

*Международная сессия-конференция СЯФ ОФН РАН  
"Физика фундаментальных взаимодействий"*

*50-лет Баксанской нейтринной обсерватории*

*80-лет мюонам (1937 – 2017)*

# **Мюоны космических лучей высоких и сверхвысоких энергий**

**А.А. Петрухин, А.Г. Богданов**  
**НОЦ НЕВОД НИЯУ МИФИ**

*Нальчик, КБГУ, 6-8 июня 2017 г.*

# Содержание

1. Мюоны до Стандартной Модели
2. Мюоны “сегодня” – инструмент исследований:
  - процессов генерации мюонов;
  - энергетического спектра и состава ПКЛ
3. Изучаемые характеристики:
  - энергетический спектр и угловое распределение “одиночных” мюонов;
  - множественность мюонов в группах (в ШАЛ)
4. “Новый” подход – энерговыделение групп мюонов

## Области энергий

Средняя энергия мюонов на поверхности Земли  $\approx 4$  ГэВ

до  $\sim 100$  ГэВ – прикладные исследования;

$\sim 0.1 - 1$  ТэВ – область критических энергий для  $\pi$  и  $K$ -мезонов;

$1 - 100$  ТэВ – спектр, состав ПКЛ ( $10^{13} - 10^{15}$  эВ) и новые процессы генерации  $\mu$ ;

$> 100$  ТэВ – мюоны сверхвысоких энергий (VHE $\mu$ )

# Методы исследования энергетического спектра мюонов

- ❑ **магнитный спектрометр** ( $E_\mu$  до  $\sim 10$  ТэВ)  
DEIS, MARS, MUTRON, Nottingham, ...
- ❑ **кривая поглощения** ( $E_\mu$  до  $\sim 100$  ТэВ)  
Баксан, Frejus, KGF, LVD, MACRO, NUSEX, South Africa, ...
- ❑ **калориметрический метод – каскады от  $\gamma$ -квантов** ( $E_\mu \sim \infty$ )  
МИФИ, Артемовск, Байкал, Баксан, РЭК МГУ, IceCube, ...
- ❑ **парметр – каскады от  $e^+e^-$  пар** ( $E_\mu \sim \infty$ )  
MUTRON, NUSEX, БАРС, Баксан, ...

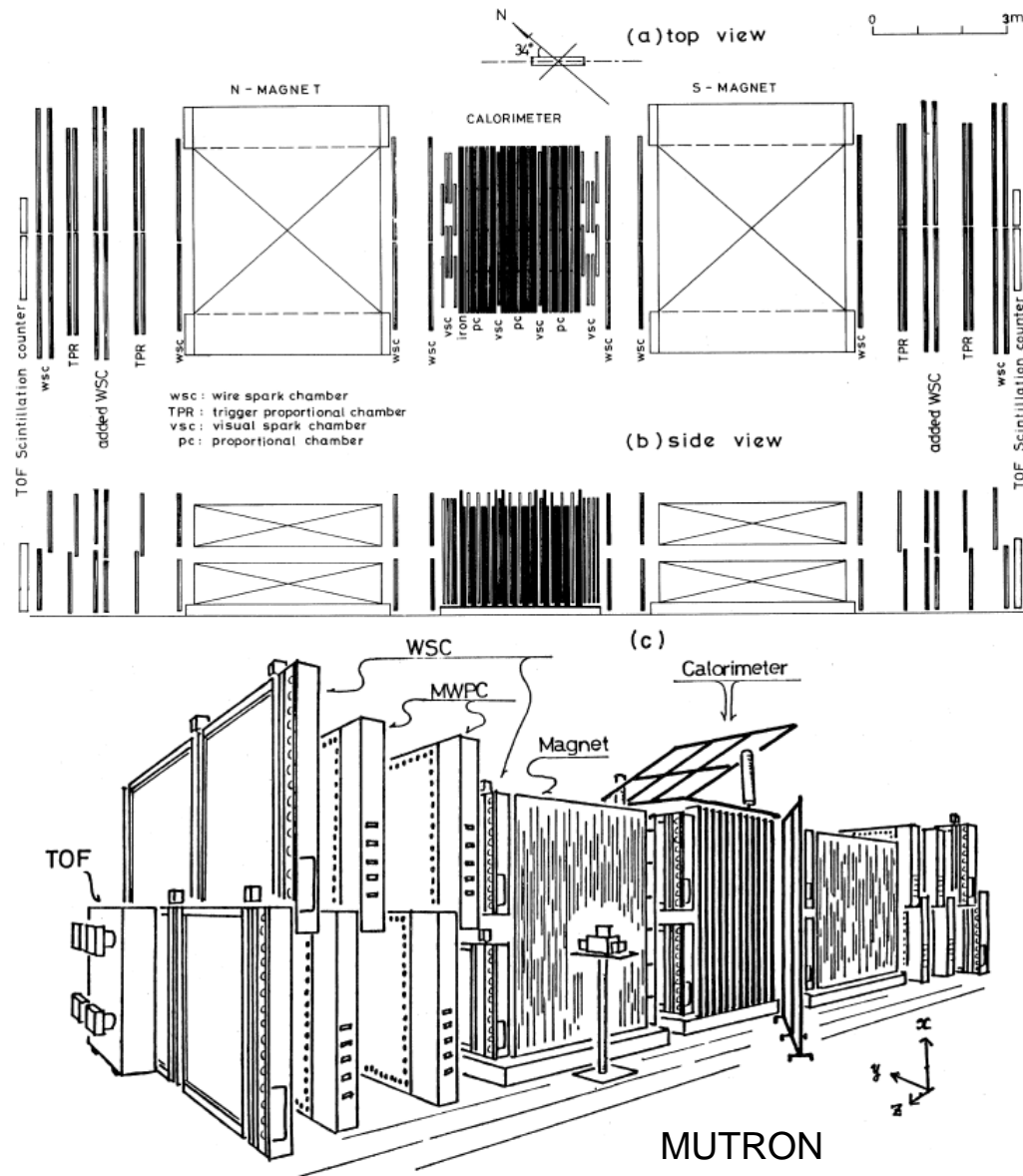
# **Энергетический спектр мюонов**

## **Muon energy spectrum**

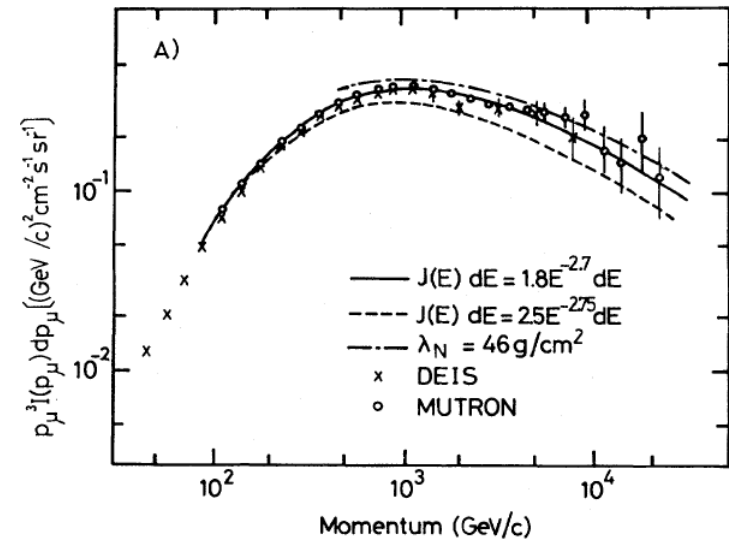
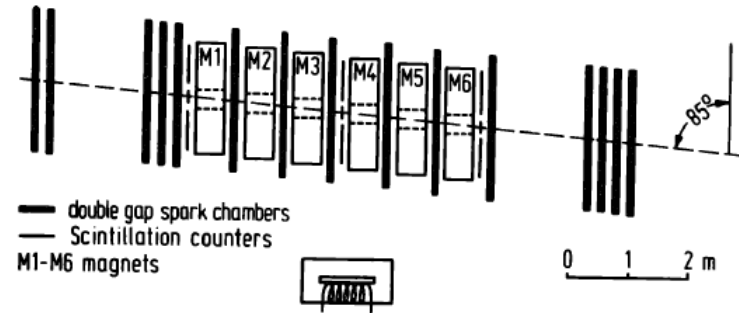
# Магнитный спектрометр

O.C. Allkofer et al. // 17th ICRC, 1981, Paris, France

S. Matsuno et al. // Phys. Rev. D 29 (1984) 1



## DEIS



The MUTRON and DEIS muon energy spectra are compared with the calculated ones at a zenith angle of 89°.

# Кривая поглощения



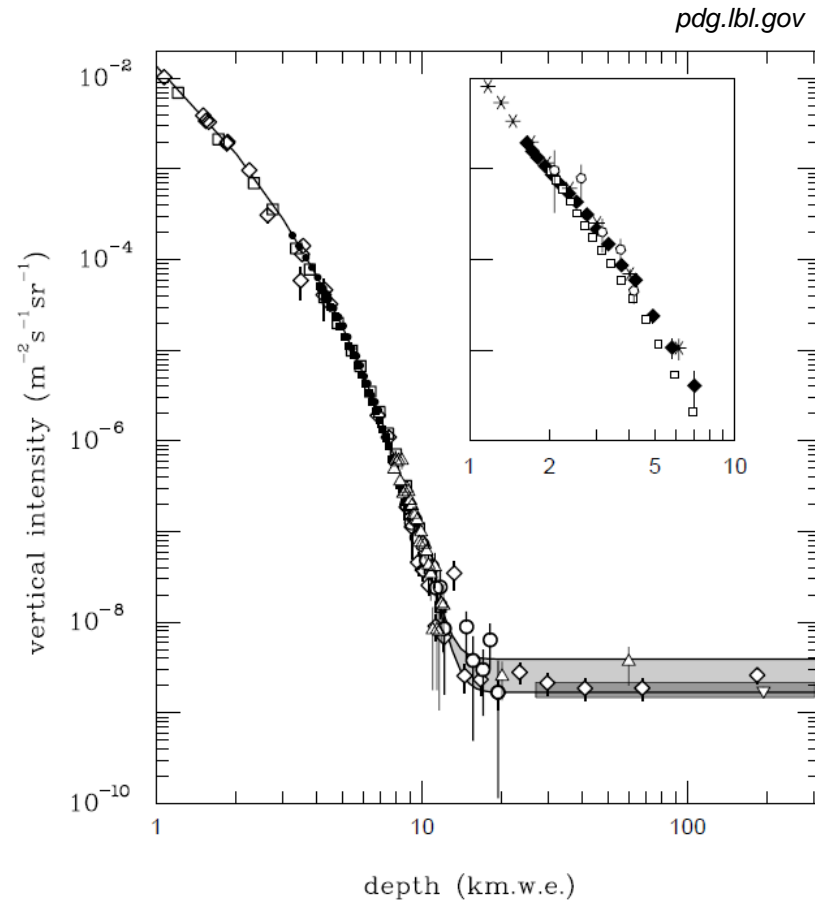
**LVD** – 840 liquid scintillation tanks  
 $1 \times 1.5 \text{ m}^3$ , streamer tubes modules



**MACRO** –  $76.5 \times 12 \times 9.3 \text{ m}^3$ ,  
liquid scintillation counters,  
limited streamer tubes and  
nuclear track detectors



**Frejus** –  $12.3 \times 6 \times 6 \text{ m}^3$ ,  
912-layer sandwich  
of 3 mm thick iron plates  
and (5 mm x 5 mm)  
flash tubes, Geiger tubes

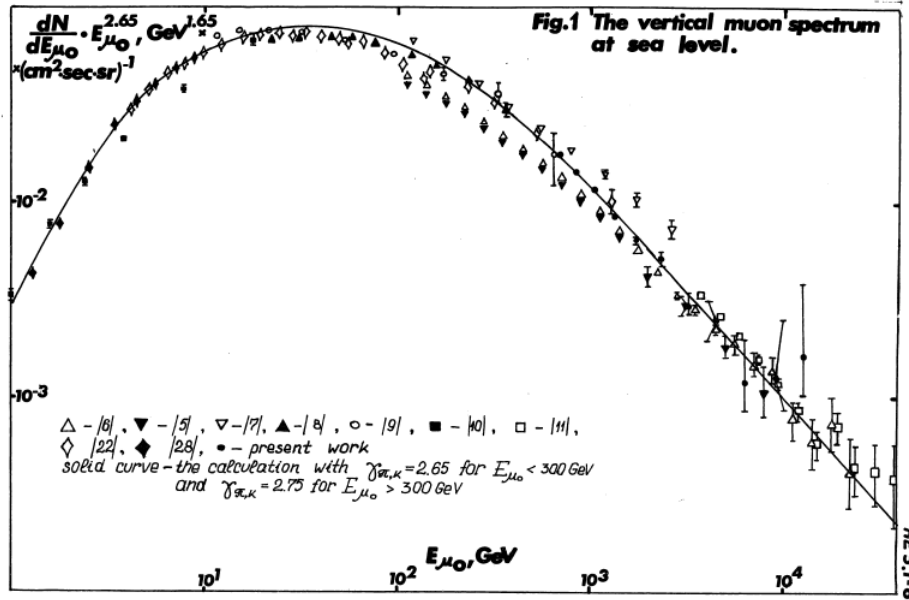


## Vertical muon intensity vs depth.

The experimental data are from: the compilations of Crouch, Baksan, LVD, MACRO, Frejus, SNO. The inset shows the vertical intensity curve for water and ice.

# Калориметрический метод (Артемовск)

F.F. Khalchukov et al. // 19th ICRC, 1985, La Jolla, United States



100-tons scintillation detector is situated in the salt mine near Artyomovsk (Ukraine) at the depth of 600 m.w.e.

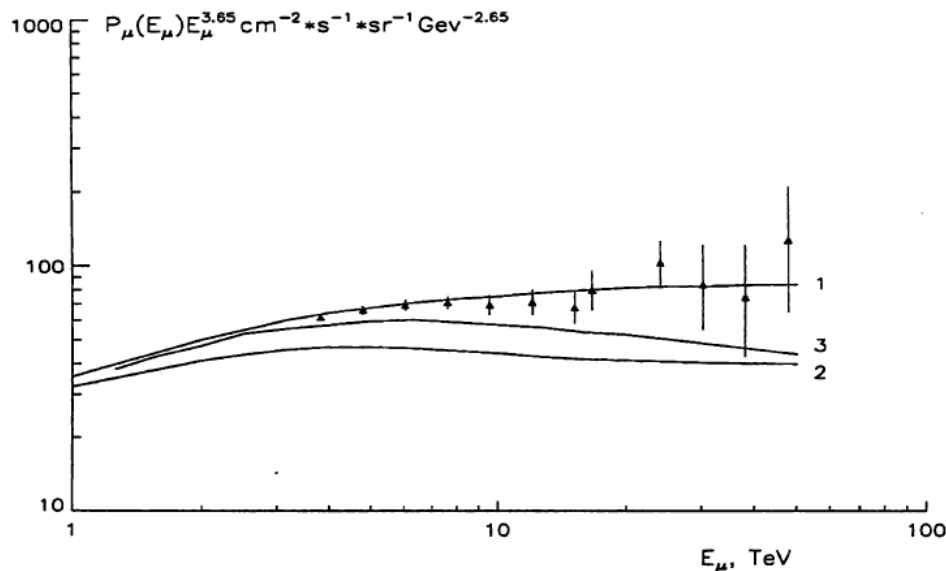
The detector consists of stainless steel cylinder the height and diameter 5.6 m filled with liquid scintillator.

128 FEU-49B ( $\varnothing=15 \text{ cm}$ ), 16 FEU-110 ( $\varnothing=8 \text{ cm}$ ) are used.



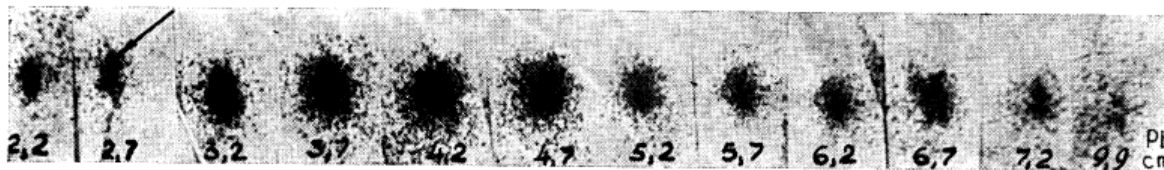
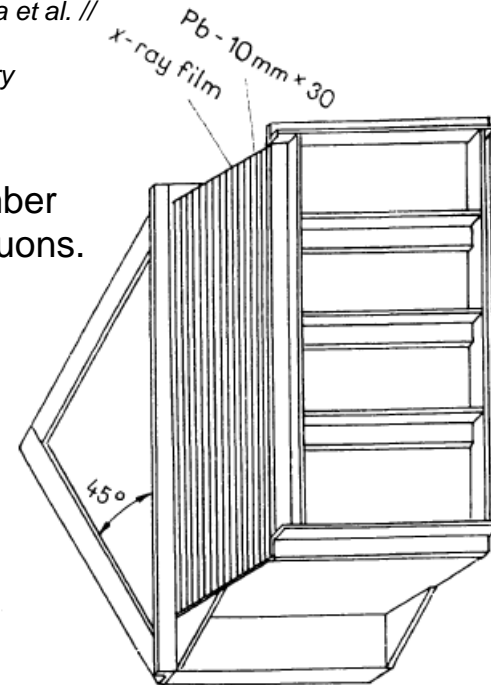
# Калориметрический метод (РЭК МГУ)

N.P. Il'ina et al. // 24th ICRC, 1995, Rome, Italy



K.V. Cherdyntseva et al. // 11th ICRC, 1969, Budapest, Hungary

Emulsion chamber for detecting muons.

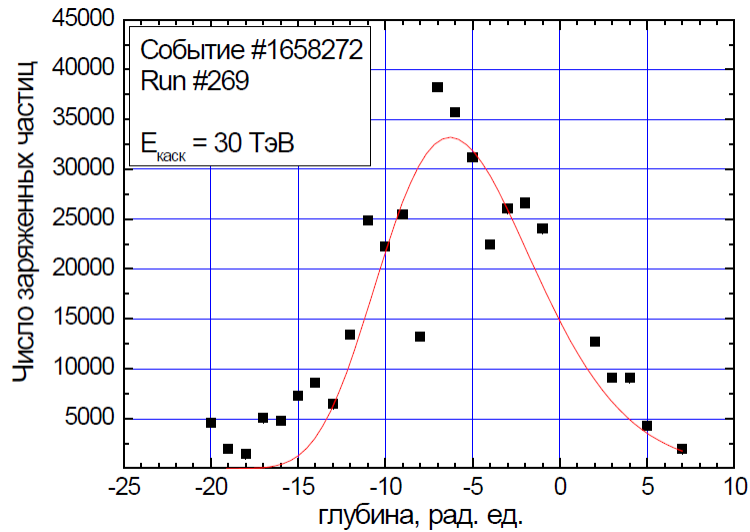
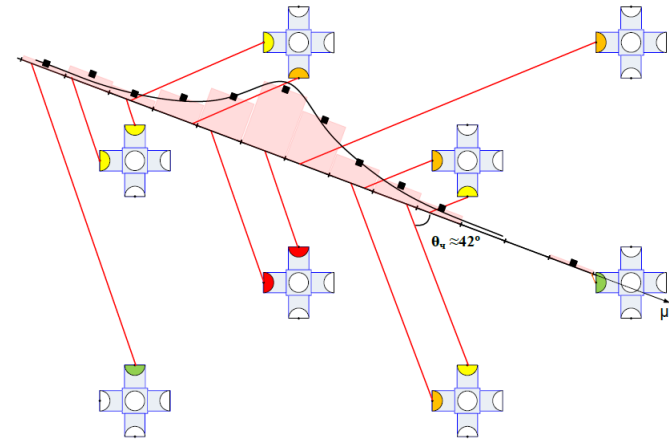


Development of an electromagnetic cascade produced by a  $\gamma$ -quantum of the energy of  $1.5 \times 10^{13}$  eV.

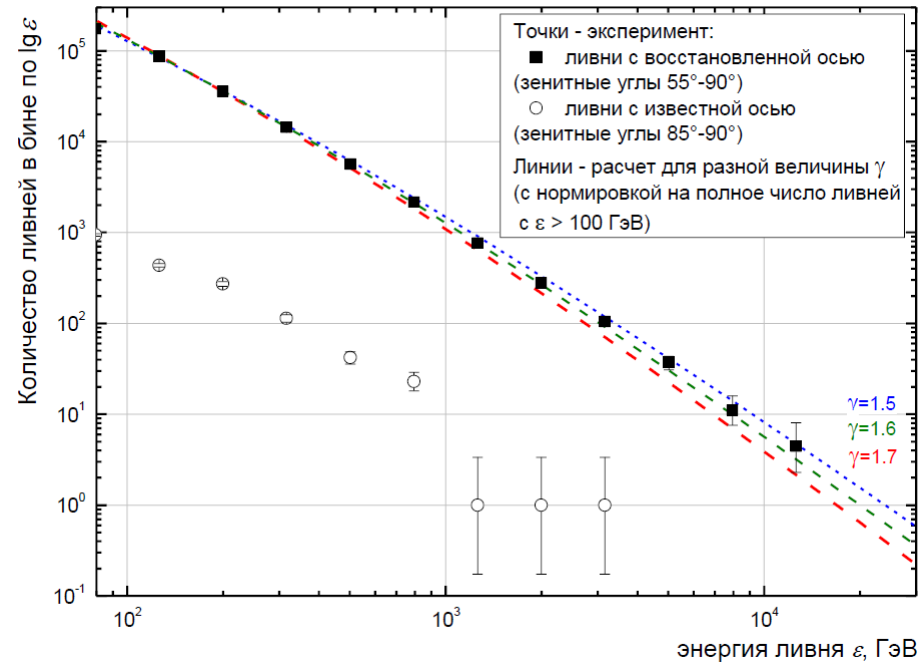
Основная проблема этого метода – узкий интервал линейности в зависимости плотности почернения РЭК от плотности прошедших частиц.



# Черенковский водный калориметр (МИФИ)



Пример восстановления каскадной кривой ливня, инициированного мюоном.



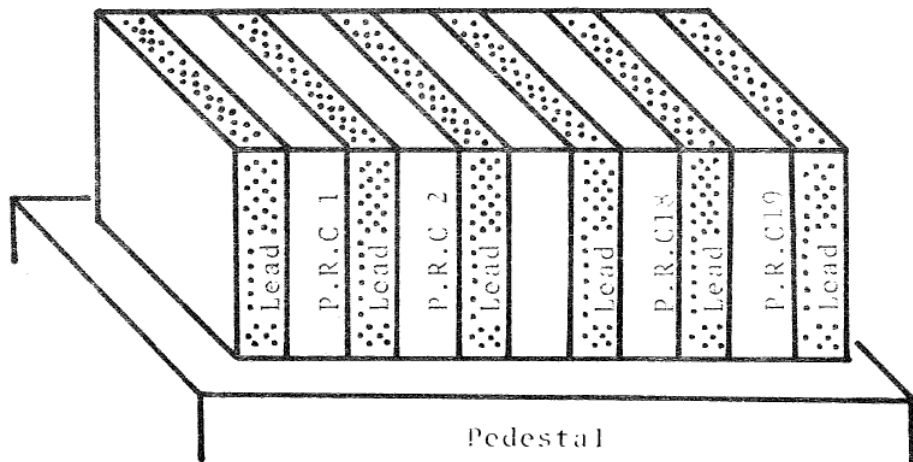
Экспериментальные дифференциальные энергетические спектры ливней от мюонов, измеренные в ЧВД НЕВОД.

# Прототип параметра – MUTRON

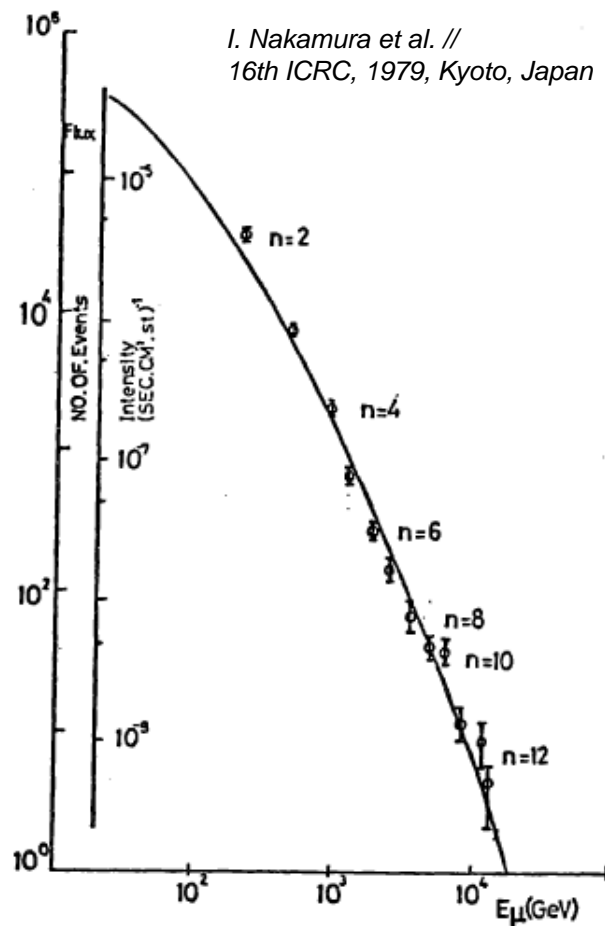
Происхождение названия метода: pair meter → пар-метр → параметр

Основные параметры:  $\delta_E \propto \sqrt{137/T}$  и  $N_{\text{слоев}} \sim 100$

T. Kitamura et al. // 14th ICRC, 1975, Munich, Germany



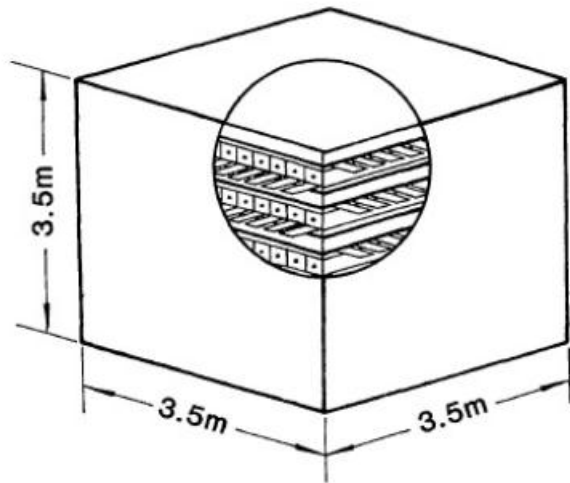
20 слоев по 5 см свинца,  
пропорциональные счетчики



The observed muon energy spectrum measured by operating the pair meter alone.

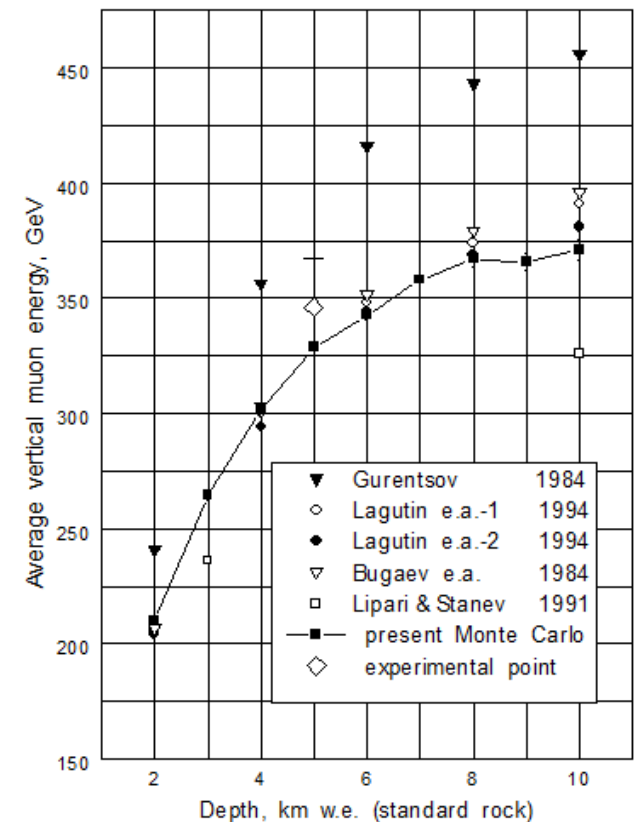
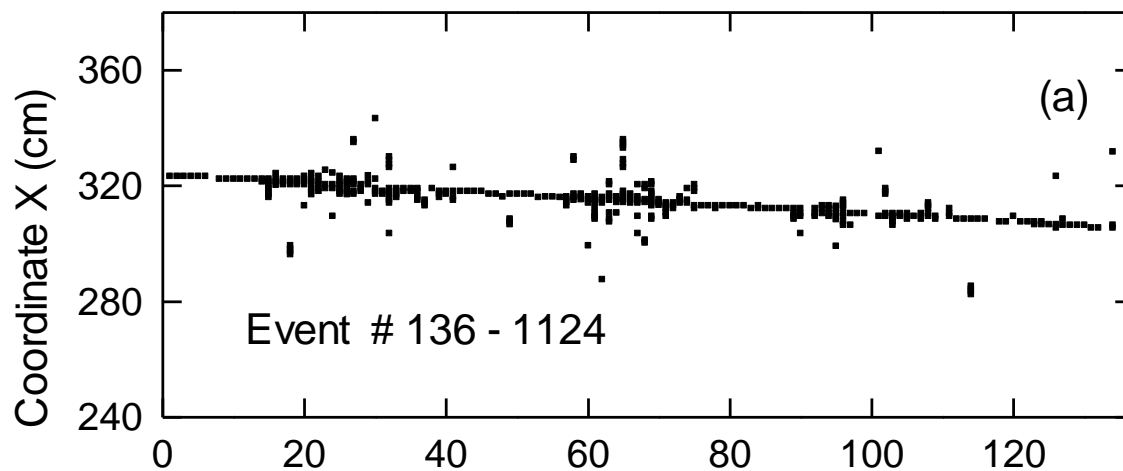
# Метод параметра (NUSEX)

Первая экспериментальная оценка энергии мюонов на больших глубинах:  
C. Castagnoli et al. // Astropart. Phys., 6 (1997) 187



Параметры спектра мюонов (средняя энергия и показатель наклона) оценивались из распределения событий по числу и мощности вторичных каскадов

136 слоев по 1 см стали, стримерные трубки

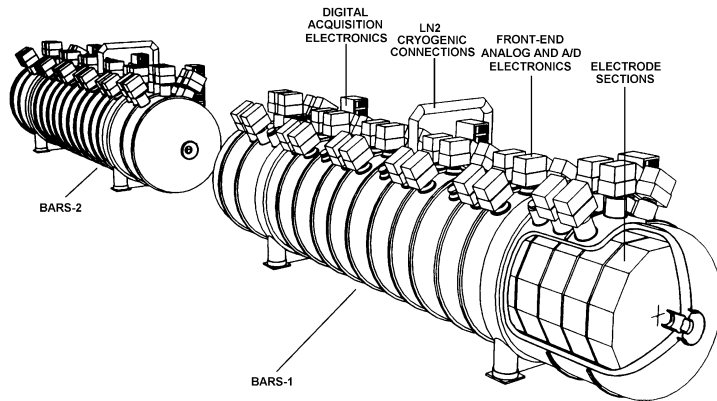


# Метод параметра (БАРС)

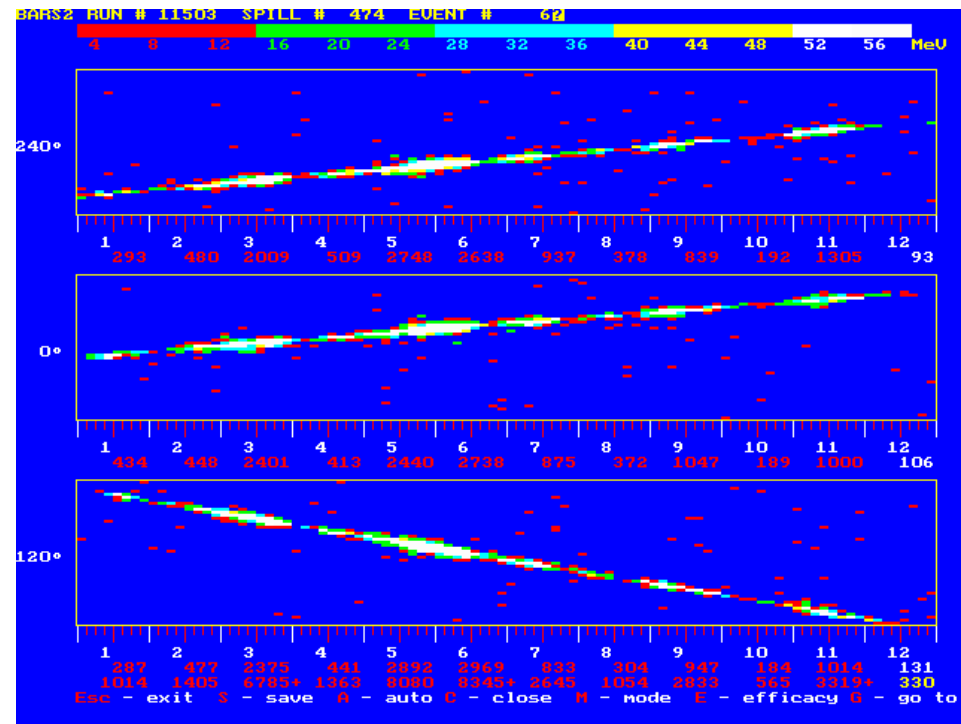
Одно из первых применений крупного ускорительного детектора для эксперимента в космических лучах:

S.V. Belikov et al. // Preprint IHEP 96-65, 1996

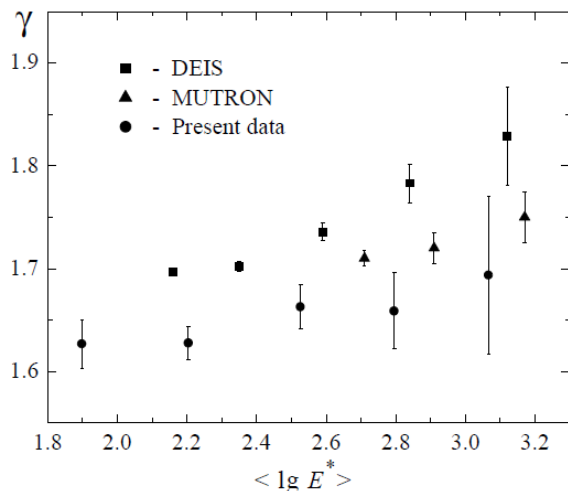
V.B. Anikeev et al. // Proc. 27th ICRC, Hamburg, Germany, 2001, v. 3, p. 958



Опробованы всевозможные варианты методики параметра, оценены параметры спектра мюонов космических лучей



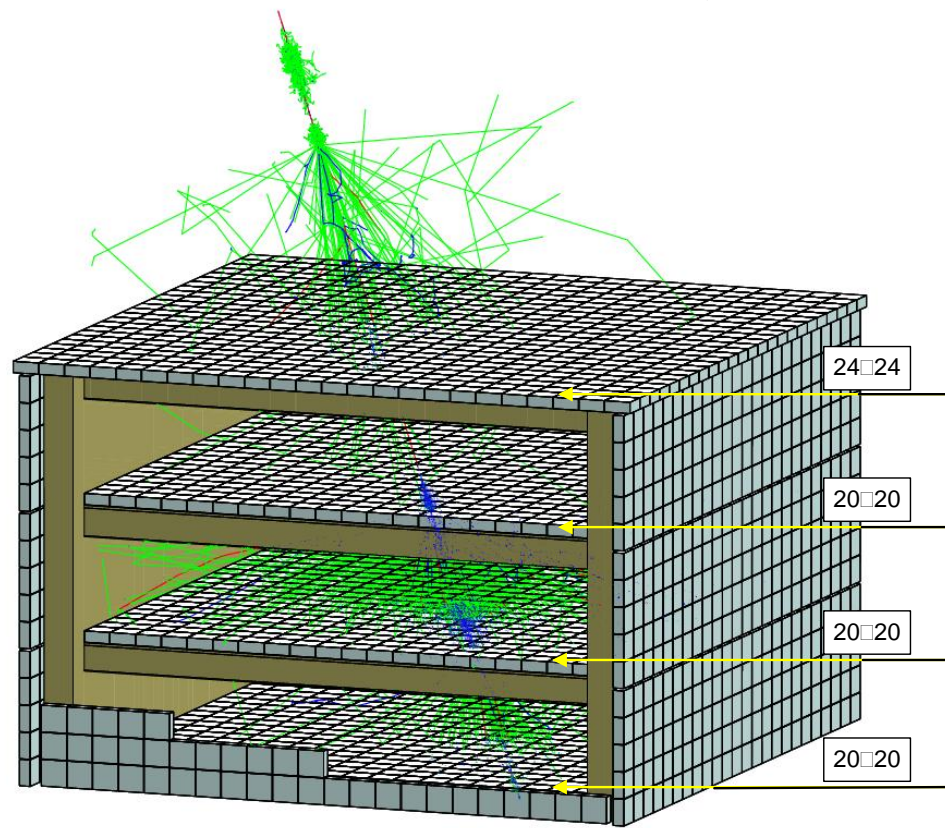
288 слоев жидкоаргоновых ионизационных камер



Оценки показателя интегрального спектра родительских частиц мюонов в верхней части атмосферы

# Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (БПСТ)

эффективная толщина грунта над телескопом –  $850 \text{ г/см}^2$ ,  $E_{\mu} > 220 \text{ ГэВ}$

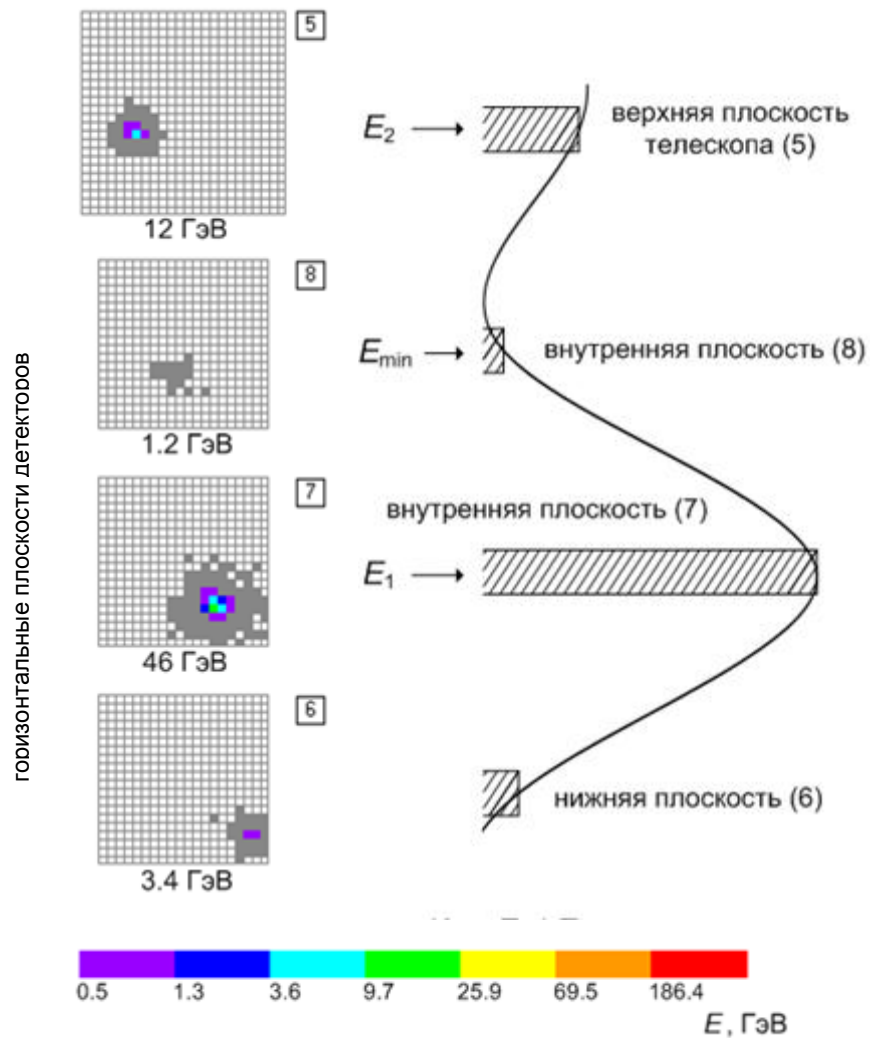


здание телескопа  $17 \times 17 \times 11 \text{ м}^3$

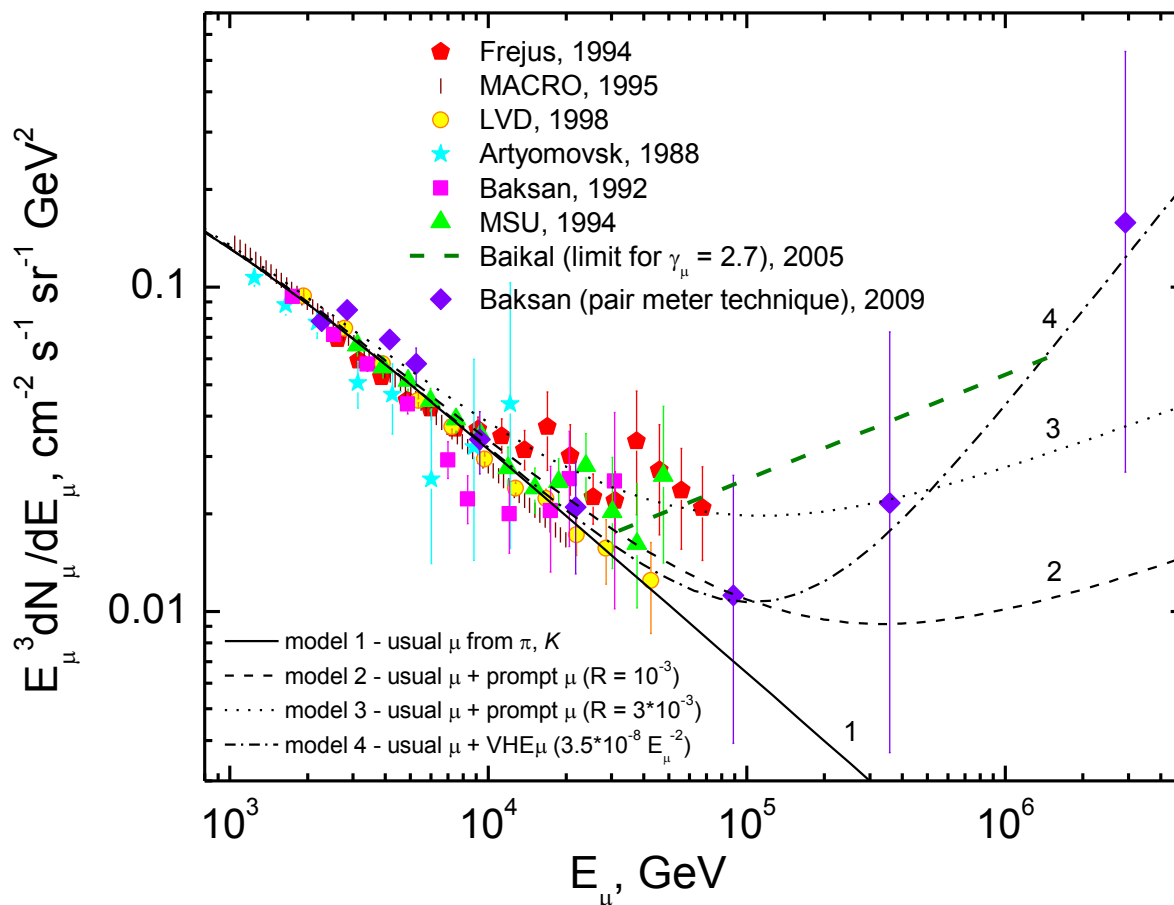
3150 детекторов  $70 \times 70 \times 30 \text{ см}^3$   
(жидкий сцинтиллятор)

порог срабатывания – 12.5 МэВ (“да-нет”)  
измерение энерговывделений – 0.5-600 ГэВ

RUN 516828 кадр 10093



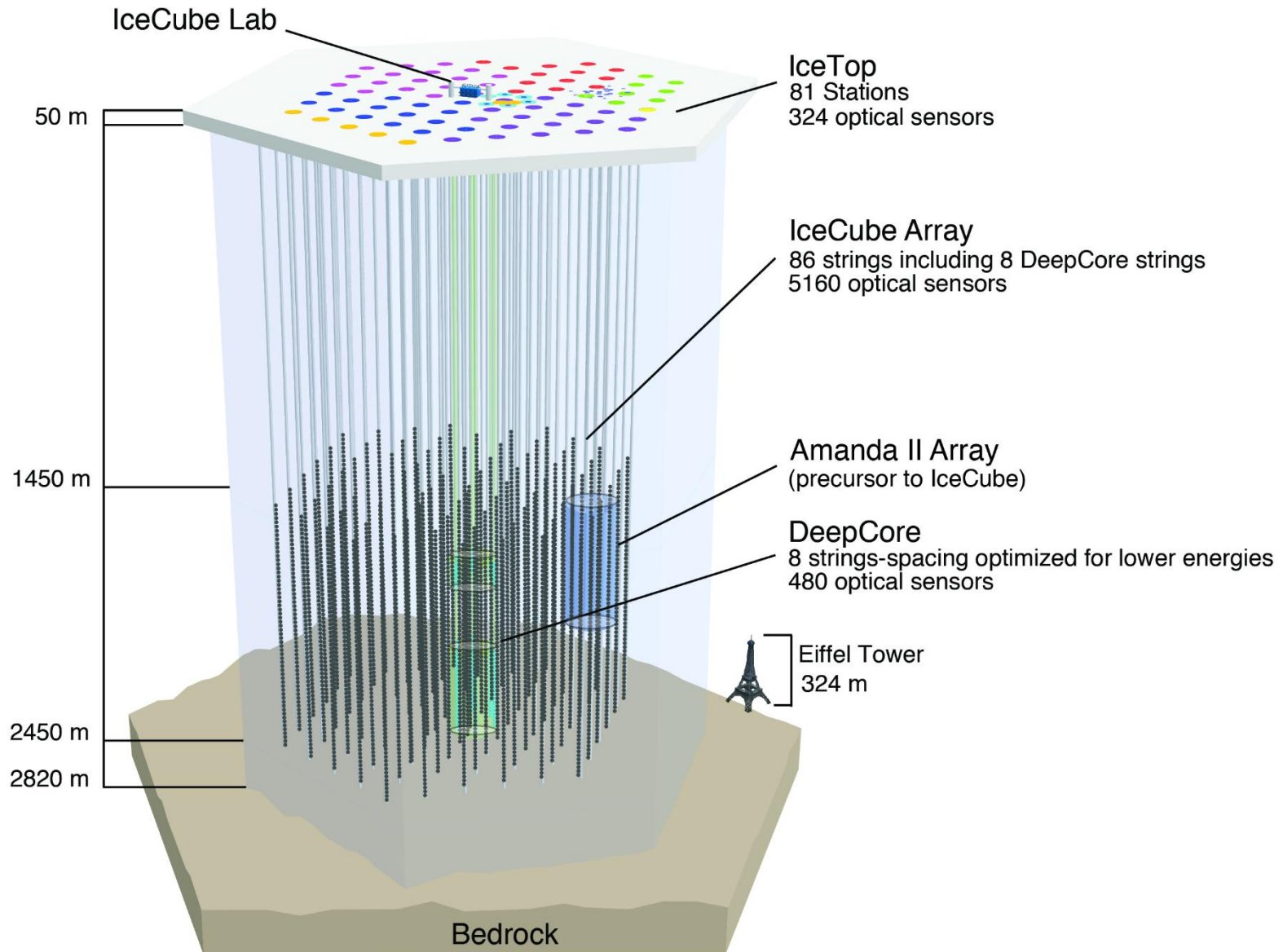
# Дифференциальные спектры мюонов на уровне моря (вертикаль) по данным различных экспериментов



Для калориметрического метода и метода параметра  
нужен большой объем детектора и хорошее разрешение

# Нейтринный телескоп IceCube

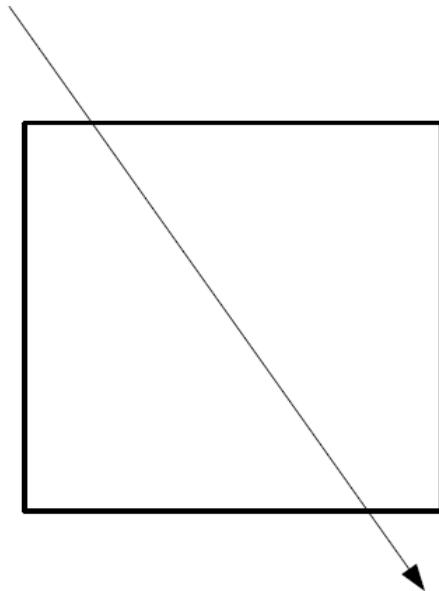
*icecube.wisc.edu*



# Типы событий с мюонами в детекторе IceCube

P. Berghaus, ICPPA-2015

## Low Energy



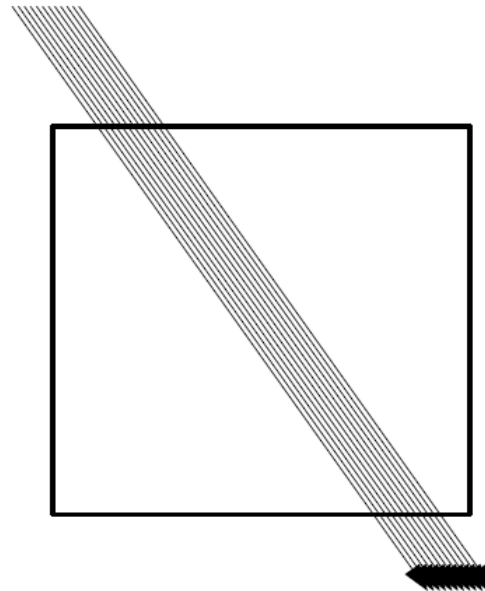
1,000/second

Minimum Ionizing

Single Muons

10-100 TeV CR

## Bundles



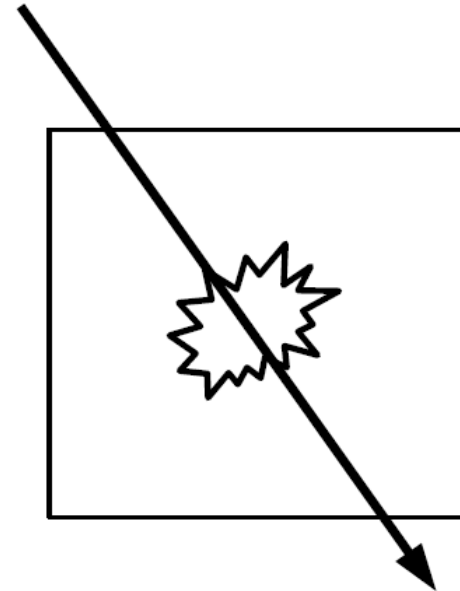
1/second

Minimum Ionizing

20-10,000 Muons

1 PeV-1 EeV CR

## HE Muons



0.1/second

Stochastic

1 HE Muon, 10-100 others

100 TeV-10 PeV CR

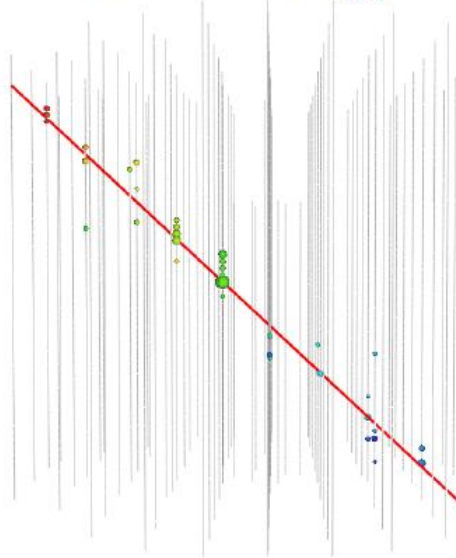


# Калориметрический метод (IceCube)

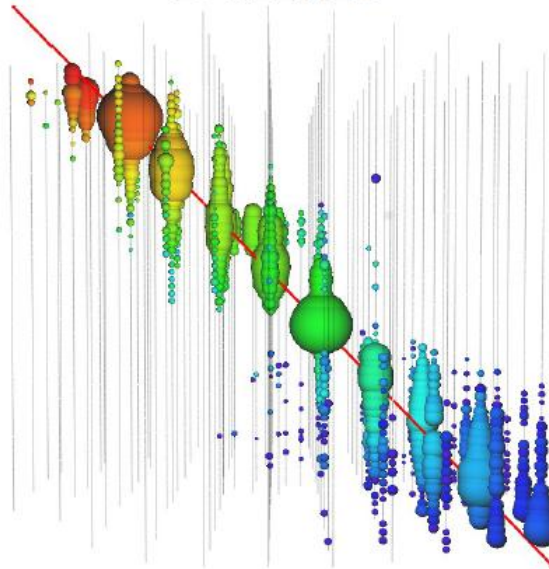
P. Berghaus, ICPPA-2015

## Experimental Data Events

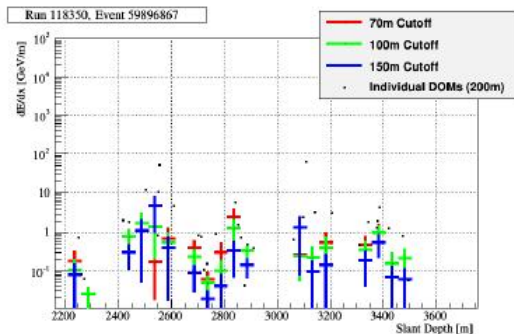
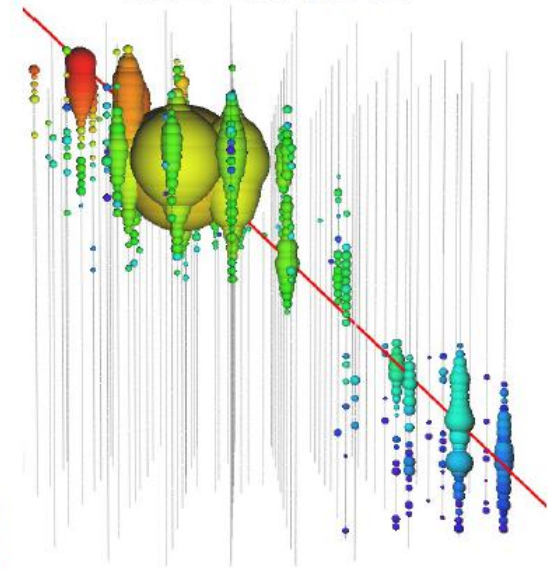
Low-Energy



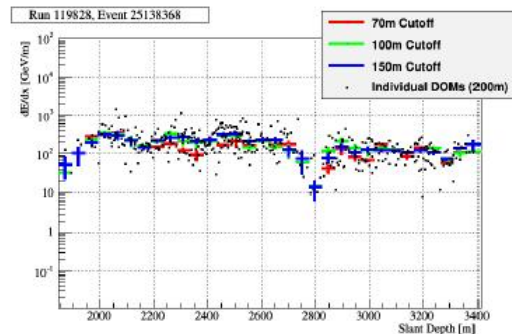
Bundle



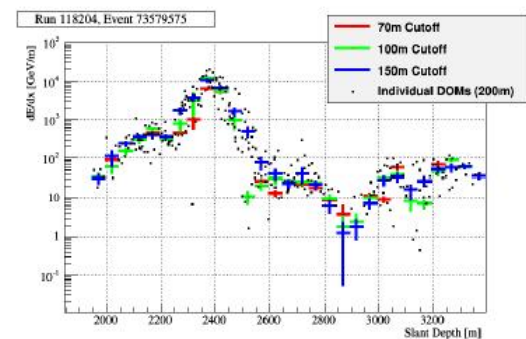
HE Muon



minimum ionizing track



smooth energy loss

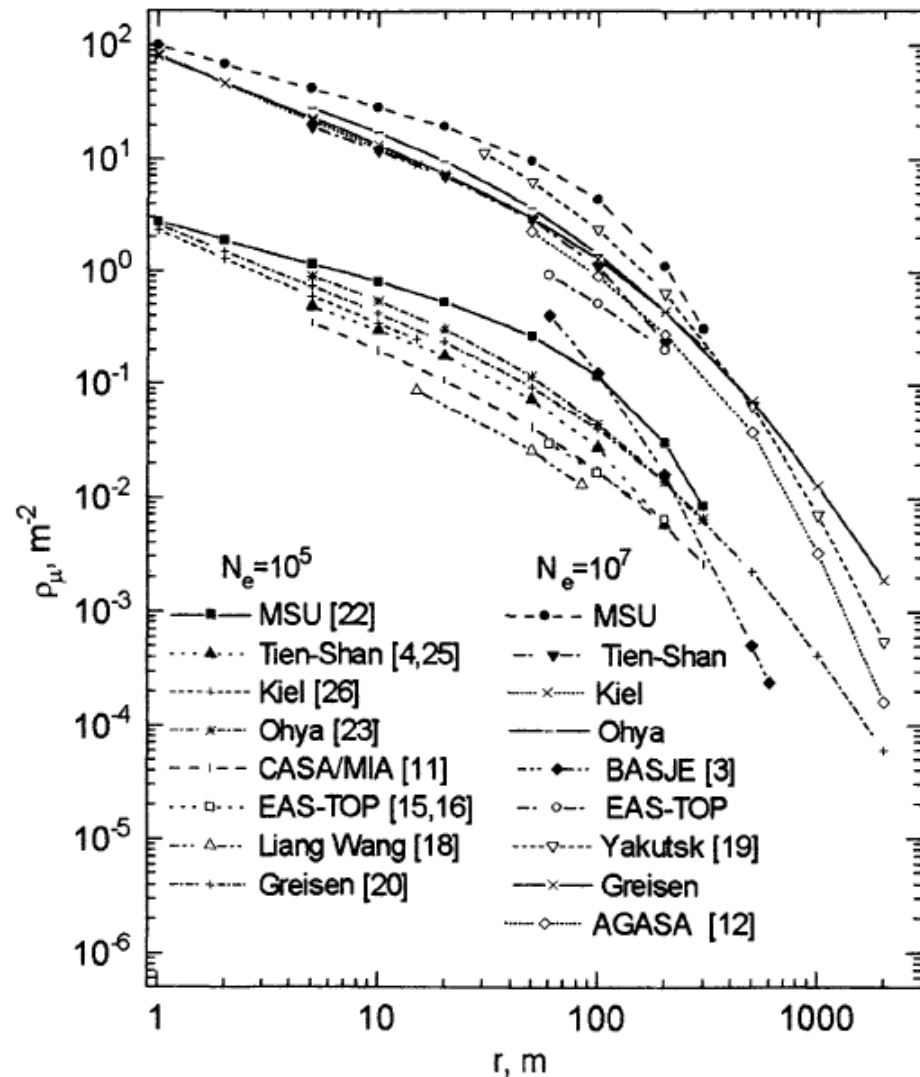


stochastic energy loss

# **Группы мюонов**

## **Muon bundles**

# Группы мюонов (Muon bundles)



ФПР мюонов ШАЛ с числом частиц до и после излома спектра

$$\rho_{\mu}(r) = kr^{-n} \left( 1 + \frac{r}{r_0} \right)^{-\beta}$$

$$n = 0.75; \beta = 2.5; r_0 = 280-450 \text{ м}$$

$$\rho_{\mu}(r) = kr^{-n} \exp\left(-\frac{r}{r_0}\right)$$

$$n = 0.7; r_0 = 80 \text{ м}$$

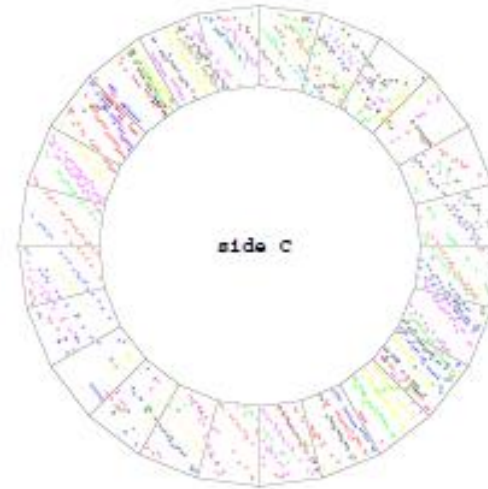
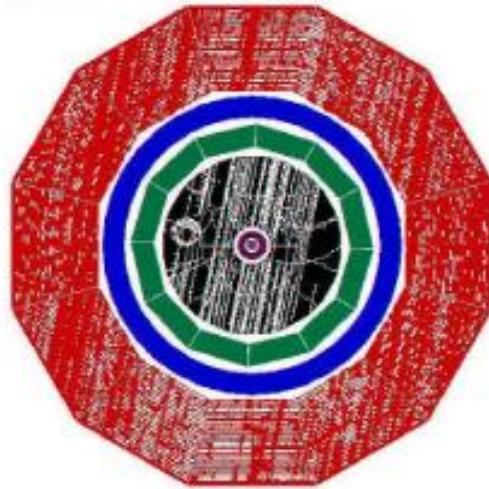
## Мюоны в составе ШАЛ

Основные детекторы –  
сцинтилляторы  
(измеряют энергосодержание,  
а не число мюонов)

Координатные детекторы:  
детекторы LEP,  
НЕВОД-ДЕКОР,  
детекторы LHC

# Excess of muon bundles with high multiplicity from ALEPH and DELPHI detectors data (LEP, CERN)

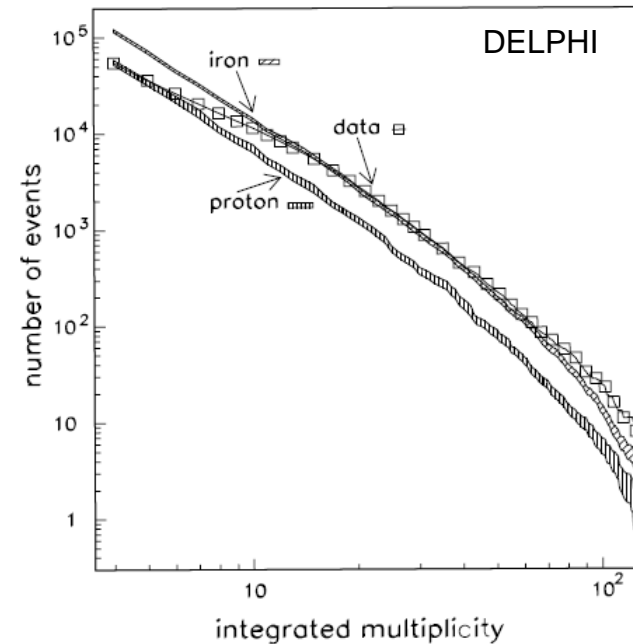
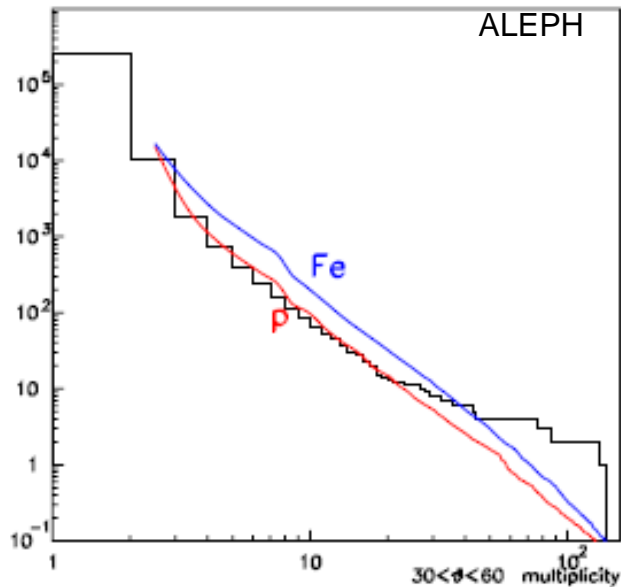
ALEPH



DELPHI

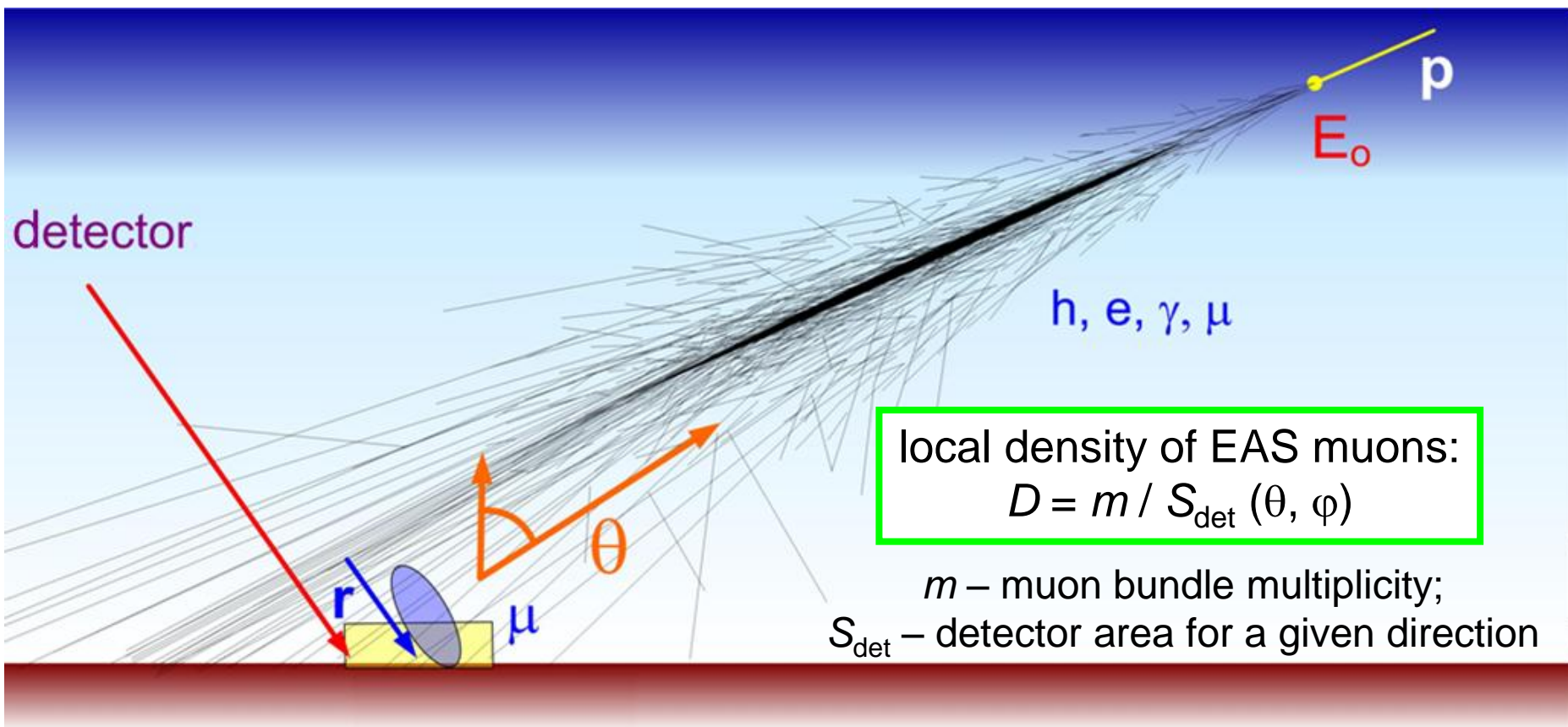
C. Grupen et al. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 175-176 (2008) 286

J. Abdallah et al. // Astroparticle Physics 28 (2007) 273



# Группы мюонов в наклонных ШАЛ

## Метод спектров локальной плотности мюонов (СЛПМ)

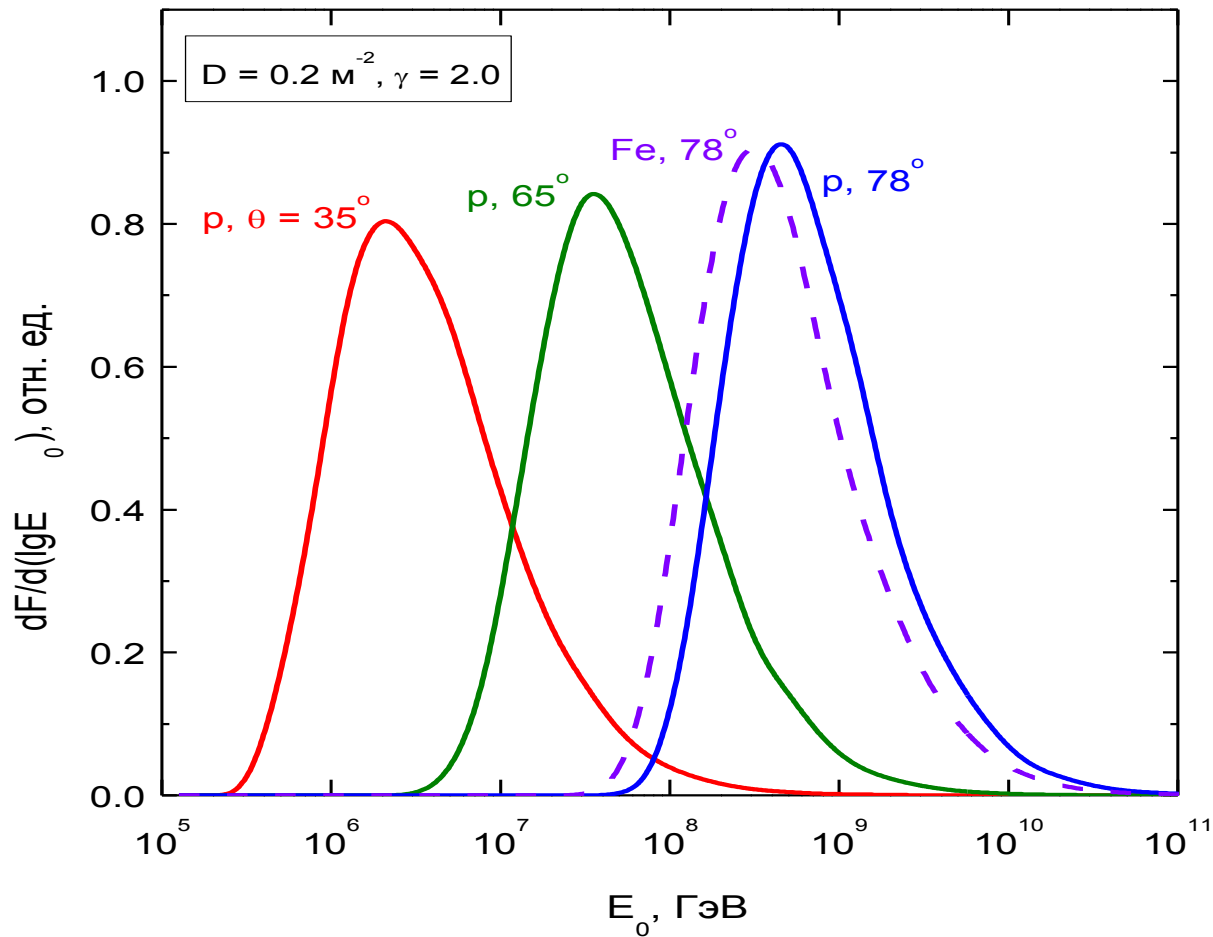


При больших зенитных углах:

- практически чистая мюонная компонента
- быстрое увеличение площади поперечного сечения ливня

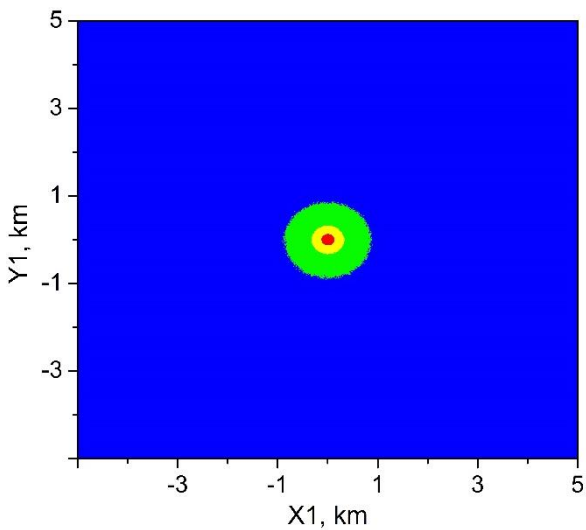
В событиях измеряется направление прихода ШАЛ и локальная плотность мюонов в точке наблюдения

# Вклад различных первичных энергий в события с фиксированной плотностью мюонов

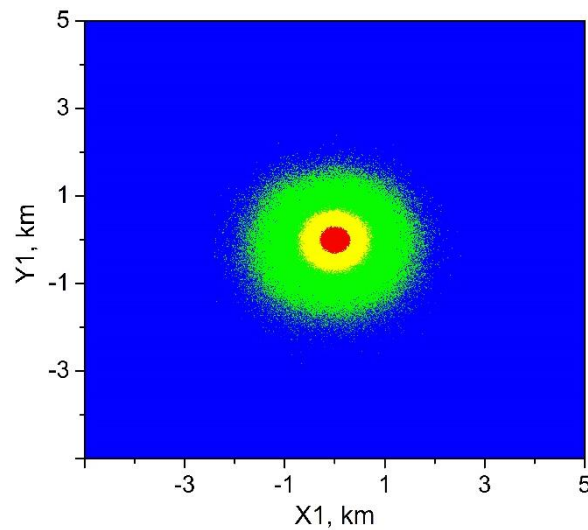


Измерение СЛПМ при разных зенитных углах обеспечивает перекрытие очень широкого интервала первичных энергий

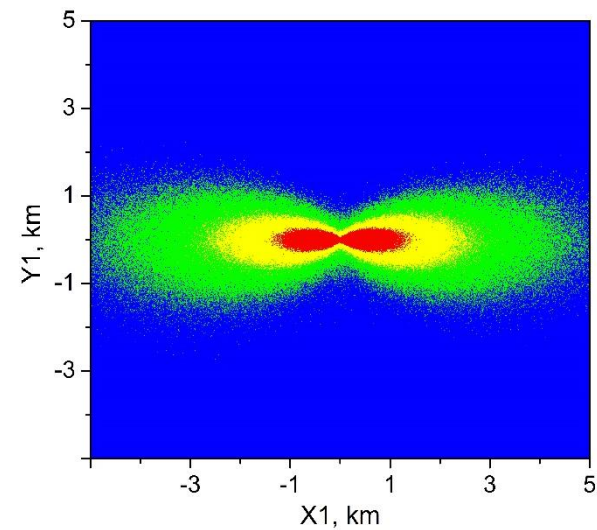
# Поперечное сечение мюонной компоненты ШАЛ



$\theta = 35^\circ$



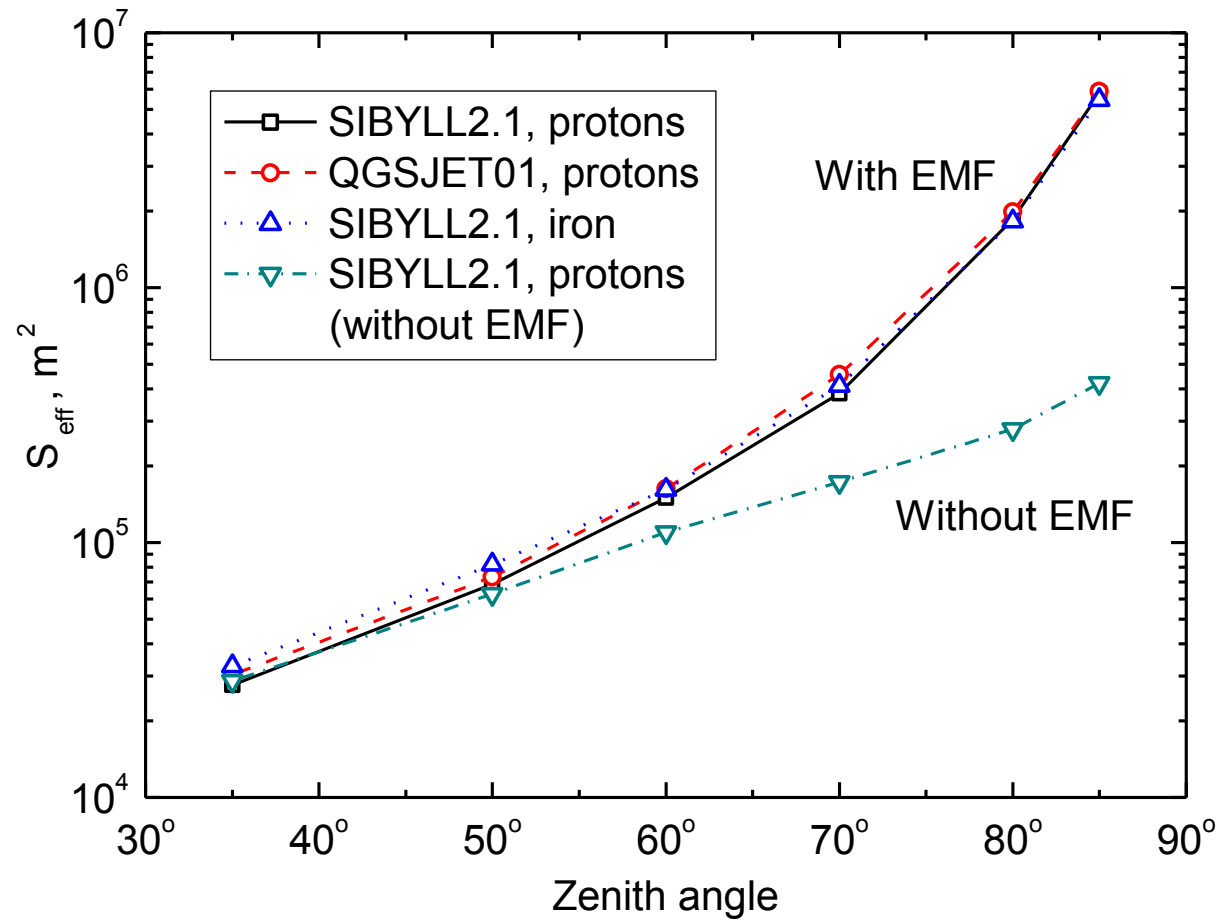
$\theta = 80^\circ$  (without EMF)



$\theta = 80^\circ$  with EMF

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

# Эффективная площадь собирания групп мюонов для метода СЛПМ



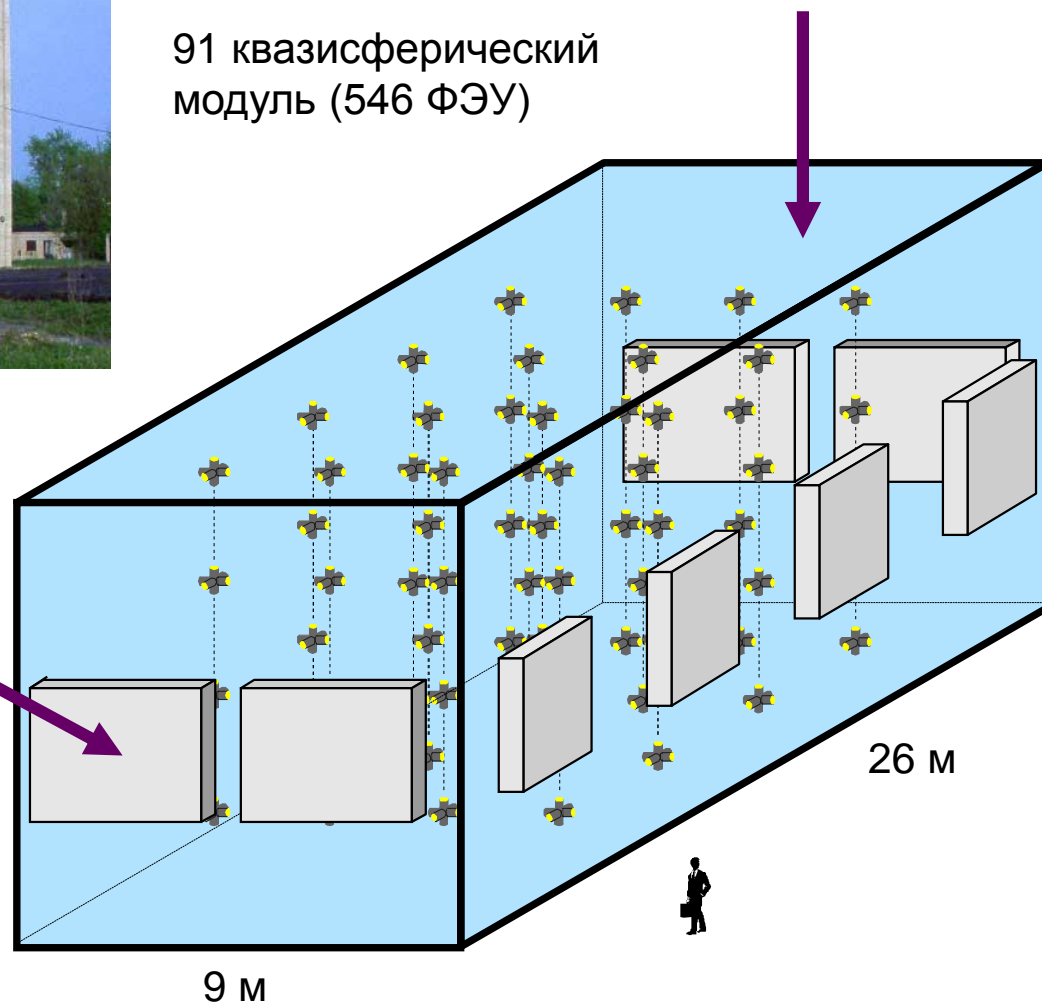


# Установка НЕВОД-ДЕКОР (МИФИ)



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

91 квазисферический  
модуль (546 ФЭУ)



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

8 супермодулей (пластиковые  
газоразрядные камеры)

# Супермодули (СМ) детектора ДЕКОР – в галерее вокруг водного объема ЧВД НЕВОД

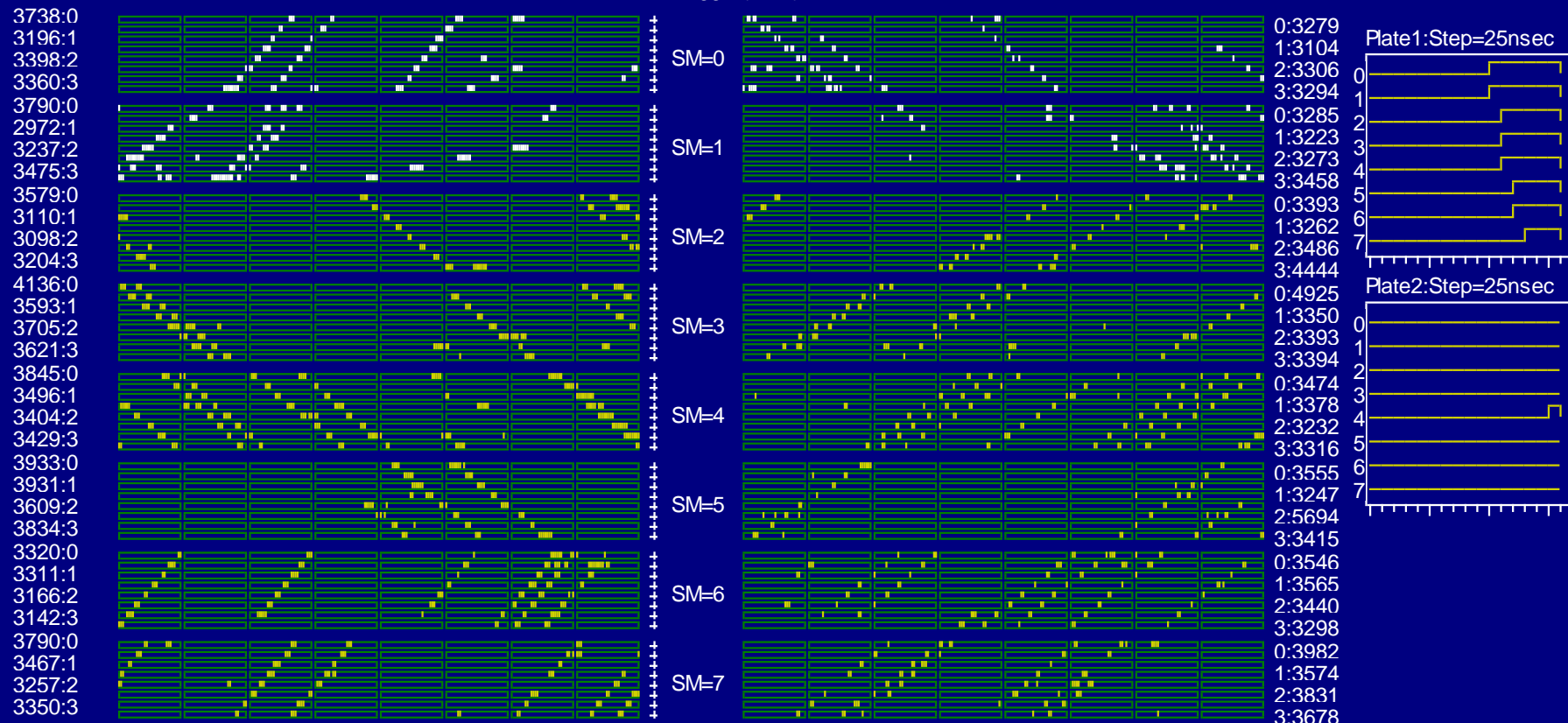


Один СМ имеет эффективную площадь  $8.4 \text{ м}^2$  и состоит из 8 плоскостей газоразрядных стримерных трубок. Плоскости оснащены двухкоординатной системой считывания сигналов с внешних стрипов.

# Группа мюонов, зарегистрированная детектором ДЕКОР

множественность  $m = 29$  частиц; зенитный угол  $\theta = 49^\circ$

Run 239 --- Event 595423 ----06-05-2012 01:34:04.17 Trigger(1-16):01111000 00010000 Weit\_Time:294.108 msec

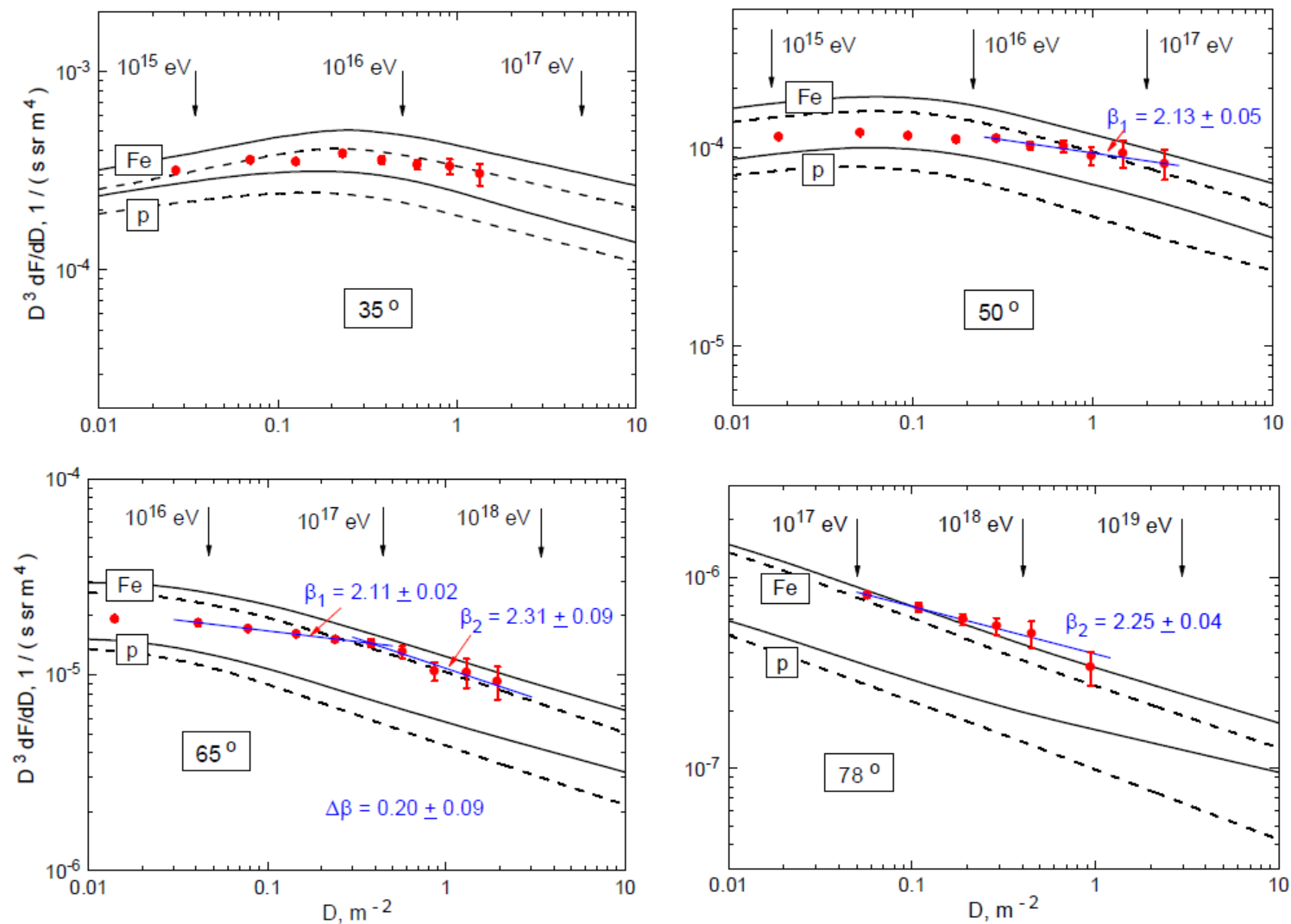


*Y-проекция*

*X-проекция*

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

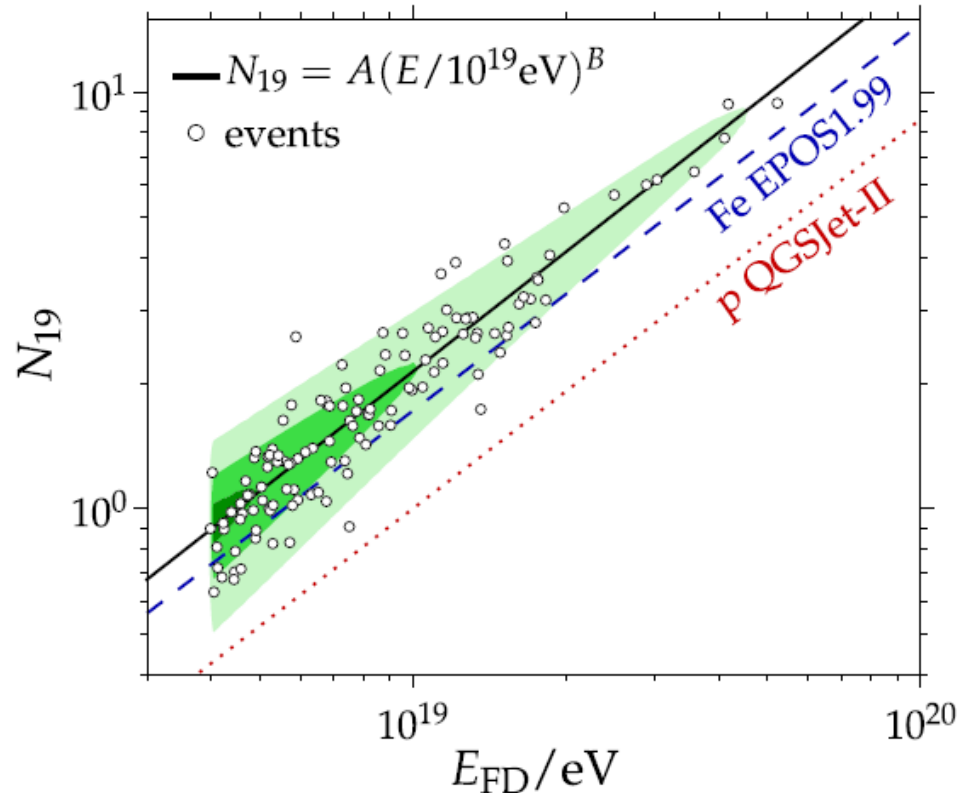
# Спектры локальной плотности мюонов (по данным ДЕКОР) для разных зенитных углов



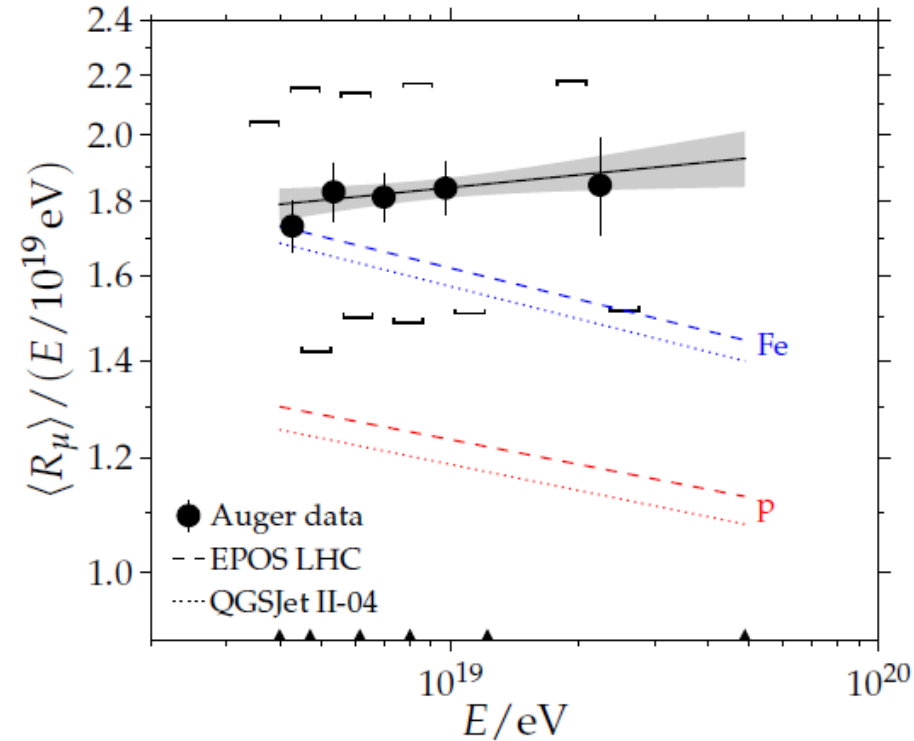
Точки – экспериментальные данные, сплошные и штриховые кривые – расчет с моделями QGSJET01 и SIBYLL 2.1, соответственно, в составе программы CORSIKA.

# Excess of the number of muons in highly inclined EAS from Pierre Auger Observatory data

G. Rodriguez, EPJ Web of Conf. 53 (2013) 07003



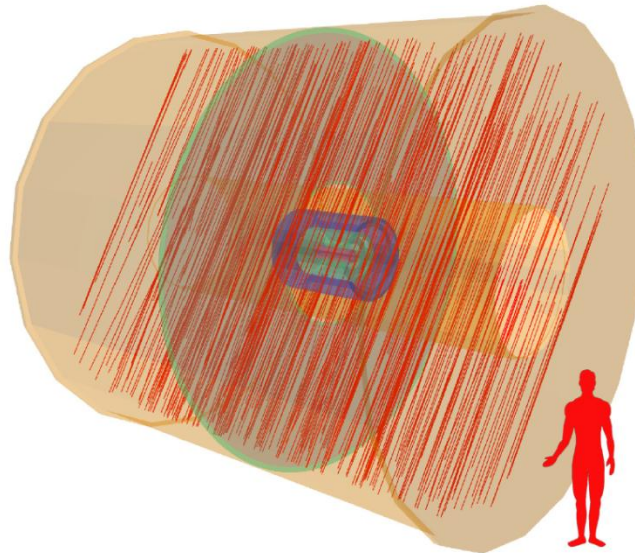
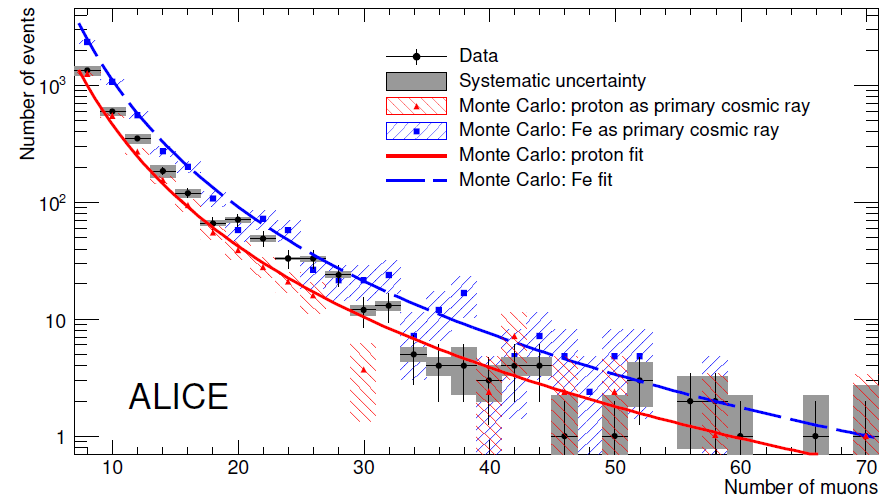
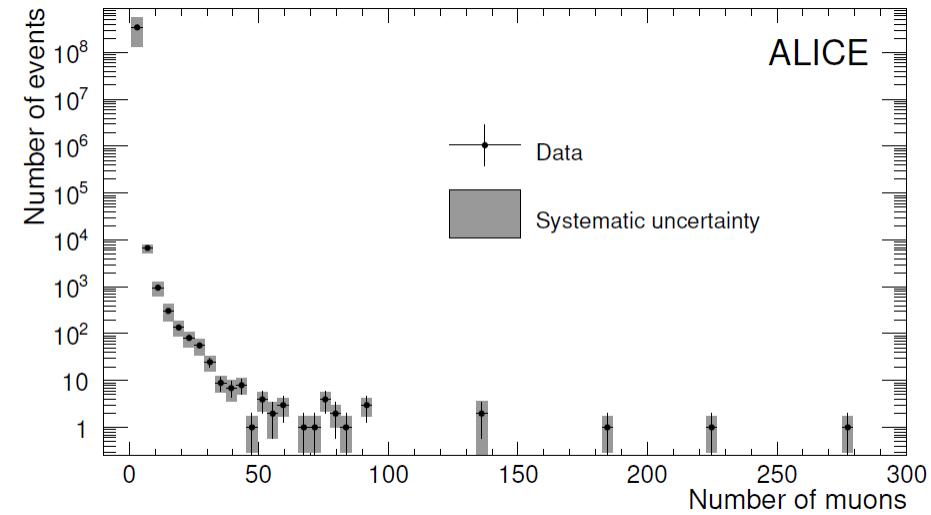
A. Aab et al. Phys. Rev. D 91, 032003 (2015)



Этот эффект – растущий с энергией первичных частиц избыток групп мюонов – получил название “мюонная загадка”.

# Excess of muon bundles with high multiplicity from ALICE detector data (LHC, CERN)

The ALICE collaboration // JCAP01 (2016) 032

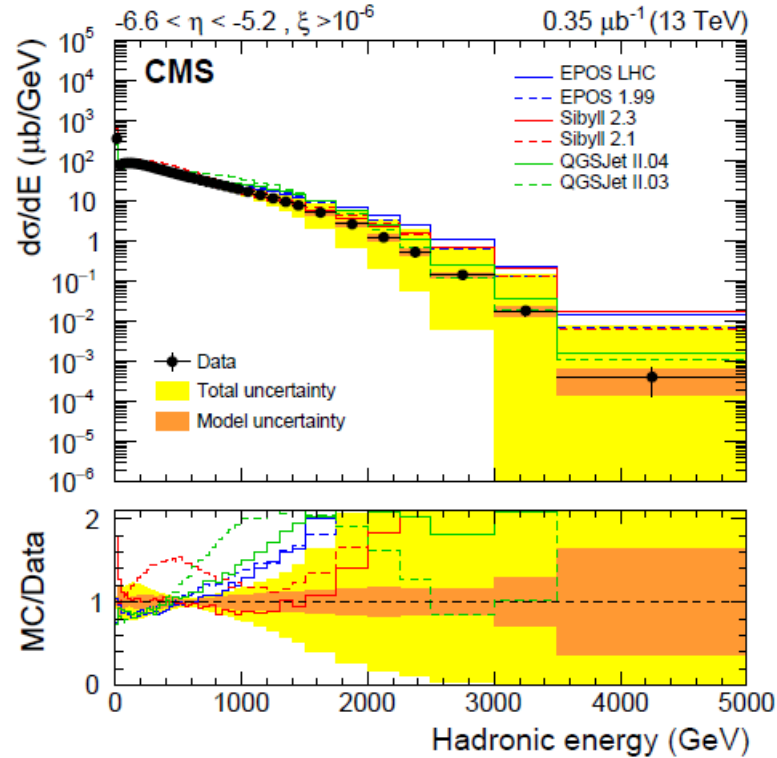


# Как решить “мюонную загадку”?

## 1. Улучшить расчеты

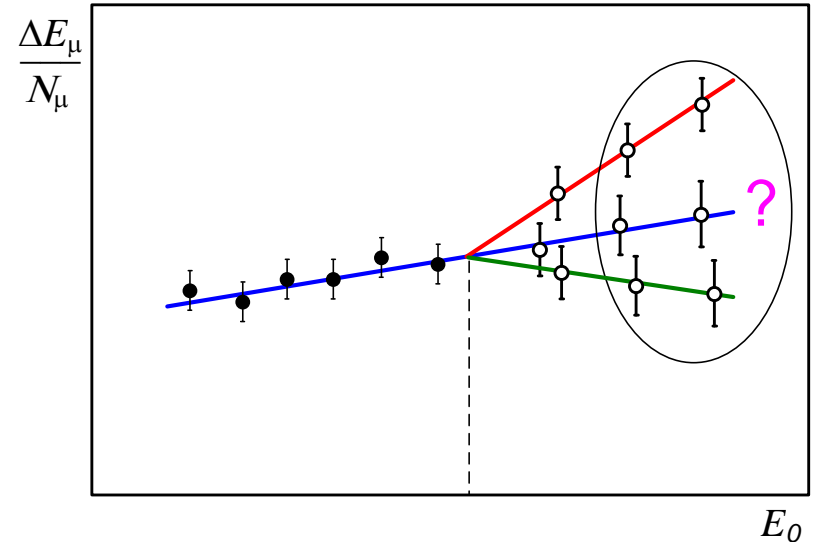
## 2. Измерить энерговыделение мюонных групп

CMS Collaboration // arXiv:1701.08695v1 [hep-ex]



The differential cross section for particle production as a function of energy measured in the CASTOR calorimeter.

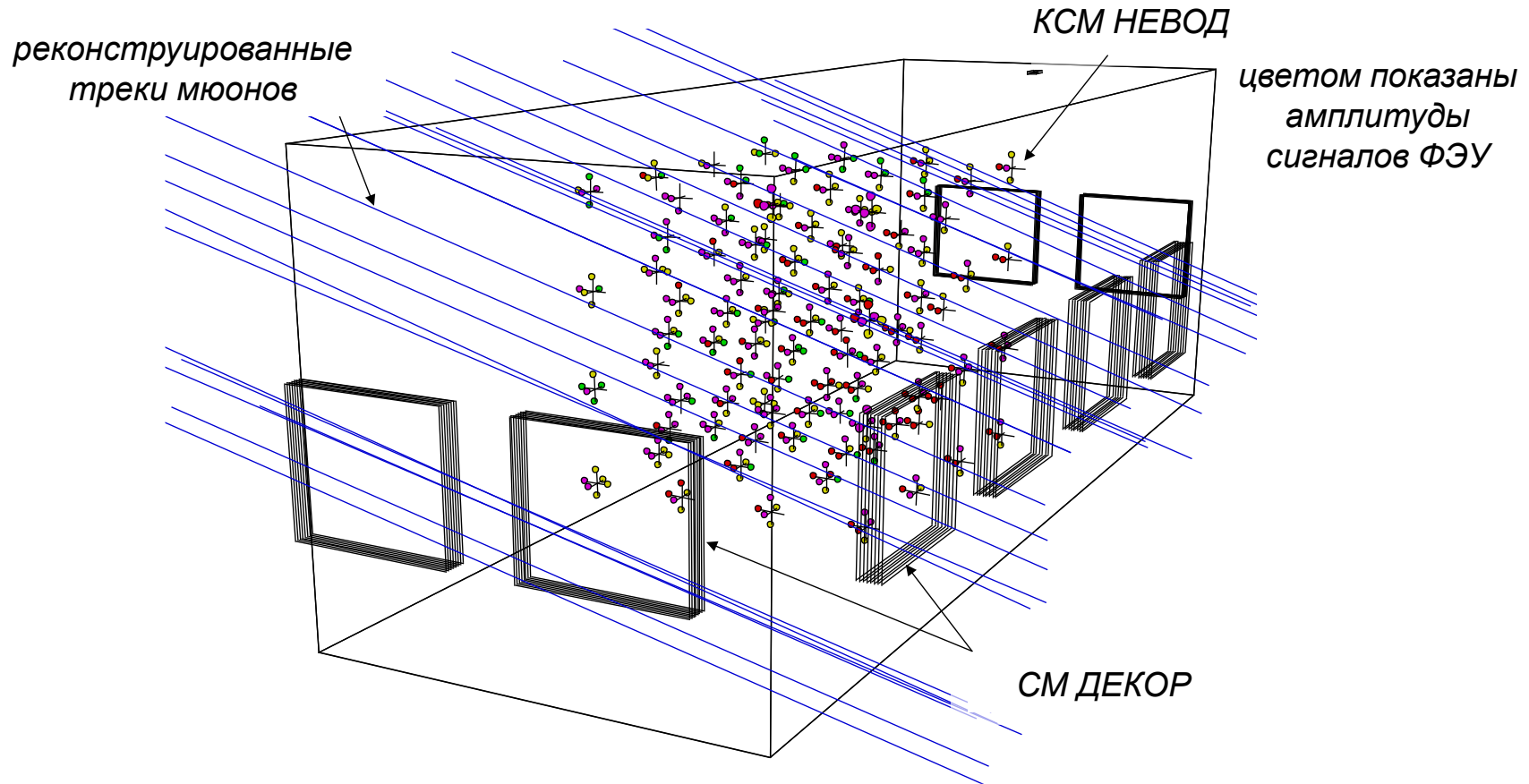
Средние потери мюонов в веществе:  
 $dE/dX \sim a + bE$ .



Зависимость удельного энерговыделения мюонных групп от энергии первичных частиц будет определяться причиной появления избытка мюонов:

- включением нового процесса генерации мюонов,
- изменением состава ПКЛ.

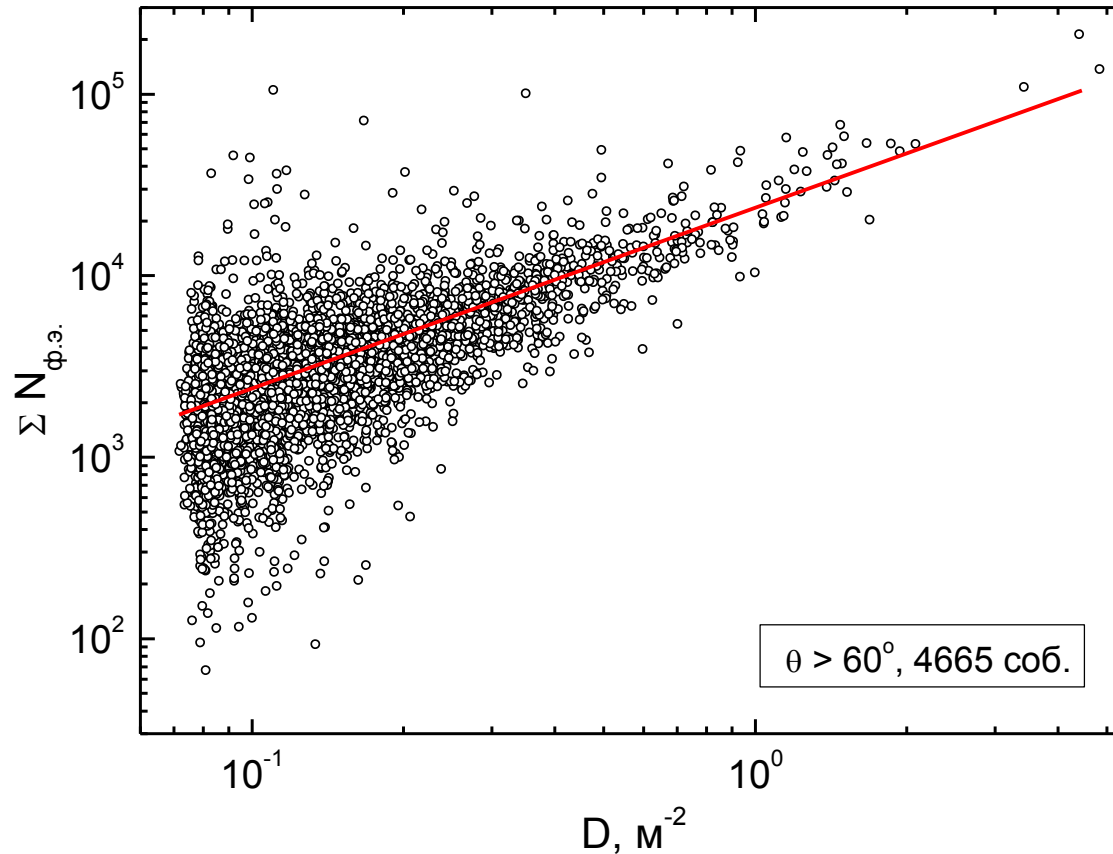
# Пример события с группой мюонов в экспериментальном комплексе НЕВОД-ДЕКОР



Плотность мюонов оценивается по данным установки ДЕКОР.  
Энерговыделение измеряется в черенковском водном калориметре НЕВОД.

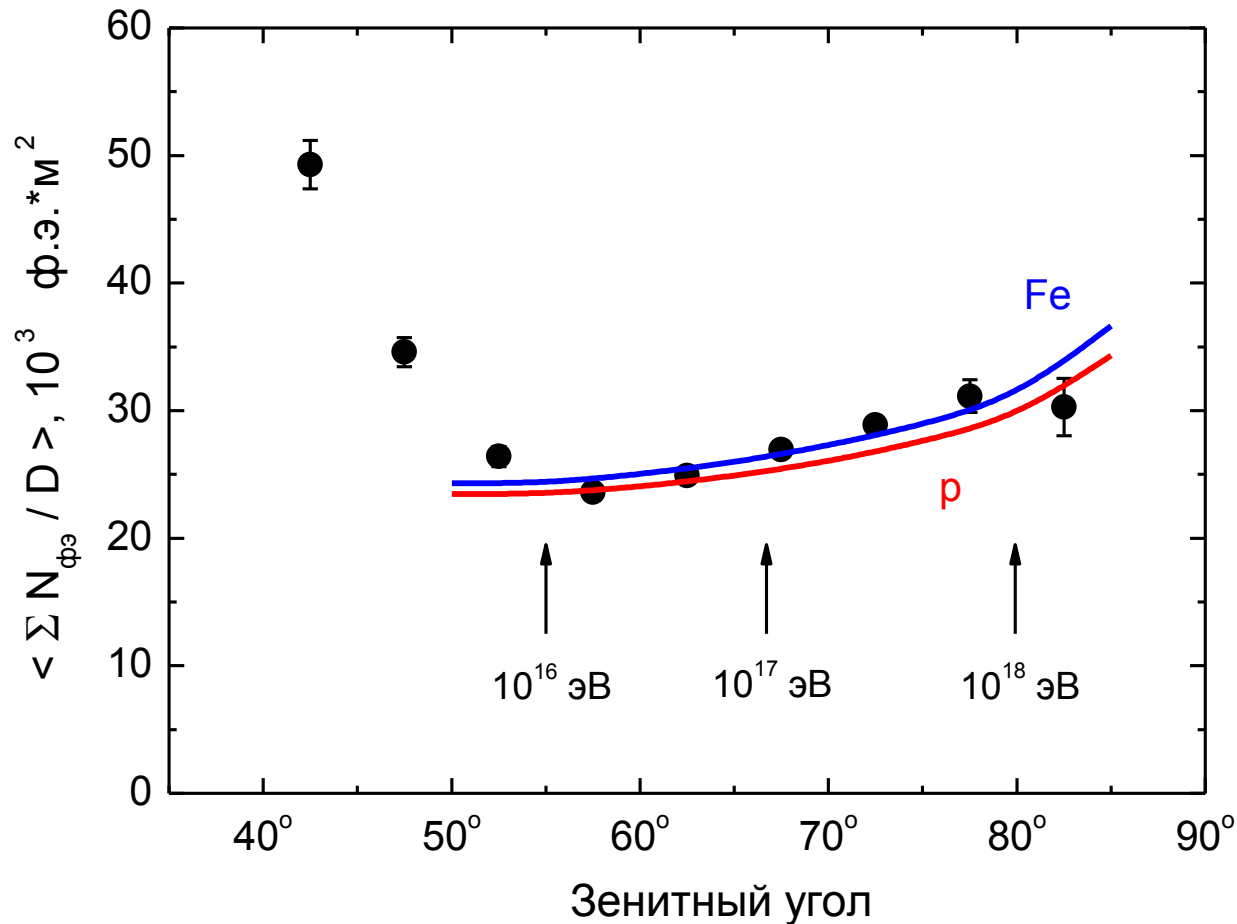


# Корреляции суммарного энерговыделения с плотностью мюонов



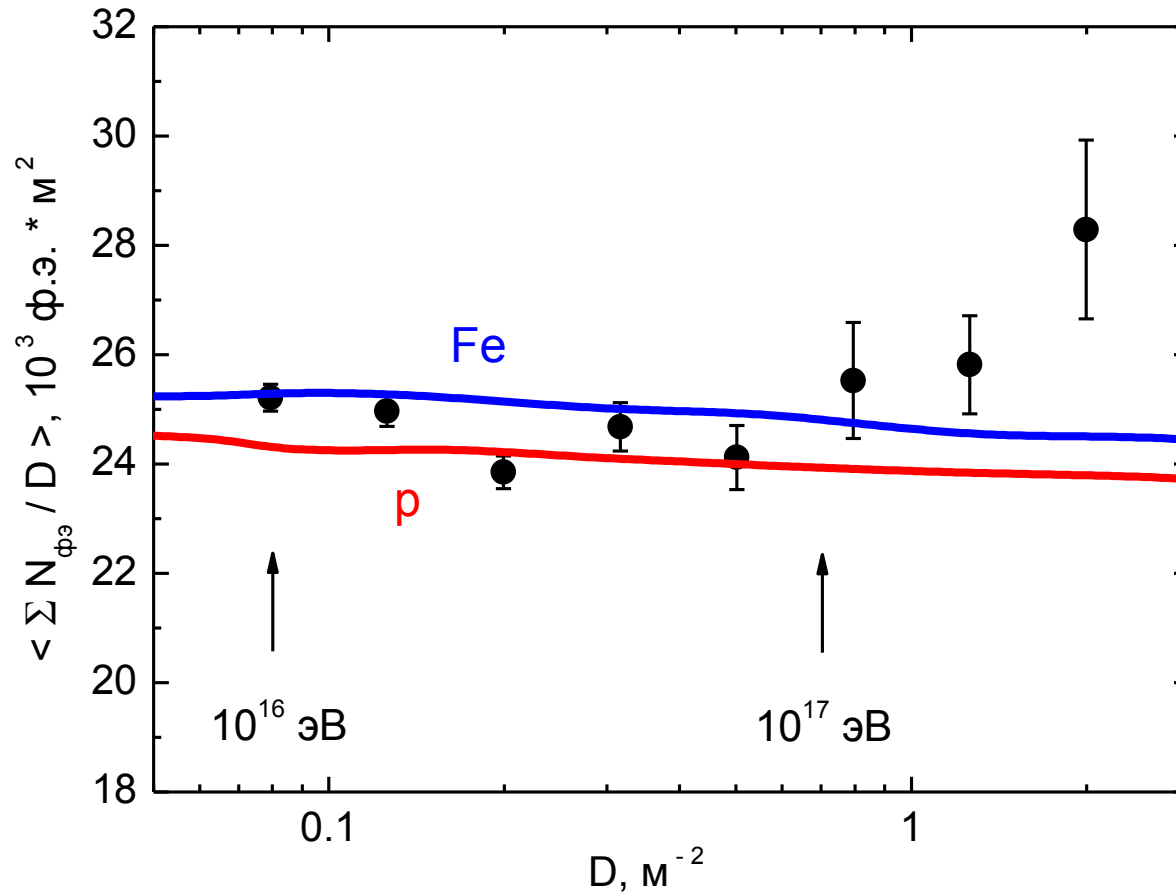
В первом приближении, суммарное энерговыделение пропорционально плотности мюонов в группе. Поэтому далее рассматривается удельное энерговыделение (т.е., нормированное на плотность мюонов).

# Зависимость среднего удельного энергосодержания групп мюонов от зенитного угла



При больших зенитных углах средняя энергия мюонов в группах достигает 500 ГэВ

# Зависимость удельного энерговыделения ОТ ПЛОТНОСТИ МЮОНОВ



Экспериментальные данные указывают на возможное увеличение удельного энерговыделения групп мюонов при плотностях  $> 1$  част./м<sup>2</sup>

# Заключение

Мюоны были, есть и будут одним из важнейших инструментов исследований как в физике частиц, так и в космических лучах, например, в гамма-астрономии для разделения  $\gamma$ -ШАЛ и  $h$ -ШАЛ.

Сегодня наиболее актуальна “мюонная загадка” – растущий с энергией ПКЛ избыток мюонов в ШАЛ.

Наиболее подходящим методом ее решения является измерение энерговыделения групп мюонов. Для этого необходимы два детектора, независимо измеряющие множественность мюонов в группе и их энерговыделение.

Спасибо за внимание!

