

38-я Всероссийская конференция по космическим лучам,
1 - 5 июля 2024, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия



INAF



Интенсивность групп мюонов, зарегистрированных в эксперименте 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

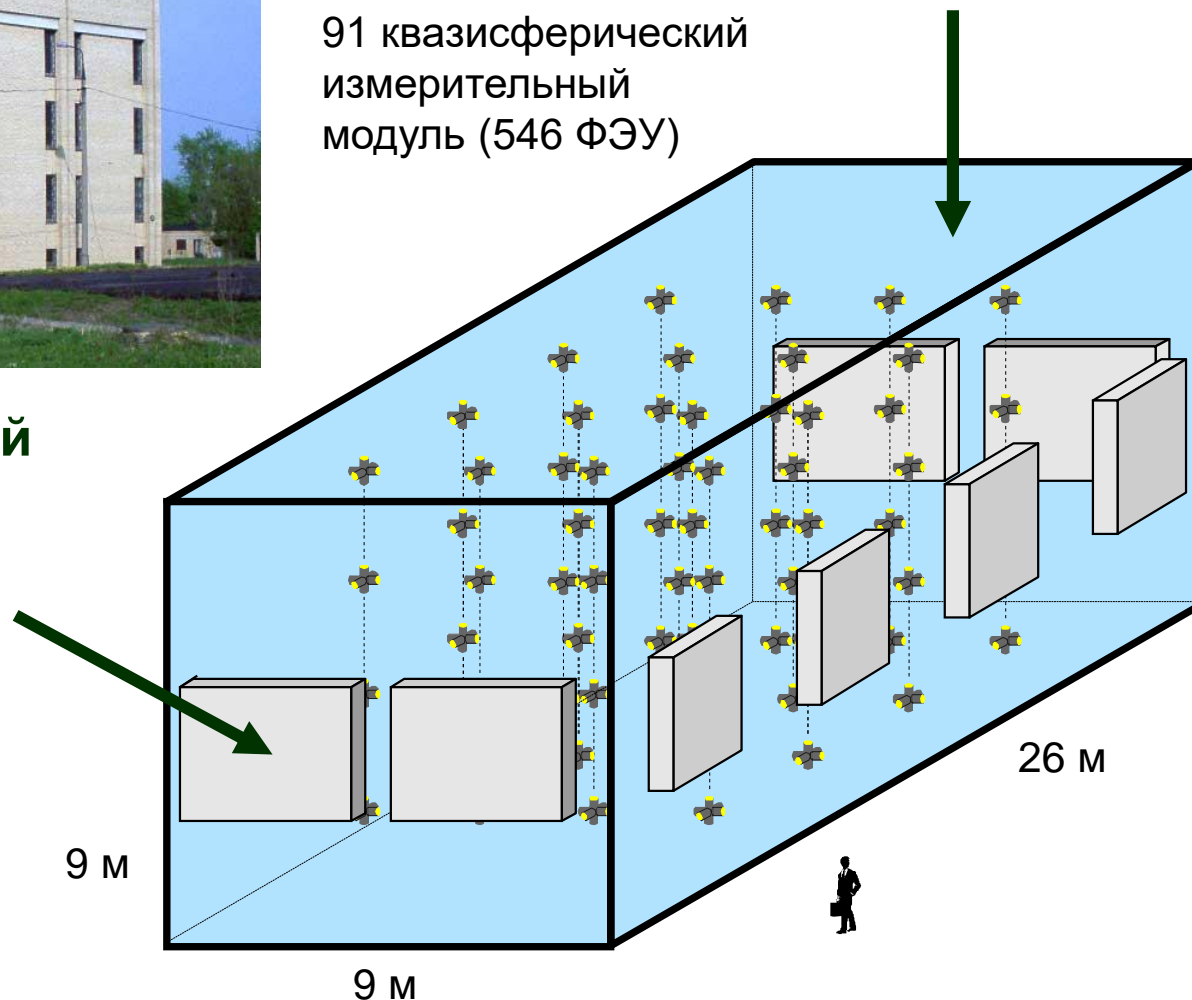


**Черенковский водный
детектор НЕВОД
(объем 2000 м³)**

91 квазисферический
измерительный
модуль (546 ФЭУ)

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

8 вертикальных
супермодулей
(стримерные трубки)

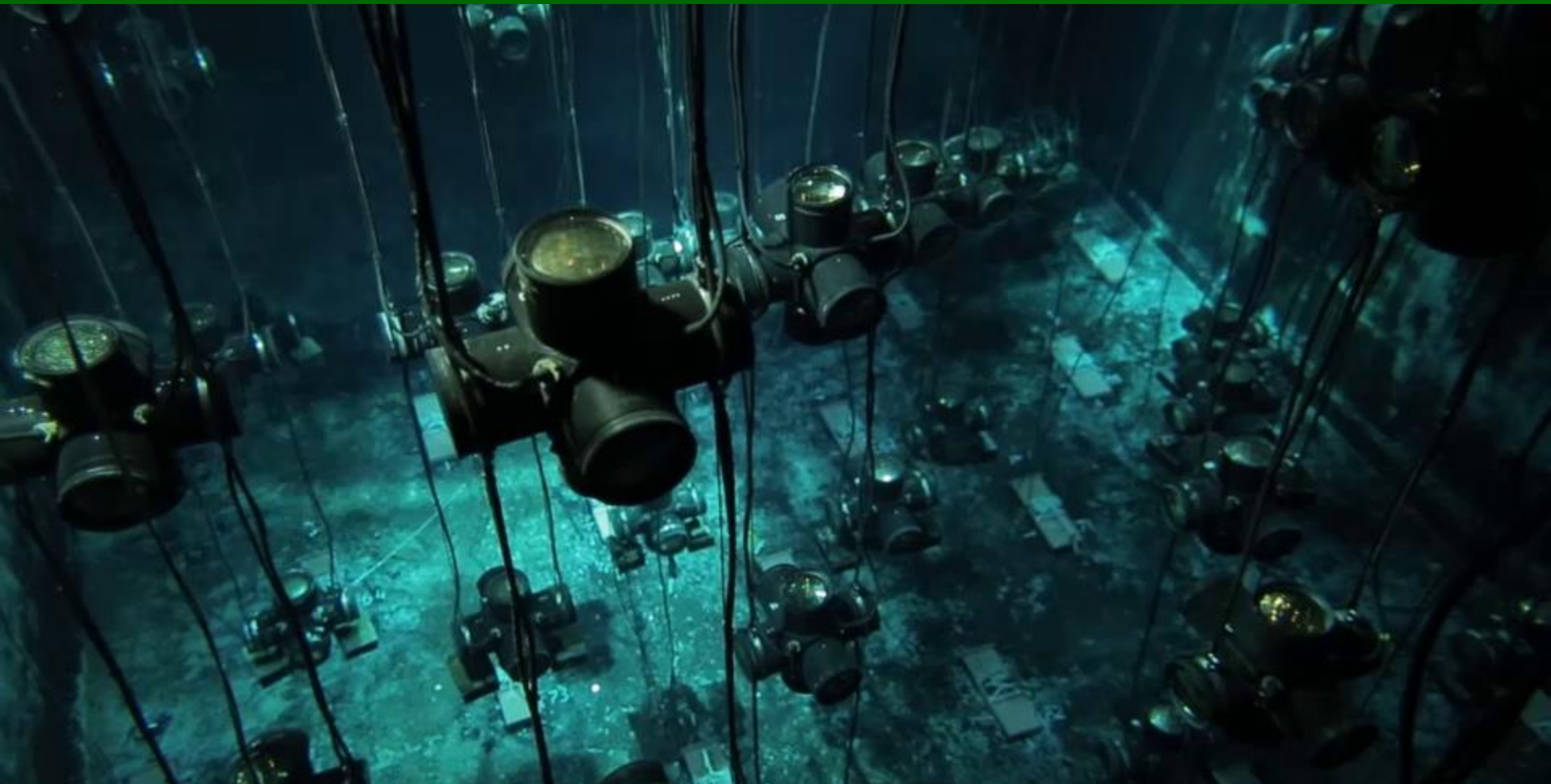


Супермодули детектора ДЕКОР в галереях вокруг водного объема детектора НЕВОД



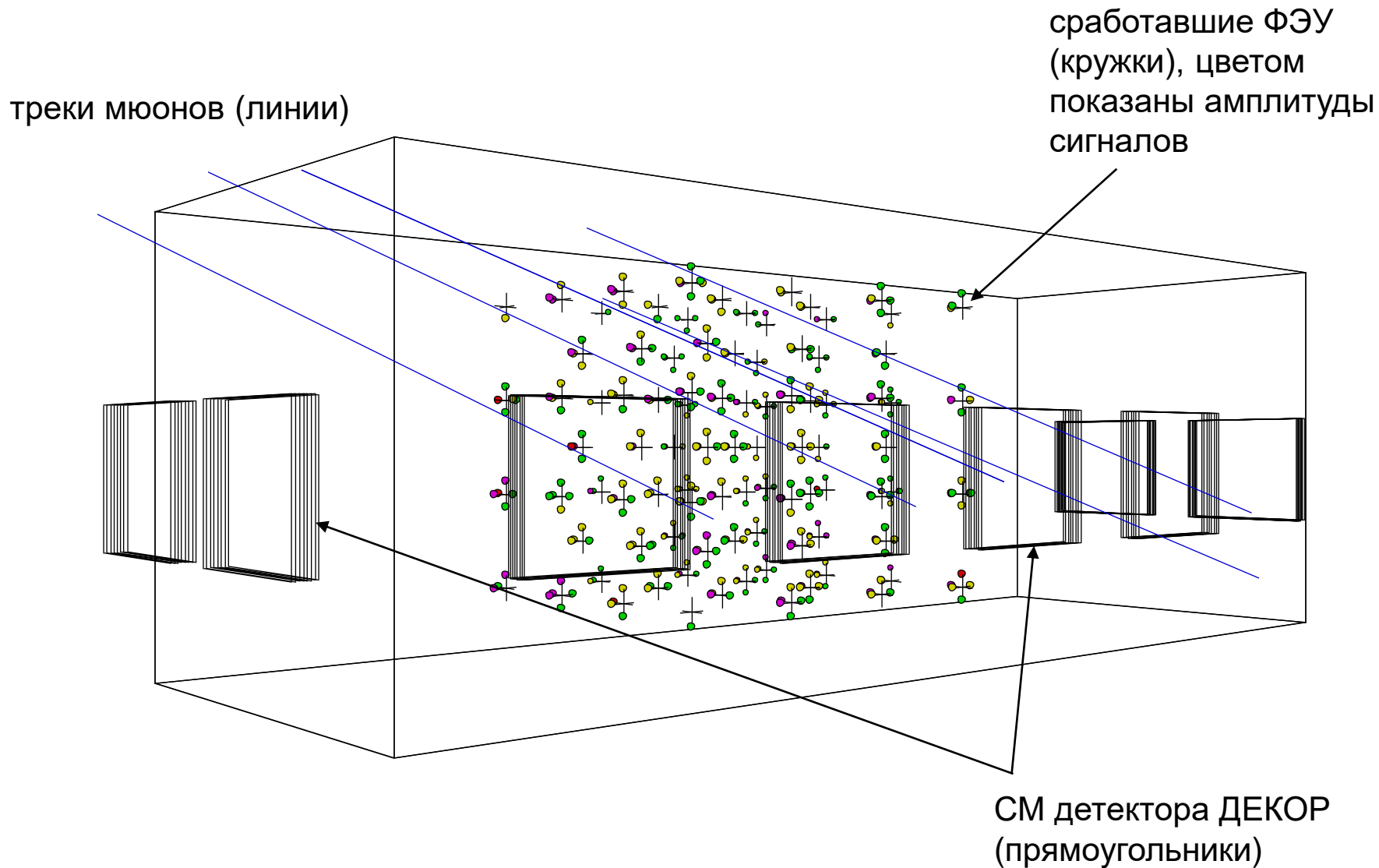
Каждый СМ имеет эффективную площадь 8.4 м^2 и состоит из 8 плоскостей по 16 камер стримерных трубок. Длина камер 3.5 м, сечение внутренних трубок $9 \times 9 \text{ мм}^2$. Плоскости оснащены системой внешних стрипов для считывания сигналов по двум координатам.

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



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).

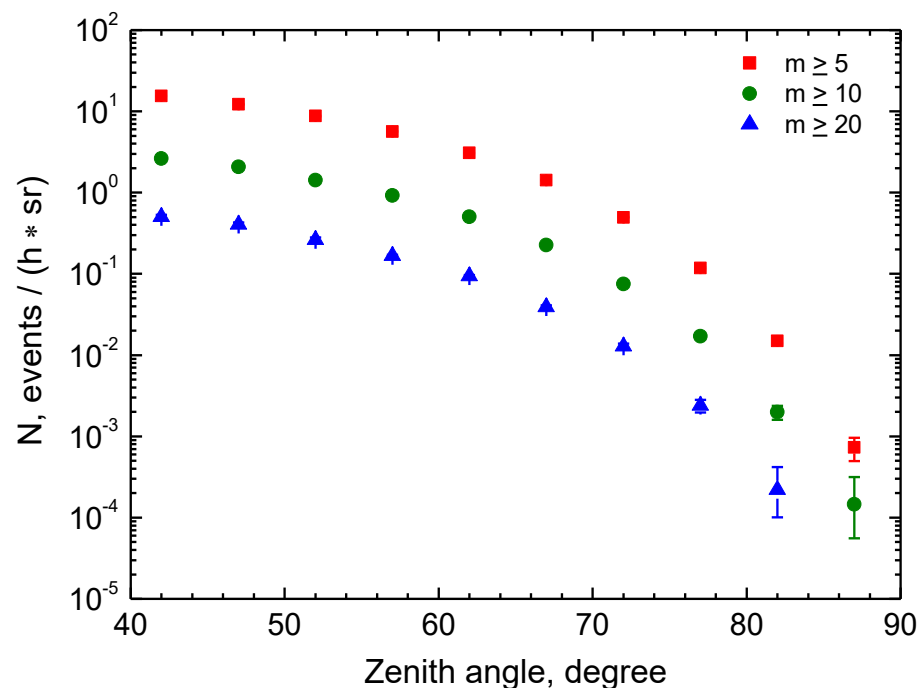
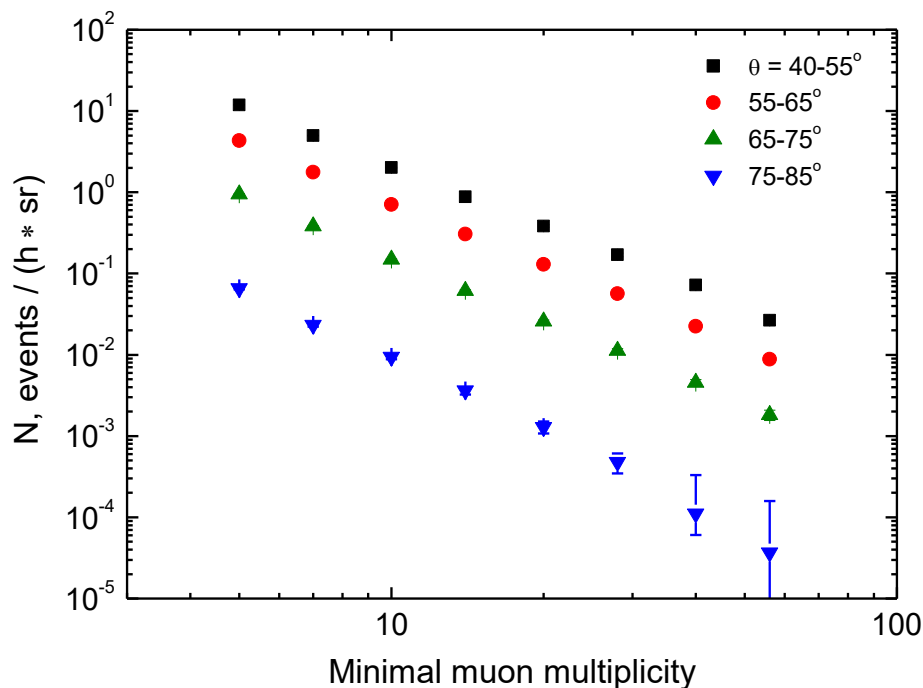
два сектора азимутальных углов (105 - 165° и 195 - 255°) –

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

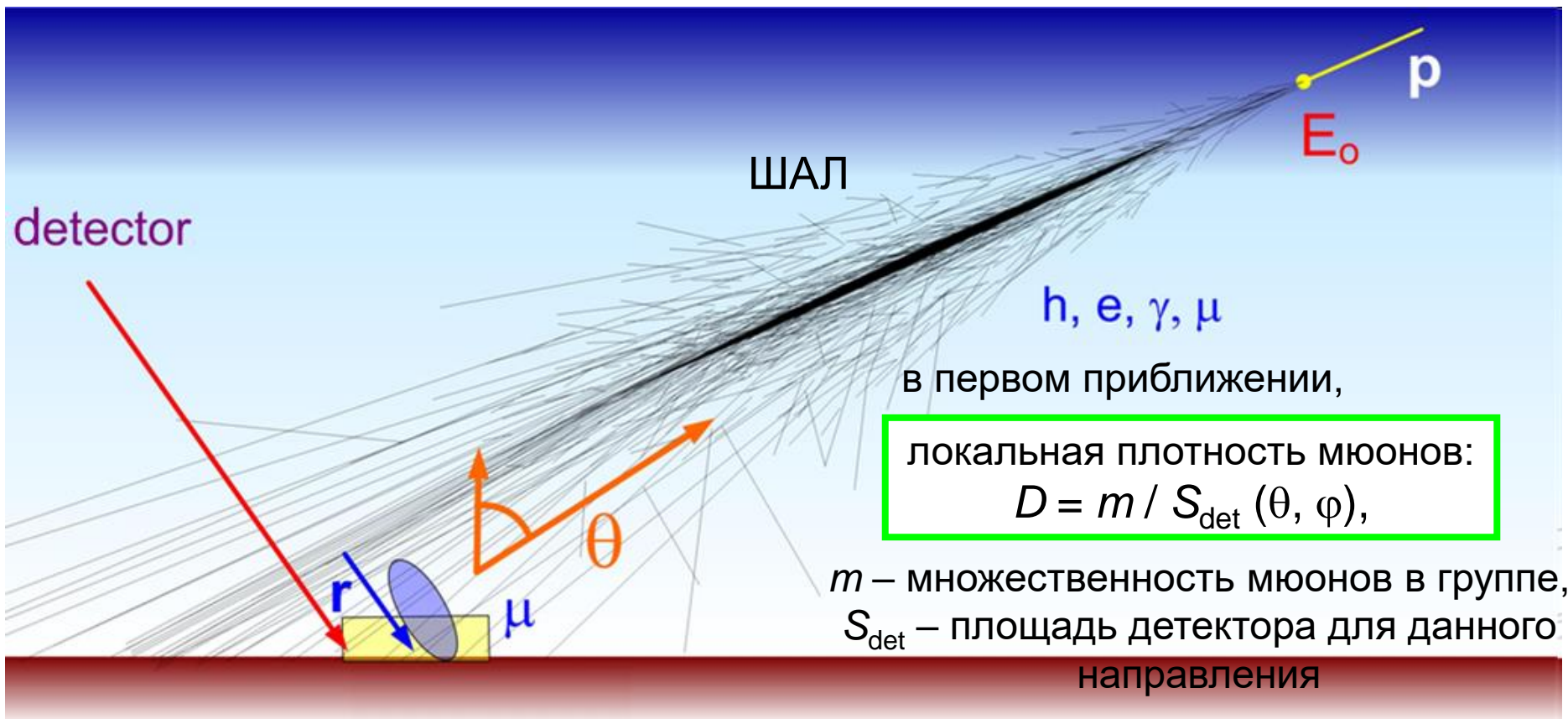
Распределения групп мюонов по множественности и зенитному углу



Оценки интенсивности событий с группами мюонов перекрывают более пяти декад.

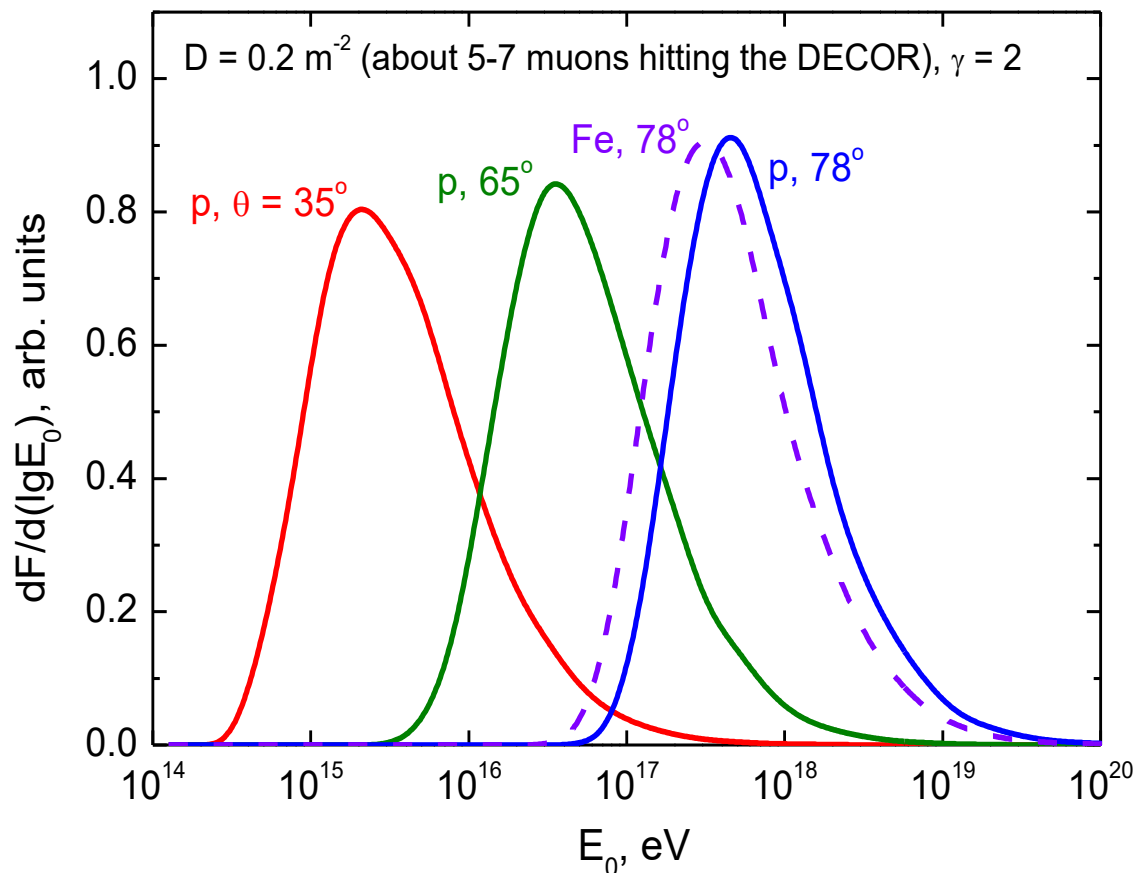
По измеренным распределениям характеристик групп мюонов получают экспериментальные оценки СЛПМ.

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 по энергиям ПКЛ, дающих вклад в события с заданной плотностью мюонов при различных зенитных углах



$$D, \theta \rightarrow E_0$$

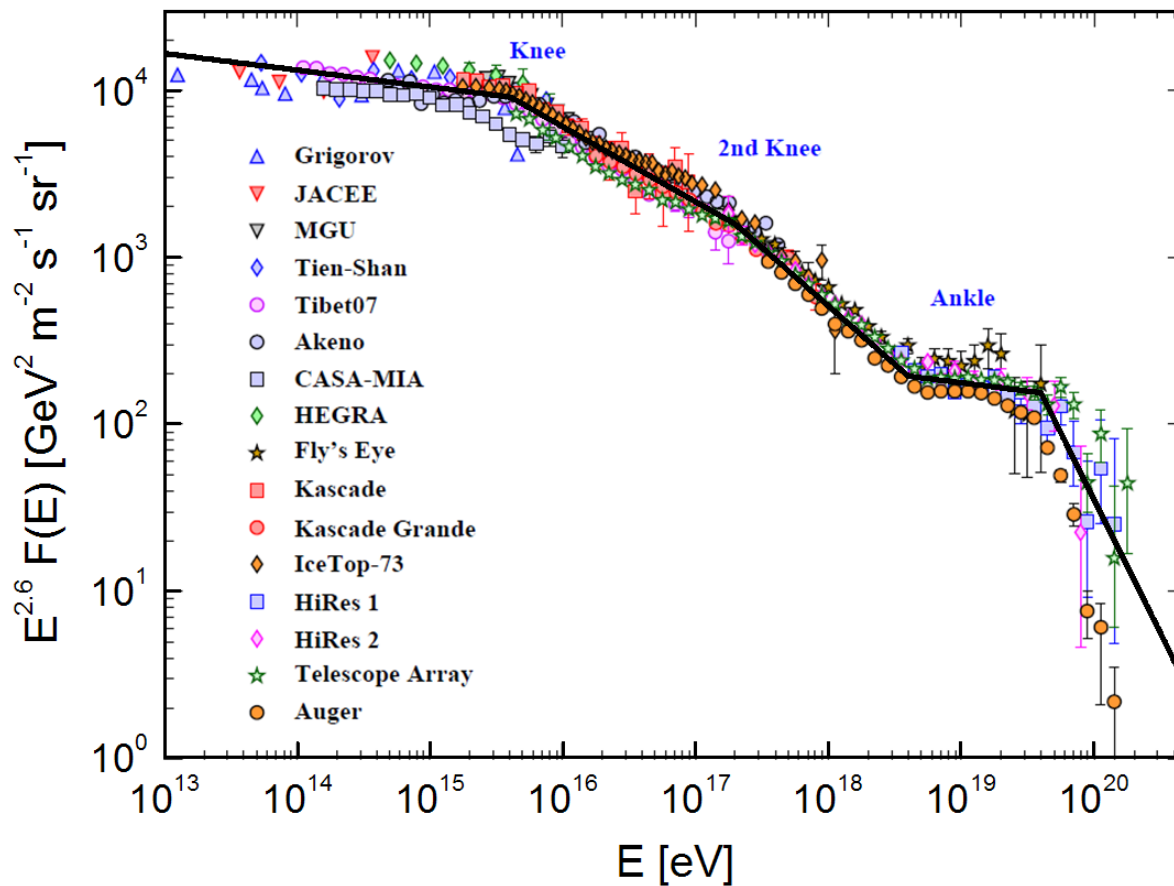
При одинаковой плотности мюонов разным зенитным углам соответствуют на порядки отличающиеся характерные энергии ПКЛ, дающих вклад в отбираемые события (поскольку разлет мюонов в группах увеличивается с ростом зенитного угла).

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.

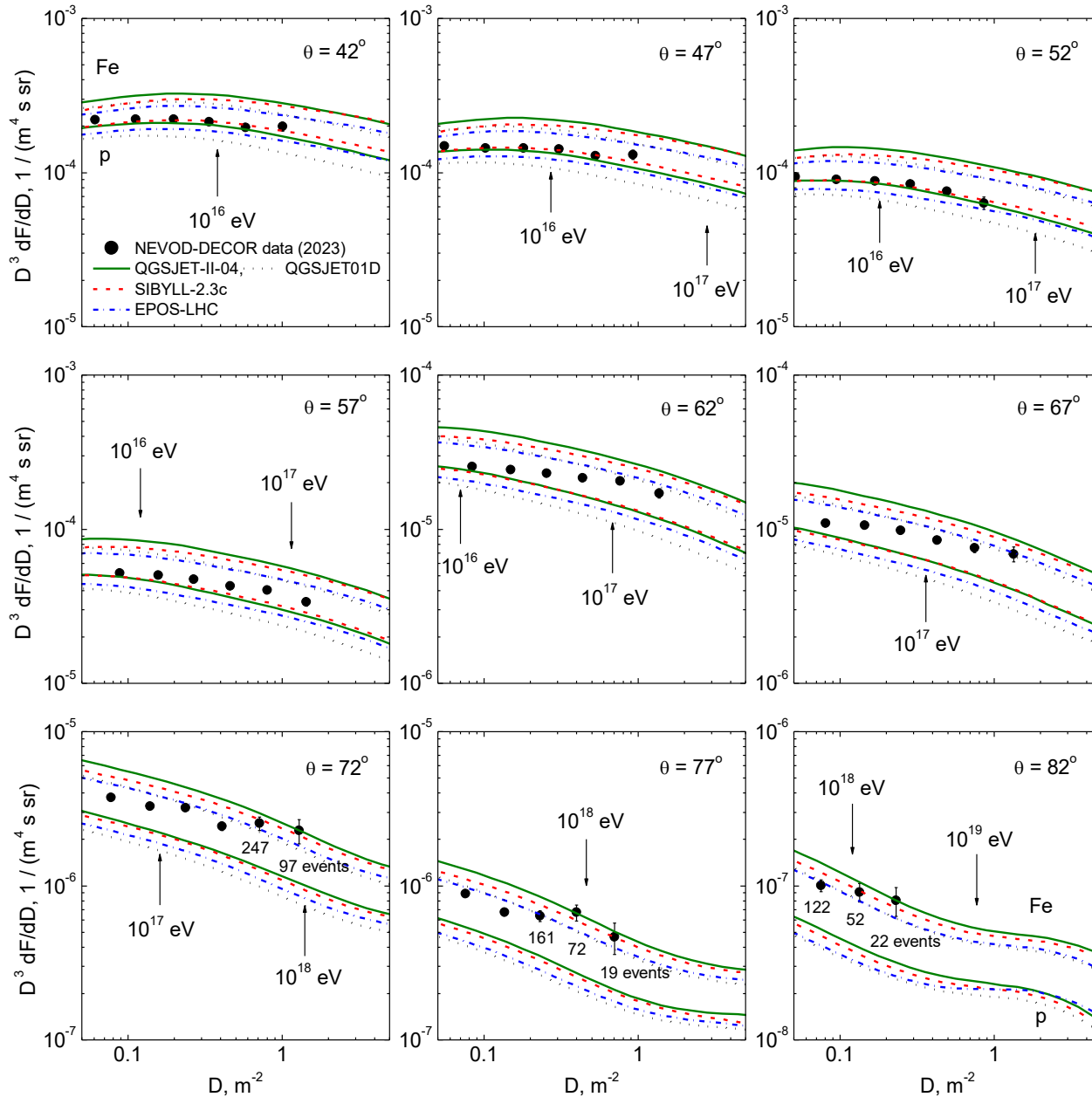
Получение расчетных СЛПМ в виде свертки модели спектра ПКЛ и функций пространственного распределения (ФПР) мюонов, которые вычисляются на основе моделирования ШАЛ с помощью программы CORSIKA для заданных энергий, зенитных углов, моделей адронных взаимодействий: EPOS-LHC, QGSJET-II-04, SIBYLL-2.3c (post-LHC),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

Сопоставление экспериментальных и расчетных СЛПМ.

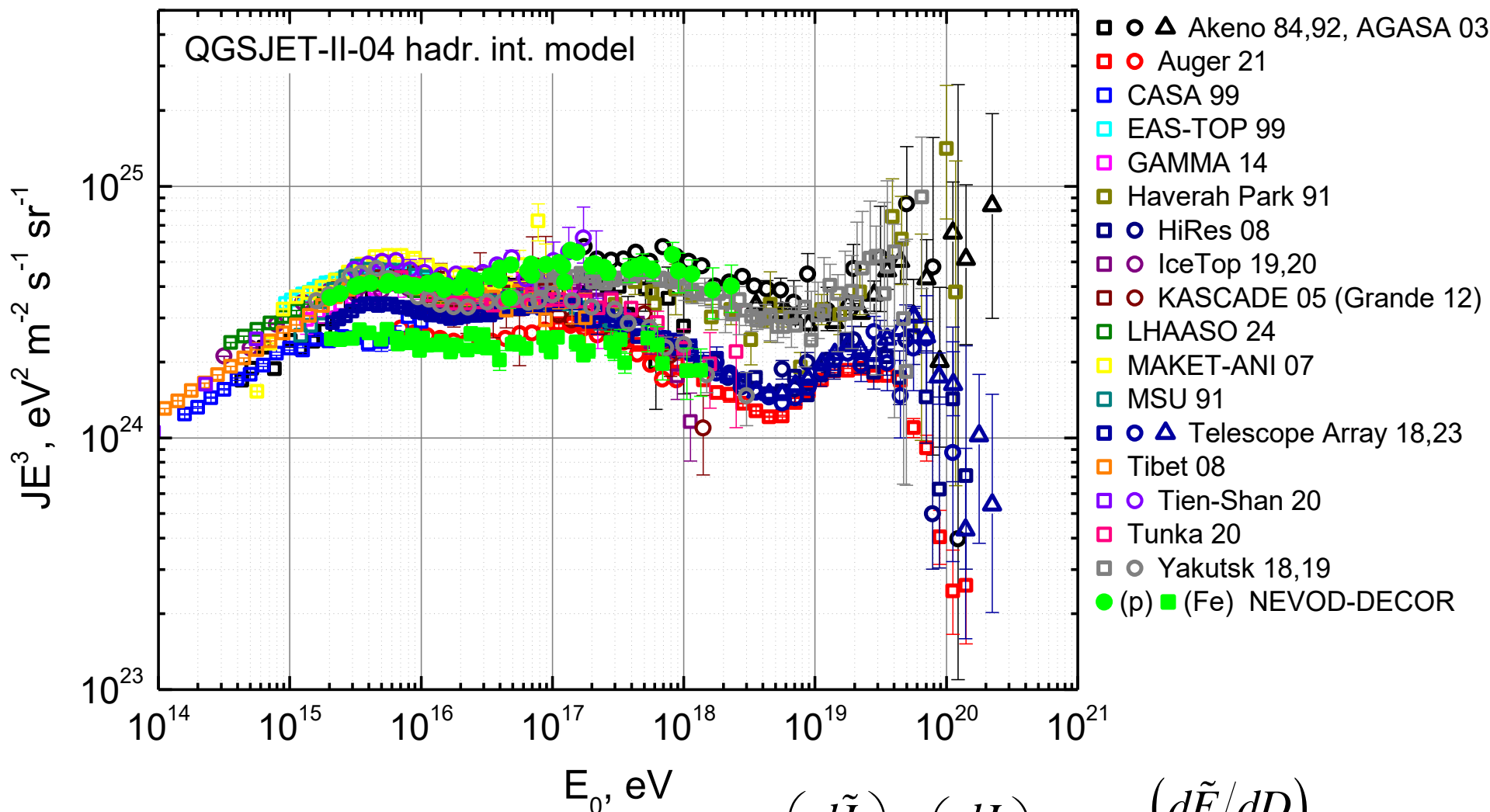


The all-particle spectrum, PDG 2016

СЛПМ для различных зенитных углов

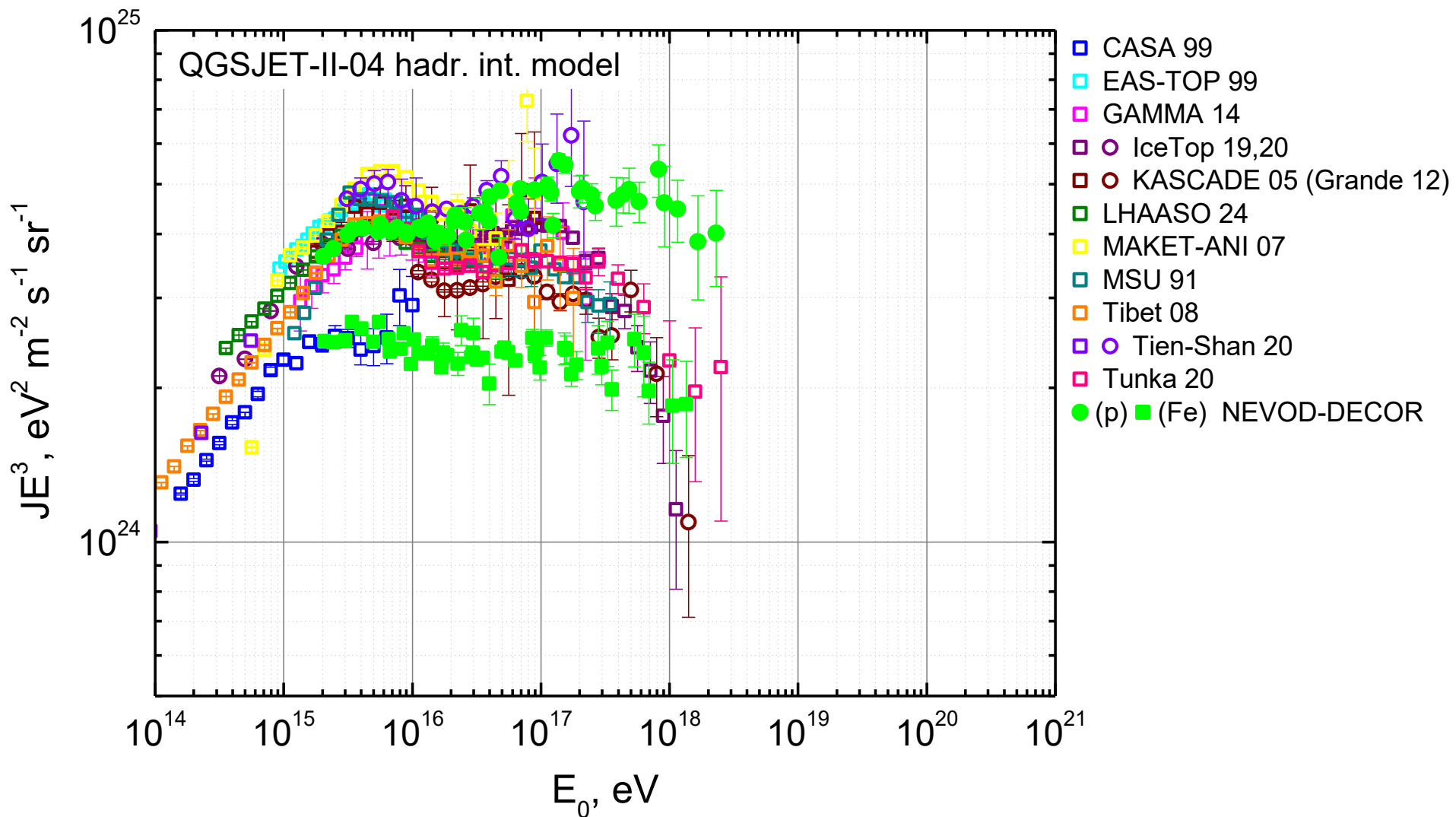


Энергетический спектр ПКЛ по группам мюонов, зарегистрированным на установке НЕВОД-ДЕКОР

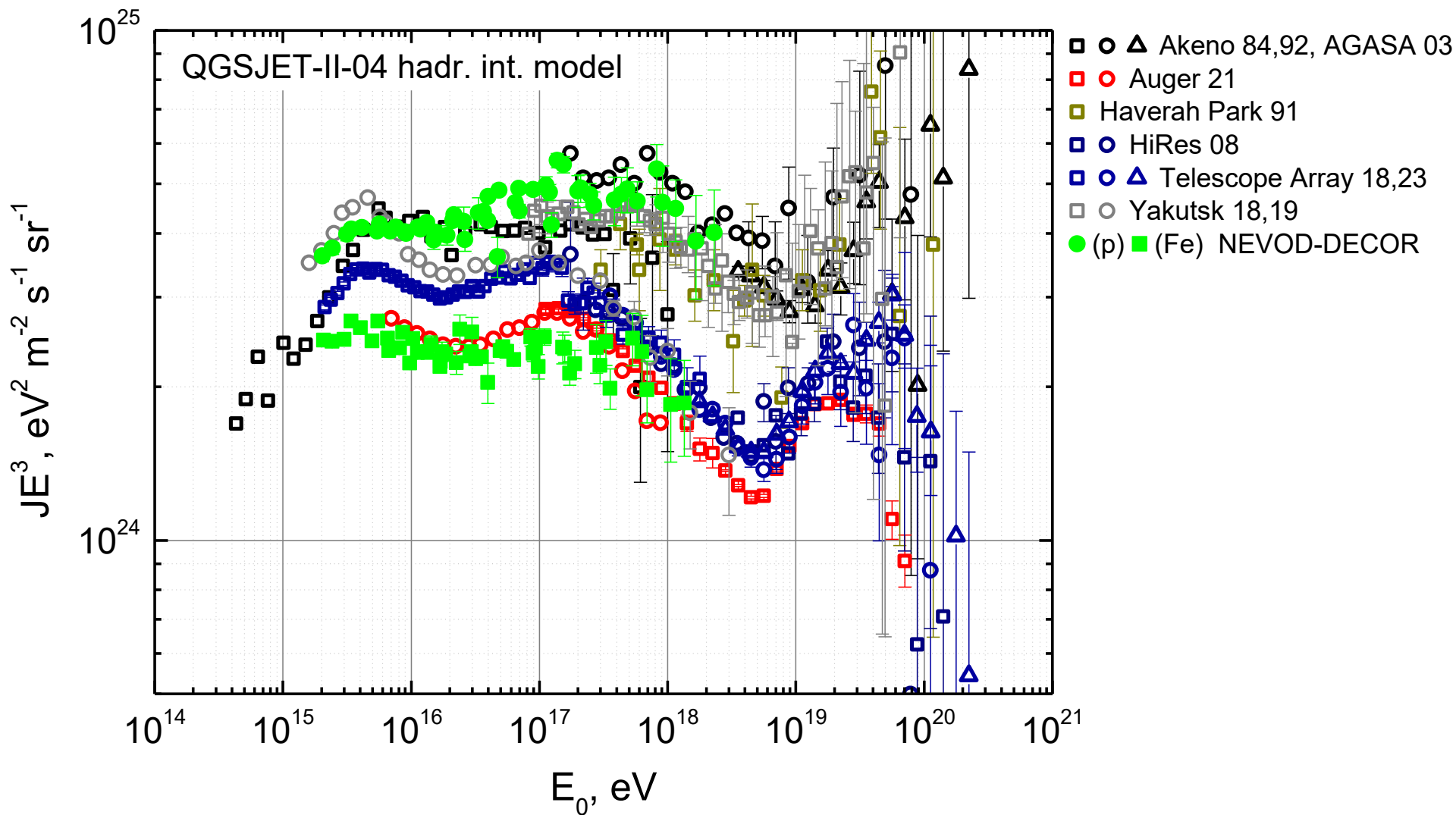


переход от СЛПМ к спектру ПКЛ:
$$\left(\frac{d\tilde{J}}{dE} \right) = \left(\frac{dJ}{dE} \right)_{\text{model}} \times \frac{\left(\frac{d\tilde{F}}{dD} \right)_{\text{data}}}{\left(\frac{dF}{dD} \right)_{\text{sim}}}$$

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



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



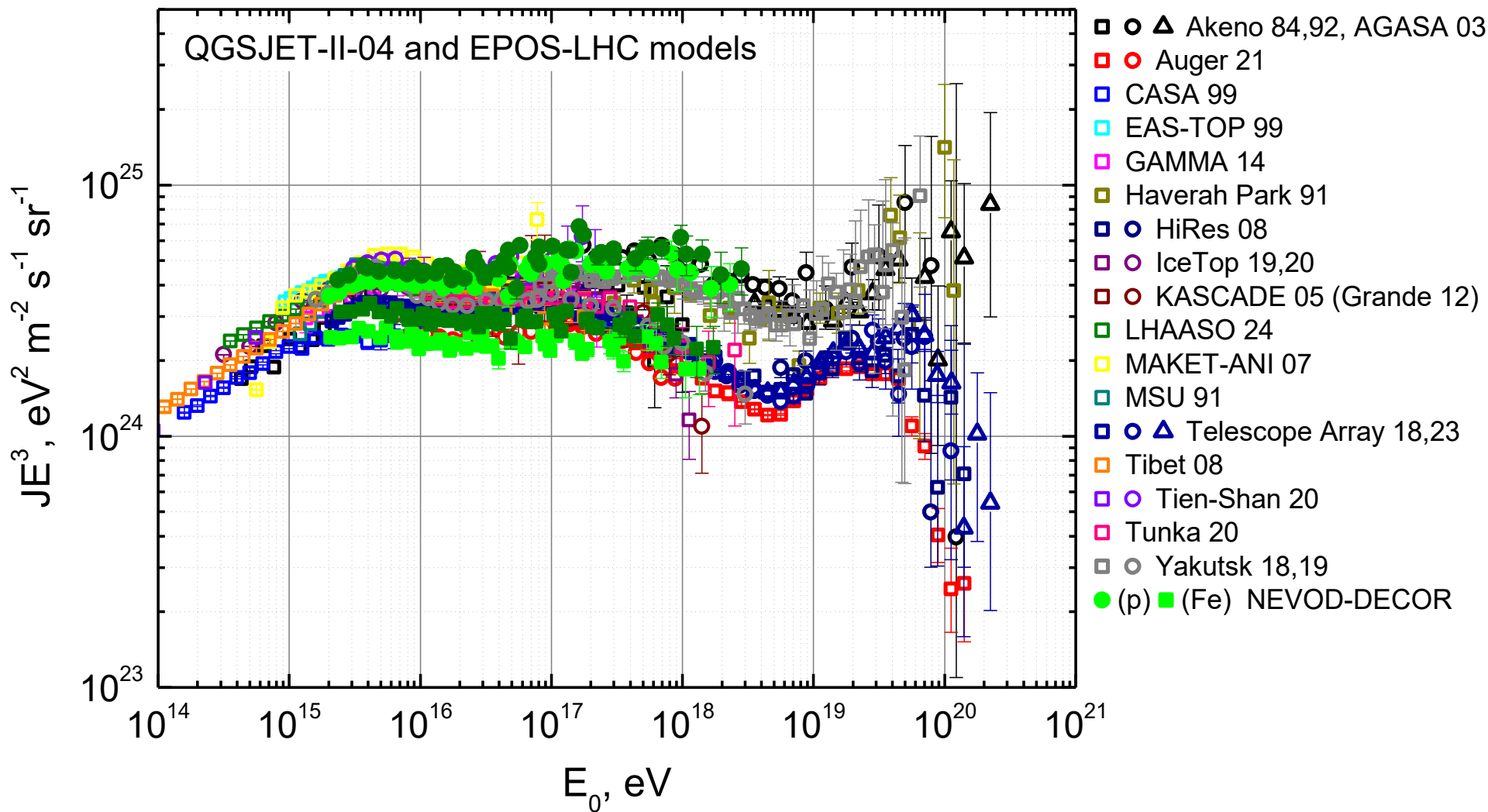
Выводы

- ❑ Получены оценки энергетического спектра ПКЛ по измеренным в широком диапазоне зенитных углов ($40 - 85^\circ$) спектрам локальной плотности мюонов для двух крайних предположений о массовом составе (p и Fe) и четырех моделей адронных взаимодействий (EPOS-LHC, QGSJET-II-04, SIBYLL-2.3c, QGSJET01D).
- ❑ В области энергий $10^{15} - 10^{16}$ эВ интенсивность групп мюонов, измеренная на установке НЕВОД-ДЕКОР, лучше всего согласуется с результатами большинства экспериментов по регистрации ШАЛ в предположении о легком (p , He) составе ПКЛ, если оставаться в рамках существующих моделей адронных взаимодействий.
- ❑ При энергиях ПКЛ $\sim 10^{18}$ эВ данные эксперимента НЕВОД-ДЕКОР сопоставимы с результатами установок Akeno, Haverah Park, Якутск, где энергия ливней оценивается по плотности частиц на больших расстояниях от оси ШАЛ (ρ_{600}), в предположении о легком (p , He) составе ПКЛ, а с результатами установок Pierre Auger Observatory, HiRes, Telescope Array, где энергия ливней оценивается по данным флуоресцентных измерений – только в предположении о тяжелом (группа ядер Fe) массовом составе.

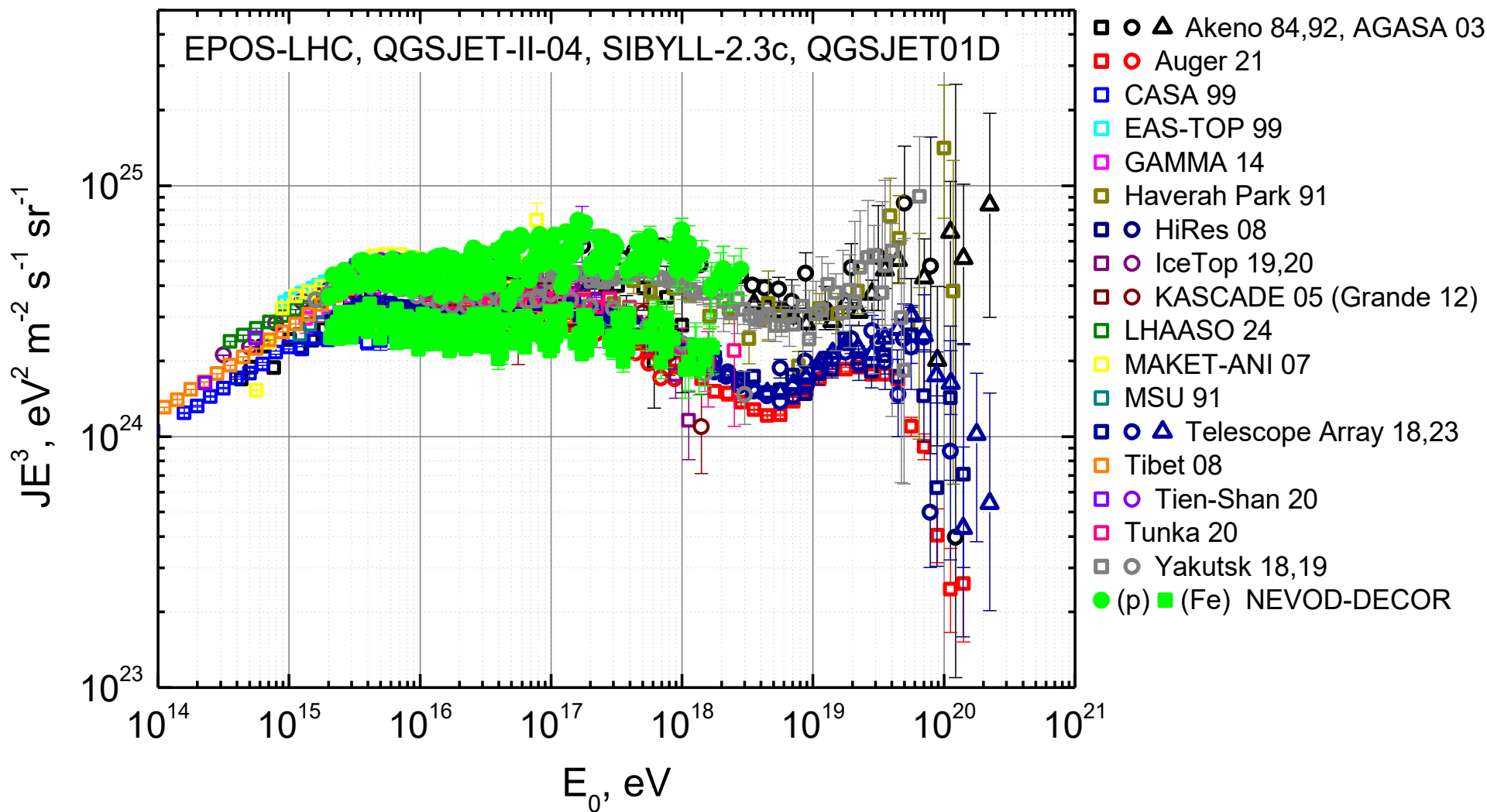
Спасибо за внимание!



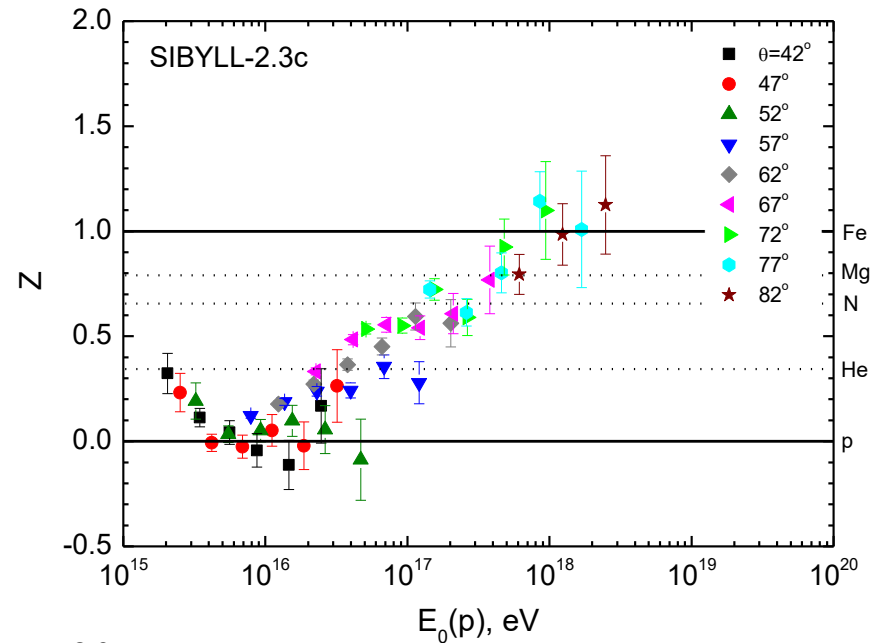
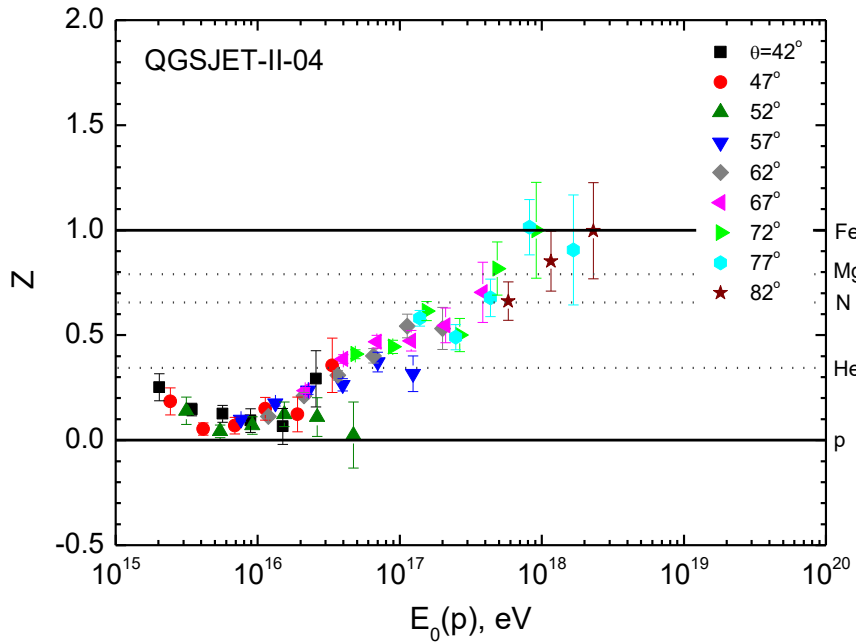
Энергетический спектр ПКЛ по группам мюонов, зарегистрированным на установке НЕВОД-ДЕКОР



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



Сопоставление СЛПМ для различных зенитных углов

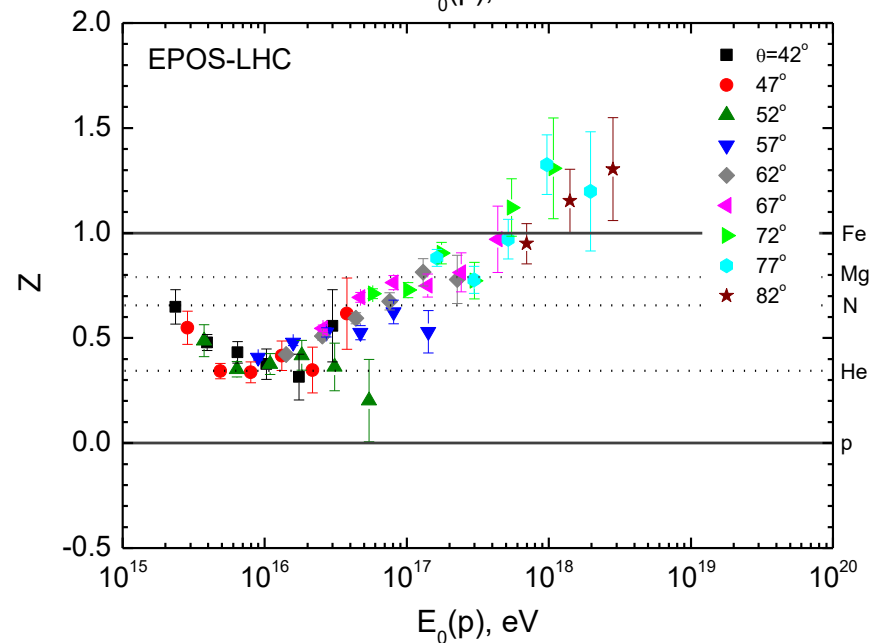


$$Z = \frac{\ln(N_{\mu}^{\text{det}}) - \ln(N_{\mu}^{\text{p sim}})}{\ln(N_{\mu}^{\text{Fe sim}}) - \ln(N_{\mu}^{\text{p sim}})}$$

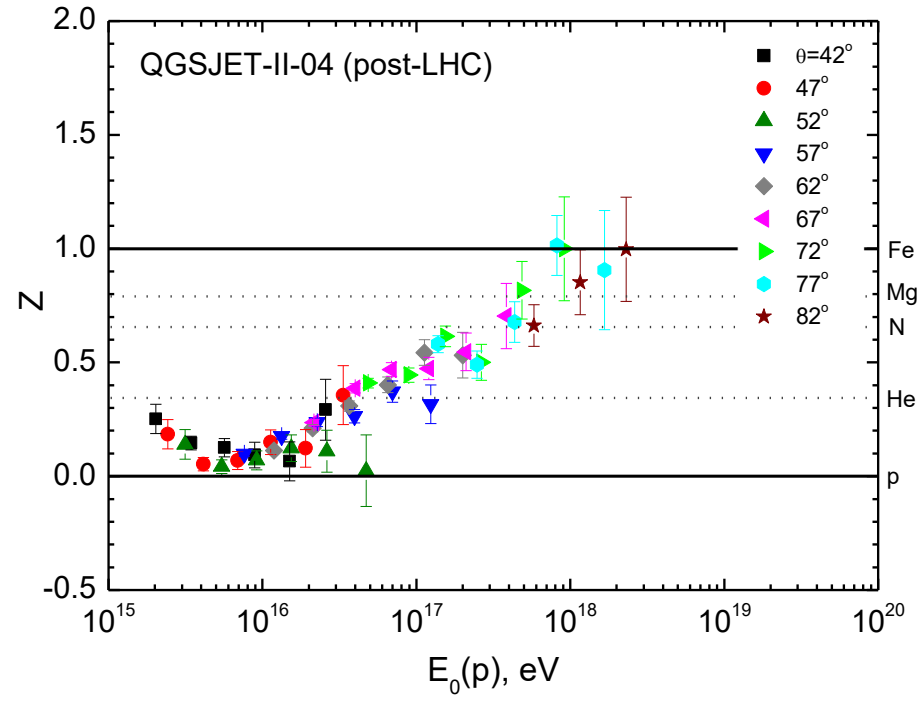
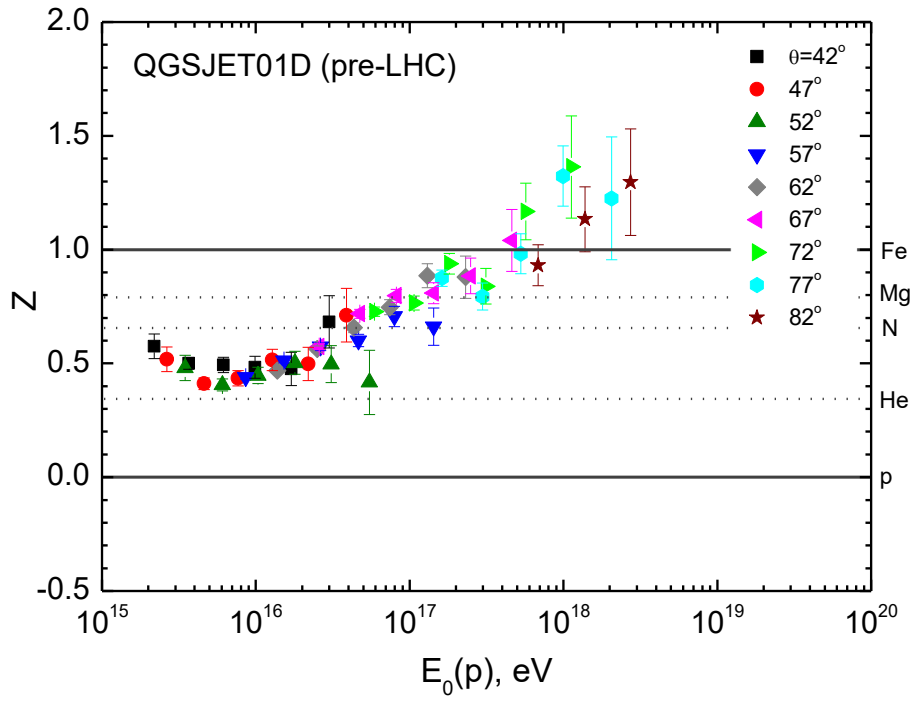
N_{μ}^{det} – экспериментальная оценка числа мюонов (плотности, СЛПМ, ...) в детекторе,

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

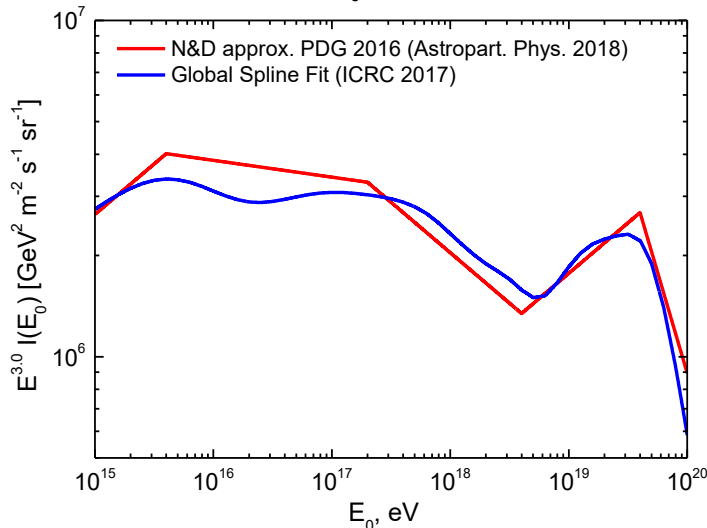
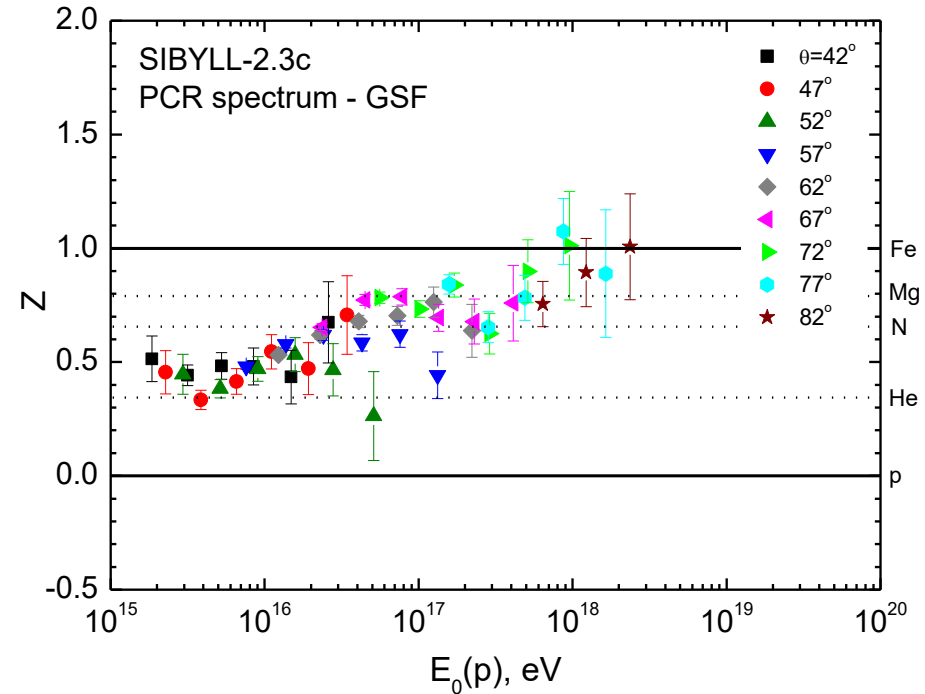
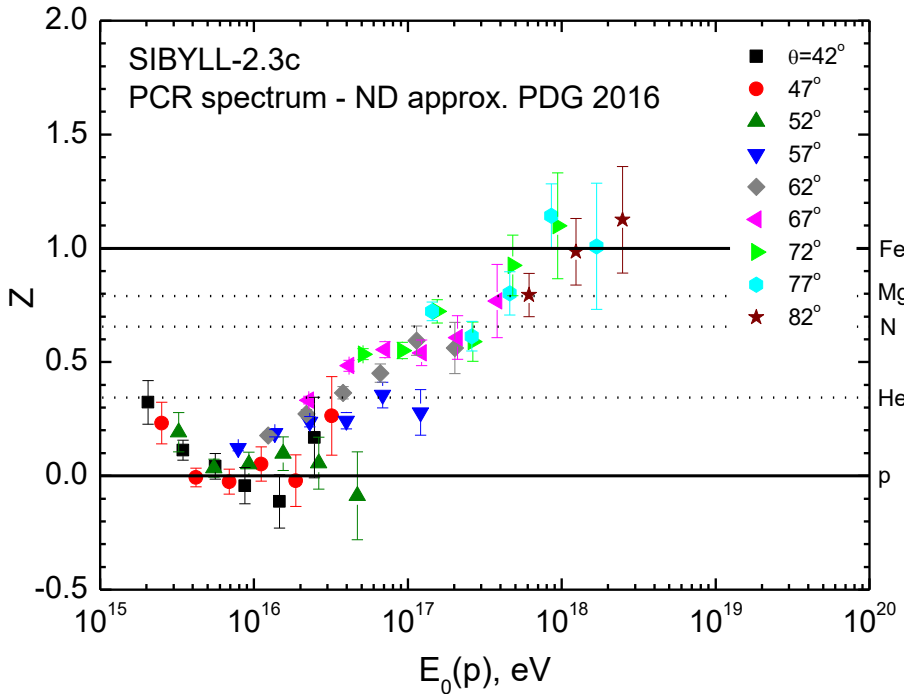
$Z = 0$ соответствует ШАЛ от протонов, а $Z = 1$ – ШАЛ от ядер железа.



Comparison of LMDS at different θ angles by means of Z-scale (effect of the hadronic interaction model)



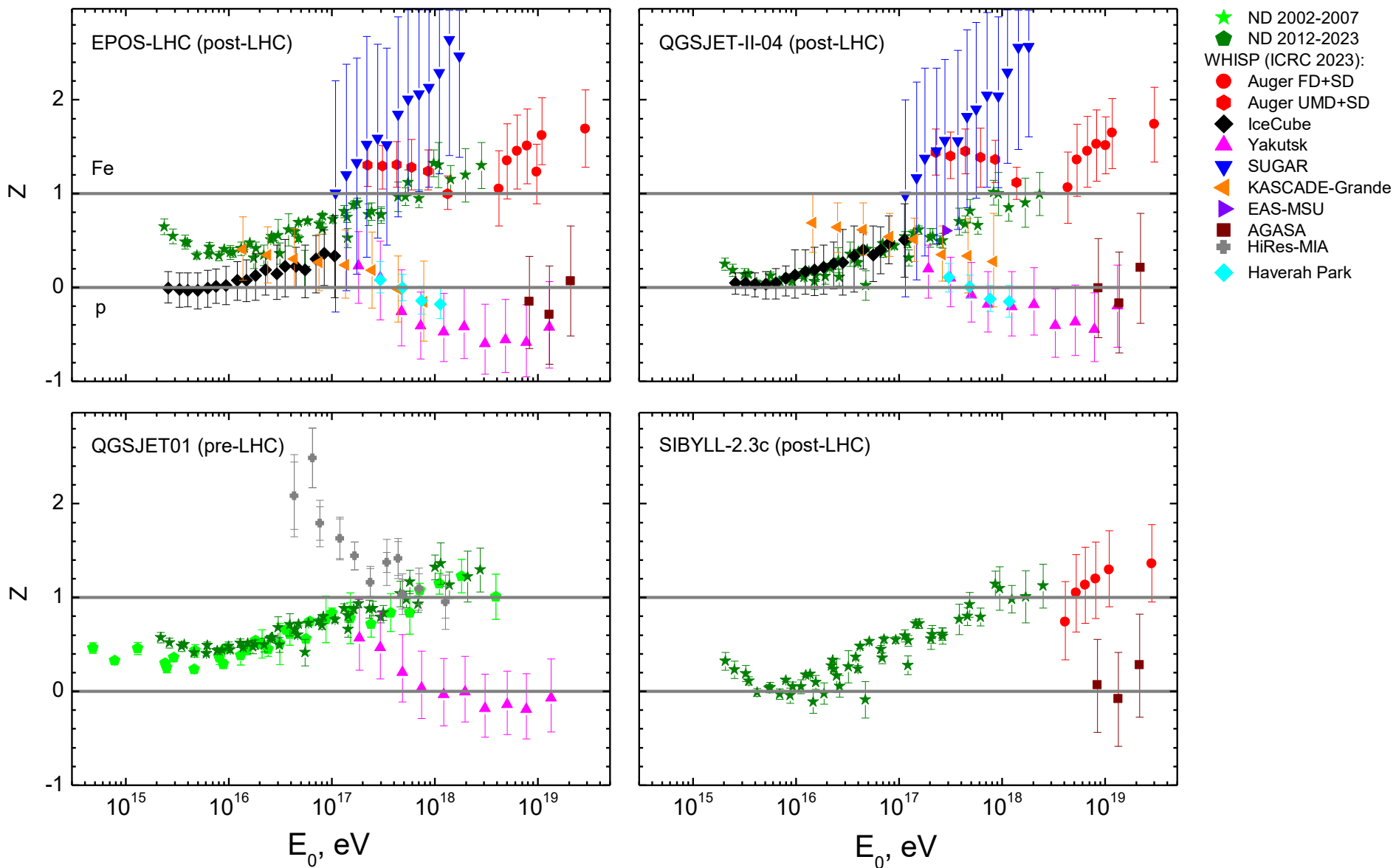
Comparison of LMDS at different θ angles by means of Z-scale (effect of the model of primary cosmic ray energy spectrum)



For interpretation of our data, assumption on the primary all-particle spectrum is necessary. We used an approximation of the all-particle primary energy spectrum which was based on a PDG review of EAS data.

Differences between our parameterization and Global Spline Fit is not large, but appreciable around 10-100 PeV.

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



WHISP (ICRC 2023)

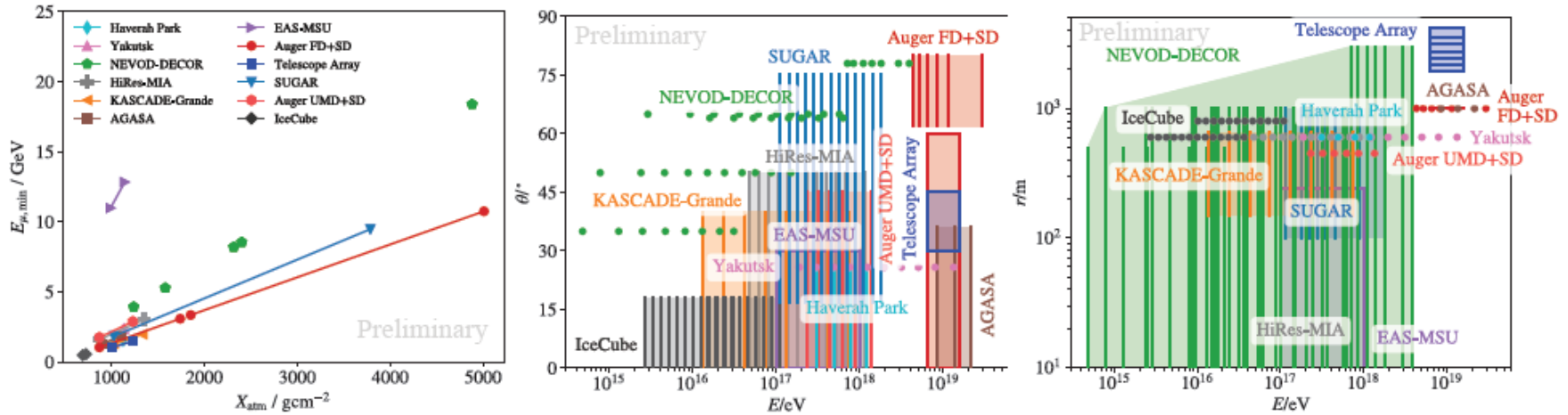
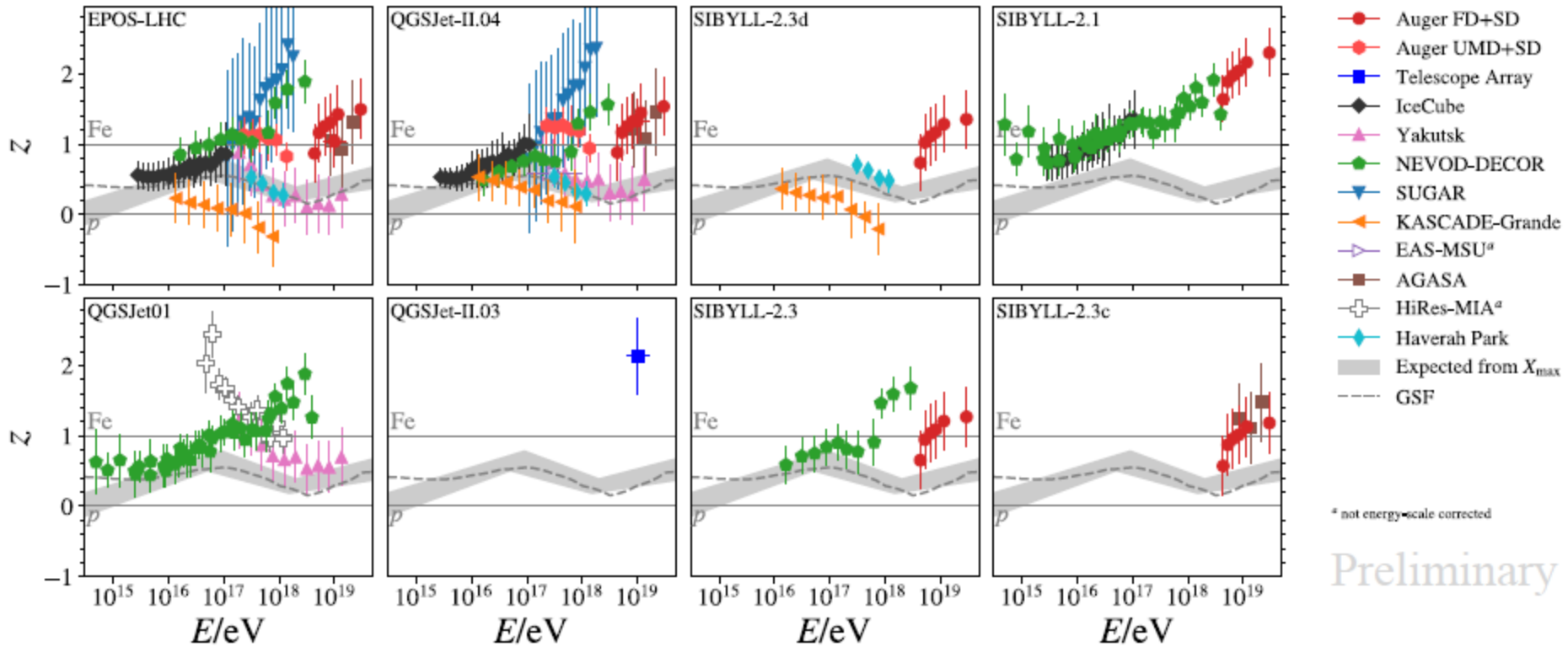


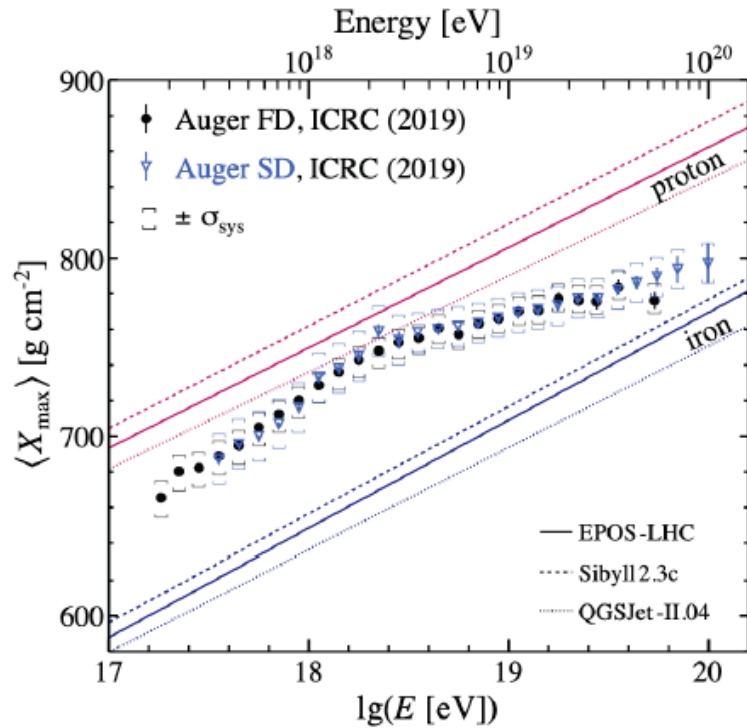
Figure 1: The muon phase space of cosmic-ray induced EAS covered by the experiments included in the meta-analysis. On figure of the left, the muon energy threshold but at the production site in the EAS (estimated according to [13]), $E_{\mu, \min}$, versus the effective atmospheric depth is presented (left). Points connected by a line indicate variations due to the zenith angle of observation. At the central and right figures, the zenith angle of observation θ and the lateral distances, r , respectively, are plotted against the primary energy, E , of the EAS. The points and the lines represent measurements in a limited region of the phase space, while the shaded areas indicate the regions over which the measurements were integrated.

WHISP (ICRC 2023)

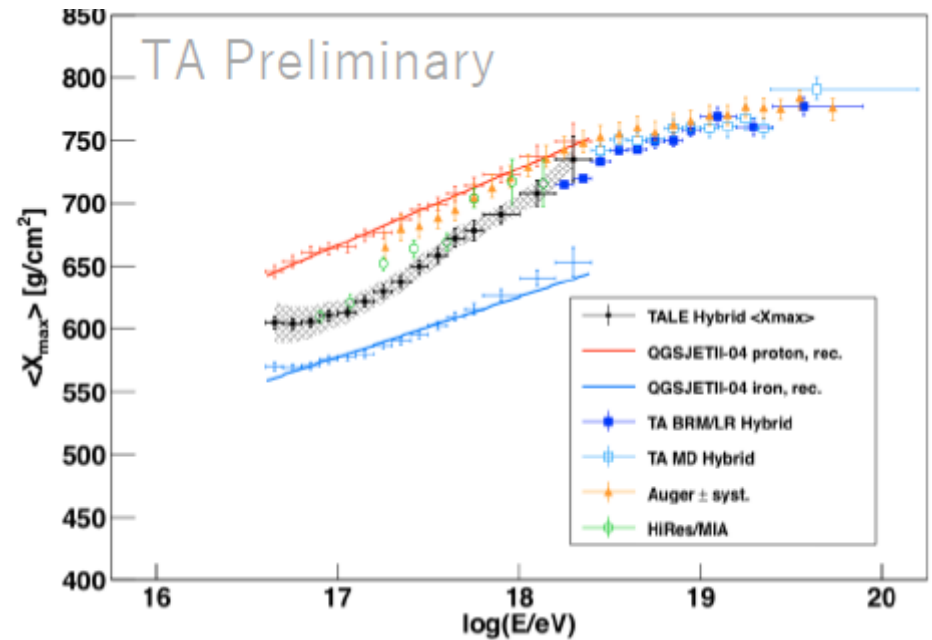


The z-scale values after applying the energy-scale adjustments

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

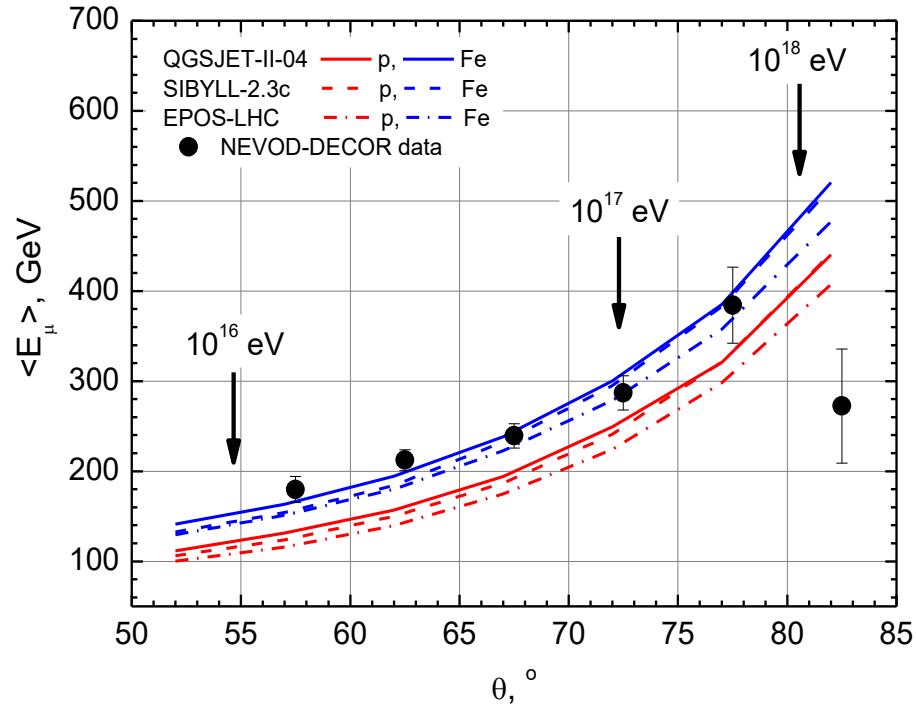
Новый подход к решению мюонной загадки

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

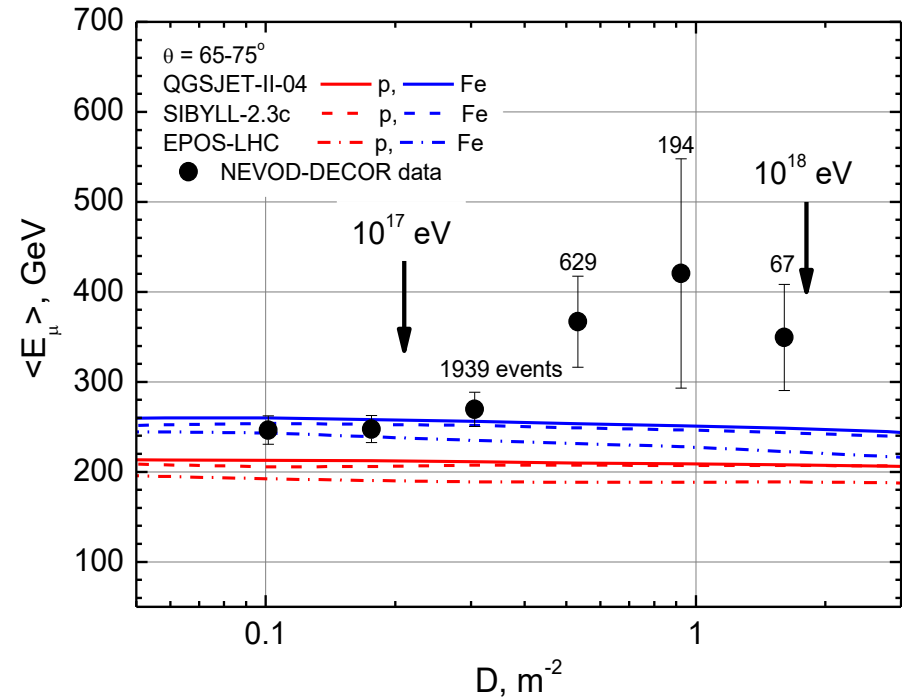
Один из возможных подходов – измерение энерговыделений групп мюонов в черенковском водном калориметре НЕВОД, так как средние потери мюонов в веществе практически линейно зависят от их энергии:
 $dE/dX \sim a + bE$.

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

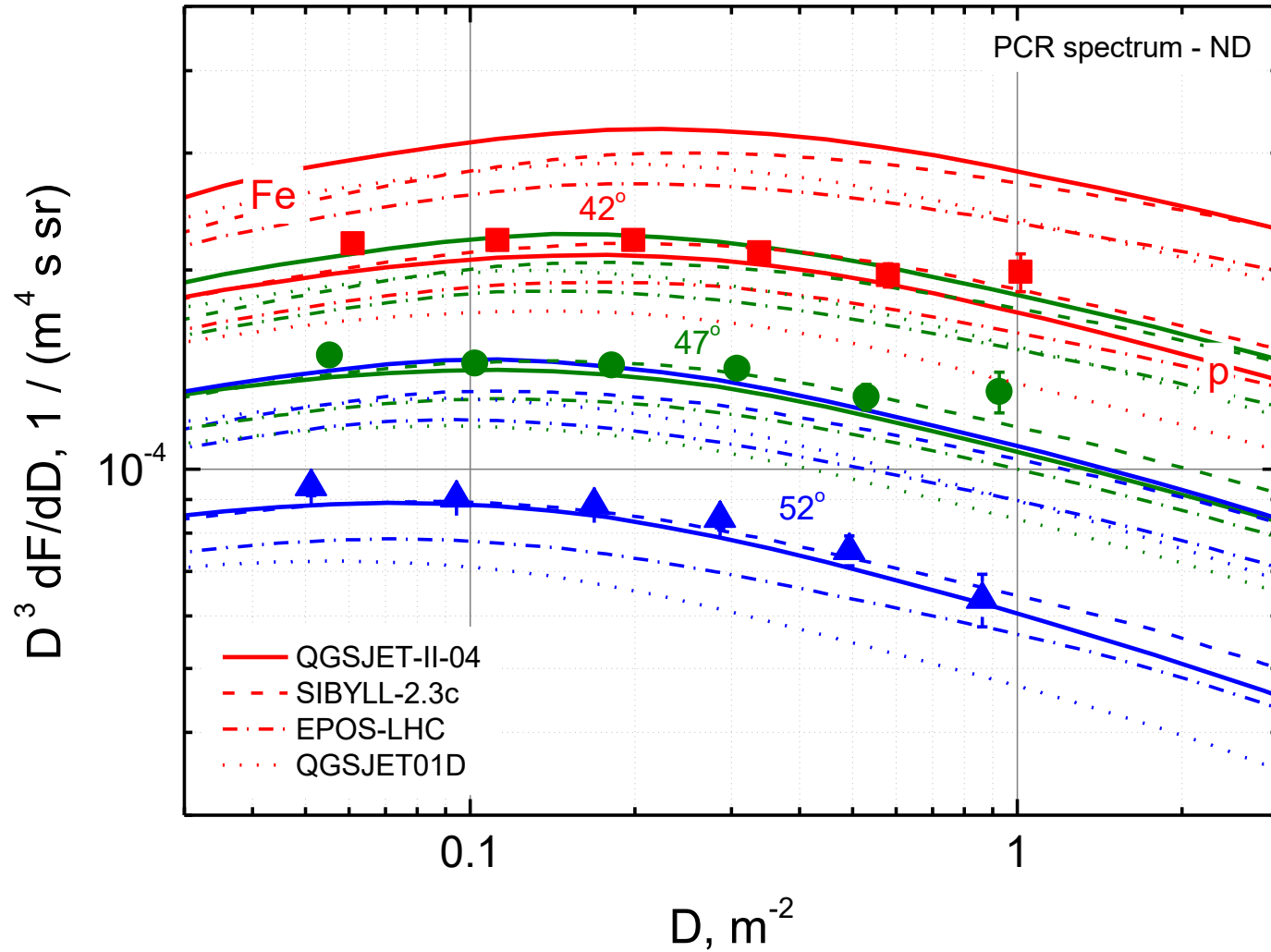


Зависимость средней энергии мюонов в группах от зенитного угла

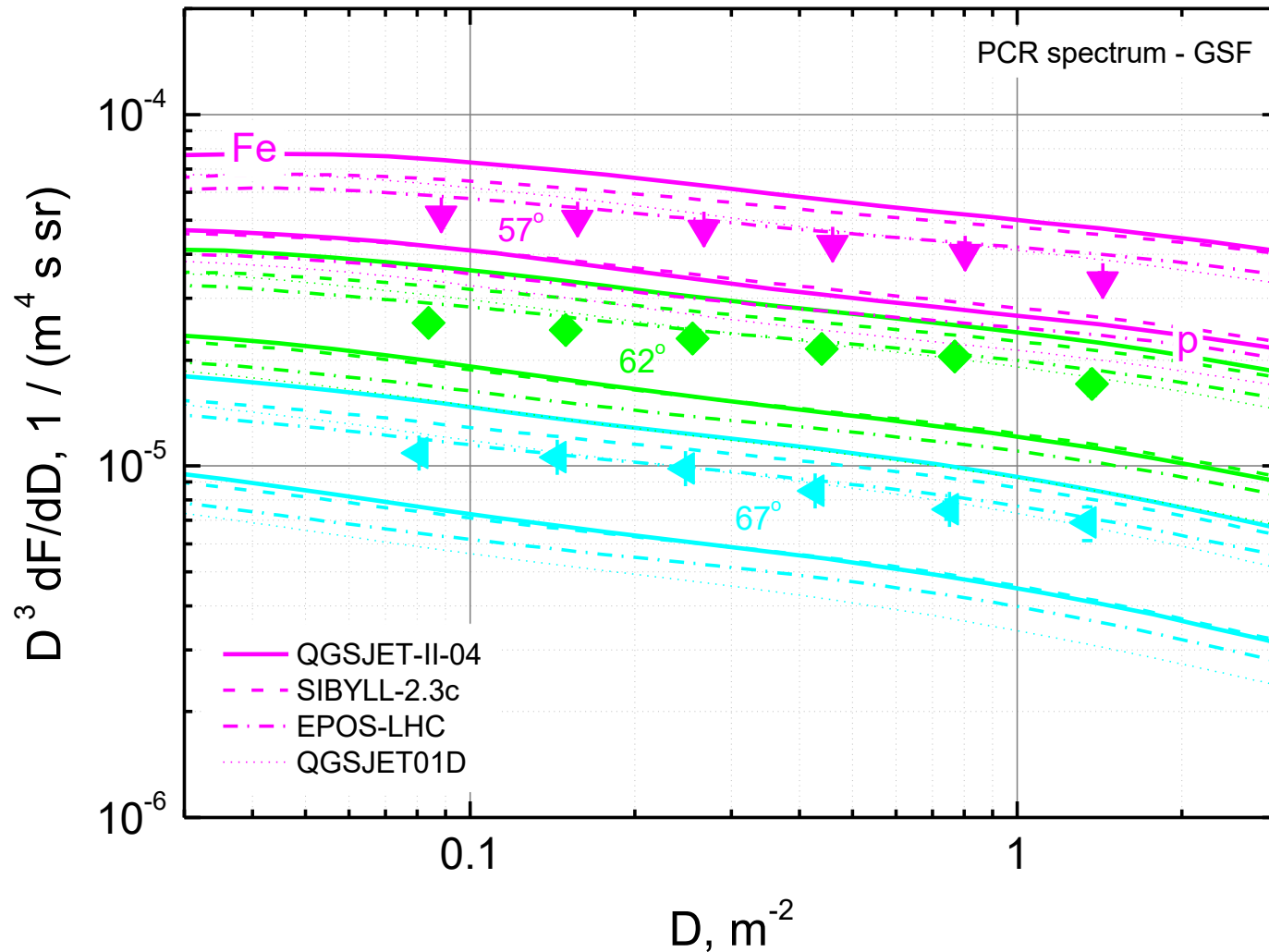


Зависимость средней энергии мюонов в группах от локальной плотности мюонов

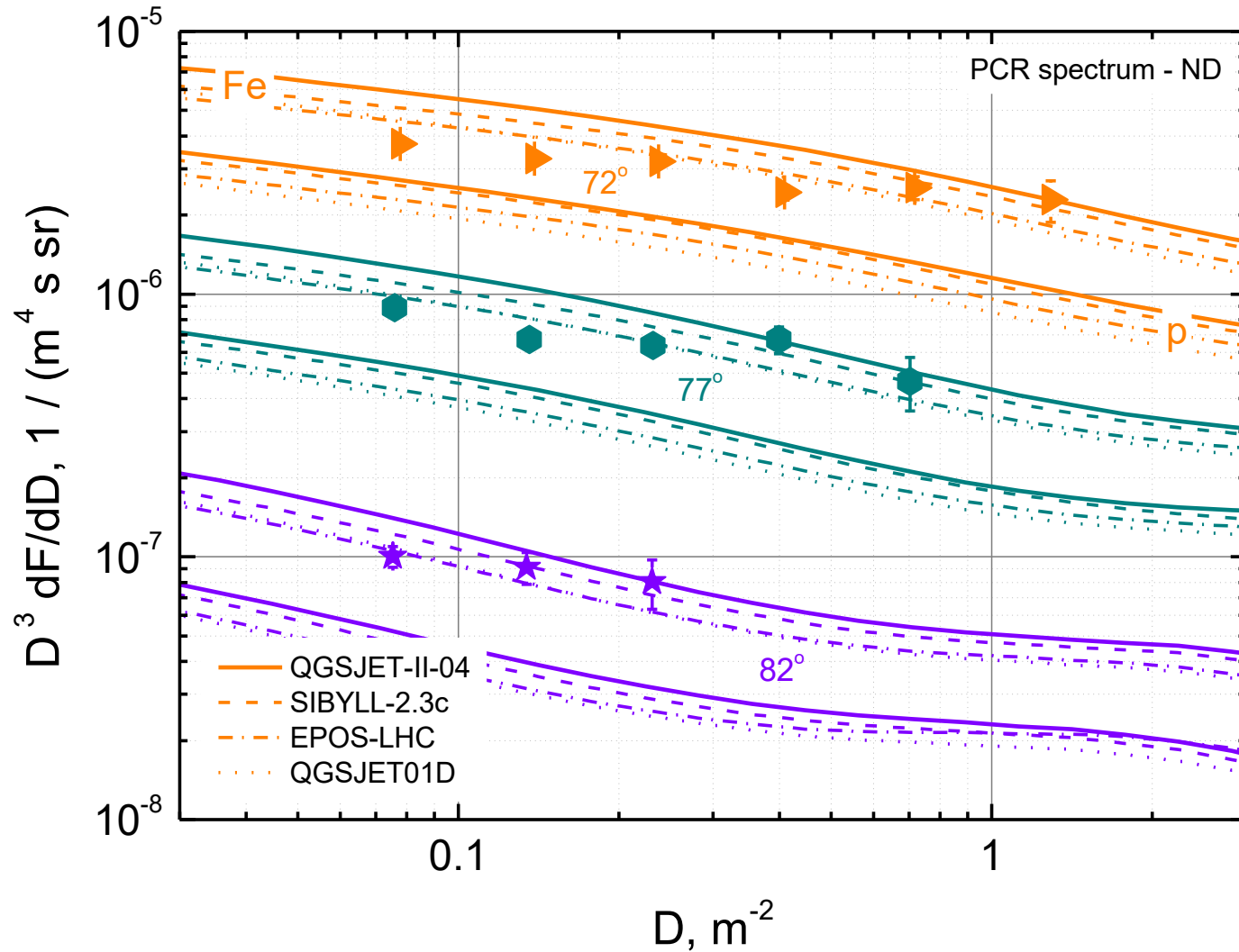
LMDS for different zenith angles (42 – 52°), ND



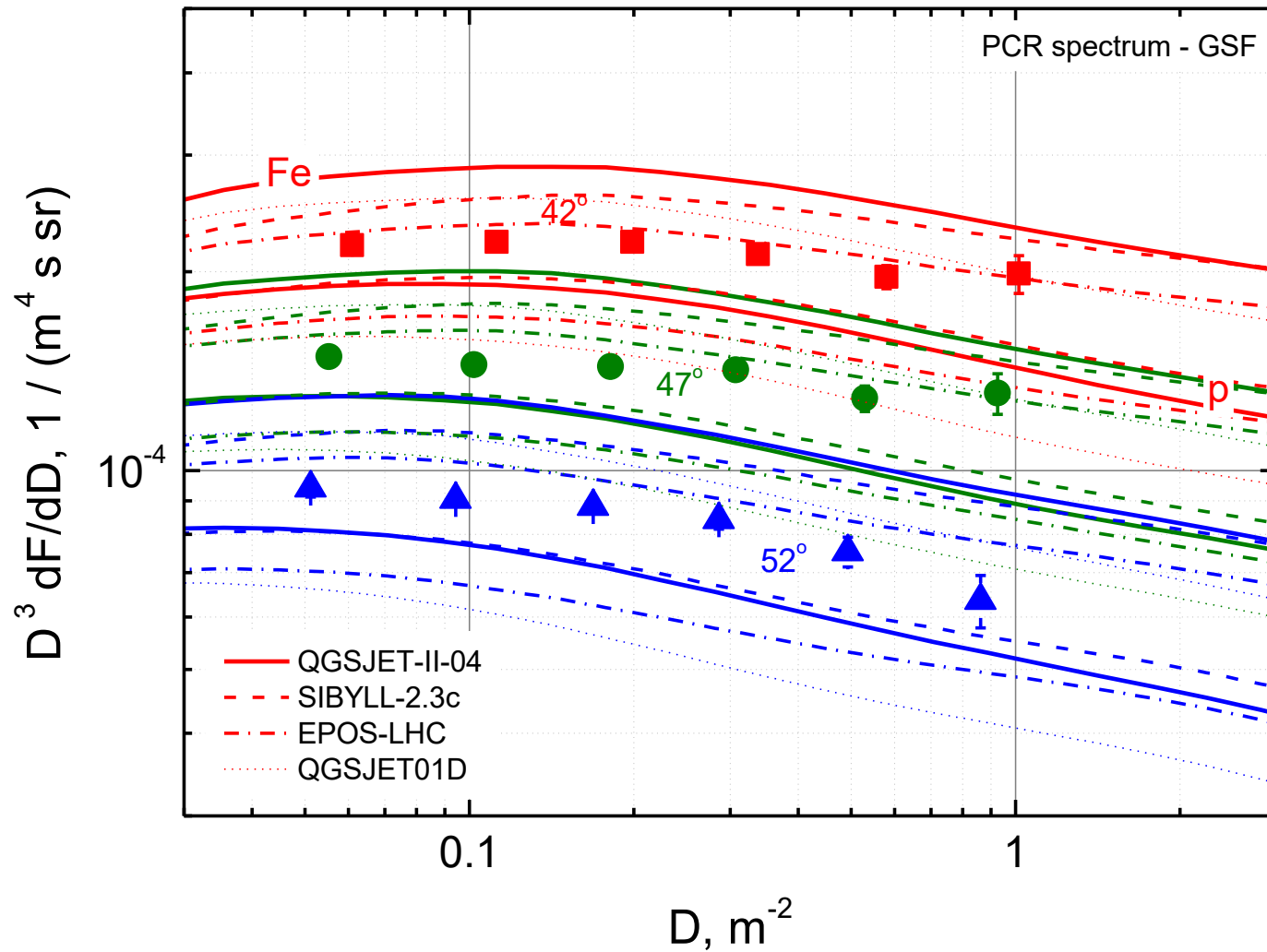
LMDS for different zenith angles (57 – 67°), GSF



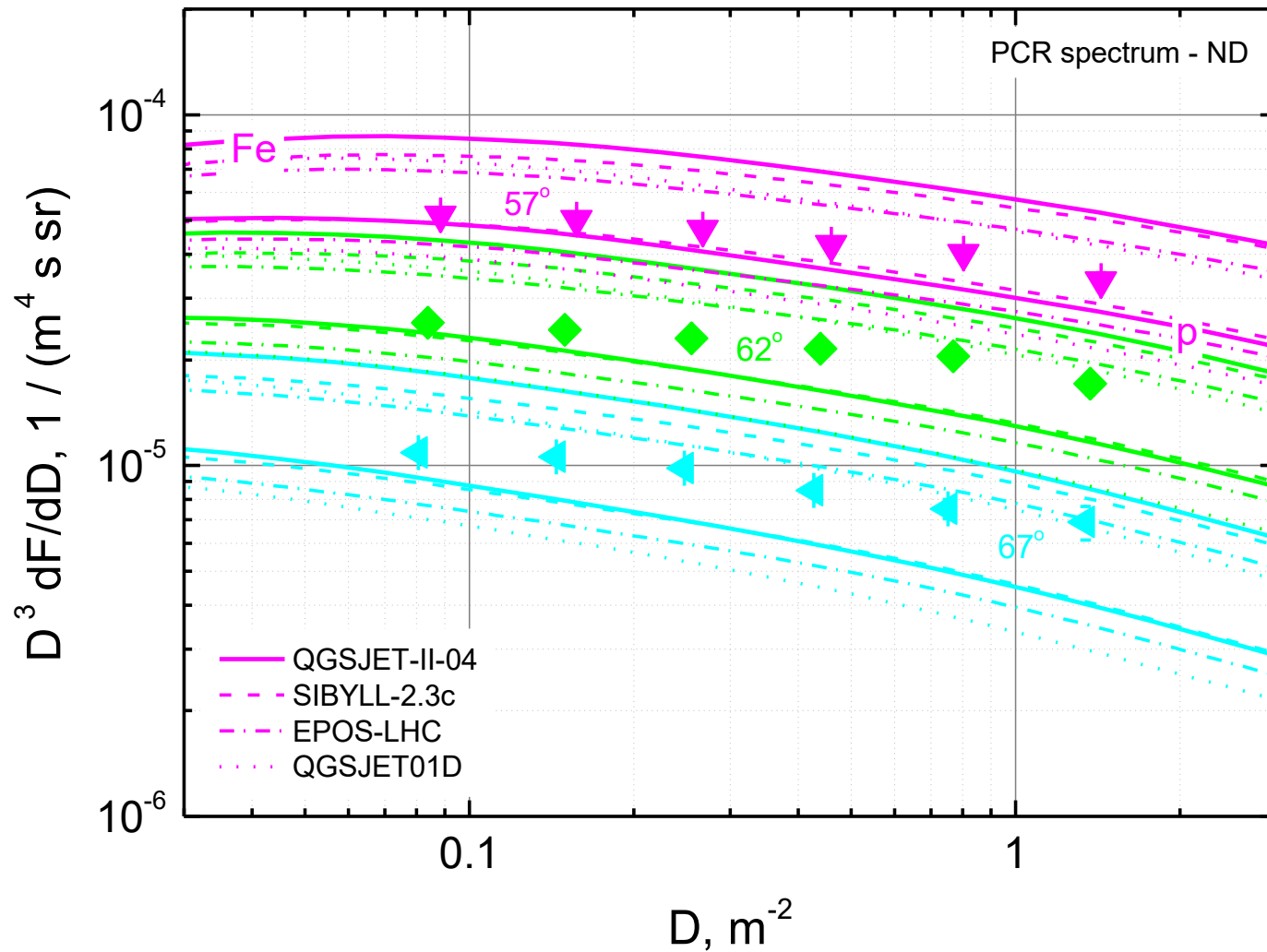
LMDS for different zenith angles (72 – 82°), ND



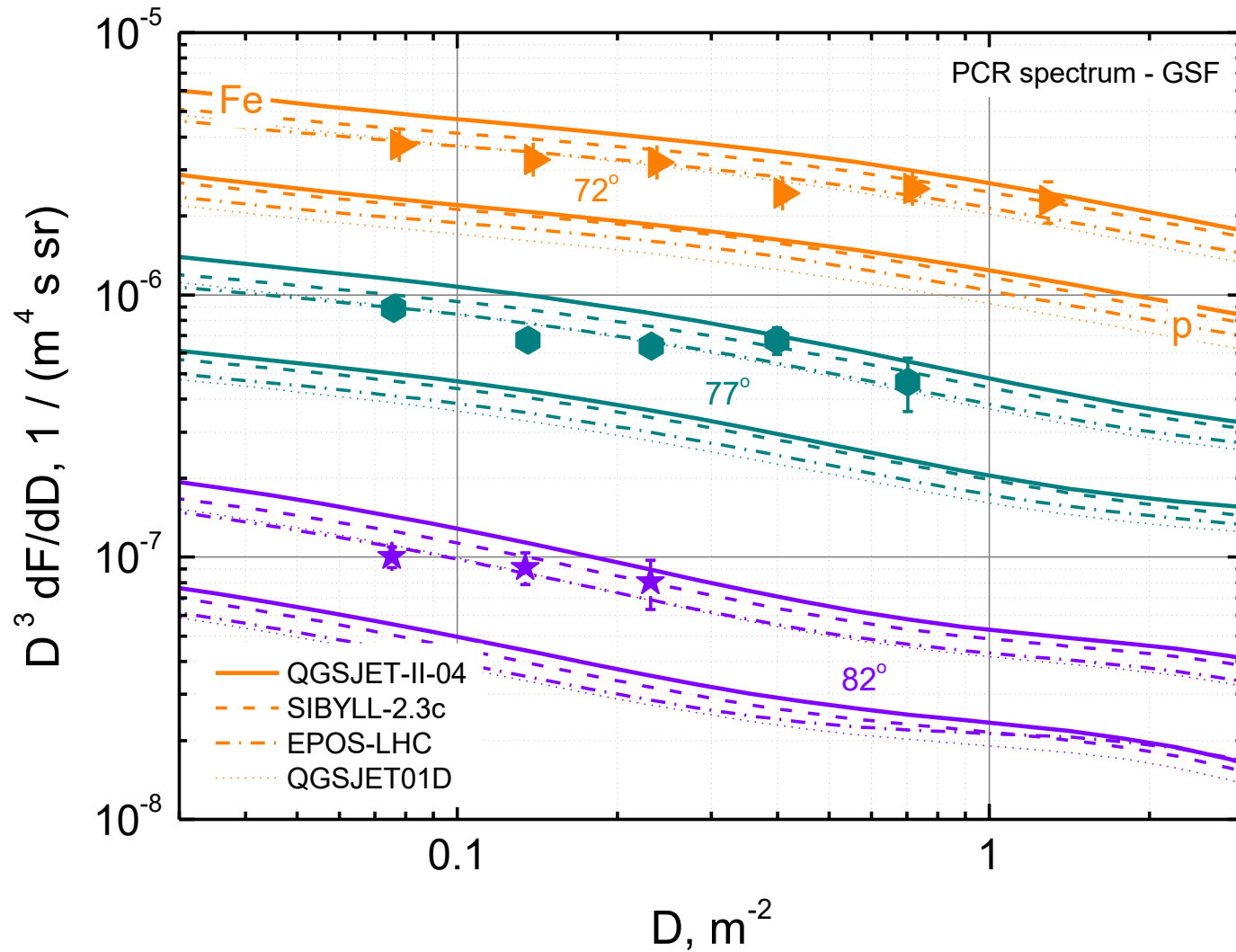
LMDS for different zenith angles (42 – 52°), GSF



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



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



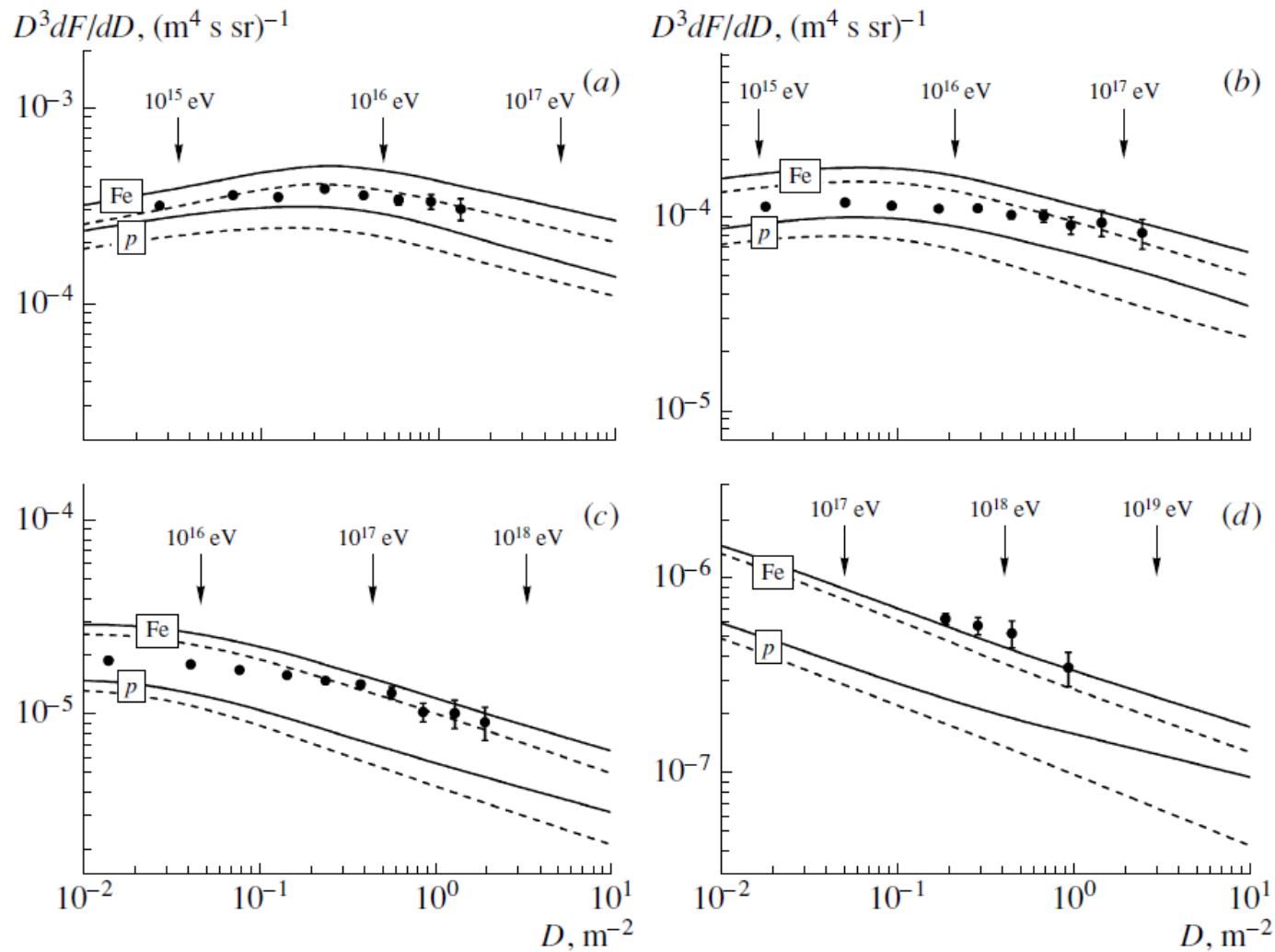
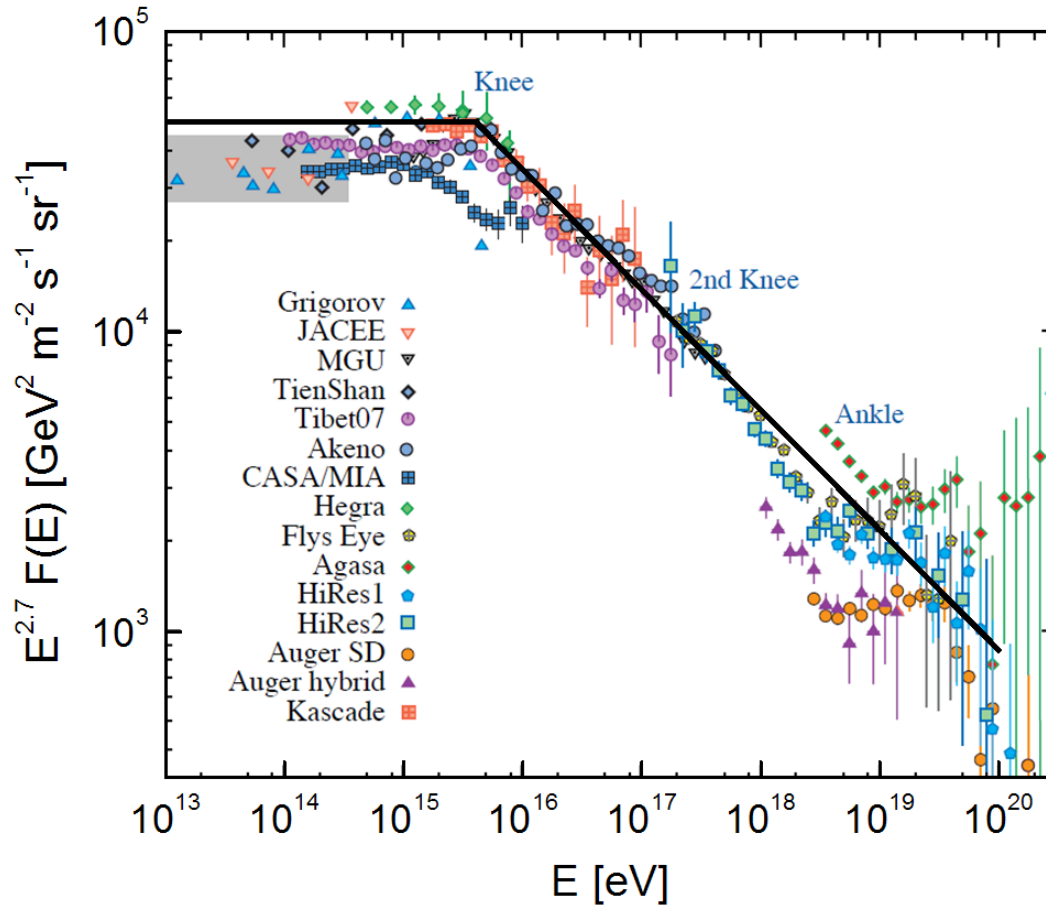


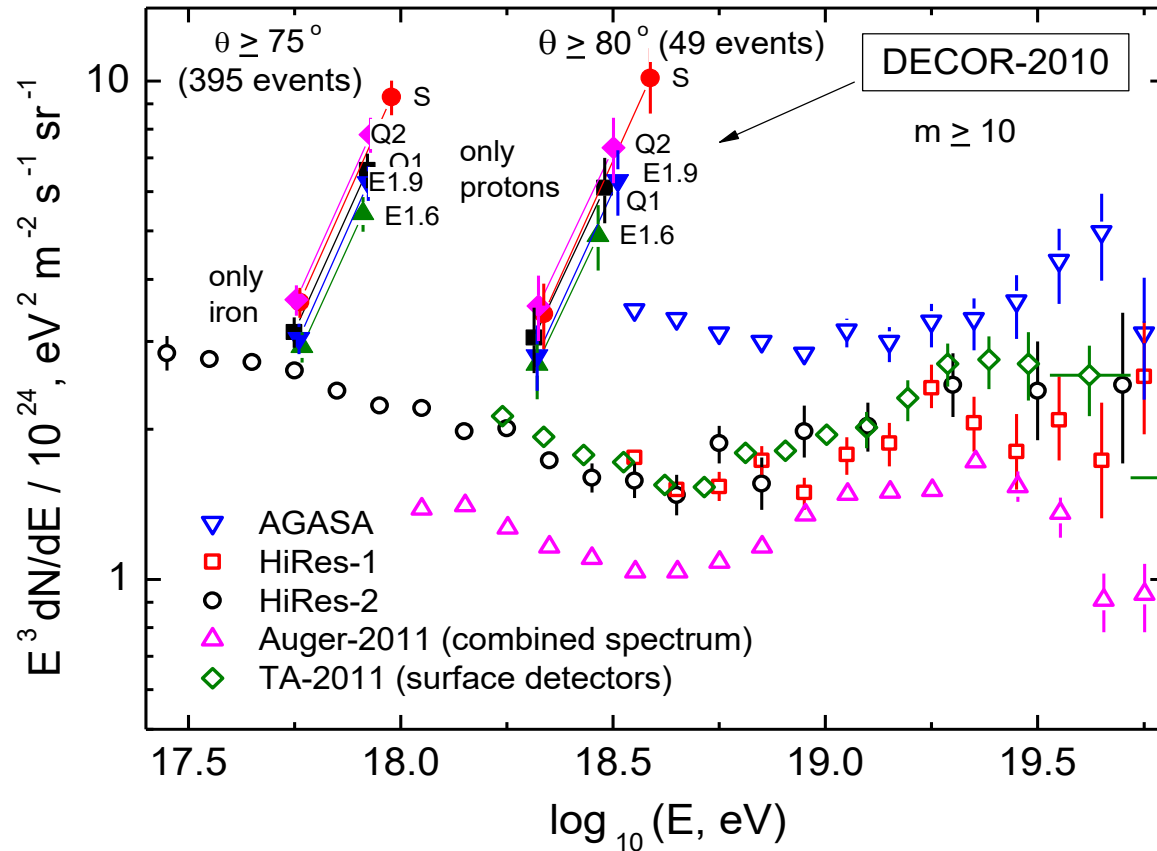
Fig. 9. Experimental and calculated differential spectra of the local muon density at the zenith angles of (a) 35° , (b) 50° , (c) 65° , and (d) 78° . The displayed points stand for experimental data, while the solid and dashed curves represent the results of the calculations performed by using the QGSJET01 and SIBYLL 2.1 models, respectively. In each panel, the lower pair of curves corresponds to primary protons, while the upper pair corresponds to iron nuclei.



The all-particle spectrum, PDG 2008

Excess of muon bundles intensity from DECOR data 2002-2007

O. Saavedra et al., *Journ. of Phys.: Conf. Ser.* 409 (2013) 012009



Reconstructed energy spectrum of primary cosmic rays at ultra high energies

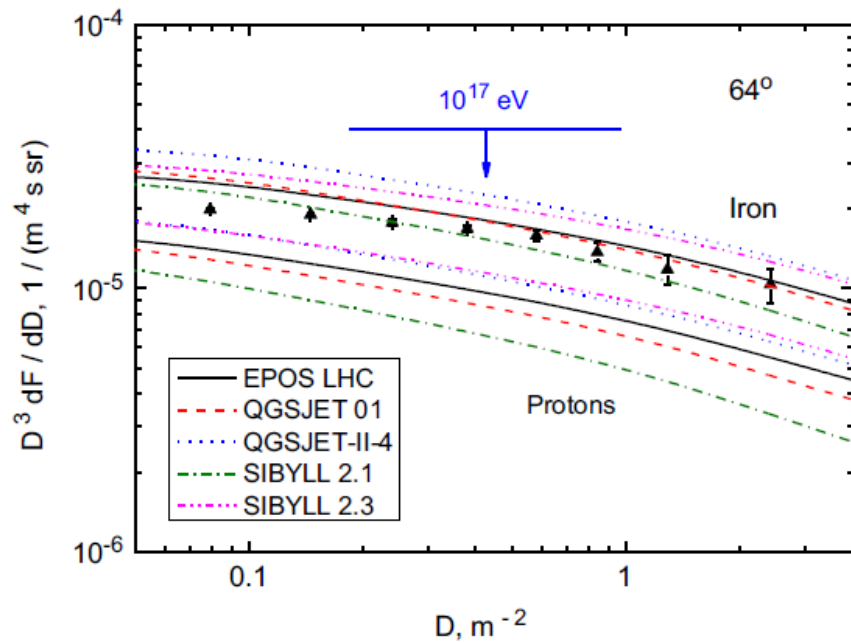


Fig. 8. Reconstructed local muon density spectrum at 64° zenith angle (dark triangles) and expected spectra calculated for protons and iron nuclei as primary particles (lower and upper groups of the curves respectively) with five different hadron interaction models. Arrow indicates the position of the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

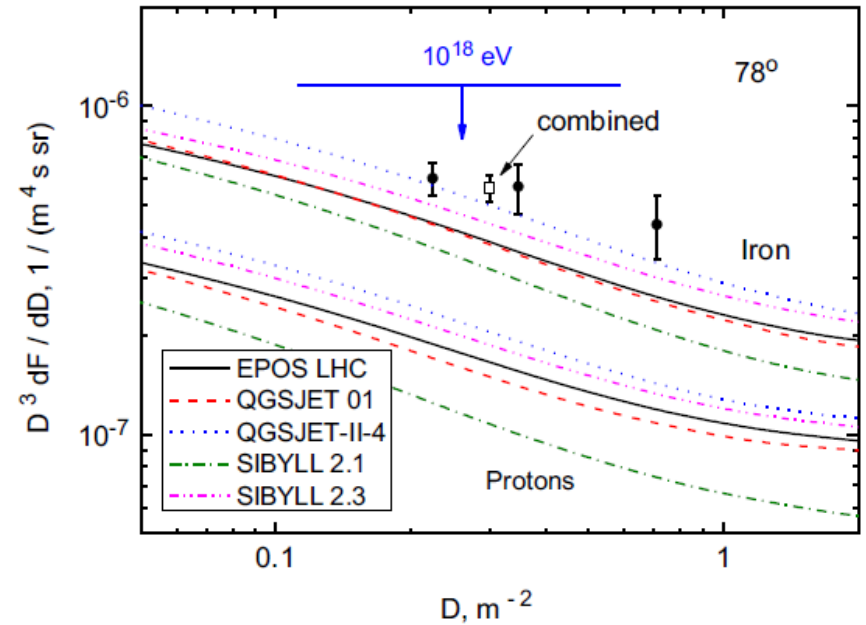
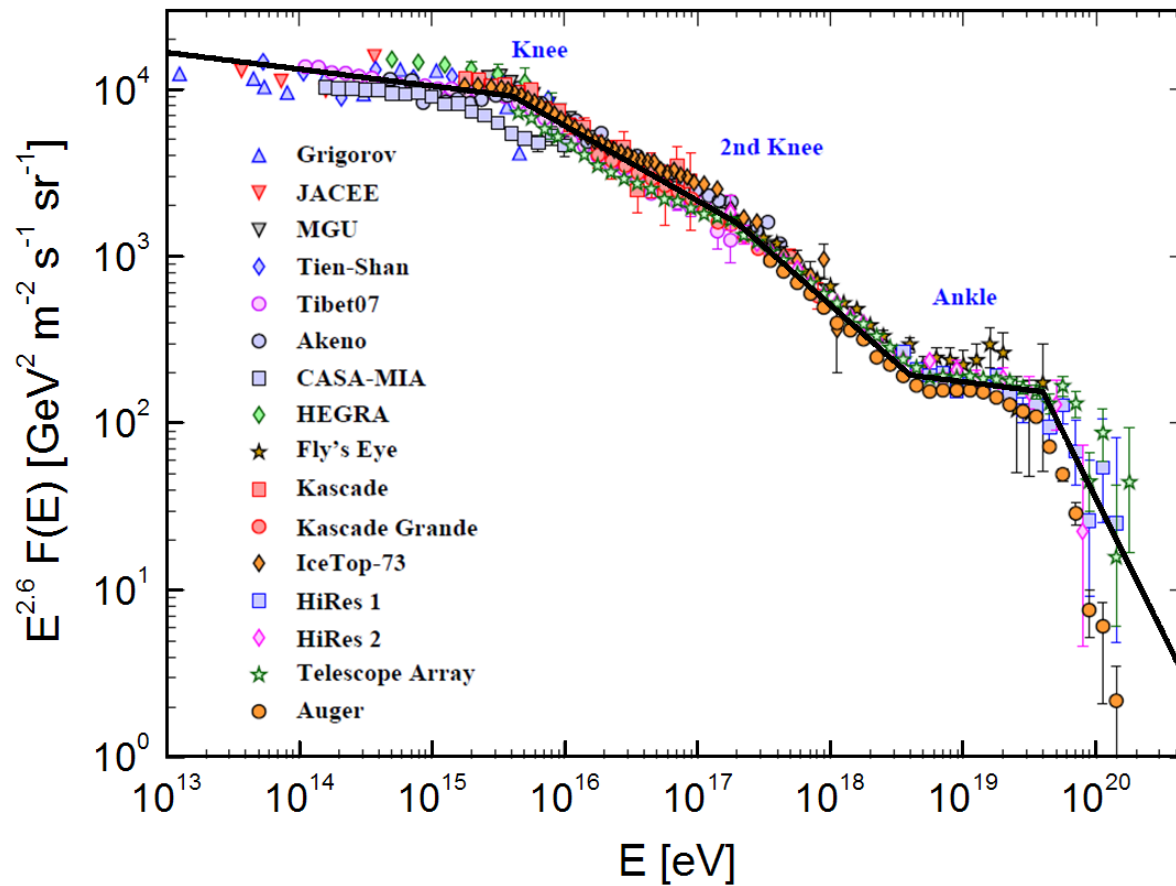
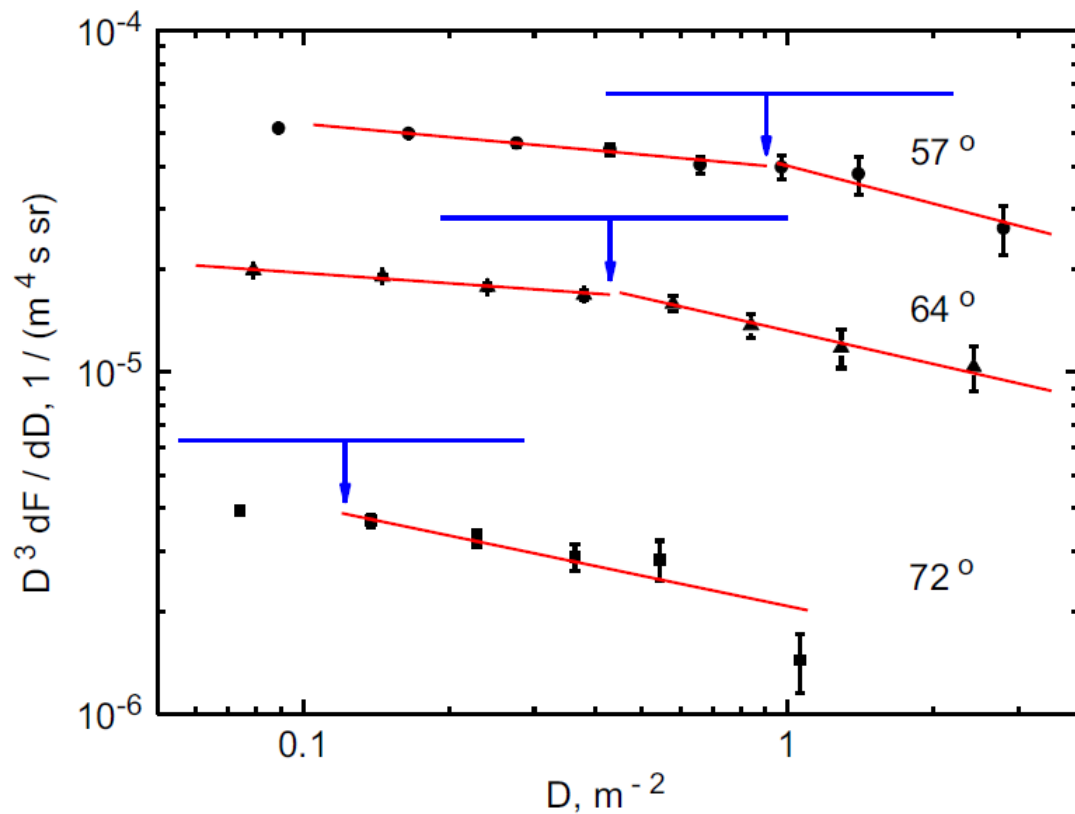


Fig. 9. Reconstructed muon density spectrum at 78° zenith angle (dark circles) and expected spectra calculated for protons and iron nuclei as primary particles (lower and upper groups of the curves respectively) with five different hadron interaction models. The open square represents a combined estimate 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


Table 2

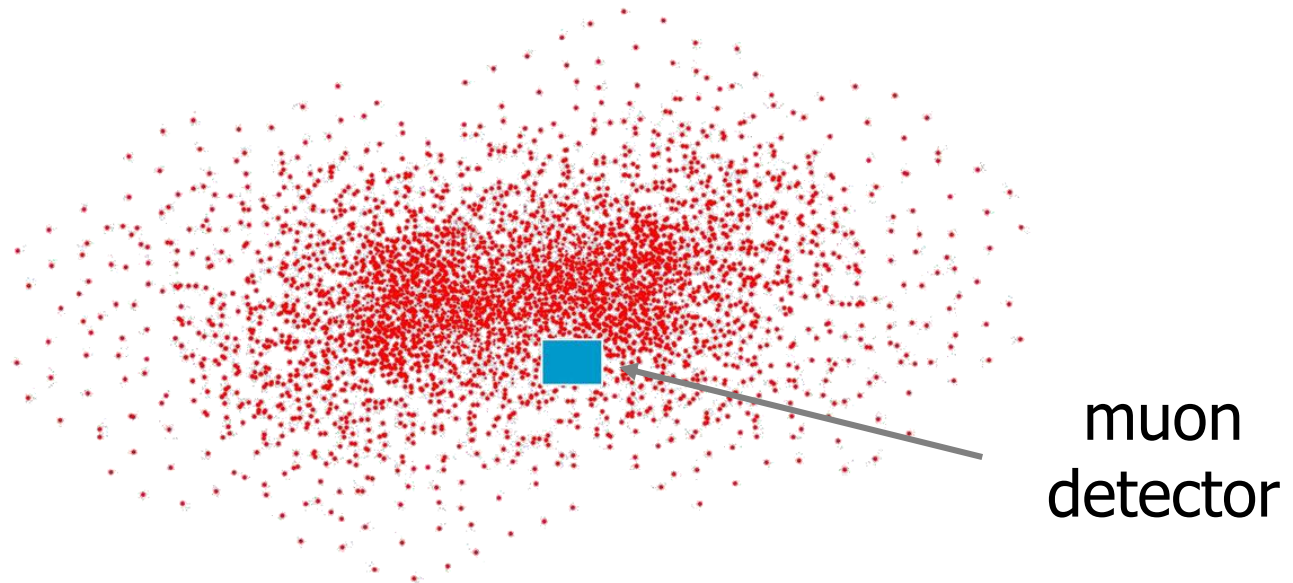
Integral spectrum slopes for LMDS at 3 different zenith angles with a piece-wise power function in two ranges of effective primary energy.

Zenith angle	$E_0 = 10^{16} - 10^{17}$ eV	$E_0 > 10^{17}$ eV
57°	2.129 ± 0.027	2.368 ± 0.183
64°	2.099 ± 0.016	2.323 ± 0.103
72°	–	2.296 ± 0.064
Combined	2.107 ± 0.014	2.309 ± 0.052

Fig. 7. Reconstructed local muon density spectra for three different zenith angles (labels near the point sets) and piece-wise power law fits of the data (solid lines). Arrows indicate the positions of the effective 10^{17} eV primary particle energy for different angles.

Local muon density spectra detection technique

$$E \sim 10^{18} \text{ eV}, \theta = 80^\circ$$

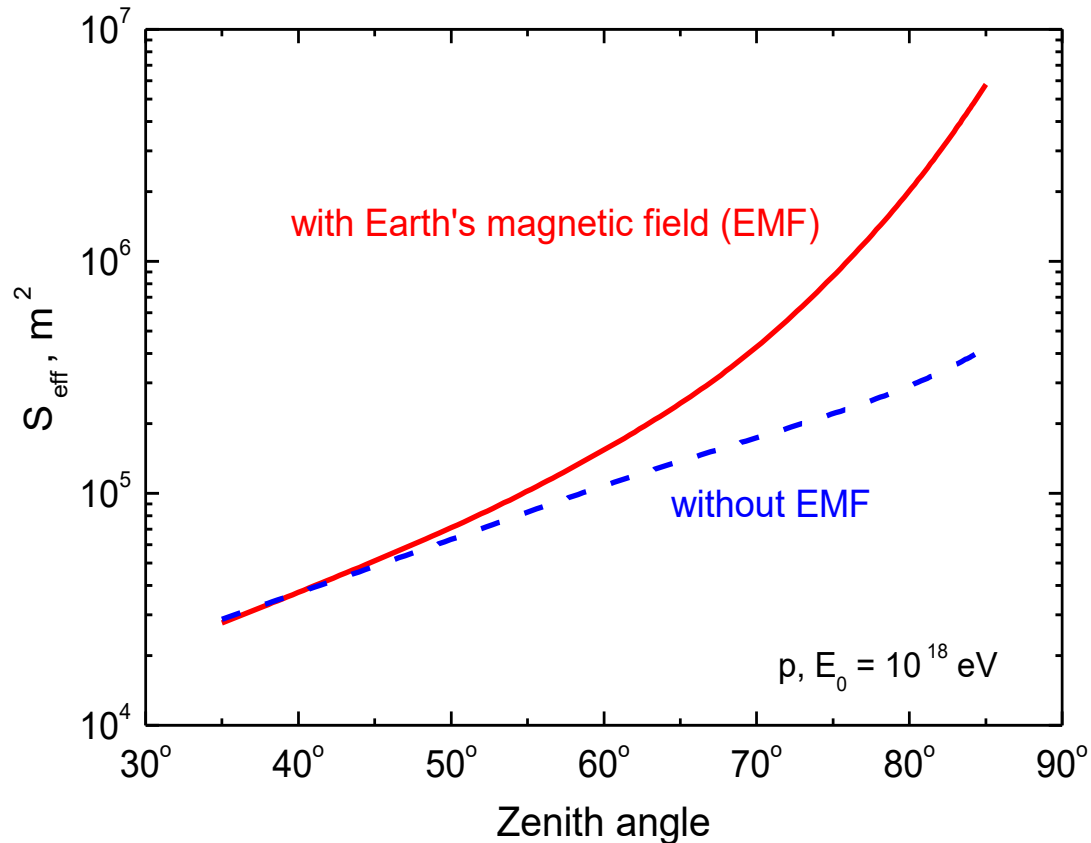


muon
detector

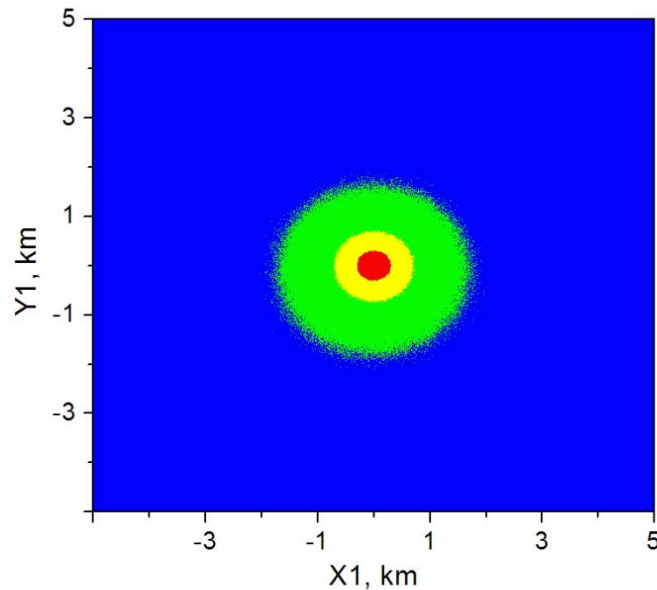
$\sim 10 \text{ km}$

Dependence of the effective EAS collection area in the LMDS technique on zenith angle

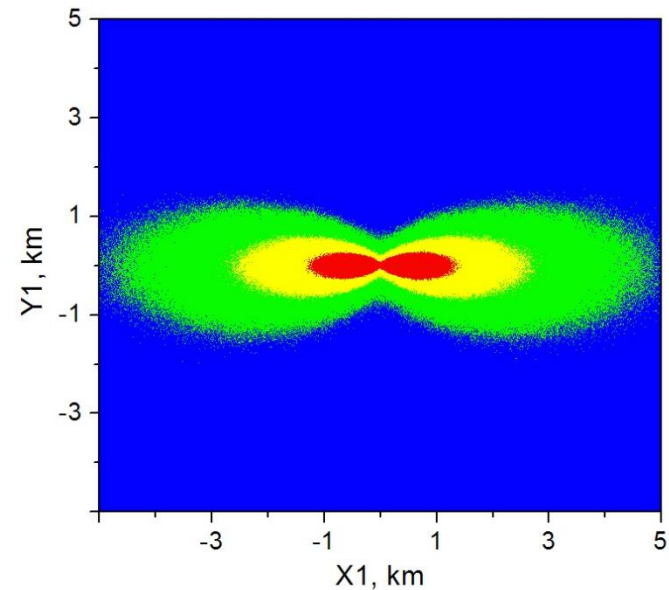
Event collection area is determined not by the detector size, but by transverse dimensions of the showers in muon component (up to several km² at large zenith angles); sufficient to reach energies of primary particles $\sim 10^{18}$ eV.



Shower cross section in muons



$\theta = 80^\circ$ (without EMF)



$\theta = 80^\circ$ (with EMF)

The content of particles in each of the colored area is 30% of the total number of muons

CORSIKA (100 EAS): proton, $E_0 = 10^{18}$ eV, $E_\mu \geq 1$ GeV

A muon detector with sizes of tens meters may be considered as a point-like probe in comparison with a shower dimension in muon component. A small fragment of the shower cross section is registered in the experiment.

Local muon density phenomenology (1)

For inclined EAS, the muon detector may be considered as a point-like probe. In a muon bundle event, the local muon density D (in a random point of the shower) is estimated:

$$D = (\text{number of muons}) / (\text{detector area}); [D] = \text{particles} / \text{m}^2.$$

Without considering fluctuations, spectrum of events in local density may be written as

$$F(\geq D) = \int N(\geq E(\mathbf{r}, D)) dS,$$

where $N(\geq E)$ - primary spectrum, E is defined by the equation:

$$\rho(E, \mathbf{r}) = D.$$

Dimension: $[F(\geq D)] = \text{events} / (\text{s sr})$.

Procedure of reconstruction of LMDS from the experimental data on muon bundles

The experimental events were sorted in nine 5° -wide intervals of zenith angles from 40° to 85° and several bins of the density estimate D (with a constant step in the logarithm of the density), then the matrix of the numbers of the observed events $N_{\text{obs}}(\Delta D, \Delta \theta)$ was formed.

The expected matrix of the event numbers $N_{\text{exp}}(\Delta D, \Delta \theta)$ was calculated by means of the Monte Carlo technique. Artificial events (muon density, arrival direction) were sampled according to the reference local muon density spectrum model in the form

$$dF_0 / dD = CD^{-(\beta+1)} \cos^\alpha \theta, \quad \alpha \approx 4.7, \quad \beta \approx 2.1$$

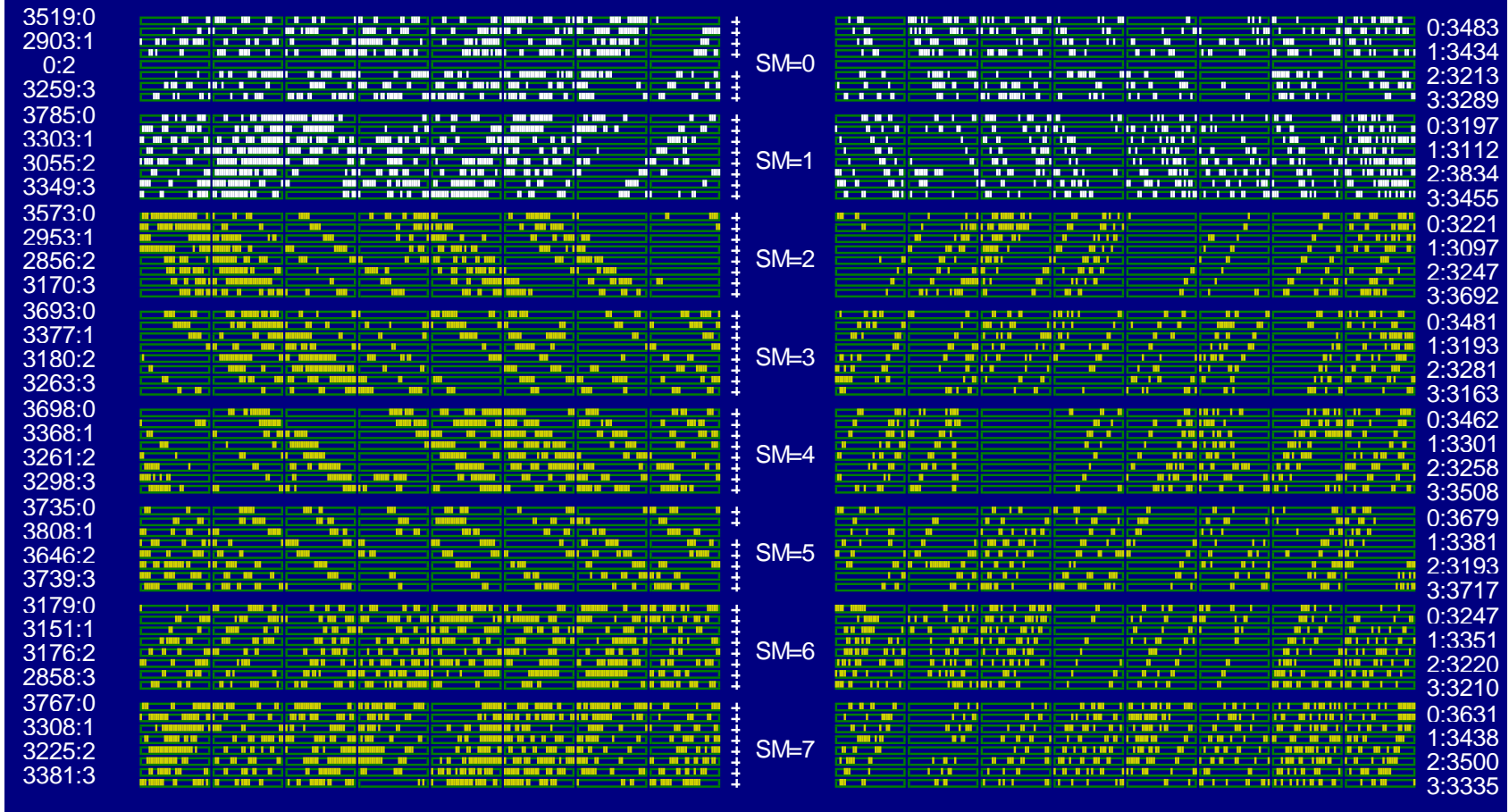
Finally, the experimental estimates of the differential LMDS were obtained as

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

Muon bundle event in DECOR supermodules

multiplicity $m = 124$ particles, zenith angle $\theta \approx 75^\circ$

Run 539 --- Event 596095 ----11-10-2017 17:26:51.23 Trigger(1-16):01111000 00010000 Weir_Time:60.510 msec



Y-coordinate (azimuth angle)

X-coordinate (projected zenith angle)

An example of geometry reconstruction of muon bundle event detected by the NEVOD-DECOR setup

Nam=91,N5=91,N6=91,NR1=0,NR2=0,Sum1=131,Sum2=7,Sob=11000001,11100000
N1=87,N3=91 nCup= 5 SumAmp=8.22e+05 01111000,00010000 NGroup2=129,n=129,n1=134,n2=151,n0=120,nx=151,ny=134,One=3
N2=91,N4=91 nCdown= 3 ACup=1.14e+03 ACdn= 413 NPMT=542 ETel= 25.3% ERec= 43.4%

