

Мюонная загадка в космических лучах и возможности ее решения

А.А. Петрухин

Национальный исследовательский
ядерный университет МИФИ

10 Марта 2020

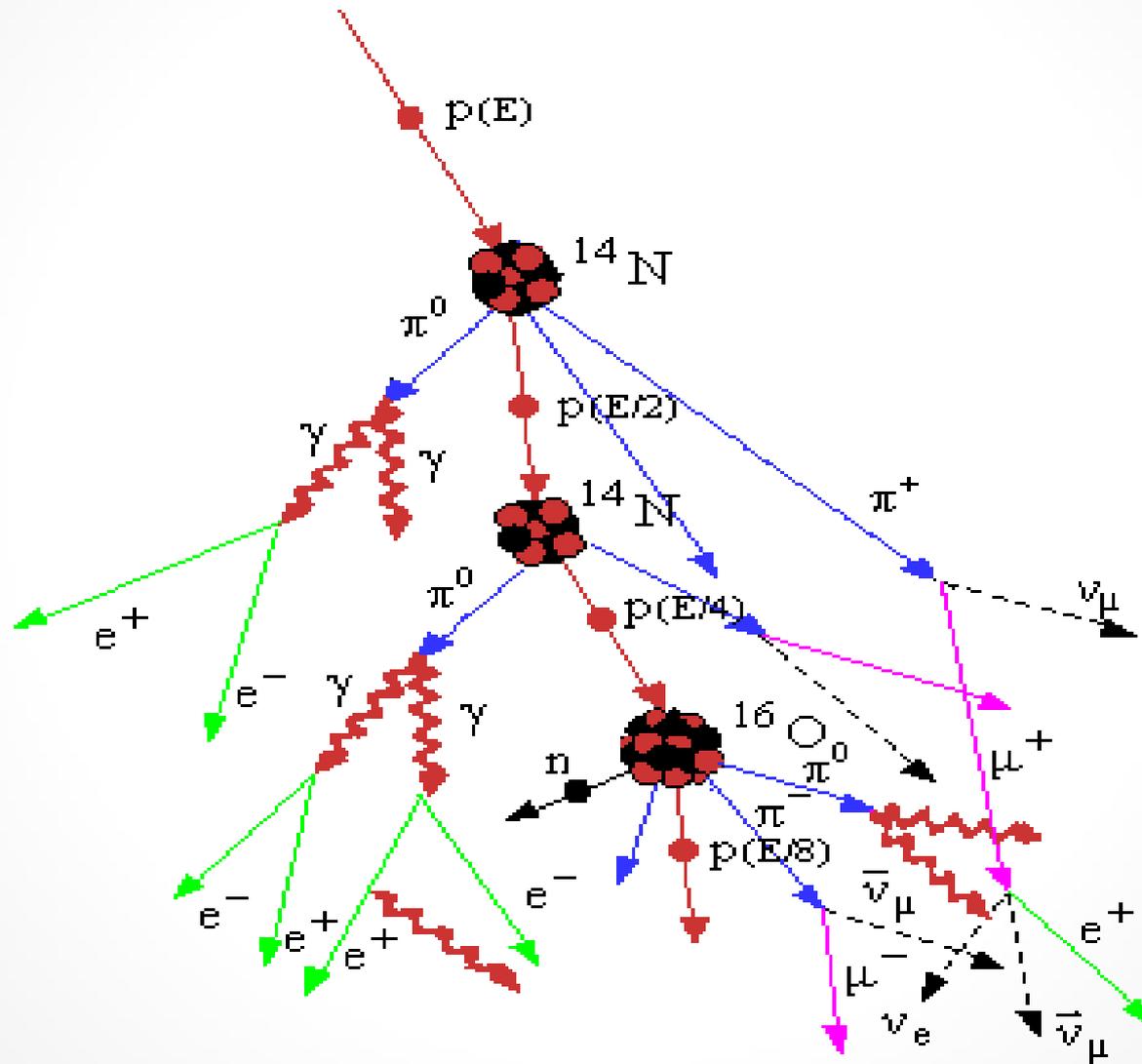
Введение

Исторически, слова «мюон» и «загадка» были синонимами, начиная с открытия мюона.

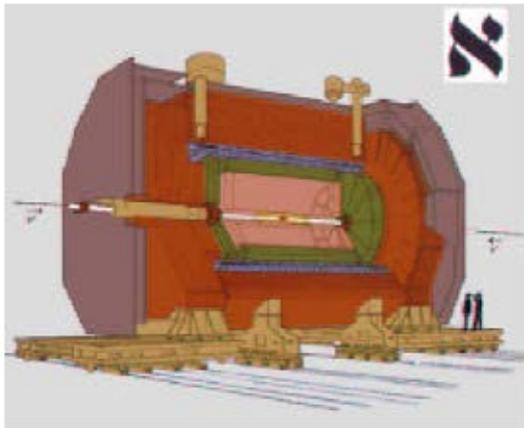
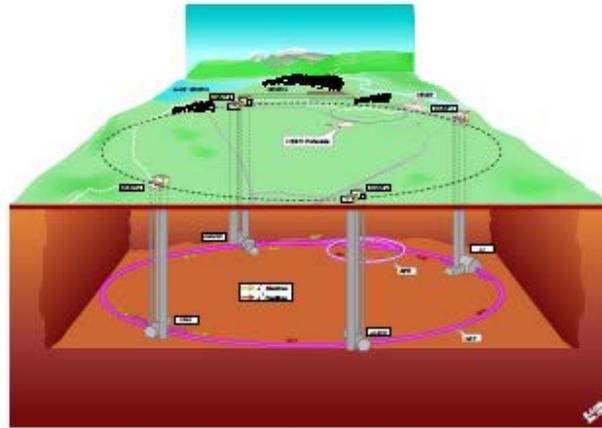
Загадки:

1. Что такое мюон, если это не квант сильного взаимодействия?
2. В чем разница между мюоном и электроном, кроме массы?
3. Существует ли аномальное взаимодействие мюона по сравнению с электроном?
4. Существуют ли так называемые «прямые мюоны», которые изменяют энергетический спектр мюонов в атмосфере при высоких энергиях?
5. Сегодня мюонная загадка – это растущий с энергией избыток групп мюонов в широких атмосферных ливнях (ШАЛ), генерируемых космическими лучами сверхвысоких энергий ($> 10^{15}$ эВ).

Развитие ШАЛ

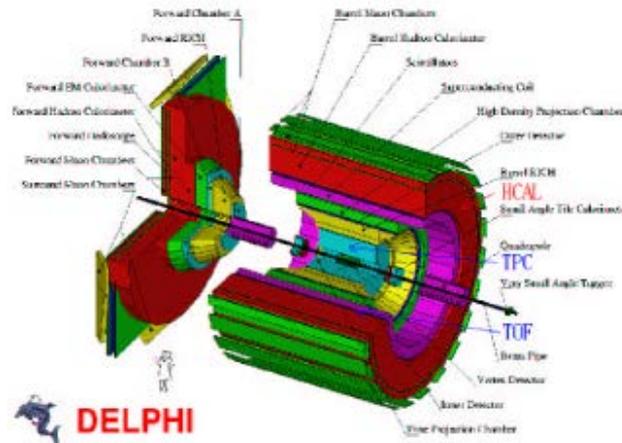


Детекторы LEP (ЦЕРН)



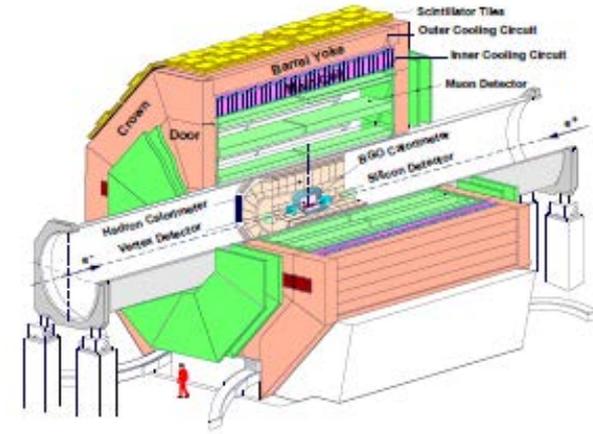
ALEPH

130 m depth ($E_{\mu} > 70$ GeV)
Hadron calorimeter, TPC
5 scintillator stations



DELPHI

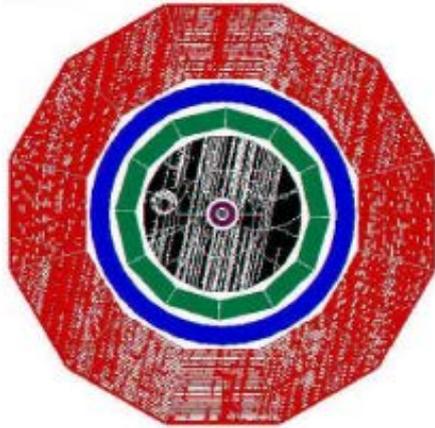
Hadron calorimeter, TPC



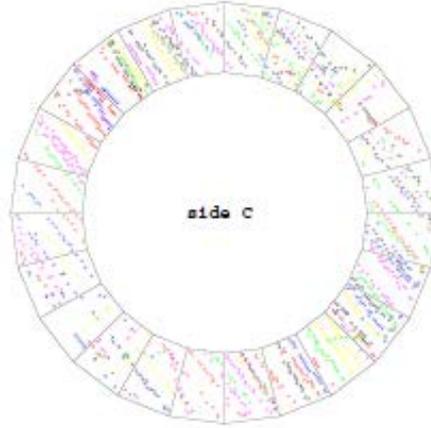
L3

40 m depth ($E_{\mu} > 15$ GeV)
Drift chambers, Timing scintillator
EAS surface array

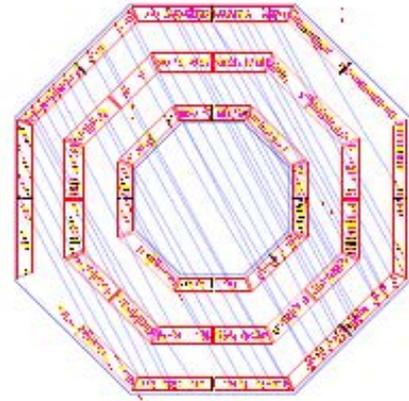
Мультимюонные события (группы мюонов)



ALEPH



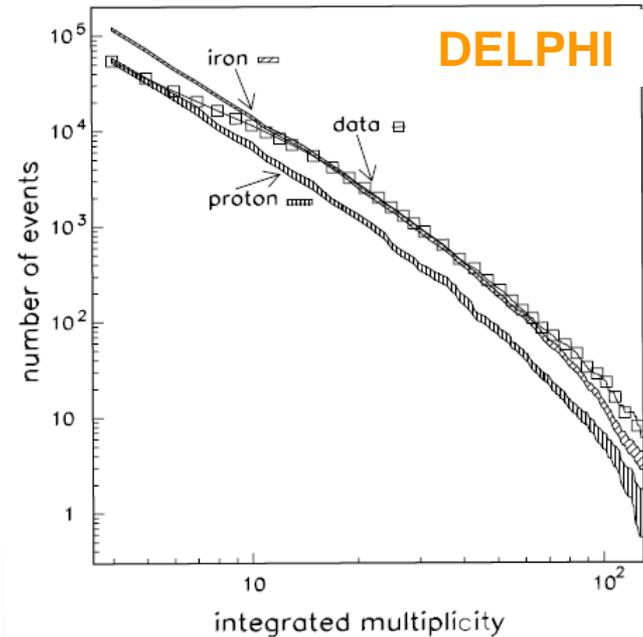
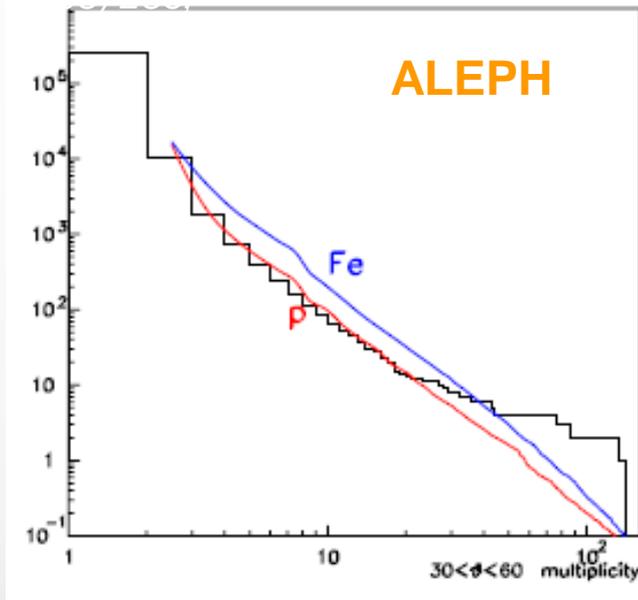
DELPHI



L3+C

C. Grupen et al.
175-176

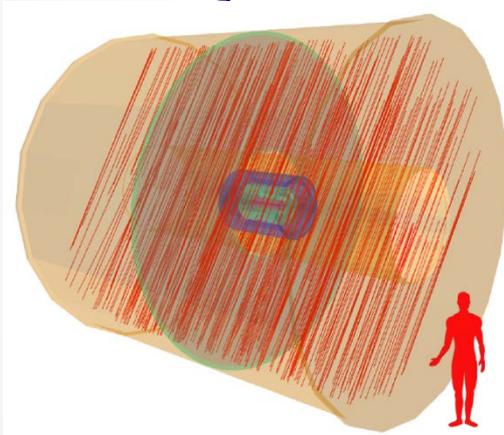
28 (2007) 273.



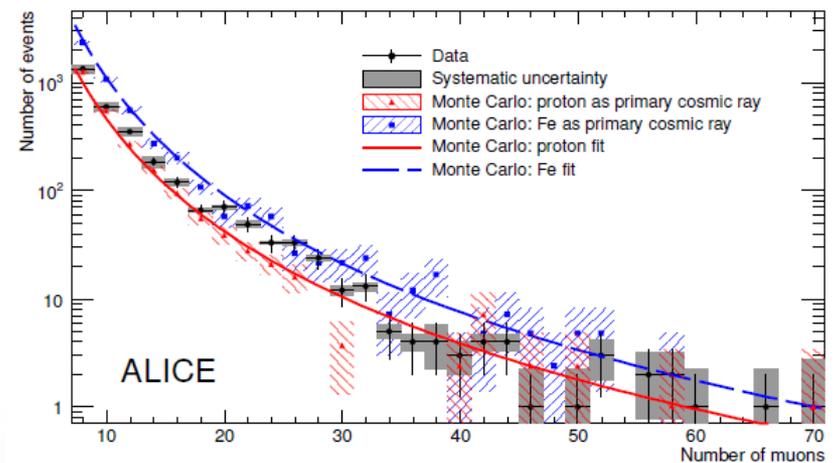
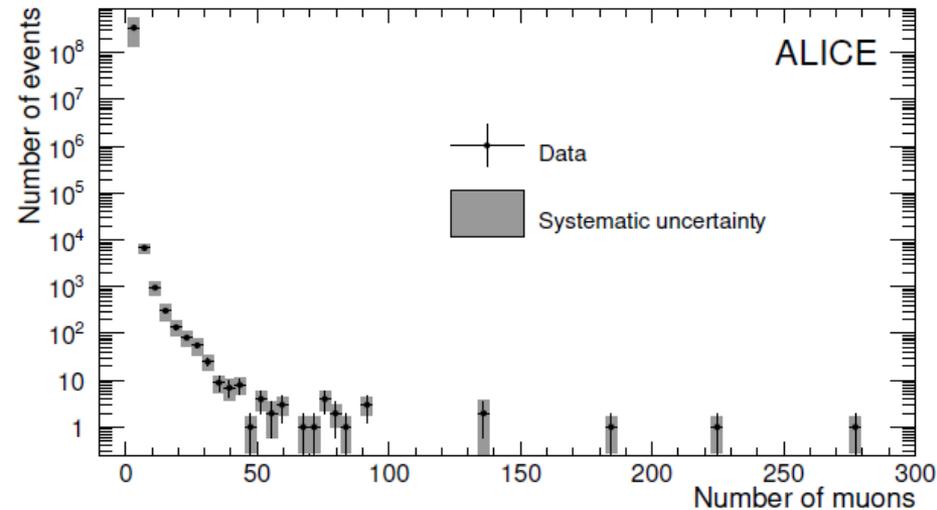
Группы мюонов в ALICE

Исследование событий космических лучей с большой множественностью мюонов с использованием детектора ALICE на Большом адронном коллайдере CERN, коллаборация ALICE, JCAP01 (2016) 032

Распределение мюонной множественности всей выборки данных (2010-2013 гг.), соответствующее 30,8 дням



Измеренное распределение множественности мюонов по сравнению со значениями и подгонками, полученными в результате моделирования CORSIKA с первичными космическими лучами протона и железа в течение 30,8 дней сбора данных.



Группы мюонов в экспериментах на ускорителях и космических лучах

В ускорительных детекторах энергия первичных частиц космических лучей, которые генерируют мюонные пучки, **не измеряется** и даже **не оценивается**.

В экспериментах с космическими лучами энергия первичных частиц **измеряется или оценивается**.

Было проведено свыше 10 таких экспериментов, но их результаты было сложно сравнивать, т.к. использовались различные параметры и различные подходы.

Мюонная загадка в 2018 г.

В августе 2018 года во время конференции TeVPA в Берлине Ханс Дембинский организовал Международную рабочую группу (IWG) и предложил очень простой метод сравнения различных результатов эксперимента..

Он ввел параметр z

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

где N_{μ}^{exp} ; N_{μ}^p и N_{μ}^{Fe} экспериментальные и смоделированные данные для двух предельных случаев состава космических лучей: только протоны и только ядра железа.

Данные могут быть любыми, но одинаковыми как экспериментальные, так и смоделированные.

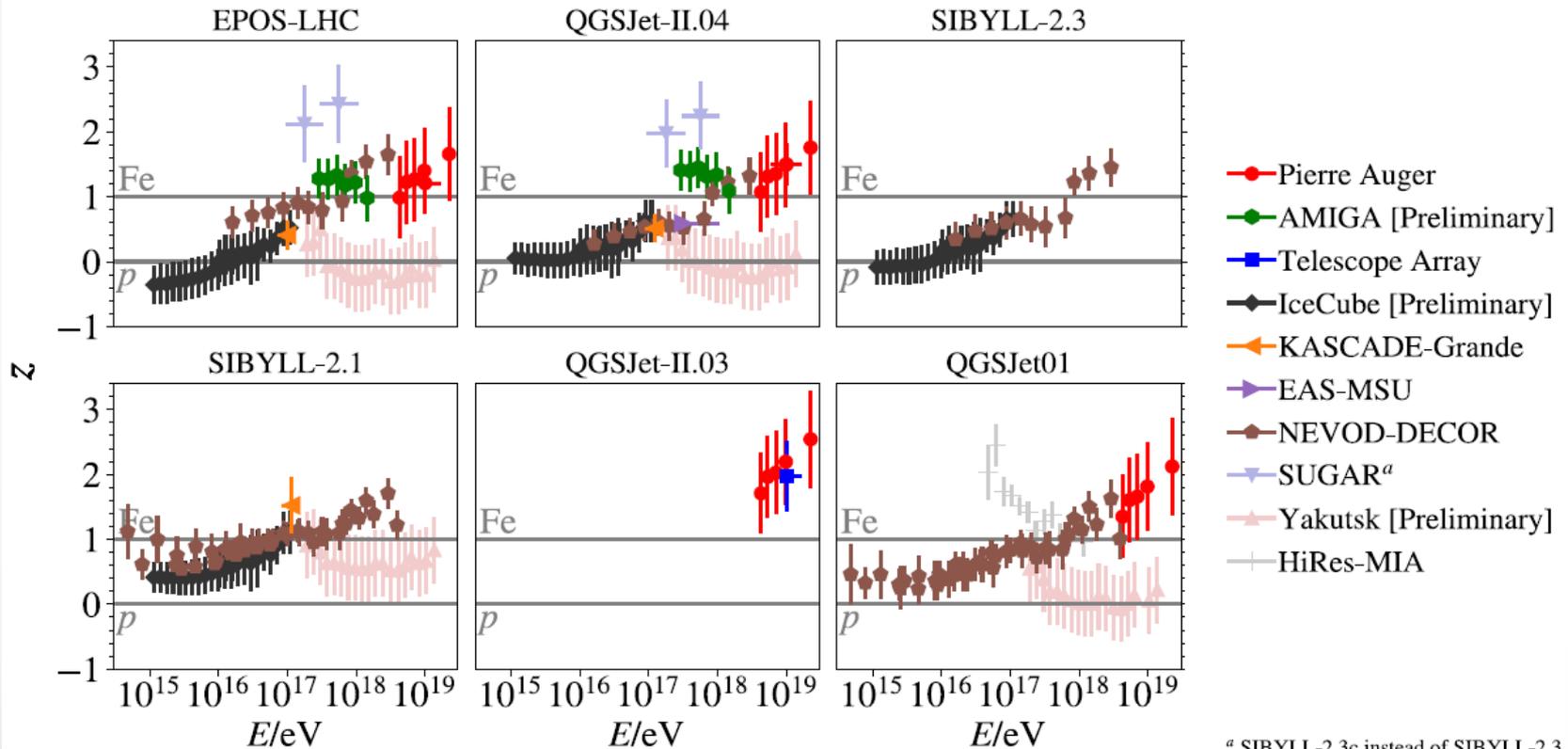
$$0 \leq z \leq 1$$

Мюонная загадка на UHECR-2018

Результаты IWG сравнения различных экспериментальных данных для разных моделей, представленные Хансом Дембинским на UHECR-2018

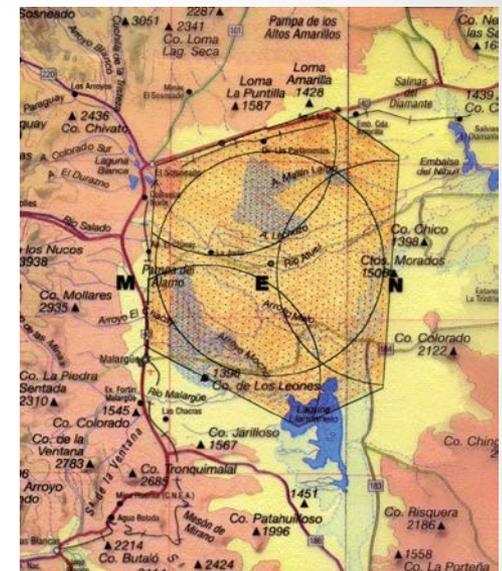
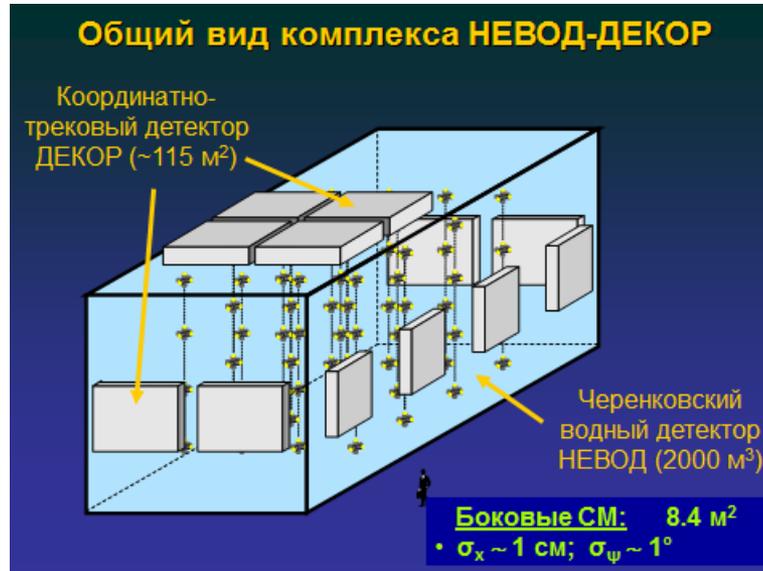
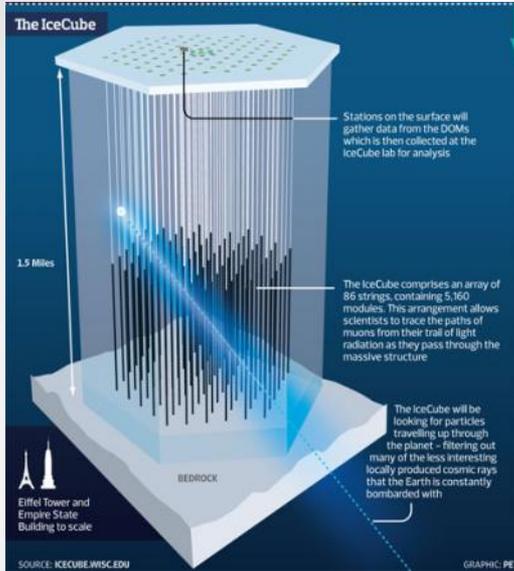
Step 1: Convert all measurements to z-scale $z = \frac{\ln N_{\mu}^{\text{det}} - \ln N_{\mu,p}^{\text{det}}}{\ln N_{\mu,\text{Fe}}^{\text{det}} - \ln N_{\mu,p}^{\text{det}}}$

corrects simple biases;
 $z_p = 0$ and $z_{\text{Fe}} = 1$



^a SIBYLL-2.3c instead of SIBYLL-2.3

Установки IceCube, NEVOD-DECOR, Pierre Auger



IceCube

$S = 1 \text{ кв. км}$
 $10^{15} \div 10^{17} \text{ эВ}$
 2018

NEVOD-DECOR

$S = 100 \text{ кв. м (!!!)}$
 $3 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{18} \text{ эВ}$
 2010

Pierre Auger

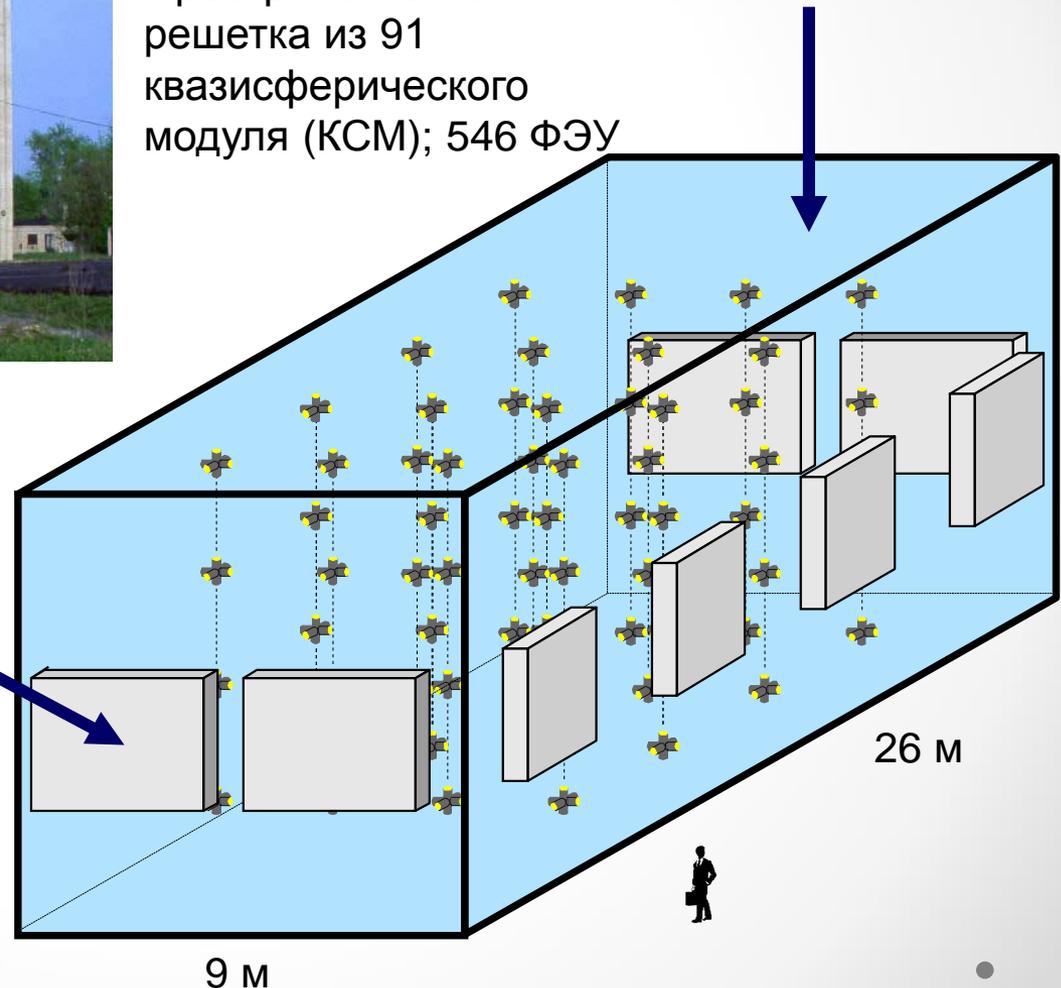
$S = 3 \cdot 10^3 \text{ кв. км}$
 $3 \cdot 10^{18} \div 3 \cdot 10^{19} \text{ эВ}$
 2015

Общий вид установки НЕВОД-ДЕКОР



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

Пространственная
решетка из 91
квазисферического
модуля (КСМ); 546 ФЭУ



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

8 супермодулей (СМ)
из стримерных трубок

Особенности исследований наклонных ШАЛ

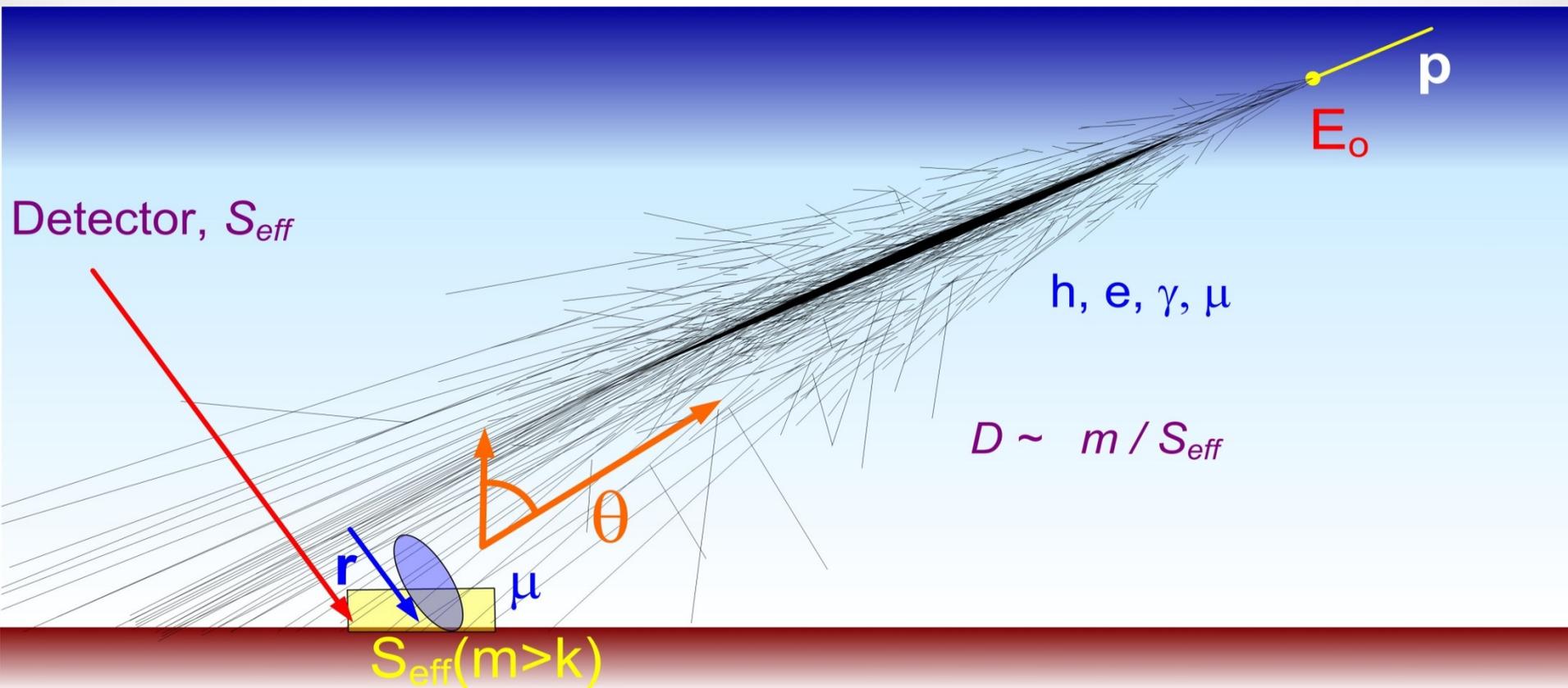
Координатно-трековый детектор **ДЕКОР** имеет **вертикальное расположение** и может измерять наклонные группы мюонов с очень хорошей эффективностью вплоть до горизонта.

При больших зенитных углах ($> 60^\circ$) **только мюоны** могут проникать в атмосферу до поверхности Земли.

Поскольку расстояние между точками генерации мюона и наблюдением увеличивается с увеличением зенитного угла, **размеры ШАЛ** также **увеличиваются**.

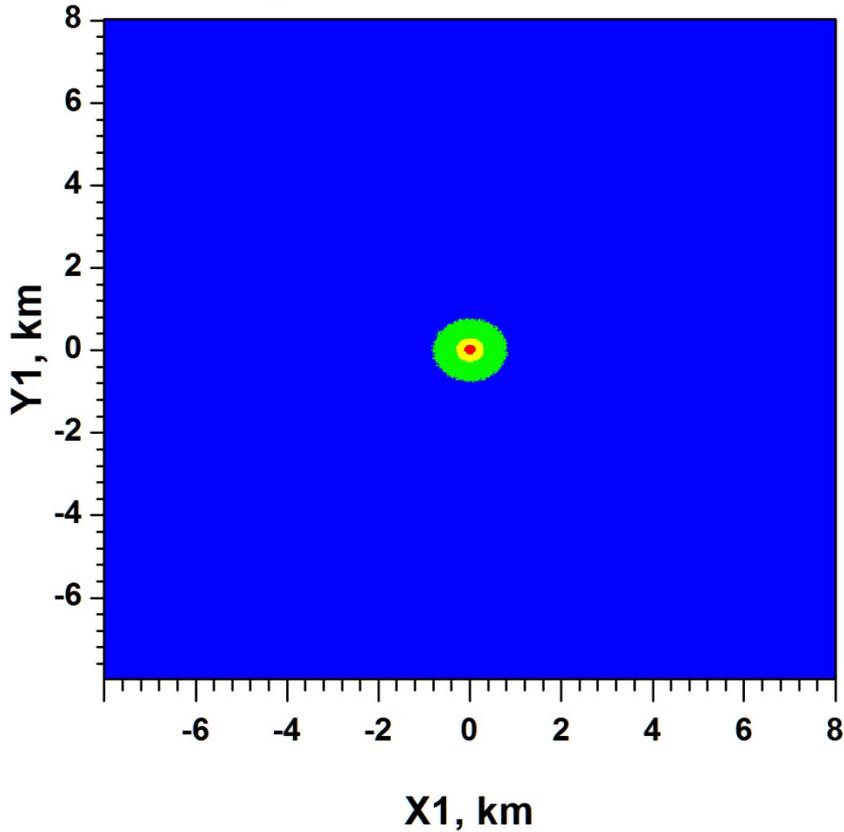
Кроме того, **геомагнитное поле** разделяет положительные и отрицательные мюоны, что также **увеличивает** размер ШАЛ.

Регистрация наклонных ШАЛ (измеряется спектр локальной плотности мюонов)

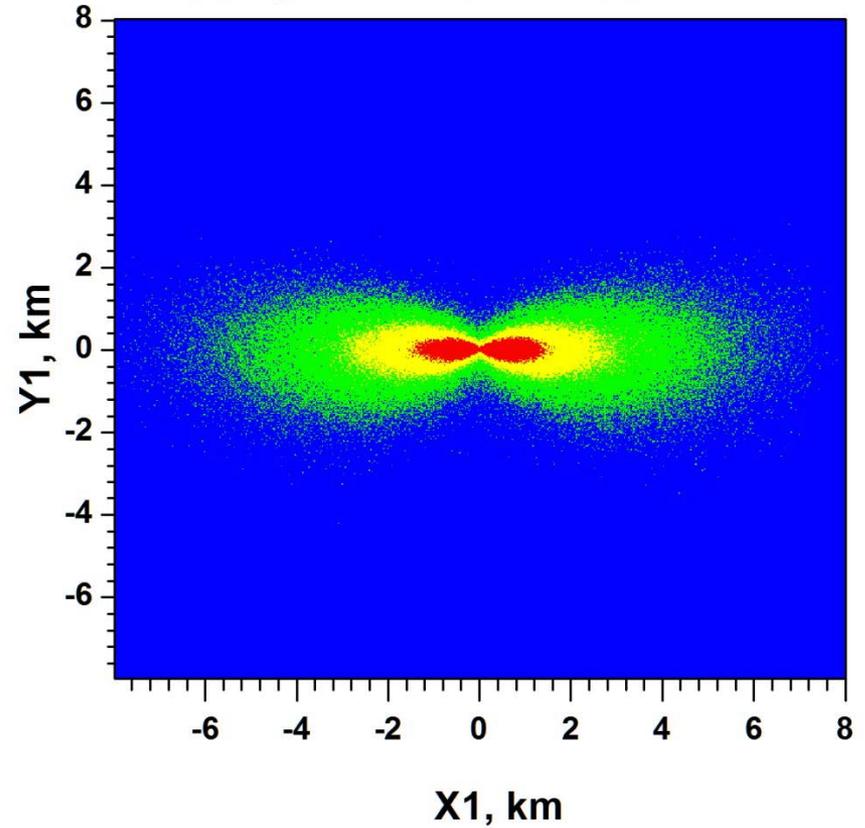


μ -ШАЛ поперечный разрез VS зенитный угол

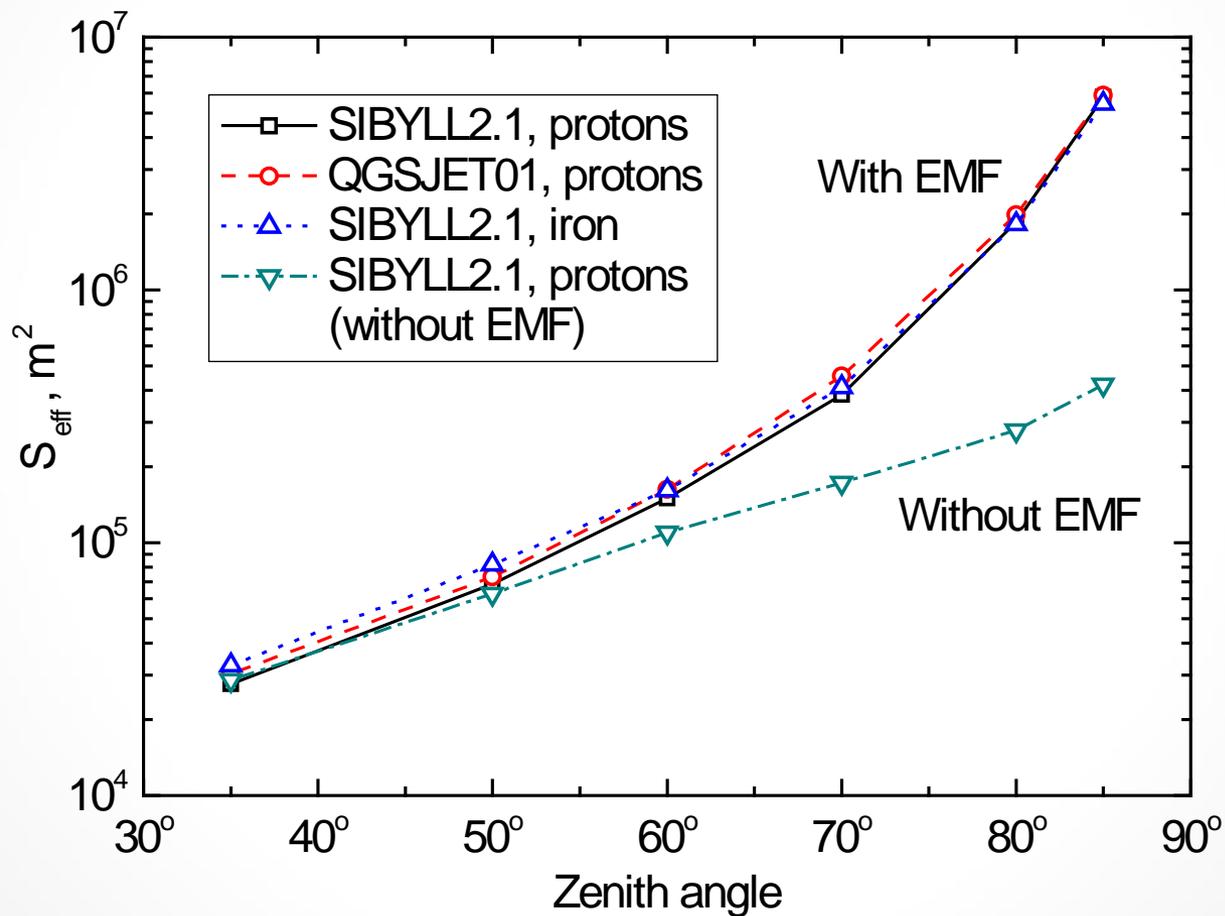
$\rho, E_0=10^{16}$ eV, $\theta=35^\circ$, μ EAS



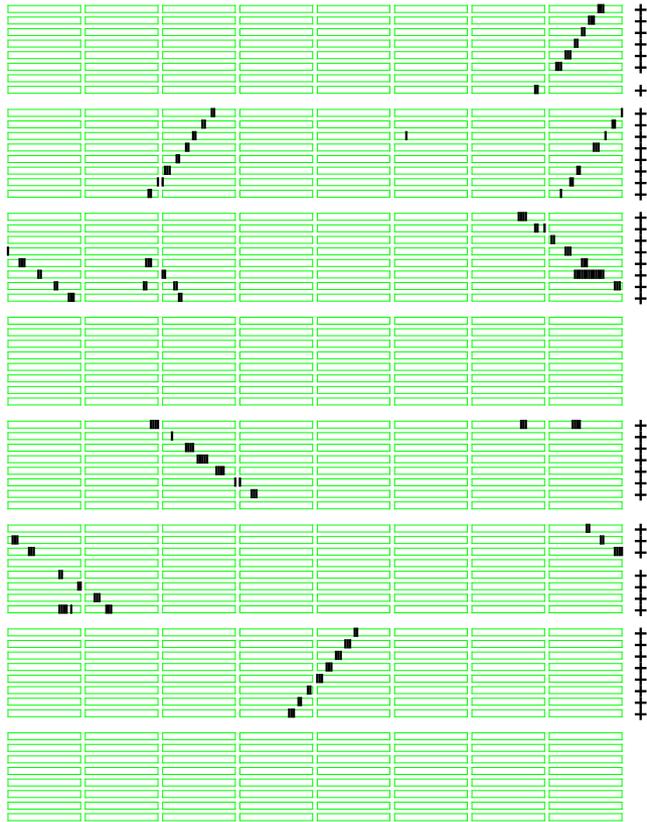
$\rho, E_0=10^{16}$ eV, $\theta=80^\circ$, μ EAS



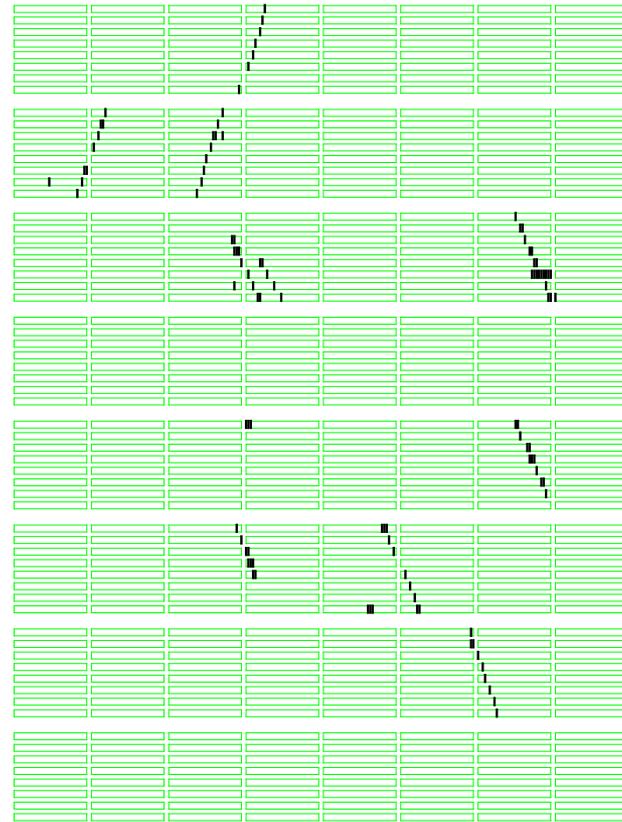
Зависимость эффективной площади сбора ШАЛ в методе СЛПМ от зенитного угла



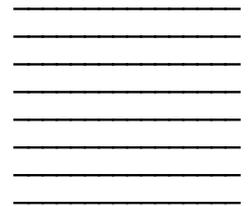
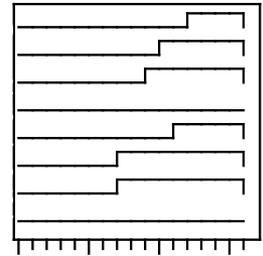
Типичное событие - группа мюонов (9 мюонов, 78 градусов)



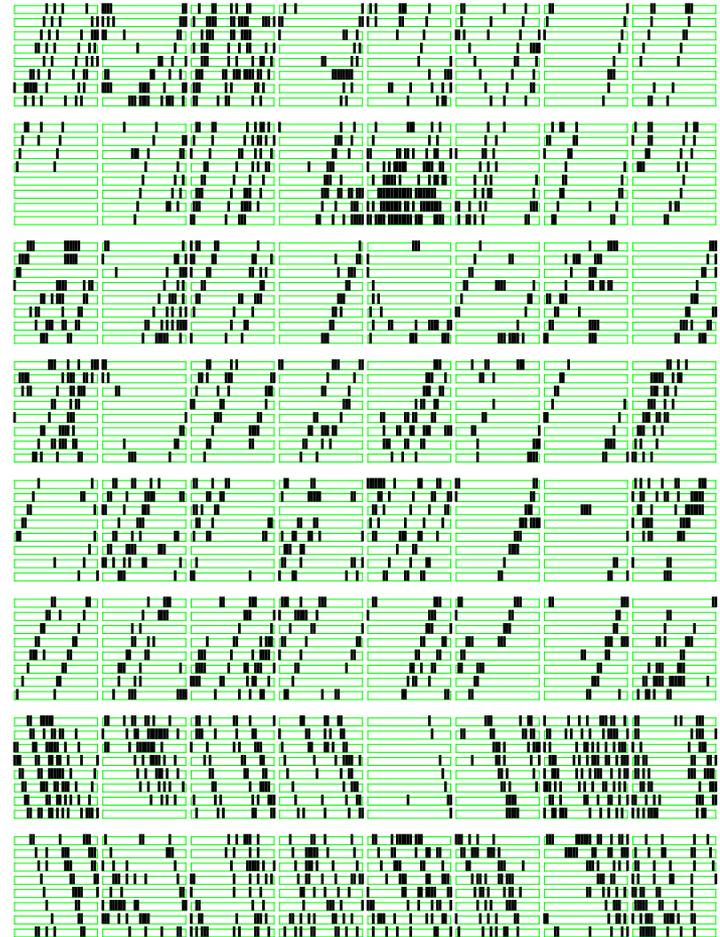
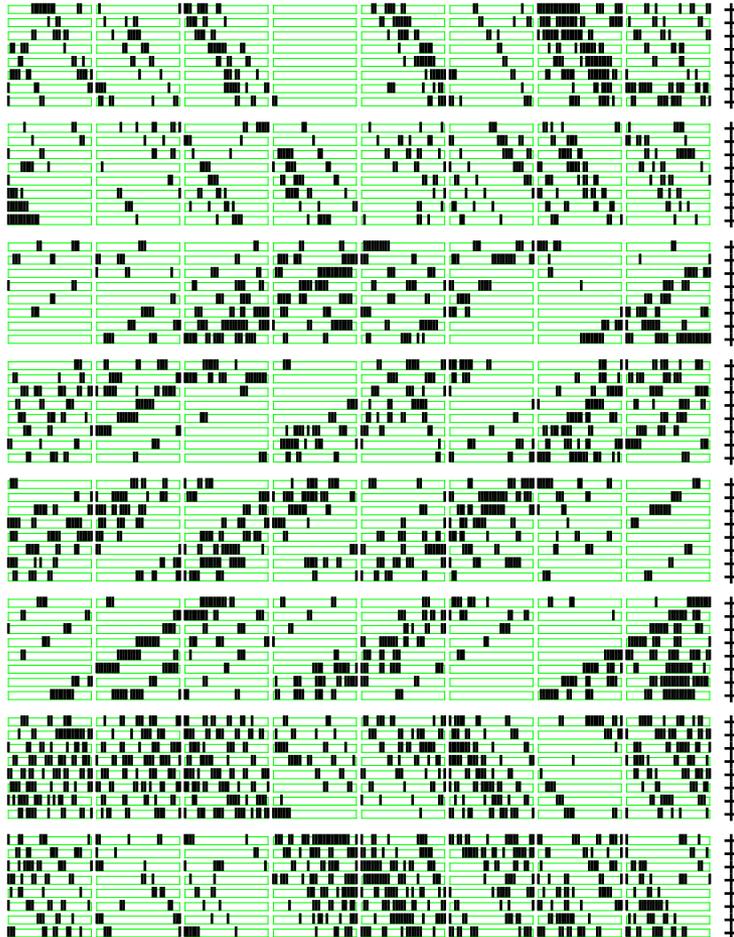
Y-projection



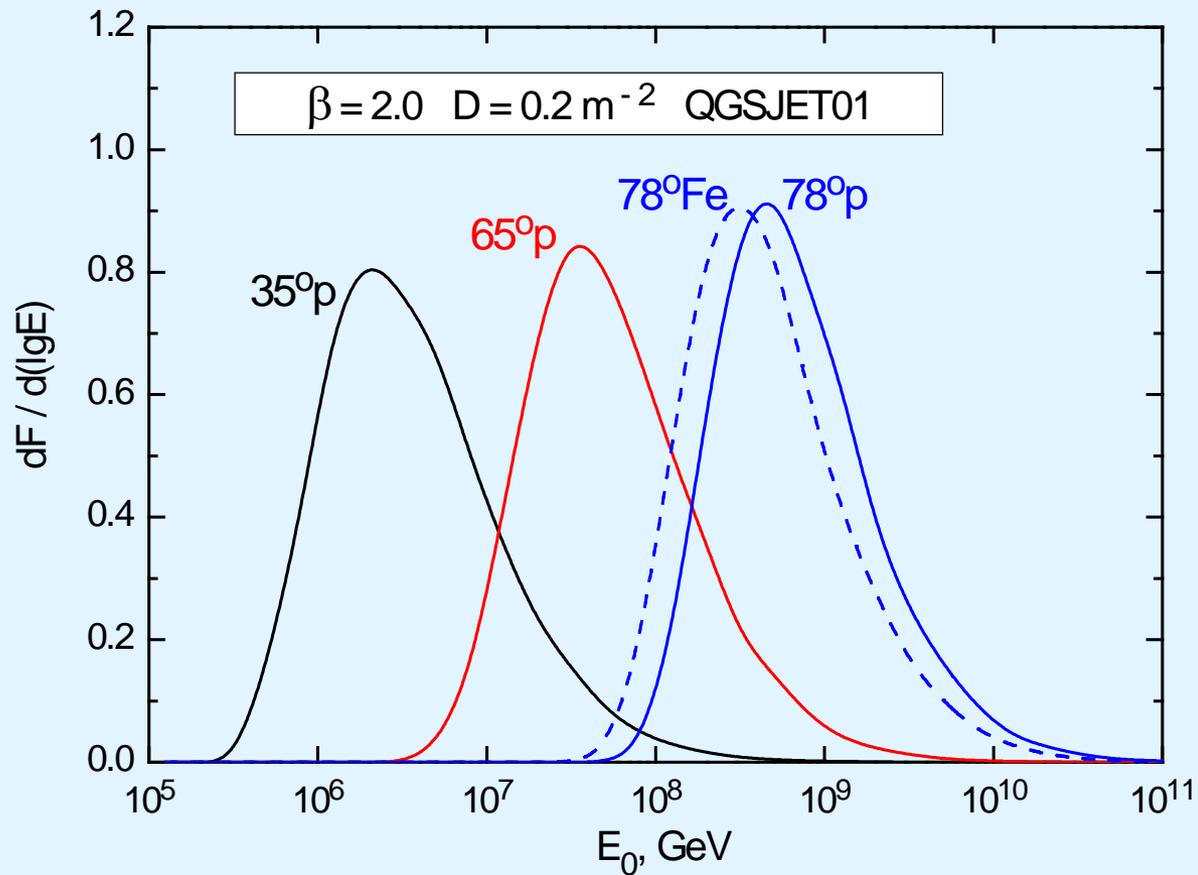
X-projection



Рекордное мюонное событие (132 мюона, 80 градусов)



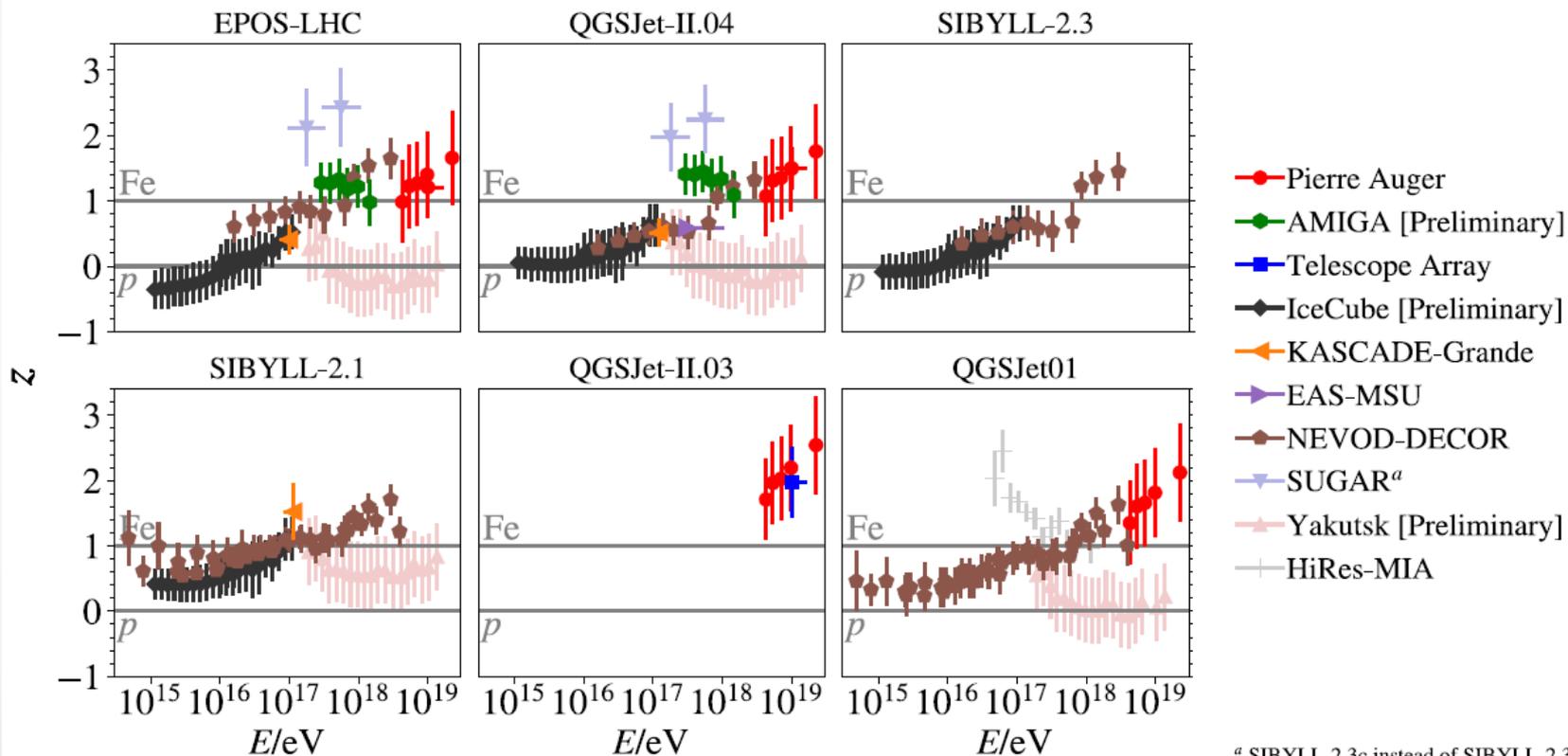
Вклад первичных энергий под разными зенитными углами



Мюонная загадка на UHECR-2018

Результаты IWG сравнения различных экспериментальных данных для разных моделей, представленные Хансом Дембинским на UHECR-2018

Step 1: Convert all measurements to z-scale $z = \frac{\ln N_{\mu}^{\text{det}} - \ln N_{\mu,p}^{\text{det}}}{\ln N_{\mu,\text{Fe}}^{\text{det}} - \ln N_{\mu,p}^{\text{det}}}$ corrects simple biases;
 $z_p = 0$ and $z_{\text{Fe}} = 1$



^a SIBYLL-2.3c instead of SIBYLL-2.3

Как объяснить избыток мюонов?

В принципе возможны два подхода к анализу параметров измеренных компонент ШАЛ:

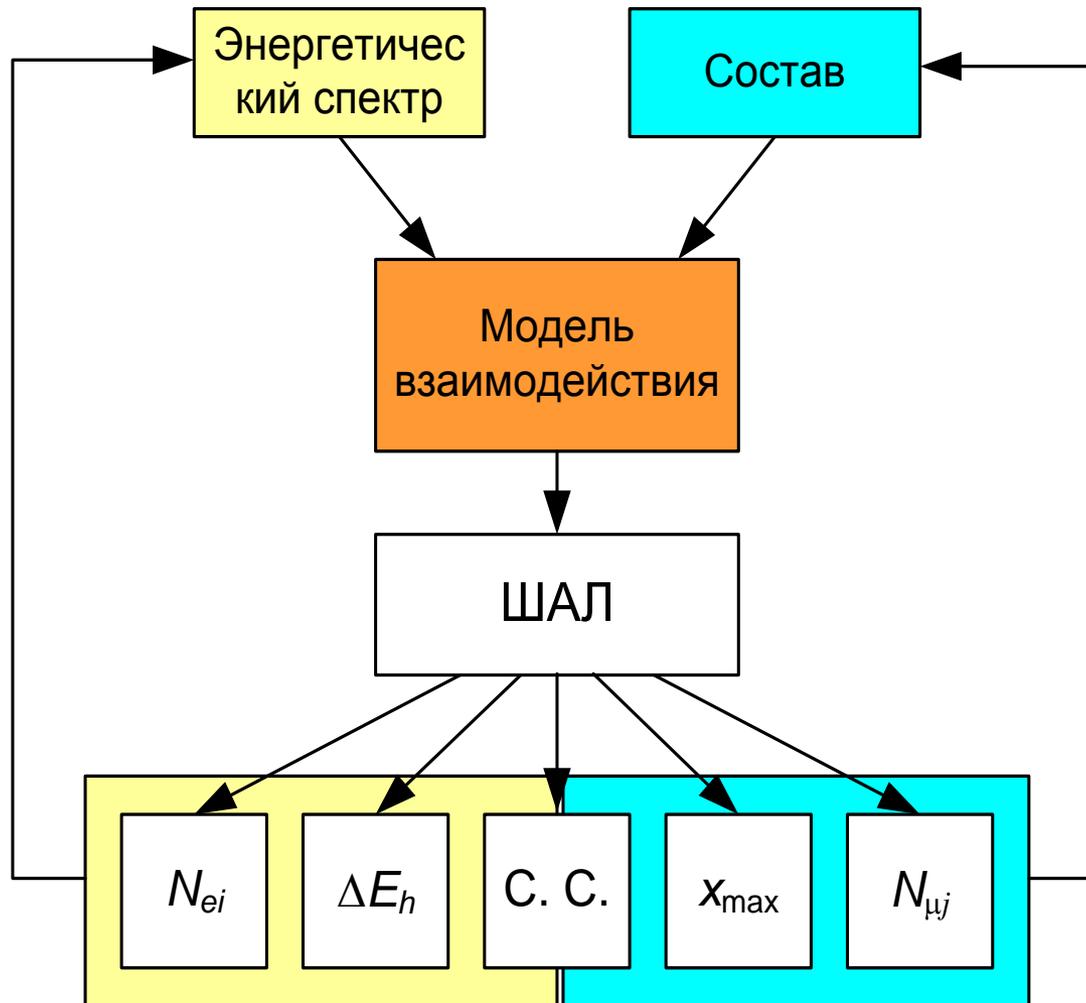
Подход	Энергетический спектр и состав	Модель взаимодействия
Космофизический	Неизвестны	Известна
Ядерно-физический	Известны	Неизвестна

В результате **наблюдаемые изменения** измеренных параметров EAS объясняются:

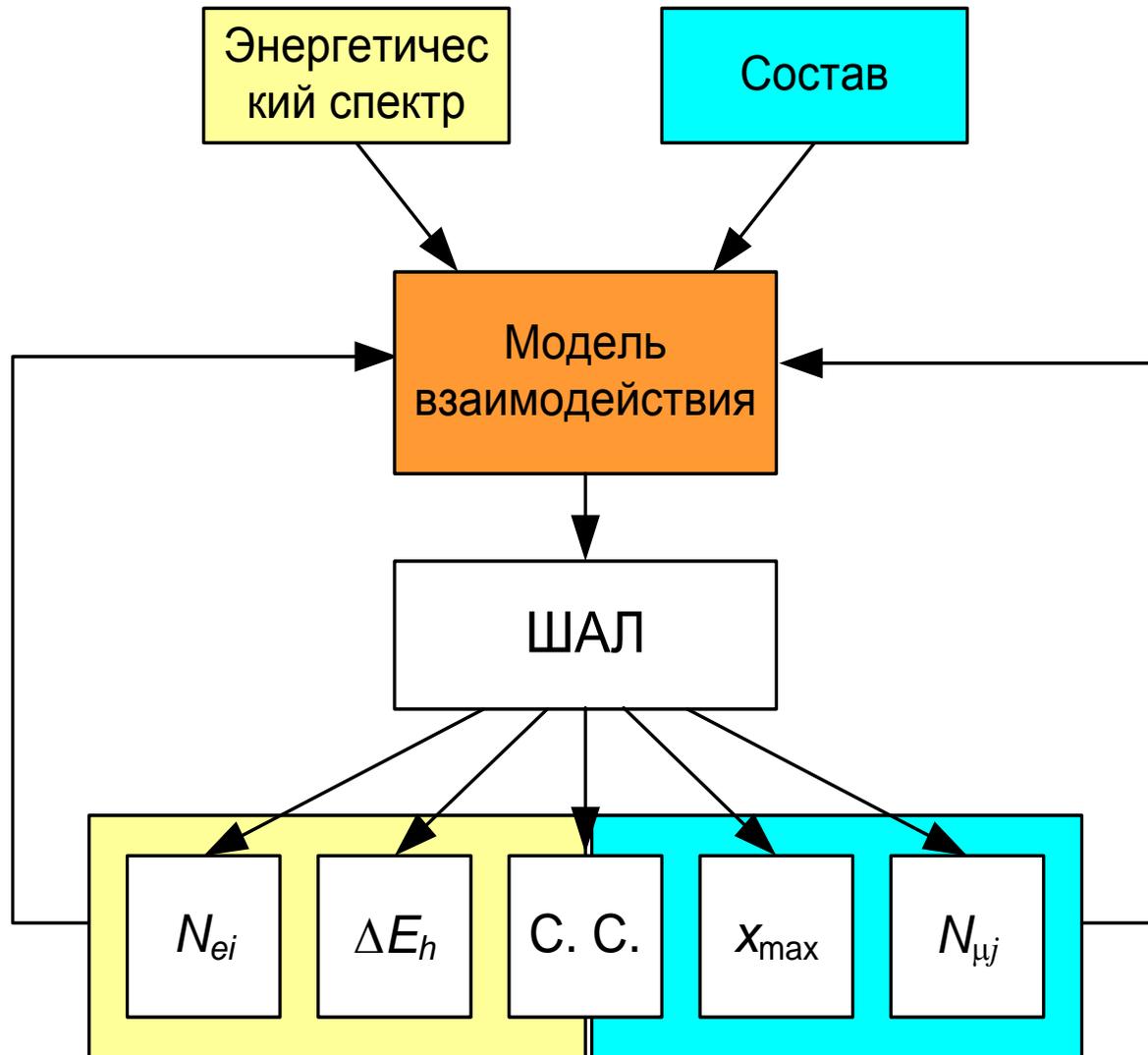
В космофизическом подходе путем изменения параметров **первичных космических лучей**,

В ядерно-физическом подходе путем изменения **модели взаимодействия**.

Космофизический подход



Ядерно-физический подход



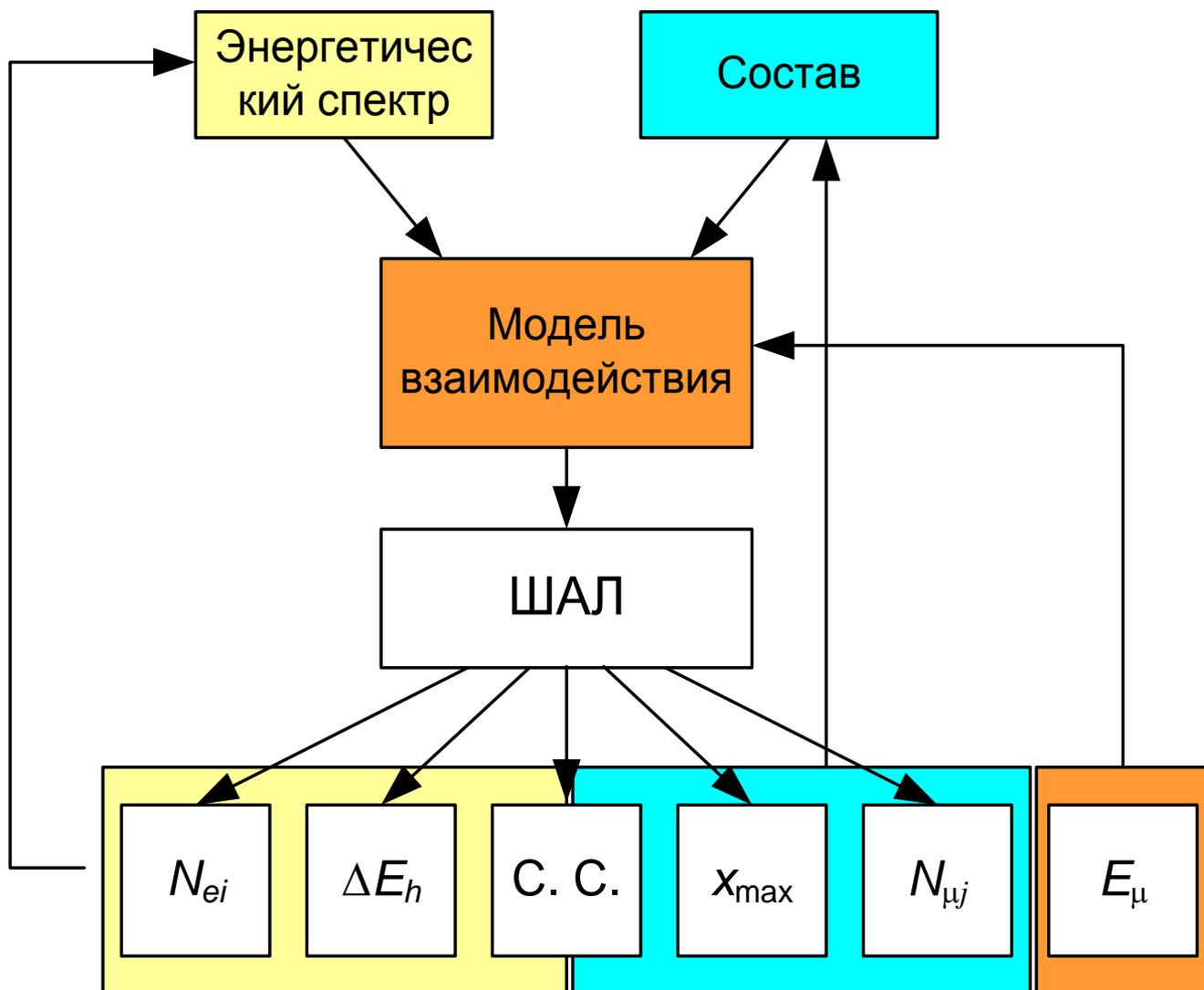
Как сделать выбор между двумя подходами?

Существует только **один параметр** ШАЛ, который может дать ответ на этот вопрос: **энергия мюонов**.

Если избыток мюонов вызван появлением тяжелых ядер (например, урана) в ПКЛ, то энергетический спектр мюонов практически не должен меняться.

Если избыток мюонов связан с включением **нового процесса** генерации мюонов или образованием нового состояния вещества при энергиях **выше некоторого порога**, то такие мюоны должны иметь **более высокие энергии**.

Новый подход к анализу ШАЛ



Возможность решения мюонной загадки в рамках ядерно-физического подхода

Для этого требуются серьезные изменения в модели взаимодействия.

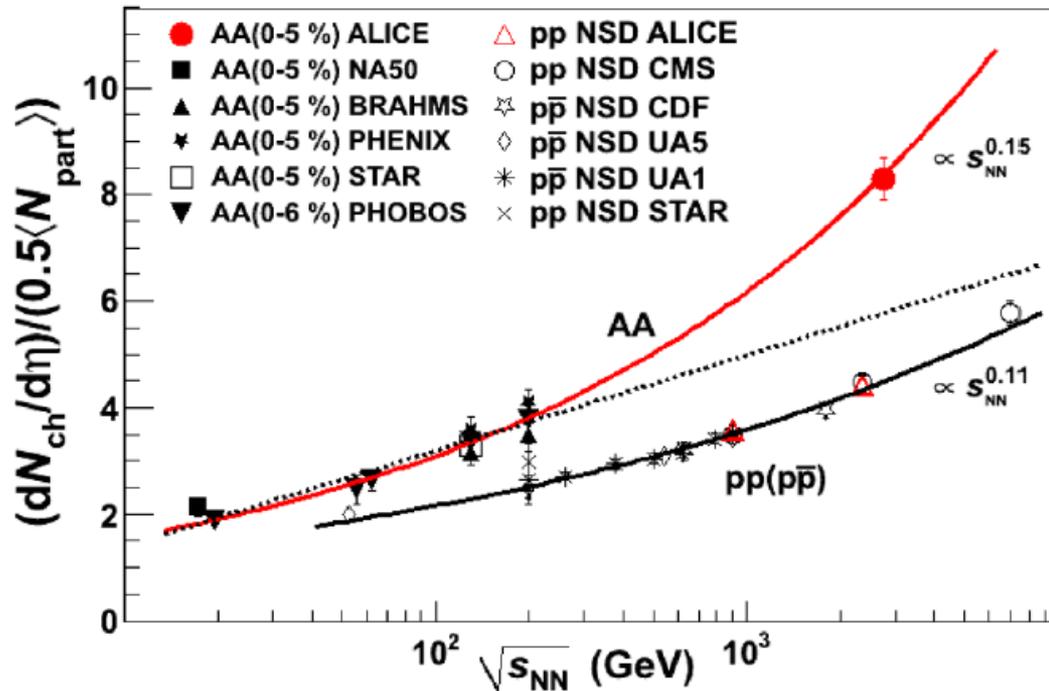
Против этого предположения говорят результаты исследований pp-взаимодействия в экспериментах на LHC, в которых не наблюдалось серьезных отклонений от существующих моделей.

Но космические лучи состоят в основном из ядер (60%).

Частицы	Z	$\langle A \rangle$	Энергия на нуклон	Энергия на ядро
Протоны	1	1	92 %	42 %
α -частицы	2	4	7 %	21 %
Легкие ядра	3-5	10	0.15 %	1 %
Средние ядра	6-10	15	0.5 %	18 %
Тяжелые ядра	≥ 11	32	0.15 %	18 %

Charged Particle Multiplicity

most central collisions: ~ 1600 charged particles per unit of η



log extrapolation fails (finally!)

2.2 x central Au+Au
($\sqrt{s_{NN}}=0.2$ TeV)

1.9 x pp (NSD)
($\sqrt{s_{NN}}=2.36$ TeV)

ALICE: PRL105 (2010) 252301

$\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV Pb+Pb, 0-5% central, $|\eta|<0.5$

2 dNch/dη / ⟨Npart⟩ = 8.3 ± 0.4 (sys.)

Как можно изменить модель взаимодействия?

- Образование новых тяжелых частиц. В этом случае геометрическое сечение будет очень маленьким.

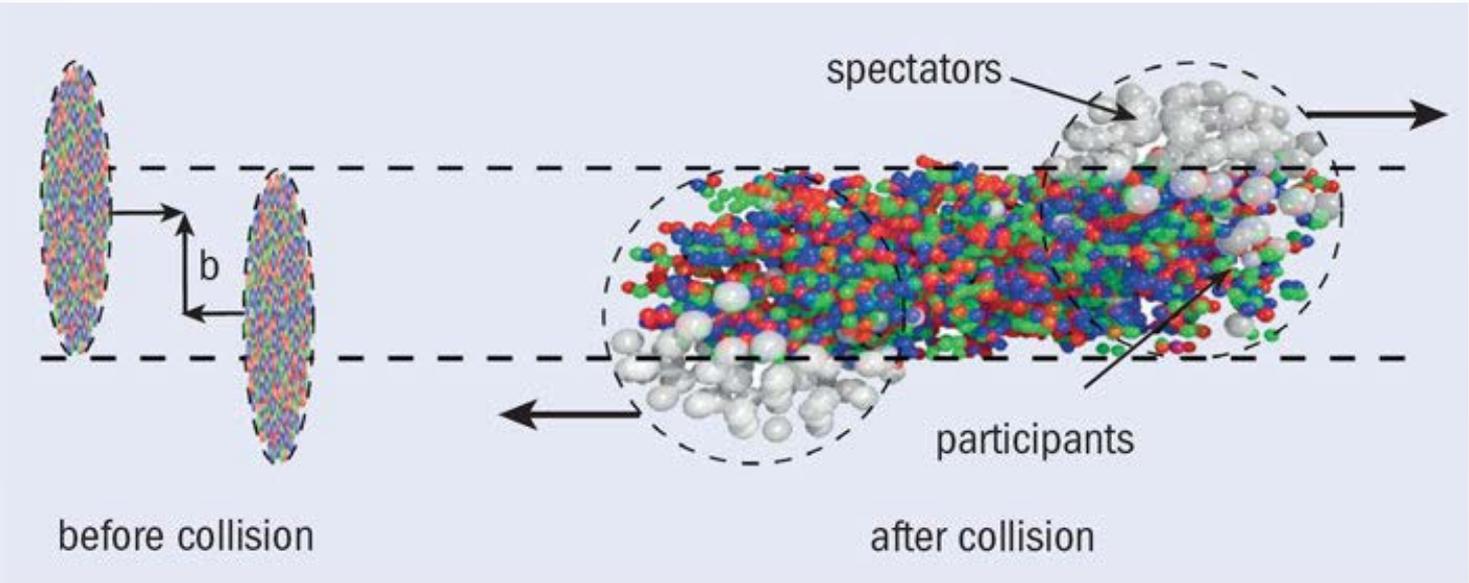
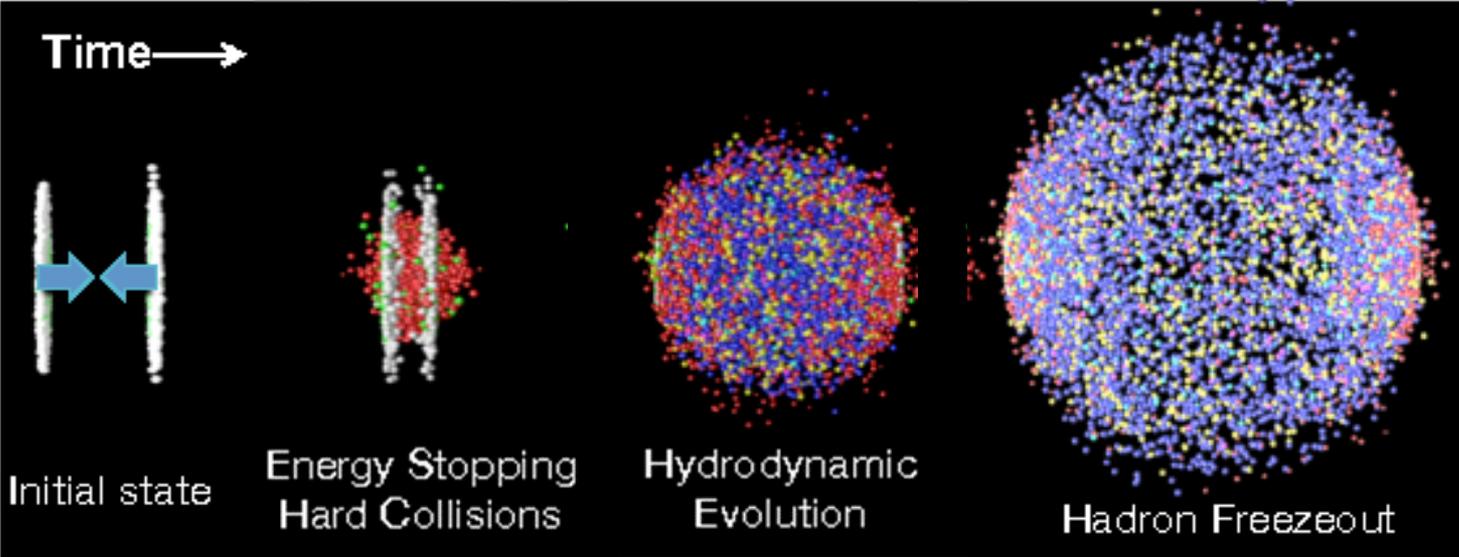
$$\sigma = \pi\lambda^2, \quad \lambda \propto 1/m$$

- Образование **сгустков** кварк-глюонной плазмы (**КГП**), что обеспечивает два основных условия:
 - **пороговое поведение**, так как для этого требуется высокая температура (энергия);
 - **большое сечение**, так как происходит переход от кварк-кваркового взаимодействия к некоторому коллективному взаимодействию многих кварков:

$$\sigma = \pi\lambda^2 \rightarrow \sigma \propto \pi R^2$$

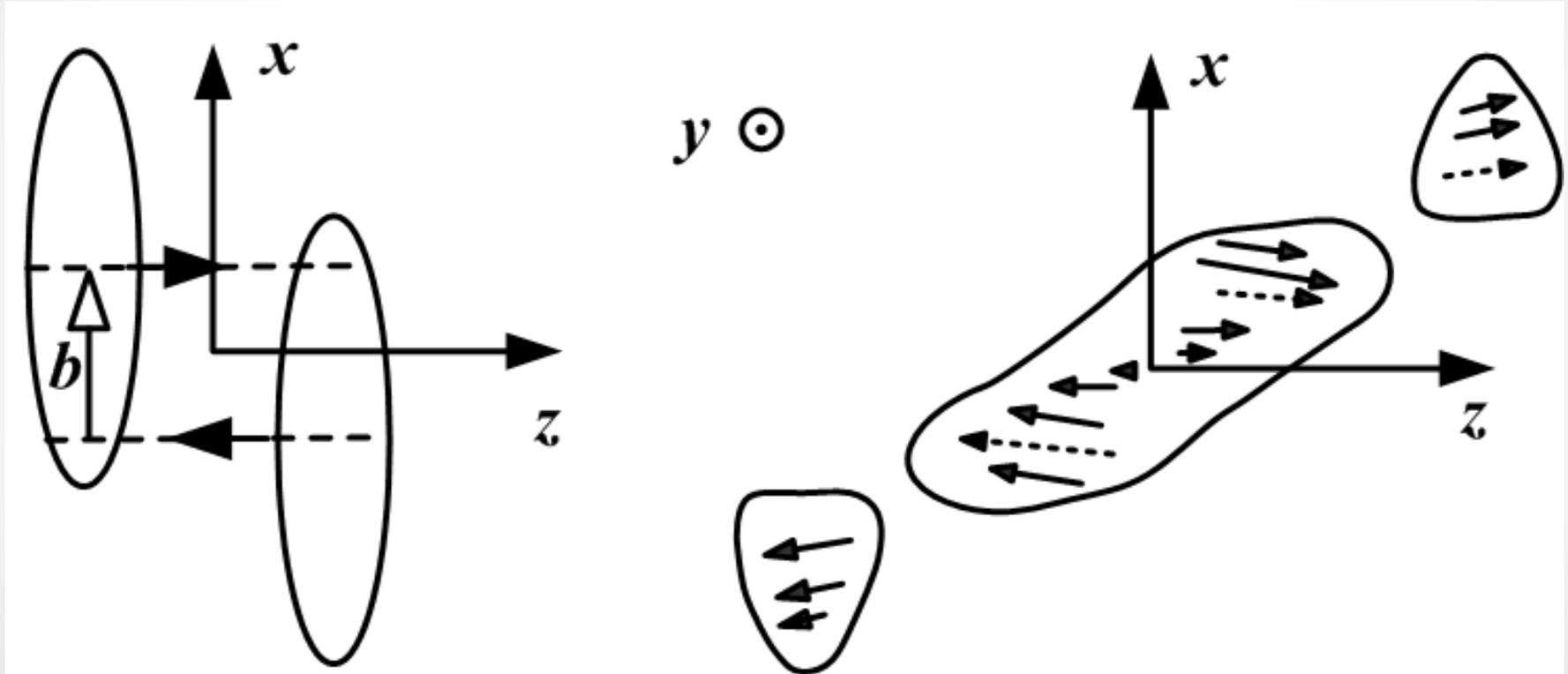
где R размер кварк-глюонного сгустка.

- Но для объяснения всех наблюдаемых явлений требуется **большой**
- **орбитальный момент**.



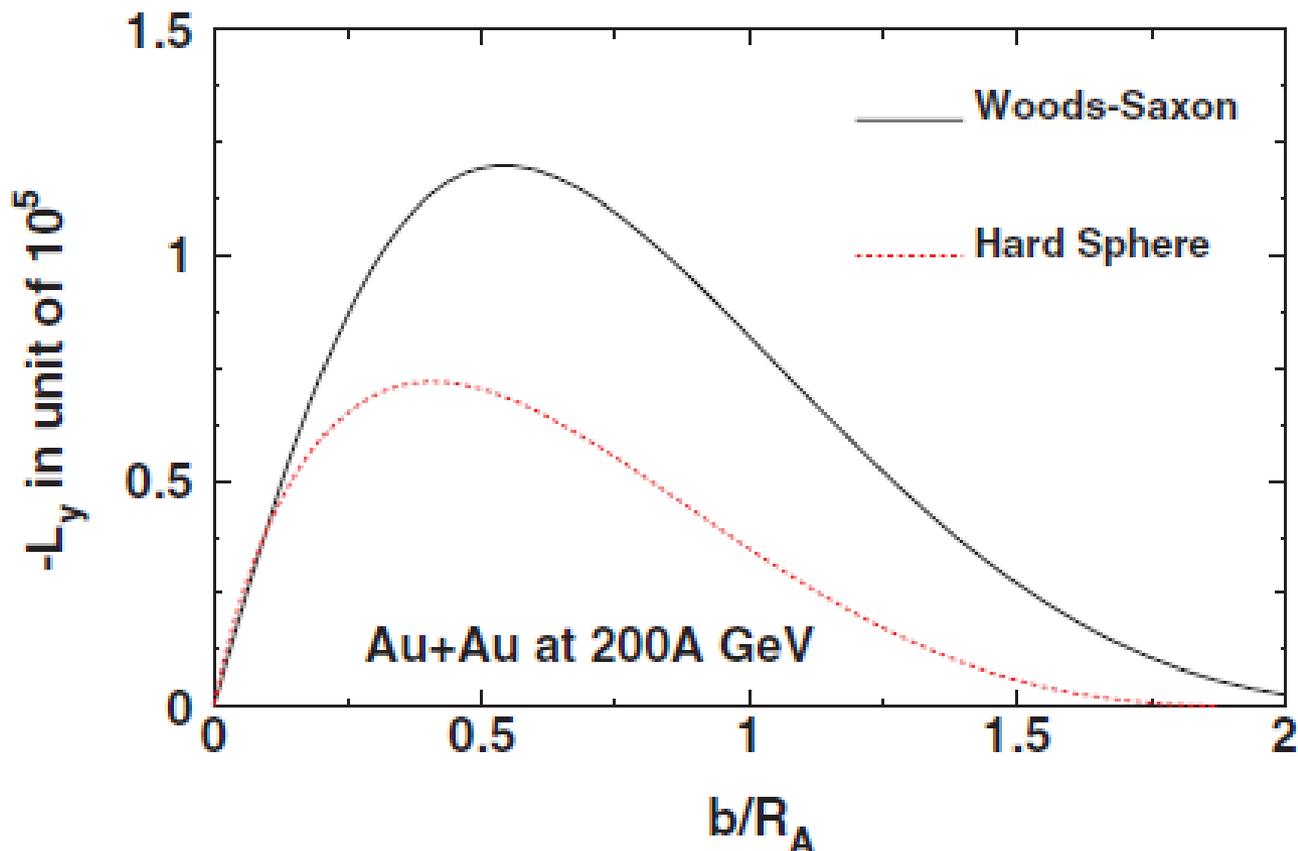
Орбитальный момент импульса в нецентральных ион-ионных столкновениях

Zuo-Tang Liang and Xin-Nian Wang // PRL 94, 102301 (2005); 96, 039901 (2006)



Значение орбитального углового момента

Jian-Hua Gao et al., Phys. Rev. C 77 (2008) 044902



Total orbital angular momentum of the overlapping system in Au+Au collisions at the RHIC energy as a function of the impact parameter b .

Центробежный барьер

1. Сгусток глобально поляризованной КГП с большим орбитальным угловым моментом может рассматриваться как обычный резонанс с большим **центробежным барьером**.

$$V(L) = L^2 / 2mr^2$$

2. Центробежный барьер будет **большим для легких кварков**, но намного меньше для тяжелых кварков.
3. Хотя во взаимодействующих ядрах тяжелые кварки отсутствуют, подавление распадов в легкие кварки дает **время для образования тяжелых кварков** в кипящей кварк-глюонной плазме.

Как меняется взаимодействие в рамках новой модели?

1. Одновременные взаимодействия многих кварков резко меняют (увеличивают) энергию в системе центра масс:

$$\sqrt{S} = \sqrt{2m_p E_1} \rightarrow \sqrt{2m_c E_1}$$

где $m_c \approx nm_N$. При пороговой энергии, $n \approx 4$ (α - частиц).

2. Образовавшиеся $t\bar{t}$ -кварки уносят энергию $\varepsilon_t > 2m_t \approx 350$ ГэВ, а с учетом энергии вылета $\varepsilon_t > 4m_t \approx 700$ ГэВ, в системе центра масс.

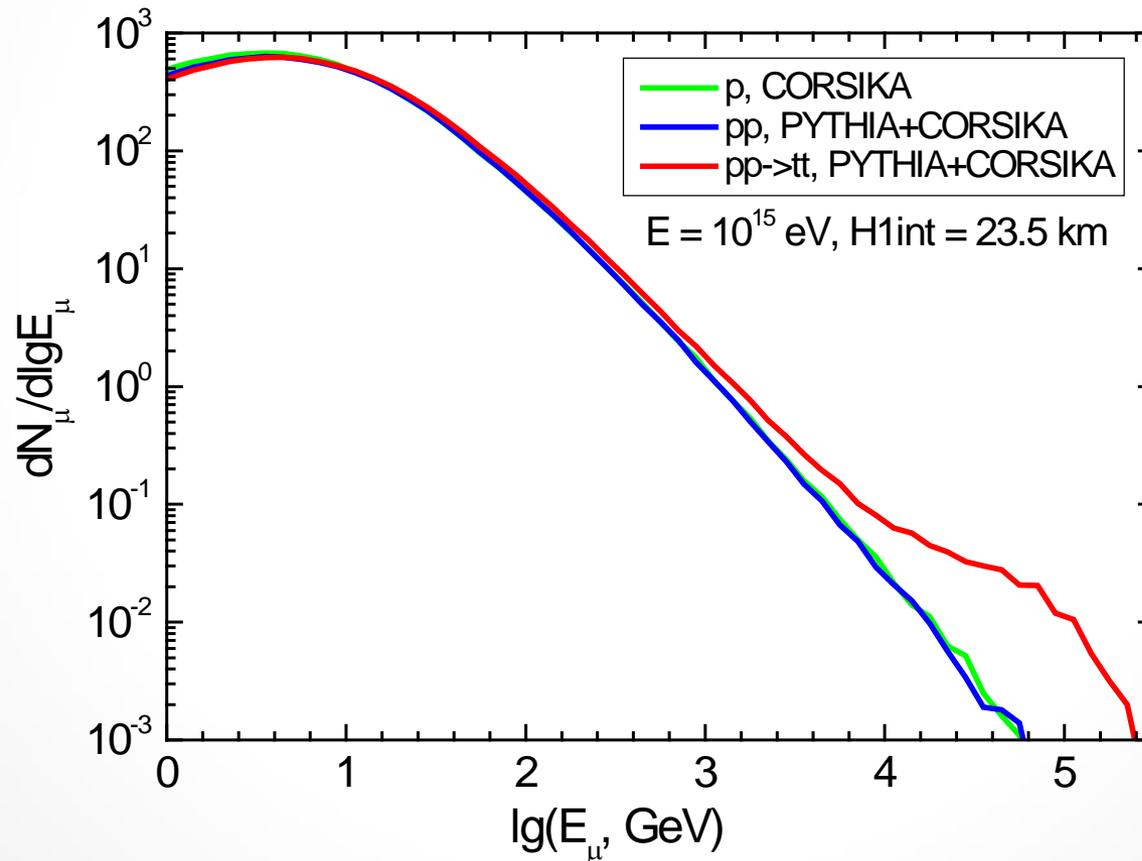
3. Распады топ-кварков: $t(\bar{t}) \rightarrow W^+ (W^-) + b(\bar{b})$

W - бозоны распадаются на лептоны (~30%) и адроны (~70%);

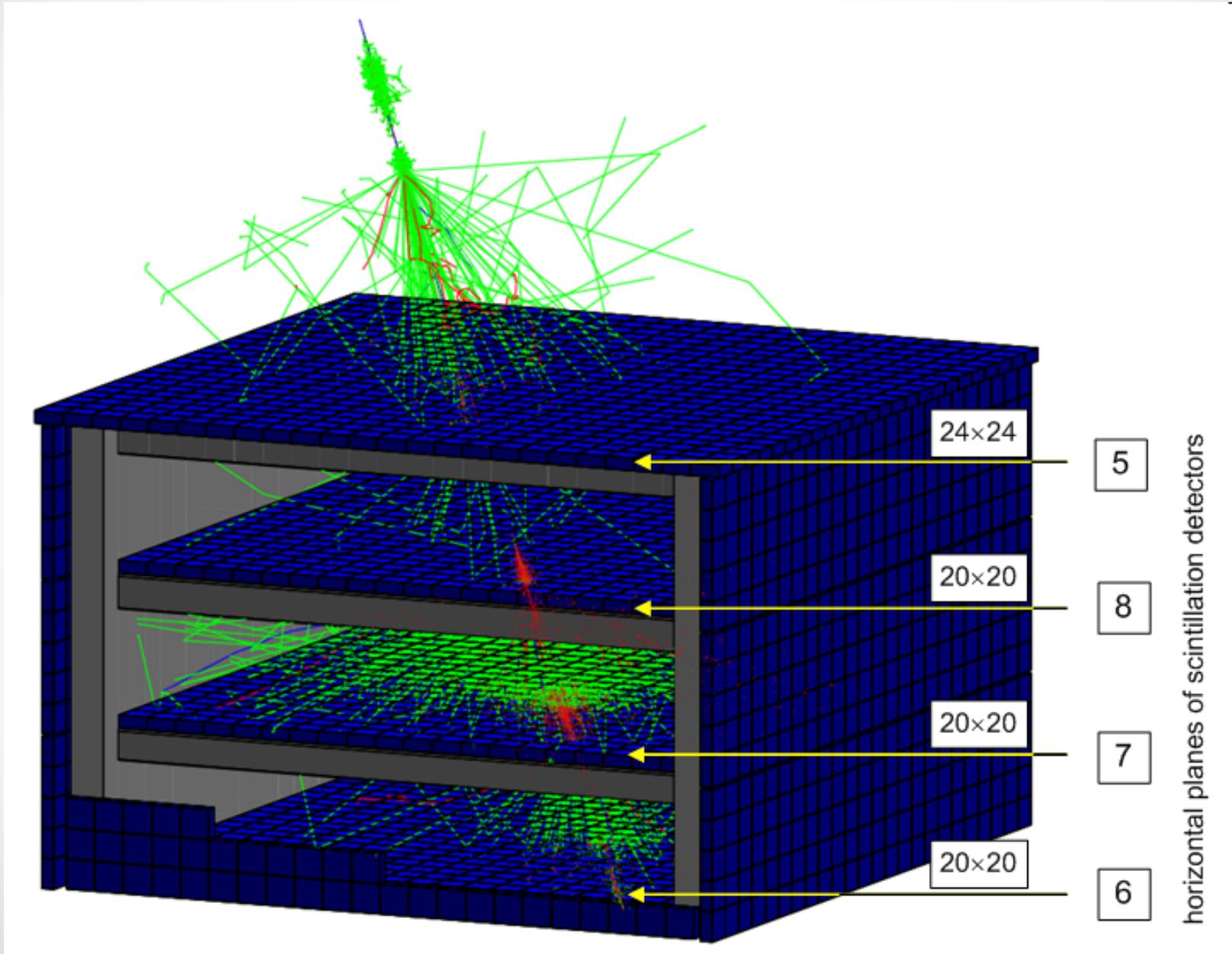
b - кварки производят струи, которые генерируют множественные пионы, распадающиеся на мюоны и нейтрино.

Как новая модель может объяснить мюонную загадку?

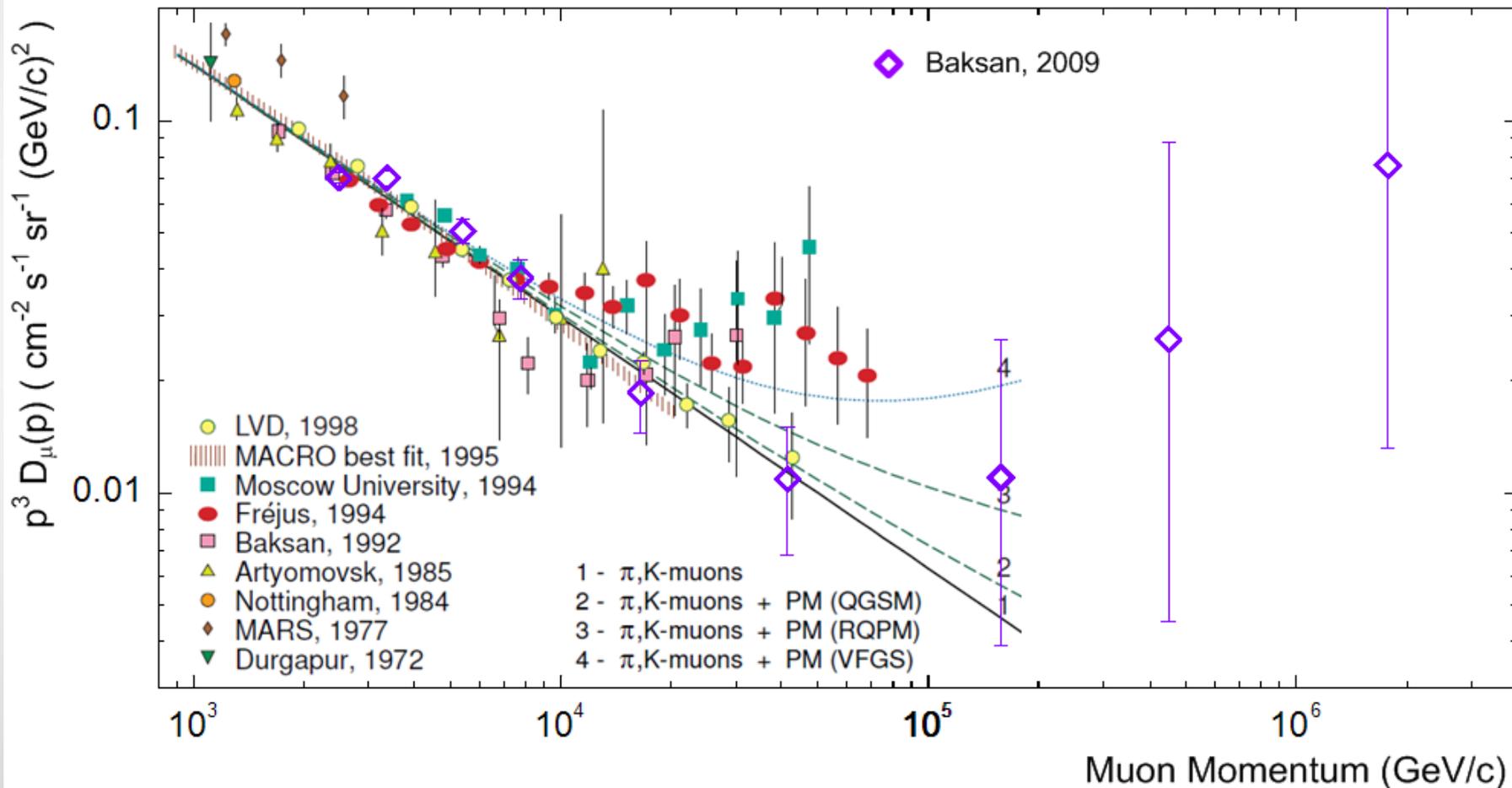
Распад W -бозонов на мюоны и нейтрино дает избыток мюонов VHE с энергией выше 100 ТэВ



Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп

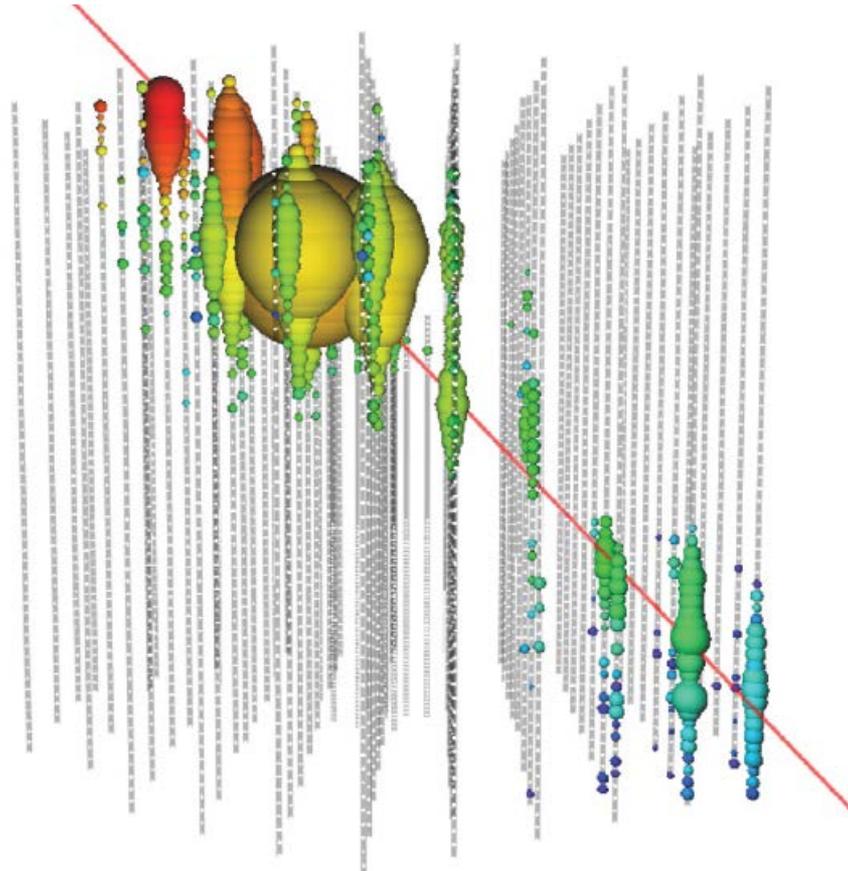


Результаты исследований энергетического спектра мюонов в Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (BUST) *A. Phys.* 36 (2012) 224 - 236



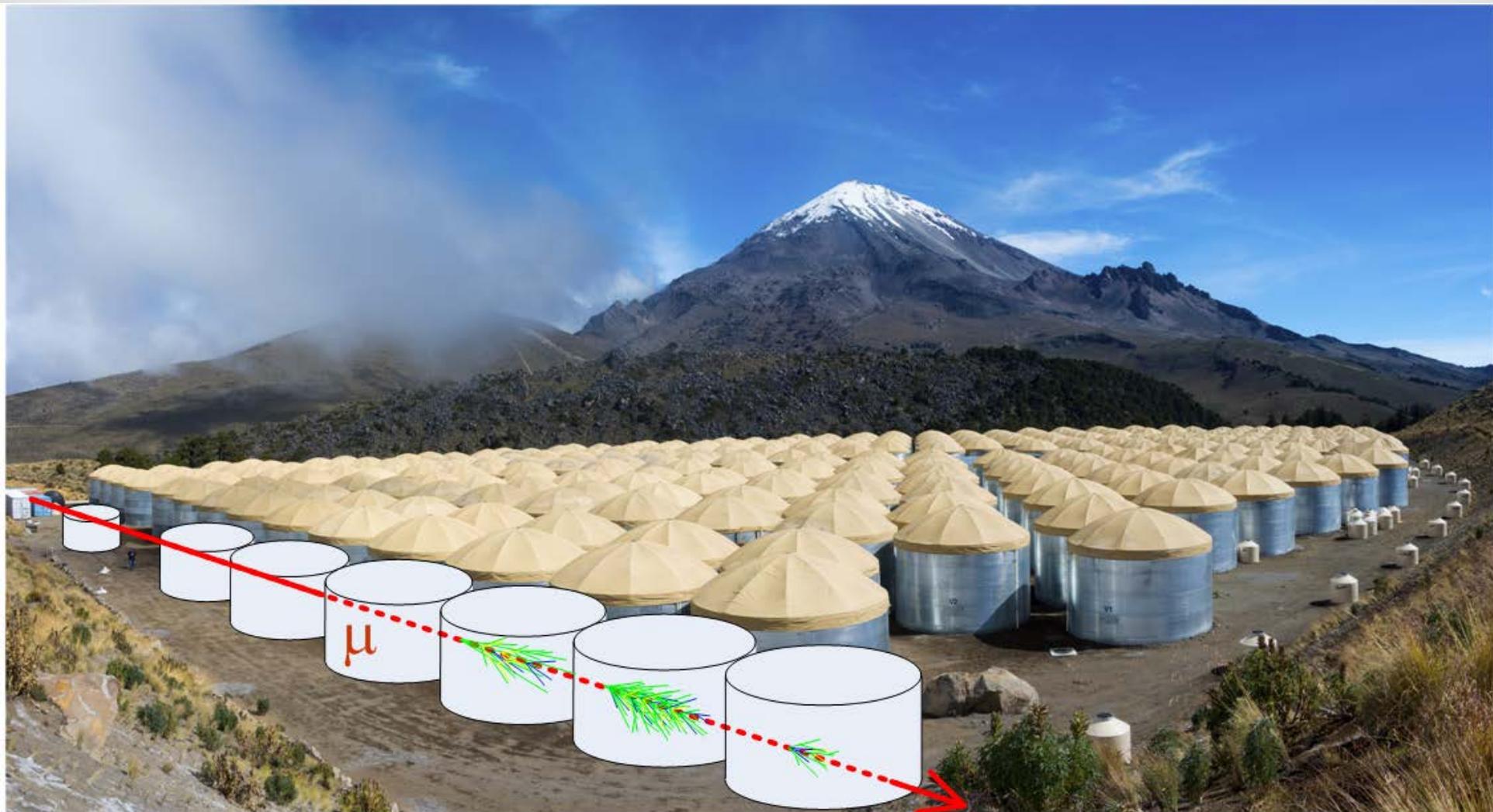
HE мюон в IceCube

M.G. Aartsen et al., Astroparticle Physics 78 (2016) 1



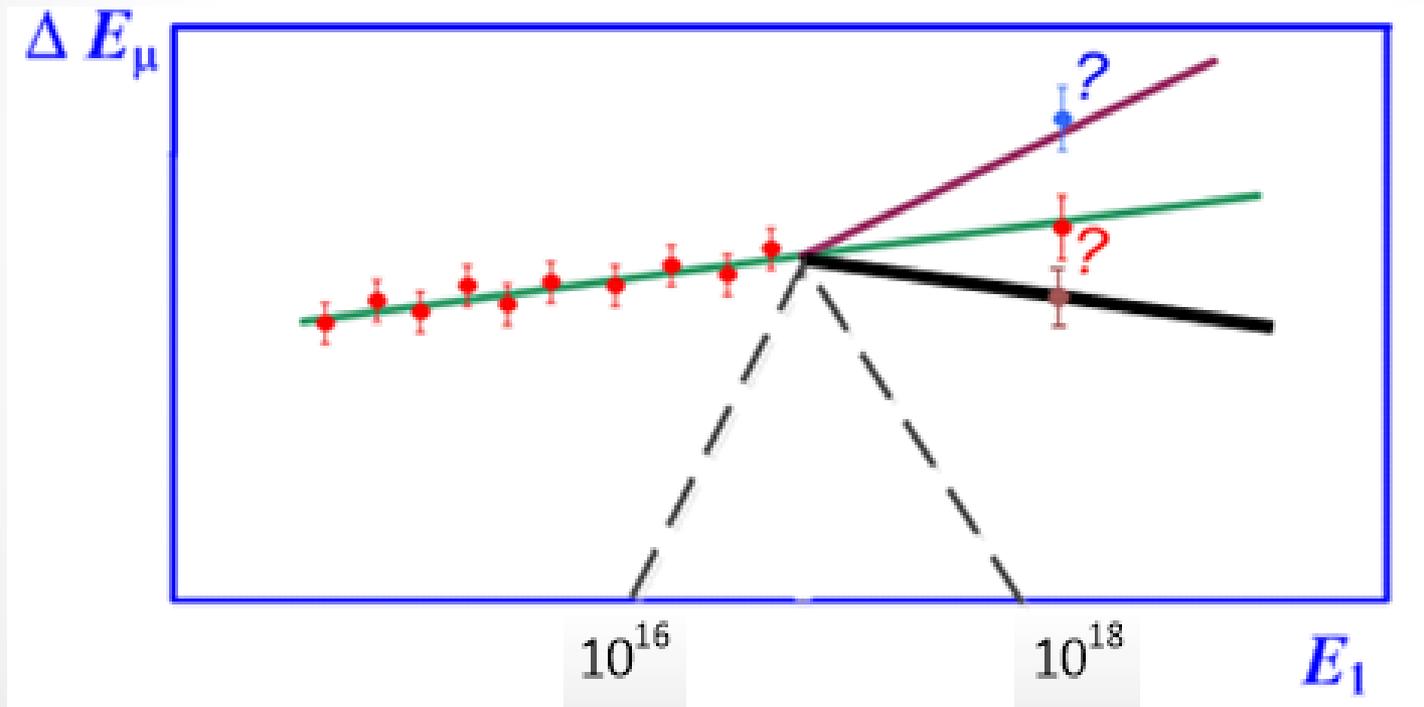
Example of a high-energy muon candidate event found in experimental data.
Reconstructed event parameters are: $E_{\text{loss}} = 550 \text{ TeV}$, $E_{\mu, \text{surf}} = 1.03 \text{ PeV}$, $\theta = 45^\circ$.

VHE МЮОН В HAWC



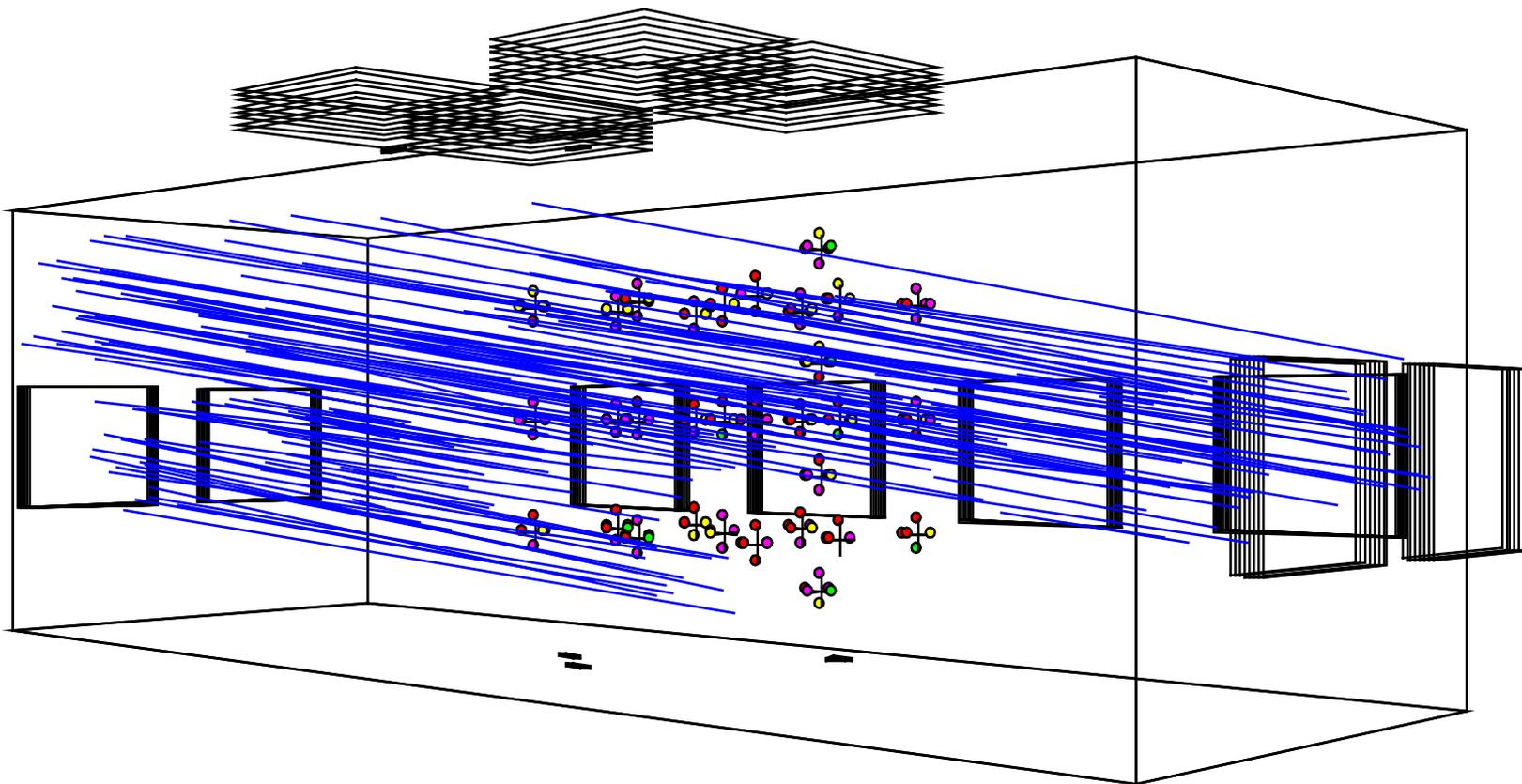
Новая модель и энергосодержание групп мюонов

Распад W -бозонов на адроны (в основном пионы, в среднем ~ 20) объясняет увеличение групп мюонов с большими энергиями.



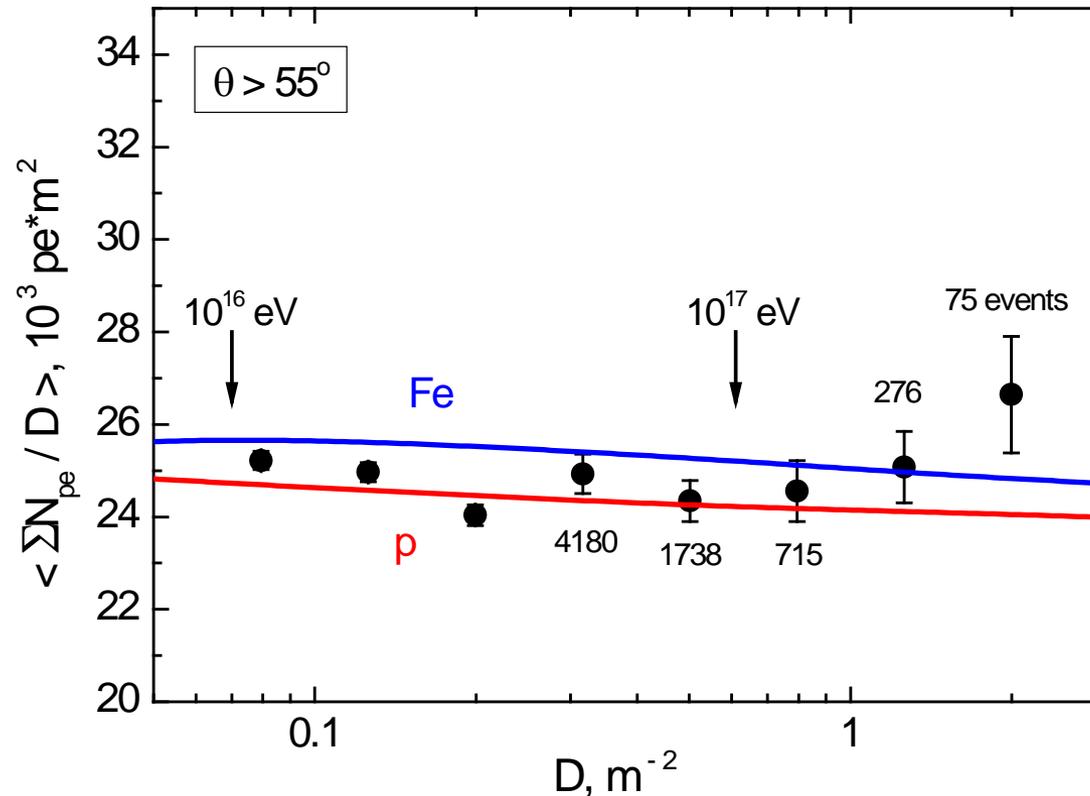
Группа мюонов (реконструкция геометрии)

Nlam=31,N5=30,N6=31,NR1=0 ,NR2=0 NGroup2=132
N1=30,N3=26 nCup= 3 SumAmp=5.57e+04
N2=30,N4=28 nCdown= 3 NPMT=175 ETel= 0.0% ERec= 49.7%



Date=05-05-03 06:11:04.043 Nevent=847205 fm=123.1 tm=79.7

Зависимость средней энергии от плотности мюонов (данные НЕВОД + ДЕКОР)



Результаты моделирования показывают тенденцию к медленному уменьшению энергии мюонов в группах с увеличением первичной энергии. Экспериментальные данные указывают на некоторое увеличение энергии при высоких плотностях мюонов, которые соответствуют эффективным энергиям первичных частиц больше, чем 10^{17} эВ).

Заключение

Мюонная загадка была сформулирована на основе результатов, полученных в различных экспериментах, проведенных как на ускорительных детекторах, так и в космических лучах.

С большой вероятностью за появление избытка групп мюонов ответственны **новые процессы в ядро-ядерных взаимодействиях**, поскольку космические лучи состоят в основном из ядер.

Если эта идея верна, ее можно также изучать на LHC. Но искать новое состояние вещества на LHC необходимо не во **взаимодействиях протон-протон**, а во **взаимодействиях ядро-ядро**, что является достаточно трудной задачей.

В космических лучах для решения мюонной загадки наиболее перспективны эксперименты: **НЕВОД – ДЕКОР, IceCube и HAWC**.

Спасибо за внимание!