

36-я ВККЛ, 28.09 – 02.10.2020, Москва, НИИЯФ МГУ

Исследование спектра, состава и взаимодействий  
космических лучей сверхвысоких энергий по данным  
об интенсивности групп мюонов  
в эксперименте НЕВОД-ДЕКОР

Р.П. Кокоулин, А.Г. Богданов

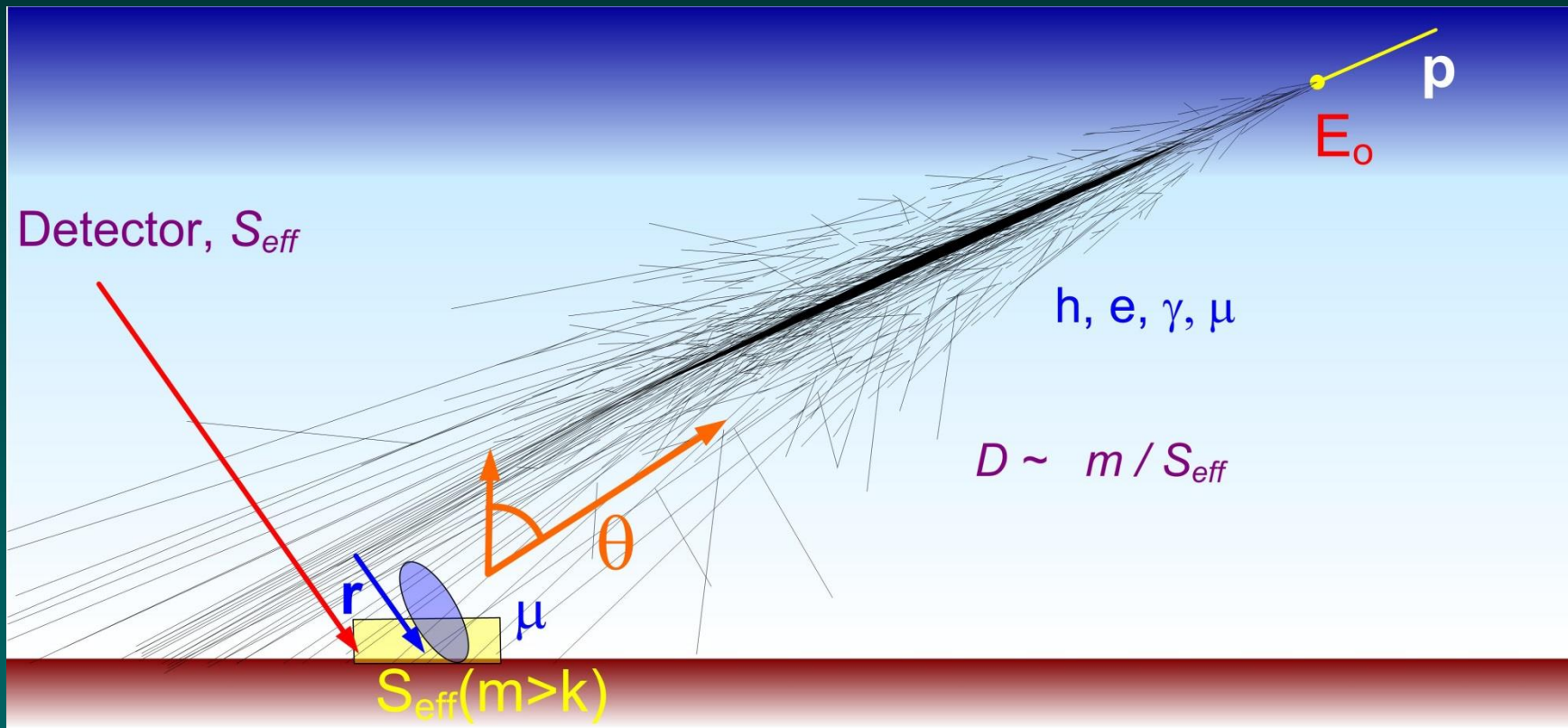
Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

от сотрудничества НЕВОД-ДЕКОР

[rpkokoulin@mephi.ru](mailto:rpkokoulin@mephi.ru)

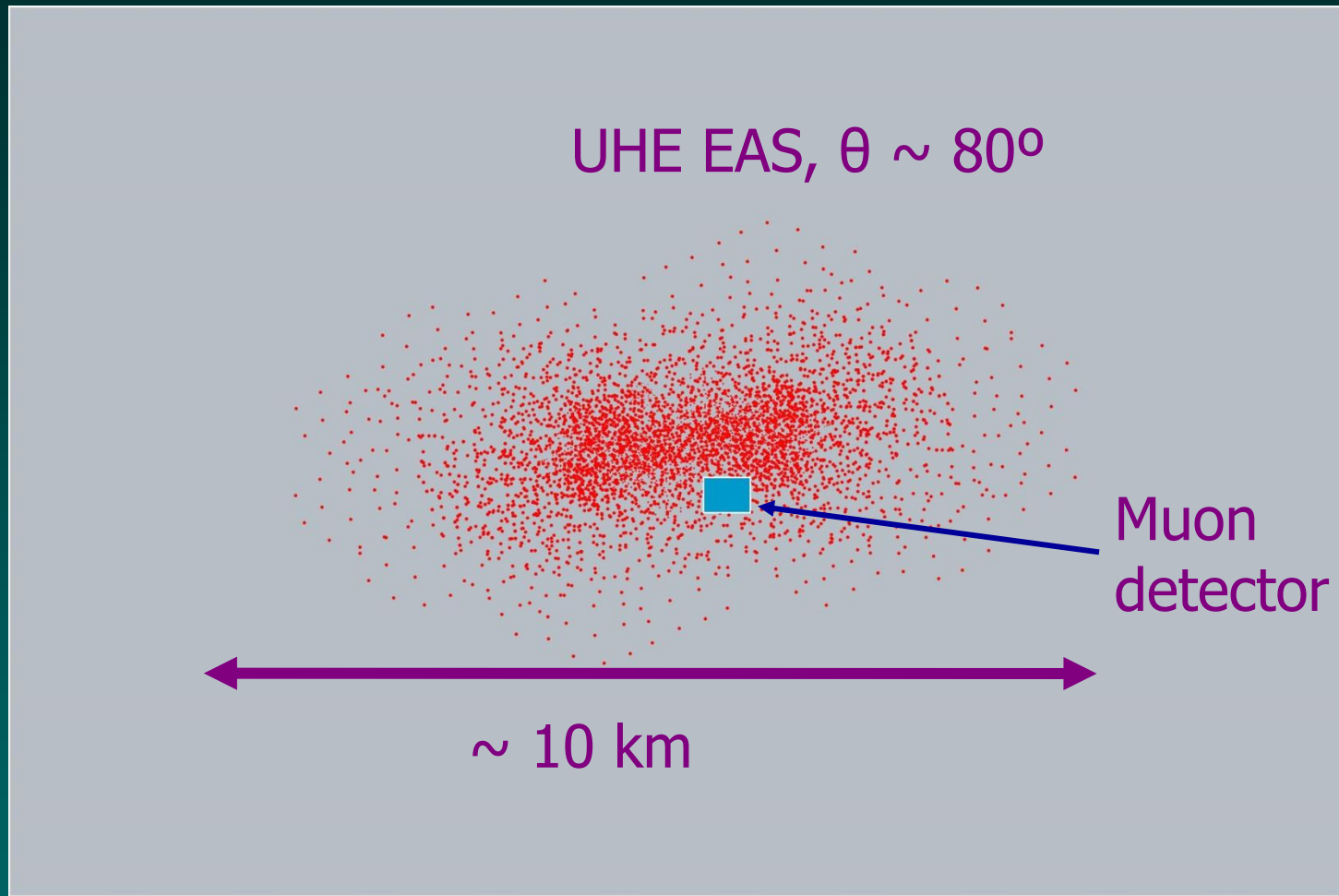
# Для анализа мюонных групп используется феноменология спектров локальной плотности мюонов (СЛПМ)

A.G. Bogdanov et al., Phys. Atom. Nucl. 2010. V. 73. N 11. P. 1852



В отдельном событии с группой мюонов измеряется локальная плотность мюонов  $D$  в точке наблюдения. Распределение событий по оценке  $D$  образует СЛПМ.

# Метод спектров локальной плотности мюонов

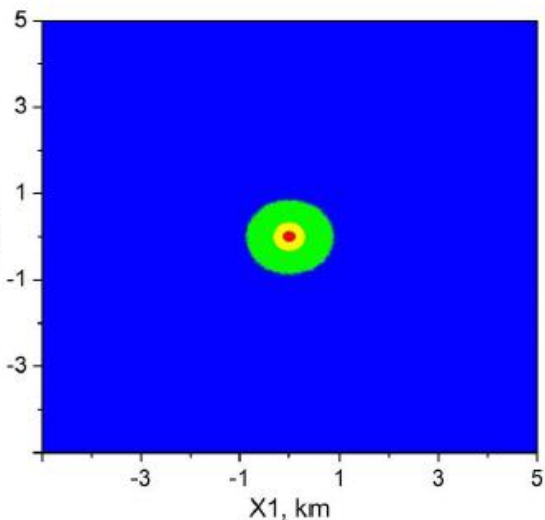


Мюонный детектор с размерами десятки метров является точечным по сравнению с размерами ливня в мюонной компоненте. Регистрируется маленький «осколок» поперечного сечения ливня.

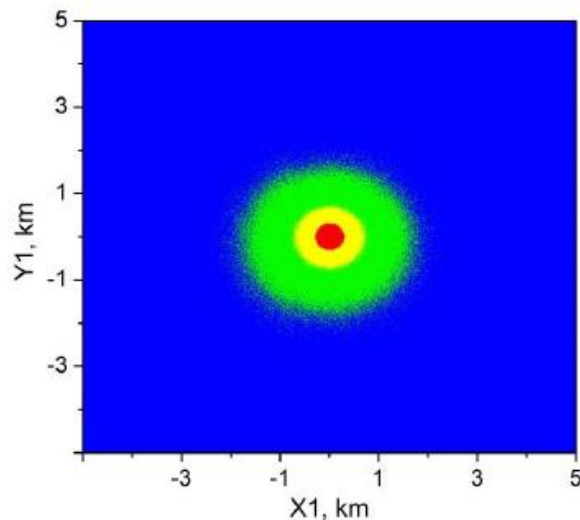
# Поперечное сечение ШАЛ в мюонной компоненте

EAS cross section (muon component)

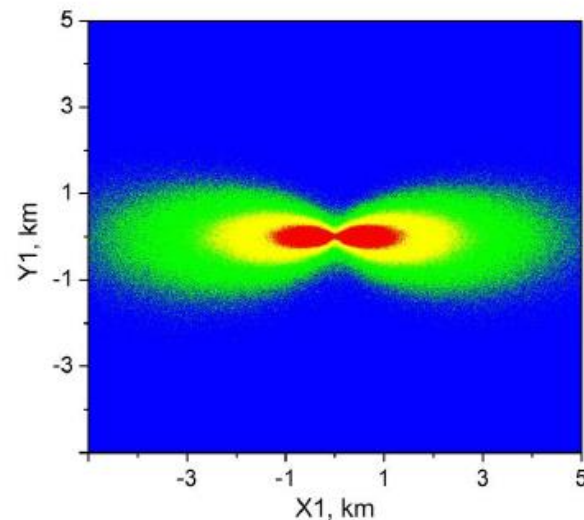
Red, yellow, green contours contain 30, 60, 90% of EAS muons, respectively



35° without EMF



80° without EMF



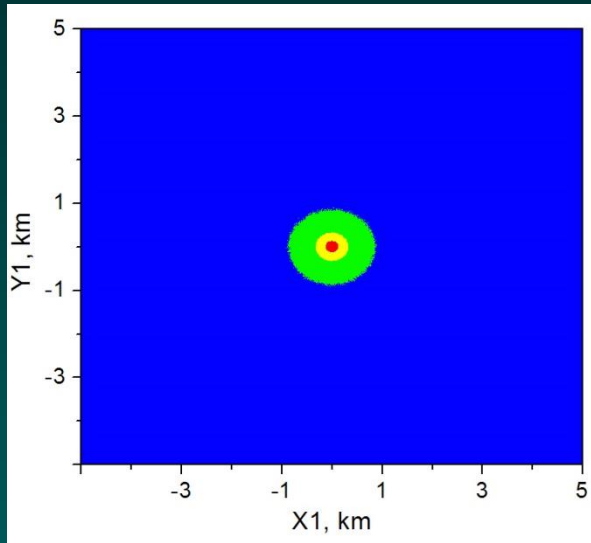
80° with EMF

CORSIKA (SIBYLL+FLUKA),  $p$ ,  $E_0 = 10^{17}$  eV, 100 EAS,  $E_\mu \geq 1$  GeV

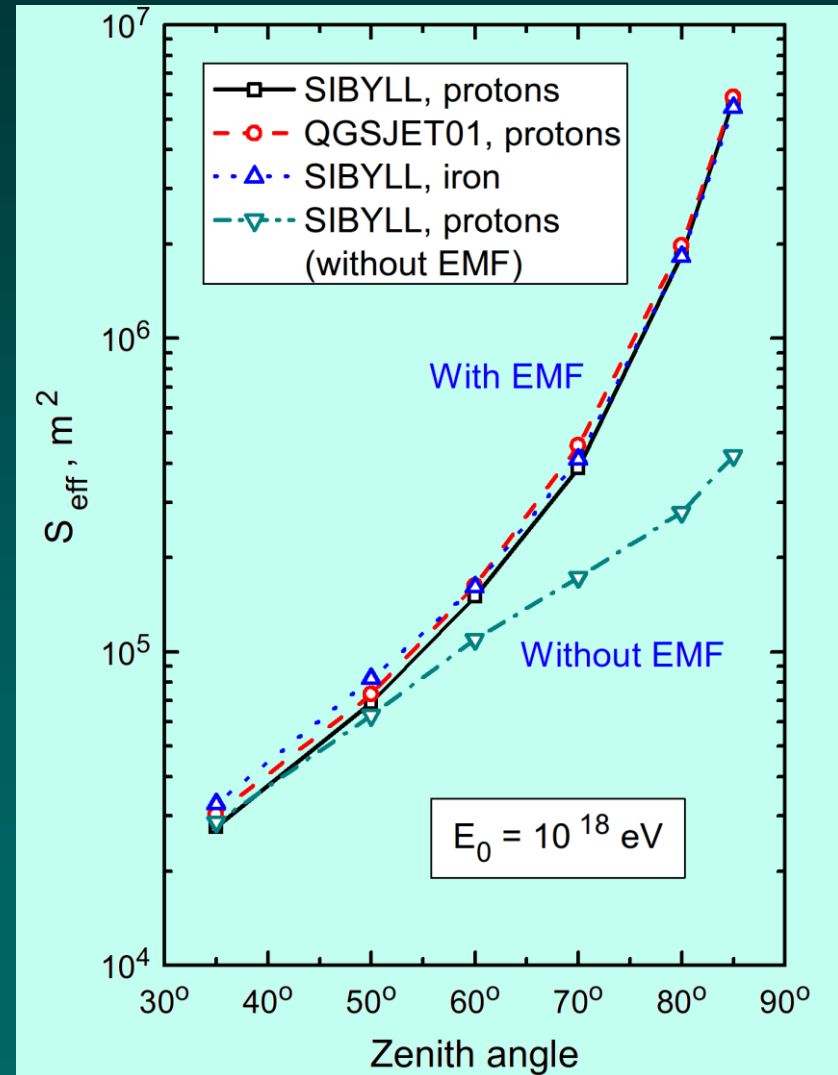
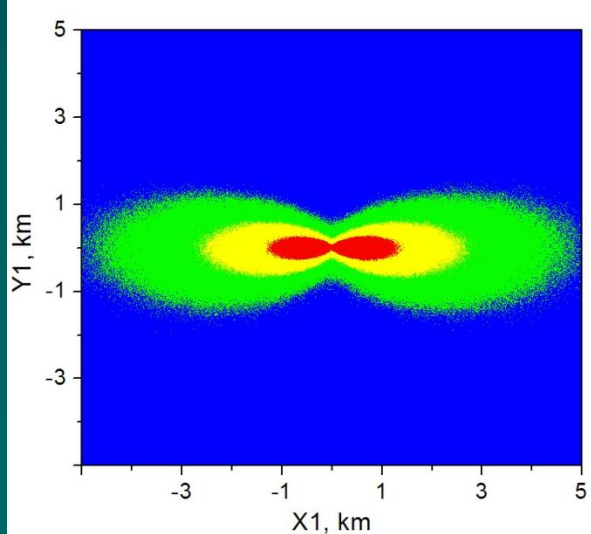
# Площадь собирания ШАЛ в методе СЛПМ

## Сечение ШАЛ в мюонах

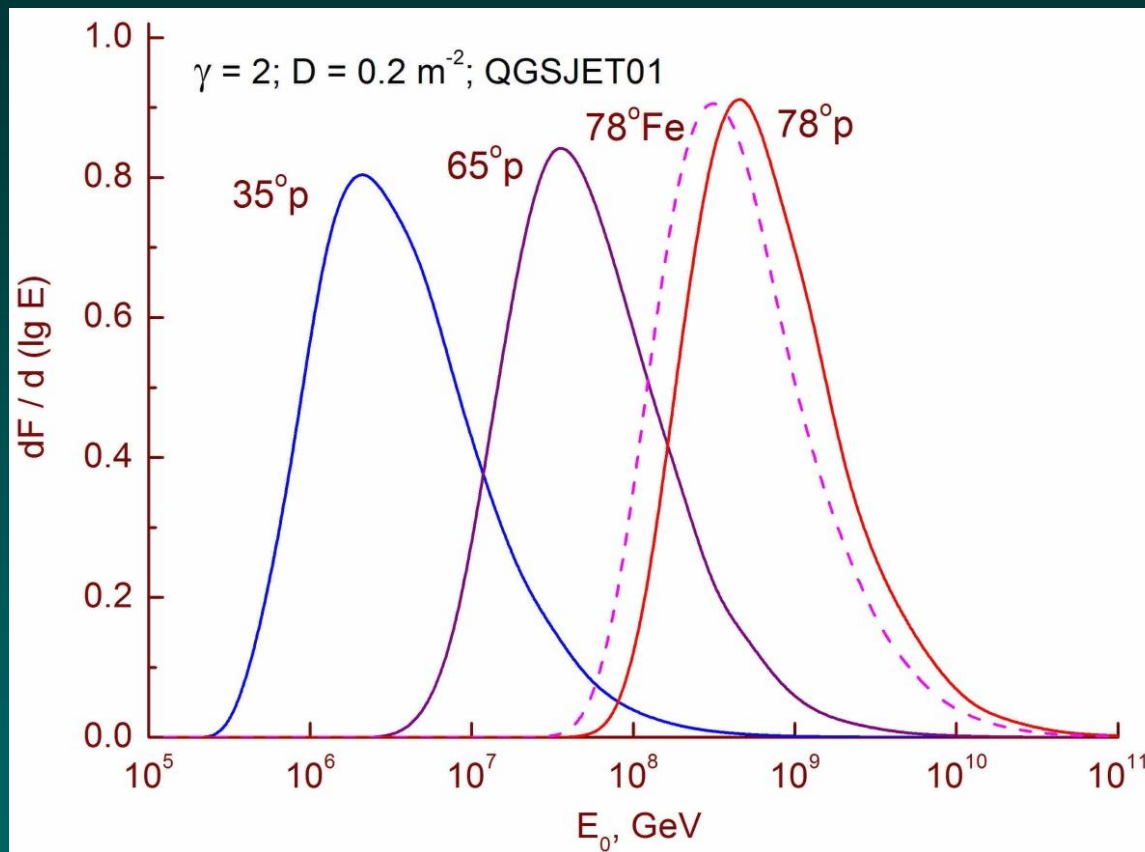
$\theta = 35^\circ$



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



# Распределение энергий первичных частиц, дающих вклад в события с фиксированной плотностью мюонов



Разным зенитным углам при одинаковой плотности мюонов соответствуют очень сильно (на порядки) отличающиеся энергии ШАЛ.

# Метод СЛПМ: основные соотношения

Без учета флуктуаций, спектр событий по плотности мюонов может быть записан в виде интеграла по сечению ливня [R.P. Kokoulin et al., 2005]

$$F(\geq D) = \int N(\geq E(\vec{r}, D)) dS, \quad [\text{событий} / (\text{с ср})]$$

где  $N(\geq E)$  первичный спектр, а  $E$  определяется уравнением:

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

Для масштабной ФПР мюонов в окрестности некоторой энергии  $E_0$

$$\rho(E, \vec{r}) = (E/E_0)^\kappa \cdot \rho(E_0, \vec{r}), \quad \kappa \approx 0.9$$

и квазистепенного первичного спектра

$$N(\geq E) = A(E/E_0)^{-\gamma},$$

$$F(\geq D) = AD^{-\beta} \int [\rho(E_0, \vec{r})]^\beta dS, \quad \beta = \gamma / \kappa \sim 2$$

СЛПМ чувствителен к спектру (наклон, интенсивность), массовому составу и модели адронных взаимодействий.

# Важнейшие особенности метода спектров локальной плотности мюонов

Площадь собирания событий определяется не размером детектора, а поперечным сечением ливня, которое в мюонной компоненте вблизи горизонта достигает нескольких квадратных километров (достаточно, чтобы достичь энергий  $10^{18}$  эВ и выше).

Одновременные измерения СЛПМ при разных зенитных углах дают возможность исследования очень широкого энергетического диапазона в рамках единого эксперимента с помощью относительно небольшой установки.



# Краткая история сотрудничества ДЕКОР

28 лет назад (1 июня 1992) было подписано первое соглашение о сотрудничестве между МИФИ и туринской группой (Институт космогеофизики, Туринский университет).

Главной целью было создание координатного детектора ДЕКОР вокруг черенковского калориметра НЕВОД для исследований многочастичных событий при больших зенитных углах.

Первые два супермодуля детектора были введены в эксплуатацию в 1998 г. В 2001 сборка ДЕКОР была завершена.

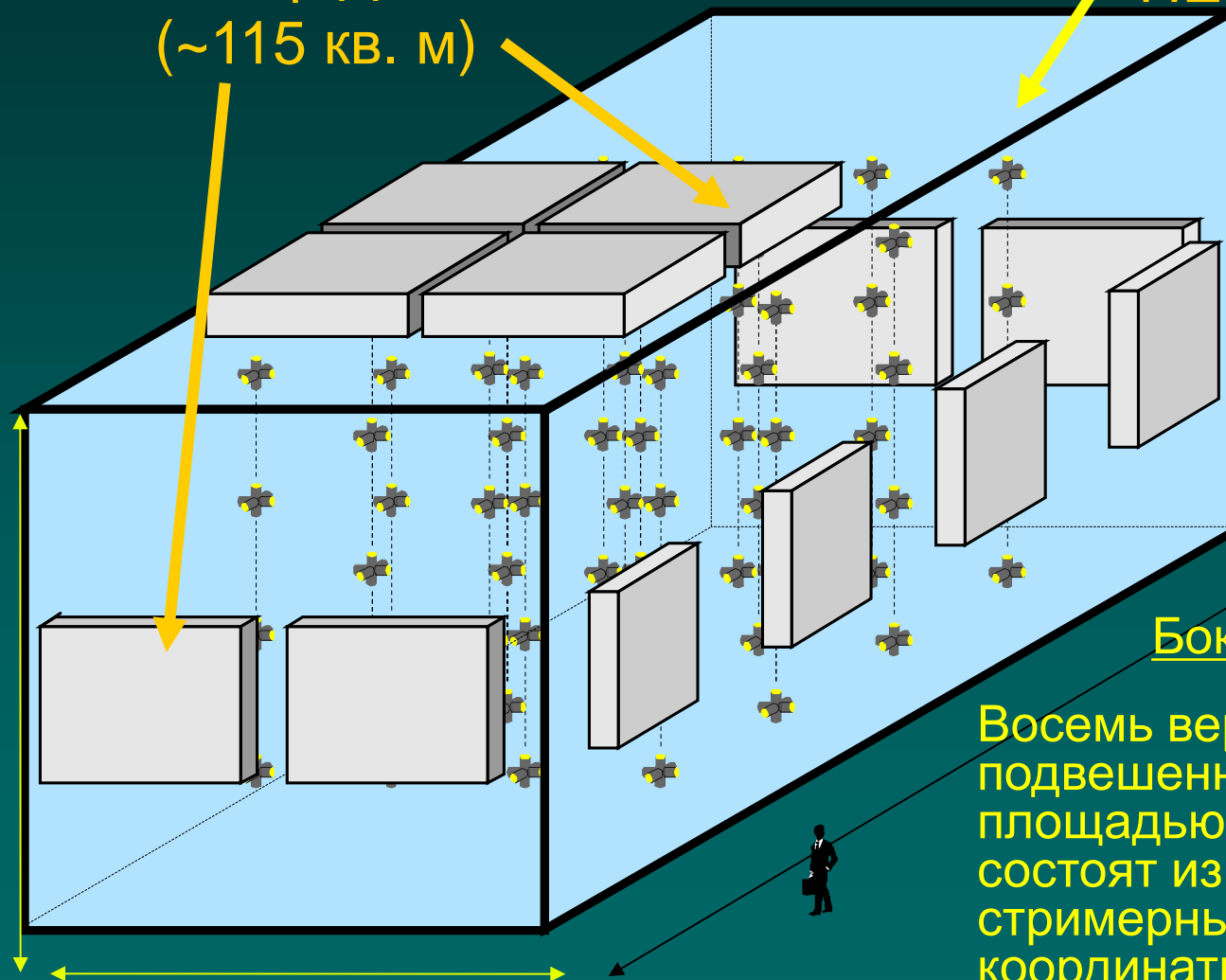
Долговременные измерения (более 70 тысяч часов) по регистрации групп мюонов на комплексе НЕВОД-ДЕКОР были проведены в 2002-2007 и 2012-2020 гг.). Эксперимент продолжается.

# Общий вид комплекса НЕВОД-ДЕКОР

Координатно-трековый  
детектор ДЕКОР

(~115 кв. м)

Черенковский  
водный детектор  
НЕВОД (2000 куб. м)



$\sigma_x \sim 1\text{ cm};$   
 $\sigma_\psi < 1^\circ$

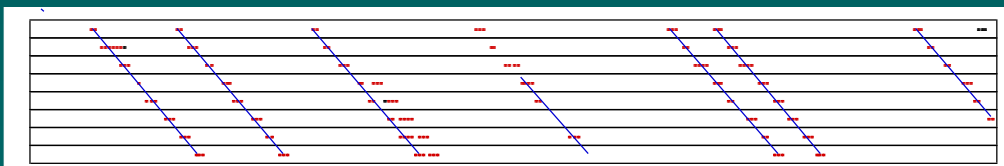
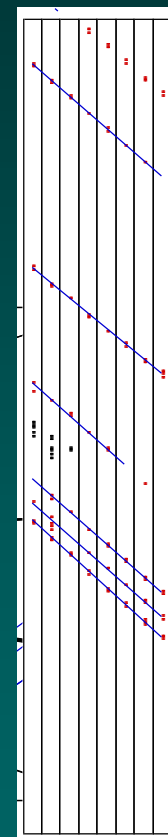
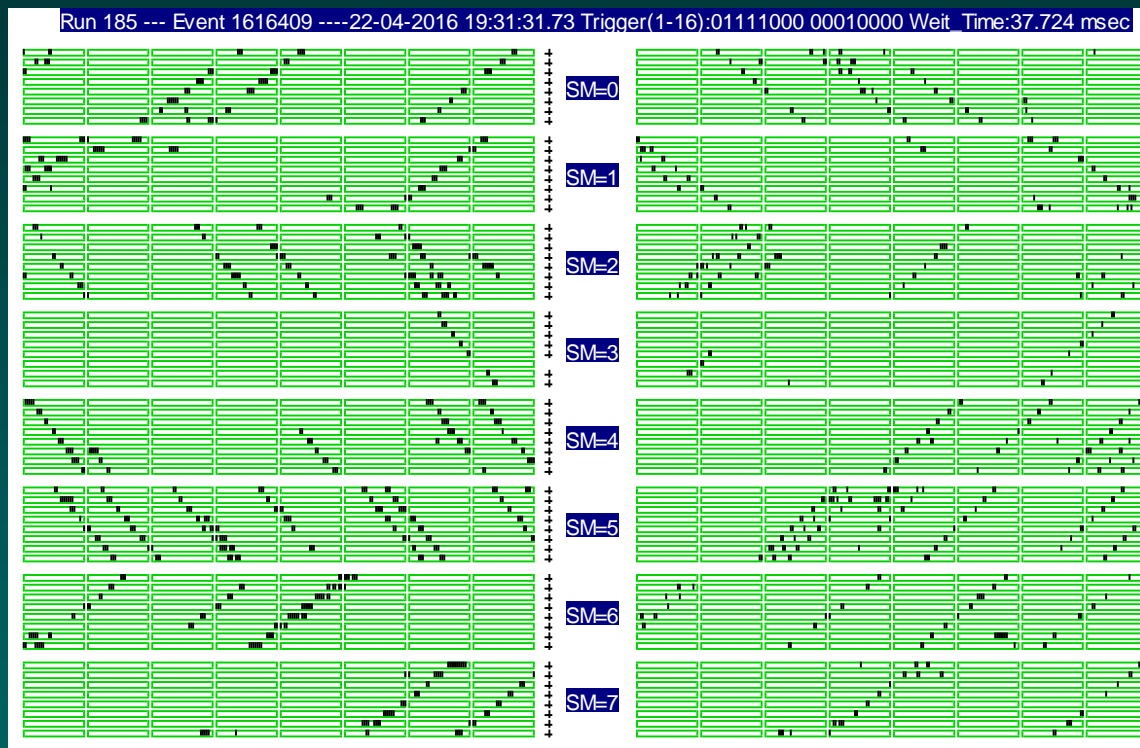
Боковой ДЕКОР:

Восемь вертикально  
подвешенных супермодулей  
площадью 8.4 кв. м каждый,  
состоят из 8 плоскостей  
стримерных трубок с двух-  
координатным считыванием.

# Супермодули (СМ) ДЕКОР в галереях здания вокруг водного бассейна НЕВОД

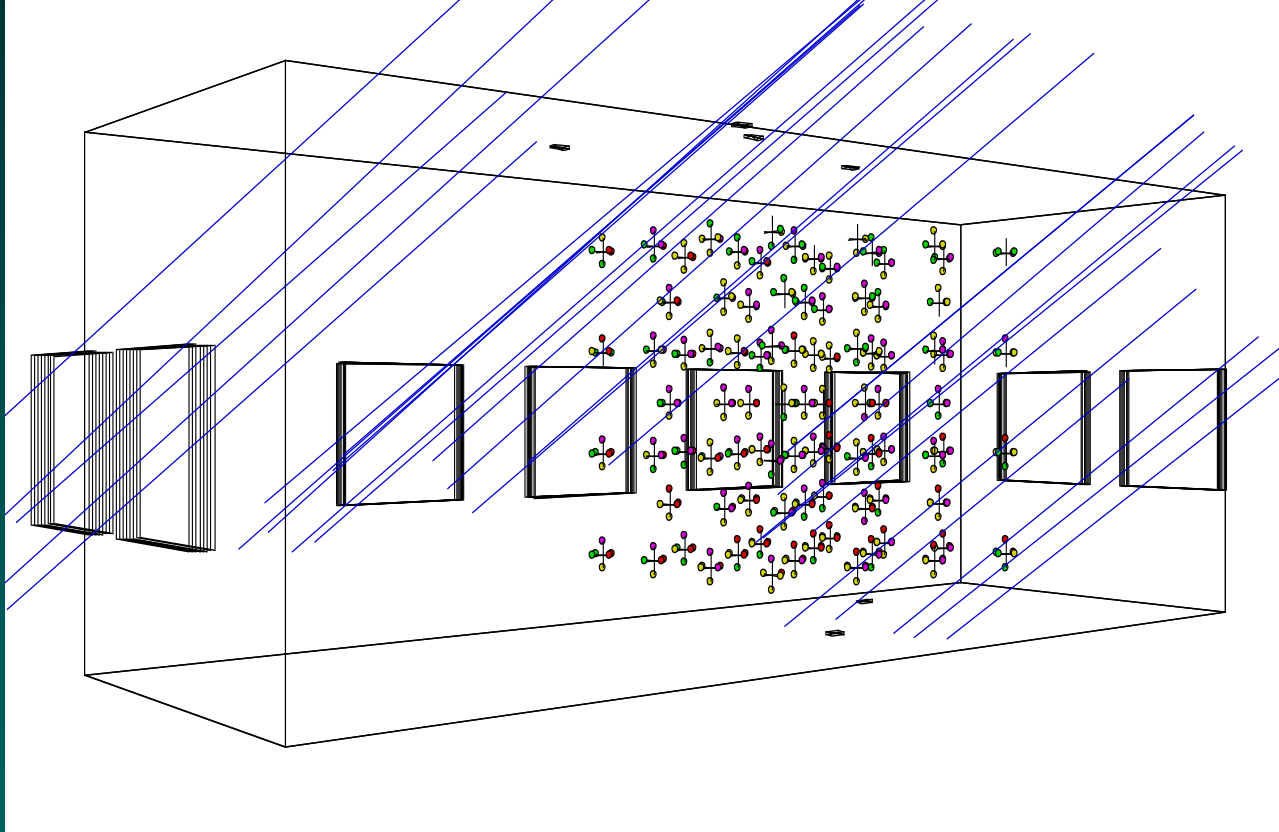


# Отклик координатно-трекового детектора ДЕКОР для события с группой мюонов



SM5: X-view, Y-view

# Геометрическая реконструкция и отклик ЧВД для события с группой мюонов



Lines – muon tracks reconstructed from DECOR data;  
Circles – hit phototubes in CWD (colors reflect signal amplitudes);  
Small rectangles – hit counters of the calibration telescope system.

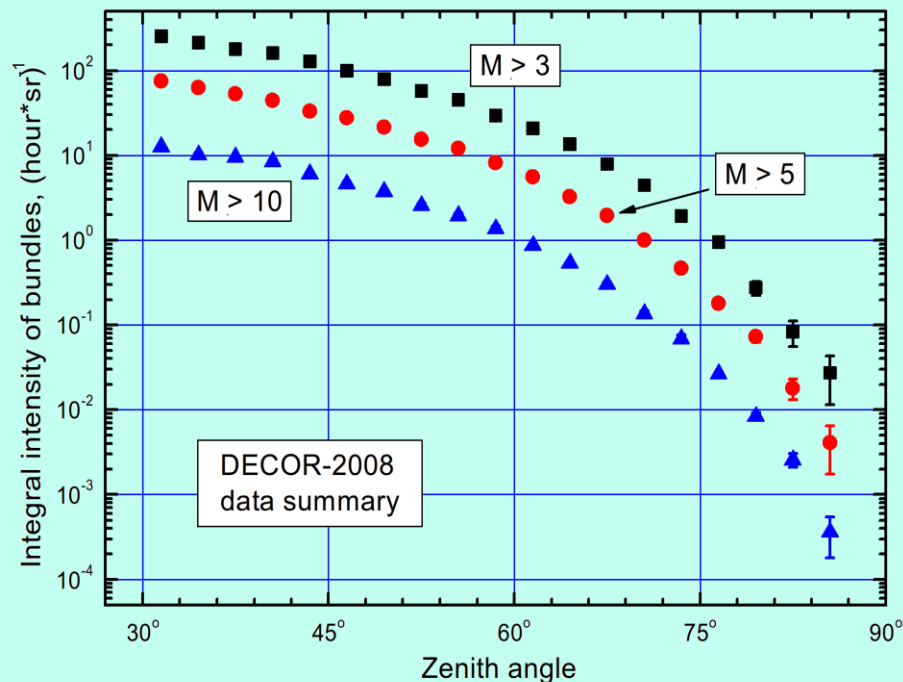
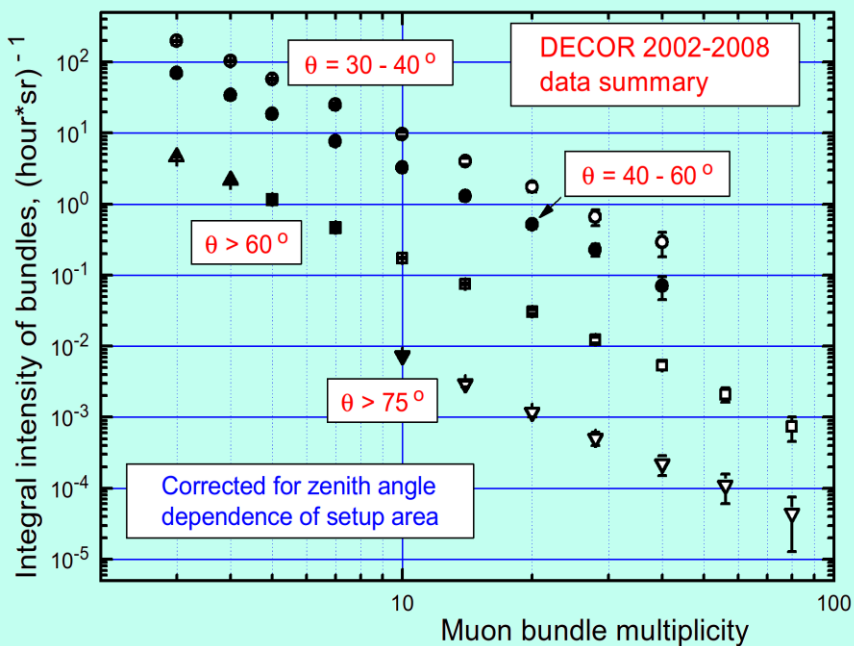






# Распределения мюонных групп по множественности и зенитному углу

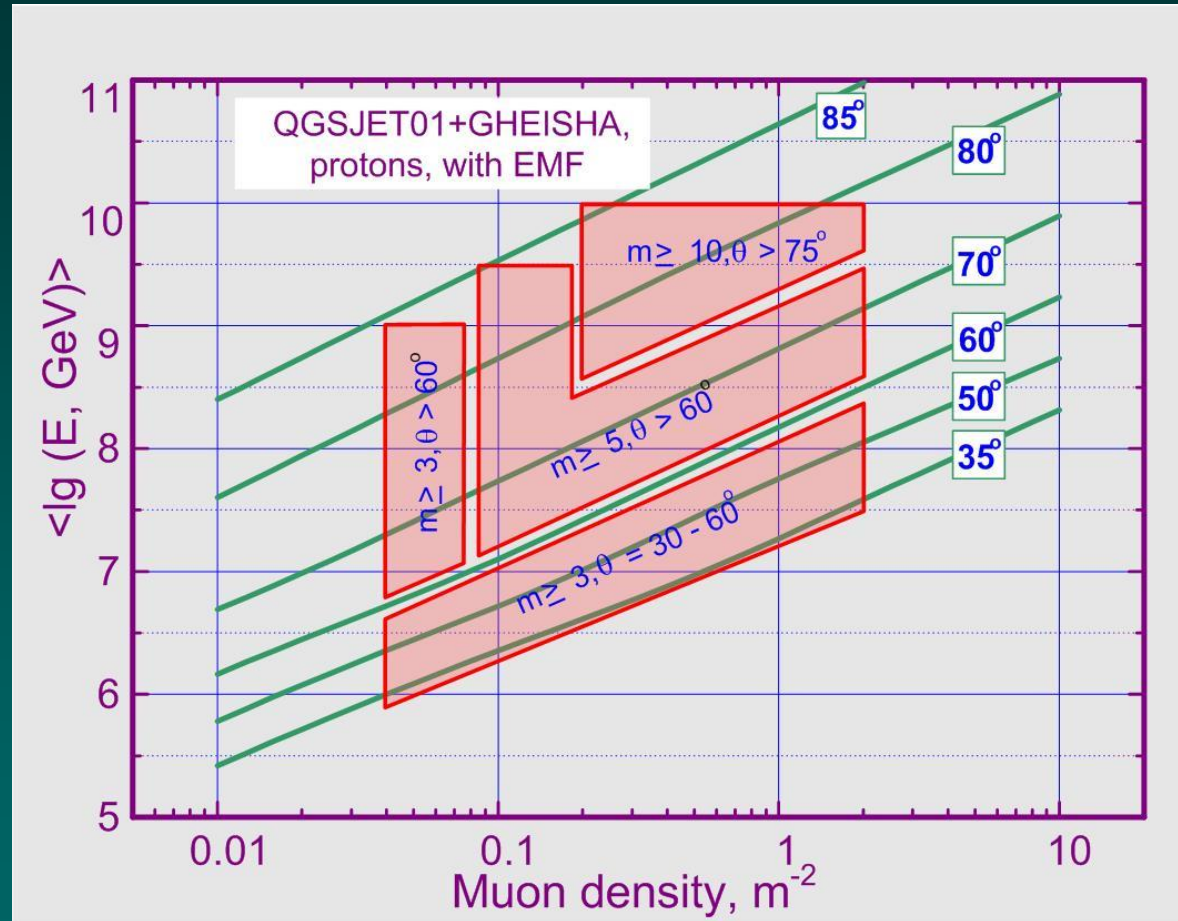
Около 40 тысяч мюонных групп с различными зенитными углами и множественностью было отобрано из экспериментальных данных 2002-2007 гг.



**NB!!! 6 – 7 порядков по интенсивности событий !!!**



# Среднелогарифмические энергии первичных частиц для событий с разной множественностью, регистрируемых под разными зенитными углами

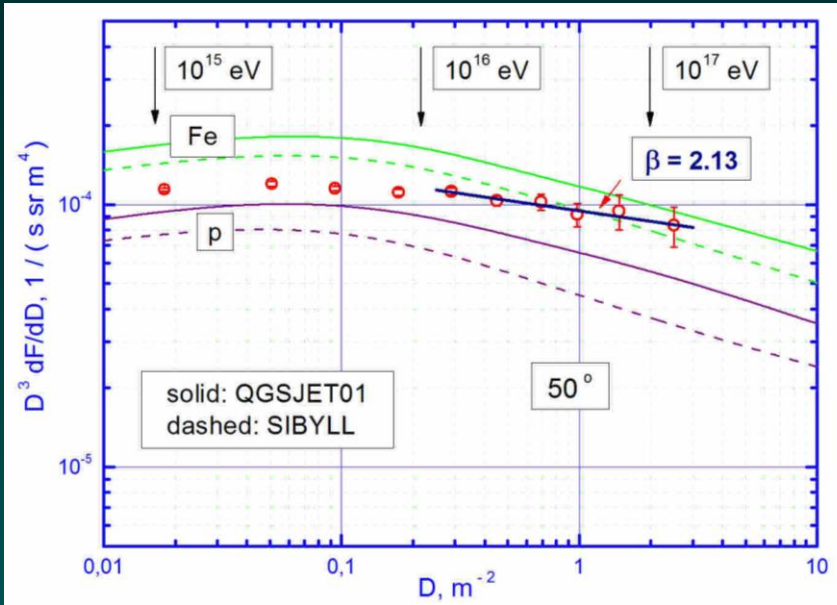
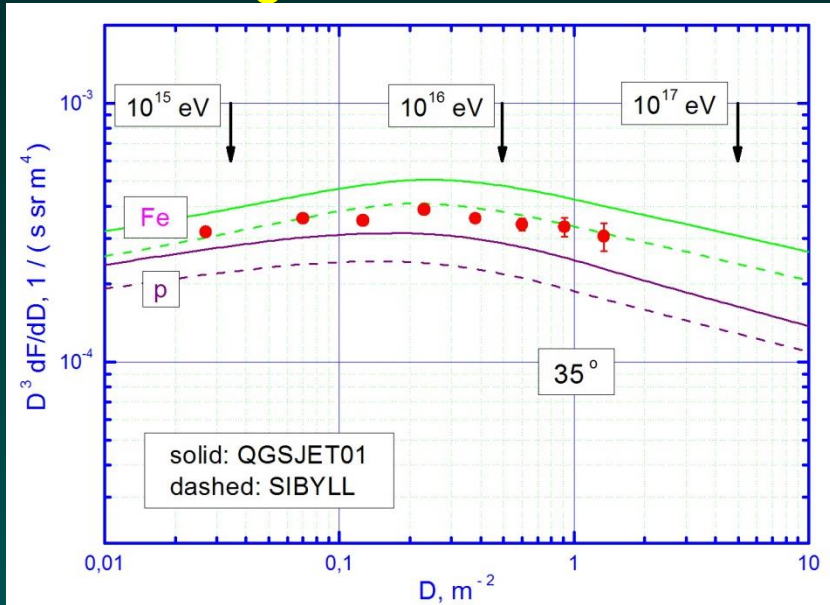


Нижний предел  $\sim 10^{15}$  эВ (ограничен площадью ДЕКОР).  
Верхний предел  $\sim 10^{19}$  эВ (ограничение по статистике).

# Экспериментальные спектры плотности мюонов (2002-2007)

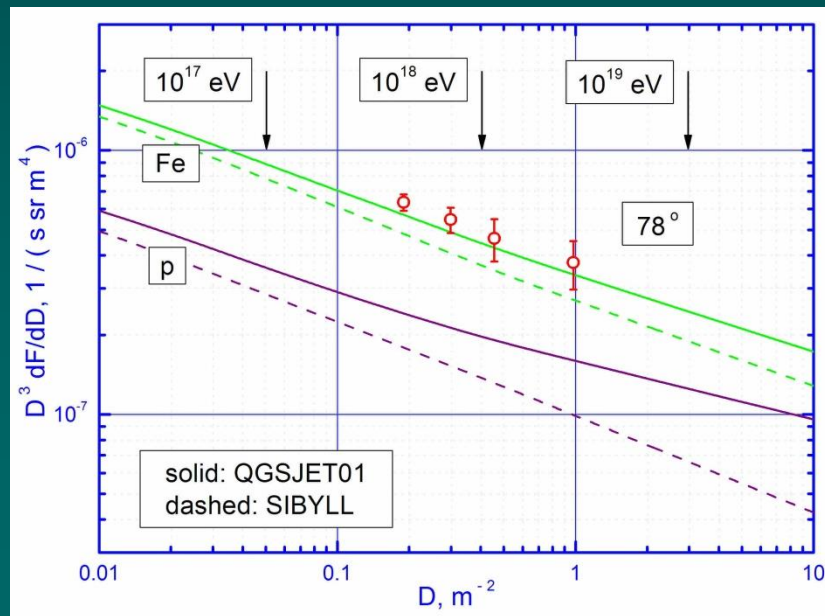
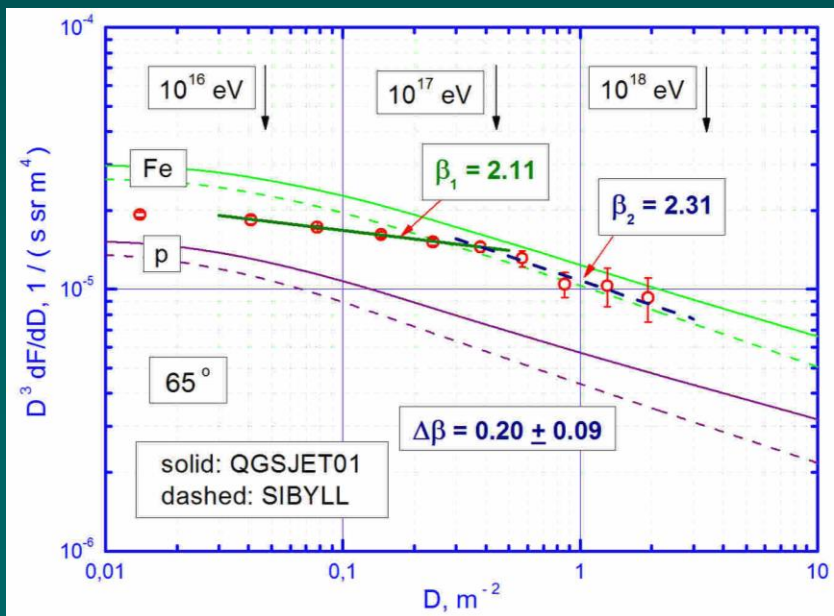
## Low angles: around the “knee”

## $\theta = 50^\circ : 10^{15} - 10^{17} \text{ eV}$

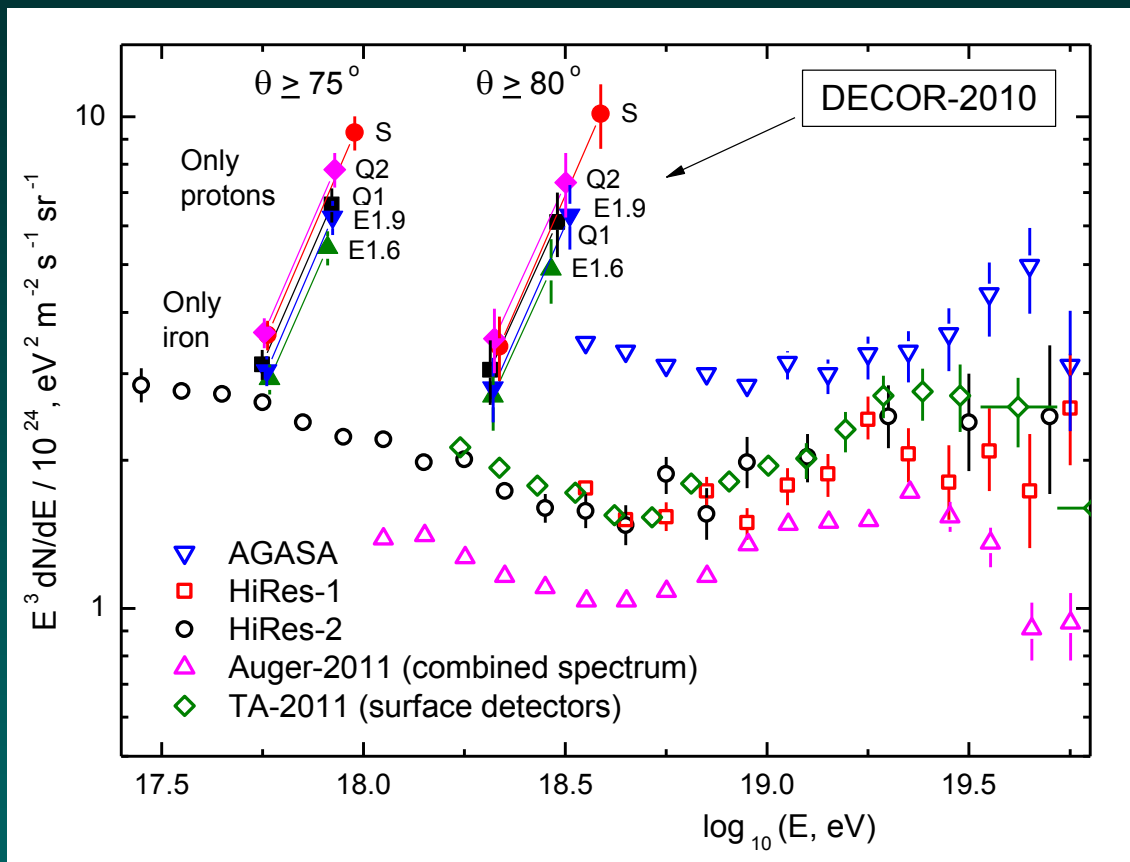


## $\theta = 65^\circ : 10^{16} - 10^{18} \text{ eV}$

## Large angles: around $10^{18} \text{ eV}$



# Сравнение спектра КЛ сверхвысоких энергий, оцененного по группам мюонов, с другими данными

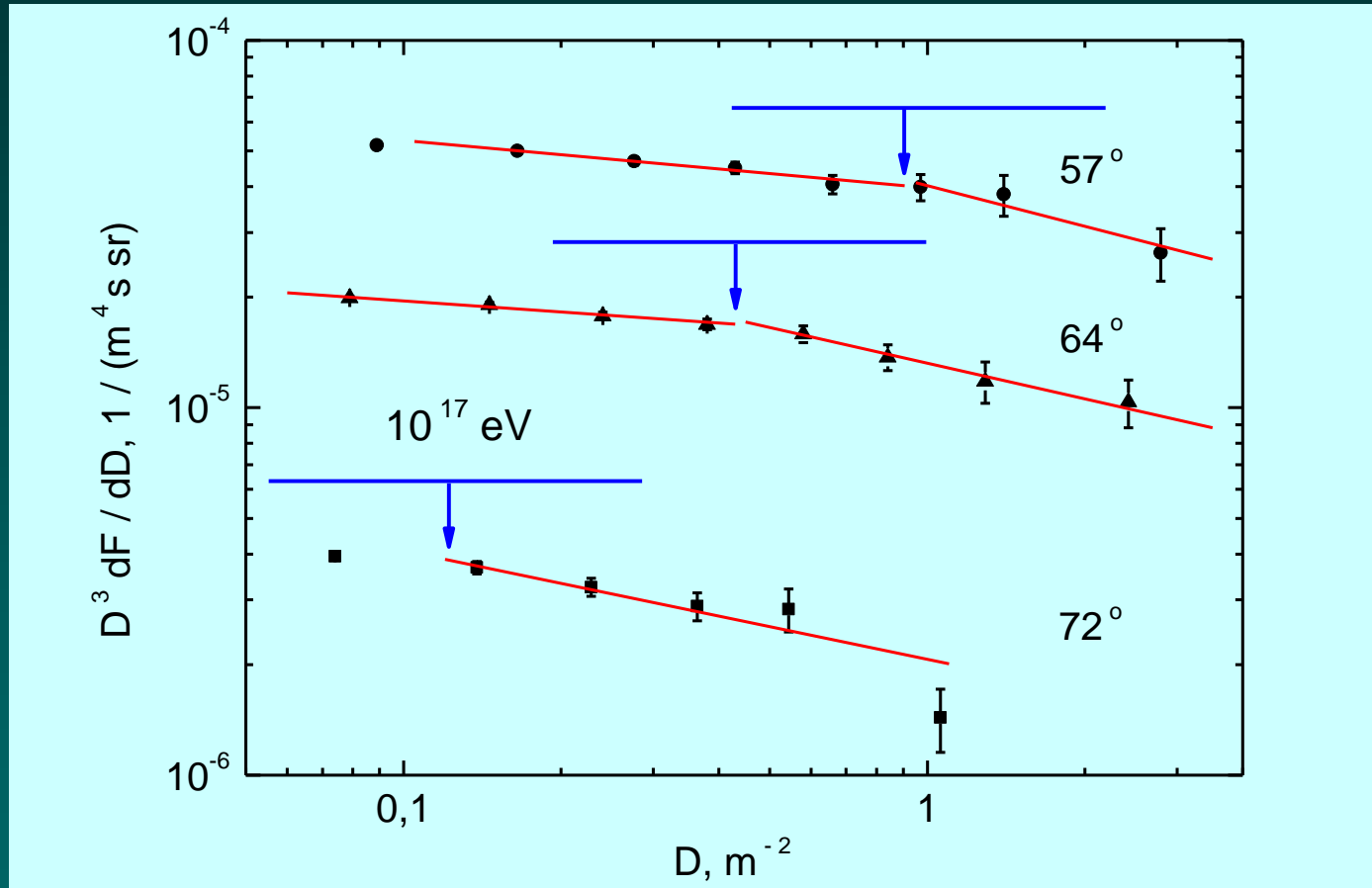


R. Kokoulin et al. ,  
ISVHECRI 2008.  
Nucl.Phys. B (Proc.  
Suppl.). 196 (2009)106

При больших углах и больших множественностях интенсивность мюонных групп несовместима с результатами флуоресцентных измерений для любой из рассмотренных моделей, даже в предположении тяжелого (железо) первичного состава.

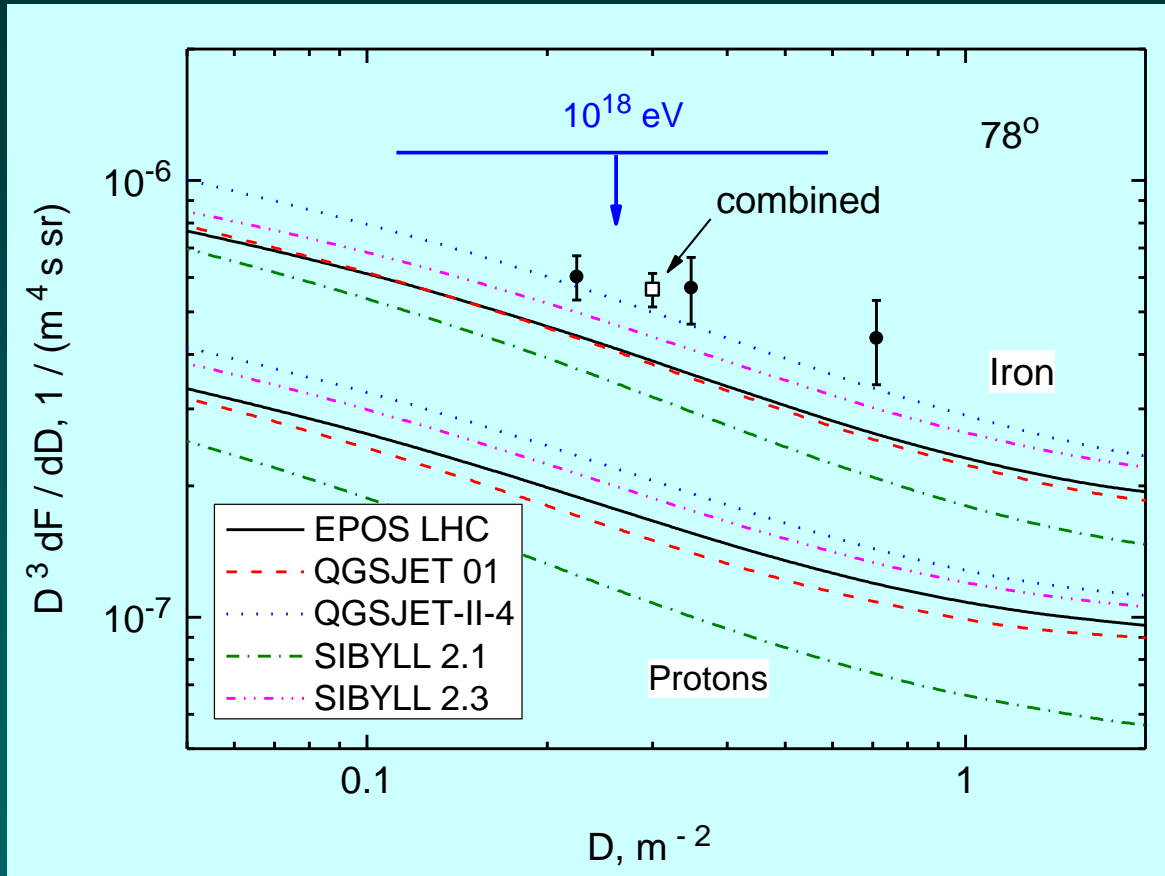
# 2-й излом в спектрах локальной плотности мюонов (объединенная статистика 2002-2007 и 2012-2016)

Astropart. Phys. 98 (2018) 13–20 <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2018.01.003>



$$\Delta\beta = 0.202 \pm 0.054 (\sim 3.7 \sigma)$$

# Сравнение интенсивности групп с ожиданием для различных моделей взаимодействия вблизи $10^{18}$ эВ (для первичных протонов и ядер железа)



Данные совместимы только с расчетом в предположении тяжелого состава (железо) для моделей взаимодействия, настроенных по данным LHC (SIBYLL 2.3 и QGSJet II-4). NB!!! Железо противоречит  $X_{max-}$ !

# Объединение мюонных измерений

Working group on Hadronic Interactions and Shower Properties (WHISP, Hans Dembinski et al.). Анализ проведен с участием представителей 8 экспериментальных групп, исследующих мюонную компоненту ШАЛ.

Используется *Z-scale*:

$$z = \frac{\ln N_{\mu}^{\text{obs}} - \ln N_{\mu p}^{\text{sim}}}{\ln N_{\mu \text{Fe}}^{\text{sim}} - \ln N_{\mu p}^{\text{sim}}}$$

Здесь  $N^{\text{obs}}$  – результат измерений, индексы sim соответствуют моделированию ожидаемых значений. По определению,  $z = 0$  соответствует первичным протонам,  $z = 1$  ядрам железа.

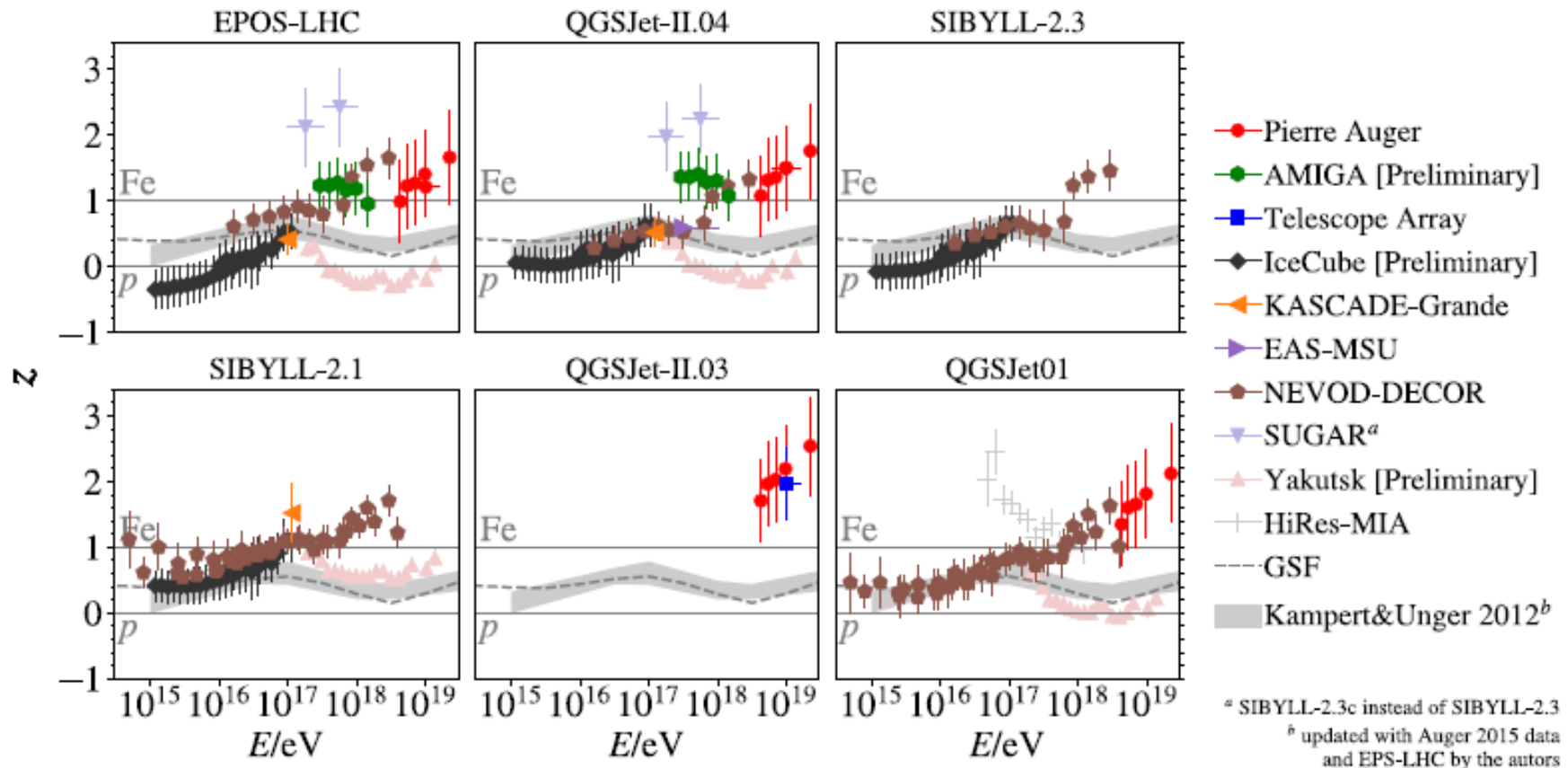
Позволяет сопоставить различные характеристики: полное число мюонов, плотность на фиксированных расстояниях от оси ливня, спектры локальной плотности мюонов, etc.



# Combining muon measurements

## Step 2: Apply energy scale corrections (before)

Still present: possible dependence on energy scale, shower age, lateral distance, energy threshold



# Новые данные по группам мюонов (май 2012 - май 2020)

«Живое» время наблюдений: ~ 52.5 тыс. часов

Группы  $\theta \geq 55^\circ$ ,  $m \geq 5$ : ~ 90.0 тыс. событий

Два сектора по азимуту шириной по  $60^\circ$

Пороговая энергия мюонов ~ 2 ГэВ

Дополнительно:

«Живое» время наблюдений: ~ 6.3 тыс. часов

Группы  $40^\circ \leq \theta < 55^\circ$ ,  $m \geq 5$ : ~ 30.4 тыс. событий

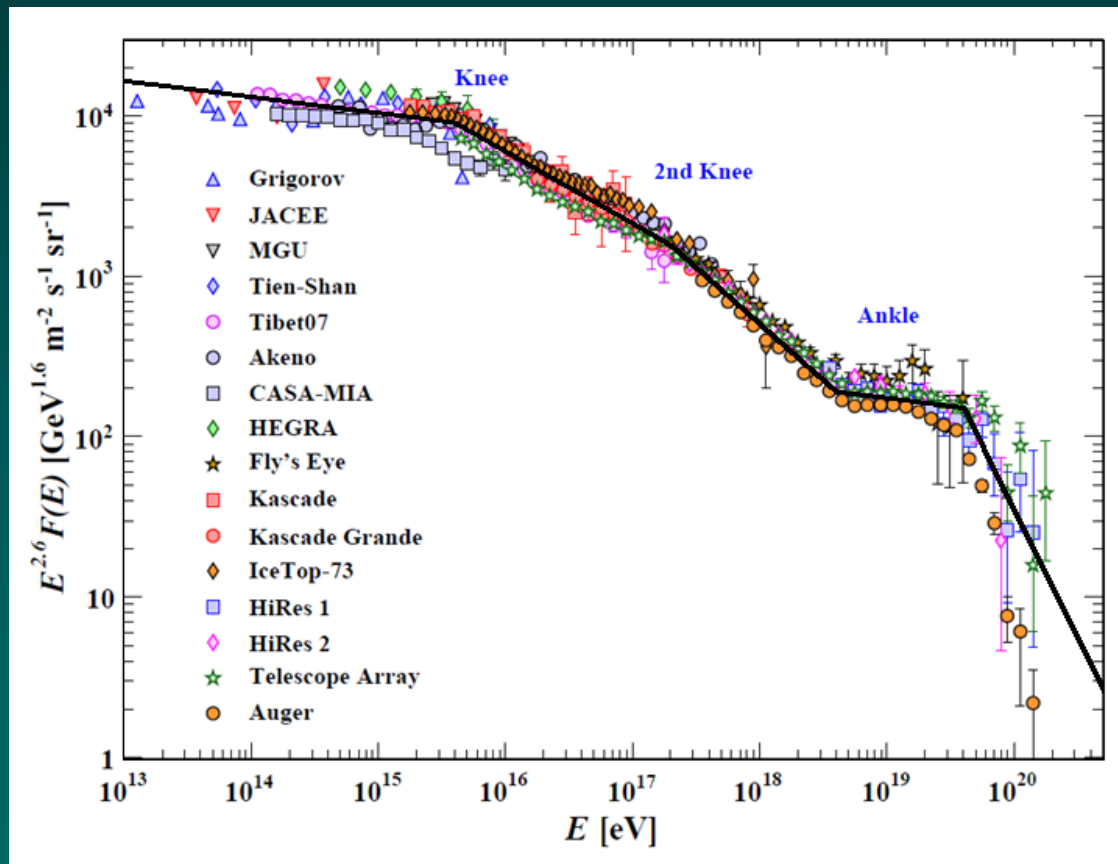
Восстановлены спектры локальной плотности мюонов для 9 интервалов зенитного угла от  $40^\circ$  до  $85^\circ$  (с шагом  $5^\circ$ ).



# Расчет ожидаемых СЛПМ

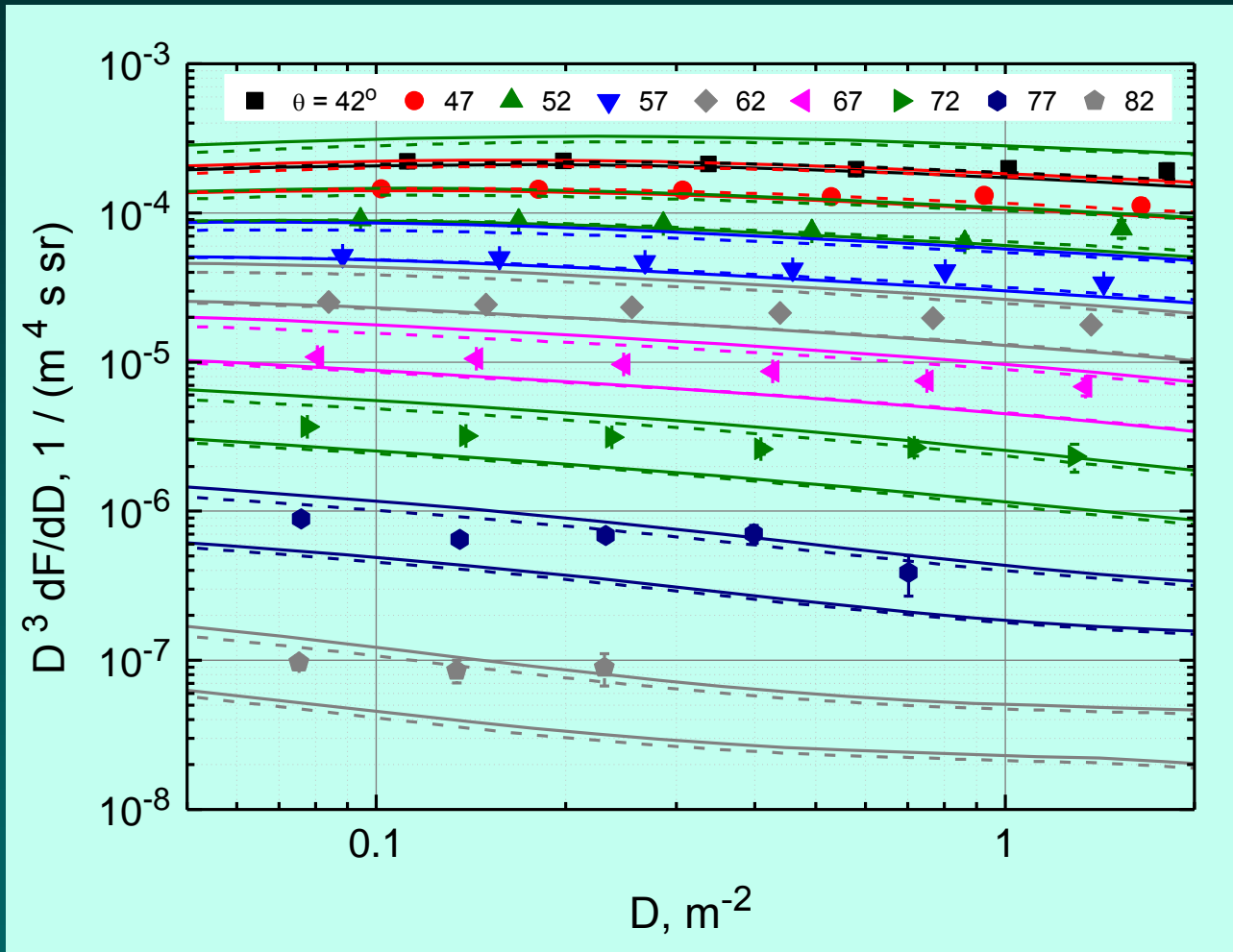
CORSIKA, с учетом МПЗ, модели SIBYLL 2.3c, QGSJet II-4  
первичные протоны и ядра железа.

Аппроксимация первичного спектра «всех частиц»:



По данным из обзора: С. Patrignani et al. PDG, 2016

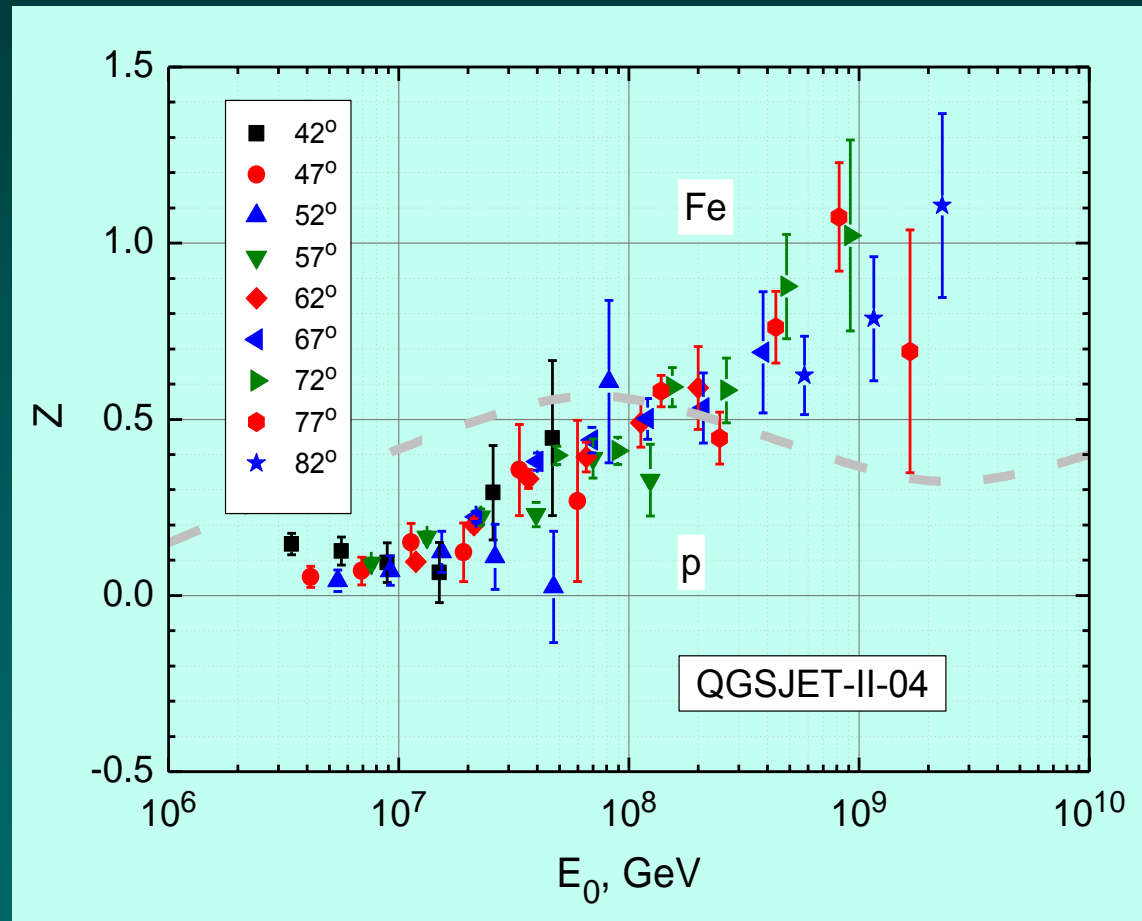
# Спектры локальной плотности мюонов (НЕВОД-ДЕКОР 2020)



Сплошные кривые QGSJet II-4, штриховые SIBYLL 2.3c

# Объединение данных ДЕКОР для разных углов, z-scale:

$$z = \frac{\ln N_{\mu}^{\text{obs}} - \ln N_{\mu p}^{\text{sim}}}{\ln N_{\mu\text{Fe}}^{\text{sim}} - \ln N_{\mu p}^{\text{sim}}}$$



# Заключение

Измерения спектров плотности мюонов при разных зенитных углах позволили провести исследования в широком диапазоне первичных энергий от  $10^{15}$  до  $10^{18}$  эВ и выше. Выявлены следующие особенности:

- Увеличение наклона спектра вблизи нескольких ПэВ («колено»);
- Относительное возрастание интенсивности групп по сравнению с расчетом при энергиях от 10 до 100 ПэВ (утяжеление состава?);
- Увеличение наклона спектра вблизи 100 ПэВ (первое наблюдение «второго излома» в мюонной компоненте);
- Избыток групп мюонов по сравнению с ожидаемым для современных моделей взаимодействия адронов при энергиях выше 100 ПэВ («мюонная загадка»).

## Ближайшие перспективы:

- Дальнейшее увеличение статистики мюонных групп;
- Исследования энергетических характеристик мюонов в группах;
- Создание нового детектора ТРЕК (расширение диапазона).

Спасибо за внимание!