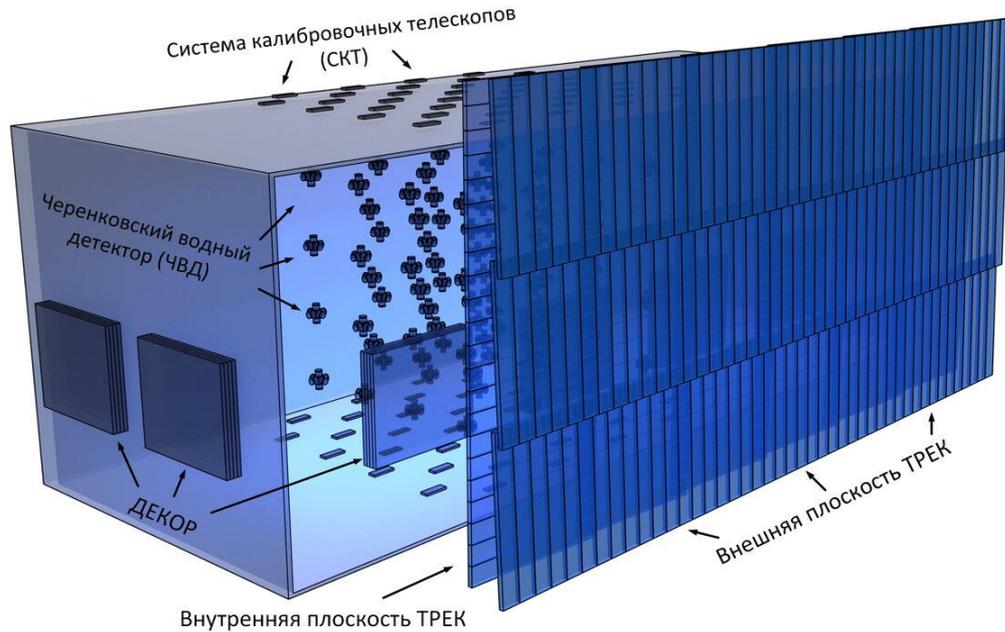


Зависимость средней энергии мюонов в группах от зенитного угла



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!

