

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,  
посвященная 70-летию В.А. Рубакова,  
17-21 февраля 2025, Москва, Россия



# Возможности решения "мюонной загадки" в космических лучах по данным Экспериментального комплекса НЕВОД

А.Г. Богданов<sup>1</sup>, В.С. Воробьев<sup>1</sup>, А. Chiavassa<sup>2,3</sup>, Д.М. Громушкин<sup>1</sup>, Е.А. Задеба<sup>1</sup>,  
В.В. Кундин<sup>1</sup>, К.Г. Компаниец<sup>1</sup>, А.Ю. Коновалова<sup>1</sup>, G. Mannocchi<sup>4</sup>, А.А. Петрухин<sup>1</sup>,  
G. Trinchero<sup>3,4</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> Dipartimento di Fisica Dell' Universit'a Degli Studi di Torino, Italy

<sup>3</sup> Sezione di Torino Dell' Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – INFN, Italy

<sup>4</sup> Osservatorio Astrofisico di Torino – INAF, Italy

# “Мюонная загадка”

В ряде экспериментов наблюдается избыток мюонов по сравнению с расчетами, выполненными в рамках современных моделей адронных взаимодействий, даже в предположении об экстремально тяжелом (ядра Fe) массовом составе ПКЛ в области энергий  $E_0 \sim 10^{18}$  эВ.

Это противоречит измерениям глубины максимума развития ШАЛ  $X_{\max}$  флуоресцентным методом, которые свидетельствуют о доминировании легкого массового состава ПКЛ (p, ядра He) при таких энергиях.

# Установка НЕВОД-ДЕКОР

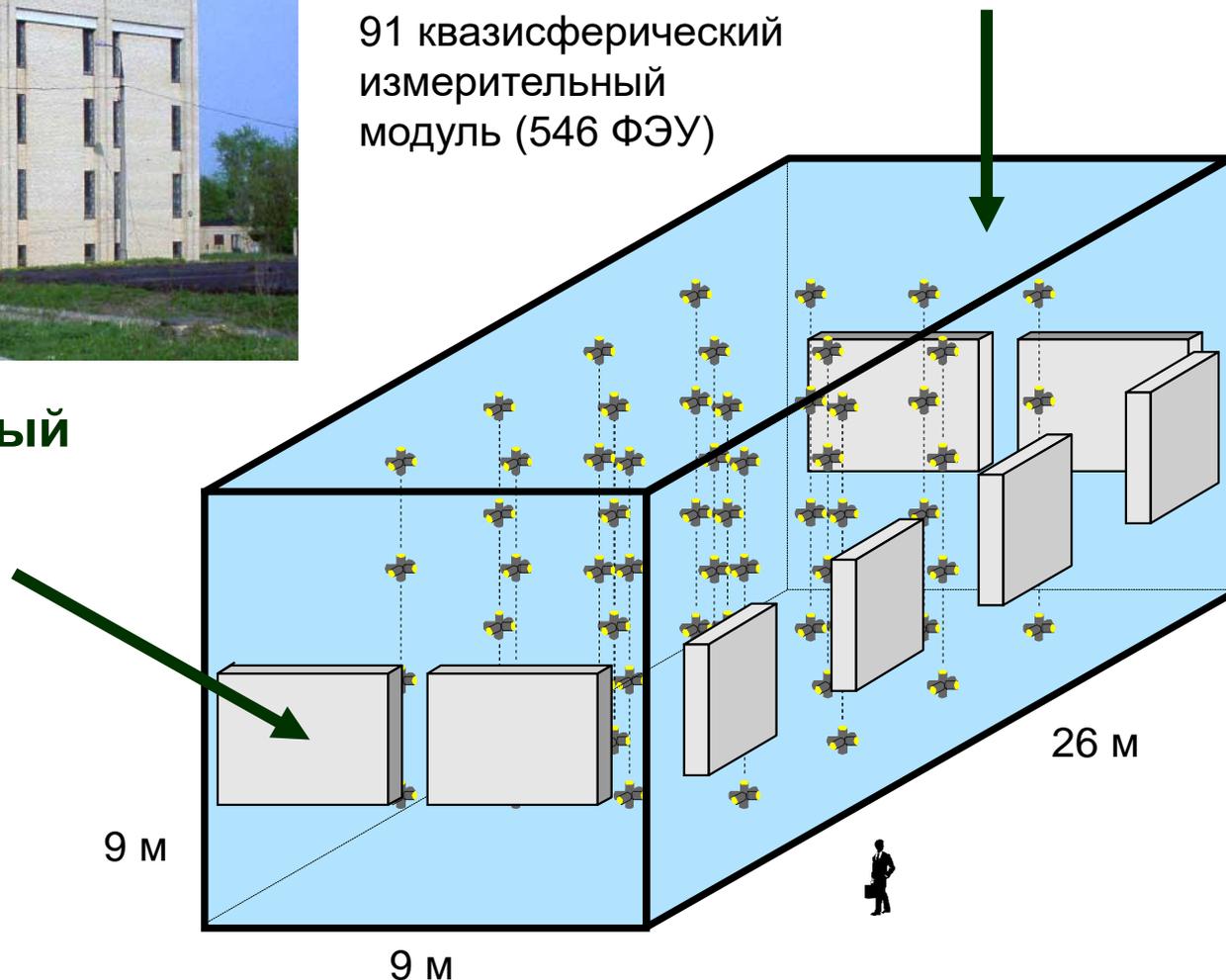


**Черенковский водный  
детектор НЕВОД  
(объем 2000 м<sup>3</sup>)**

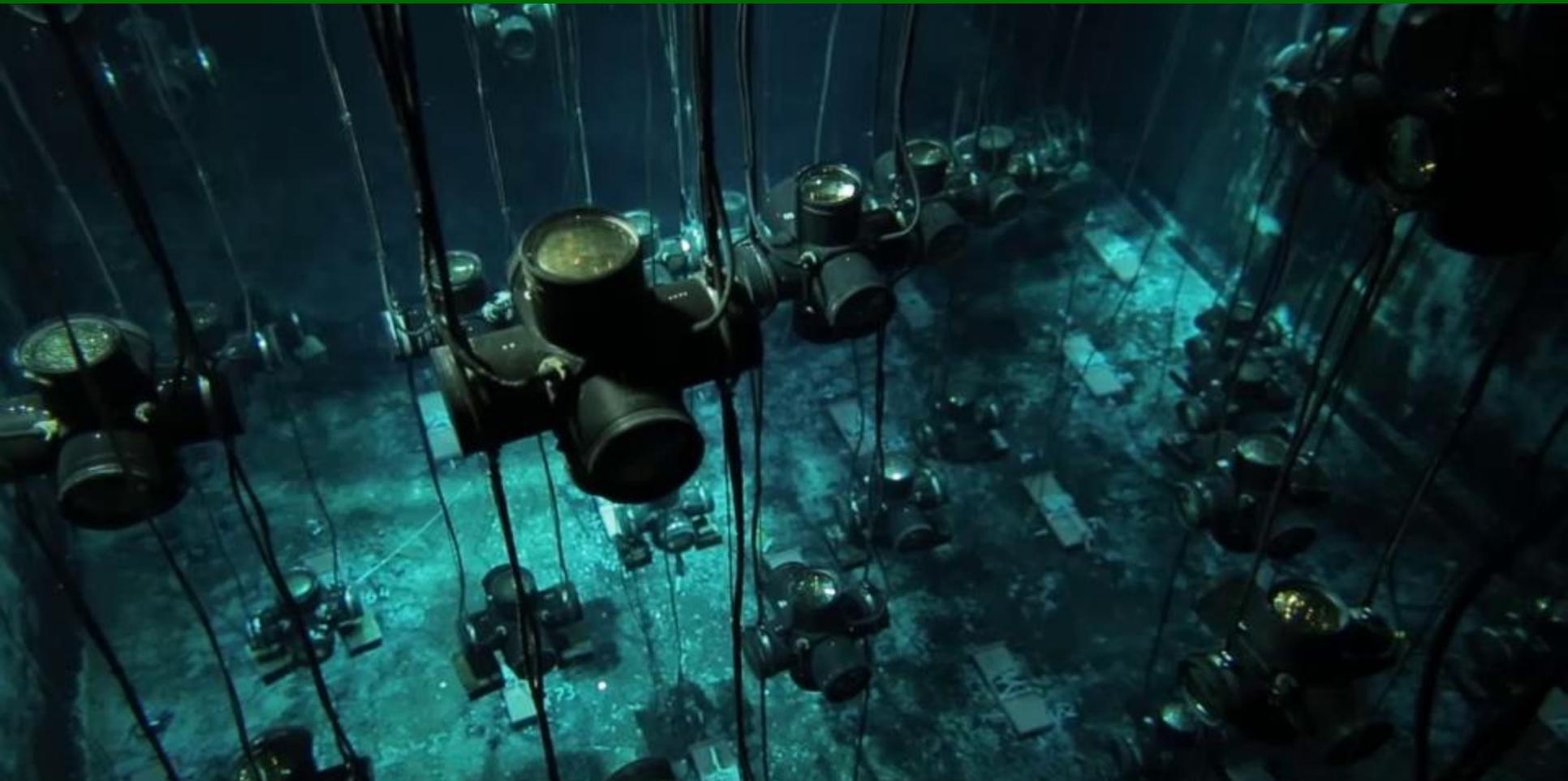
91 квазисферический  
измерительный  
модуль (546 ФЭУ)

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

8 вертикальных  
супермодулей  
(стримерные трубки)



# Регистрирующая система оптических модулей 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.

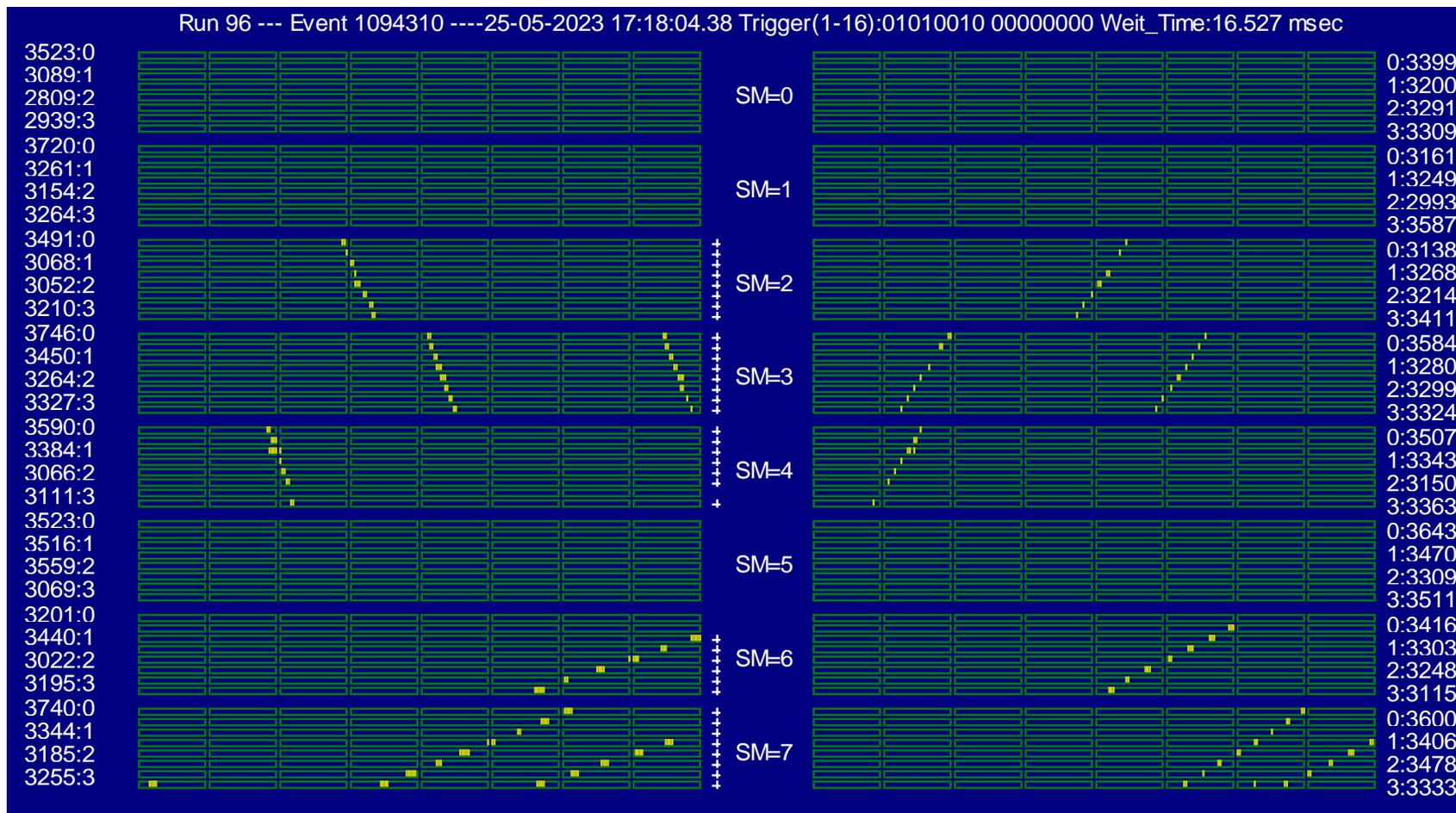
# Супермодули детектора ДЕКОР в галереях здания вокруг водного объема детектора НЕВОД



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

# Группа мюонов, зарегистрированная детектором ДЕКОР

множественность  $m = 7$  частиц, зенитный угол  $\theta \approx 62^\circ$



Y-проекция  
(азимутальный угол)

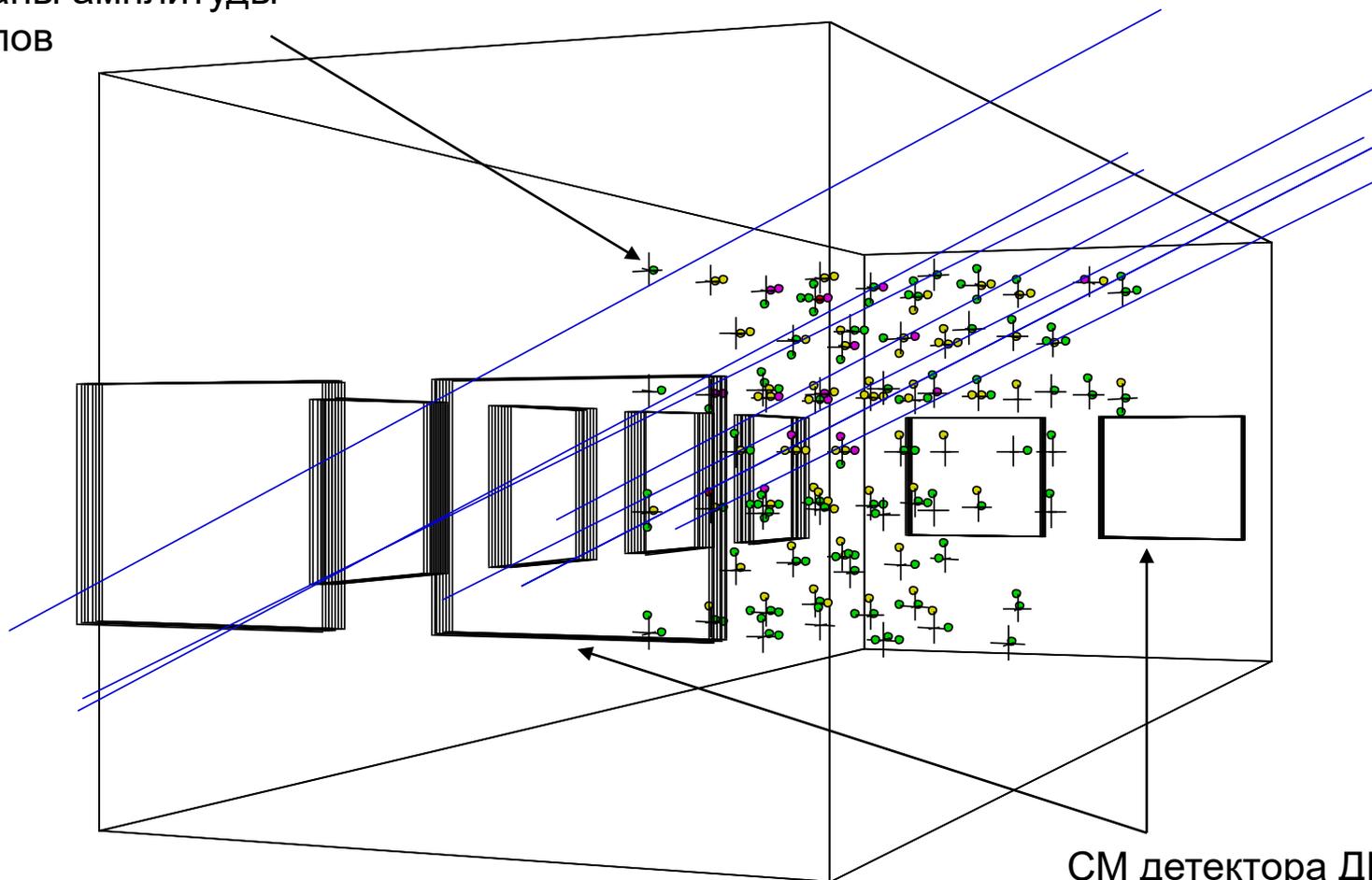
X-проекция  
(проекционный зенитный угол)

Точность локализации треков заряженных частиц  $\approx 1$  см.  
Угловая точность реконструкции треков, пересекающих СМ, лучше  $1^\circ$ .

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

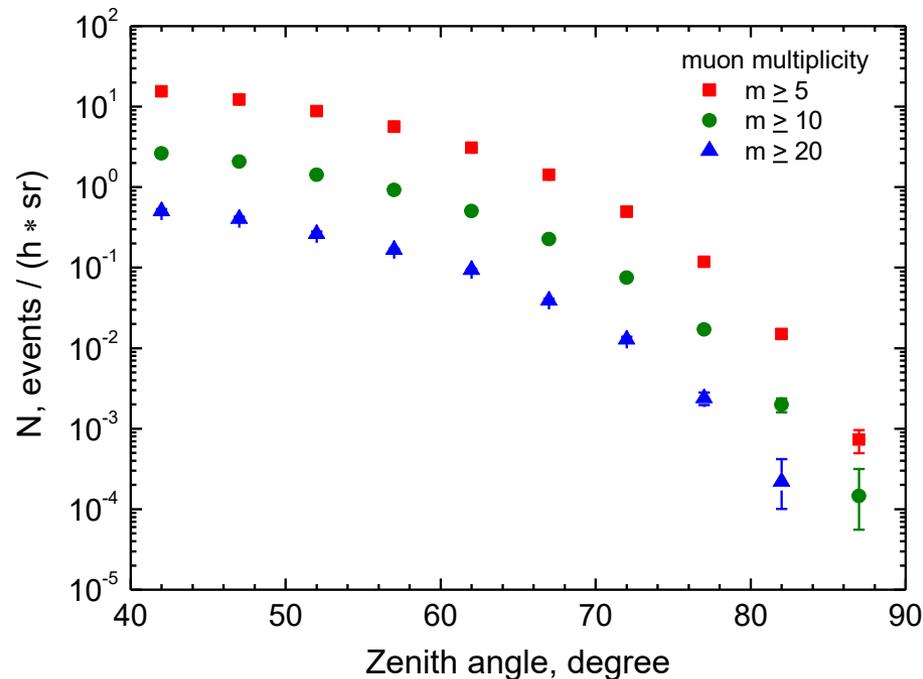
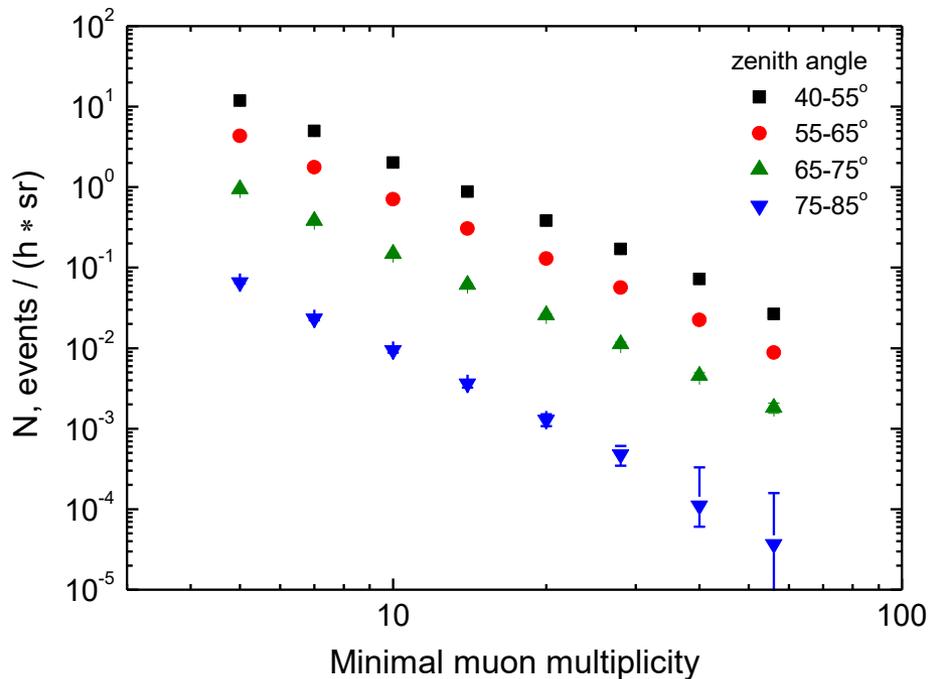
сработавшие ФЭУ  
(кружки), цветом  
показаны амплитуды  
сигналов

треки мюонов (линии)



СМ детектора ДЕКОР  
(прямоугольники)

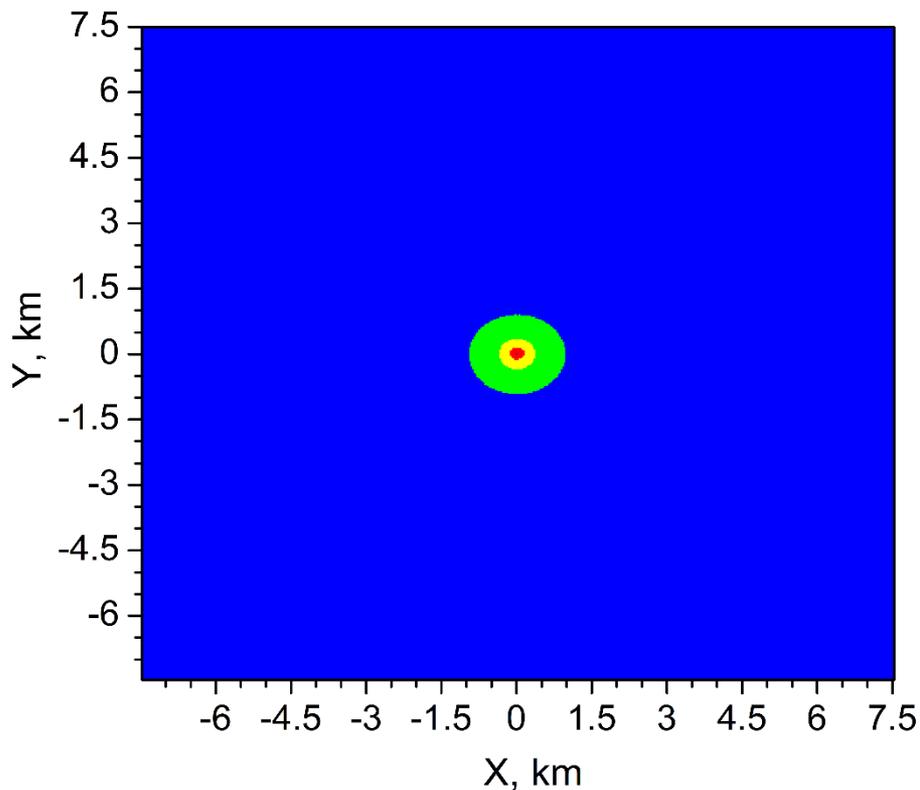
# Распределения зарегистрированных групп мюонов по множественности и зенитному углу



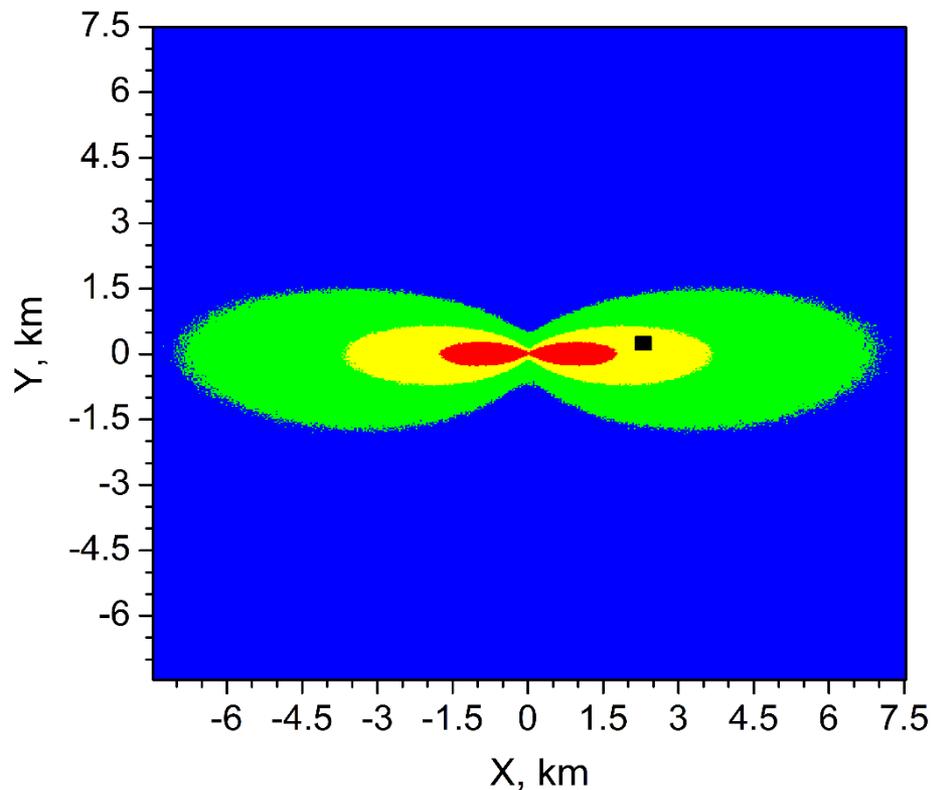
Оценки интенсивности событий с группами мюонов перекрывают более пяти декад.

По измеренным распределениям характеристик групп мюонов получают экспериментальные оценки СЛПМ.

# Сечение мюонной компоненты ШАЛ



$\theta = 42^\circ$  (с учетом МПЗ)

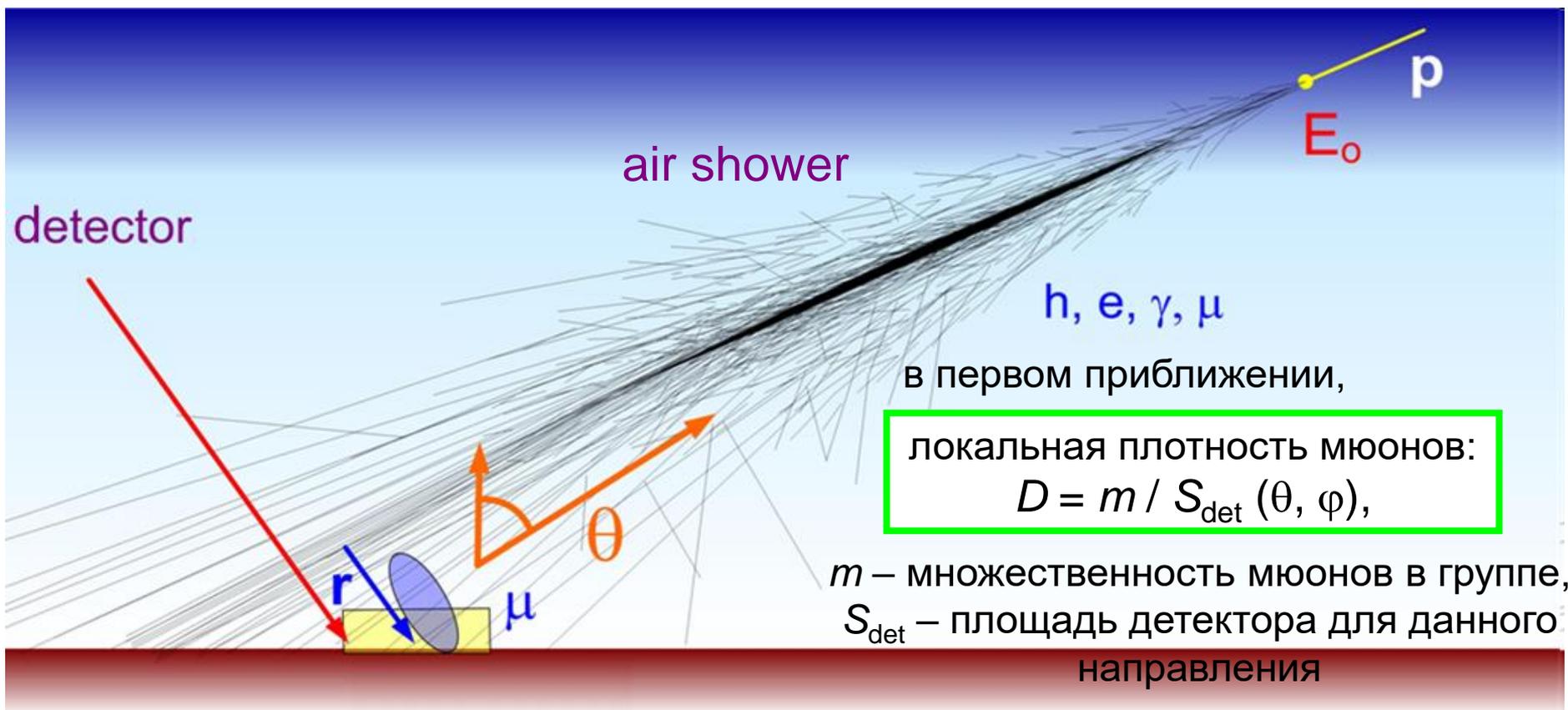


$\theta = 82^\circ$  (с учетом МПЗ)

$$\rho, E_0 = 10^{18} \text{ эВ}, E_\mu \geq 1 \text{ ГэВ}$$

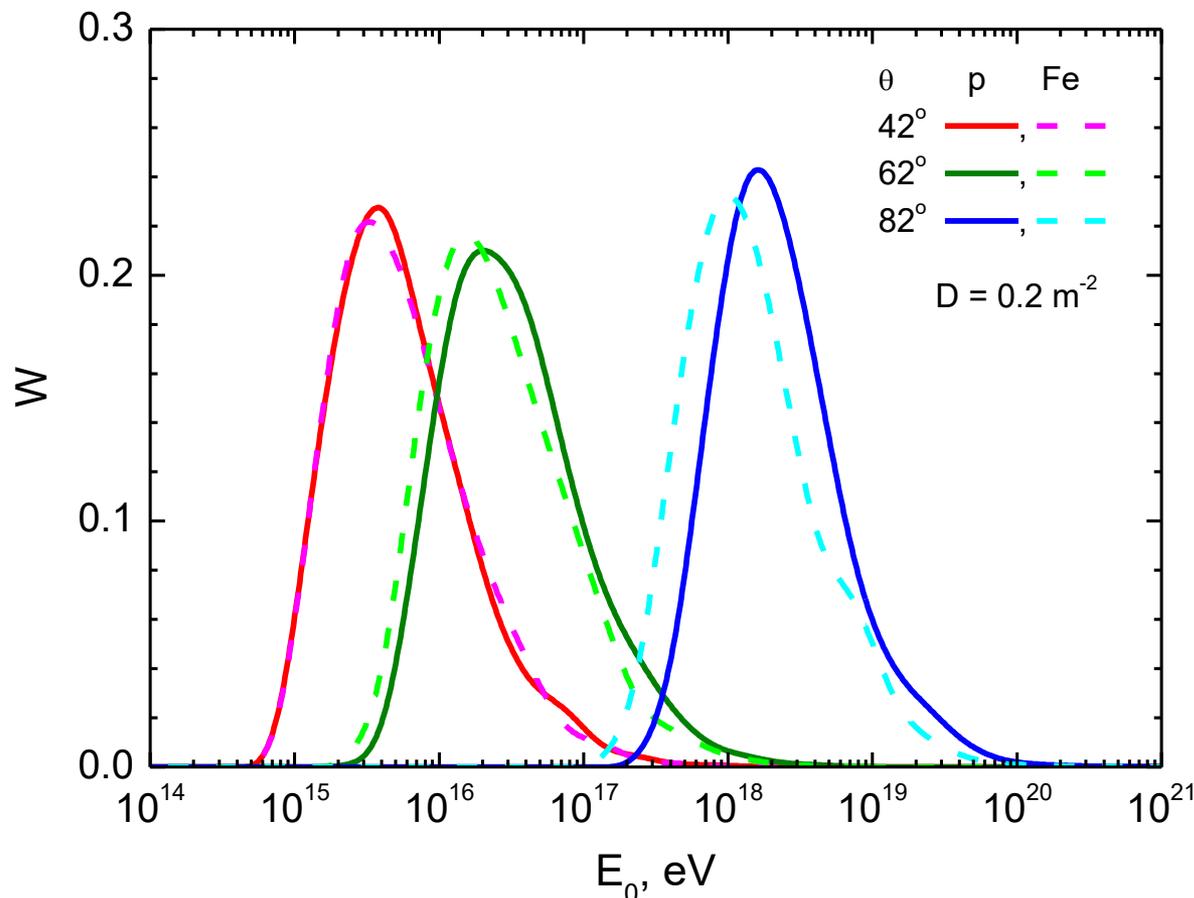
Типичные размеры мюонной компоненты ШАЛ  
значительно превышают размеры установки.

# Оригинальный 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. 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.

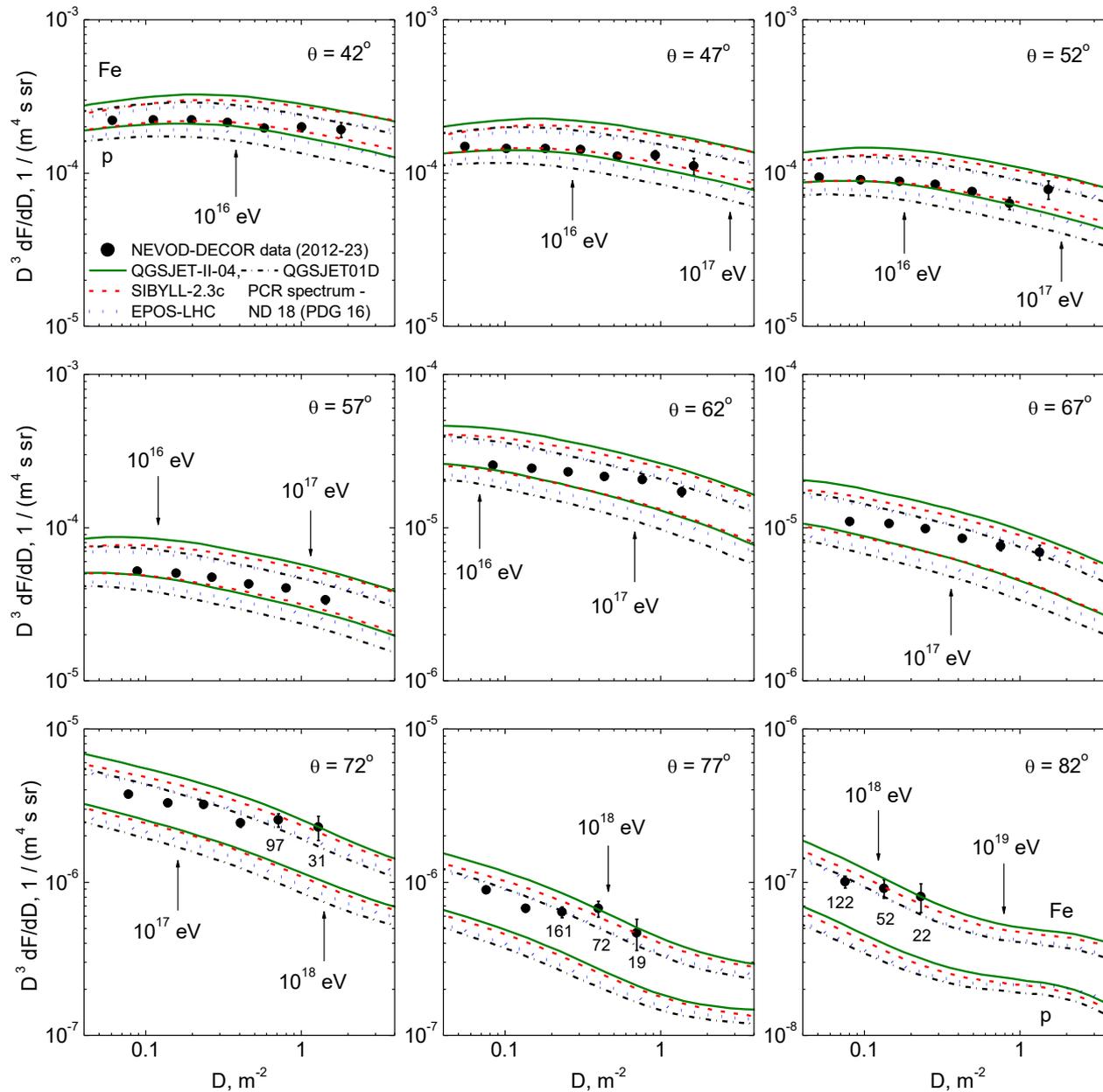
# Этапы анализа данных по локальной плотности мюонов

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 т. д.

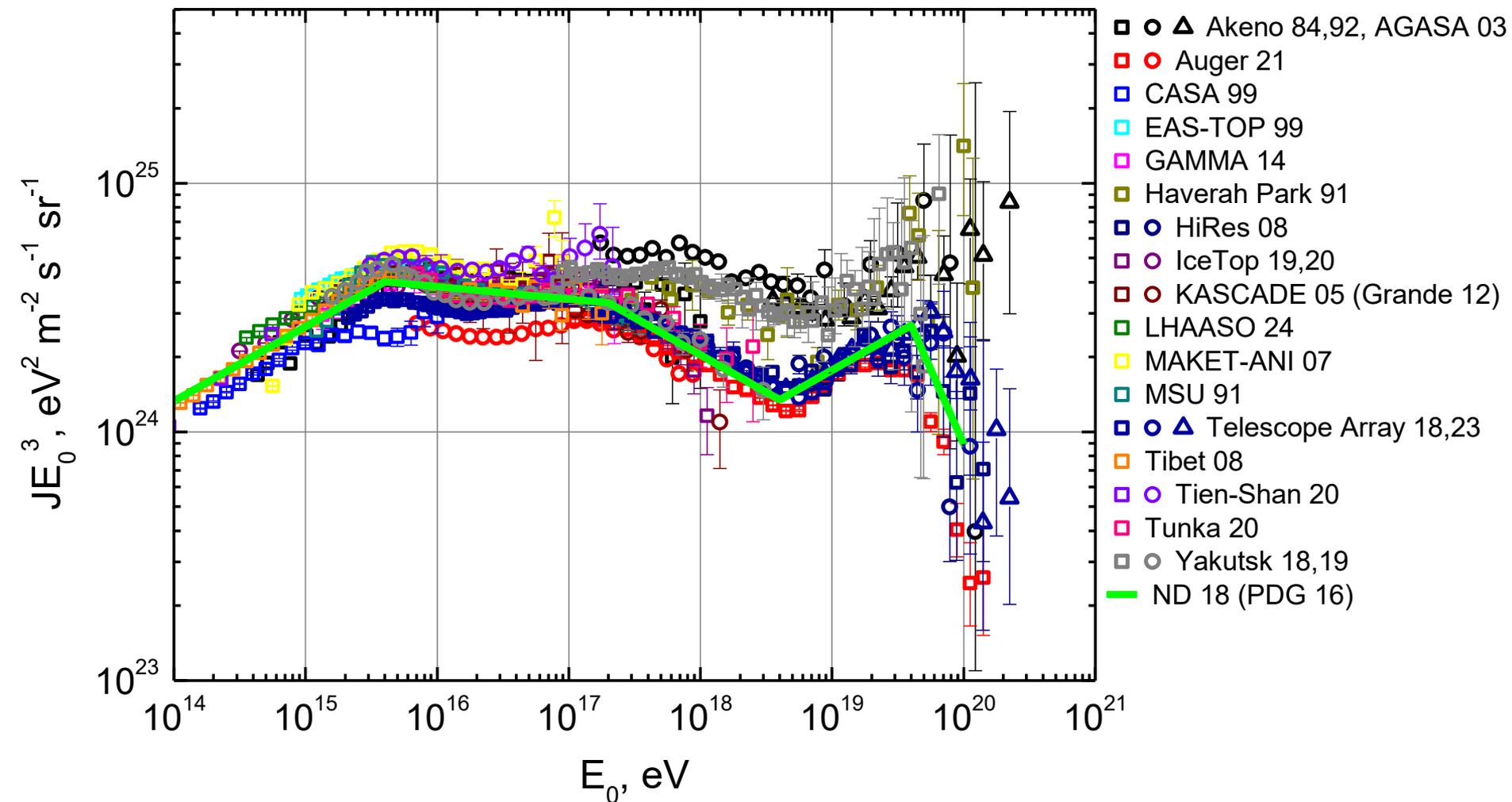
Получение расчетных СЛПМ в виде свертки модели энергетического спектра ПКЛ и функций пространственного распределения (ФПР) мюонов, которые вычисляются на основе моделирования ШАЛ с помощью программы CORSIKA для заданных энергий, зенитных углов, моделей адронных взаимодействий: EPOS-LHC, QGSJET-II-04, SIBYLL-2.3c (post-LHC) и QGSJET01D (pre-LHC) и предположений о массовом составе ПКЛ (p, Fe).

Сопоставление экспериментальных и расчетных СЛПМ.

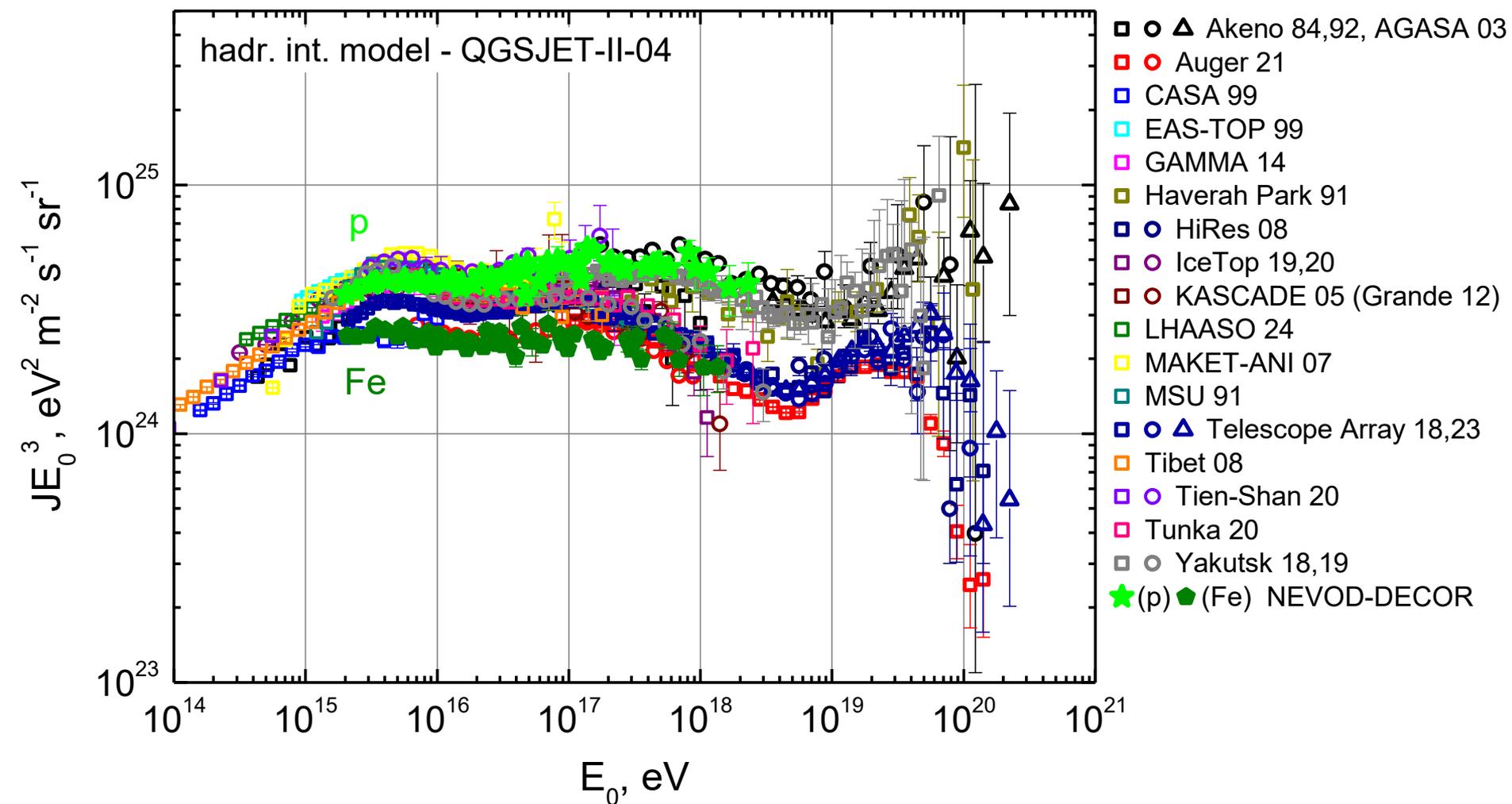
# СЛПМ для различных интервалов зенитных углов



# Энергетический спектр ПКЛ (эксперименты и модели)

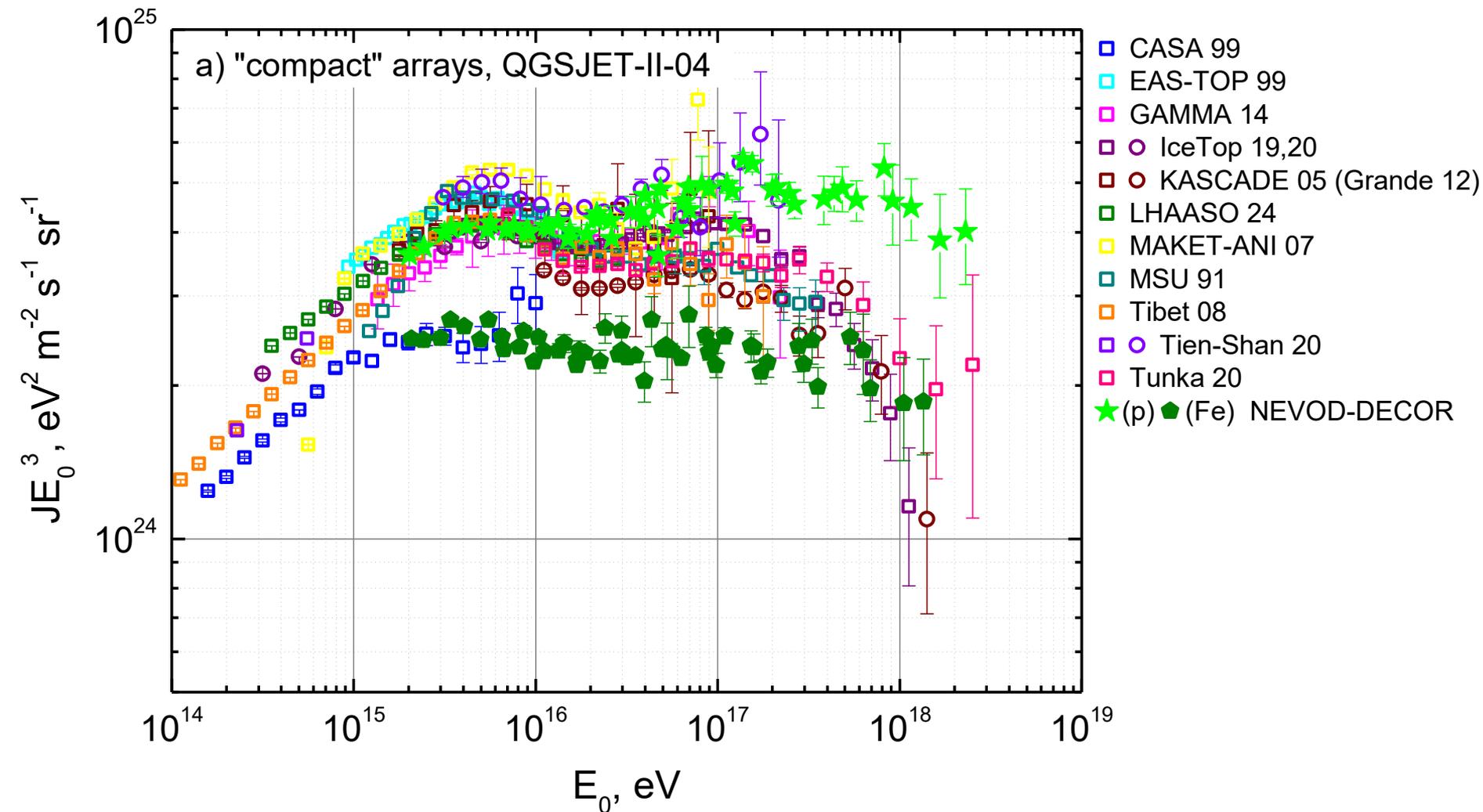


# Энергетический спектр ПКЛ по группам мюонов, зарегистрированным на установке НЕВОД-ДЕКОР

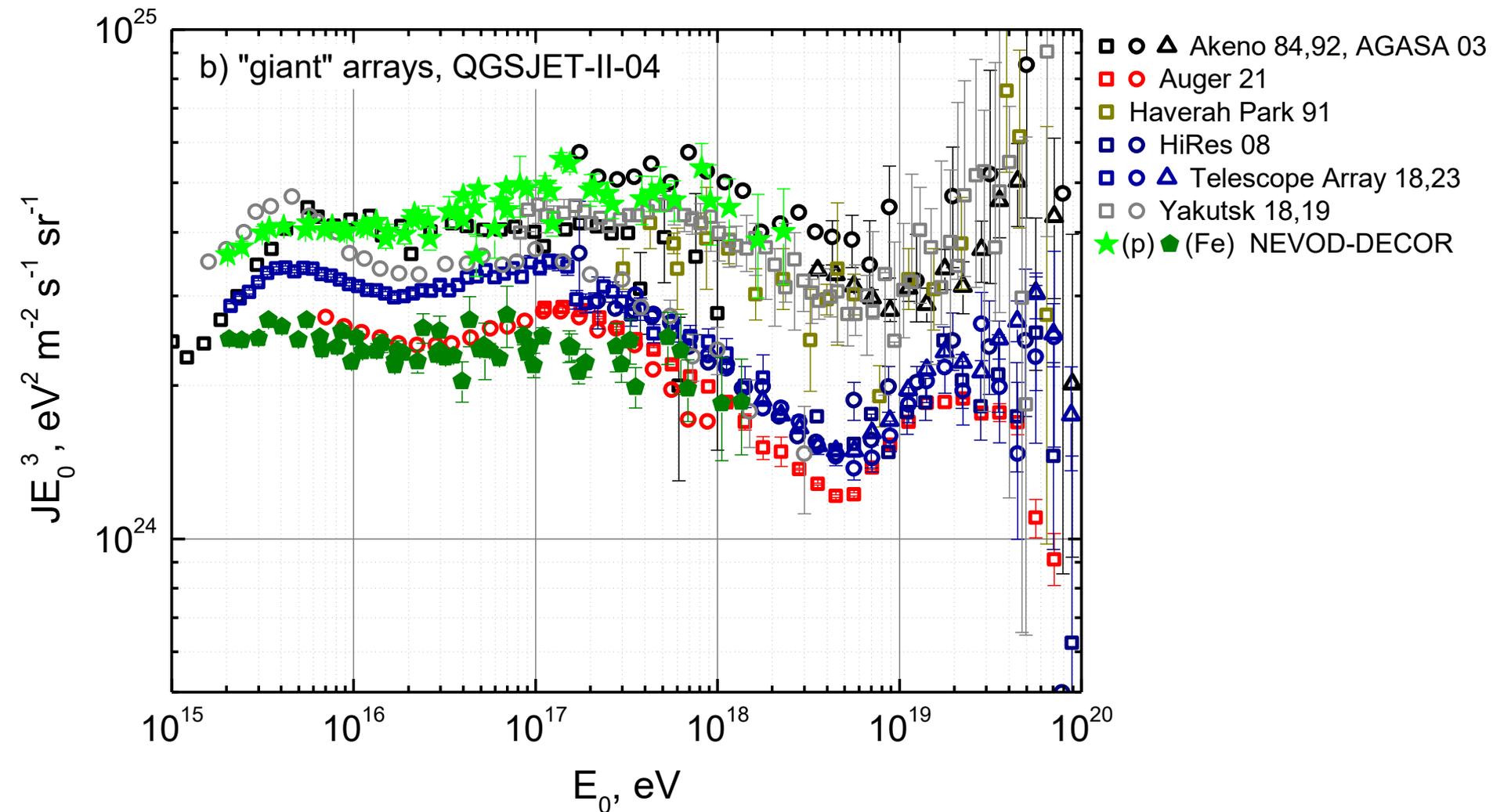


переход от СЛПМ к спектру ПКЛ:  $dJ/dE_0 = (dN/dE_0)_{\text{mod}} \times \left[ (dF/dD)_{\text{obs}} / (dF/dD)_{\text{sim}} \right]$

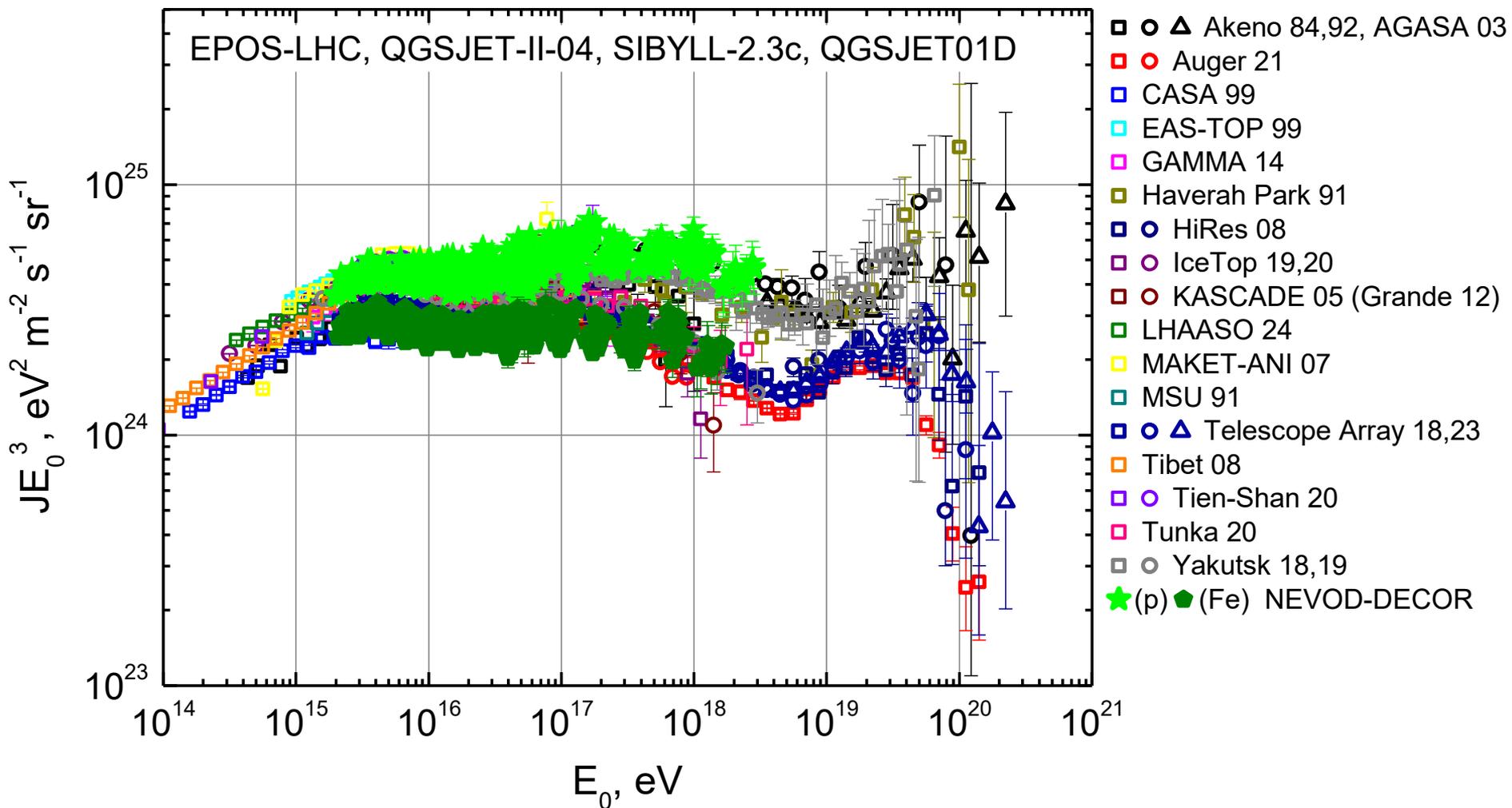
# Энергетический спектр ПКЛ по группам мюонов, зарегистрированным на установке НЕВОД-ДЕКОР



# Энергетический спектр ПКЛ по группам мюонов, зарегистрированным на установке НЕВОД-ДЕКОР



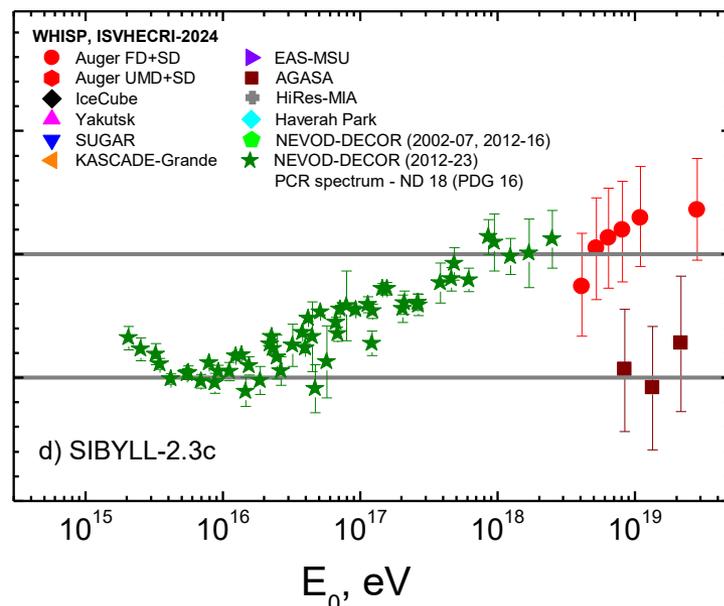
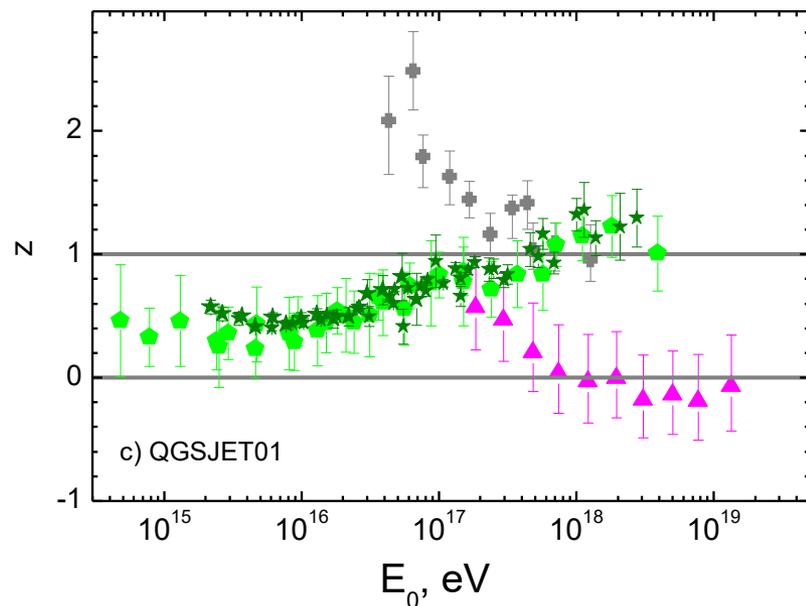
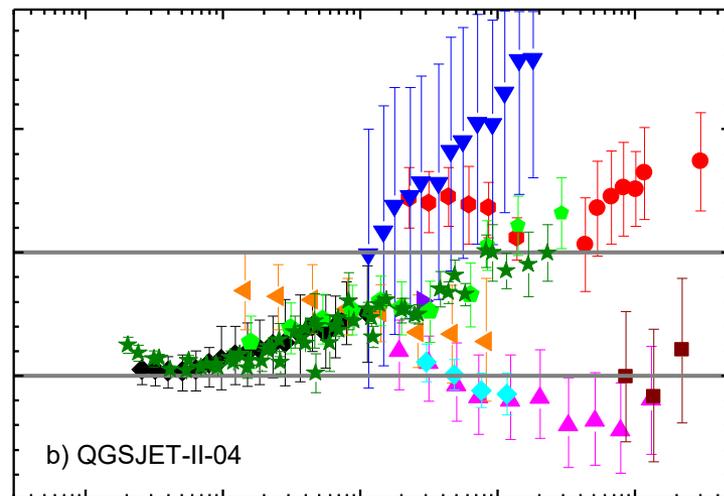
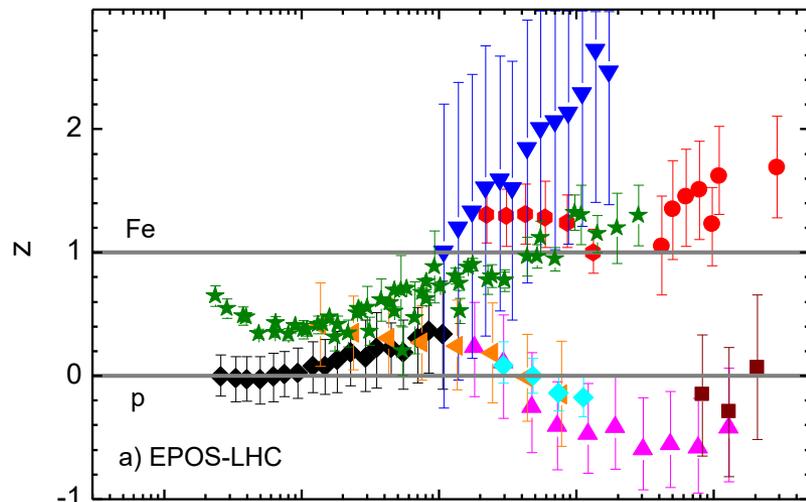
# Энергетический спектр ПКЛ по группам мюонов, зарегистрированным на установке НЕВОД-ДЕКОР



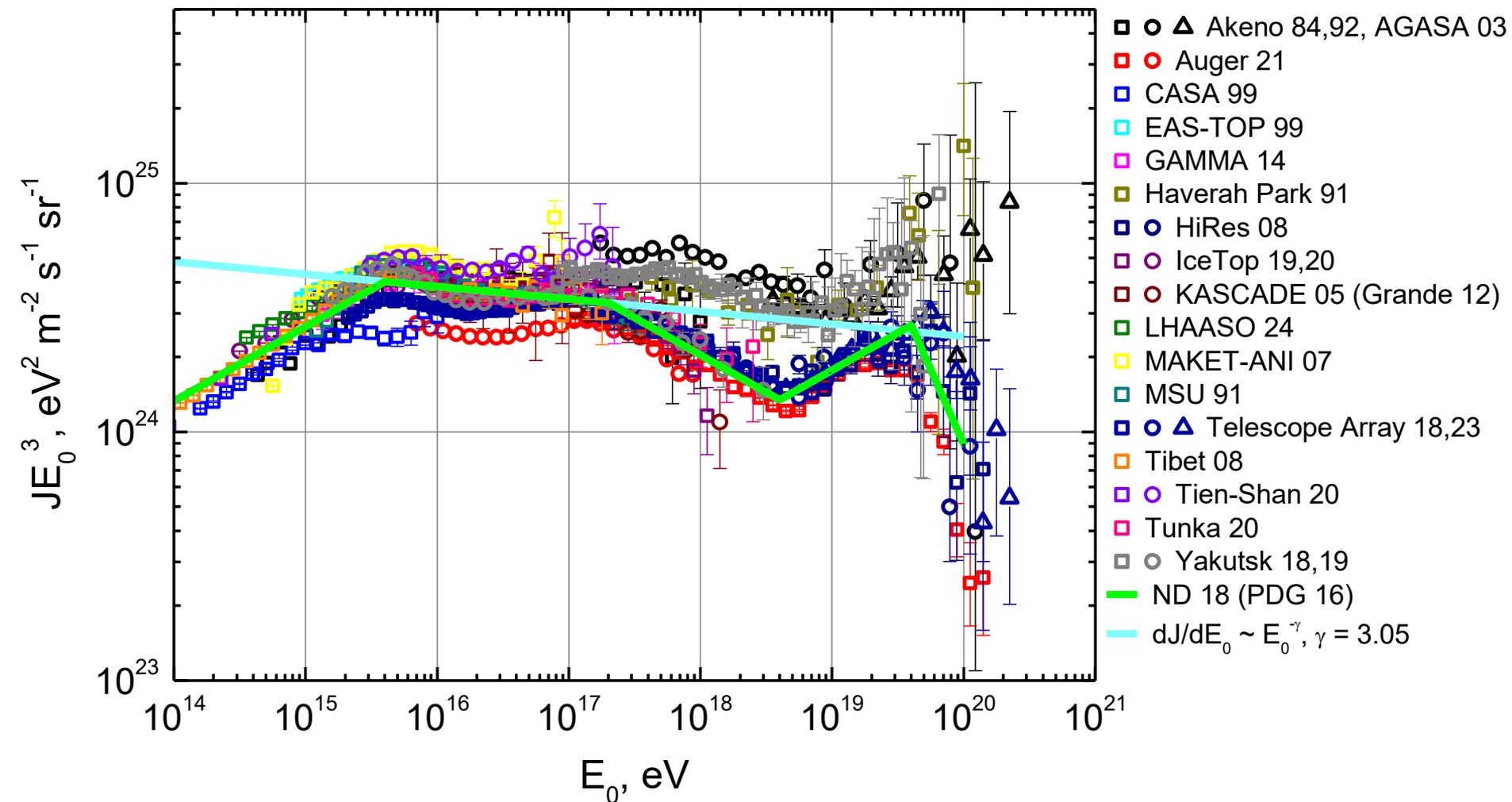
# Сравнение данных НЕВОД-ДЕКОР с результатами измерений мюонной компоненты ШАЛ в других экспериментах

$$z = \left[ \ln(N_{\mu}^{\text{det}}) - \ln(N_{\mu}^{\text{p sim}}) \right] / \left[ \ln(N_{\mu}^{\text{Fe sim}}) - \ln(N_{\mu}^{\text{p sim}}) \right]$$

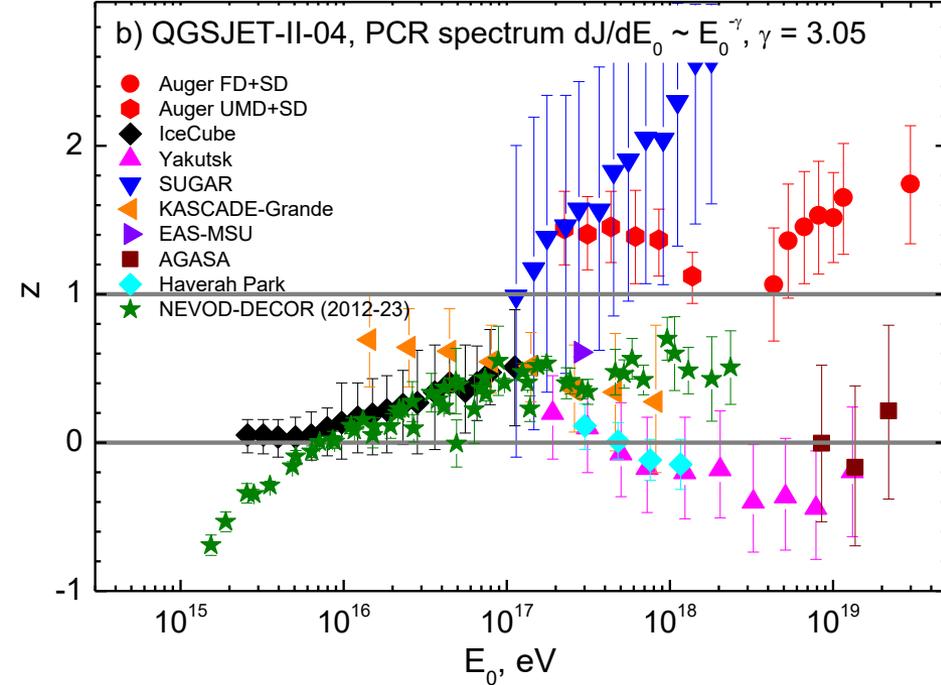
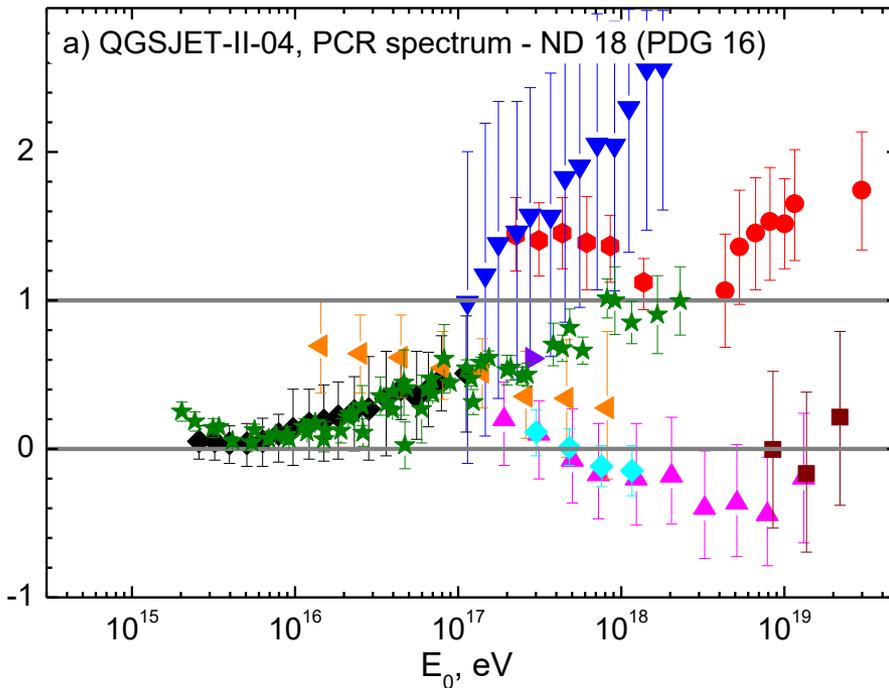
$N_{\mu}^{\text{det}}$  – экспериментальная оценка СЛПМ (Н-Д)



# Энергетический спектр ПКЛ (эксперименты и модели)



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



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

$N_{\mu}^{\text{det}}$  – экспериментальная оценка СЛПМ (числа мюонов плотности, ...) 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,  
 $Z = 1$  – ШАЛ от ядер железа.

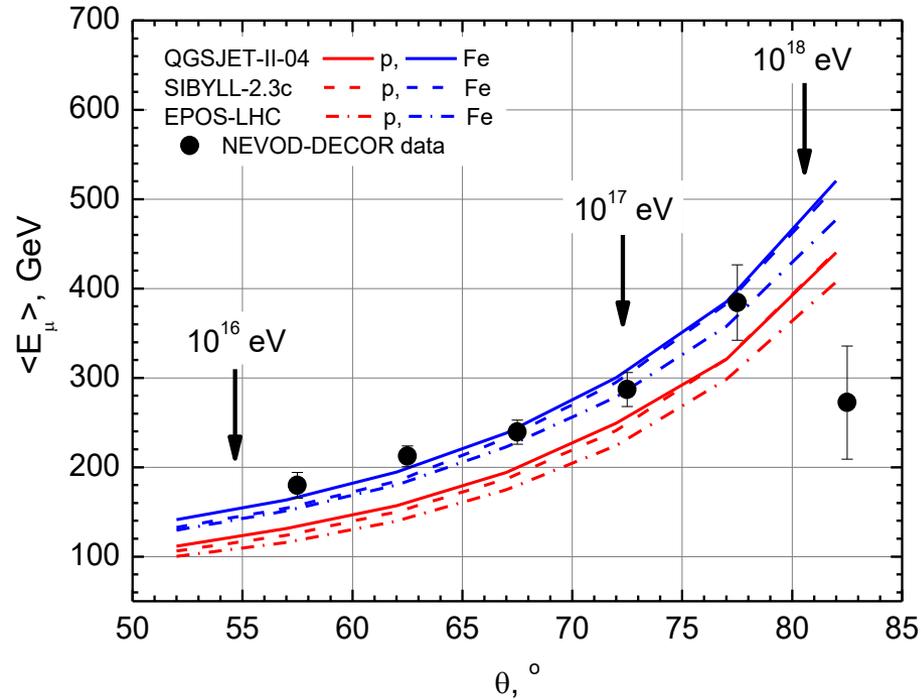
# Измерение энерговыделений групп мюонов

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

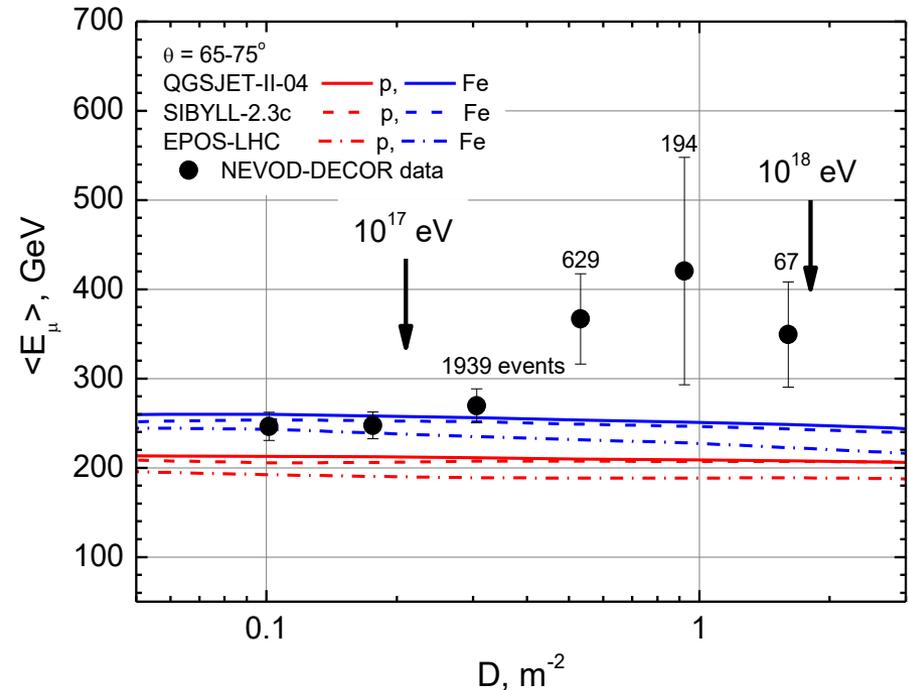
Один из возможных подходов – измерение энерговыделений групп мюонов в черенковском водном калориметре НЕВОД, так как средние потери мюонов в веществе практически линейно зависят от их энергии:  
 $dE/dX \sim a + bE$ .

Средние энергии мюонов в группах оценивались по удельным энерговыделениям с привлечением результатов моделирования отклика установки (пакет программ Geant4) на прохождение одиночных околоразрывных мюонов.

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



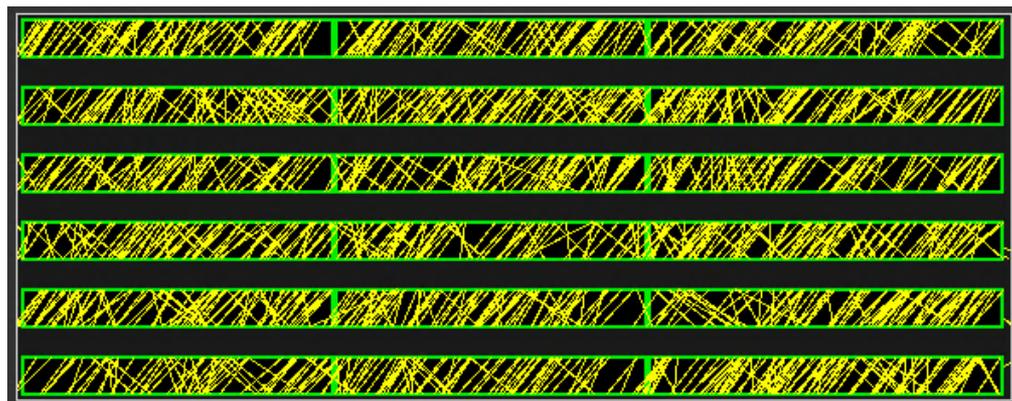
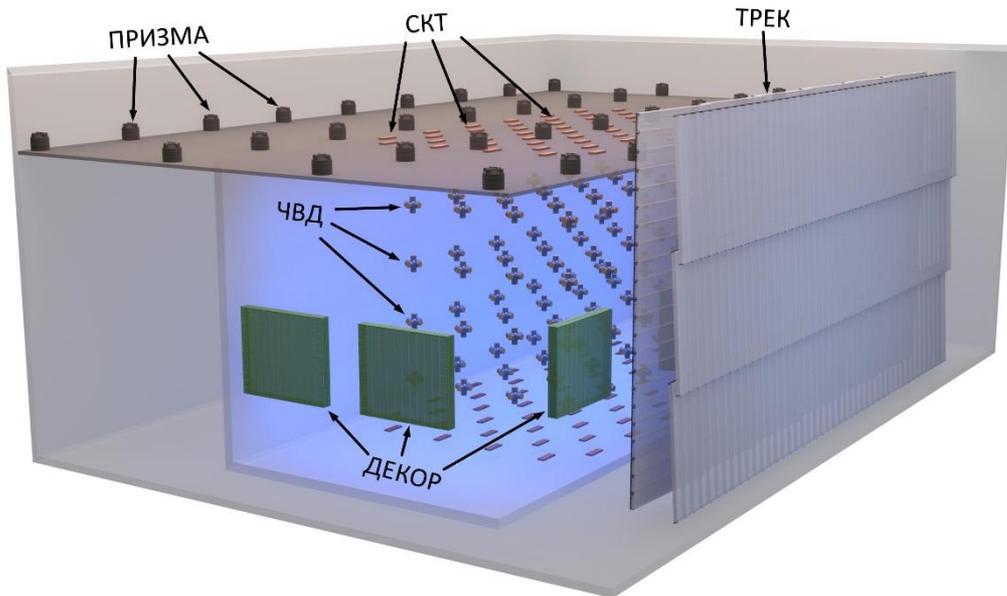
Зависимость средней энергии мюонов в группах от зенитного угла



Зависимость средней энергии мюонов в группах от локальной плотности мюонов

Для больших плотностей, соответствующих энергиям ПКЛ  $> 10^{17}$  эВ, превышение экспериментальных оценок средней энергии мюонов над расчетными: для p на  $4.2 - 4.8\sigma$ , для ядер Fe на  $3.1 - 3.7\sigma$ .

# Развитие ЭК НЕВОД – детектор ТРЕК



отклик детектора ТРЕК на прохождение группы мюонов

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

# Выводы

- ❑ На установке НЕВОД-ДЕКОР проводится длительный эксперимент по систематическому исследованию групп мюонов космических лучей в широком диапазоне зенитных углов.
- ❑ Сравнение энергетических спектров ПКЛ, восстановленных с использованием различных методов регистрации ШАЛ (включая группы мюонов), дает возможность устанавливать новые ограничения на имеющиеся предположения о массовом составе ПКЛ и на модели взаимодействия частиц при сверхвысоких энергиях.
- ❑ Характерные энергии мюонов в группах составляют сотни ГэВ. Это определяет повышенную чувствительность метода СЛПМ к наиболее энергичным адронам ШАЛ, которые образуются в передней кинематической области взаимодействий. Что открывает пути поиска новых физических особенностей (явлений).
- ❑ Создание детектора ТРЕК и модернизация черенковского водного калориметра НЕВОД позволят расширить исследуемый энергетический диапазон ПКЛ и улучшить точность измерений.

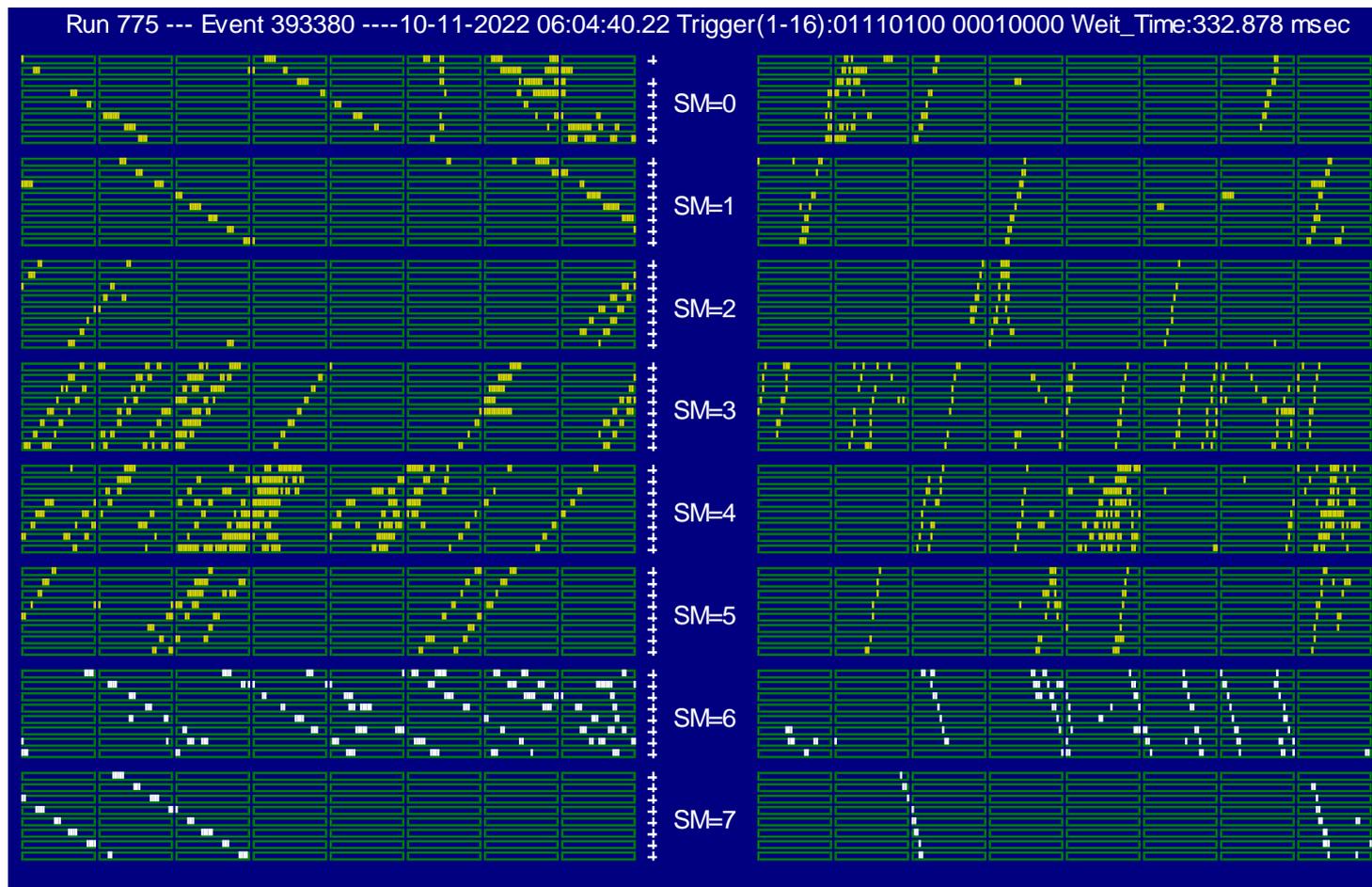
# Спасибо за внимание!





# Рекордная группа мюонов в детекторе ДЕКОР (1)

множественность  $m = 33$  частицы, зенитный угол  $\theta \approx 84^\circ$ ,  $E_0 \approx 4 \times 10^{19}$  эВ

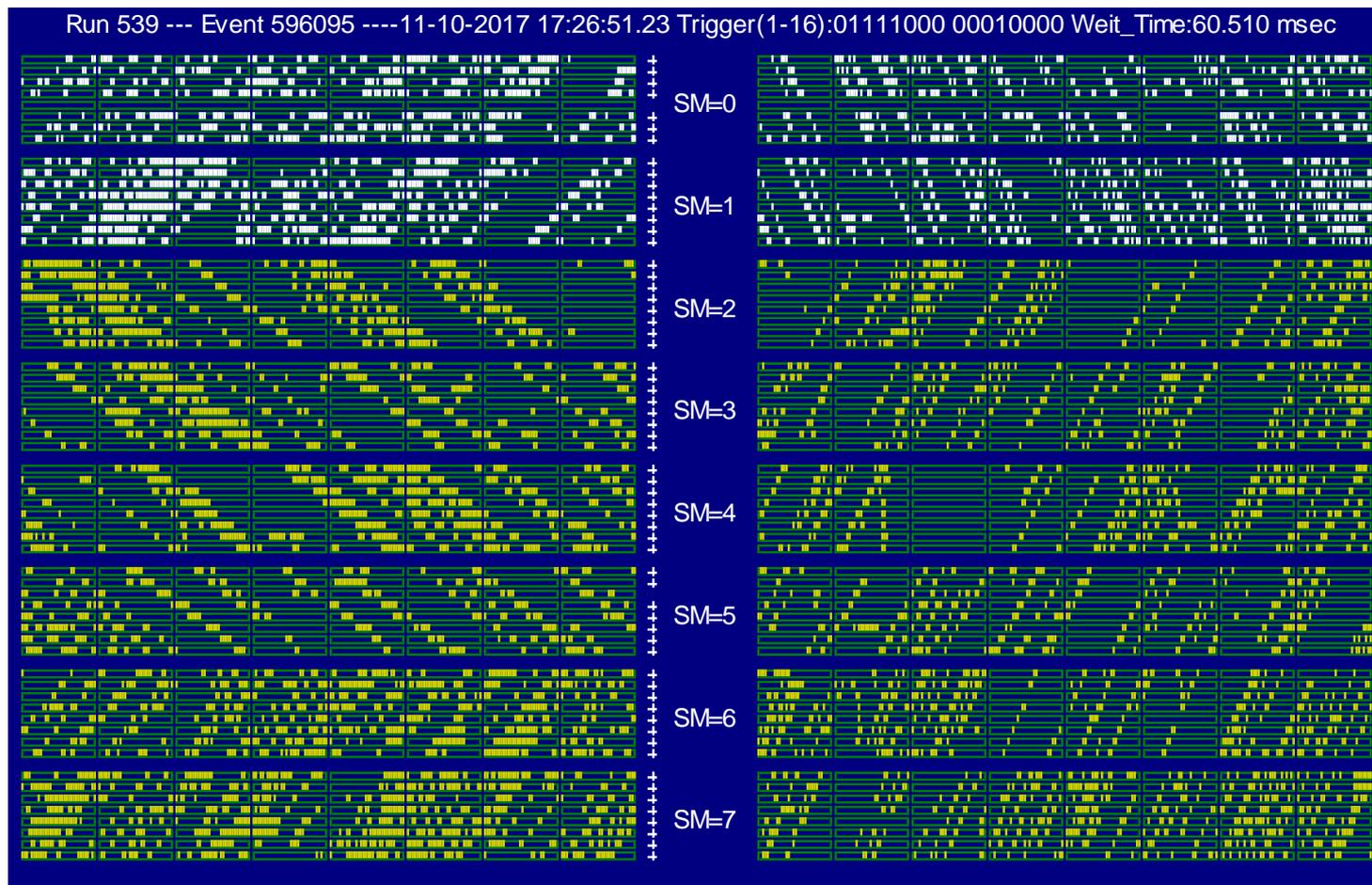


Y-проекция  
(азимутальный угол)

X-проекция  
(проекционный зенитный угол)

# Рекордная группа мюонов в детекторе ДЕКОР (2)

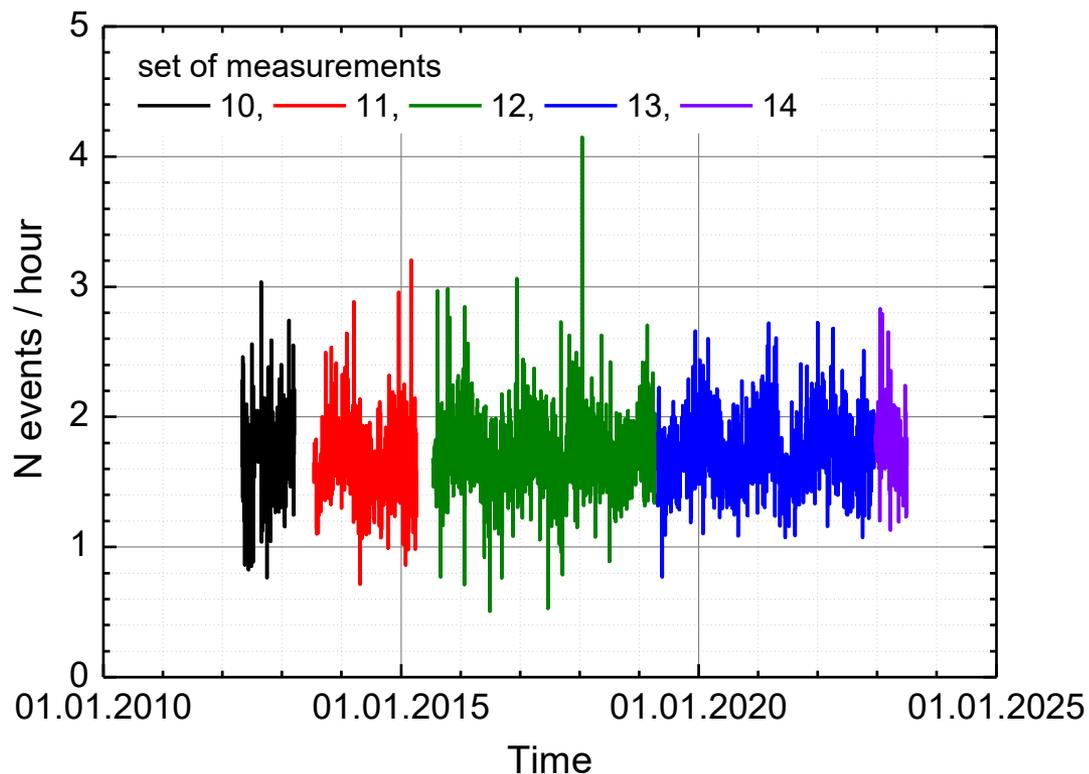
множественность  $m \approx 124$  частицы, зенитный угол  $\theta \approx 75^\circ$ ,  $E_0 \approx 7 \times 10^{18}$  эВ



Y-проекция  
(азимутальный угол)

X-проекция  
(проекционный зенитный угол)

# Частота регистрации групп мюонов



серия	период измерений	“живое” время, ч	число событий
10	май 2012 – март 2013	5541.8	9412
11	июль 2013 – апрель 2015	11897.5	19923
12	июль 2015 – апрель 2019	27269.3	46708
13	апрель 2019 – декабрь 2022	26602.6	46090
14	декабрь 2022 – июль 2023	3927.4	7040
итого:	май 2012 - июль 2023	75238.6	129173

# Экспериментальные оценки СЛПМ в независимом от детектора виде

$$dF/dD = dF_0/dD \times [\Delta N_{\text{obs}}(\Delta D, \Delta \theta)] / [\Delta N_{\text{exp}}(\Delta D, \Delta \theta)]$$

“опорная” модель:  $dF_0/dD = CD^{-(\beta+1)} \cos^\alpha \theta$        $C = 7 \times 10^{-4}$ ,  $\alpha = 4.7$  и  $\beta = 2.1$

$$D^3 dF/dD = [N_{\text{obs}}(\Delta D, \Delta \theta) / N_{\text{exp}}(\Delta D, \Delta \theta)] CD^{2-\beta} \cos^\alpha \theta$$

# Расчеты СЛПМ

Интегральный СЛПМ:  $F(\geq D) = \int N(\geq E_0(\mathbf{r}, D)) dS$  событий / (с ср)

$N(\geq E_0)$  – энергетический спектр ПКЛ

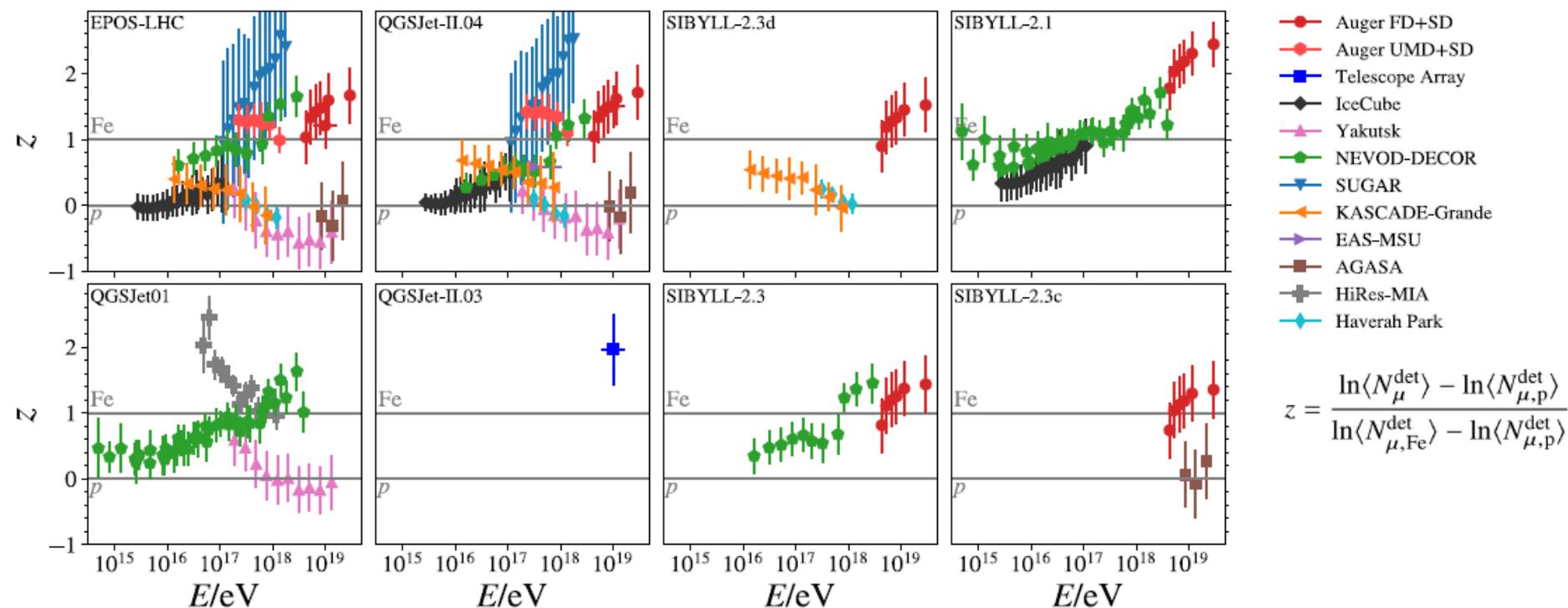
$E_0$  определяется уравнением:  $\rho(E_0, \mathbf{r}) = D$

Дифференциальный СЛПМ:  $dF/dD = \int (dN/dE_0) / [d\rho(E_0, \mathbf{r})/dE_0] dS$

## 4) Combined analysis

ISVHECRI 2024

Preliminary



J.C. Arteaga-WHISP's combined analysis of  $\mu$  data

ISVHECRI 2024, Puerto Vallarta, Mx

10

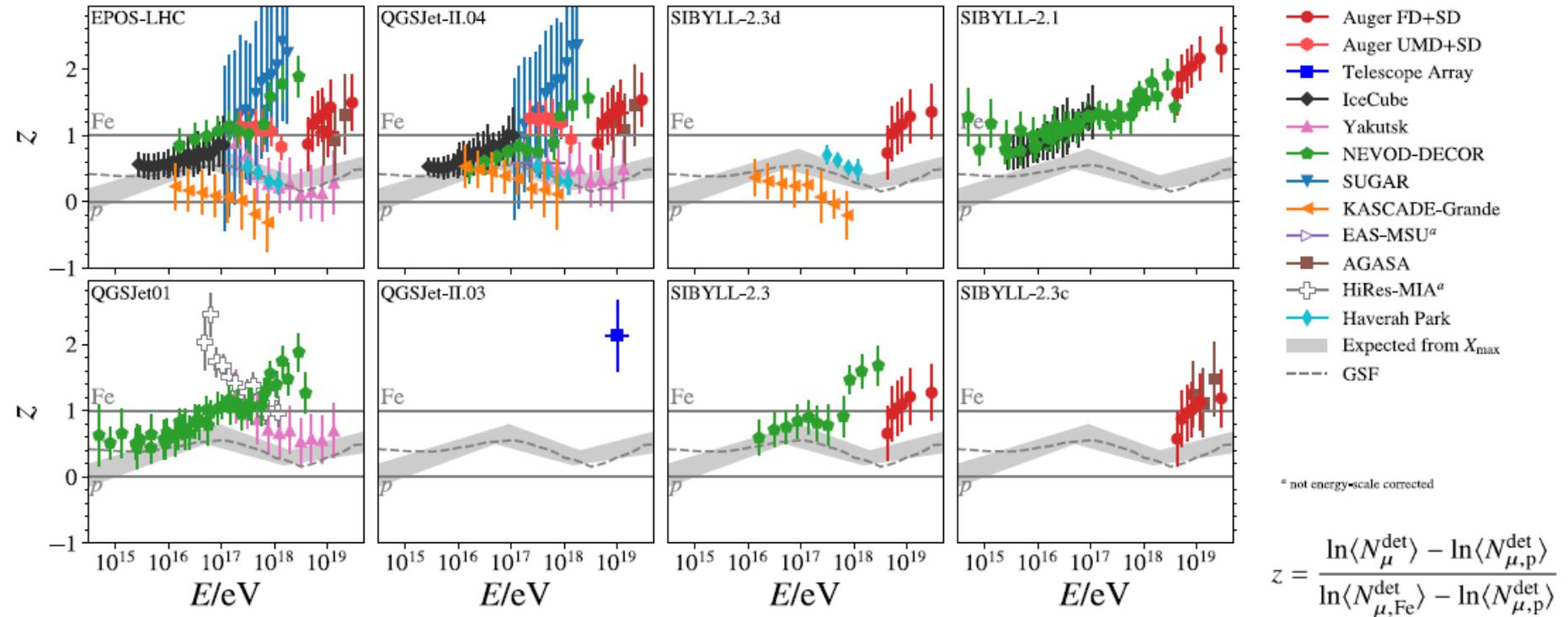
J.C. Arteaga-Velázquez, A combined analysis from the **WHISP** working group on the muon data from ten extensive air shower experiments

## 4) Combined analysis

▶ The z-scale after applying the energy shifts for common energy calibration.

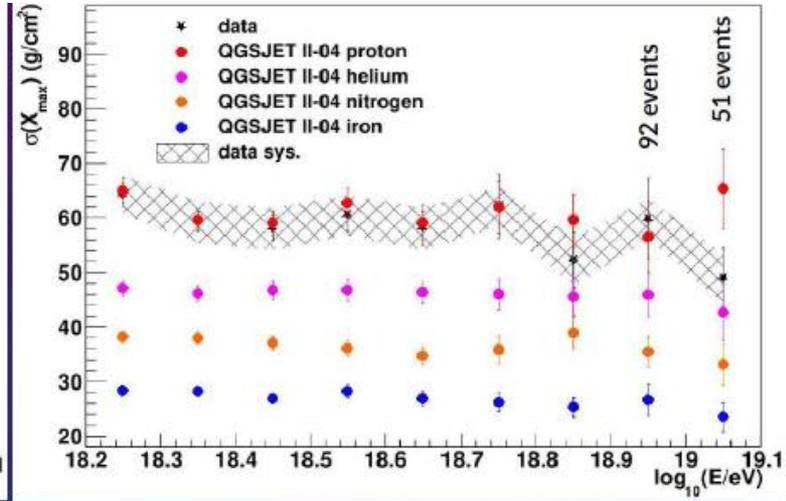
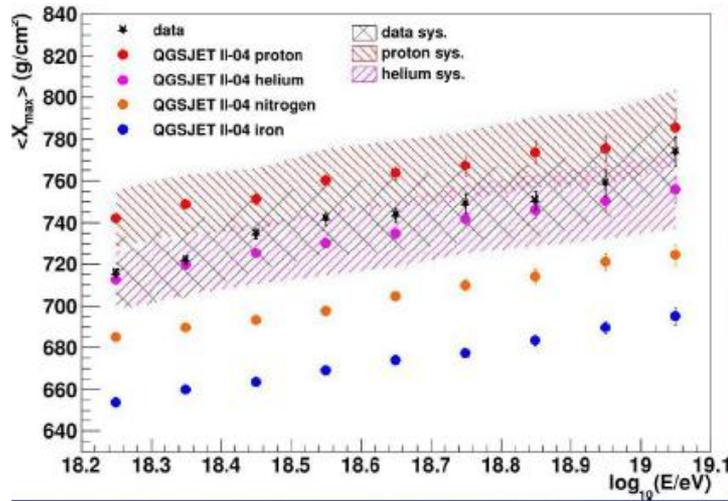
ISVHECRI 2024

Preliminary

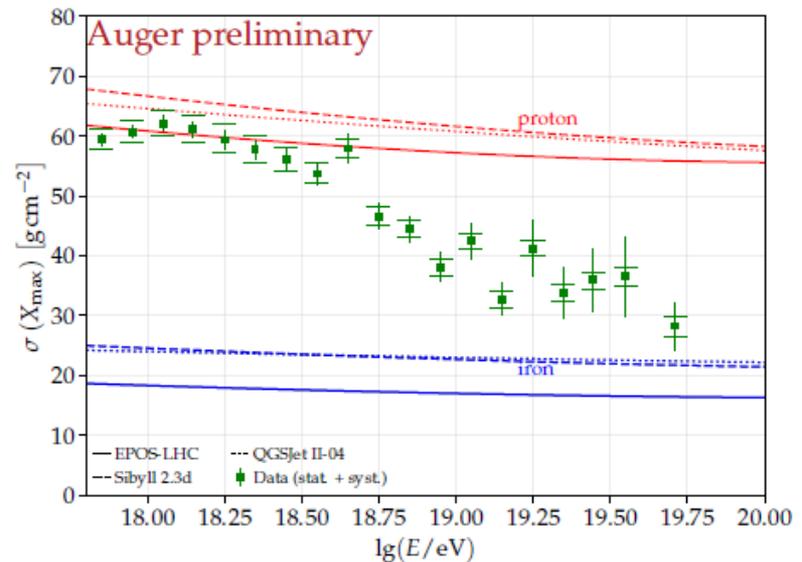
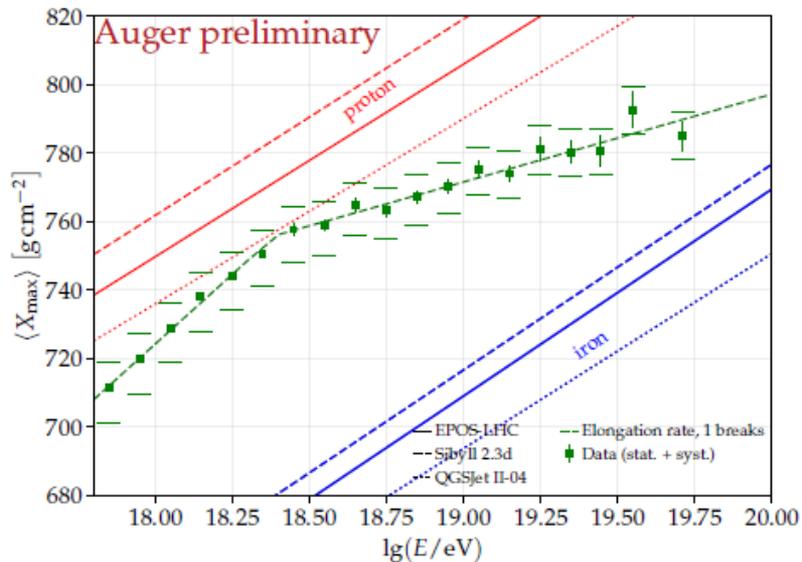


# Измерения глубины максимума развития ШАЛ $X_{\max}$ флуоресцентным методом

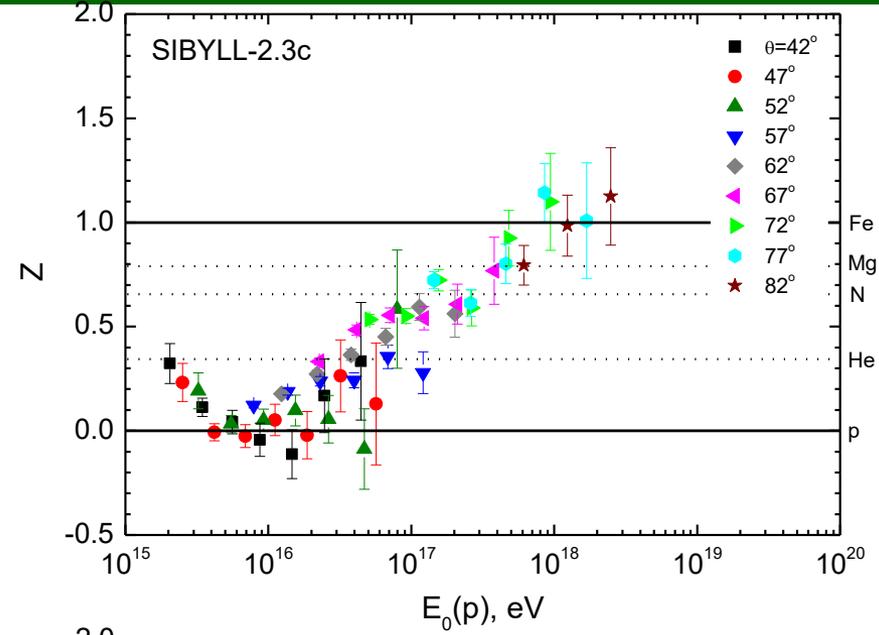
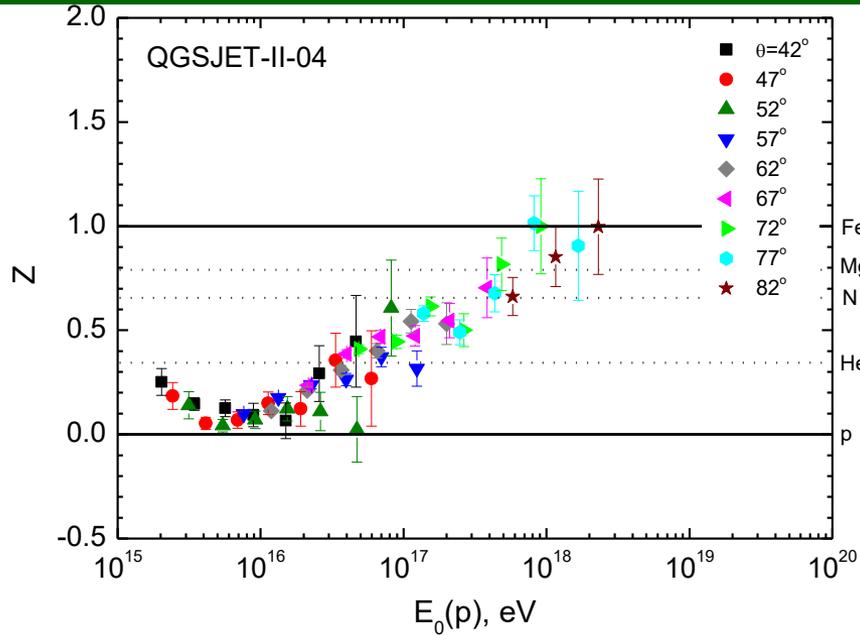
John Matthews, Telescope Array Collaboration, ISVHECRI-2024



Thomas Fitoussi, Pierre Auger Collaboration, UHECR-2022



# Сопоставление СЛПМ для различных зенитных углов (влияние выбора модели адронных взаимодействий)

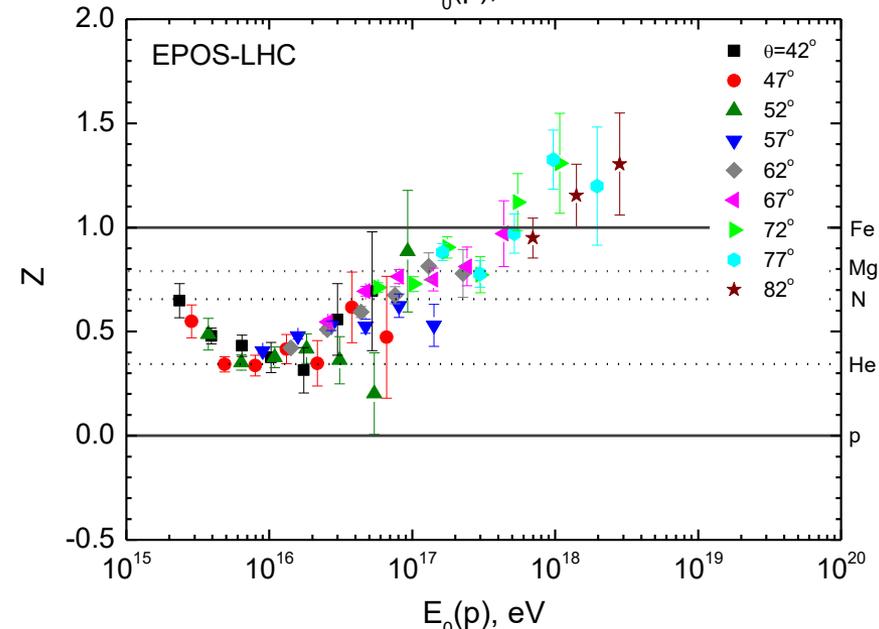


$$Z = \frac{\ln(N_{\mu}^{\text{det}}) - \ln(N_{\mu}^{\text{p sim}})}{\ln(N_{\mu}^{\text{Fe sim}}) - \ln(N_{\mu}^{\text{p sim}})}$$

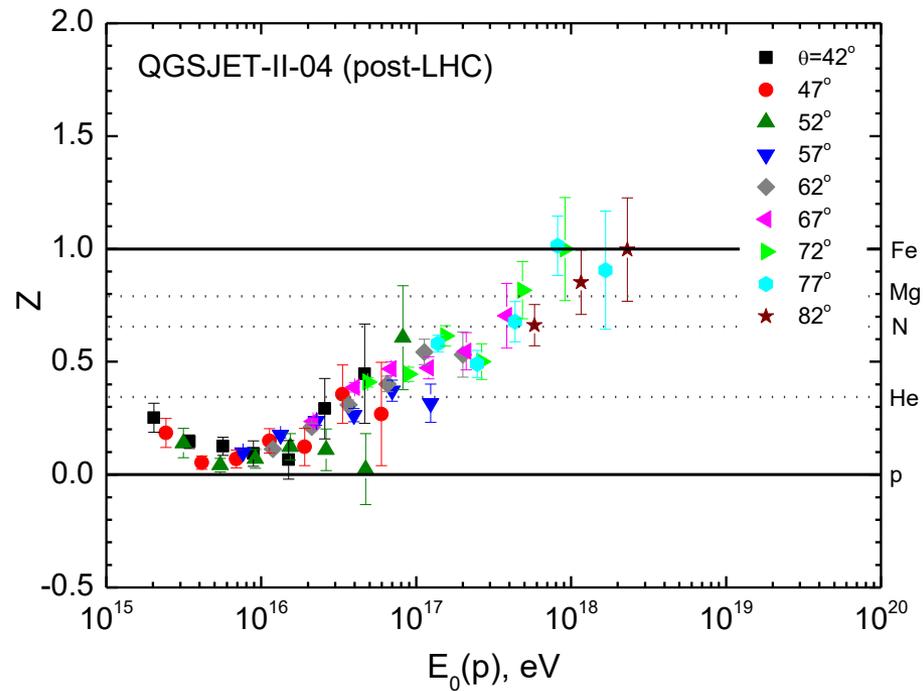
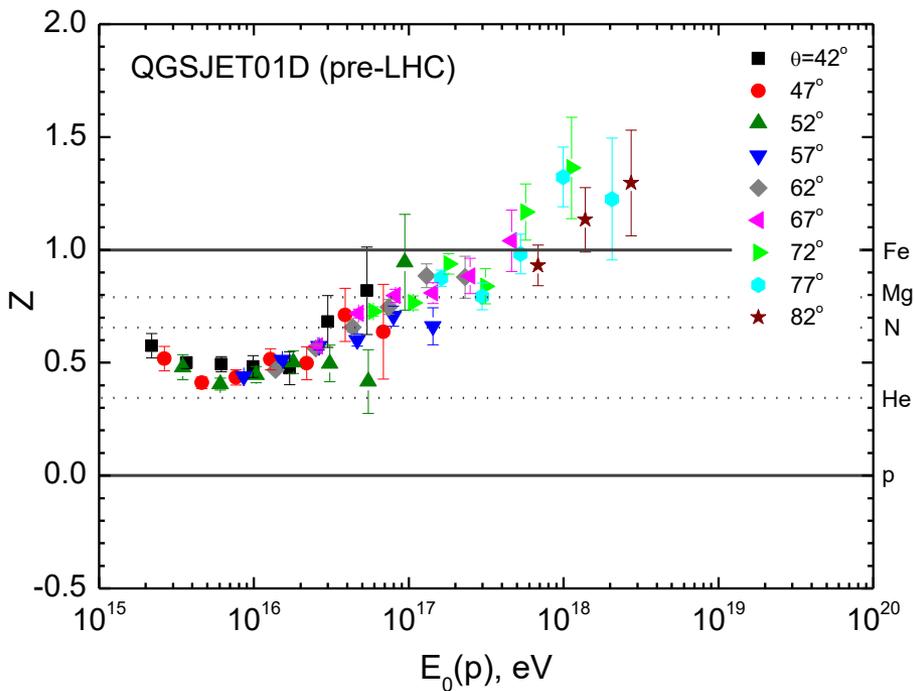
$N_{\mu}^{\text{det}}$  – экспериментальная оценка числа мюонов (плотности, СЛПМ, ...) в детекторе,

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

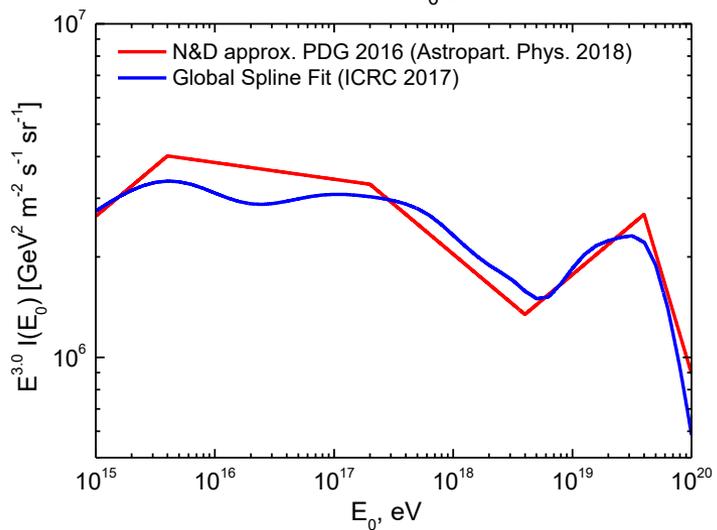
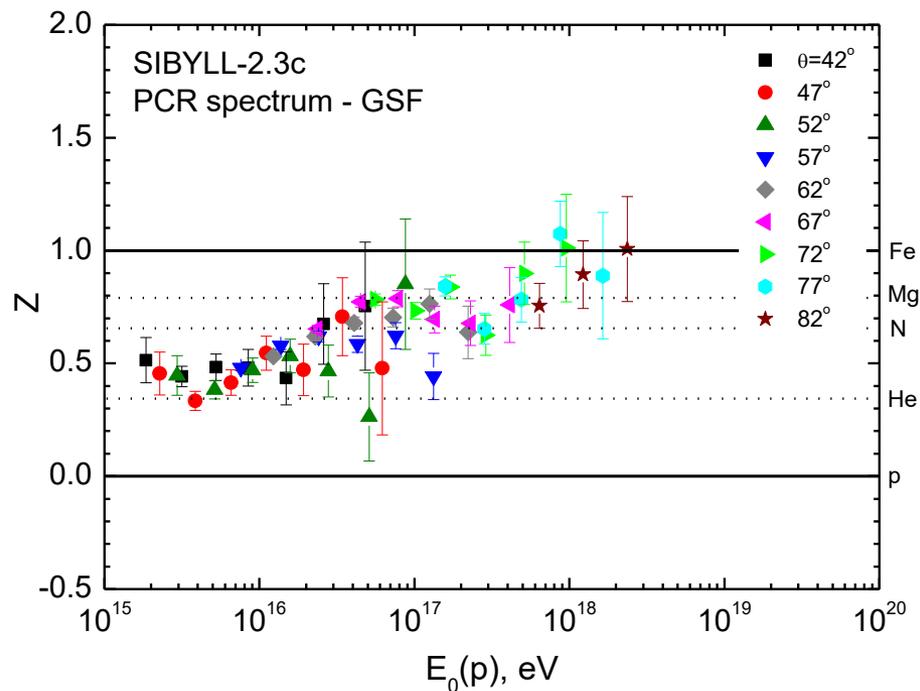
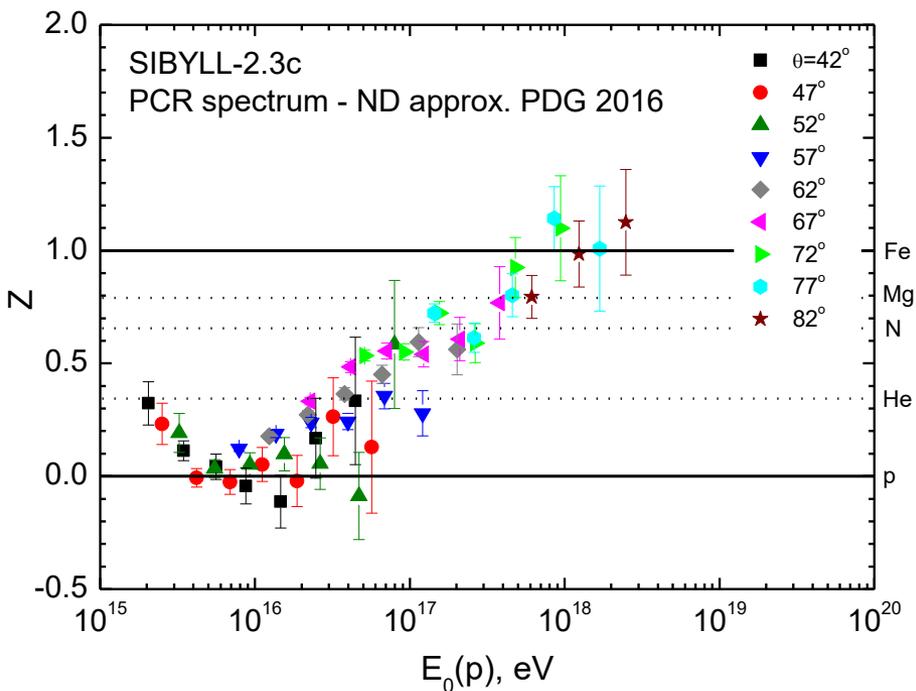
$Z = 0$  соответствует ШАЛ от протонов,  
 $Z = 1$  – ШАЛ от ядер железа.



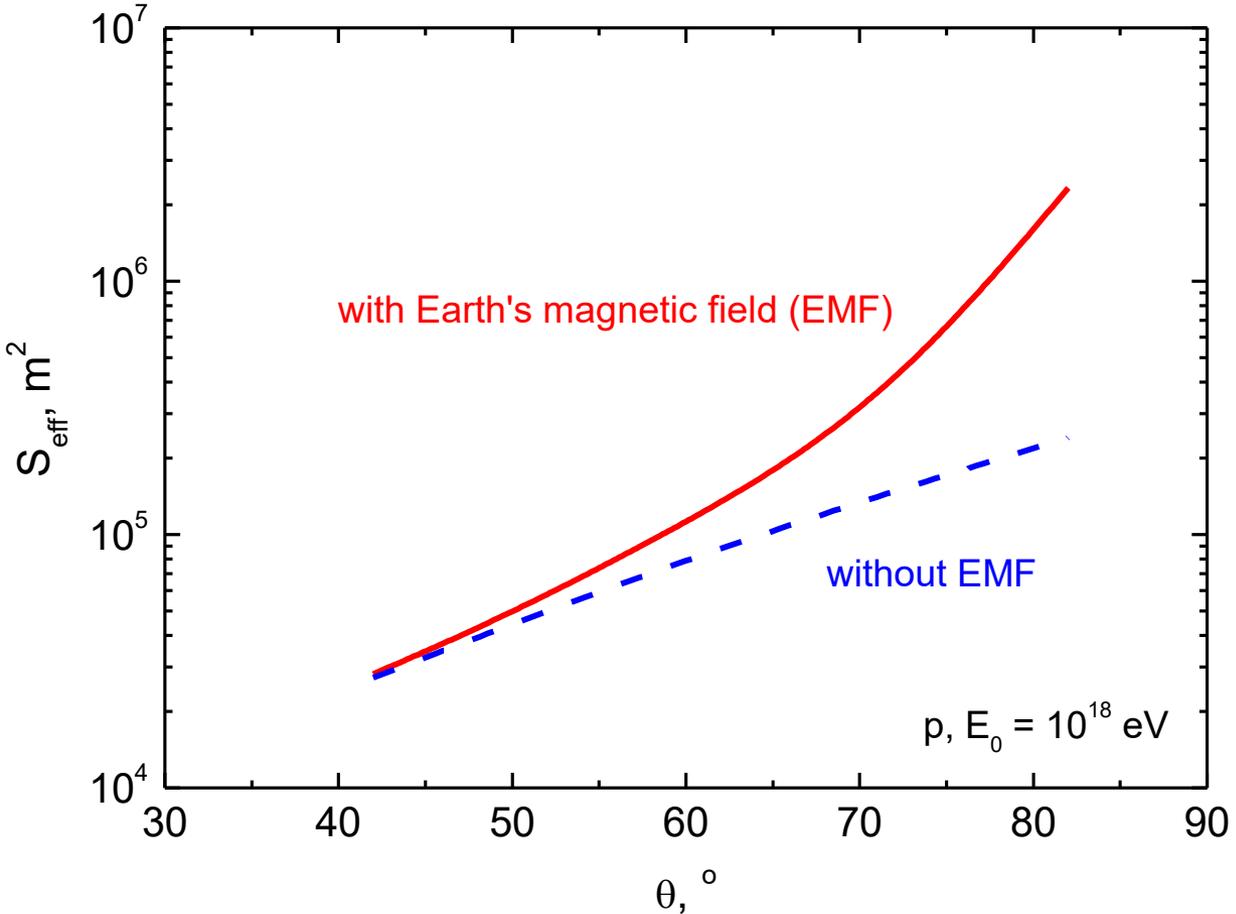
# Сопоставление СЛПМ для различных зенитных углов (влияние выбора модели адронных взаимодействий)

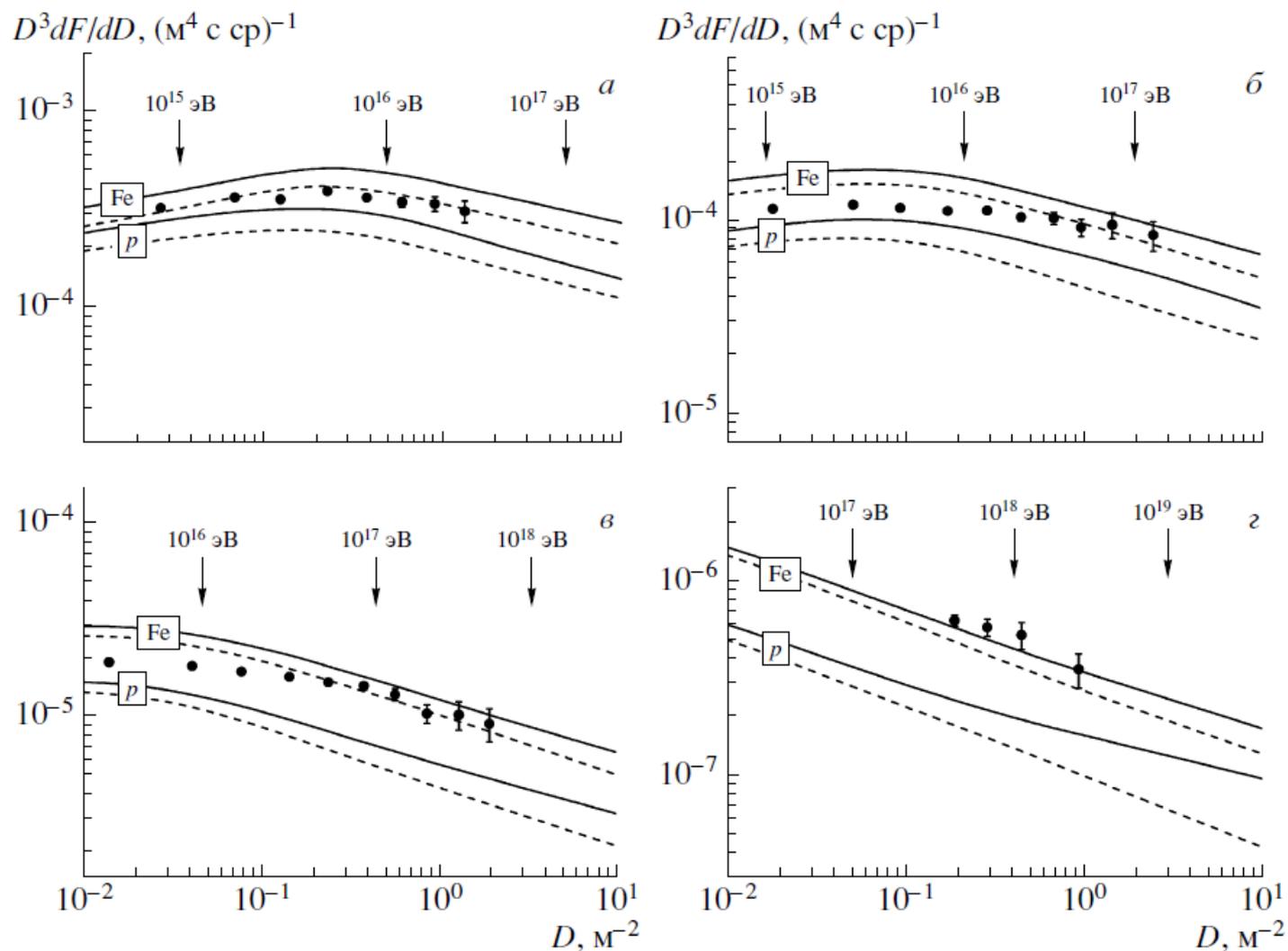


# Сопоставление СЛПМ для различных зенитных углов (влияние выбора энергетического спектра ПКЛ)

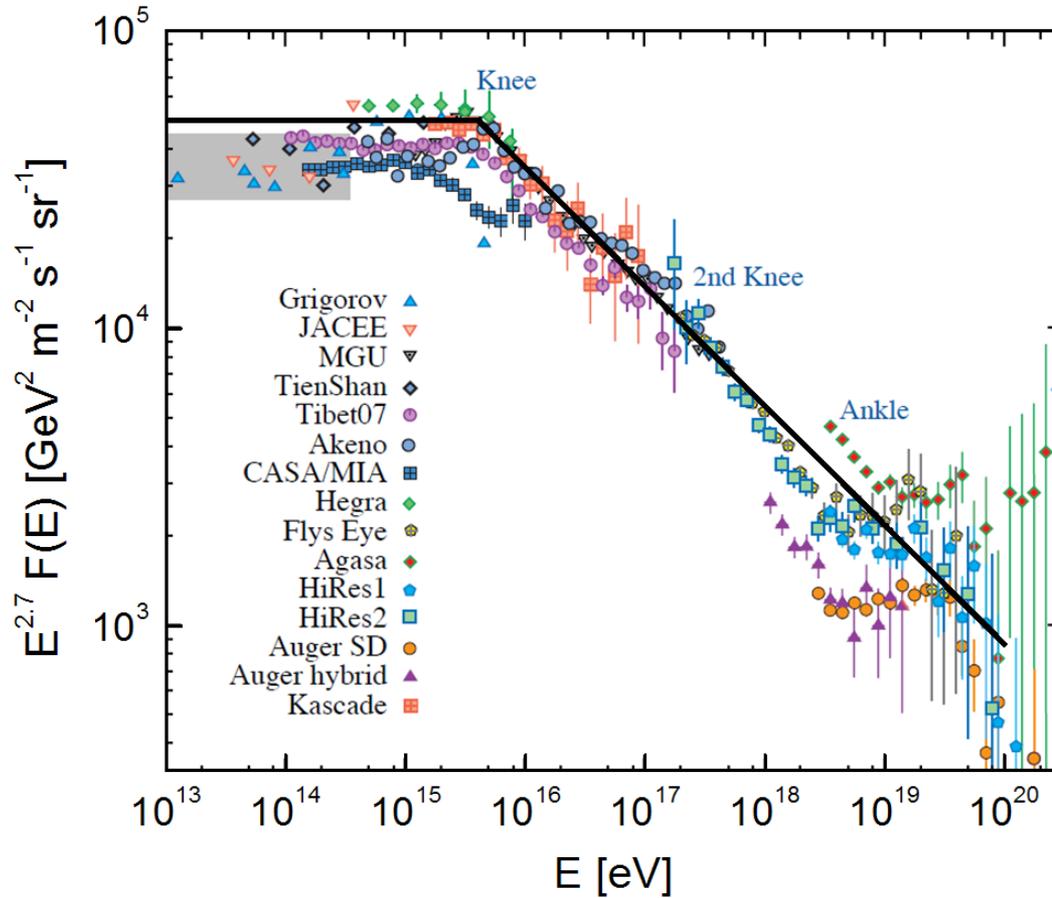


# Эффективная площадь собирания событий для метода СЛПМ





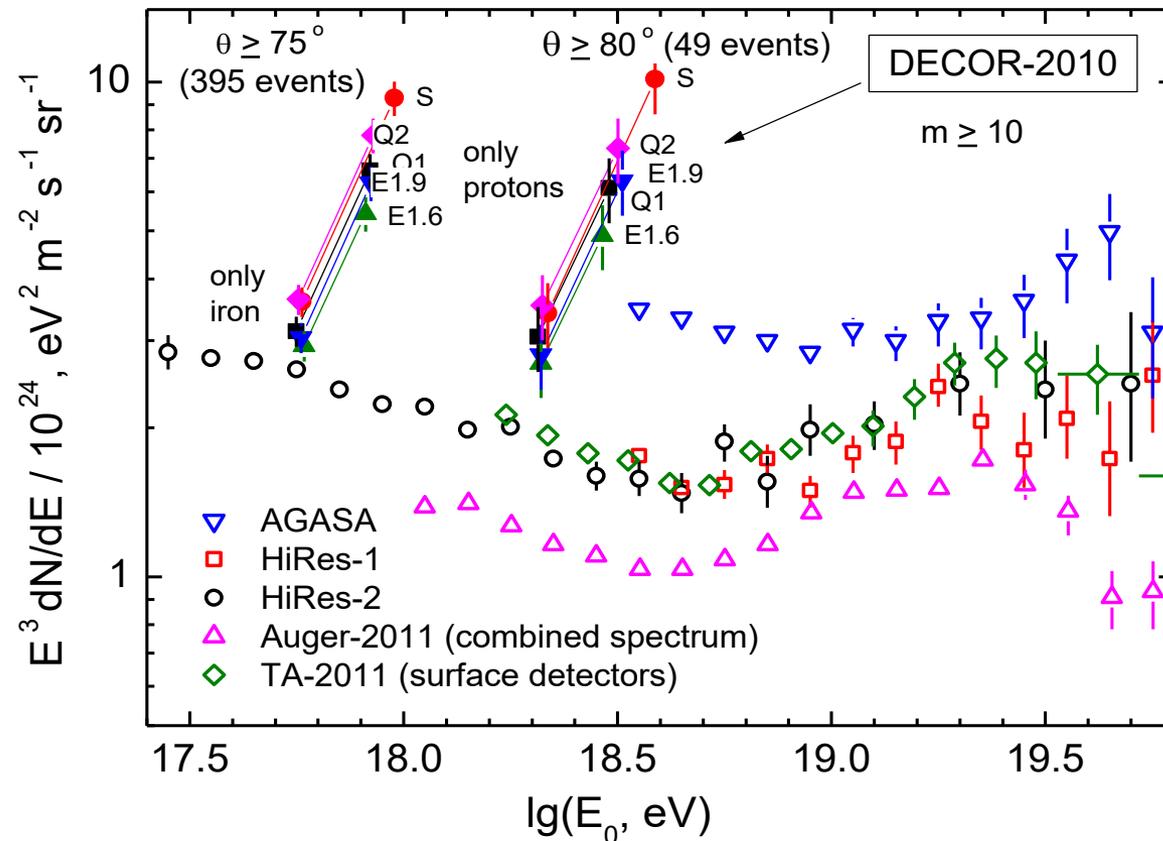
**Рис. 9.** Экспериментальные и расчетные дифференциальные спектры локальной плотности мюонов для зенитных углов  $35^\circ$  (*a*),  $50^\circ$  (*б*),  $65^\circ$  (*в*) и  $78^\circ$  (*г*). Точки — экспериментальные данные; сплошные и штриховые кривые — расчет с моделями QGSJET01 и SIBYLL 2.1 соответственно. Нижние пары кривых на каждом рисунке — первичные протоны, верхние — ядра железа.



The all-particle spectrum, PDG 2008

# Энергетический спектр ПКЛ при сверхвысоких энергиях

R.P. Kokoulin et al., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 196 (2009) 106; O. Saavedra et al., Journ. of Phys.: Conf. Ser. 409 (2013) 012009



Оценки спектра ПКЛ, основанные на данных ДЕКОР по группам мюонов при больших зенитных углах, оказываются плохо совместимы (даже в предположении тяжелого массового состава) с данными установок HiRes, PAO, TA. Это противоречие становится еще более значимым, если принять во внимание, что данные флуоресцентных детекторов указывают на доминирование легких ядер в области энергий  $\sim 10^{18}$  эВ.

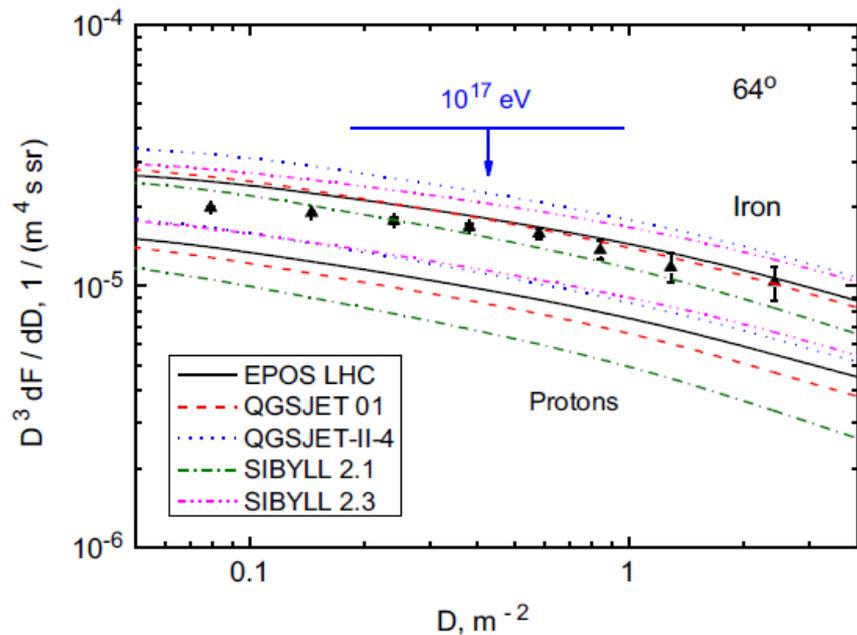


Fig. 8. Reconstructed local muon density spectrum at  $64^\circ$  zenith angle (dark triangles) and expected spectra calculated for protons and iron nuclei as primary particles (lower and upper groups of the curves respectively) with five different hadron interaction models. Arrow indicates the position of the effective  $10^{17}$  eV primary particle energy.

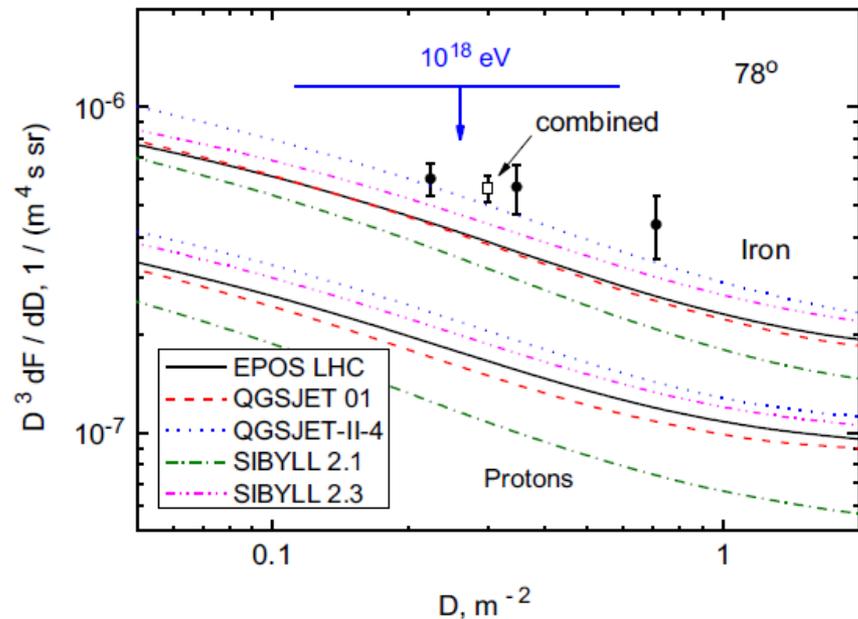
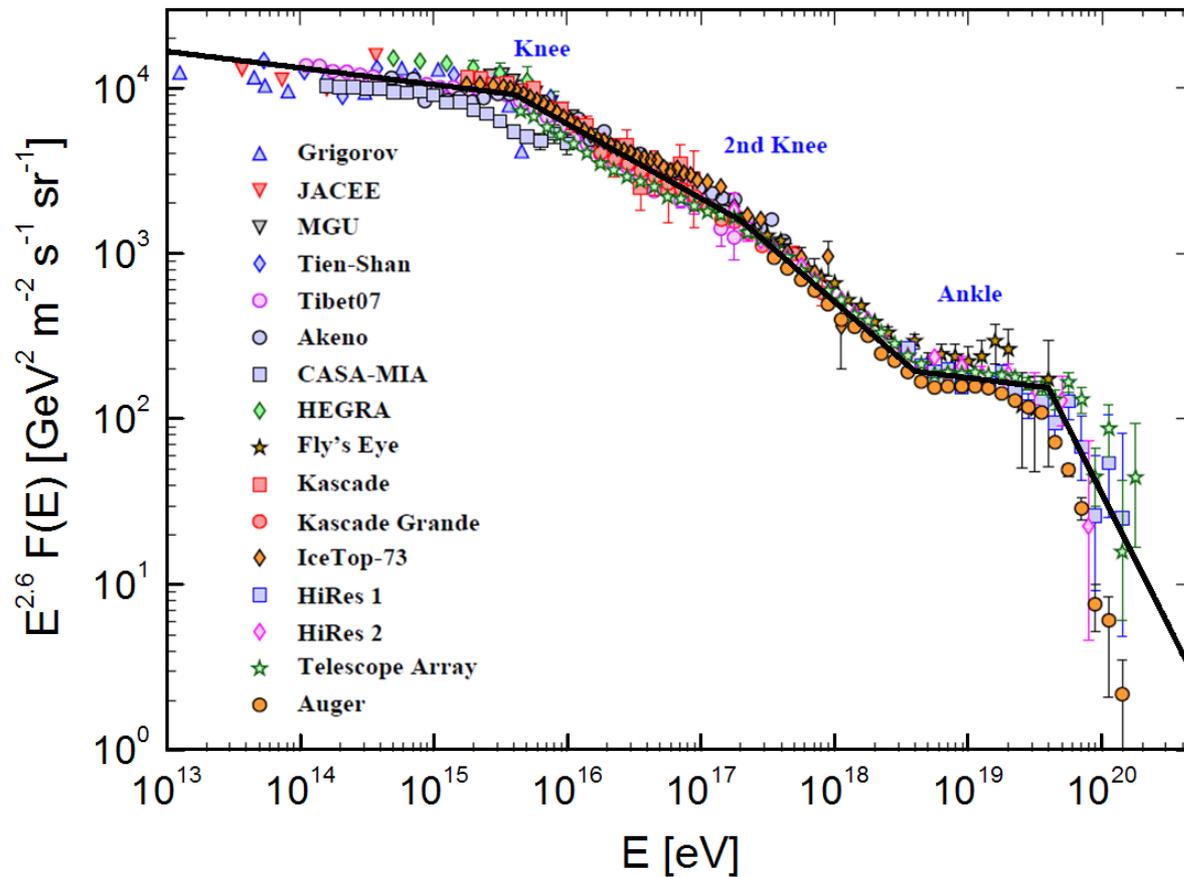
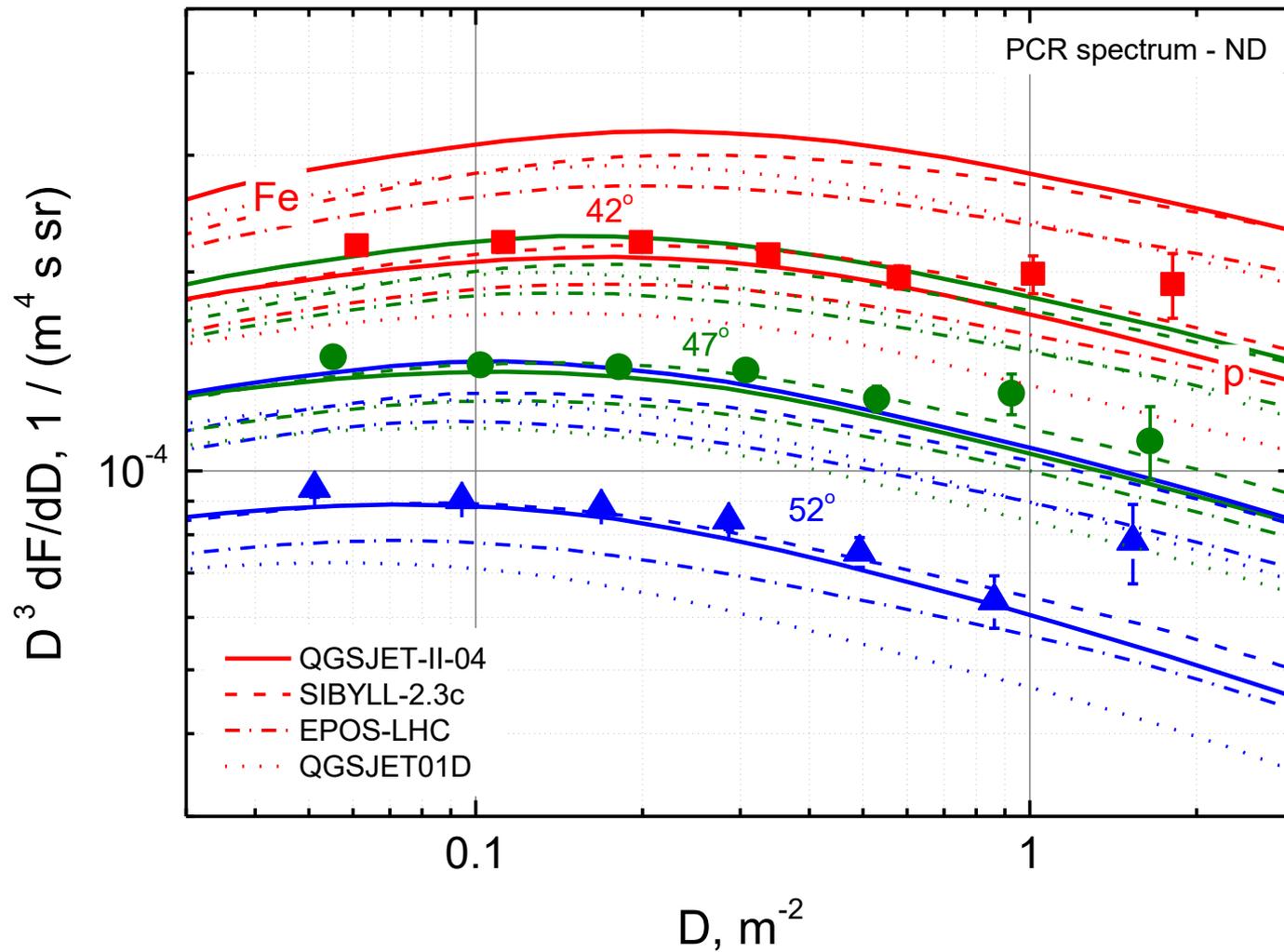


Fig. 9. Reconstructed muon density spectrum at  $78^\circ$  zenith angle (dark circles) and expected spectra calculated for protons and iron nuclei as primary particles (lower and upper groups of the curves respectively) with five different hadron interaction models. The open square represents a combined estimate based on all events with muon multiplicity  $m \geq 10$  in the respective angular bin. The arrow indicates the position of  $10^{18}$  eV effective primary energy.

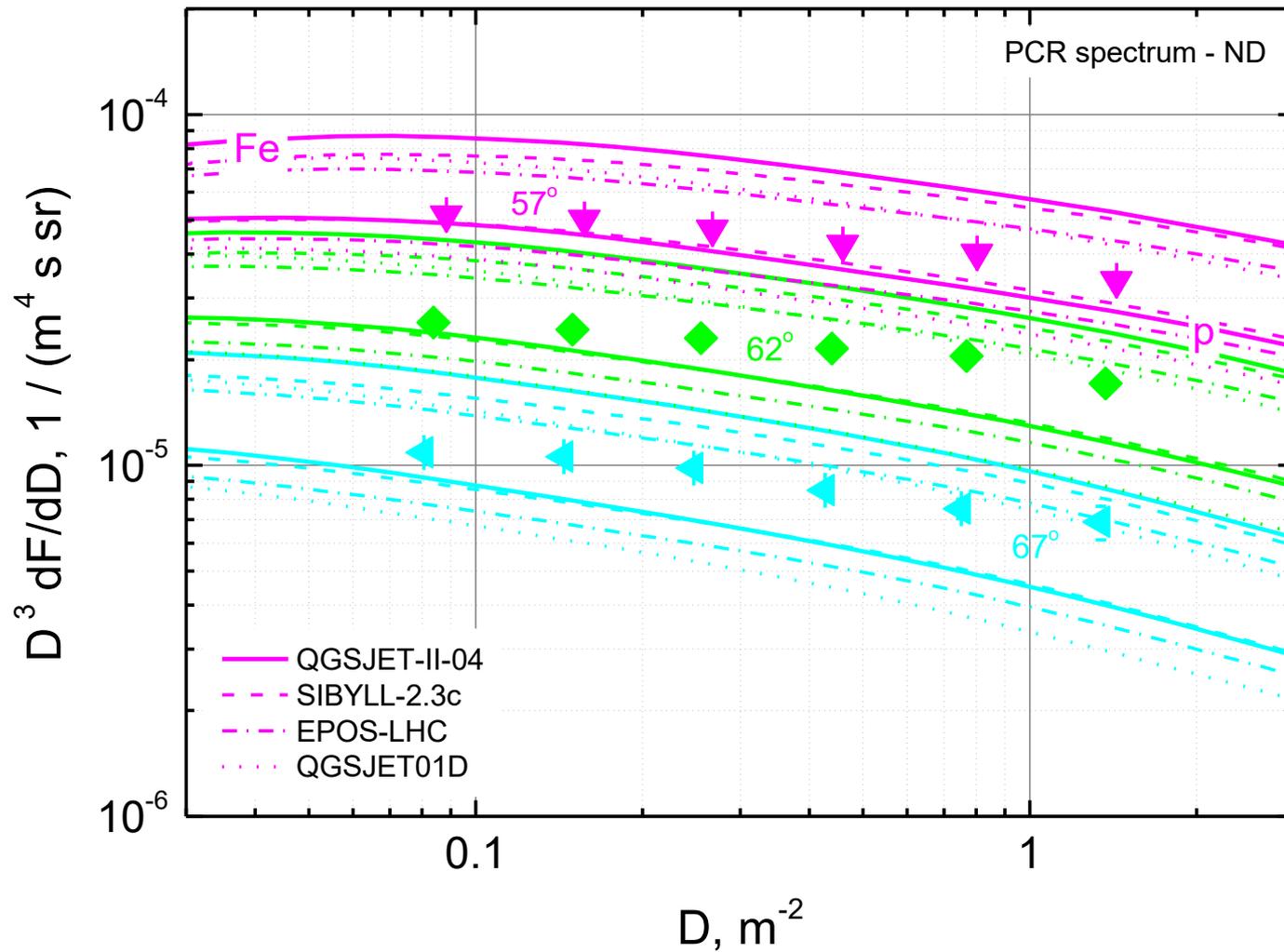


The all-particle spectrum, PDG 2016

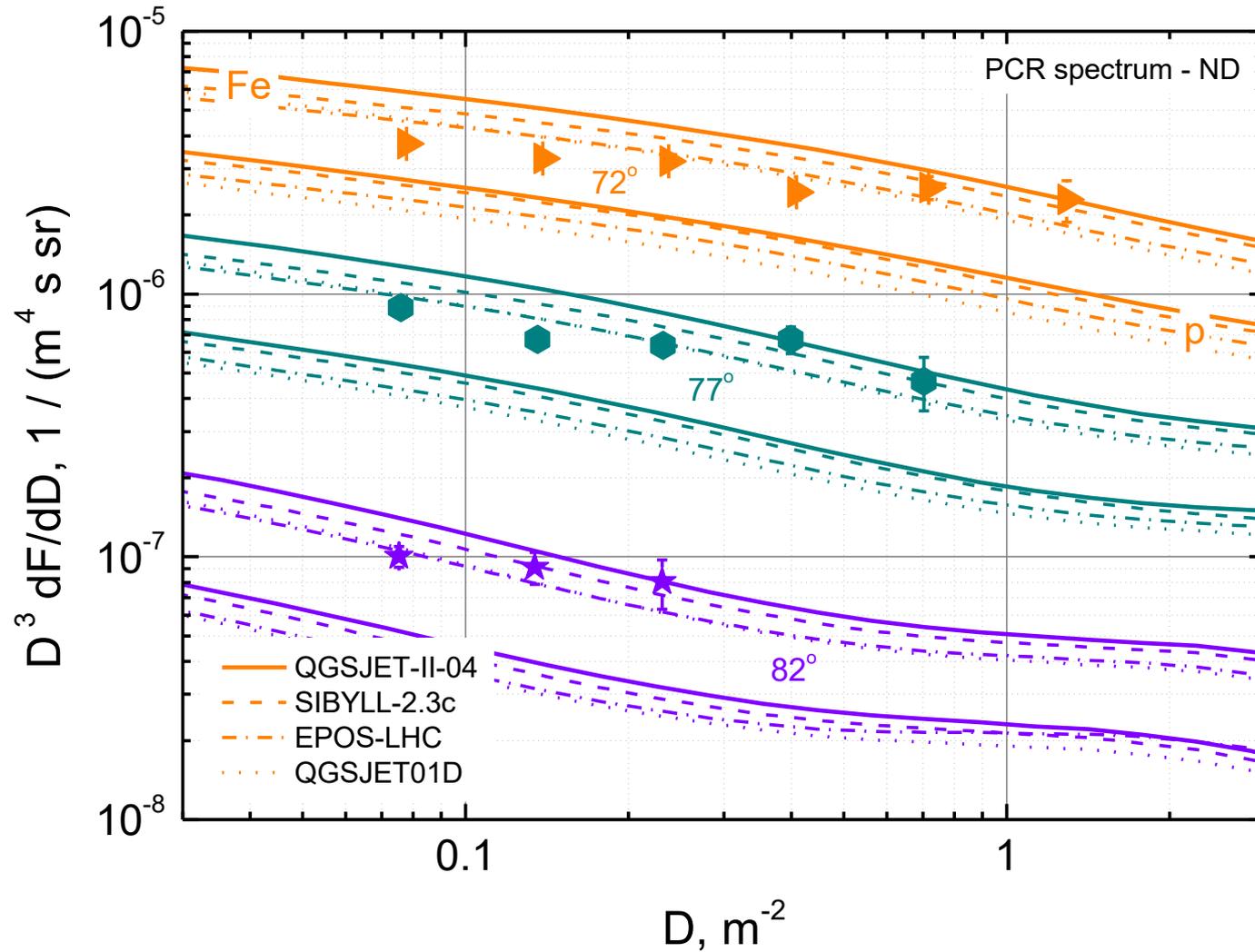
# LMDS for different zenith angles (42 – 52°), ND



# LMDS for different zenith angles (57 – 67°), ND

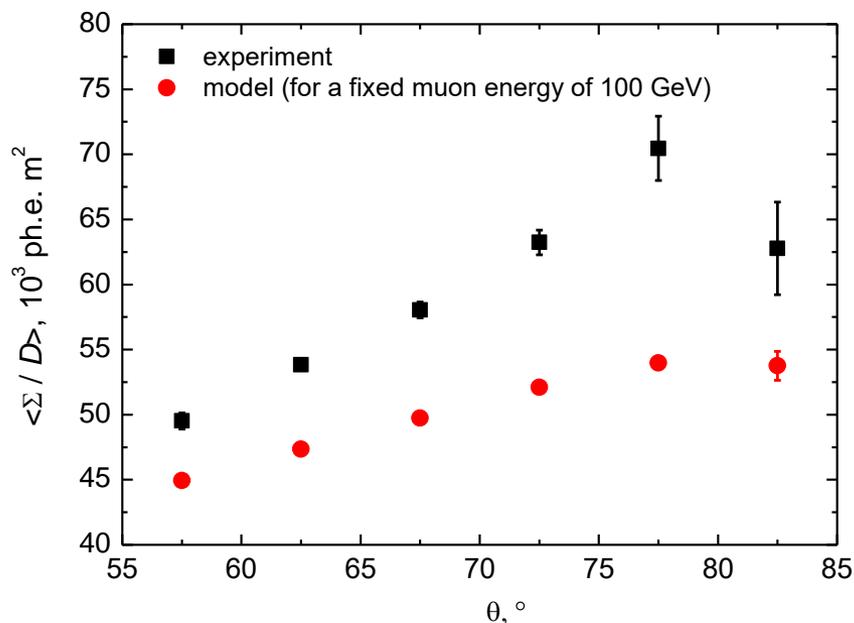


# LMDS for different zenith angles (72 – 82°), ND

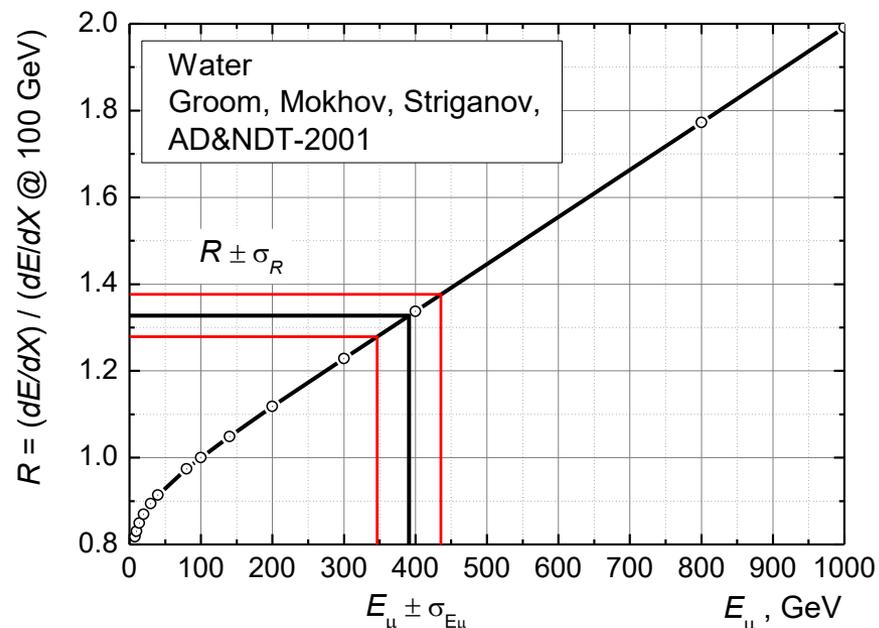


# Переход от средних удельных энерговыделений к средним энергиям мюонов в группах

$$R = (\Sigma / D)^{\text{exp}} / (\Sigma / D)_{100 \text{ GeV}}^{\text{mod}}$$



Зависимость среднего удельного энерговыделения групп мюонов от зенитного угла



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

# Распределение первичных частиц по энергиям $E_0$ , которые дают вклад в ШАЛ с заданным числом частиц $N_e$

