

Научная сессия ОФН РАН "100-летие Г.Т. Зацепина"

Семинар ИЯИ РАН "Нейтринная и ядерная астрофизика" им. Г.Т. Зацепина

8-е Зацепинские чтения

Мюоны космических лучей высоких и сверхвысоких энергий

А.Г. Богданов, А.А. Петрухин

НОЦ НЕВОД НИЯУ МИФИ

Москва, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 24 и 26 мая 2017 г.

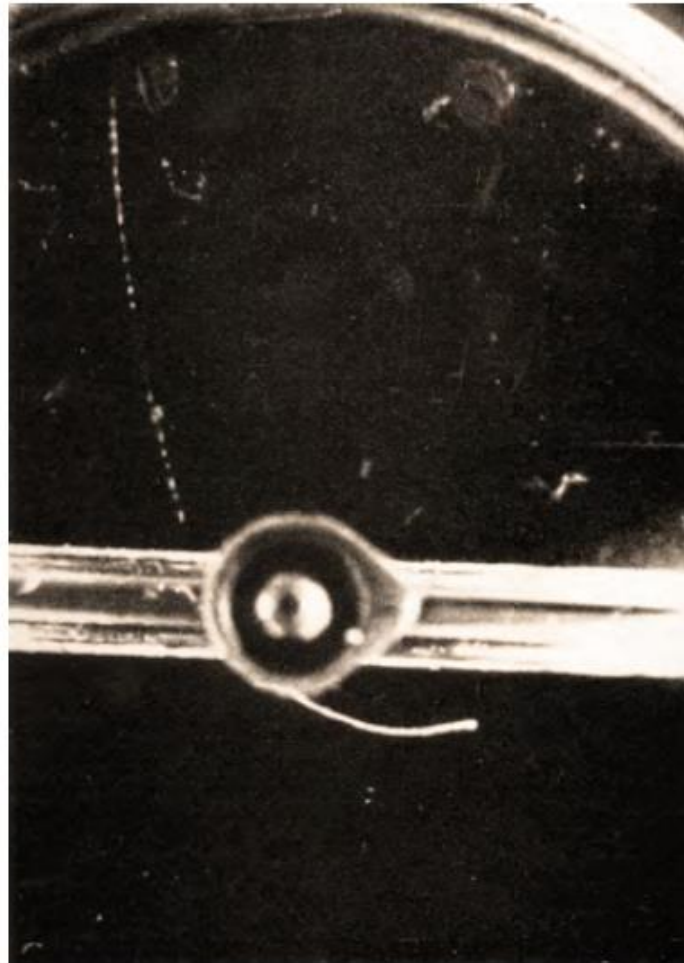
Открытие мюона

www-zeuthen.desy.de/exps/2012_VictorHess/

1936 SH Neddermeyer, CD Anderson: Discovery of the muon

In a cloud chamber exposure with a 1 cm-thick platinum plate in the centre, 6000 photographs were taken. Anderson and Neddermeyer found about 25 events where the energy loss in the platinum absorber was much smaller than measured for electrons or positrons. Since the mass should be between the electron and proton masses, they first called it the mesotron.

For several years, it was assumed that this particle was the predicted Yukawa particle.



Seth H. Neddermeyer, Phys. Rev., Vol. 51, 884

1937

Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles

SETH H. NEDDERMEYER AND CARL D. ANDERSON
California Institute of Technology, Pasadena, California
(Received March 30, 1937)

Measurements¹ of the energy loss of particles occurring in the cosmic-ray showers have shown that this loss is proportional to the incident energy and within the range of the measurements, up to about 400 Mev, is in approximate agreement with values calculated theoretically for electrons by Bethe and Heitler. These measurements were taken using a thin plate of lead (0.35 cm), and the observed individual losses were found to vary from an amount below experimental detection up to the whole initial energy of the particle, with a mean fractional loss of about 0.5. If these measurements are correct it is evident that in a much thicker layer of heavy material multiple losses should become much more important, and the probability of observing a particle loss less than a large fraction of its initial energy should be very small. For the purpose of testing this inference and also for checking our previous measurements² which had shown the presence of some particles less massive than protons but more penetrating than electrons obeying the Bethe-Heitler theory, we have taken about 6000 counter-triggered photographs with a 1 cm plate of platinum placed across the center of the cloud chamber.

Stereographic photograph of a cloud chamber exposure. A muon enters the chamber from above and comes to rest below.

Процессы взаимодействия мюонов

с атомами – поляризация, возбуждение, ионизация;
с ядрами – упругое рассеяние, фотоядерное взаимодействие,
тормозное излучение, образование электрон-позитронных пар

MU-47

Proc. 11th Int. Conf. on Cosmic Rays, Budapest 1969

INVESTIGATION OF NUCLEAR INTERACTION OF MUONS AT A DEPTH OF 316 m w.e. UNDERGROUND

L. B. BEZRUKOV, V. I. BERESNEV, M. I. NYUNIN,
O. G. RYAZHSKAYA, G. T. ZATSEPIN

P. N. Lebedev Institute of Physics, Academy of Sciences of the USSR,
Moscow, USSR

Nuclear interaction of muons has been studied by means of scintillation counters detecting the size of the showers and neutrons produced in the showers. Nuclear and electromagnetic showers can be separated. The spectrum of nuclear showers has been obtained for the energy range from 10^{10} to $2 \cdot 10^{14}$ eV. The experimental results in this energy range can be explained in terms of the HAND theory under the assumption of a constant photonuclear cross-section $\sigma_p = (1.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-28}$ cm² per nucleon.

Up to now, investigation of the nuclear interactions of cosmic ray muons has had three directions: the first – studies of nuclear "stars" by means of nuclear emulsion underground; the second – investigation of penetrating showers produced by muons in cloud chambers and counters; the third – studies of neutrons produced in various substances by muons [1–6]. The present work describes an experiment which has been made to study nuclear (penetrating) showers and neutrons produced by muons simultaneously. An arrangement has been operated in a salt mine at a depth of 316 m w.e. below the surface of the earth. The apparatus consists of three layers of liquid scintillation counters (Fig. 1). At the top and the bottom there are

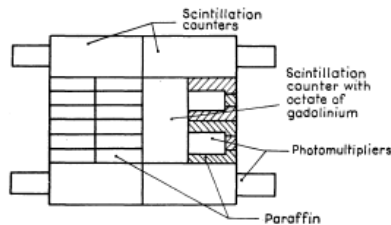


Fig. 1. The experimental arrangement

four counters of size 70 cm × 70 cm × 32 cm which detect charged particles. Each of the counters is viewed by a single photomultiplier. The inner surface of the counters is covered by white reflecting enamel. The coefficient of reflection of the enamel is about 0.9. The scintillator is made of 1 g/litre of PPO and 0.03 g/litre of POPOP dissolved in pure white-spirit [7].

R.I. Enikeev et al.// 18th ICRC, 1983, Bangalore, India

MN 5-9

82

STUDY OF INELASTIC INTERACTIONS OF MUONS WITH NaCl NUCLEI IN ENERGY RANGE UP TO 4 TeV

Enikeev R.I., Korolkova E.V., Kudryavtsev V.A.,
Malgin A.S., Ryazhskaya O.G., Zatsepin G.T.

Institute for Nuclear Research of the Academy of
Sciences of the USSR, 60th October Anniversary
prospect, 7a, Moscow 117312, USSR

The electromagnetic and nuclear cascades generated by muons have been measured at the depth of 550 m.w.e. with 100-ton scintillation detector during 10977 hours. Muon inelastic scattering cross section $\sigma_{\mu N}$, shadowing coefficient $\alpha(\nu)$ and nuclear losses $b_{\text{nuc1}}(E_\mu)$ have been obtained from these data.

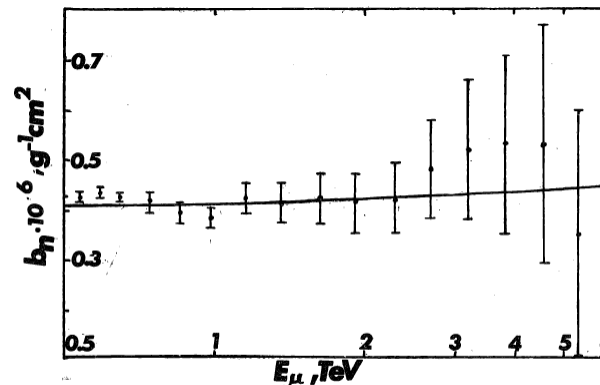


Fig.2. The inelastic scattering losses of muons: solid curve – calculation [7];
| – our experimental data.

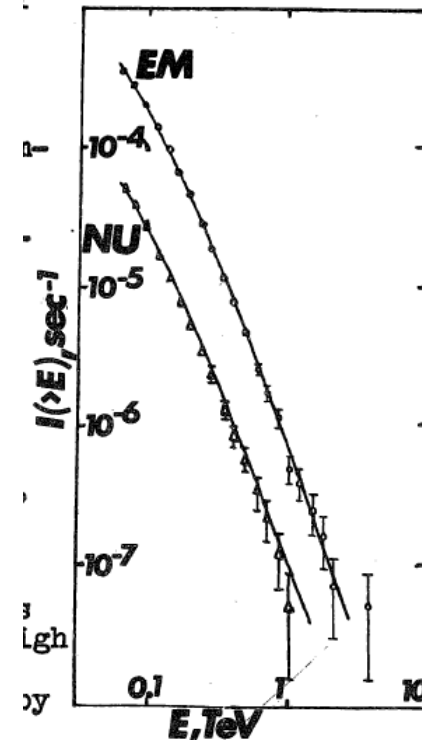


Fig.1. The integral spectra of EM and NU cascades.

The influence of the nuclear and atomic form factors on the muon bremsstrahlung cross section¹

A. A. PETRUKHIN AND V. V. SHESTAKOV
Moscow Physical Engineering Institute, Moscow, U.S.S.R.
Received June 20, 1967

The cross section for the muon bremsstrahlung process is calculated as a function of the nuclear form factor in the Born approximation following the Bethe and Heitler theory. The influence of the nuclear form factor is greater than that taken by Christy and Kusaka. The simple analytical expression for the effect of the screening of the atomic electrons is found. The influence of a decrease in the cross section upon the interpretation of some experimental results is estimated.

1. INTRODUCTION

The process of muon bremsstrahlung is of great importance in the investigation of the energy spectrum (Higashi *et al.* 1964; Miyake *et al.* 1964; Borog *et al.* 1966a). Therefore various corrections to the cross section for muon bremsstrahlung allows one to exclude some uncertainties due to the conversion of the experimental data into the energy spectrum. Christy and Kusaka (1941) were the first to investigate the influence of the nuclear form factor on the muon bremsstrahlung cross section. This question was also considered in the report of Erykin (1966). He found that the correction for the finite dimensions of the nucleus is less than that obtained from the formula of Christy and Kusaka. However, in both papers the influence of the nuclear form factor was considered only for a transferred momentum of $q \leq \mu$ (μ = the muon mass). If the influence of the form factor is considered in the range $q > \mu$, the cross section decreases.

2. BASIC FORMULAS

According to the method developed by Bethe and Heitler (1934) the cross section for high-energy muon bremsstrahlung ($E \gg \mu$) can be written in the form:

$$(1) \quad \sigma(v, E)dv = \alpha(2Zr_0m/\mu)^2 \times [(2 - 2v + v^2)\Phi_1(\delta) - \frac{2}{3}(1-v)\Phi_2(\delta)]dv/v,$$

where E = the primary energy of muons,

v = the energy fraction transferred to the photon,
 Z = the charge of the nucleus,
 r_0 = the classical electron radius,
 m = the electron mass,
 $\alpha = 1/137$.

The least momentum transferred to the nucleus is given by

$$(2) \quad \delta = \frac{\mu^2}{2E} \frac{v}{1-v}.$$

The functions $\Phi_1(\delta)$ and $\Phi_2(\delta)$ differ slightly. They are equal if the values of δ correspond to negligible screening, and their difference tends to $\frac{1}{2}$ when $\delta \rightarrow 0$ (Bethe and Heitler 1934). Since $\Phi(0) = 8$, the accuracy of $\Phi_1(\delta) = \Phi_2(\delta) = \Phi(\delta)$ is good. Then

$$(3) \quad \sigma(v, E)dv = \alpha(2Zr_0m/\mu)^2 \times \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{3}v + v^2\right)\Phi(\delta)dv/v,$$

where

$$(4) \quad \Phi(\delta) = \int_0^{\max} [F_n(q) - F_a(q)]^2 \Psi(q, \delta) \frac{dq}{q}.$$

$F_n(q)$ and $F_a(q)$ are the nuclear and atomic form factors respectively. The magnitude of the maximum transferred momentum $q_{\max}$ is defined by kinematics. Since $q_{\max} \gg \mu$, and when $q \gg \mu$, $\Psi(q, \delta) \approx 0$, then the upper limit in the integral (4) is usually considered to be equal to ∞ .

The following expression was obtained for the function Ψ , valid for all values of q :

MU-41

Proc. 11th Int. Conf. on Cosmic Rays, Budapest 1969

ANALYSIS OF THE CROSS-SECTION OF DIRECT PAIR PRODUCTION BY FAST MUONS

R. P. KOKOULIN, A. A. PETRUKHIN
Moscow Physical Engineering Institute, Moscow, USSR

Exact analytical expression for the cross-section of electron pair production by fast muons is found. The dependence of the total cross-section on the muon energy is obtained. The ratio of the number of cascade showers initiated by pair production by cosmic muons to the number of those initiated by bremsstrahlung process is calculated.

Introduction

The cross-section of electron pair production by charged particles was calculated by several authors. The present paper gives an analysis of their results in order to obtain the general analytical expression for cross-section.

Some remarks on the cross-section

The energy dependence of the cross-section may be characterized by three variables: either E , ε_+ and ε_- , or E , v , and ρ , where

E = the energy of the primary muon;
 ε_+ , ε_- = positron and electron energies, respectively;
 ε = the total energy of the pair;
 $v = \varepsilon/E$ = the energy fraction transferred to the pair;

$\rho = \frac{\varepsilon_+ - \varepsilon_-}{\varepsilon}$ = the asymmetry coefficient of the energy distribution of the pair.

We shall use the variables E , v , and ρ in what follows.

An important characteristics of the process is the least momentum transferred to the nucleus

$$\delta = \frac{2m^2(1+\xi)}{E(1-\rho^2)} \quad (1)$$

where

$$\xi = \left(\frac{\mu v}{2m}\right)^2 \frac{1-\rho^2}{1-v} \quad (2)$$

and μ and m are the masses of the muon and the electron, respectively.

The following regions may be considered: region I, where $\xi < 1$, and II, where $\xi > 1$. These regions, as well as those relating to the screening of the nucleus by

14th ICRC, 1975, Munich, Germany

1949

THE CROSS-SECTION OF THE NUCLEAR INTERACTION OF HIGH ENERGY MUONS

V.V. Borog and A.A. Petrukhin

Moscow Physical Engineering Institute
Moscow 115409, U.S.S.R.

Simple analytical expression for the connection of the muon nuclear interaction cross-section with the photonuclear cross-section $\sigma_{\gamma N}$ for any parameter Λ^2 of the inelastic form factor $F(t) = (1 + t/\Lambda^2)^{-1}$ is obtained. The value $\Lambda^2 = 0.4 \text{ GeV}^2$ from the accelerator data is determined. The available cosmic ray experiment results are analyzed to determine the dependence of the cross-section on the effective number of nucleons A_{eff} , that interact in nuclei. The present data give $A_{\text{eff}} = A^{1/n}$, where $n = 0.92 \pm 0.02$ in the energy interval $10^{11} + 10^{12} \text{ eV}$, if the accelerator value $\sigma_{\gamma N} = 100 \text{ } \mu\text{b}$ in this energy region is extrapolated.

1. Introduction. The cosmic ray muon nuclear interaction cross-section investigations give extremely contradictory information about both the value and the energy dependence of the cross-section (Glin *et al.*, 1973; Bezrukov *et al.*, 1972; Kristiansen *et al.*, 1971; Erykin *et al.*, 1973; Borog *et al.*, 1973). There are two reasons of such a situation. First, the value of the inelastic cross-section is small compared with the cross-section of all other electromagnetic processes. Second, different theoretical formulae are used for comparison with various experimental data. Therefore it is reasonable to analyze the available experimental data using the single theoretical expression for the cross-section.

2. Theory. Two structure functions corresponding two virtual photon polarization directions were apparently introduced in the inelastic lepton-nucleon cross-section for the first time by Gehlen (1960). In this paper we use the expression given by

¹Presented at the Tenth International Conference on Cosmic Rays, held in Calgary, June 19-30, 1967, MU-24.

Мюоны – инструмент исследований

Благодаря своим уникальным характеристикам: довольно слабому поглощению в веществе (только электромагнитное взаимодействие), относительно большому времени жизни ($\tau = 2.2 \times 10^{-6}$ с) и, соответственно, большому пробегу, мюоны играют очень важную, а порой и определяющую роль как в фундаментальных:

- исследование энергетического спектра и массового состава первичного космического излучения;
- проверка моделей адронных взаимодействий, поиск новых физических процессов;
- нейтринная астрофизика (фоновые условия регистрации),

так и в прикладных исследованиях космических лучей:

- просвечивание различных объектов (томография) – пирамиды, вулканы, грузы;
- мюонная диагностика атмосферы Земли;
- исследование солнечно-земных связей и мониторинг космической погоды (гелиосфера, магнитосфера).

Генерация мюонов космических лучей

распады π и K -мезонов (обычный механизм);
распады D -мезонов, Λ_c -гиперонов, ... (prompt – механизм “быстрой” генерации);
рождение мюонных пар γ -квантами высоких энергий, ...

L.V. Volkova, G.T. Zatsypin//
13th ICRC, 1973, Denver, USA

NEUTRINO PRODUCTION IN THE ATMOSPHERE

G. T. ZATSEPIN and V. A. KUZ'MIN

P. N. Lebedev Physics Institute, Academy of Sciences, U.S.S.R.

Submitted to JETP editor March 8, 1961

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 41, 1818-1827 (December, 1961)

A general expression for the μ -meson spectrum $P^\mu(x, E, \theta)$ was obtained by us earlier^[12] taking the decay and the energy loss of μ mesons in a spherical atmosphere into account. For the neutrino spectrum at energies $\varepsilon \lesssim 10^{11}$ ev, the expression simplifies somewhat since we can restrict ourselves to ionization losses only (see Fig. 1). $P^\mu(x, E, \theta)$ is then of the form

$$P^\mu(x, E, \theta) = I_\pi A_{\pi\mu} E^{-(\gamma+1)} \int_0^x e^{u-t} \left[1 + \frac{\beta}{E} (x-t) \right]^{-(\gamma+1)} dt, \quad (9)$$

$$\times \left\{ 1 + \frac{1.22E}{E_\pi(\theta)} \left[1 + \frac{\beta}{E} (x-t) \right] \right\}^{-1} dt,$$

where

$$A_{\pi\mu} = \frac{1 - (m/M)^{2(\gamma+1)}}{(1+\gamma)(1-m^2/M^2)}, \quad u = \frac{mc}{\tau_{0\mu}} \int_x^t \frac{dz}{\rho(z, \theta) [E + \beta(x-z)]}, \quad (9a)$$

and β is the ionization energy loss of the μ mesons

2. Muon spectrum calculation

The solution of kinetic equation for muon propagation through the atmosphere taking into account their decays and losses gives the following differential muon spectrum:

$$P_\mu(x, E, \theta) = \int_0^x G_\mu(t, \varepsilon(E, x-t)) x \exp \left(- \frac{\lambda_0 \mu_0^2}{c \tau_{0\mu} E} \int_0^x \frac{dz}{\rho(z, \theta) [E + \beta(x-z)]} \right) dt$$

where x - depth in lengths of nuclear interaction of muon-inducing component,

θ - angle to the vertical,

$\varepsilon(E, x-t)$ -

muon energy at the depth t if it has energy E at the depth x ,

$$G_\mu(t, \varepsilon, \theta) d\varepsilon$$

muon generation function - the number of muons generated at the depth t at angle θ with the energy in the interval $\varepsilon \div \varepsilon + d\varepsilon$,

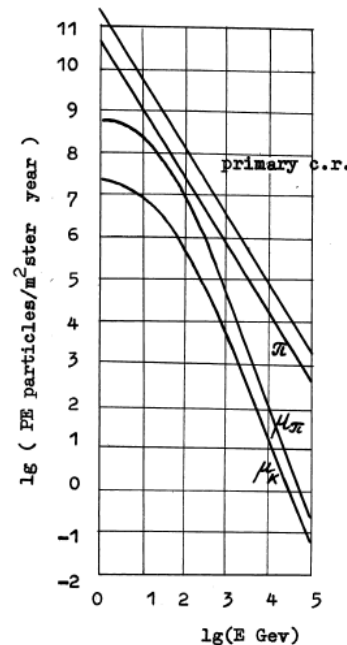


Fig.1

Physics of Atomic Nuclei, Vol. 64, No. 2, 2001, pp. 288-294. Translated from Izvestiya Fizika, Vol. 64, No. 2, 2001, pp. 313-322.

Original Russian Text Copyright © 2001 by Volkova, Zatsypin.

ELEMENTARY PARTICLES AND FIELDS Experiment

Fluxes of Cosmic-Ray Muons and Atmospheric Neutrinos at High Energies

L. V. Volkova* and G. T. Zatsypin

Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, pr. Shestidesyatiletiya Otkrytiya 7a, Moscow, 117312 Russia
Received December 22, 1999

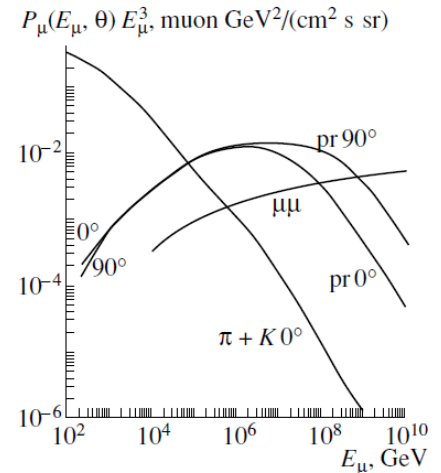


Fig. 6. Differential spectra $P_\mu(E_\mu, \theta)$ of cosmic-ray muons generated in the atmosphere that arrive at sea level along the vertical ($\theta = 0^\circ$) or horizontal ($\theta = 90^\circ$) direction: ($\pi + K$ curve) muons from pion and kaon decays, (pr curves) muons from charmed-particle decays, and ($\mu\mu$ curve) our estimate of the prompt generation of muon pairs.

¹²G. T. Zatsypin and V. A. Kuz'min, JETP 39, 1677 (1961) Soviet Phys. JETP 12, 1171, 1961

Методы исследования энергетического спектра мюонов в области $E_\mu > 10 \text{ ТэВ}$

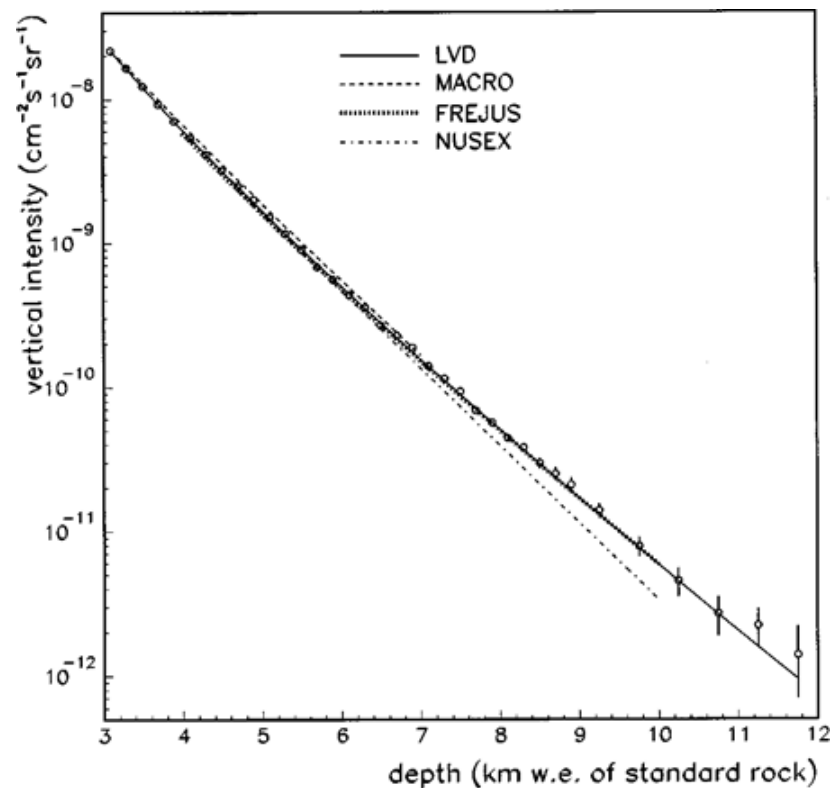
- **магнитный спектрометр** (измерение импульса мюона по отклонению траектории в магнитном поле) – **MARS, MUTRON** (m.d.m. $\sim 22 \text{ ТэВ/с}$), проблемы: необходимо сильное магнитное поле и одновременное увеличение светосилы, электромагнитное сопровождение осложняет реконструкцию событий с ростом энергии мюона
- **кривая поглощения** (измерение интенсивности потока мюонов на различных глубинах) – **БПСТ, Frejus, KGF, LVD, MACRO**, предел достижимых энергий $\sim 100 \text{ ТэВ}$ обусловлен фоновым потоком малоэнергичных мюонов, образующихся в результате взаимодействий нейтрино в окружающем грунте;
- **калориметр** (измерение спектра каскадов с энергией $\varepsilon \sim E_\mu$, вызванных тормозным излучением мюонов) – **АСД, БПСТ, РЭК МГУ** ($\approx 30\text{-}50 \text{ ТэВ}$), ограничение – необходима значительная масса мишени из-за малой вероятности рождения тормозного γ -кванта с энергией, сравнимой с энергией мюона, перспектива – использование гигантских нейтринных телескопов
- **парметр** (измерение числа и энергий каскадов $\varepsilon \ll E_\mu$, образующихся за счет прямого рождения электрон-позитронных пар мюоном) – **NUSEX, БАРС, БПСТ**

Кривая поглощения (LVD)



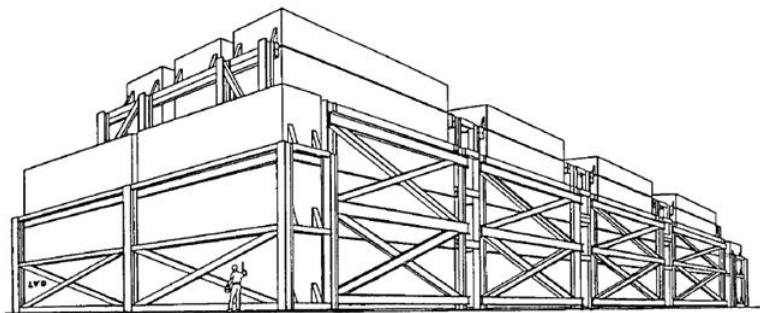
www.bo.infn.it/lvd/

M. Aglietta et al. // Phys. Rev. D 58 (2005) 092005



Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A264 (1988) 5–17

LVD AT GRAN SASSO



Depth-vertical-muon-intensity curve in standard rock

Калориметрический метод (АСД)

16th ICRC, 1979, Kyoto, Japan

MN 5-7

lvd.ras.ru/exper/art.html

100-TONS SCINTILLATION DETECTOR FOR THE REGISTRATION OF
THE ANTINEUTRINO FLUXES FROM COLLAPSING STARS IN OUR
GALAXY AND FOR HIGH ENERGY MUON INTERACTION STUDIES

V.I.Beresnev, A.A.Choodin, R.I.Enikeev, P.V.Korchagin,
V.B.Korchagin, A.S.Malgin, V.G.Ryassny, O.G.Ryazhskaya,
V.P.Talochkin, V.F.Yakushev, G.T.Zatsepin

The Institute for Nuclear Research of the USSR
Academy of Sciences, Moscow

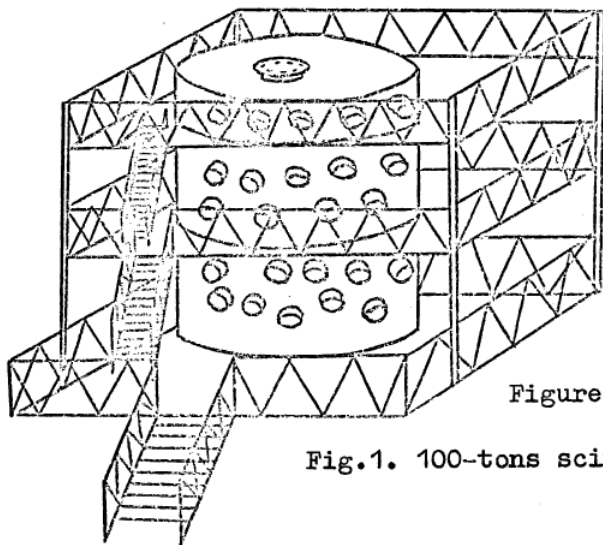


Figure captions

Fig.1. 100-tons scintillation detector of INR.



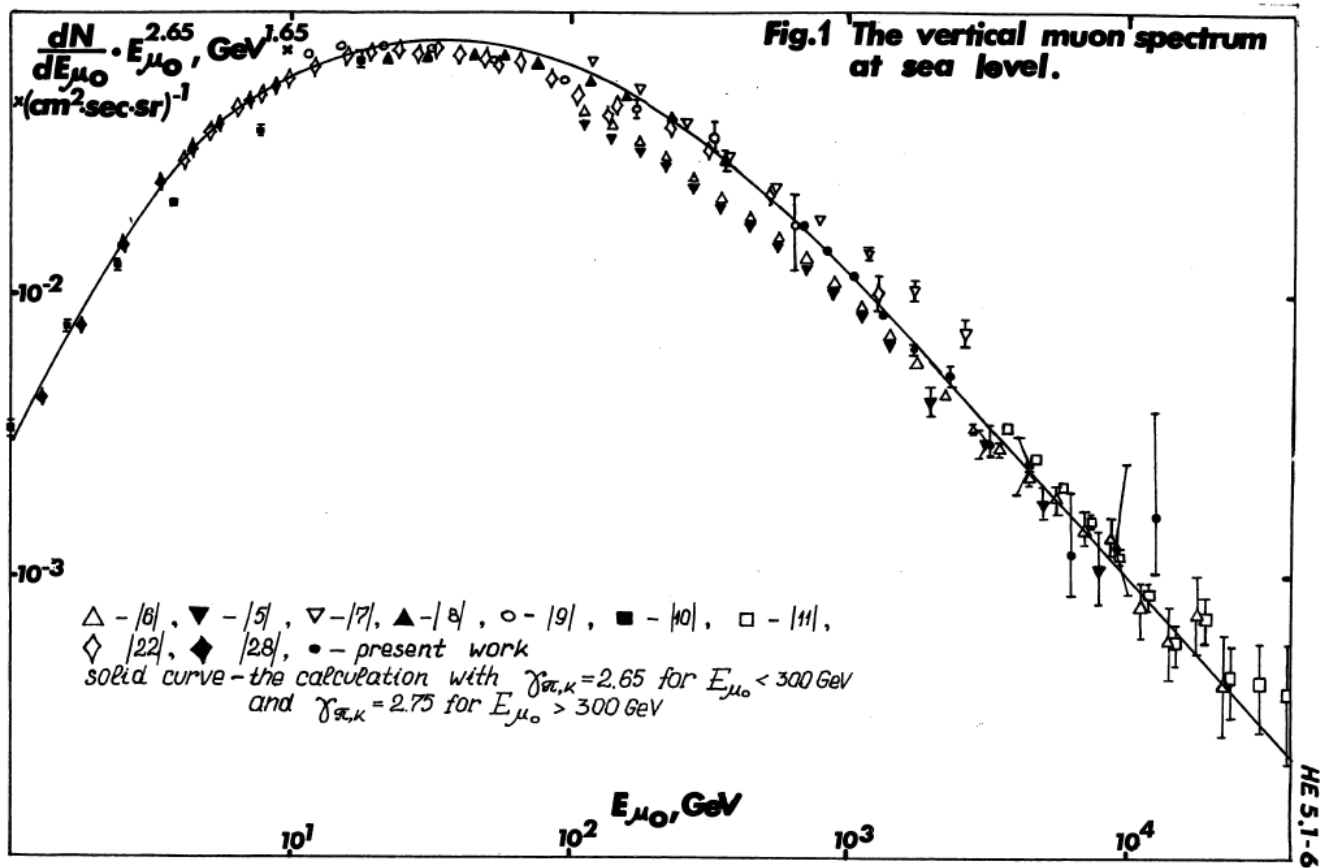
Калориметрический метод (АСД)

19th ICRC, 1985, La Jolla, United States

HE 5.1-6

THE SPECTRUM OF COSMIC RAY MUONS OBTAINED WITH
100-TON SCINTILLATION DETECTOR UNDERGROUND AND
THE ANALYSIS OF RECENT EXPERIMENTAL RESULTS

F.F.Khalchukov, E.V.Korolkova, V.A.Kudryavtsev,
A.S.Malgin, O.G.Ryazhskaya, G.T.Zatsepin



Калориметрический метод (РЭК МГУ)

MU-8

Proc. 11th Int. Conf. on Cosmic Rays, Budapest 1969

STUDY OF HIGH-ENERGY MUONS BY MEANS OF EMULSION CHAMBERS

K. V. CHERDYNTSEVA, I. P. IVANENKO, G. B. KHRISTIANSEN,
S. I. NIKOLSKY, I. V. RAKOBOLSKAYA, G. T. ZATSEPIN

Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, USSR,
P. N. Lebedev Physical Institute of the Academy of Sciences of the USSR,
Moscow, USSR

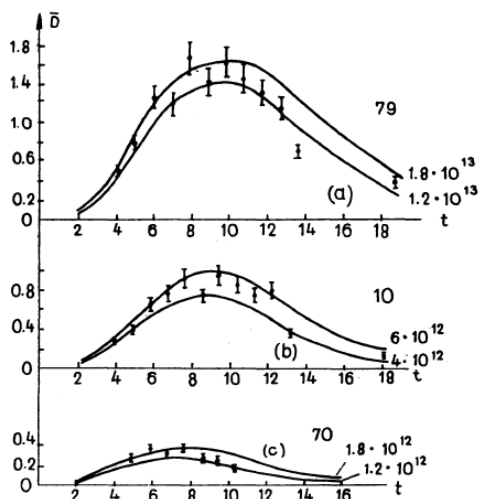


Fig. 4. Determination of the energy of a γ -quantum by photometering at various depths of lead, in the case of γ -quanta with energies a) $1.5 \cdot 10^{13}$ eV; b) $5.0 \cdot 10^{12}$ eV; c) $1.5 \cdot 10^{12}$ eV

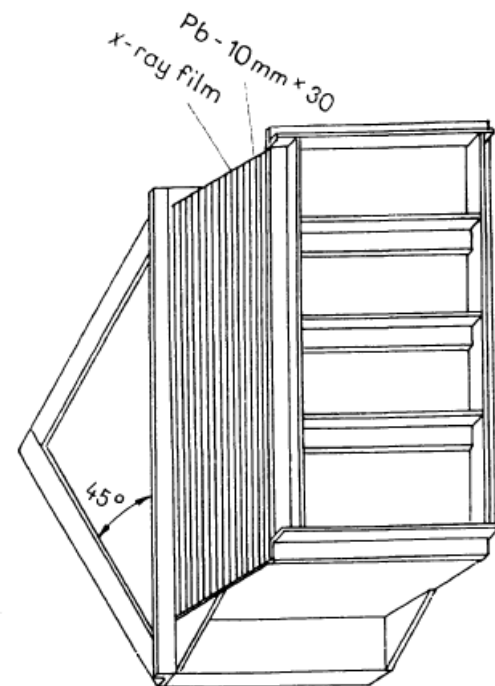


Fig. 1. Emulsion chamber for detecting muons

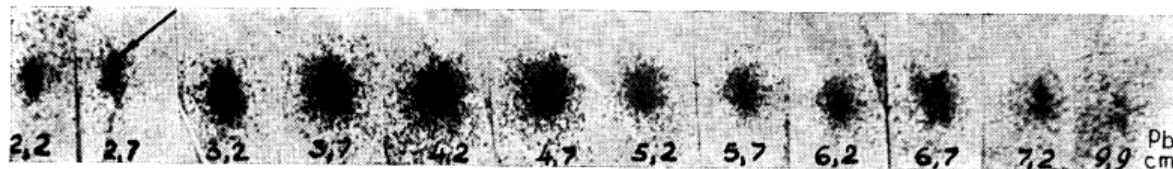


Fig. 3. Development of an electromagnetic cascade produced by a γ -quantum of the energy of $1.5 \cdot 10^{13}$ eV. The arrow indicates the lower layer of the X-ray film

Калориметрический метод (РЭК МГУ)

24th ICRC, 1995, Rome, Italy

The Analysis of the PCR Nucleon Energy Spectrum and Charm Production Cross-Section as observed in MSU Muon Experiment

N.P.II'ina¹, N.N.Kalmykov², I.V.Rakobolskaya¹, G.T.Zatsepin¹

¹Phys. Dept. Moscow State University, Moscow, 119899, Russia

²Institute of Nuclear Physics Moscow State University

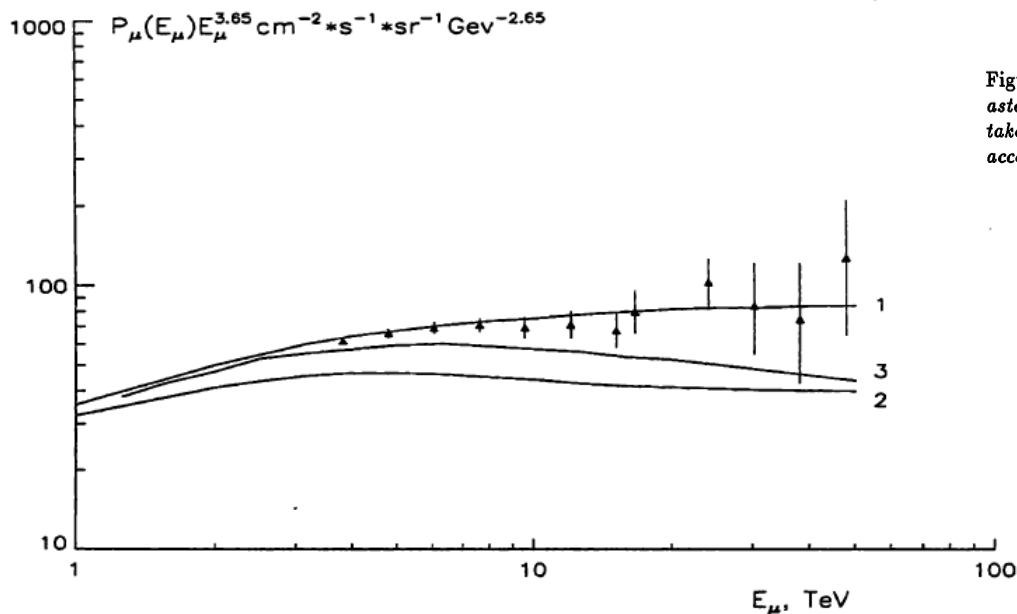


Figure 1: Energy spectrum of the horizontal muon flux. Experimental points are from [1]. Curve 1 - calculation for constant $\gamma_N = 1.65$, curve 2 - γ_N breaks from 1.65 to 3.14 at $E_p = 10 \text{ TeV}$, curve 3 - γ_N breaks from 1.65 to 3.22 at $E_p = 40 \text{ TeV}$

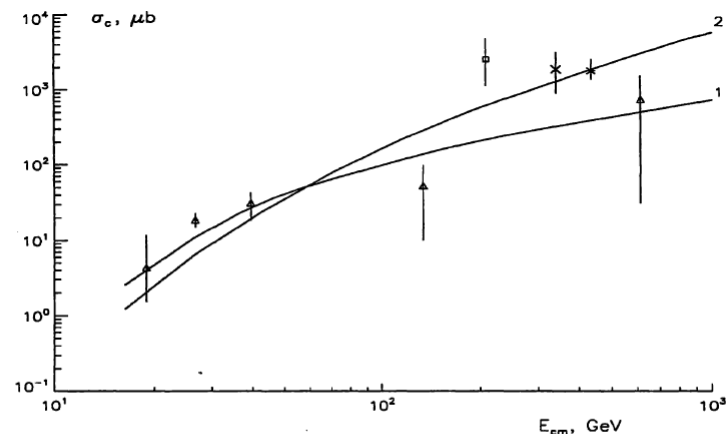


Figure 2: Cross-section of charm production versus energy. Experimental points: asterisk - [1], cross - [12], square - [13], triangle - compilation of accelerator data taken from [14]. Curves 1 and 2 represent possible bounds of theoretical predictions according [14]

Ионизационный калориметр (МИФИ)

19th ICRC, 1985, La Jolla, United States

77

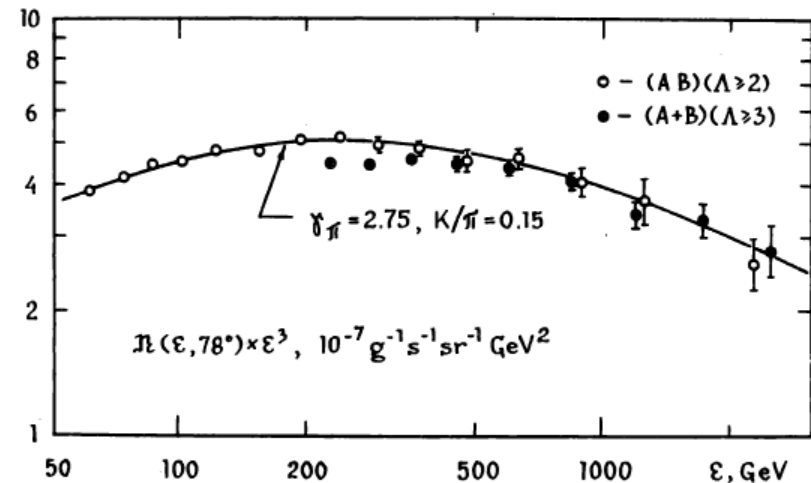
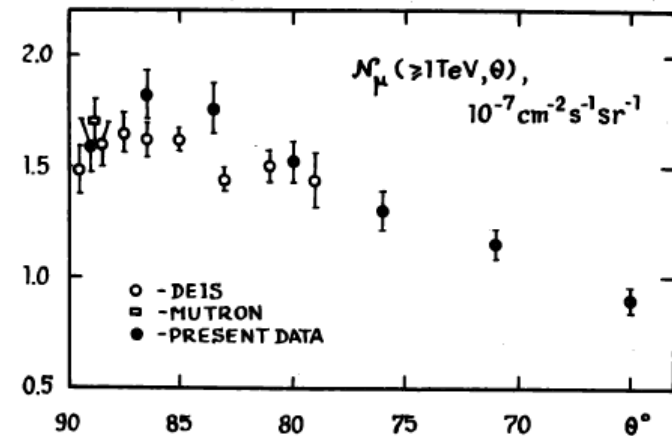
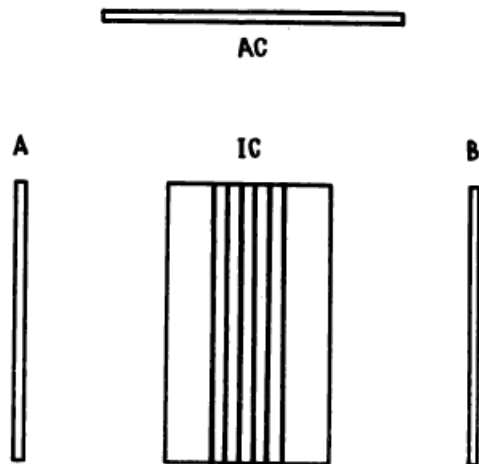
HE 5.2-14

ENERGY SPECTRUM OF CASCADE SHOWERS INDUCED BY COSMIC RAY MUONS IN THE RANGE FROM 50 GEV TO 5 TEV

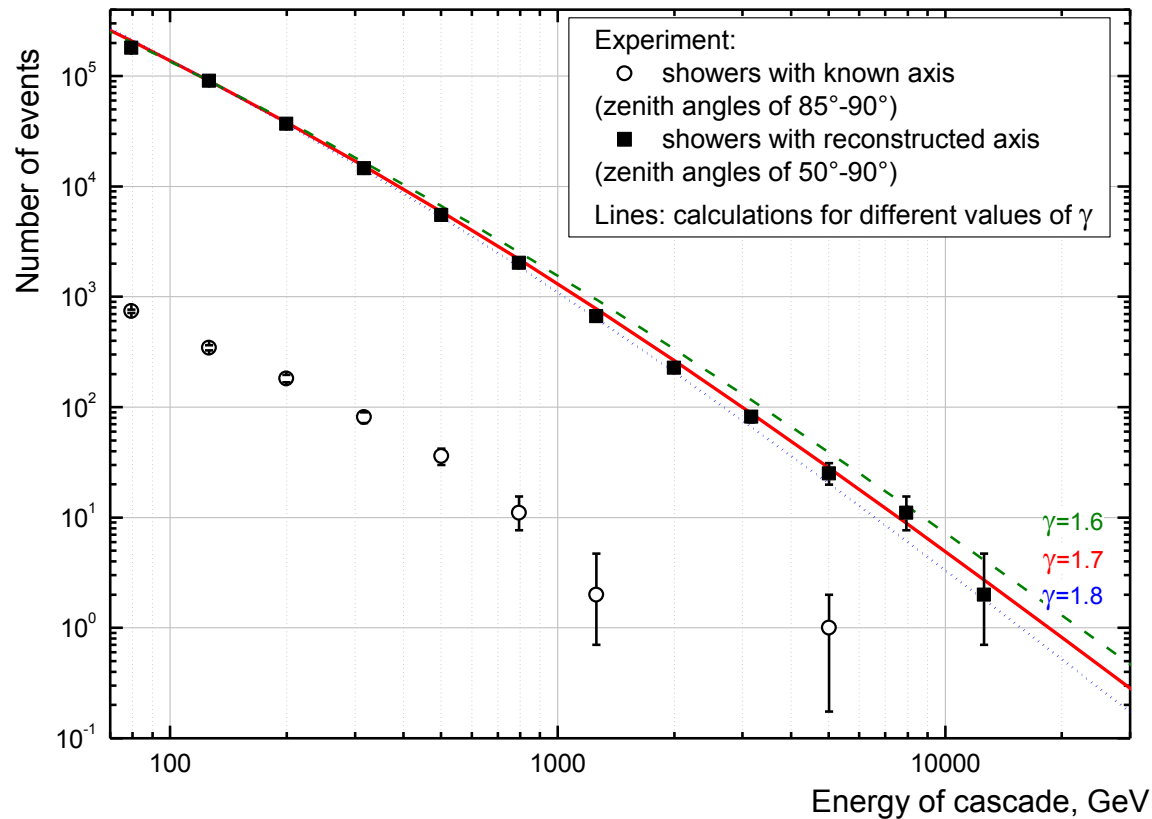
Ashitkov V.D., Kirina T.M., Klimakov A.P.,
Kokoulin R.P., Petrukhin A.A., Yumatov V.I.

Moscow Physical Engineering Institute, Moscow 115409, USSR

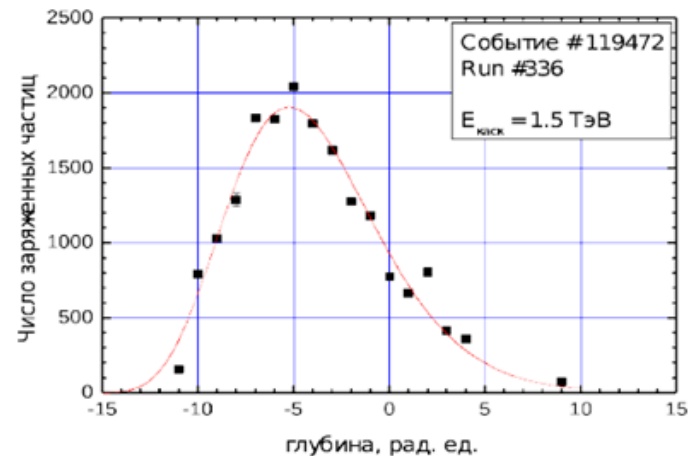
Abstract. Results of a new measurement of the energy spectrum of cascade showers induced by electromagnetic interactions of high energy muons of horizontal cosmic ray flux in iron absorber are presented. The total observation time exceeded 22,000 hours. Both the energy spectrum and angular distributions of cascade showers are fairly described in terms of the usual muon generation processes (i.e. through π^- - and K-decays in the atmosphere) with a single power index of the parent meson spectrum over the muon energy range from 150 GeV to 5 TeV.



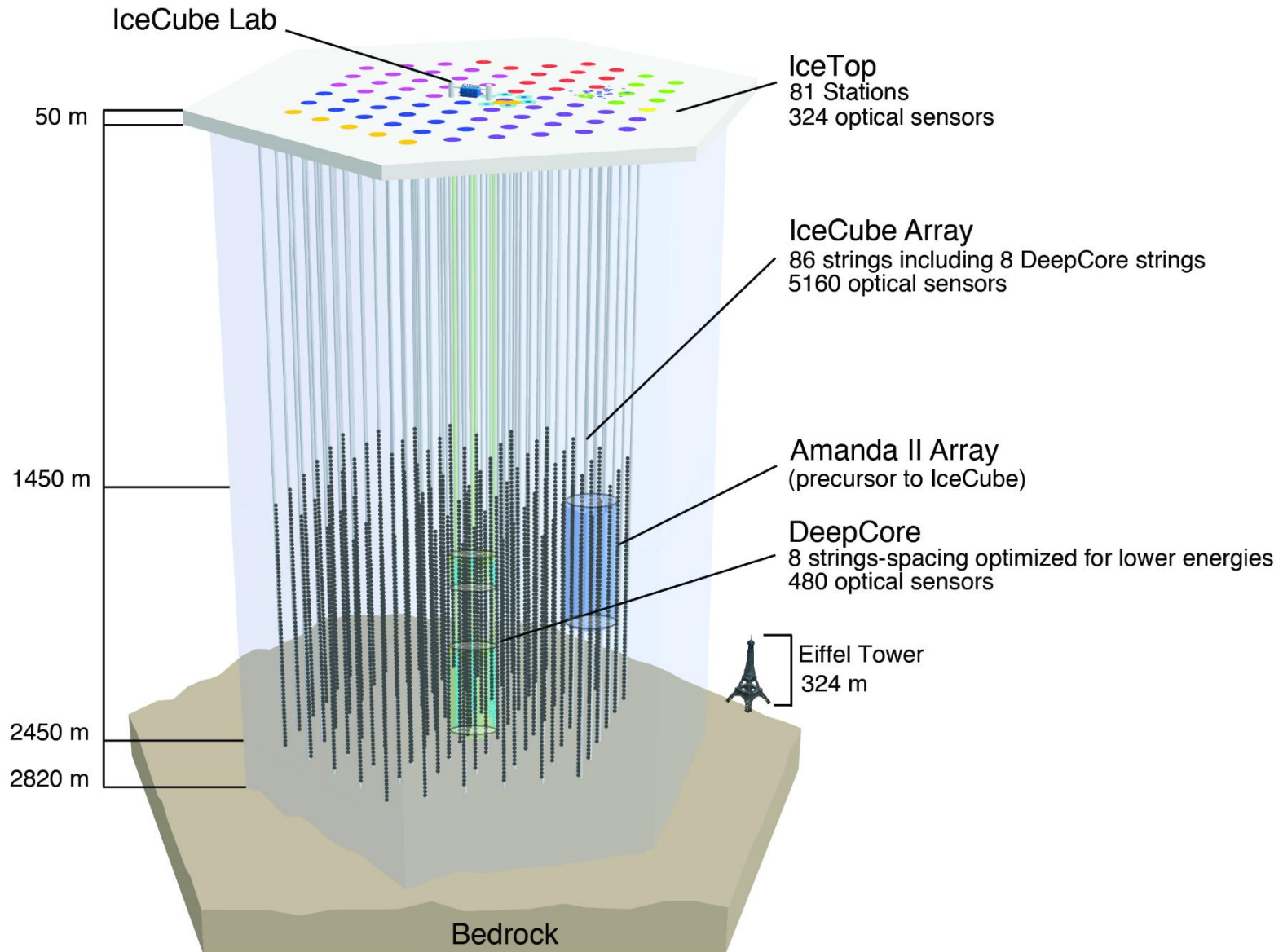
Черенковский водный калориметр (МИФИ)



Spectrum of cascade showers, initiated by muons in water (preliminary). Here γ is the slope of the integral energy spectrum of parent pions and kaons.

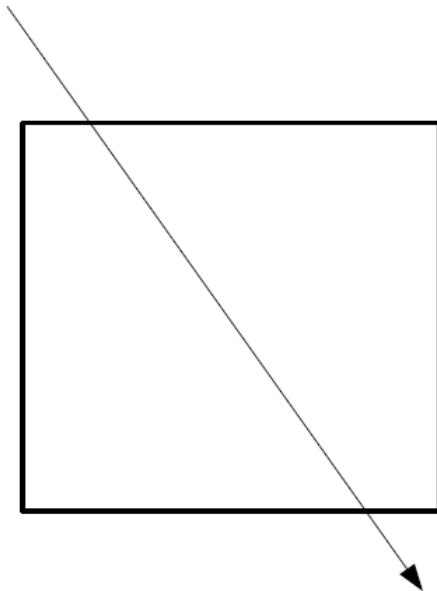


Калориметрический метод (IceCube)



Калориметрический метод (IceCube)

Low Energy



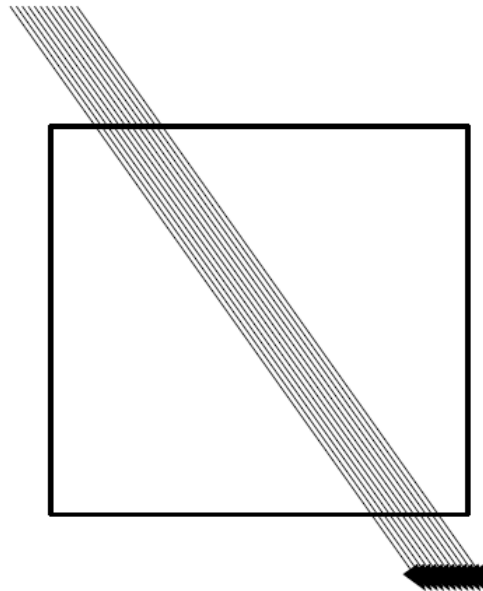
1,000/second

Minimum Ionizing

Single Muons

10-100 TeV CR

Bundles



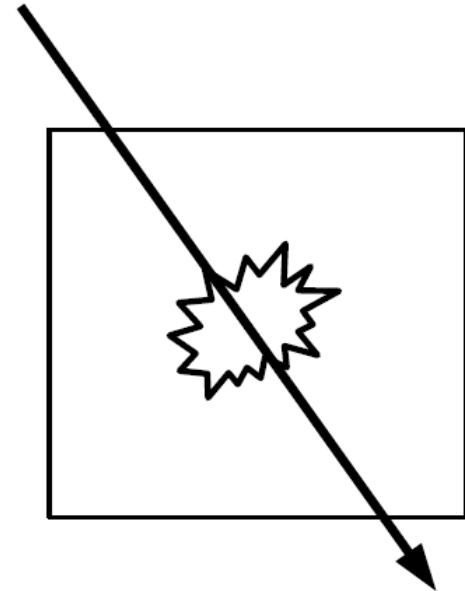
1/second

Minimum Ionizing

20-10,000 Muons

1 PeV-1 EeV CR

HE Muons



0.1/second

Stochastic

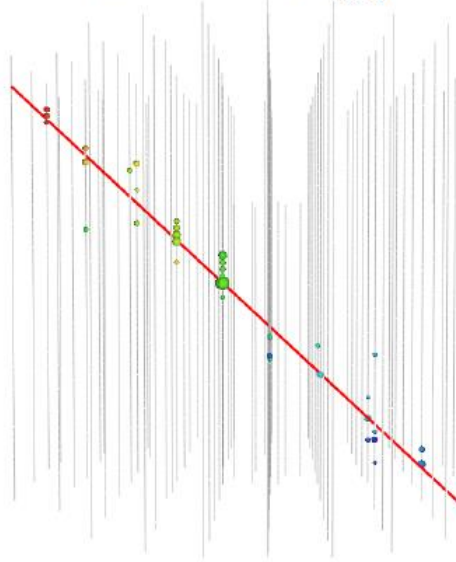
1 HE Muon, 10-100 others

100 TeV-10 PeV CR

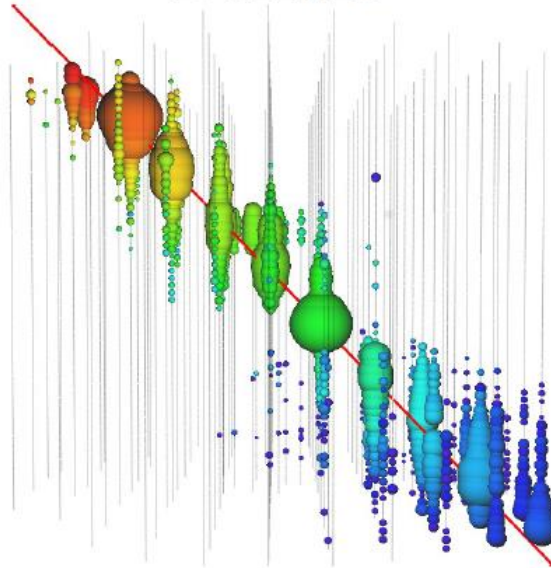
Калориметрический метод (IceCube)

Experimental Data Events

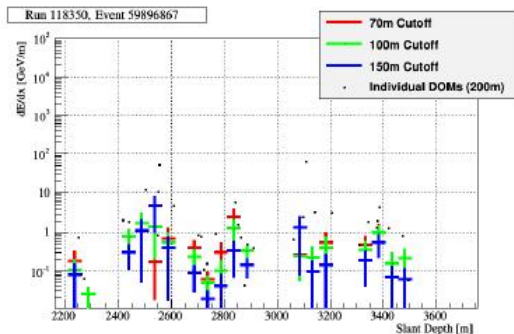
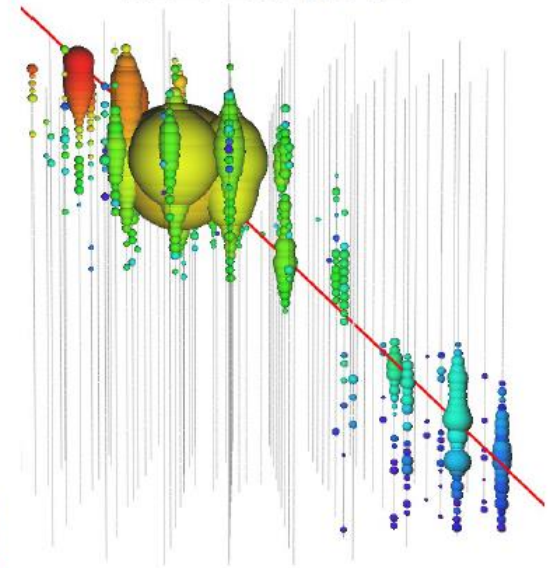
Low-Energy



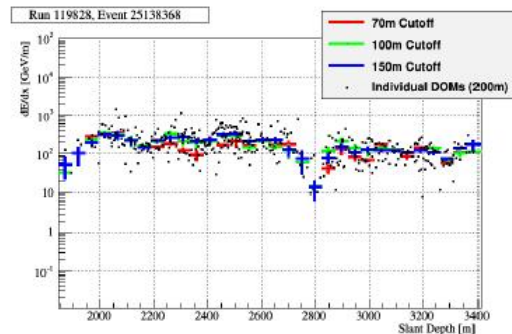
Bundle



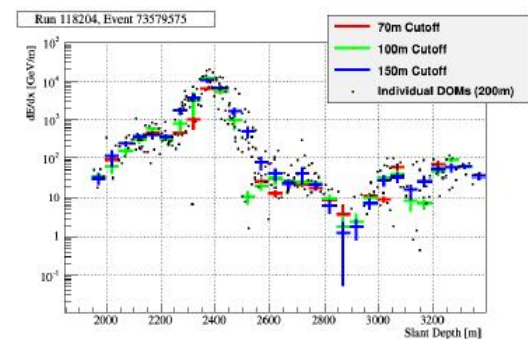
HE Muon



minimum ionizing track



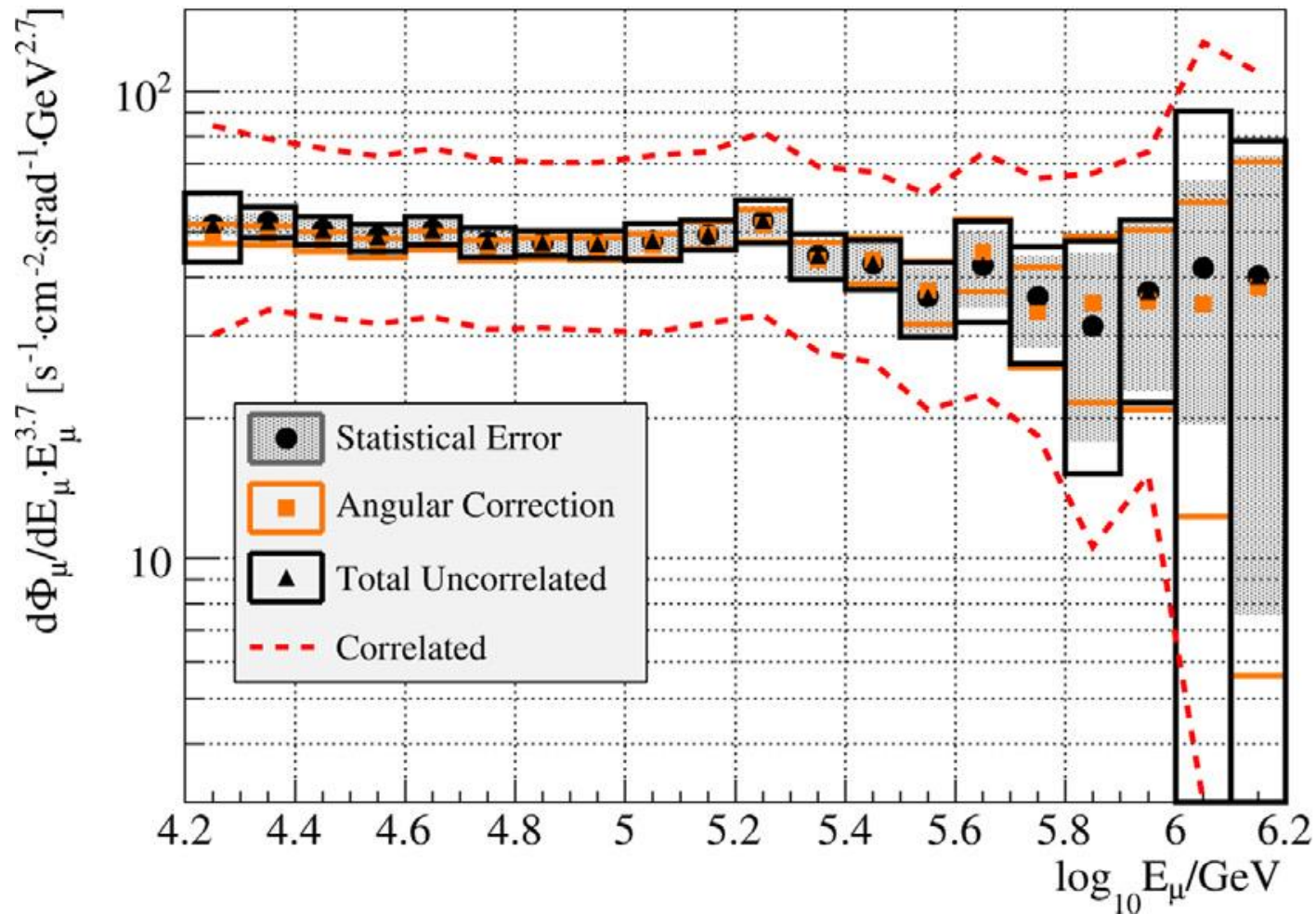
smooth energy loss



stochastic energy loss

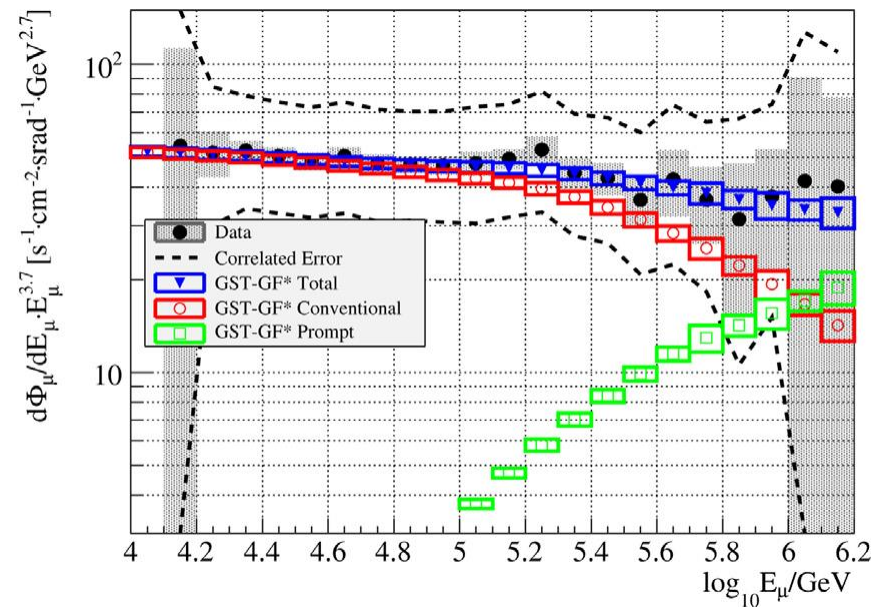
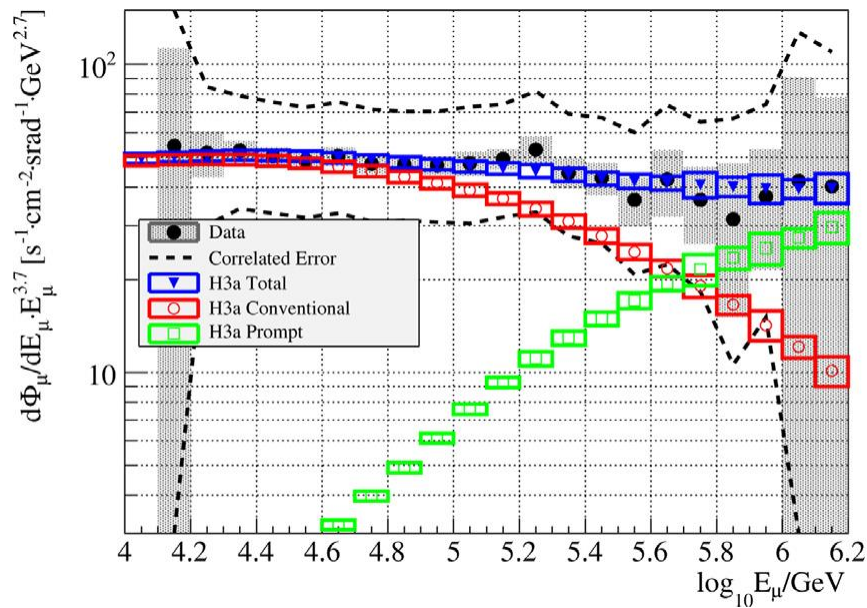
Калориметрический метод (IceCube)

P. Berghaus, ICPPA-2015



Experimentally measured spectrum of high-energy muons using 1 year of IceCube data

Калориметрический метод (IceCube)



All-sky muon energy spectrum and predictions based on H3a (left) and Global Fit model (right)

Парметр: идея метода

И.С. Алексеев, Г.Т. Зацепин. μ -мезоны высокой энергии.

Труды Международной конференции по космическим лучам (1959).

Т. 1: Ядерные взаимодействия при энергиях $10^{11} - 10^{14}$ эВ.

Москва, 1960, Изд. АН СССР, стр. 326-329.

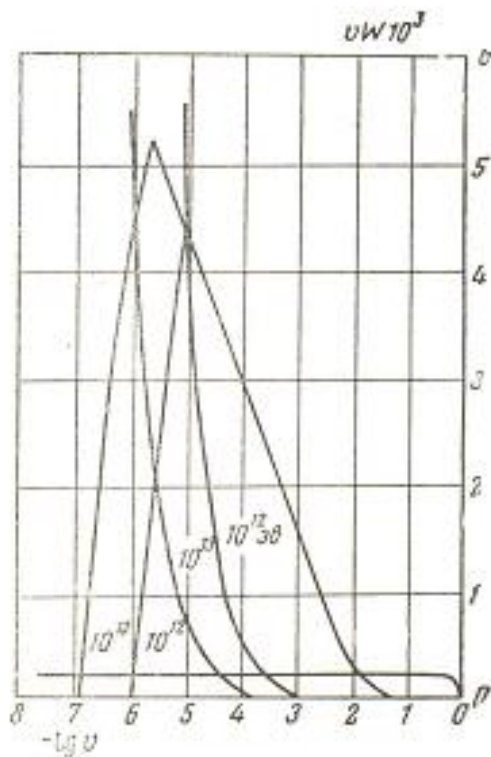


Рис. 2

Пологая кривая — радиационное излучение; кривая треугольной формы — образование пар; остальные две кривые — ионы

И. С. Алексеев, Г. Т. Зацепин

μ -МЕЗОНЫ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

Образование тормозных фотонов μ -мезонами — процесс, обладающий малым эффективным сечением. Число радиационных ливней заданной мощности составляет примерно величину 10^{-3} от числа μ -мезонов соответствующей энергии. Поэтому статистика не позволяет изучать таким путем спектр μ -мезонов с энергией $E \gtrsim 5 \cdot 10^{12}$ эВ. Однако при $E \gtrsim 5 \cdot 10^{12}$ эВ можно, по-видимому, при помощи соответствующей многослойной системы ионизационных камер регистрировать и измерять энергию каждого проходящего μ -мезона благодаря эффекту прямого образования электронных пар. Полные потери энергии в свинце на образование пар почти такие же, как и на радиационное излучение; однако они происходят малыми порциями $v \lesssim 10^{-2} - 10^{-3}$ от энергии μ -мезона. Эффективное сечение образования пар существенно растет с энергией [как $(\ln \frac{E_\mu}{\mu c^2})^2$]. Это хорошо видно на рис. 2, где изображена зави-

симость $W(v, E) = f(v)$ для различных значений E и различных процессов потерь энергии в свинце. Площадь под кривыми дает полное сечение соответствующего процесса.

Метод парметра

Парметр – метод спектрометрии мюонов высокой энергии, основанный на энергетической зависимости сечения прямого образования электрон-позитронных пар мюонами. Энергия мюона может быть восстановлена по количеству и мощности вторичных каскадов, образованных мюоном в толстом слое вещества.

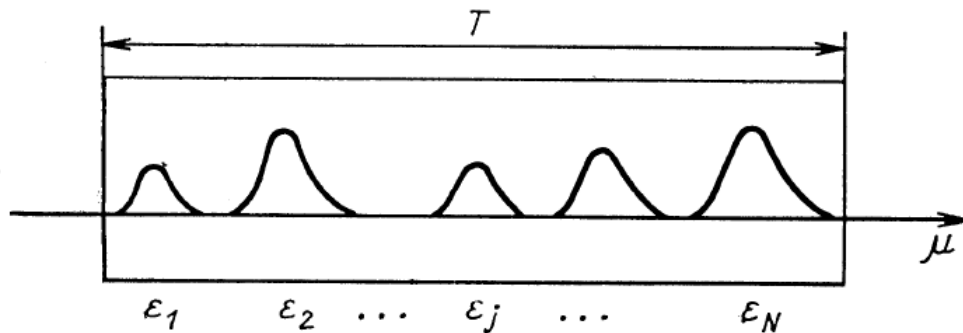
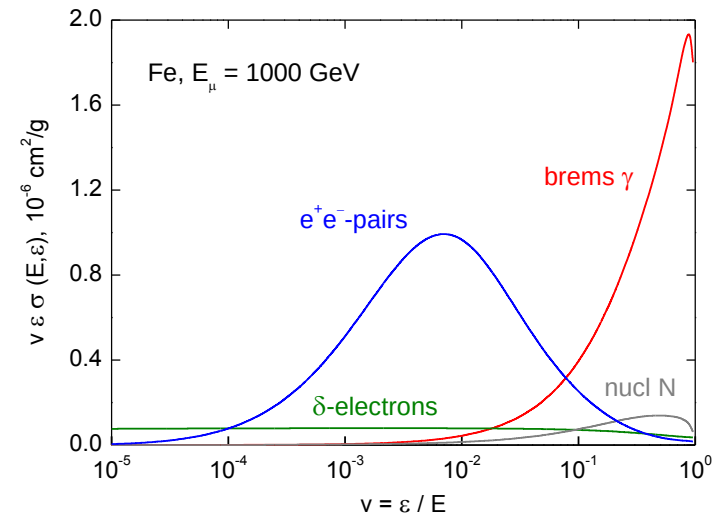


Рис. 5. Идеализированная модель парметра:

$$\delta_0 = \sqrt{9\pi/28\alpha T} = \sqrt{X_0/X}$$

$$X_0 = 9\pi t_0/28\alpha \simeq 137t_0$$



Вклад различных величин относительных переданных энергий в потери энергии мюоном

Основные требования: чувствительность к передачам энергии $\sim 10^{-2} E_\mu$; толщина мишени (для измерения энергии индивидуальных мюонов) – больше сотен рад. ед.

Для полномасштабной реализации метода необходимы массивные установки (сотни – тысячи тонн) с достаточной степенью грануляции (десятки – сотни слоев).

Зарубежные работы по методу парметра

Расчетные работы:

M.K. Moe // Nuovo Cim. B, **66** (1970) 90

T. Wada, T. Kitamura // Progr. Theor. Phys., **41** (1969) 1587

Эти работы стали основой создания прототипа парметра в комплексе МЮТРОН:

T. Kitamura et al. // Proc. 13th ICRC, Denver, 1973, v. 4, p. 2974

T. Kitamura et al. // Proc. 14th ICRC, Munich, 1975, v. 6, p. 2145

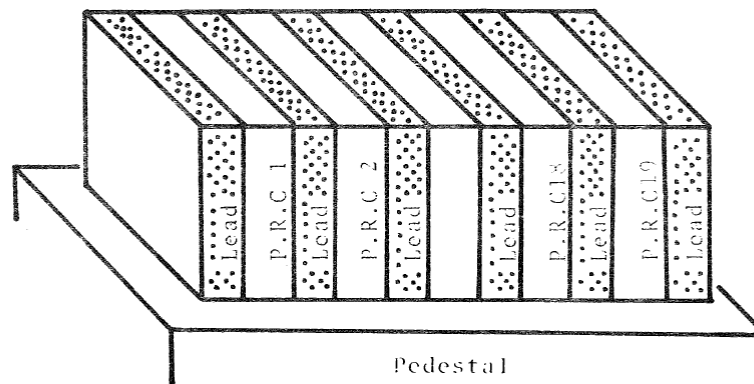
Здесь родилось современное название метода:

pair meter → пар-метр → парметр

Эксперименты с прототипом парметра МЮТРОН:

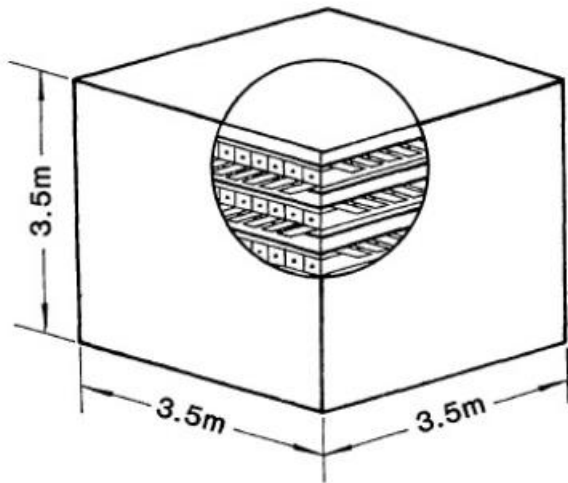
I. Nakamura et al. // Proc. 16th ICRC, Kyoto, 1979, v. 10, p. 19

2. The Apparatus of PAIR METER. The apparatus consists of twenty layers of 5 cm thick lead and proportional counter interspaced with lead. Fig. 1 shows the outline of our apparatus with the size of 1 m x 2 m x 2.5 m. This apparatus is set up just in front of the Mutron magnetic spectrometer in order to calibrate the energy measured by PAIR METER.



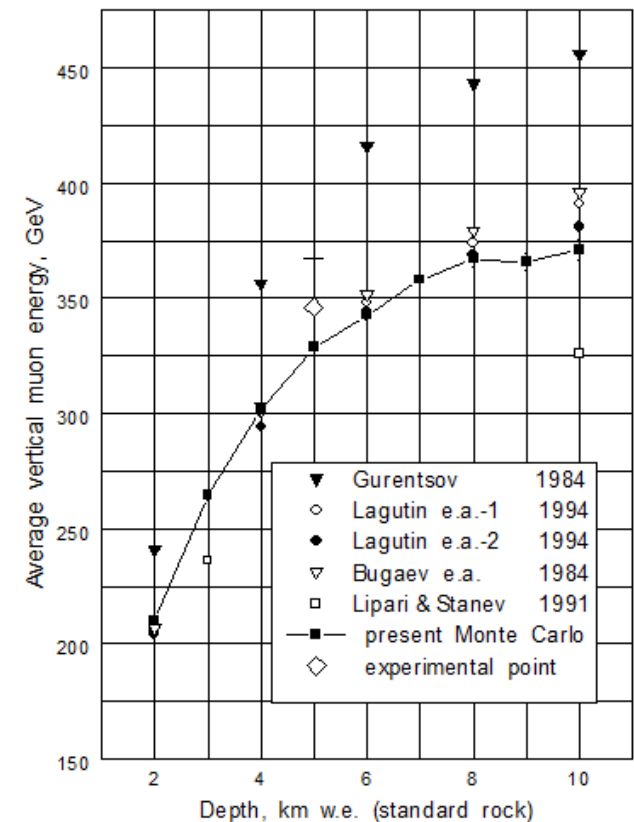
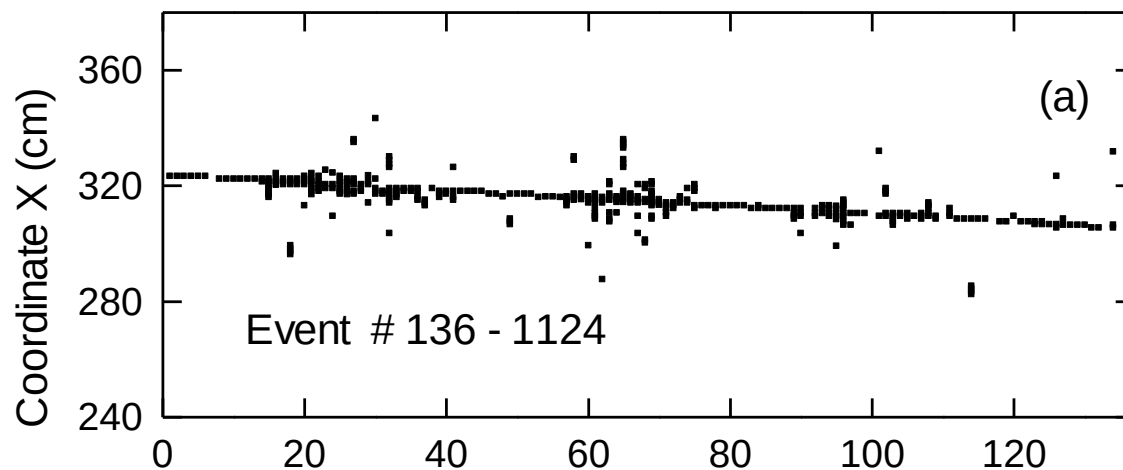
NUSEX

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

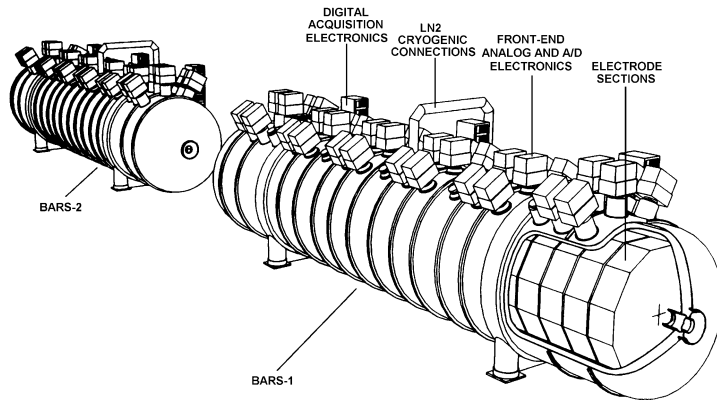


БАРС

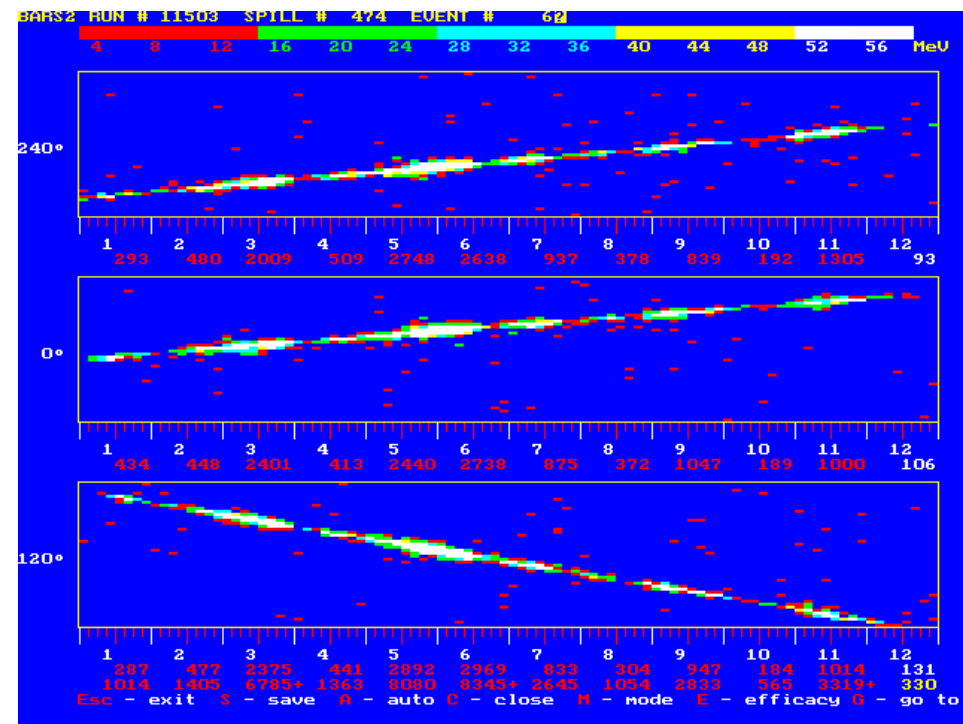
Одно из первых применений крупного ускорительного детектора для эксперимента в космических лучах:

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

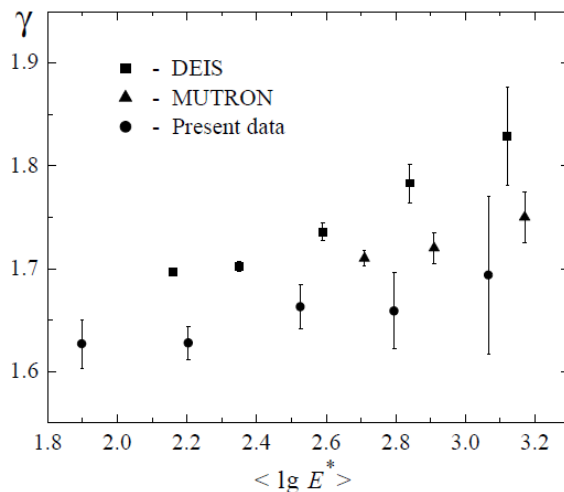
V.B. Anikeev et al. // Proc. 27th ICRC, Hamburg, 2001, v. 3, p. 958



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



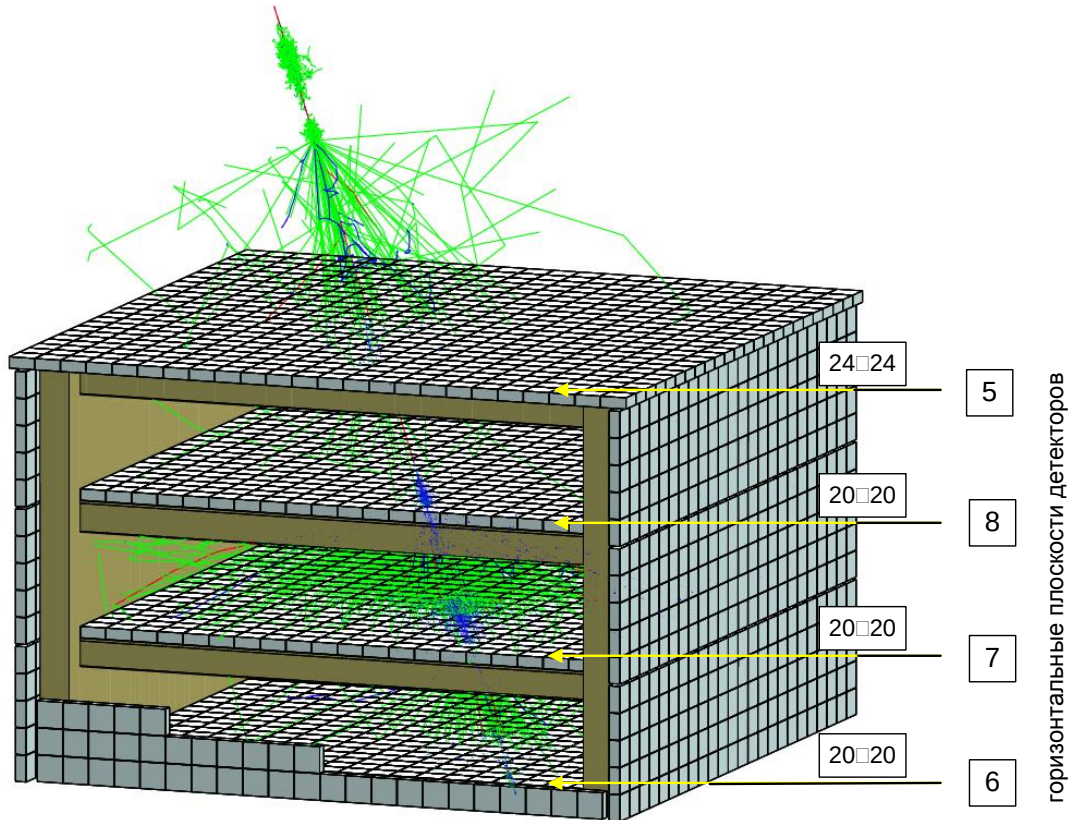
288 слоев жидкоаргоновых ионизационных камер



Оценки показателя интегрального спектра родительских частиц мюонов в верхней части атмосферы

БПСТ

эффективная толщина грунта над телескопом – 850 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)

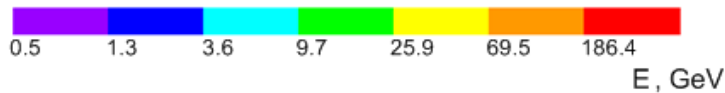
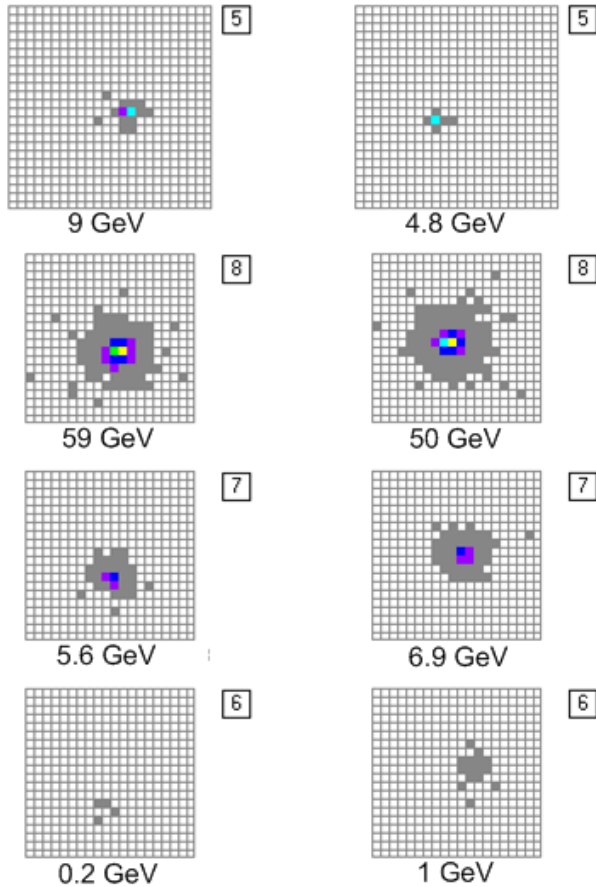
порог срабатывания – 12.5 МэВ (“да-нет”)
измерение энерговывделений – $0.5\text{--}600 \text{ ГэВ}$



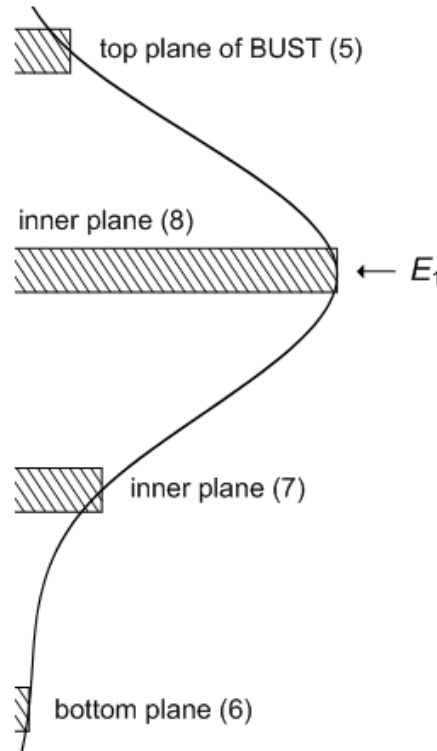
Калориметрический метод оценки энергии мюонов (БПСТ)

RUN 390811 frame 17300

Event 9931-164617



$$E_1 \sim 0.1 \varepsilon_1, \quad \varepsilon_1 \sim 0.5 E_\mu, \quad k \sim 20$$



Слева: примеры
экспериментального и
моделированного событий

Справа: продольный
профиль энерговывделений

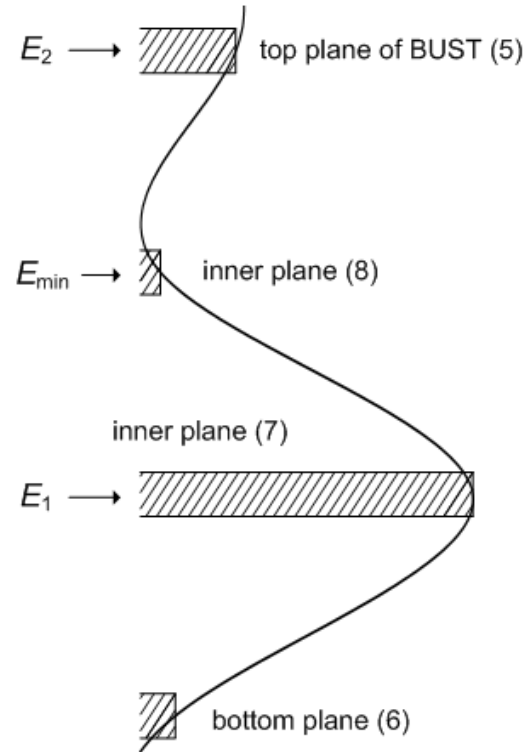
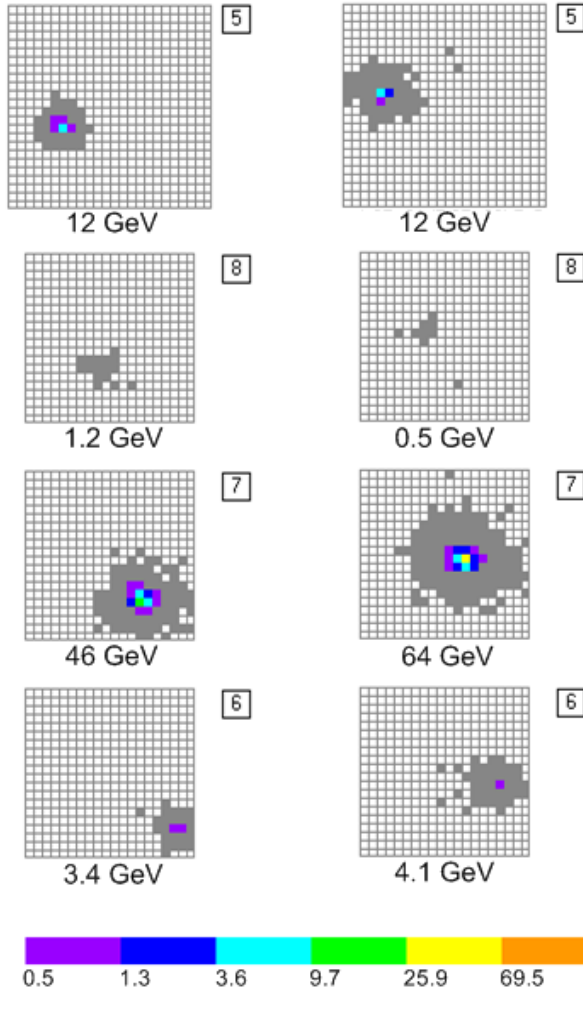
Показаны горизонтальные плоскости телескопа, сработавшие сцинтилляционные детекторы (“да-нет”) отмечены серым цветом, а энерговывделения в детекторах – градациями цвета

Метод двукратных взаимодействий (БПСТ)

RUN 516828 frame 10093

Event 9736-418339

$$E_2 \sim 0.1 \varepsilon_2, \quad \varepsilon_2 \sim 0.01 E_\mu, \quad k \sim 1000$$



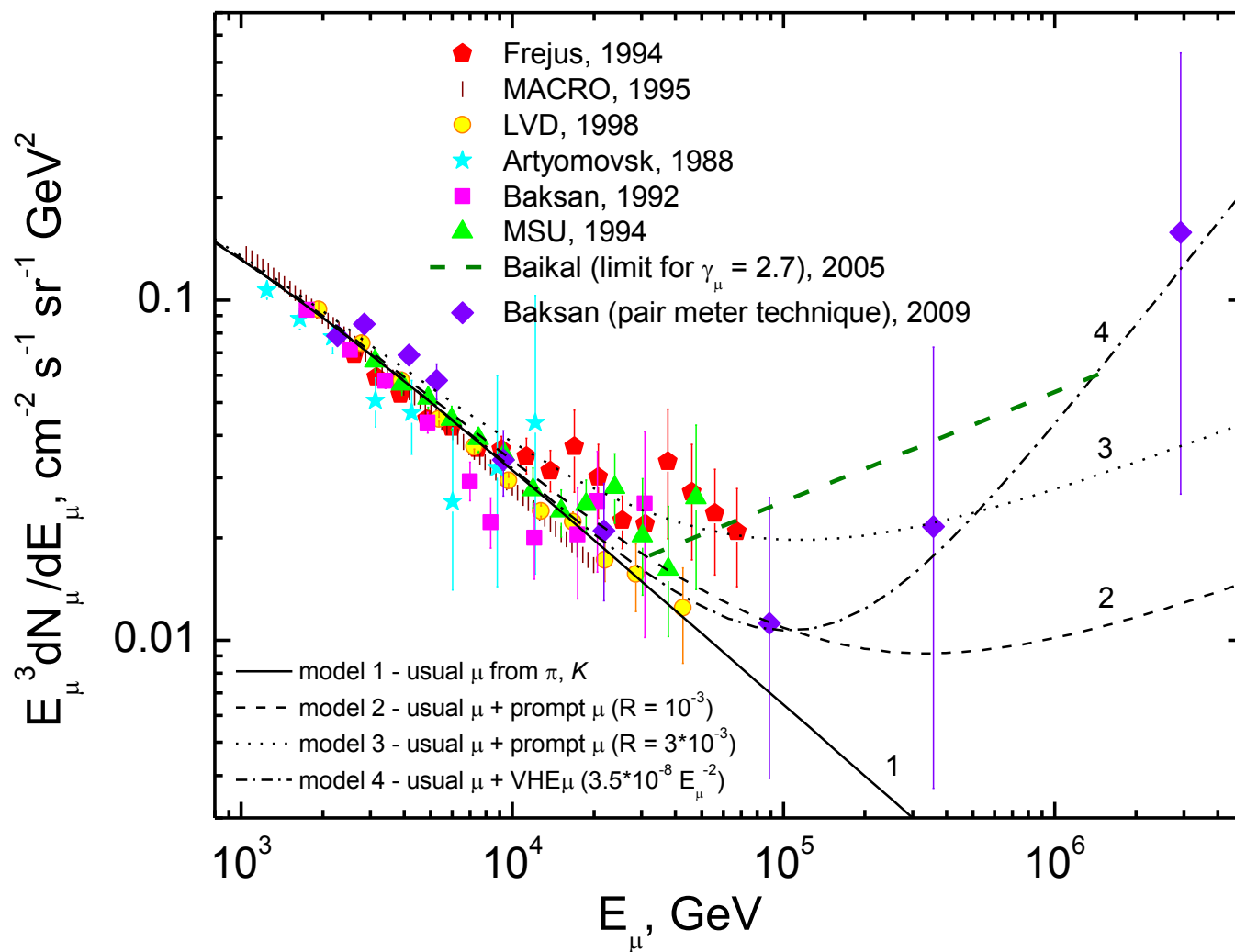
Слева: примеры
экспериментального и
моделированного событий.

Справа: продольный
профиль энергосвечения
(E_1 – энергосвечение в
первом по величине
максимуме, E_2 – во втором
“горбе”, K_2 – глубина
“провала”).

$$K_2 = E_2 / E_{\min}$$

Отбор событий по E_1 соответствует калориметрическому методу, а по E_2 – методу кратных взаимодействий оценки характеристик энергетического спектра мюонов.

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



Проект MONOLITH

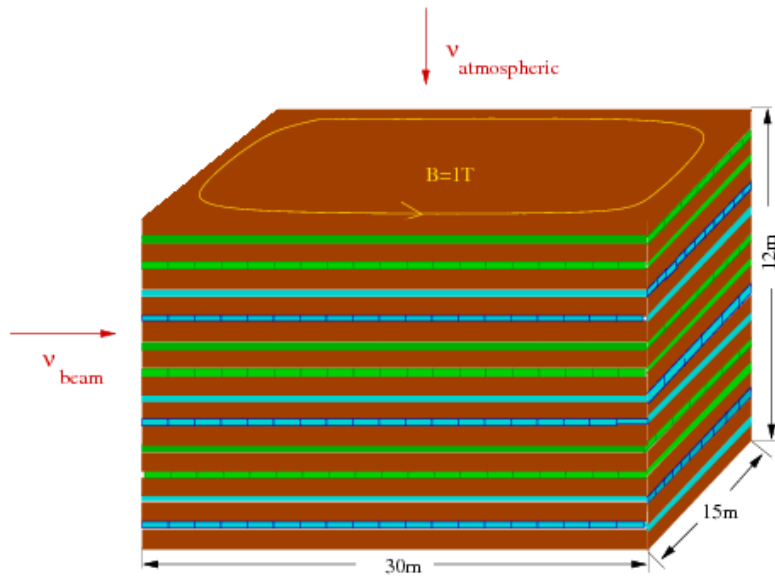
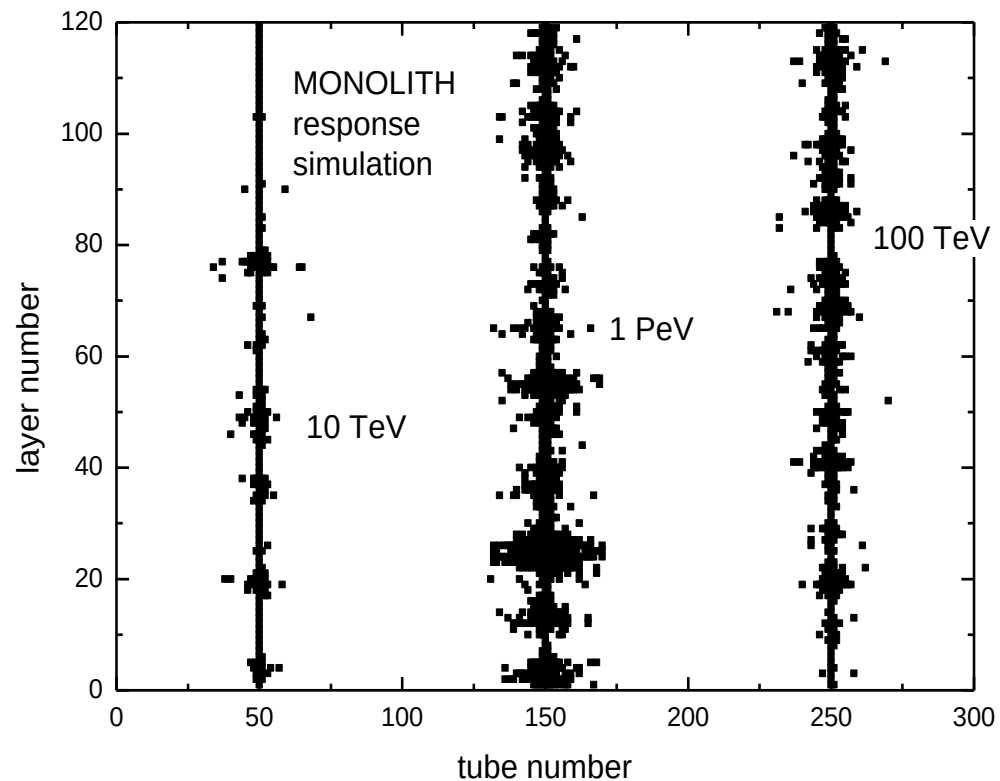


Figure 4.1: Baseline design of the magnetized calorimeter.

M. Ambrosio et al. // The MONOLITH Project.
1999 LNGS-LOI 20/99, CERN/SPSC 99-24

Первоначальный вариант установки:
~ 500 рад. ед., ~ 100 слоев,
~ 20-30 тыс. тонн стали



Гигантские нейтринные телескопы (IceCube, KM3Net, GVD)

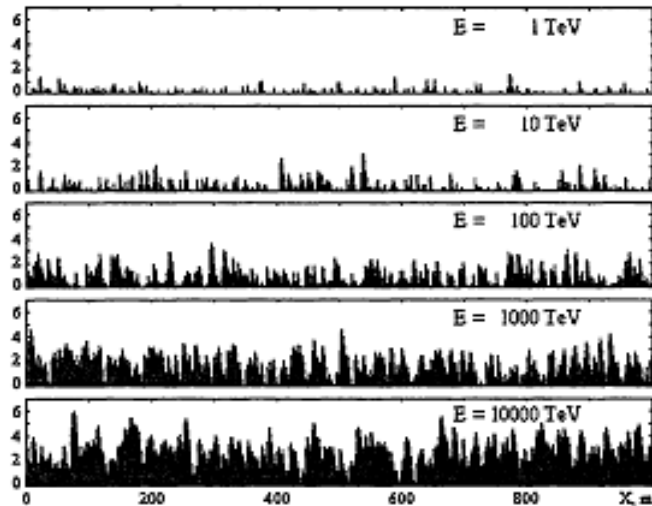


Fig.2. Examples of high energy muon penetration through 1 km water layer. Ordinate gives the common logarithm of the number of relativistic charged particles (associated cascade electrons plus muon itself).

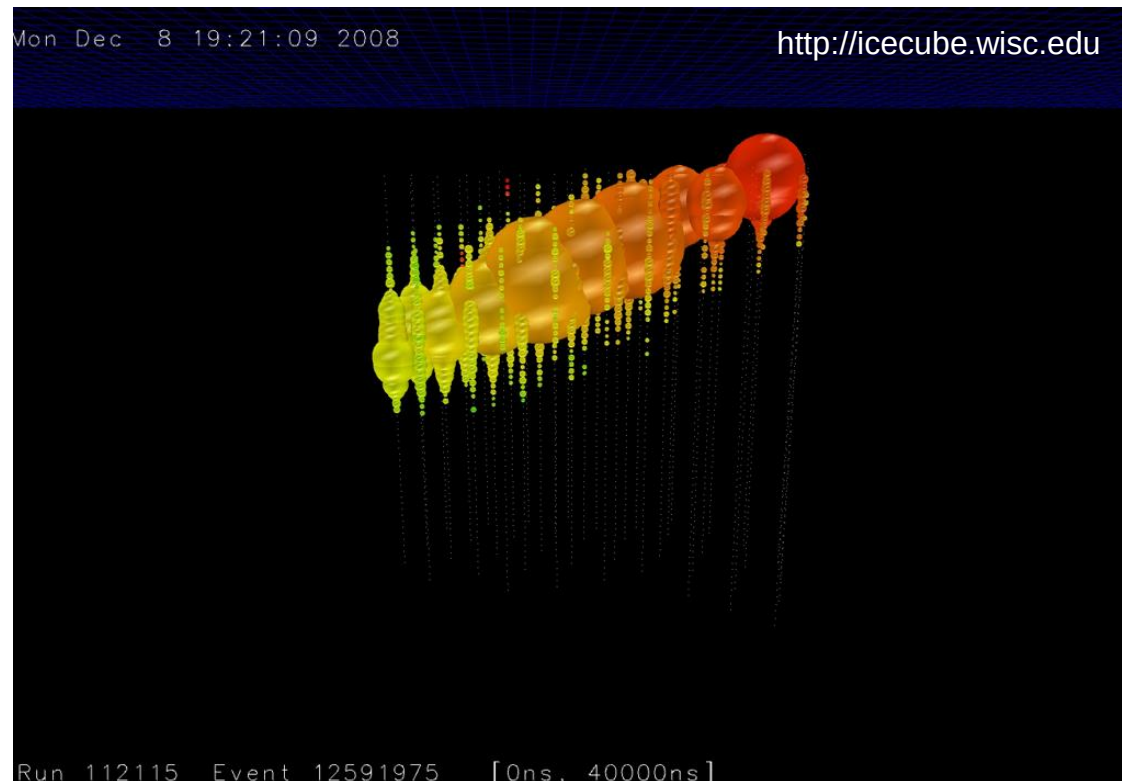
R.P. Kokoulin et al. //
24th ICRC, Rome, 1995, v.1, p. 746

Пример высокоэнергичного события в установке IceCube

100 ТэВ-ный мюон дает примерно в 100 раз больше света, чем мюон умеренной энергии!

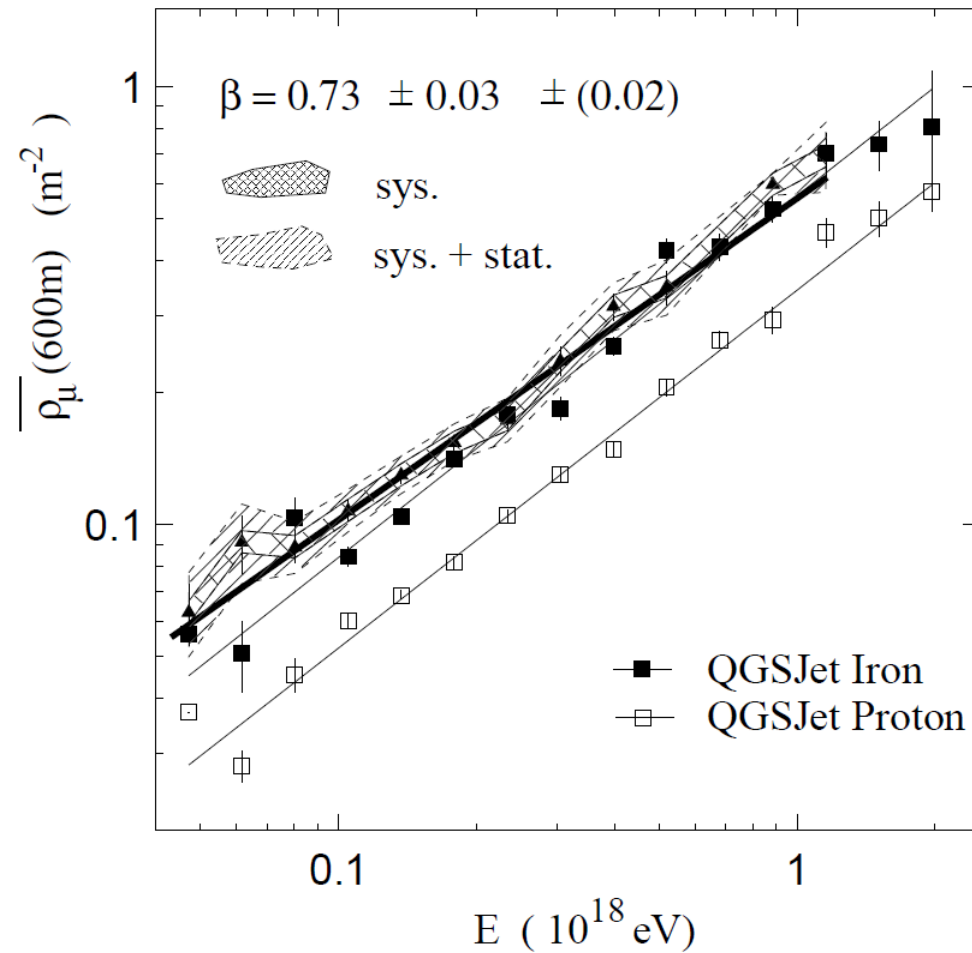
Проблемы: большие флуктуации, мюоны сопровождения, редкая “решетка”, свойства среды (неоднородность) и т.п.

Тем не менее, реализация метода парметра представляется возможной.



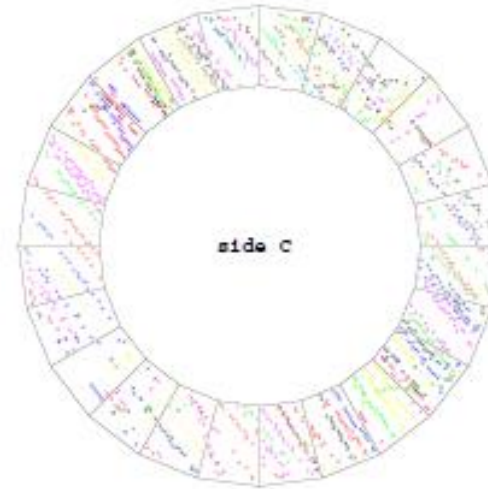
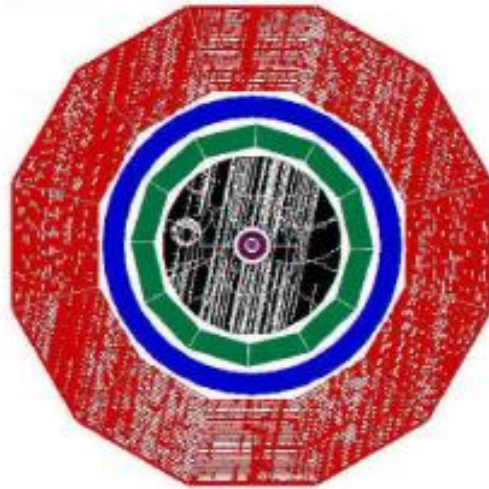
Excess of the muons in HiRes/MIA data

T. Abu-Zayyad et al., Phys. Rev. Letters 84 (2000) 4276



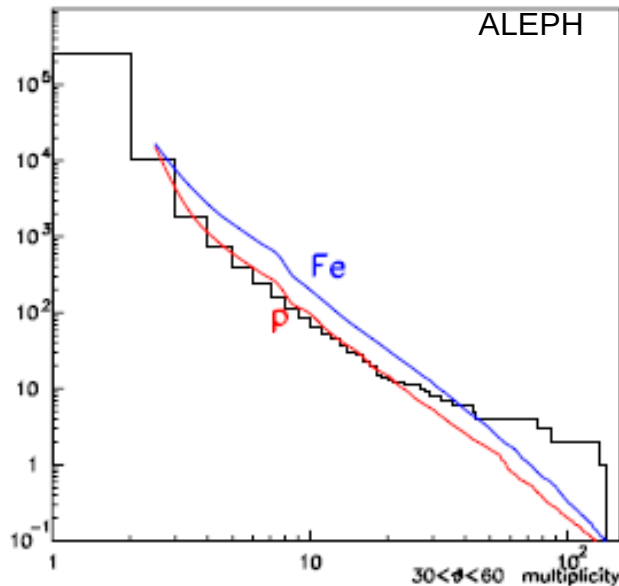
Excess of muon bundles with high multiplicity from ALEPH and DELPHI detectors data (LEP, CERN)

ALEPH

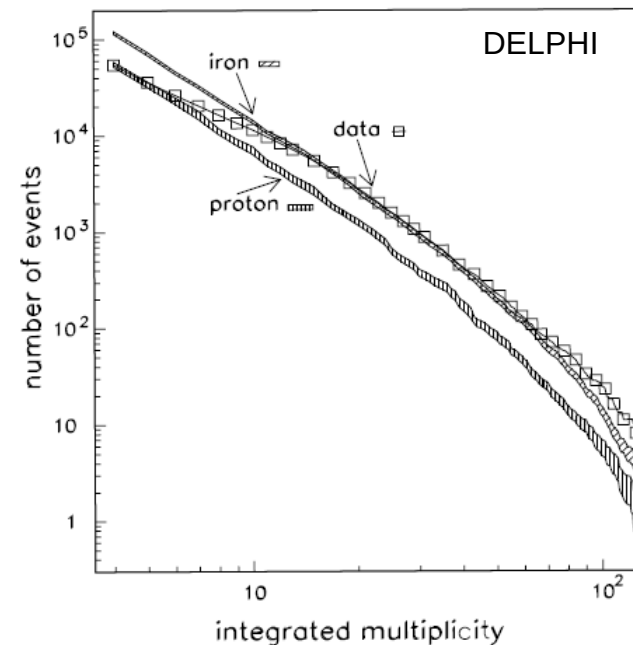


DELPHI

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

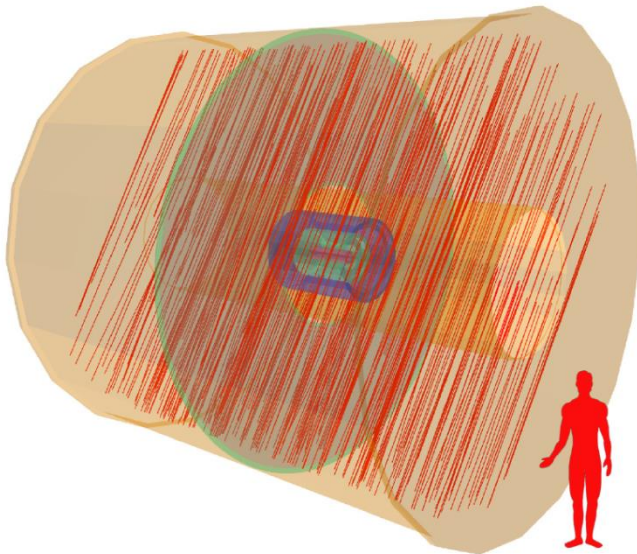
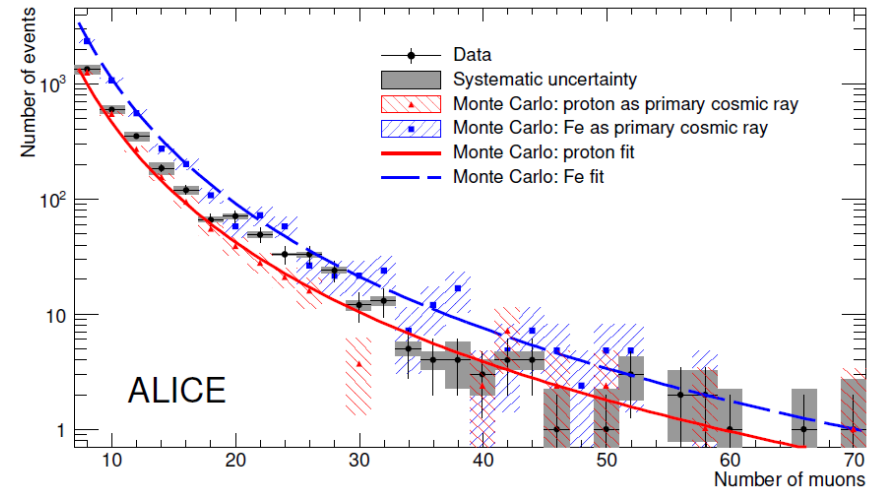
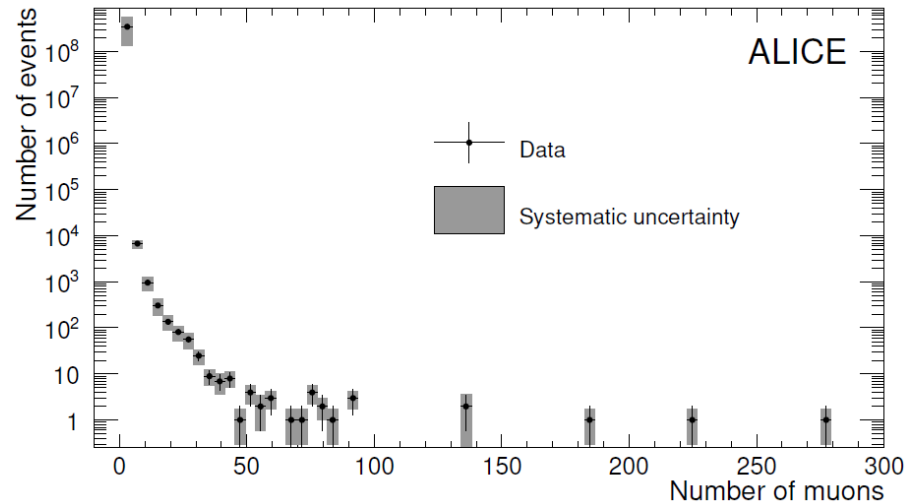


J. Abdallah et al., Astroparticle Physics 28 (2007) 273



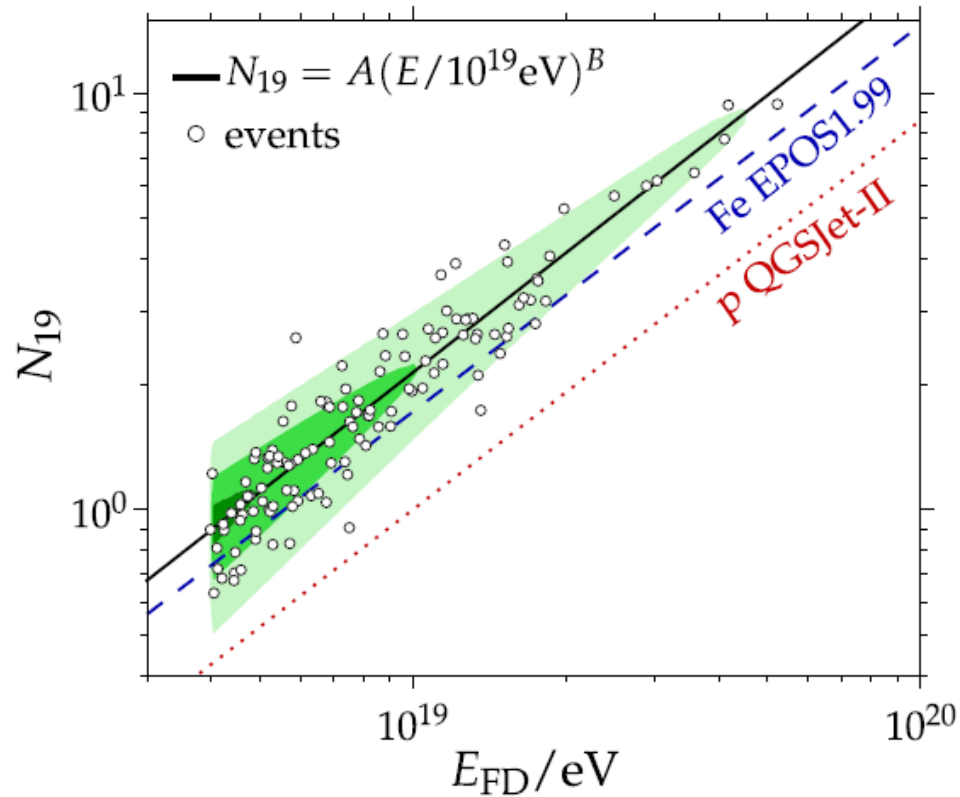
Excess of muon bundles with high multiplicity from ALICE detector data (LHC, CERN)

The ALICE collaboration, JCAP01 (2016) 032

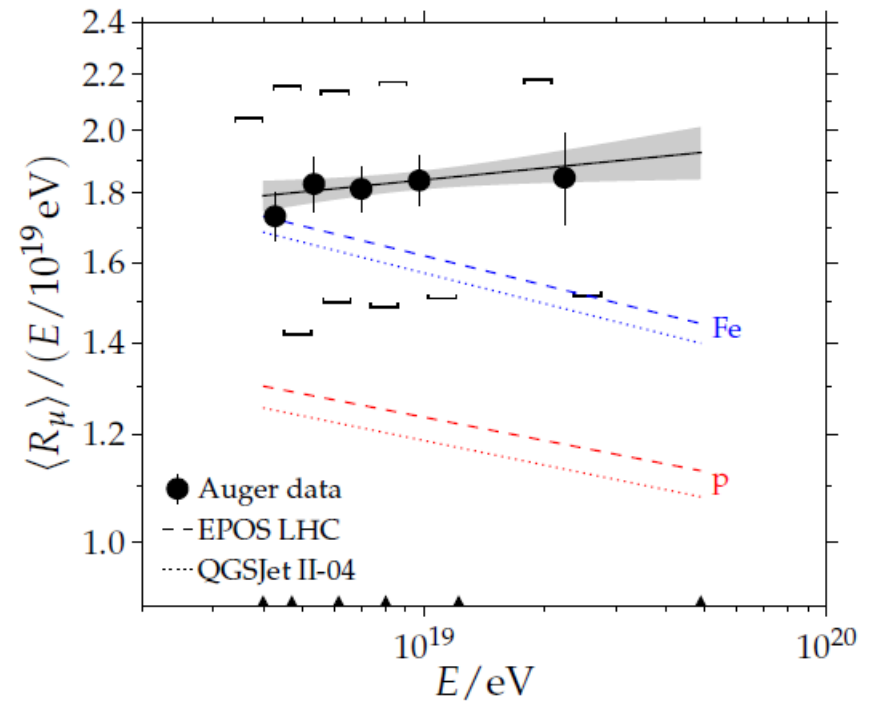


Excess of the number of muons in highly inclined EAS from Pierre Auger Observatory data

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

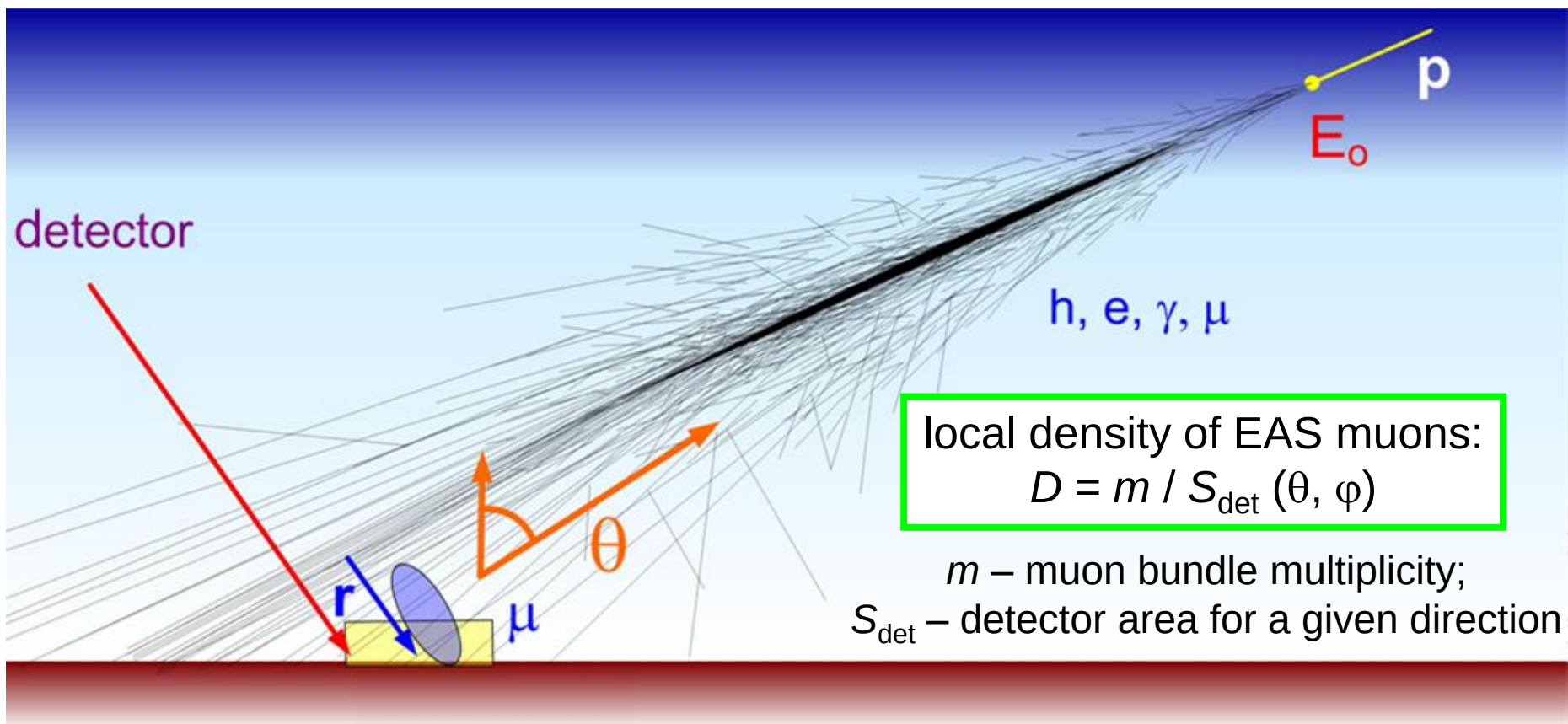


A. Aab et al. *Phys. Rev. D* 91, 032003 (2015)



Novel approach to the analysis of data on muon bundles: method of Local Muon Density Spectra (LMDS)

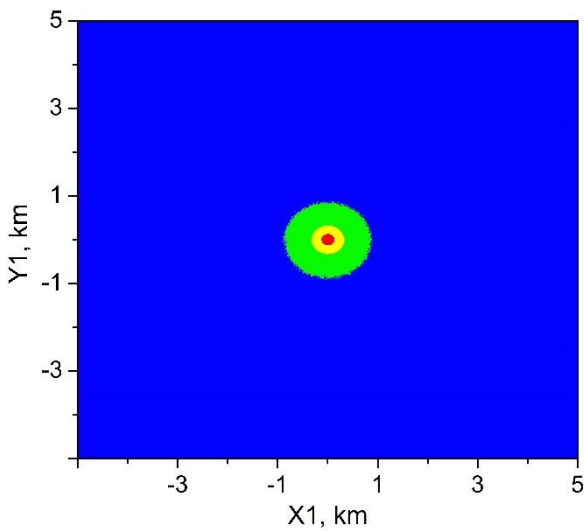
Description of the phenomenology of the LMDS – A.G. Bogdanov et al., Physics of Atomic Nuclei. 2010. V. 73. N 11. P. 1852



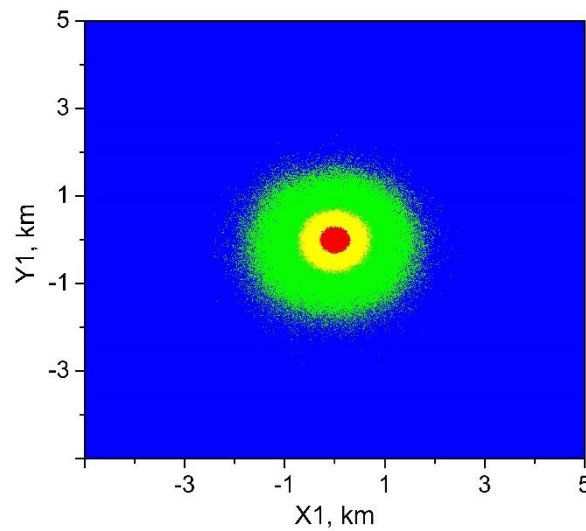
In an individual muon bundle event, local muon density D (at the observation point) is measured. Distribution of events in muon density D forms the LMDS.

Event collection area is determined by transverse dimensions of the showers in muon component (up to several square kilometers at large zenith angles).

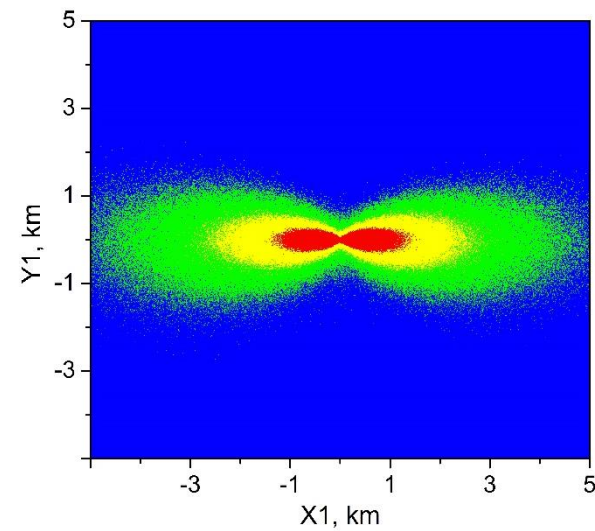
Shower cross section in muons



$\theta = 35^\circ$



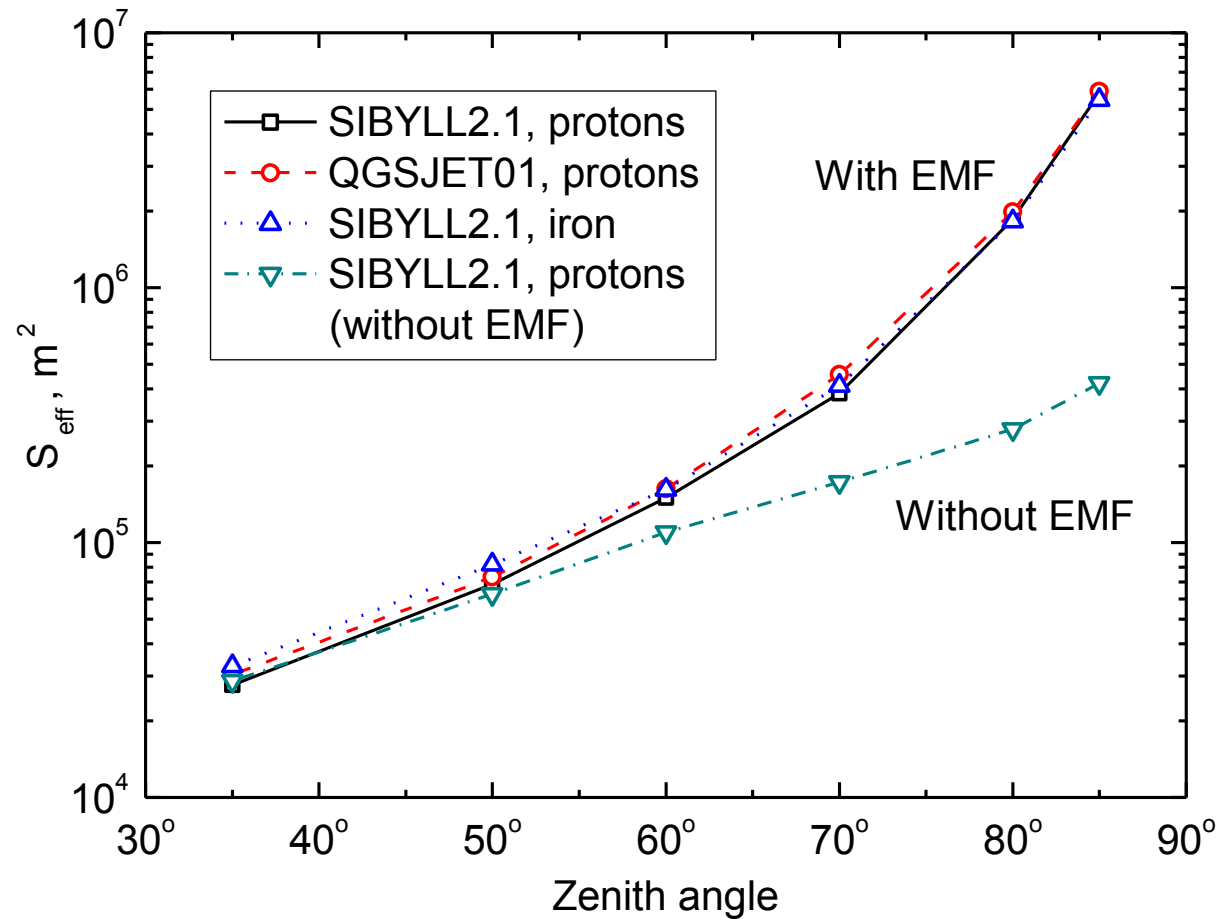
$\theta = 80^\circ$ (without EMF)



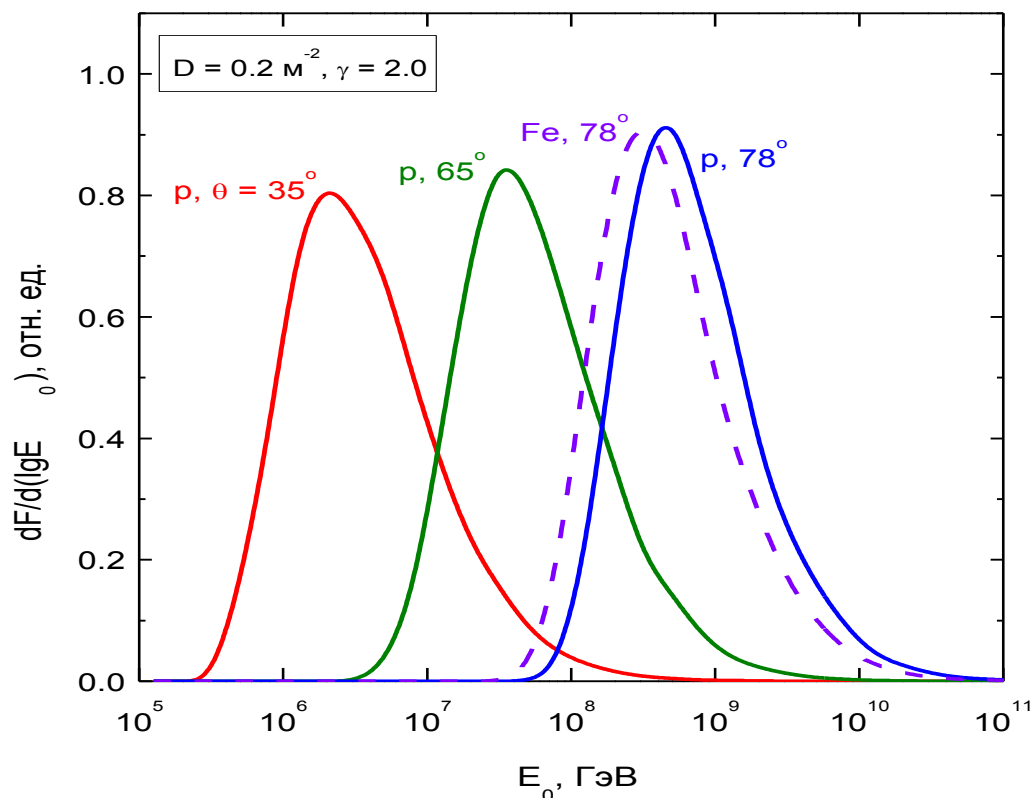
$\theta = 80^\circ$ with EMF

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

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

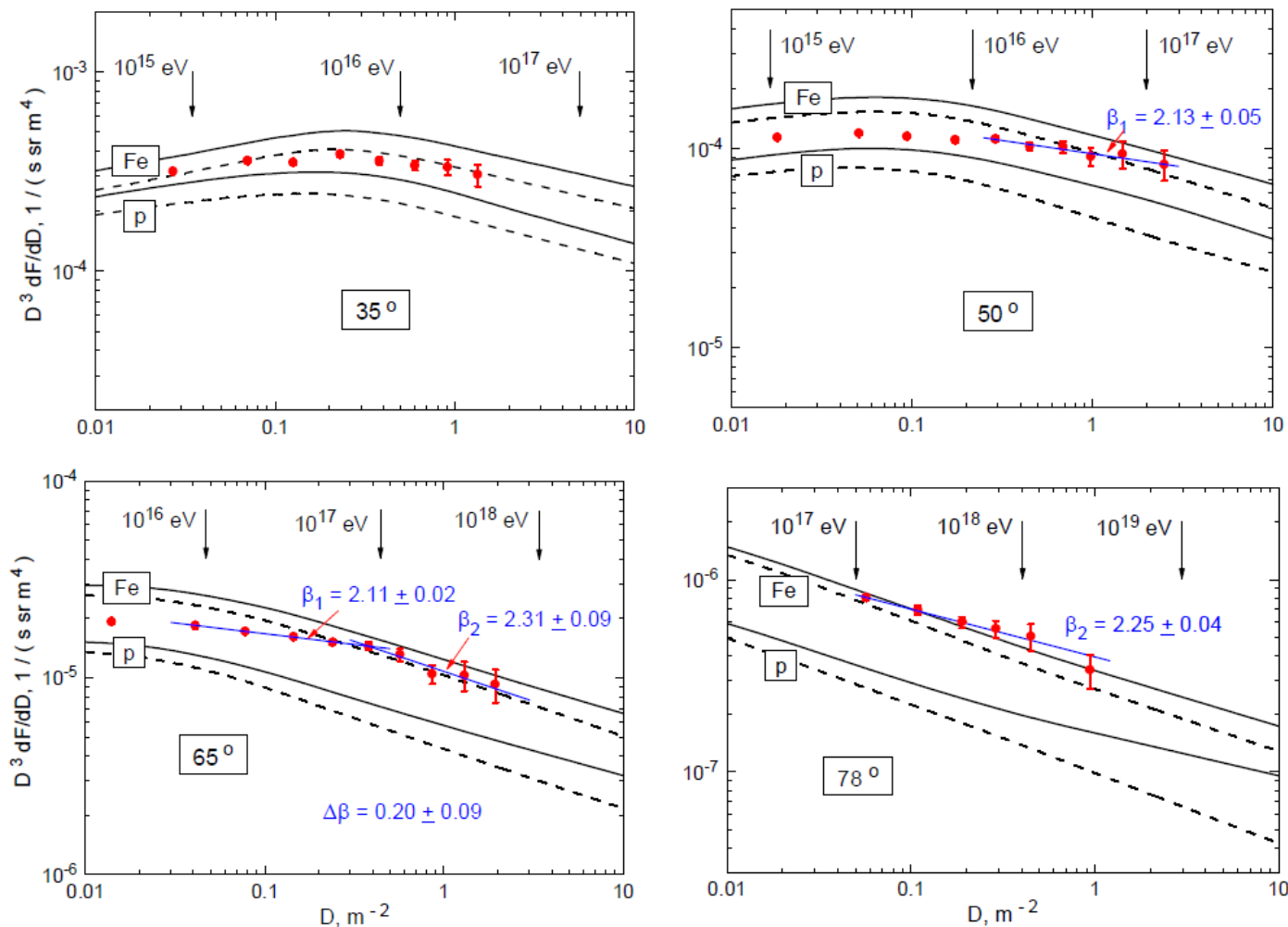


Распределение энергий первичных частиц КЛ, дающих вклад в события с фиксированной плотностью мюонов при различных зенитных углах



Вклад в события с фиксированной локальной плотностью мюонов дают ливни с различными энергиями, регистрируемые на разных (случайных) расстояниях от оси. Однако, как показали оценки, вследствие быстрого уменьшения интенсивности космических лучей с ростом энергии эффективный интервал энергий первичных частиц оказывается относительно узким. При одинаковой плотности мюонов разным зенитным углам соответствуют существенно (на порядки) различающиеся эффективные энергии первичных частиц.

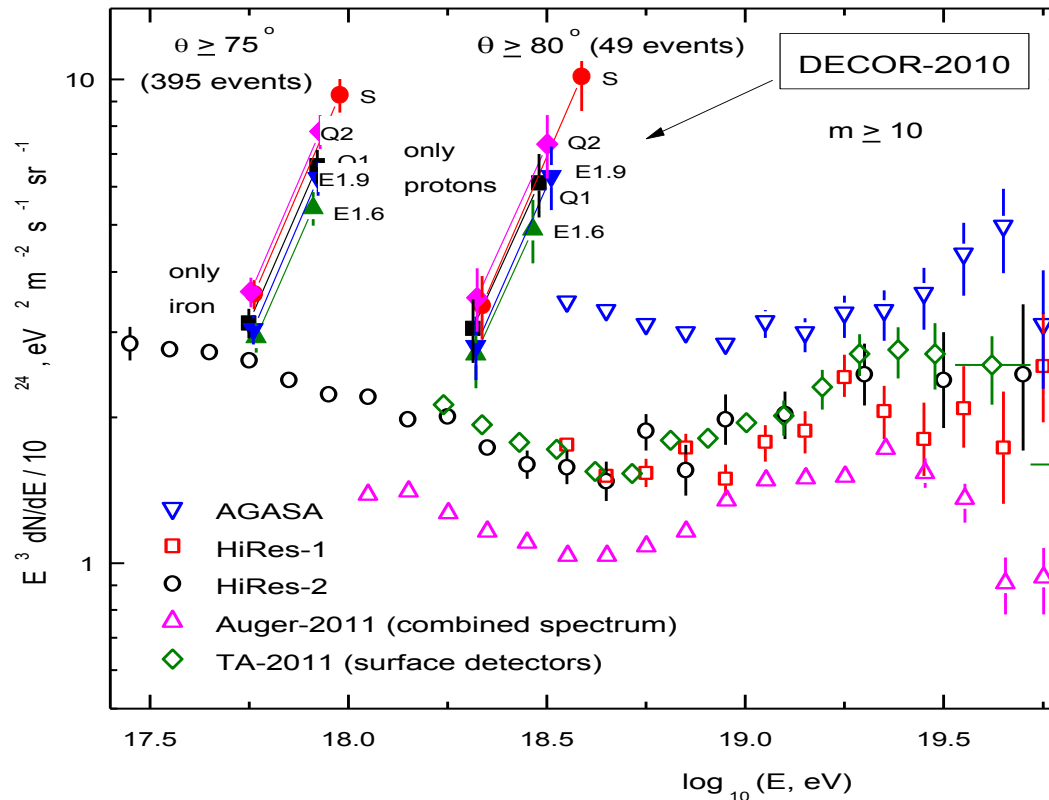
Experimental LMDS (local muon density spectra) reconstructed from DECOR data on muon bundles



Measured (points) and calculated LMDS for 4 zenith angles (labels in the frames). Thin lines represent partial power fits of the data between 10^{16} and 10^{17} eV (integral spectrum slope β_1), and above 10^{17} primary energy (β_2). The solid and dashed curves represent the results of the calculations performed by using the QGSJET01 and SIBYLL-2.1 models. The lower pair of curves corresponds to primary protons, upper pair – iron nuclei.

Excess of muon bundles intensity from DECOR data 2002-2007

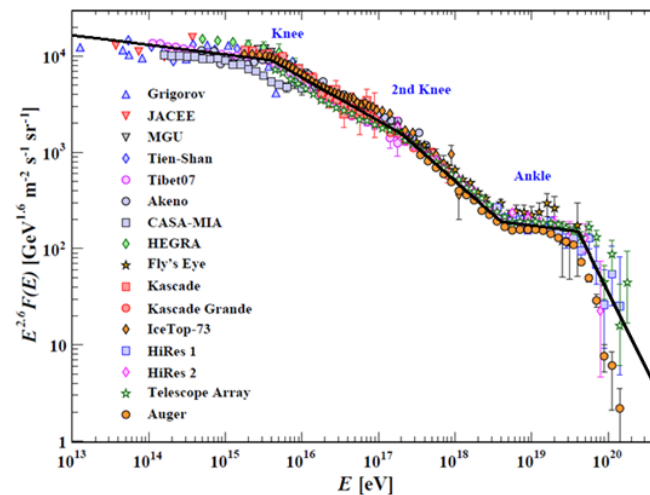
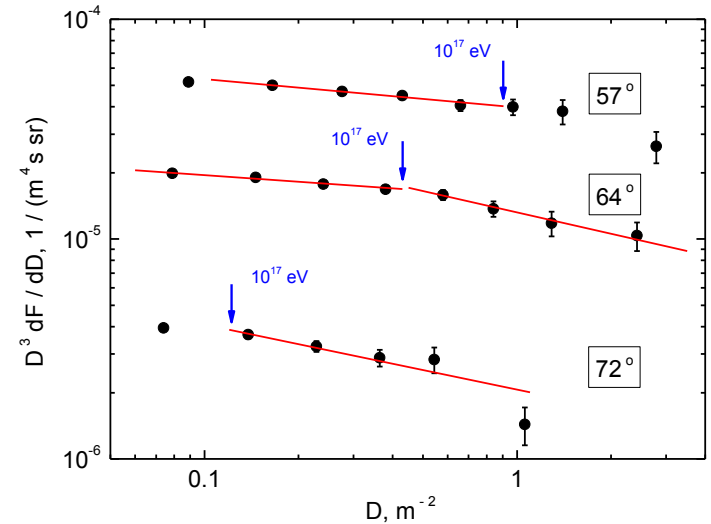
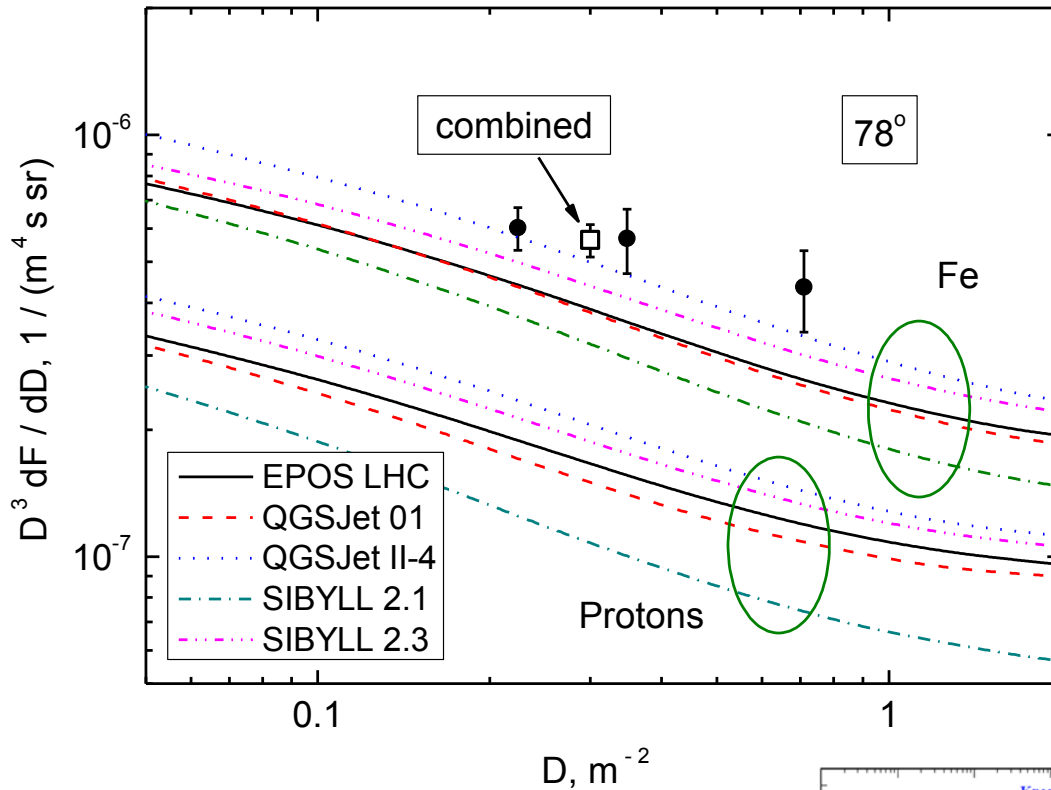
R.P. Kokoulin et al., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 196 (2009) 106; O. Saavedra et al., Journ. of Phys.: Conf. Ser. 409 (2013) 012009



Reconstructed energy spectrum of primary cosmic rays at ultra high energies

At large zenith angles and high multiplicities, the measured muon bundle intensity is not compatible with fluorescence data for any interaction model, even under assumption of a heavy primary composition. This contradiction becomes even more significant, if one takes into account that fluorescence data favor a light (predominantly proton) composition near 1 EeV.

Excess of muon bundles intensity from DECOR data 2002-2016



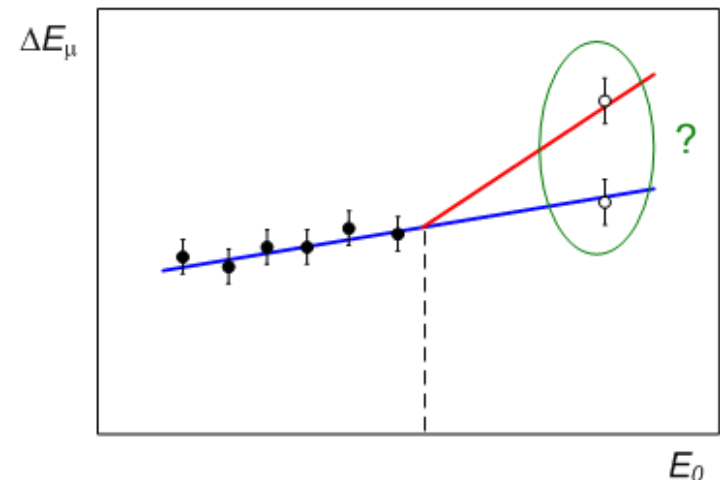
“Мюонная загадка” в экспериментах по регистрации космических лучей

В ряде экспериментов по регистрации космических лучей в области высоких (ALEPH, DELPHI) и сверхвысоких (ДЕКОР, Pierre Auger Observatory) энергий наблюдается избыток мюонных событий по сравнению с расчетами, выполненными в рамках существующих моделей адронных взаимодействий, даже в предположении тяжелого (ядра железа) состава первичного космического излучения.

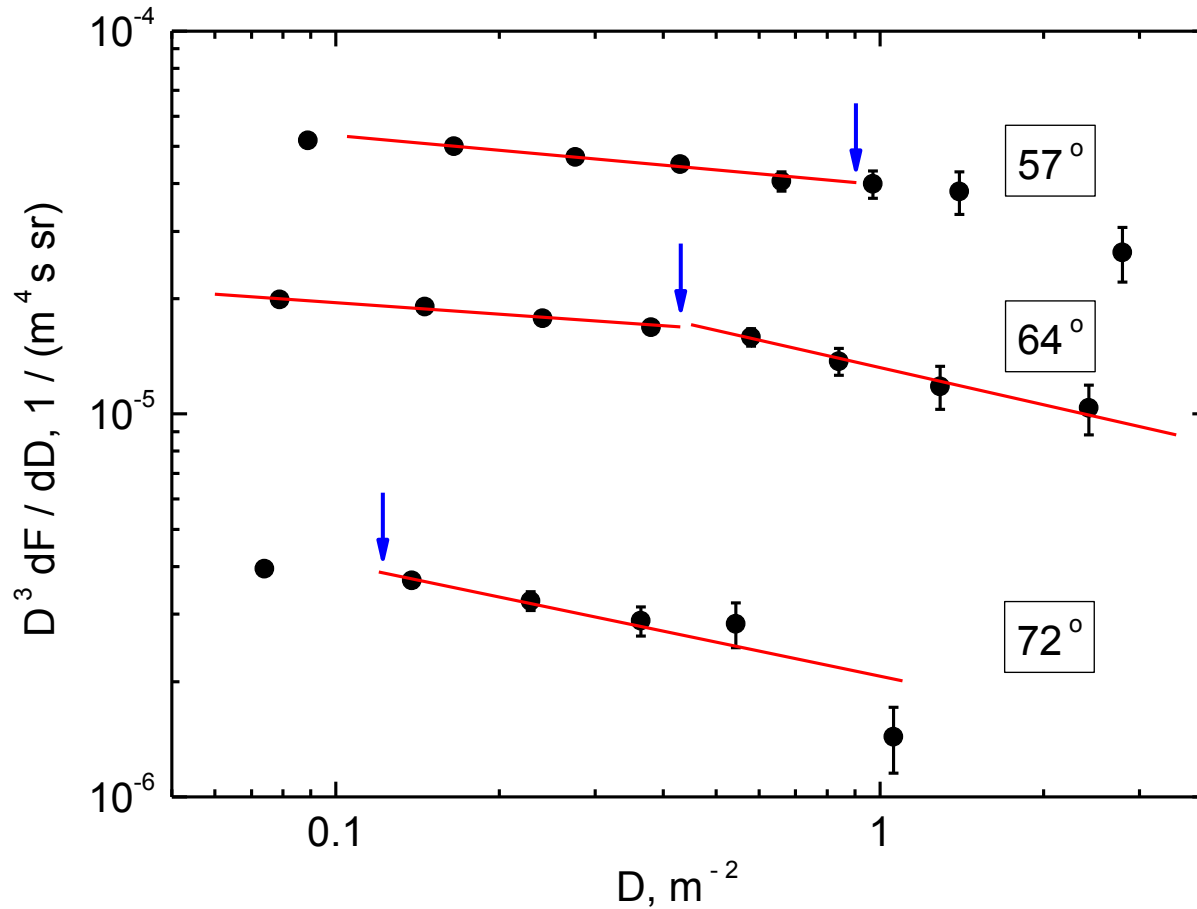
Необходимо исследование энергетических характеристик мюонной компоненты ШАЛ. Возможный подход – измерение энерговыделения групп мюонов при их прохождении через вещество детектора.

Средние потери мюонов в веществе практически линейно зависят от энергии мюонов:
$$dE/dX \sim a + bE.$$

Появление избытка мюонов высоких энергий в группах должно приводить к изменению зависимости средних энерговыделений от энергии первичных частиц космических лучей.



IceCube



Reconstructed local muon density spectra for three different zenith angles and piece-wise power function fits of the data. Arrows indicate the positions of effective 10^{17} eV primary particle energy for different angles.

LVD (muon energy loss) and EAS-TOP (air shower size) combined data analysis

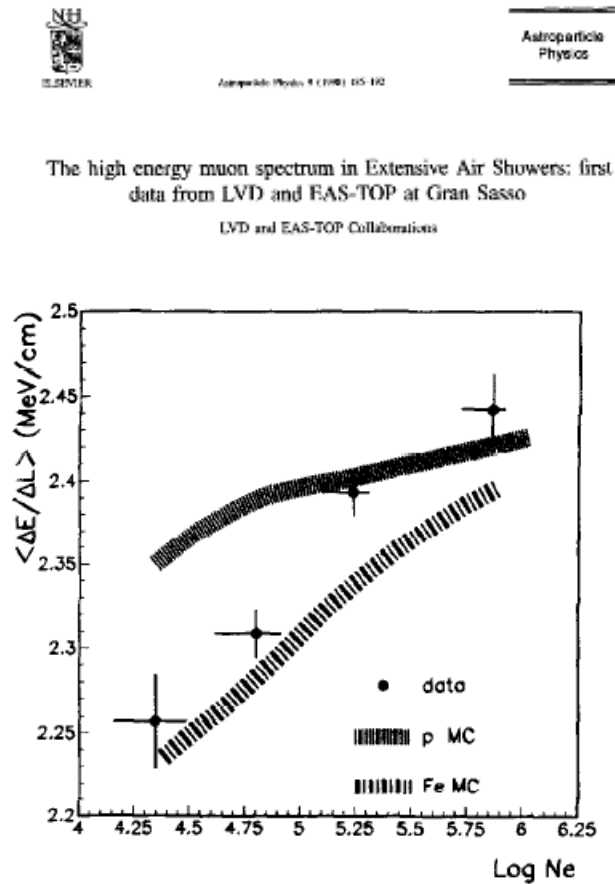


Fig. 8. From simulations: $\langle \Delta E / \Delta L \rangle$ as a function of shower size for pure proton and pure iron compositions. Data are also shown.

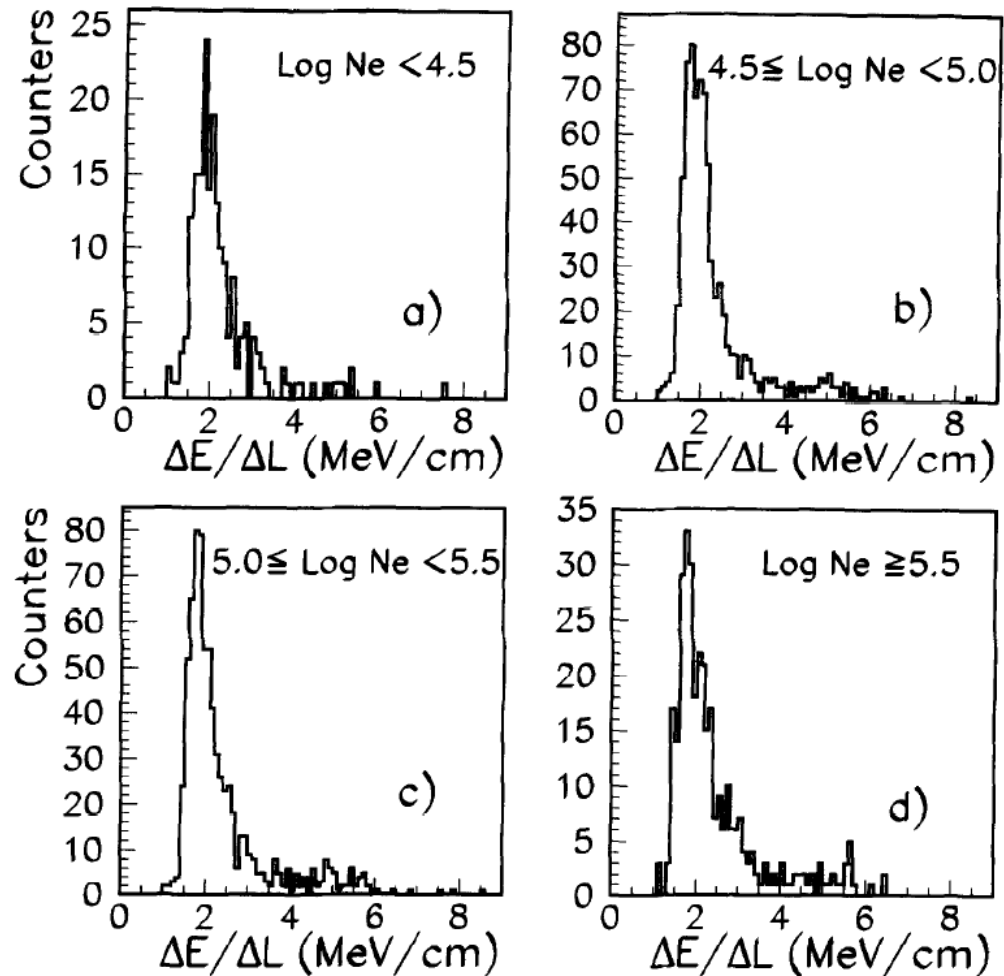


Fig. 5. Distributions of energy deposition per unit track length in LVD scintillators for muons time correlated with EAS-TOP shower events, with shower size Ne belonging to four different intervals (a)–(d). Saturation occurs in each interval at the rate of 2.1%, 2.5%, 3.4% and 5.2%, respectively, for intervals (a), (b), (c) and (d).

Установка НЕВОД-ДЕКОР

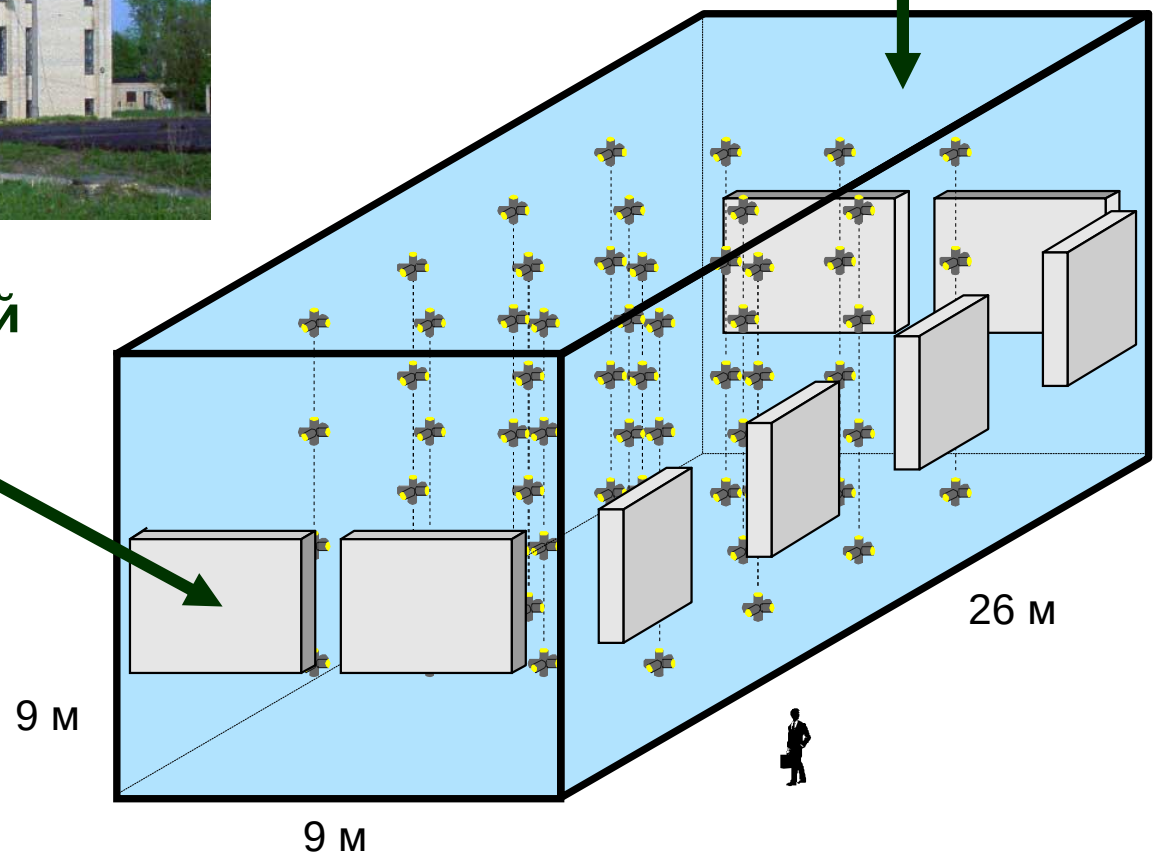


**Черенковский водный
детектор НЕВОД
(объем 2000 м³)**

91 квазисферический
модуль (546 ФЭУ)

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

8 супермодулей (пластиковые
газоразрядные камеры)



Регистрирующая система черенковского водного калориметра НЕВОД



Пространственная решетка, в узлах которой расположены
квазисферические измерительные модули:
25 гирлянд (91 КСМ) = 16 гирлянд $\times$ 4 КСМ + 9 гирлянд $\times$ 3 КСМ

Квазисферические измерительные модули (КСМ)



Каждый КСМ состоит из 6 фотоумножителей ФЭУ-200 ($\varnothing$ плоского фотокатода 15 см), ориентированных вдоль осей ортогональной системы координат. Широкий динамический диапазон $1 - 10^5$ фотоэлектронов обеспечивается съемом сигналов с 12-го и 9-го динодов ФЭУ и позволяет реализовать калориметрический режим измерения энергосвечения.

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

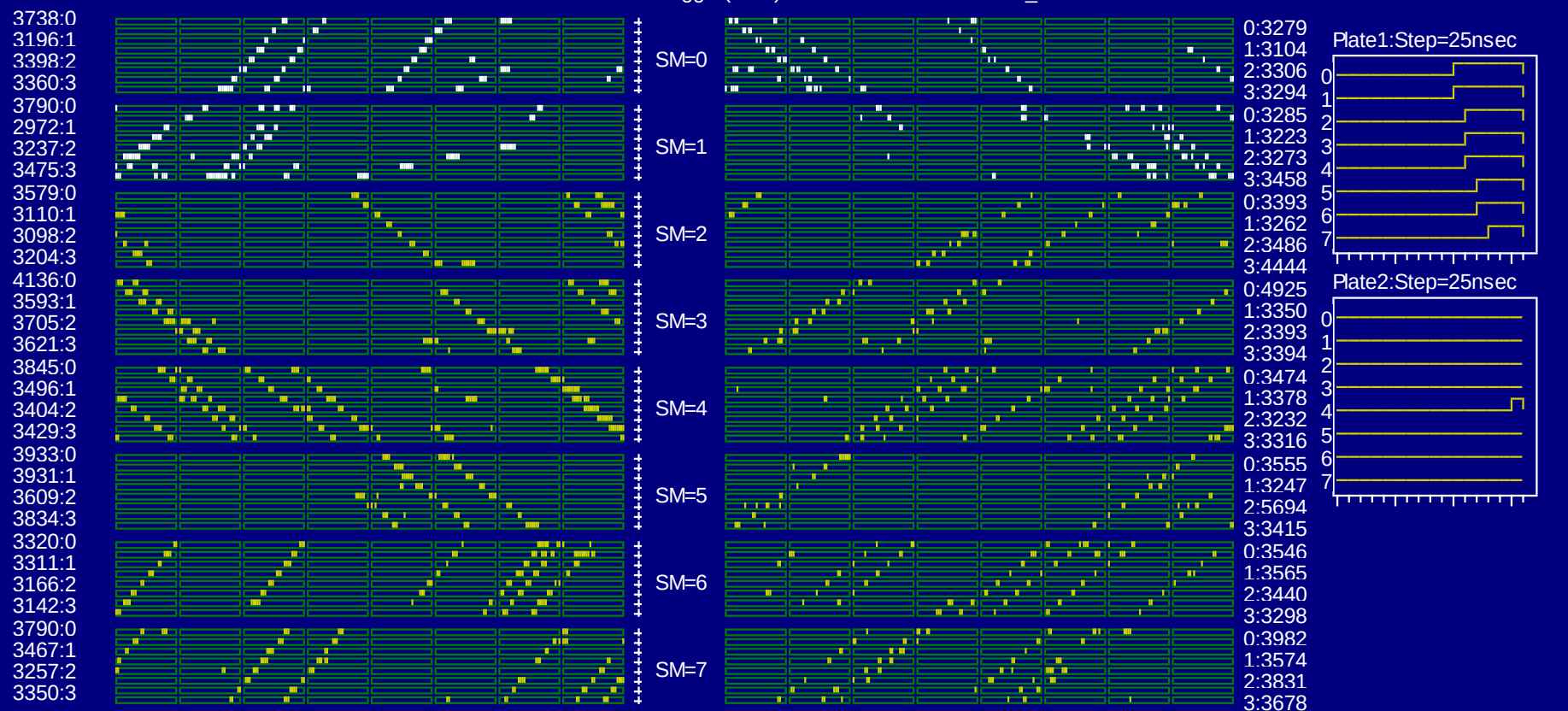


Один СМ имеет эффективную площадь 8.4 м^2 и состоит из 8 плоскостей газоразрядных стримерных трубок. Плоскости оснащены двухкоординатной системой считывания сигналов с внешних стрипов.

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 Weir_Time:294.108 msec



Y-проекция

X-проекция

Точность локализации треков заряженных частиц ≈ 1 см.
Угловая точность реконструкции треков, пересекающих СМ лучше 1° .

Экспериментальные данные установки НЕВОД-ДЕКОР

Эксперимент по исследованию энергосвыделений групп мюонов
начат на установке НЕВОД-ДЕКОР в 2012 году

Представлены результаты анализа данных для трех серий измерений:

10 (май 2012 – март 2013),

11 (июль 2013 – апрель 2015),

12 (июль 2015 – март 2016)

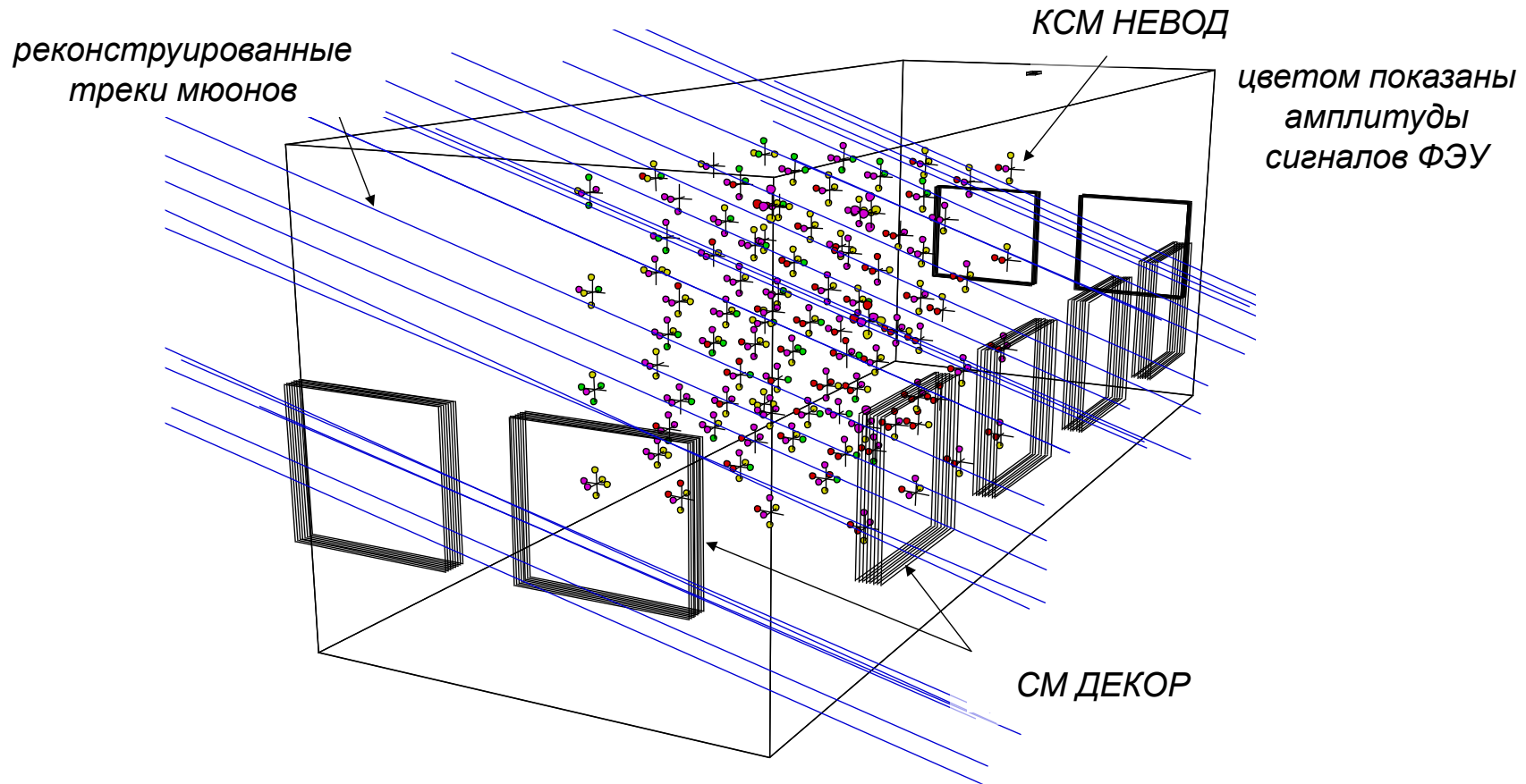
“Живое” время – 23215.5 ч

m (множественность) ≥ 5 and θ (зенитные углы) $\geq 55^\circ$ – 39542 соб.;

дополнительно: $40^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ – 15084 соб. (3253 ч)

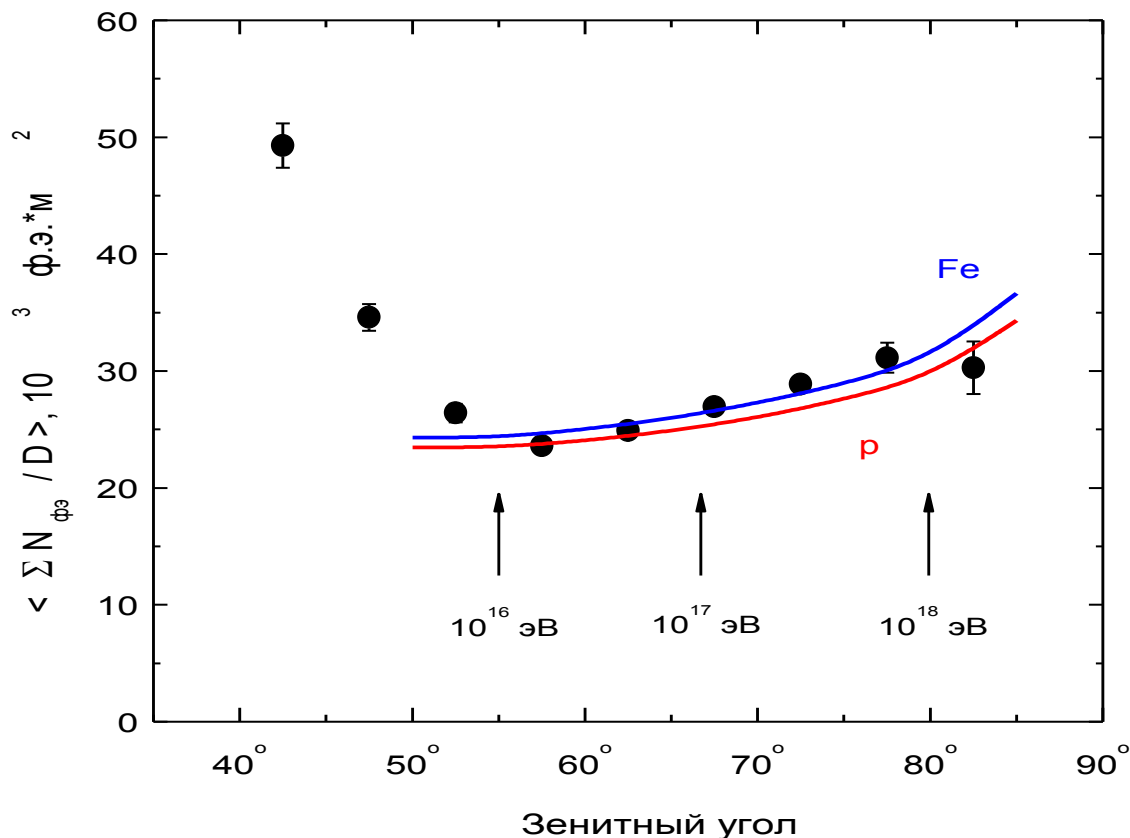
Два сектора азимутальных углов (105 - 165° и 195 - 255°) –
6 из 8 супермодулей ДЕКОР экранированы водным объемом НЕВОД

Пример события с группой мюонов в экспериментальном комплексе НЕВОД-ДЕКОР



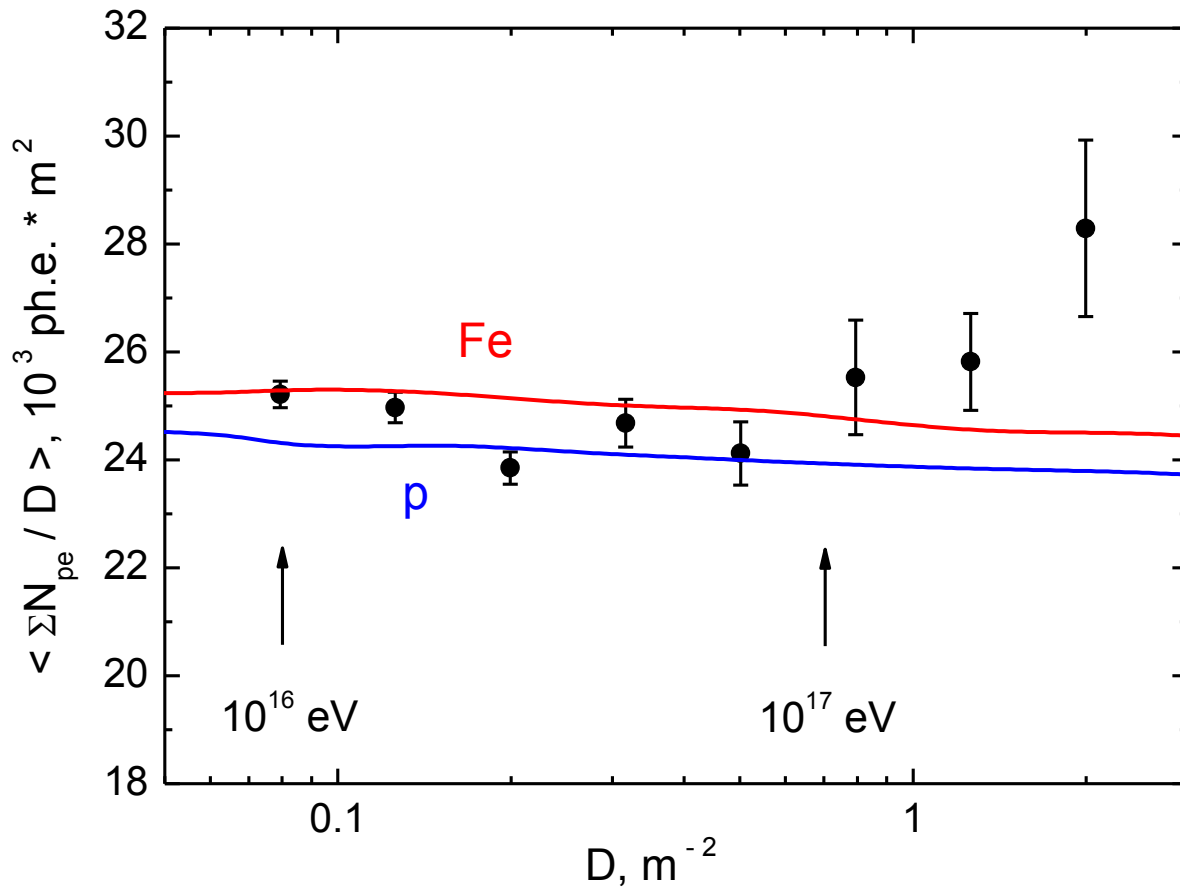
Плотность мюонов оценивается по данным установки ДЕКОР.
Энерговыделение измеряется в черенковском водном калориметре НЕВОД.

Зависимость удельного энергосодержания от зенитного угла



При малых зенитных углах (40 – 55°) существенен остаточный вклад электронно-фотонной и адронной компонент ШАЛ. Для зенитных углов $\theta > 60^\circ$, где в событиях остаются практически только мюоны, наблюдается рост среднего удельного энергосодержания с увеличением зенитного угла. Это говорит об увеличении средней энергии мюонов в группах и согласуется с ожидаемой зависимостью, полученной с помощью моделирования мюонной компоненты ШАЛ на основе программы CORSIKA.

Average specific NEVOD response as a function of muon density



In fact (for a fixed range of zenith angles), this is a measurement of the dependence $\langle \Sigma N_{pe} / D \rangle$ on the energy of primary particles. Results of simulations demonstrate a trend to a decrease of the mean muon energy in the bundles with the increase of the primary particle energy. On the contrary, the data exhibit a hint to some increase of the energy deposit at densities of muons greater than 1 particle/ m^2 (effective primary energies of 10^{17} eV and above).

Спасибо за внимание!

