

Шестые Черенковские чтения
ФИАН, 9 апреля 2013 г.

**Исследование энергетического спектра
мюонов космических лучей
в черенковском водном детекторе НЕВОД**

**Хохлов С.С.
от коллаборации НЕВОД-ДЕКОР**

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Научно-образовательный центр НЕВОД

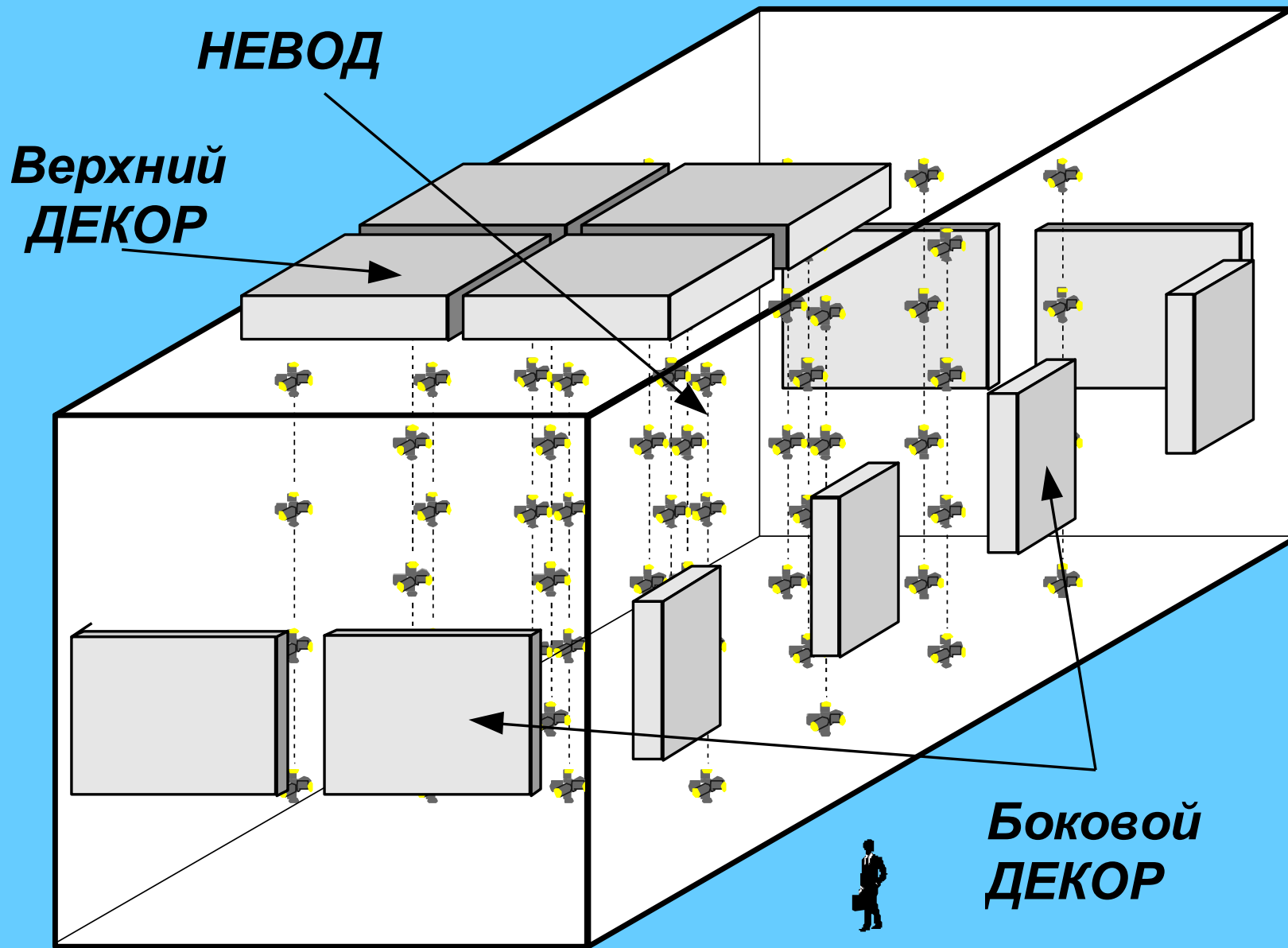
План доклада

1. Введение.
2. Экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР.
3. Калибровка ФЭУ ЧВД НЕВОД.
4. Каскадные ливни в черенковском свете.
5. Методика исследования и результаты.

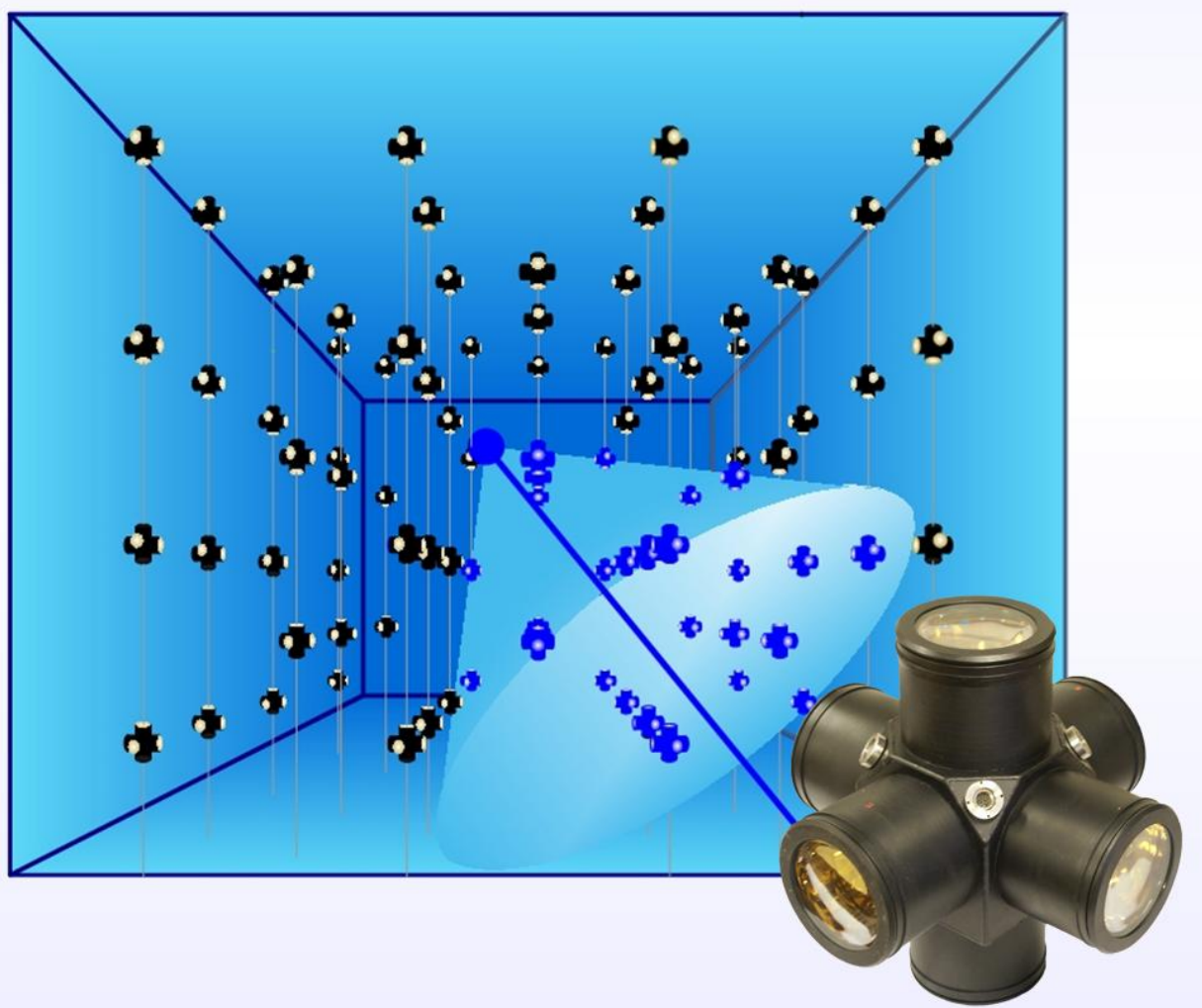
Введение

- Энергетический спектр мюонов является важнейшей характеристикой КЛ.
- Однако, результаты его измерений, проведенных на различных установках в разные периоды времени, отличаются друг от друга.
- Модернизированный комплекс НЕВОД-ДЕКОР позволяет проводить длительные измерения энергетического спектра мюонов в черенковском водном калориметре и изучать временные изменения его характеристик.

Экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР



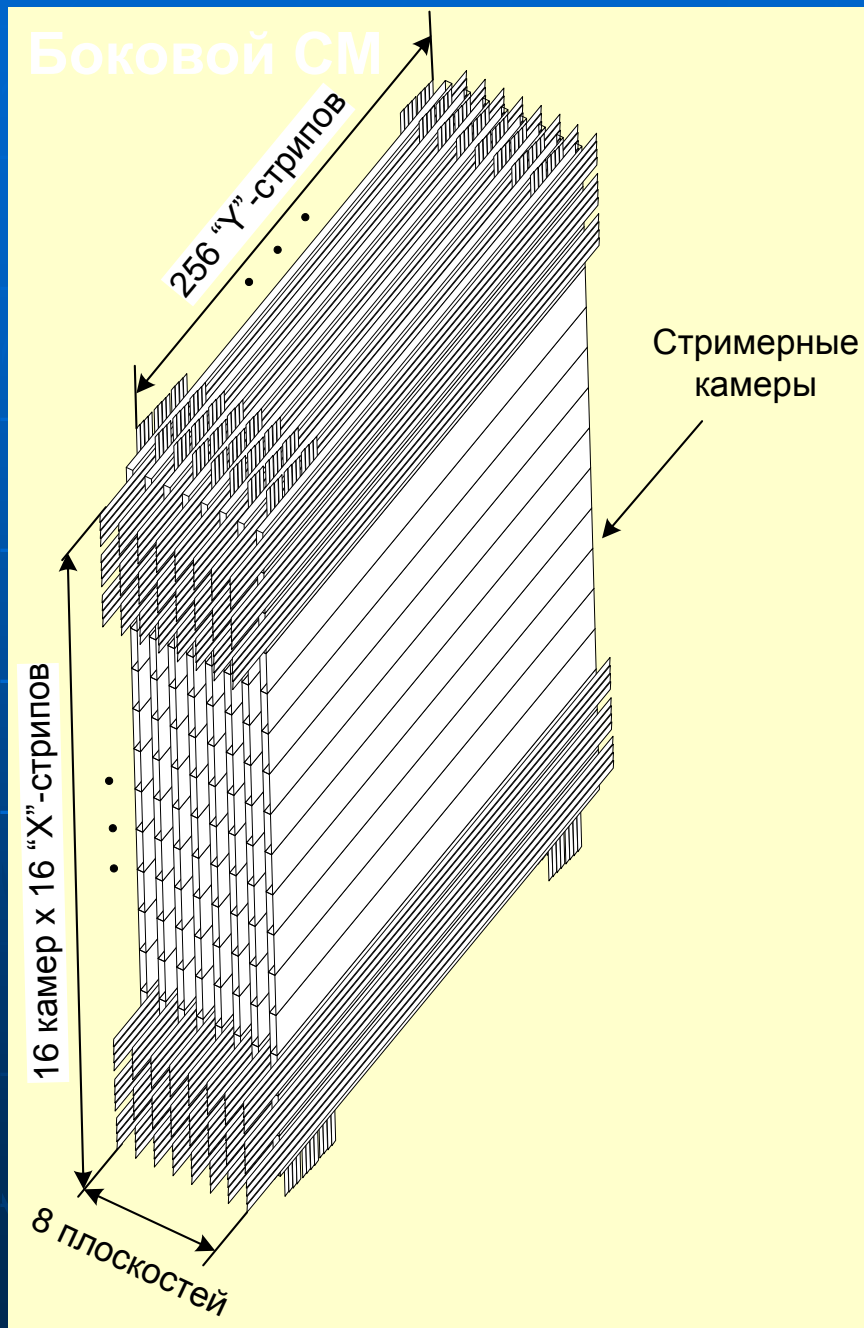
Черенковский водный детектор НЕВОД



- Объем 2000 м³.
- Детектирование черенковского излучения производится квазисферическими модулями (КСМ).
- Пространственная решетка: 91 КСМ в 25 гирляндах.
- Динамический диапазон каждого канала 1 – 10⁵ ф.э.

Малый шаг пространственной решетки и широкий динамический диапазон позволяют детектору работать в режиме калориметра.

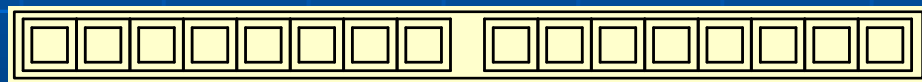
Супермодуль установки ДЕКОР



Камера:

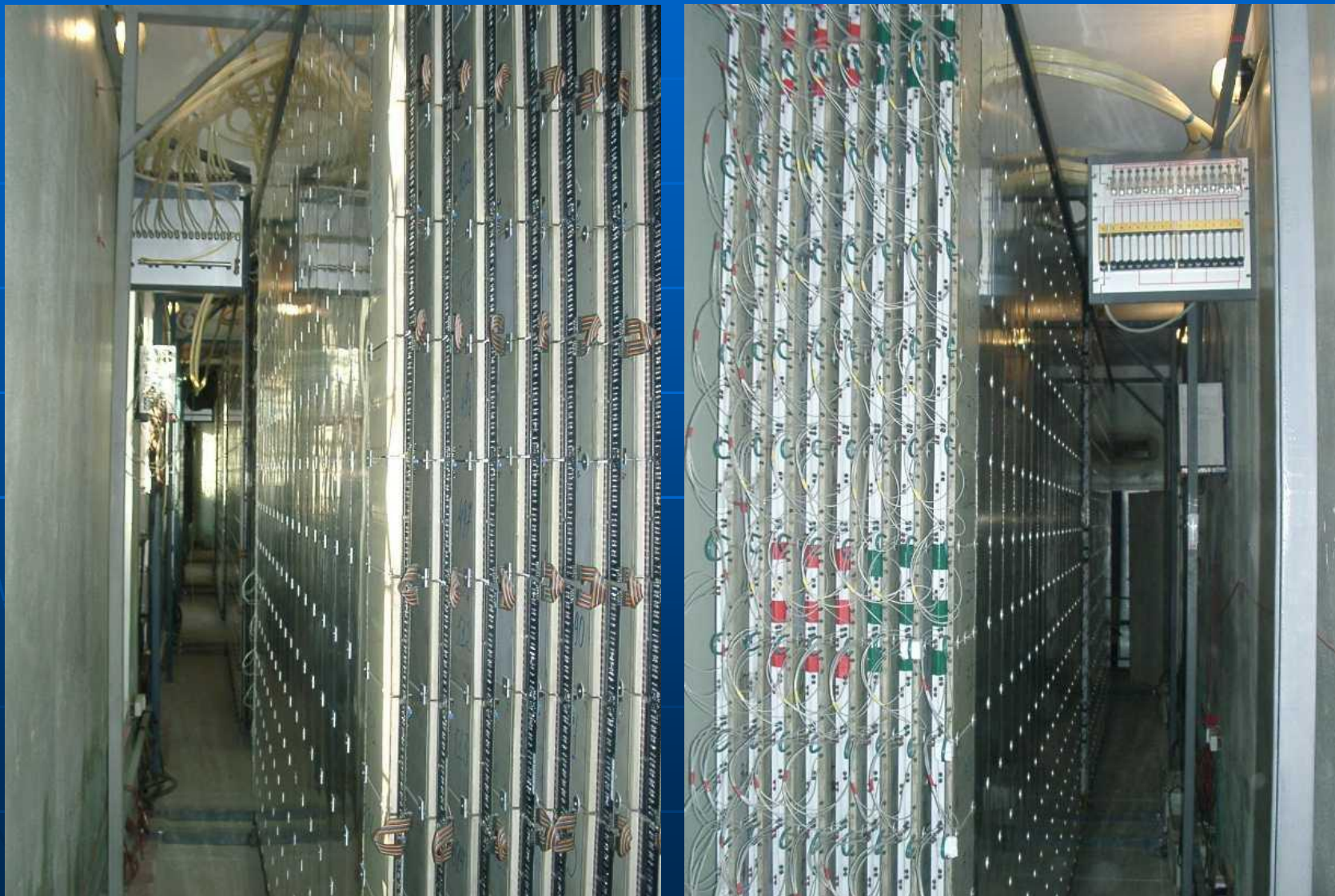
16 газоразрядных трубок
с внутренним сечением
 $0.9 \times 0.9 \text{ см}^2$.

Камера работает в
режиме ограниченного
стримера.

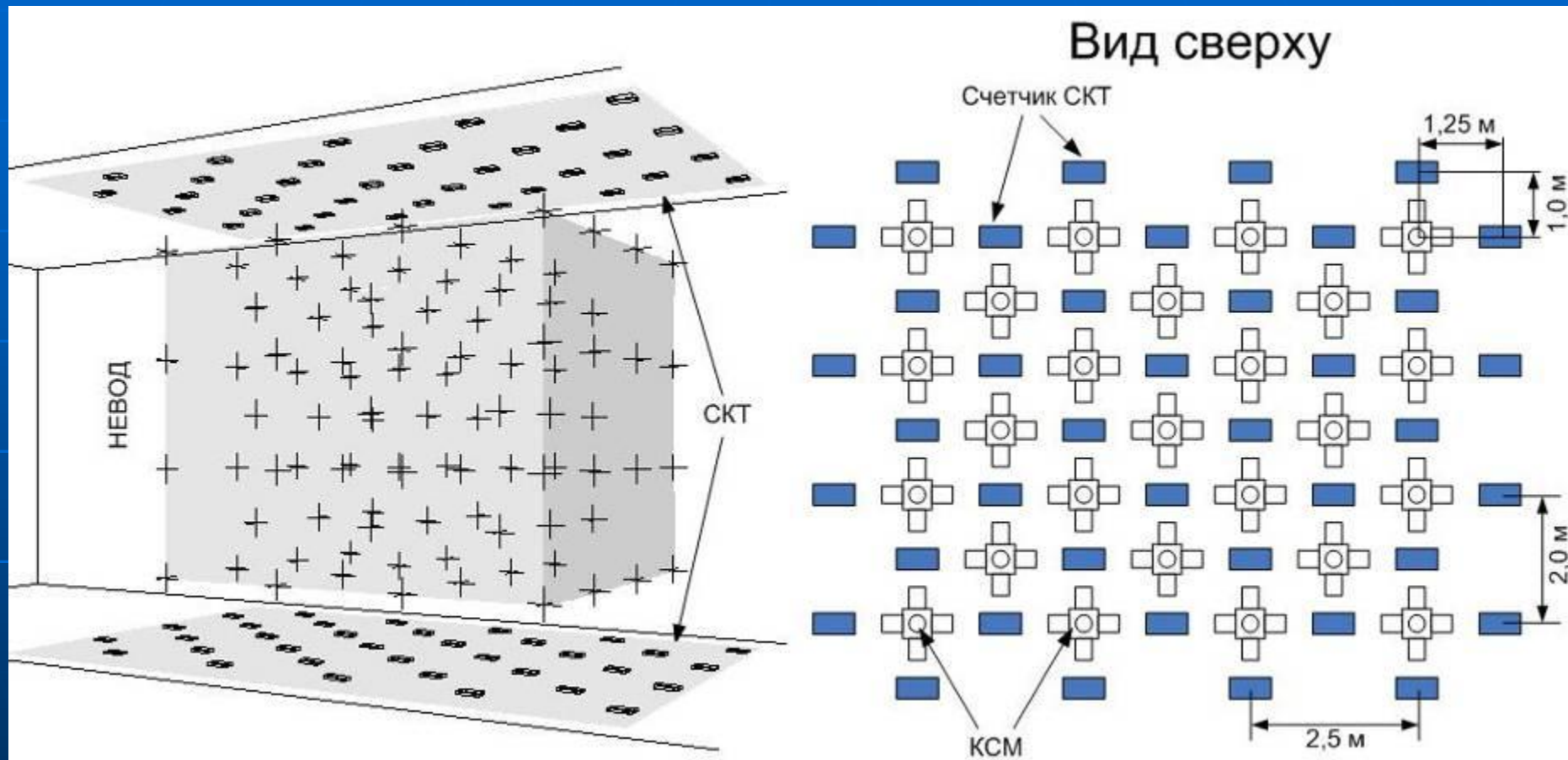


Высокая пространственная
($\sim 1 \text{ см}$) и угловая точность
(0.7° и 0.8° для
проекции зенитного и
азимутального углов).

Боковой координатно-трековый детектор ДЕКОР

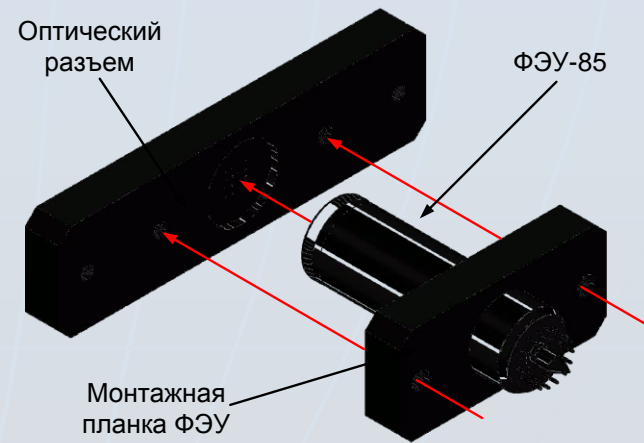
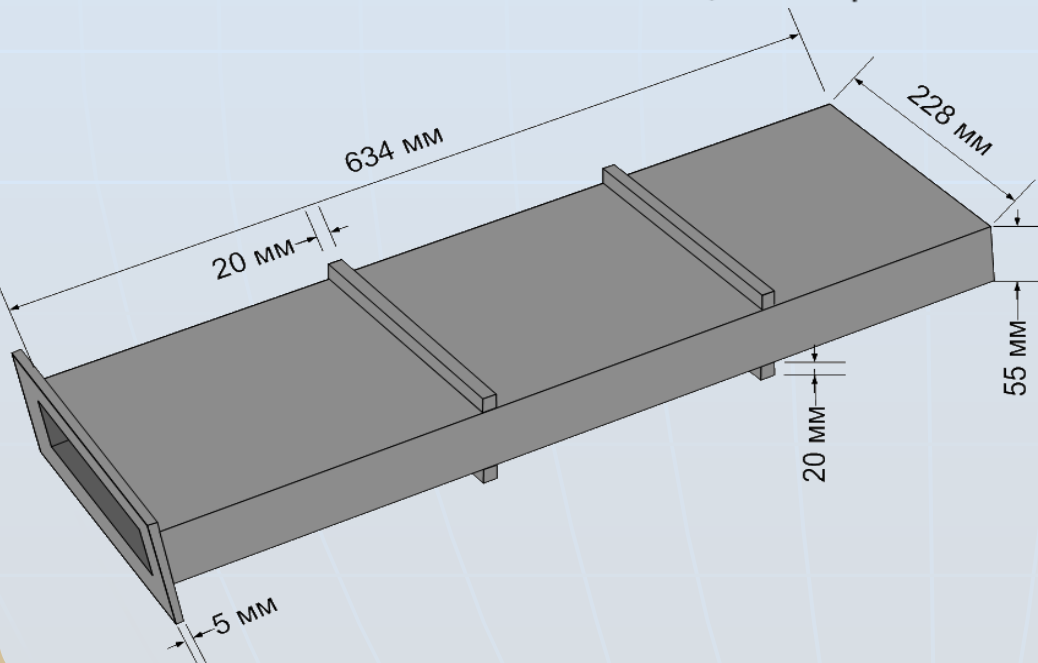
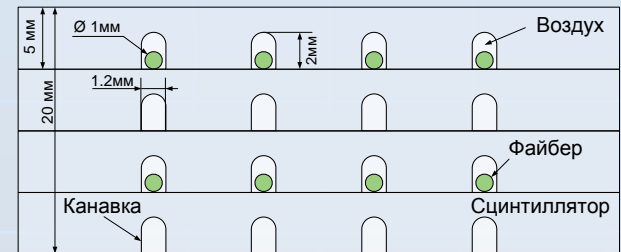
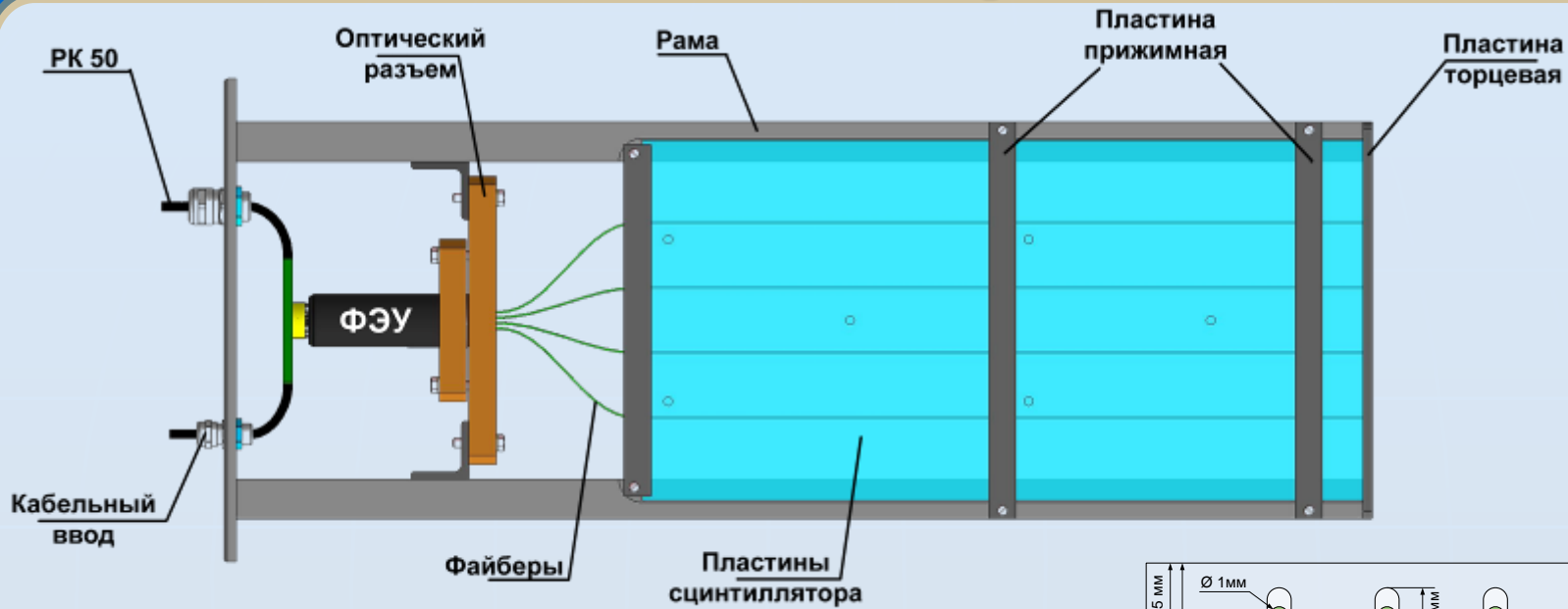


Система калибровочных телескопов



- 2 плоскости x 40 сцинтилляционных счетчиков.
- Размер счетчика $20 \times 40 \times 1 \text{ см}^3$.
- Точность выделения трека $< 2^\circ$.

Детектор СКТ

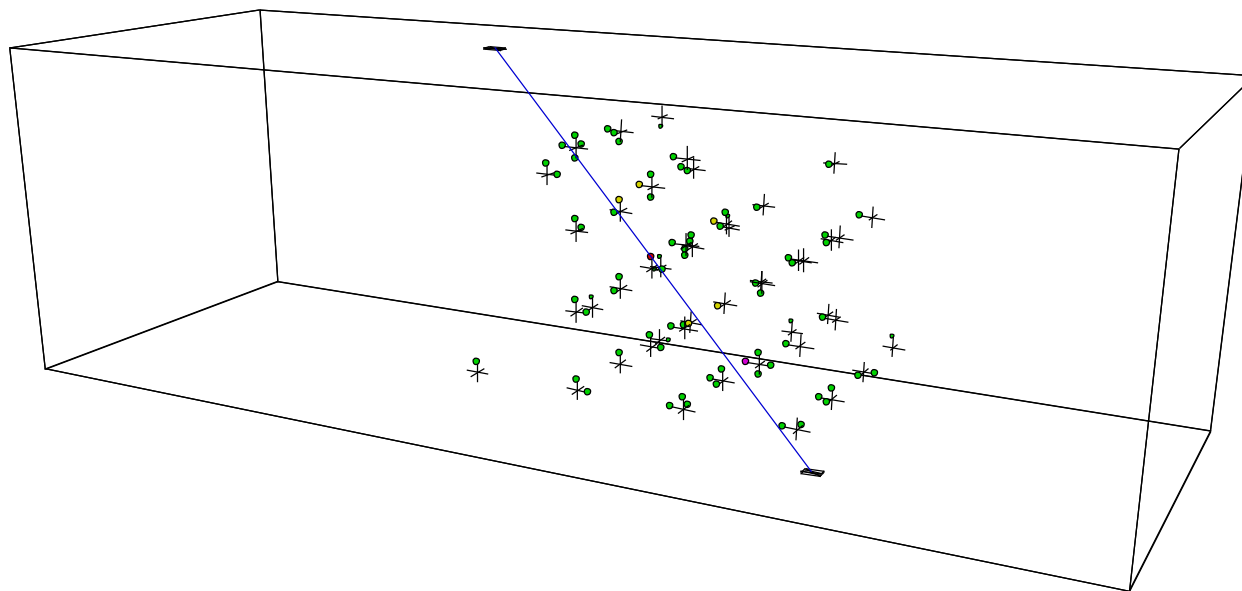


Триггерная система

- «Собственные» триггерные сигналы ЧВД: "a" (any), "b" (bottom), "c" (coincidence).
- Триггерные сигналы ДЕКОР.
- Триггерные сигналы СКТ: "U" (up), "D" (down), "U&D".

Калибровка по телескопным событиям

Nlam=46,N5=7,N6=23,NR1=0,NR2=0,Sum1=2,Sum2=4,Sob-01000000,00100000
N1=18,N3=8 nCup= 1 SumAmp=1.61e+03
N2=6,N4=18 nCdown= 1 ACup= 86 ACdn= 144 NPMT=80 ETel= 81.2% ERec= 70.0%



Date=16-01-13 06:31:57.042 Nrun=481 Nevent=787745 fm=90.00 tm=38.44 Recon: fi=116.94 t=20.12 F= 0.0

Темп счета триггера U&D СКТ $\sim 2.8 \text{ с}^{-1}$,

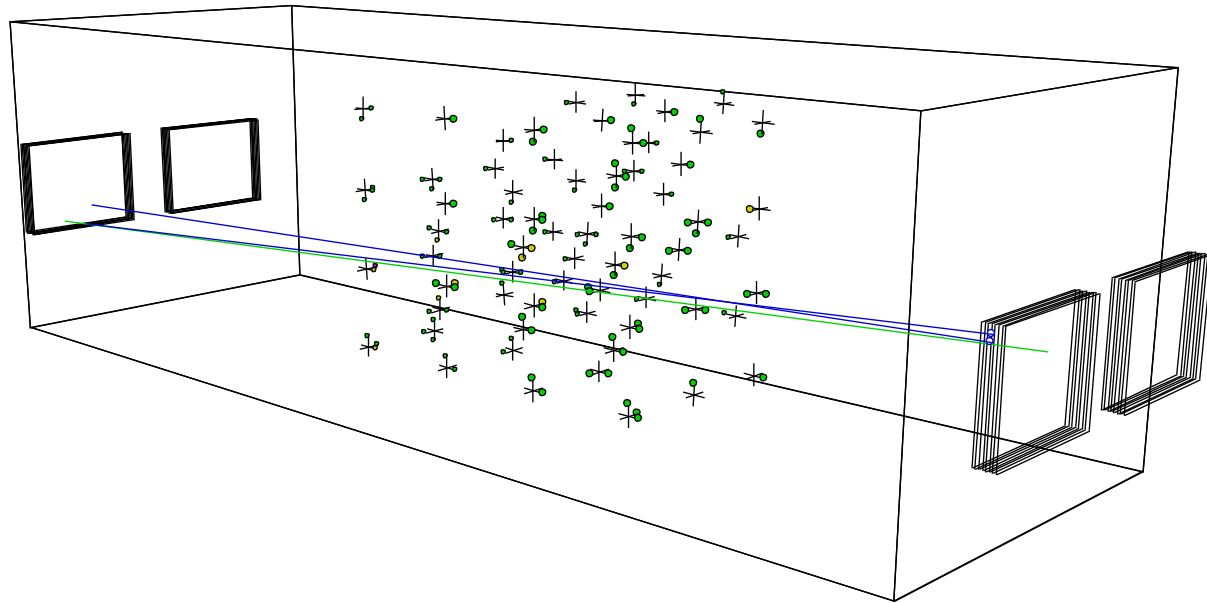
Из них с 1U и 1D $\sim 2.7 \text{ с}^{-1}$,

$\langle E \rangle = 8 \text{ ГэВ}$.

Экспериментальная серия

23.12.11 – 20.03.13

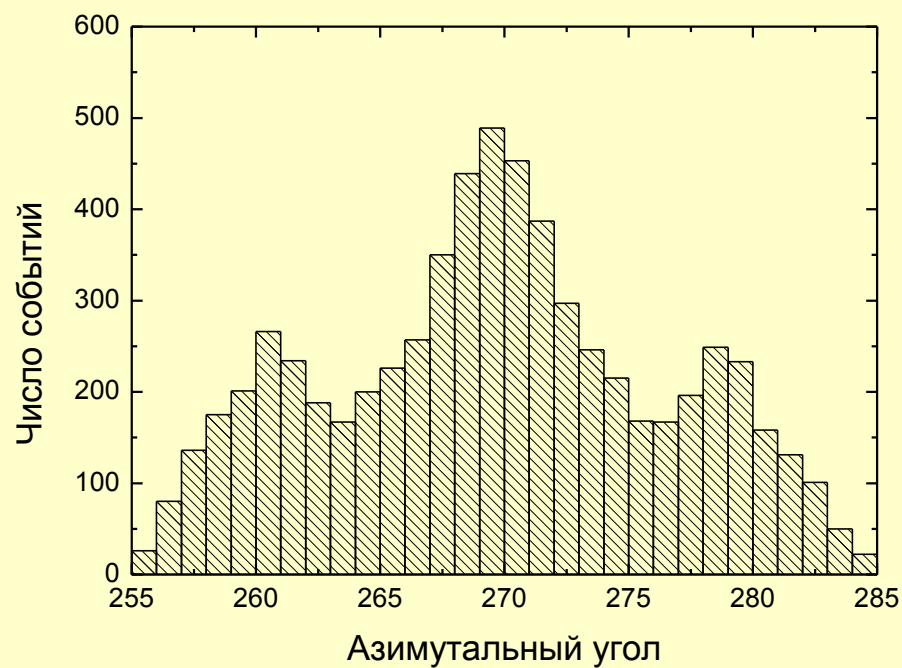
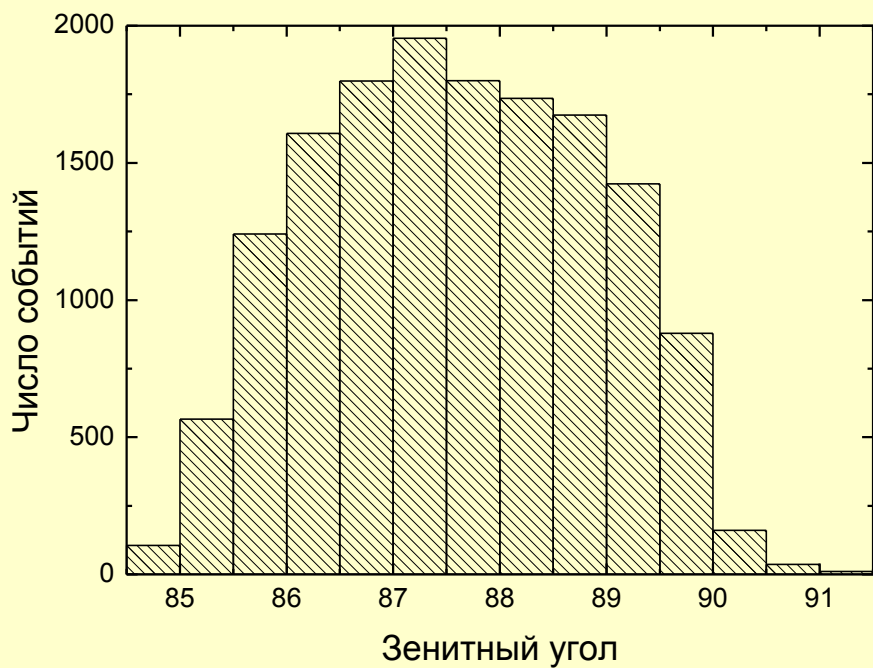
Nlam=65,N5=18,N6=15,NR1=0,NR2=0,Sum1=128,Sum2=0,Sob-00000001,00000000
N1=7,N3=42 nCup= 0 SumAmp=1.31e+03 00101000,00000000 NTrack=2
N2=8,N4=25 nCdown= 0 ACup= 0 ACdn= 0 NPMT=115 ETel= 87.8% ERec= 85.2%



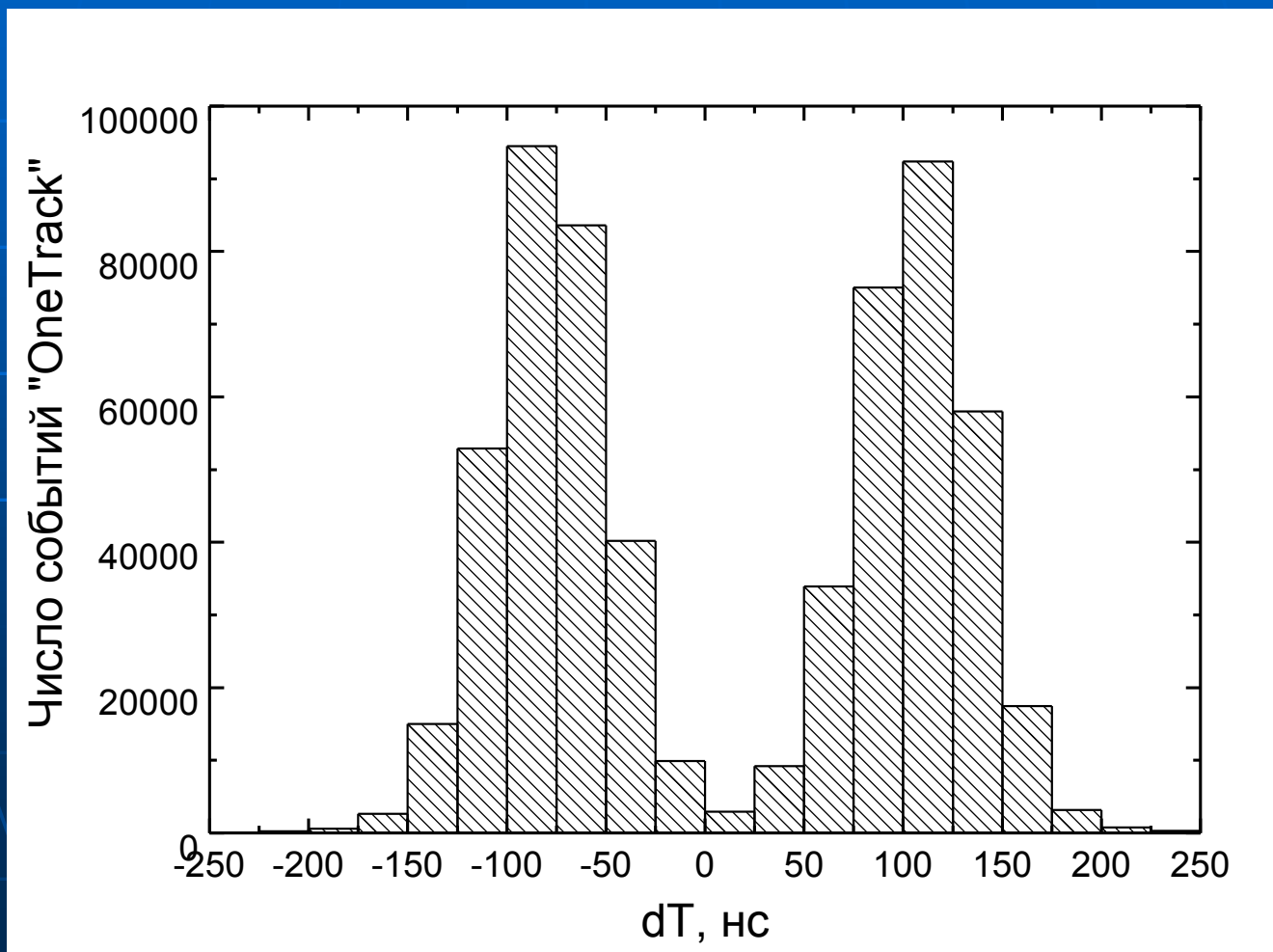
Date=23-12-11 14:32:10.065 Nrun=10 Nevent=40 fm=271.65 tm=86.77 Recon: fi=254.52 t=85.91 F= 0.0

7945 часов «живого» времени.
 $1,7 \cdot 10^6$ событий типа «OneTrack».

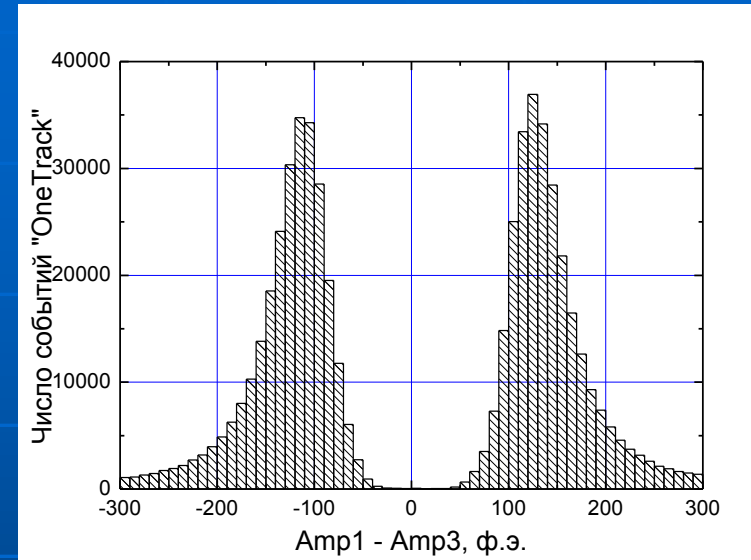
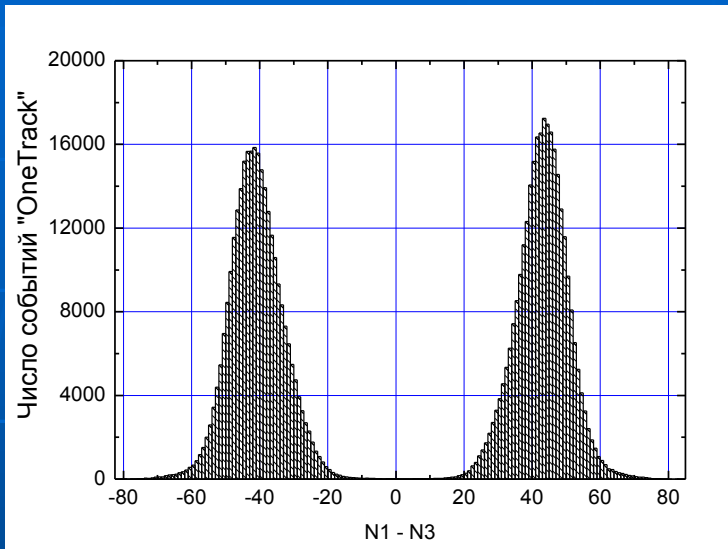
Распределение событий по углам



Определение направления пролета мюона по данным ДЕКОР (времяпролетный метод)



Определение направления пролета мюона по черенковскому свету

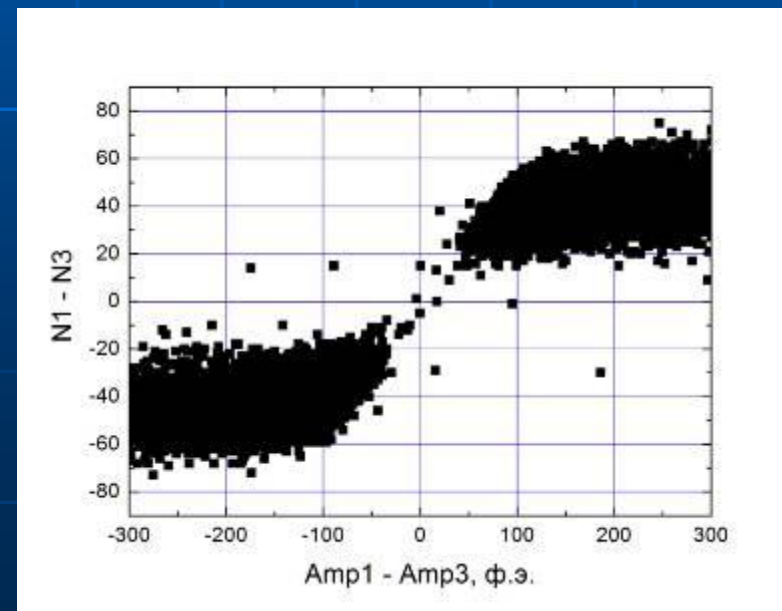


Критерии

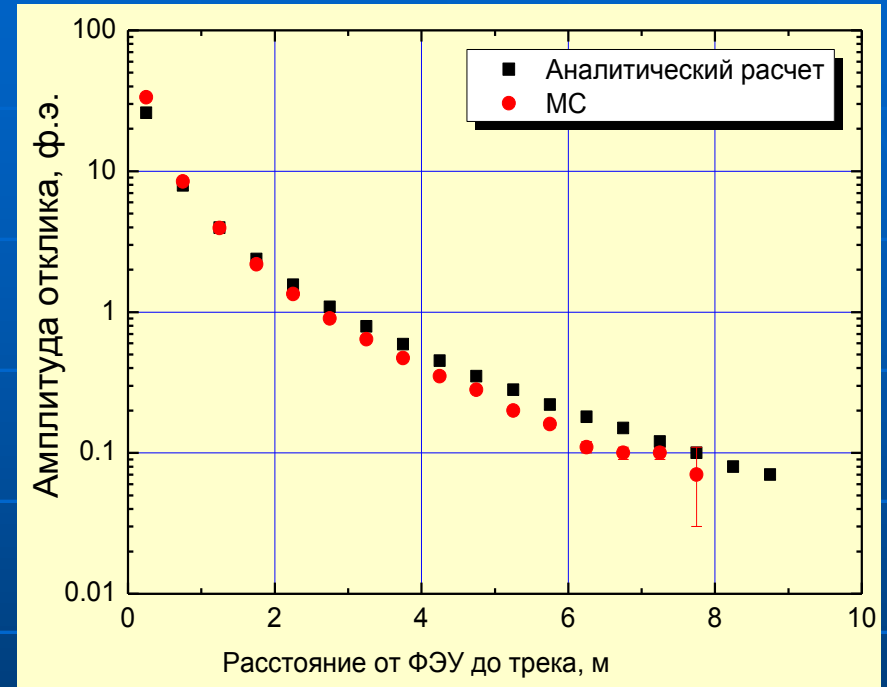
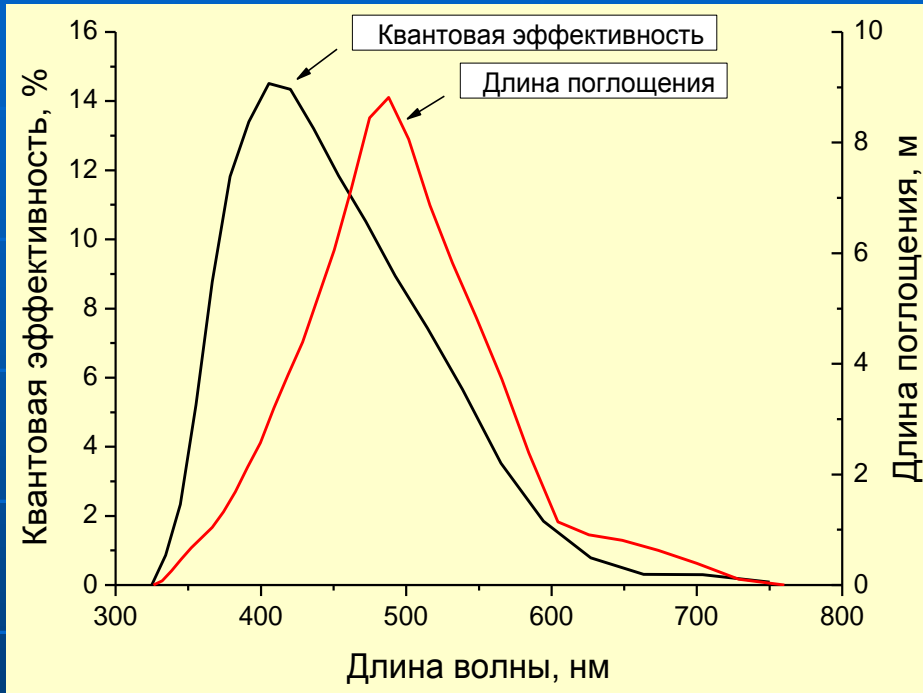
$|\Delta N_y| > 10$ фЭУ либо

$|Amp1 - Amp3| > 30$ ф.э.

позволяют определить
направление для
 $99.975 \pm 0.002\%$ событий.



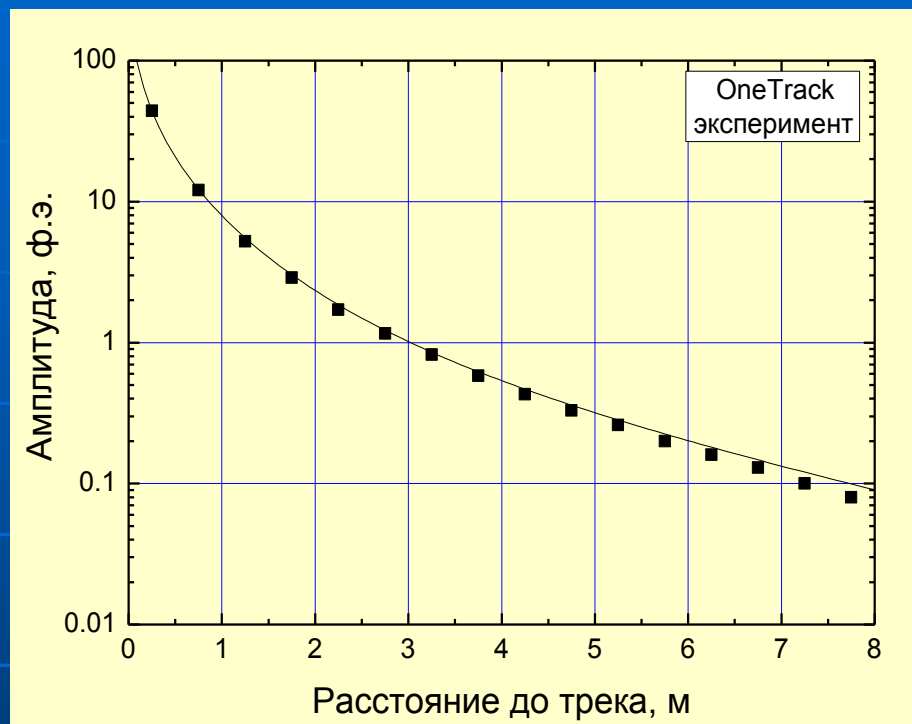
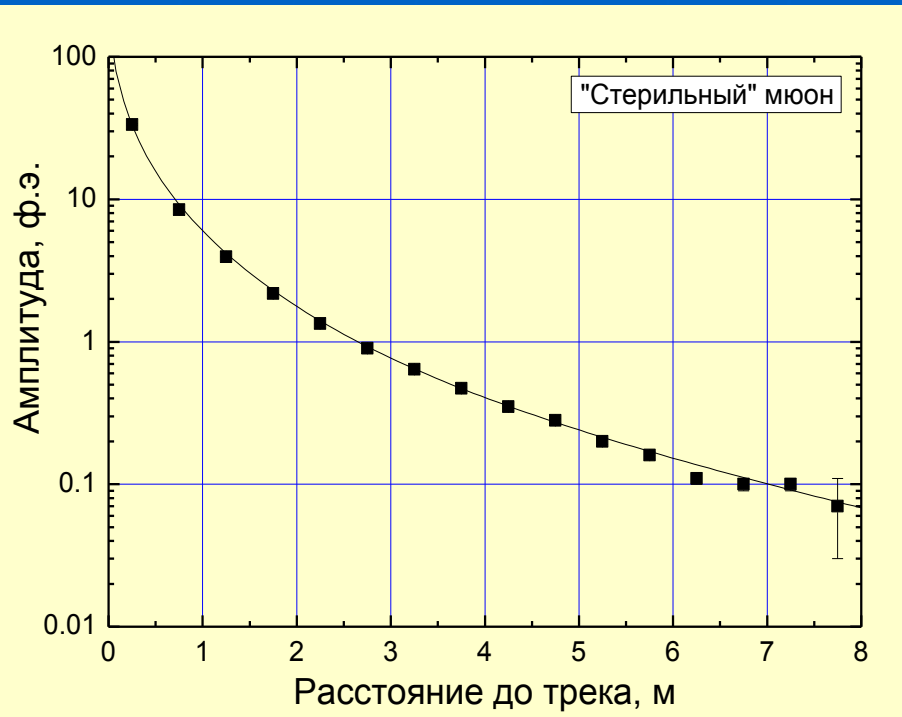
Отклик ФЭУ на одиночную заряженную частицу



$$A(R, \alpha) = \frac{S_{\text{ФЭУ}} \cdot \cos \alpha}{2\pi(R + r_{\text{ФЭУ}}) \cdot \sin \theta_C} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{dN}{d\lambda} \eta(\lambda) \cdot \exp\left(-\frac{R}{L(\lambda) \cdot \sin \theta_C}\right) d\lambda$$

«Стерильный» мюон не рождает других частиц, кроме черенковских фотонов.

Фитирование отклика ФЭУ на одиночную заряженную частицу и OneTrack

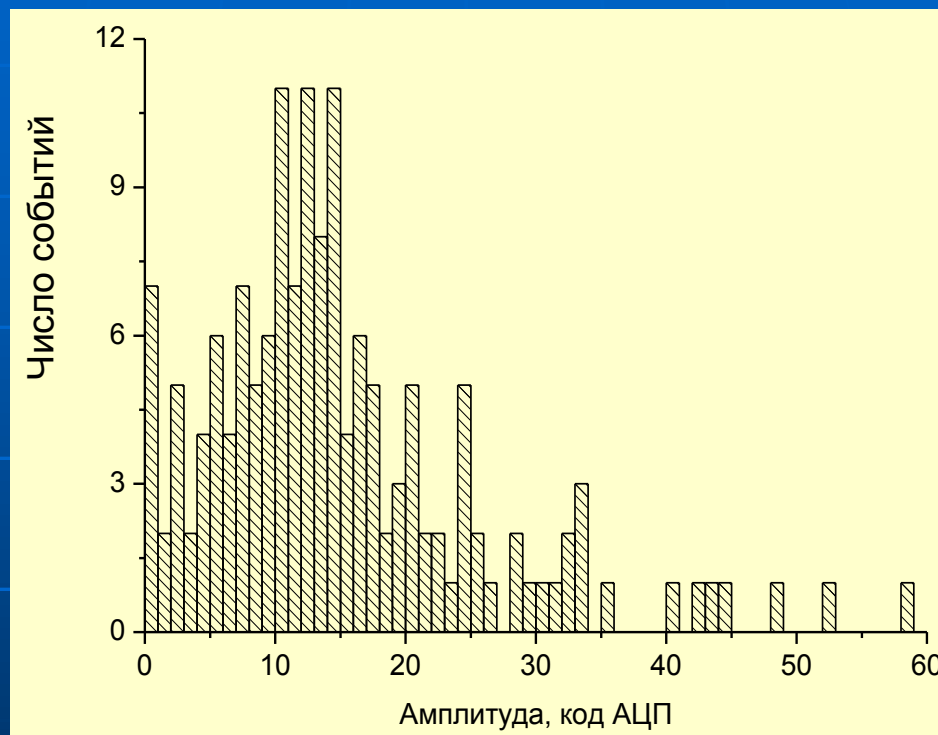


$$Amp(R, \alpha) = \frac{C \cdot \cos \alpha}{R + r_{\text{ФЭУ}}} \left(\exp\left(-\frac{R}{L_{\text{short}}}\right) + F \cdot \exp\left(-\frac{R}{L_{\text{long}}}\right) \right)$$

$$L_{\text{short}} = 1.0 \text{ м}, L_{\text{long}} = 4.0 \text{ м}, F = 0.45,$$

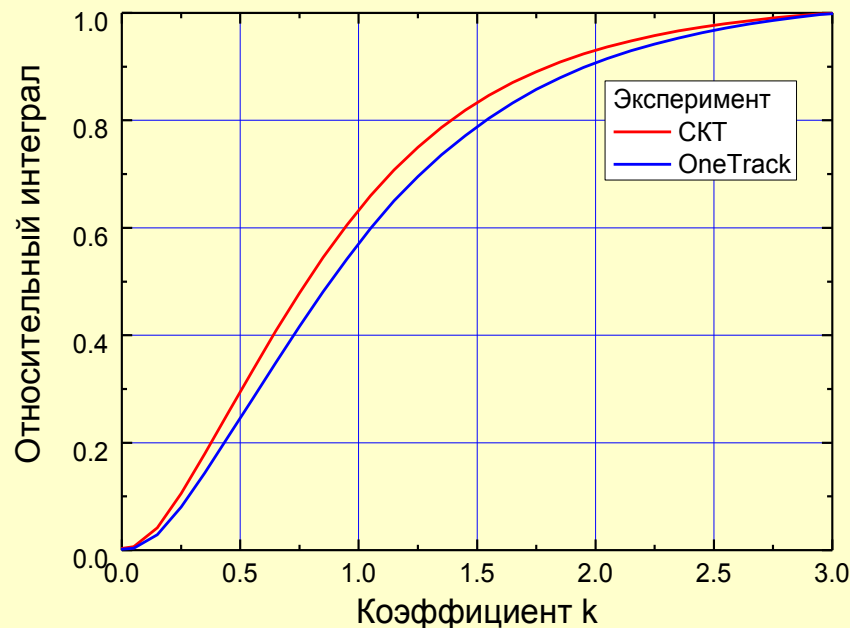
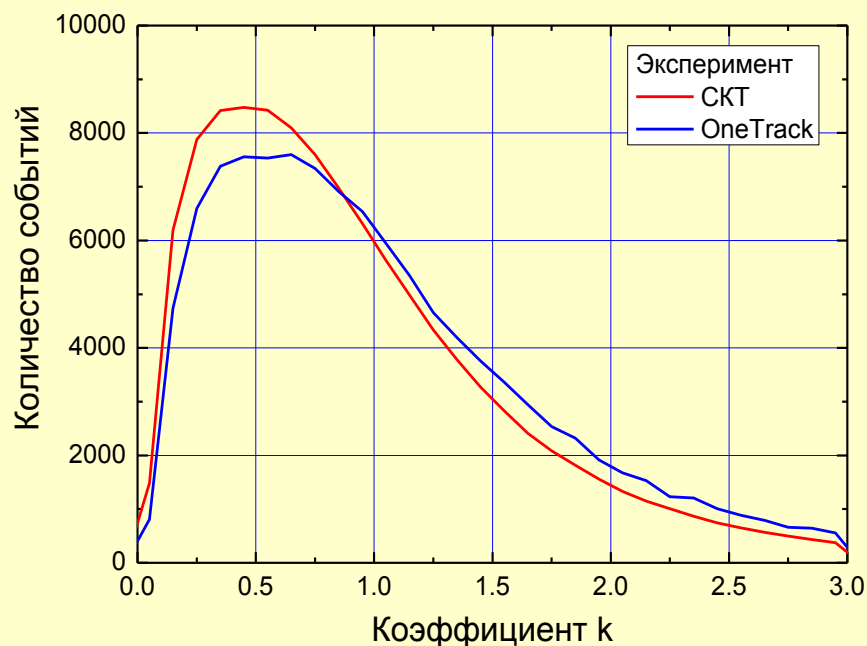
$$C_{\text{StMu}} = 9.0 \text{ ф.э.} \cdot \text{м}, C_{\text{OT}} = 11.9 \text{ ф.э.} \cdot \text{м}, C_{\text{OT}} / C_{\text{StMu}} \sim 1.3$$

Простейшая калибровочная характеристика - спектр откликов ФЭУ на ближайший вертикальный телескоп СКТ (RUN NAD_481)



Калибровочный коэффициент $k_i = A_i/A_{\text{calc}}(R, \alpha)$
 $\cos \alpha > 0.3, \quad 0.5 \text{ м} < R < 2.0 \text{ м}.$

Анализ распределения коэффициента k

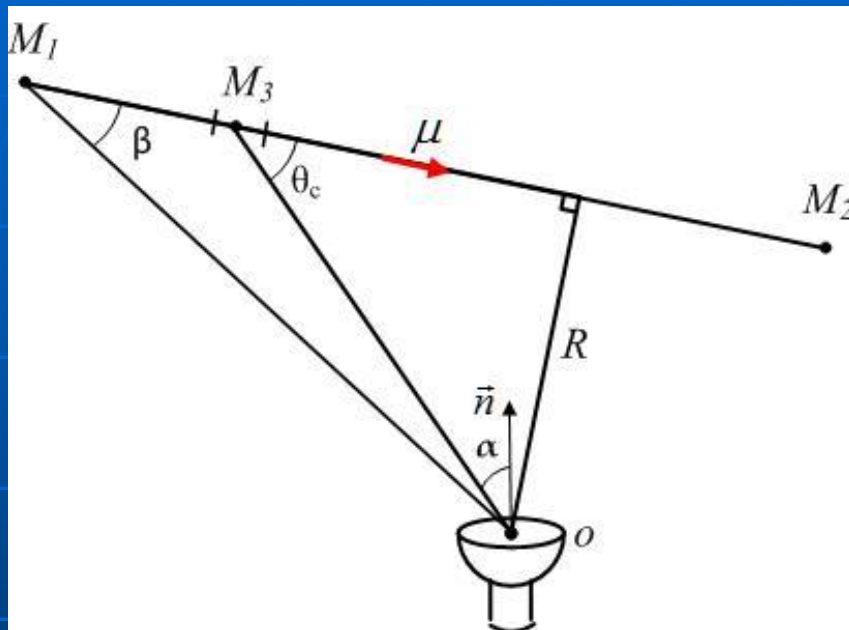


	StMu	СКТ	ОТ
$\langle k \rangle$	0.91	0.91	1.01
σ	0.62	0.61	0.65

ОТ/СКТ ~ 1.11

$I=0.35$
ОТ/СКТ = $0.65/0.58 \sim 1.12$
согласуется с результатами
моделирования
(1.10 - 1.15)

Методика восстановления каскадной кривой



Число заряженных частиц на участке трека

$$N_i = \frac{A_{\Phi ЭУ}}{A_1(R, \alpha)}$$

Уравнение каскадной кривой в одномерном приближении

$$N_{teor}(E_0, t) = \left(\frac{0.32}{\sqrt{y_0}} \right) \cdot \exp(t \cdot (1 - 1.5 \ln s))$$

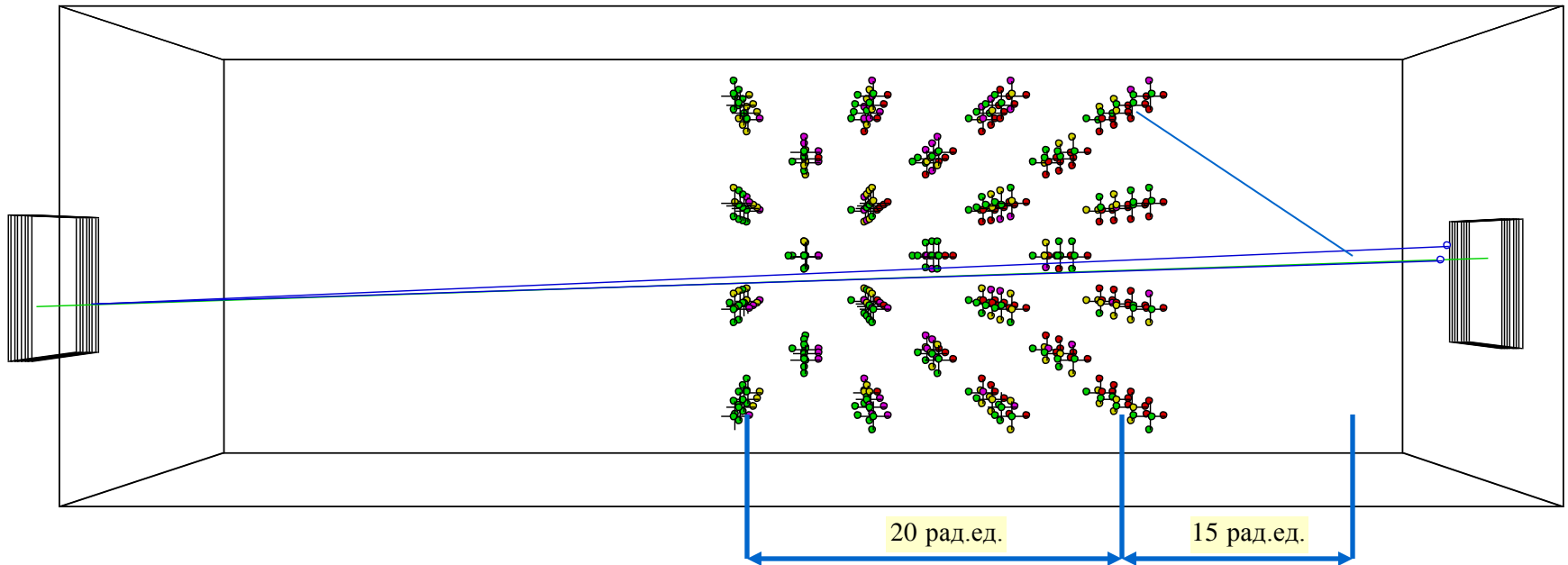
$$s = \frac{3 \cdot t}{t + 2 \cdot y_0}$$

- возраст ливня

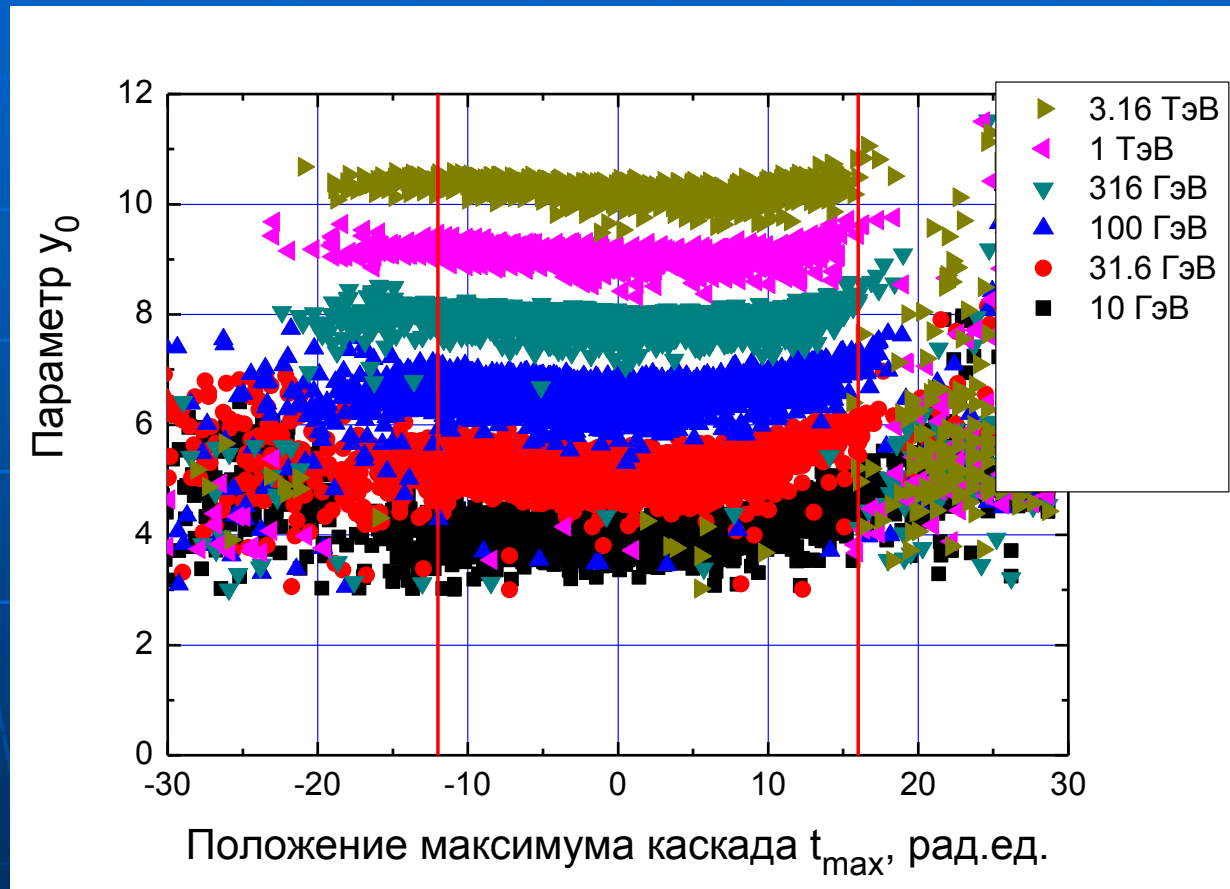
$$y_0 = \ln \left(\frac{E_0}{\varepsilon} \right)$$

$\varepsilon = 73$ МэВ, критическая энергия для электронов в воде

Пример события с каскадным ливнем

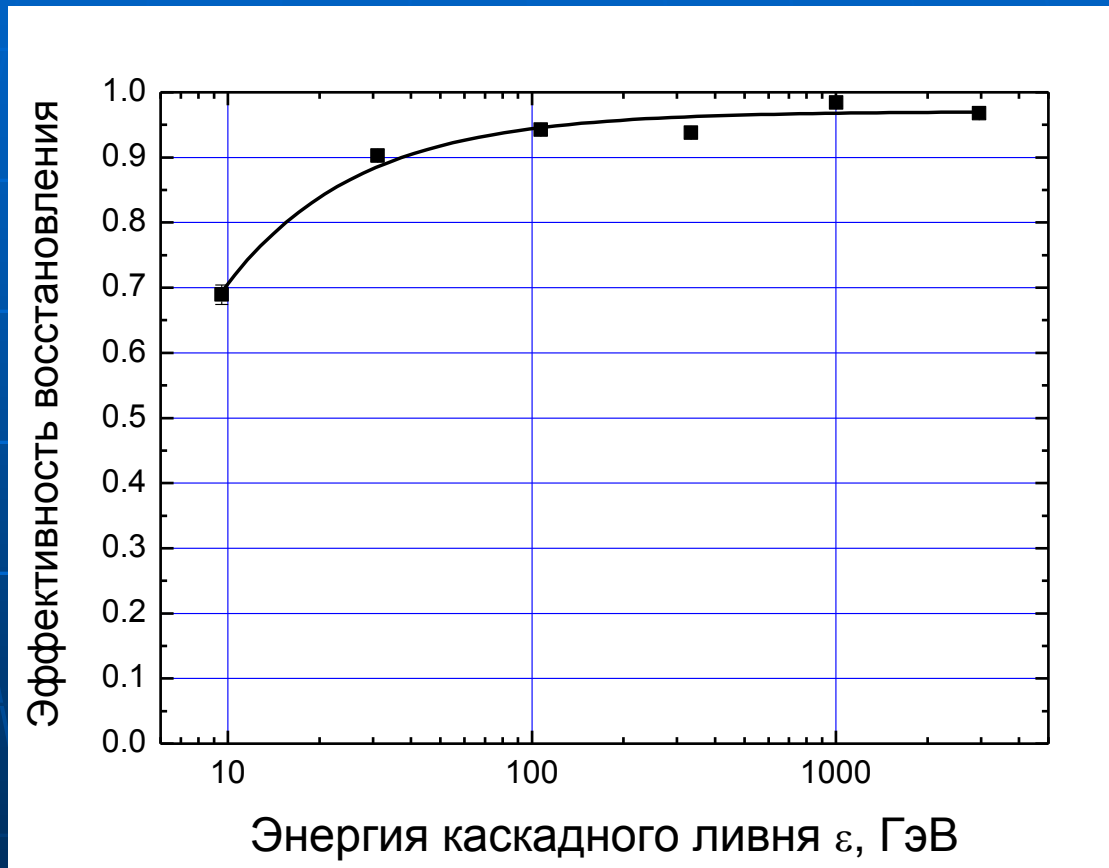


Восстановление энергии каскада



$$-12.0 \text{ рад.ед.} < t_{max} < 16.0 \text{ рад.ед.}$$

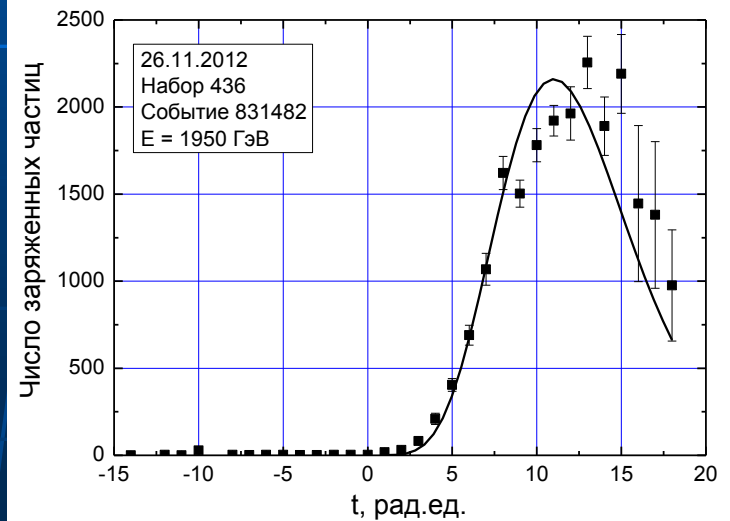
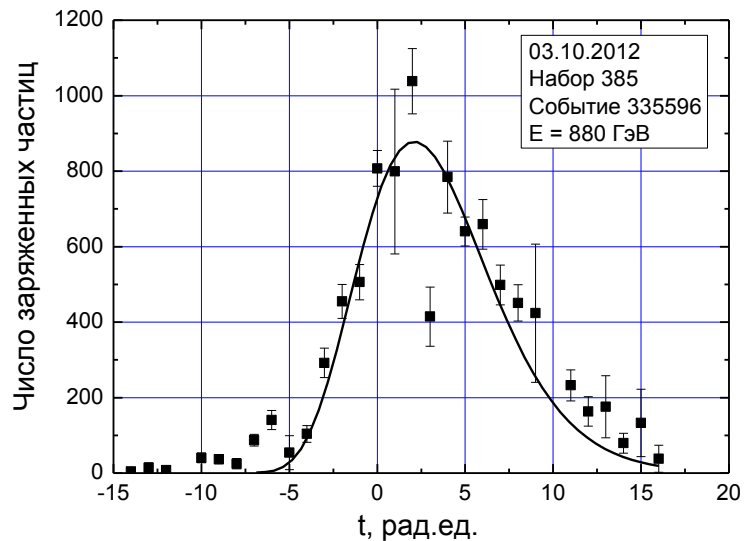
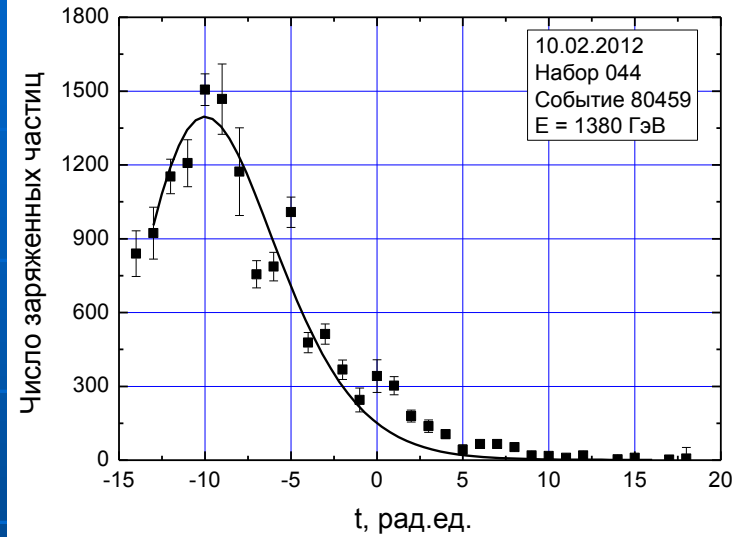
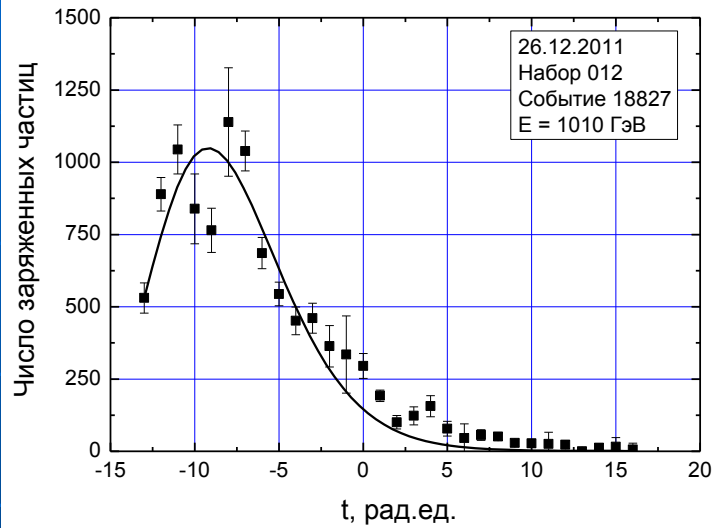
Эффективность восстановления каскада



$$eff = eff_{\max} - \frac{\varepsilon_{\min}}{\varepsilon}$$

$$eff_{\max} = 0.97 \pm 0.01, \varepsilon_{\min} = 2.6 \pm 0.2 \text{ ГэВ}$$

Пример восстановленных каскадных кривых



Связь спектра каскадов со спектром мюонов

Дифференциальный спектр каскадов:

$$N(\varepsilon, \cos \theta) = X \cdot \sum_i \int_{T_{\min}}^{\infty} N_{\mu}(T, \cos \theta) \cdot \sigma_i(T - \Delta E_1, \varepsilon) dT$$

X – толщина мишени;

$N_{\mu}(T, \cos \theta)$ – дифференциальный спектр мюонов;

$\sigma_i(T, \varepsilon)$ – сечение образования мюоном энергии T каскада энергии ε в i -том процессе.

Интегрирование по геометрии:

$$N(\varepsilon) = 4 \int_0^{b/c} dx \int_0^{a/c} N(\varepsilon, \cos \theta) \frac{(b - cx)(a - cy)}{1 + x^2 + y^2} dy$$

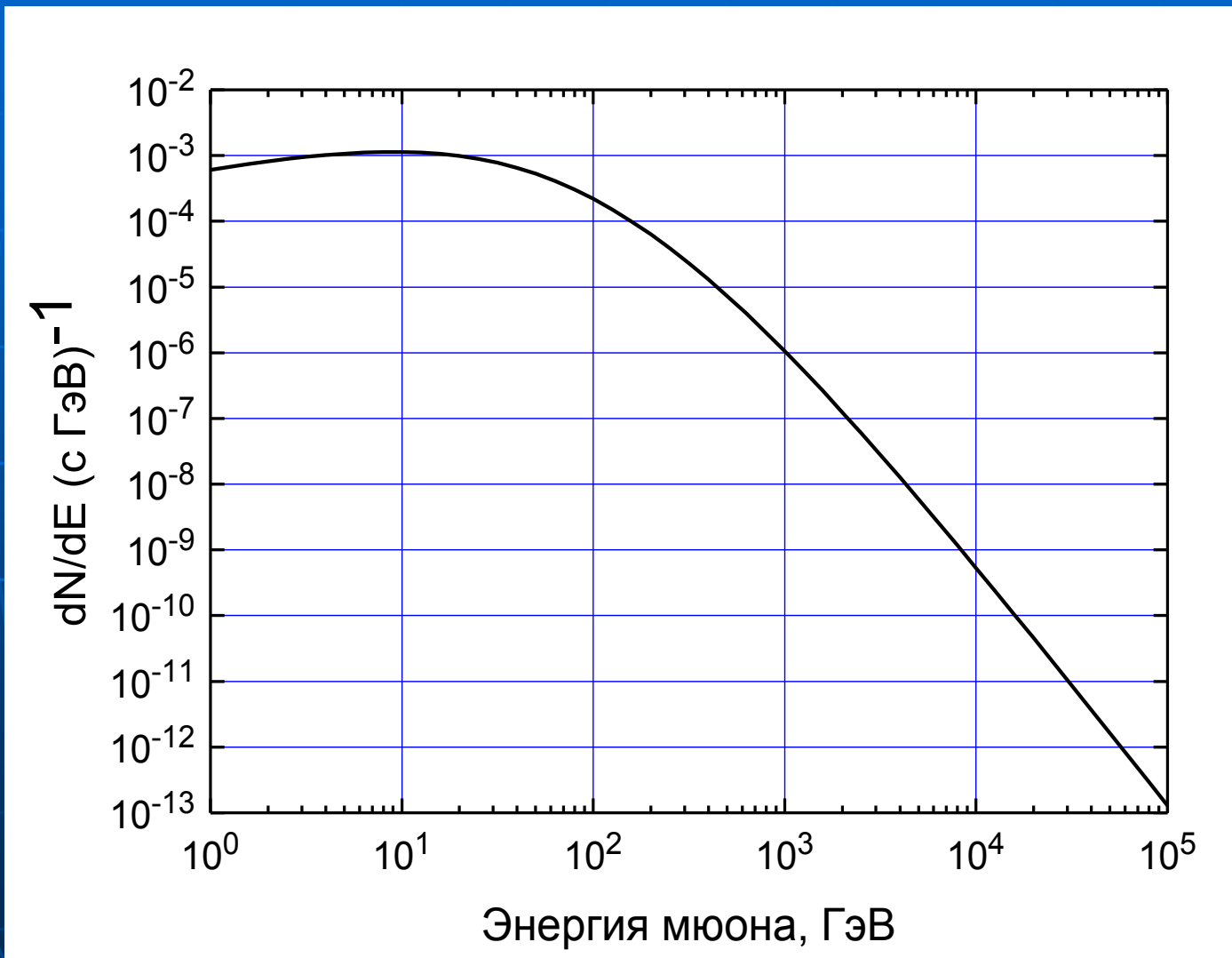
$$\cos \theta = \frac{x}{\sqrt{1 + x^2 + y^2}}$$

$a=3048$ мм – ширина СМ ДЕКОР;

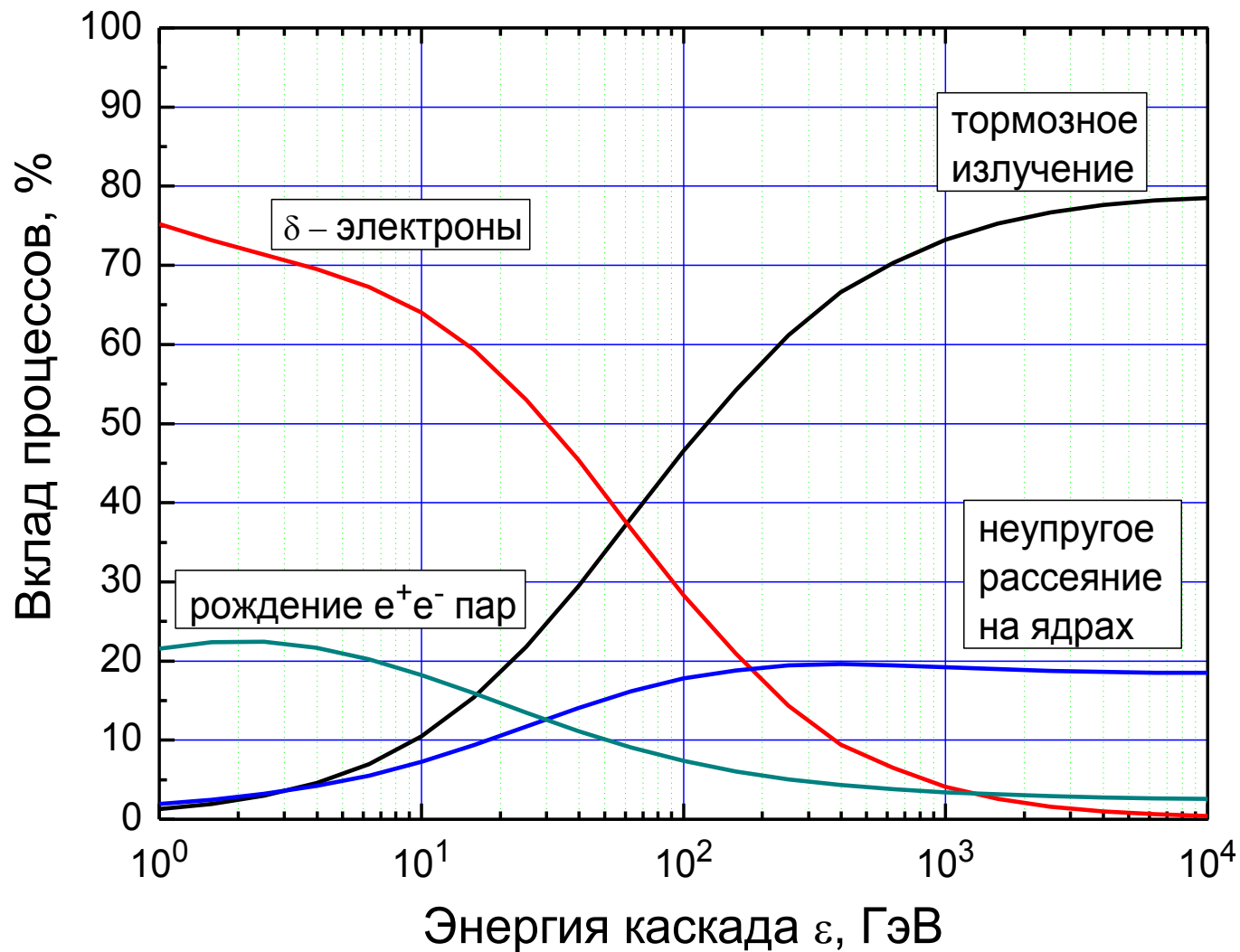
$b=2640$ мм – высота СМ ДЕКОР;

$c=28453$ мм – расстояние между СМ ДЕКОР.

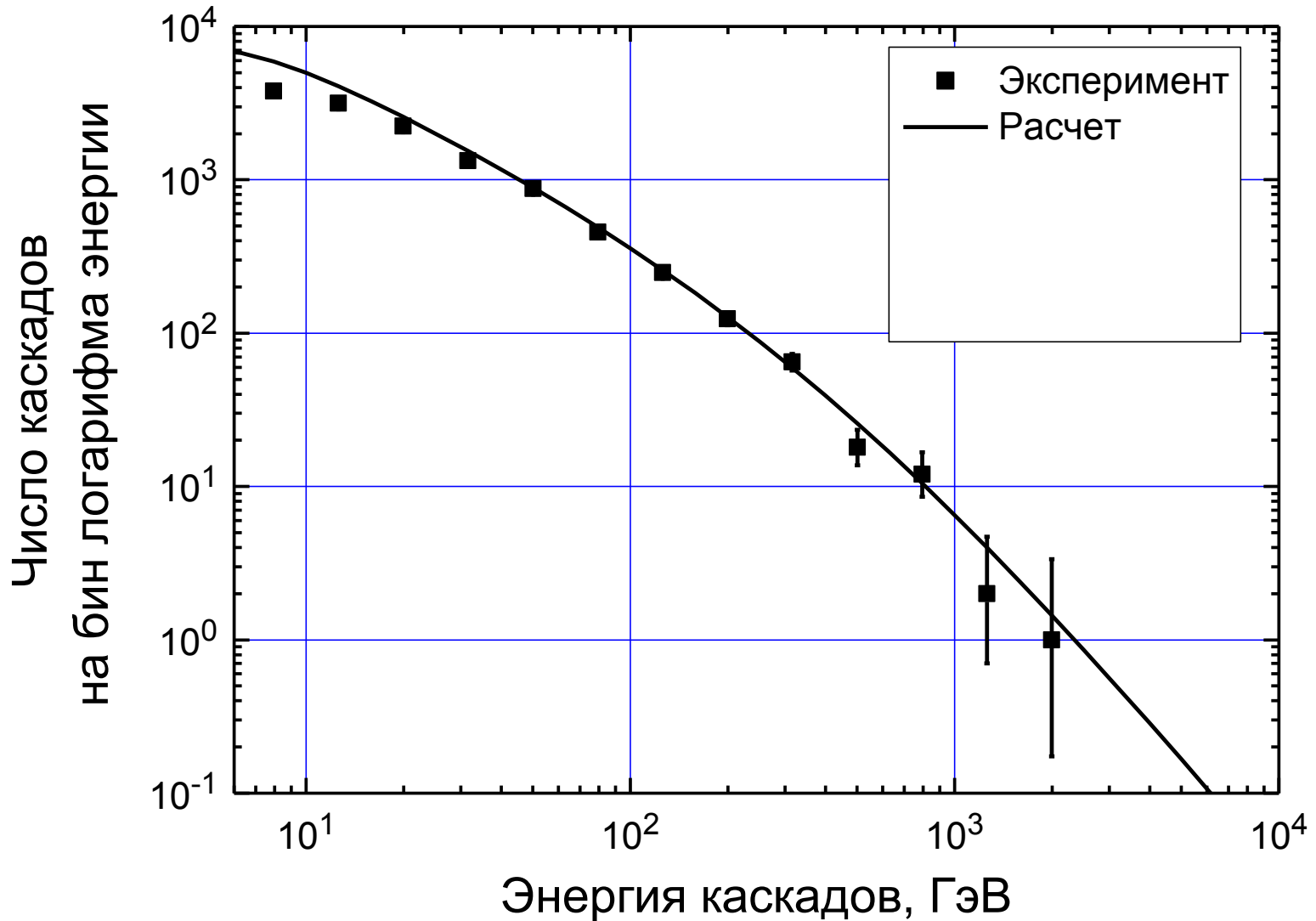
Ожидаемый дифференциальный спектр мюонов для $\odot_{\square} = -2.7$



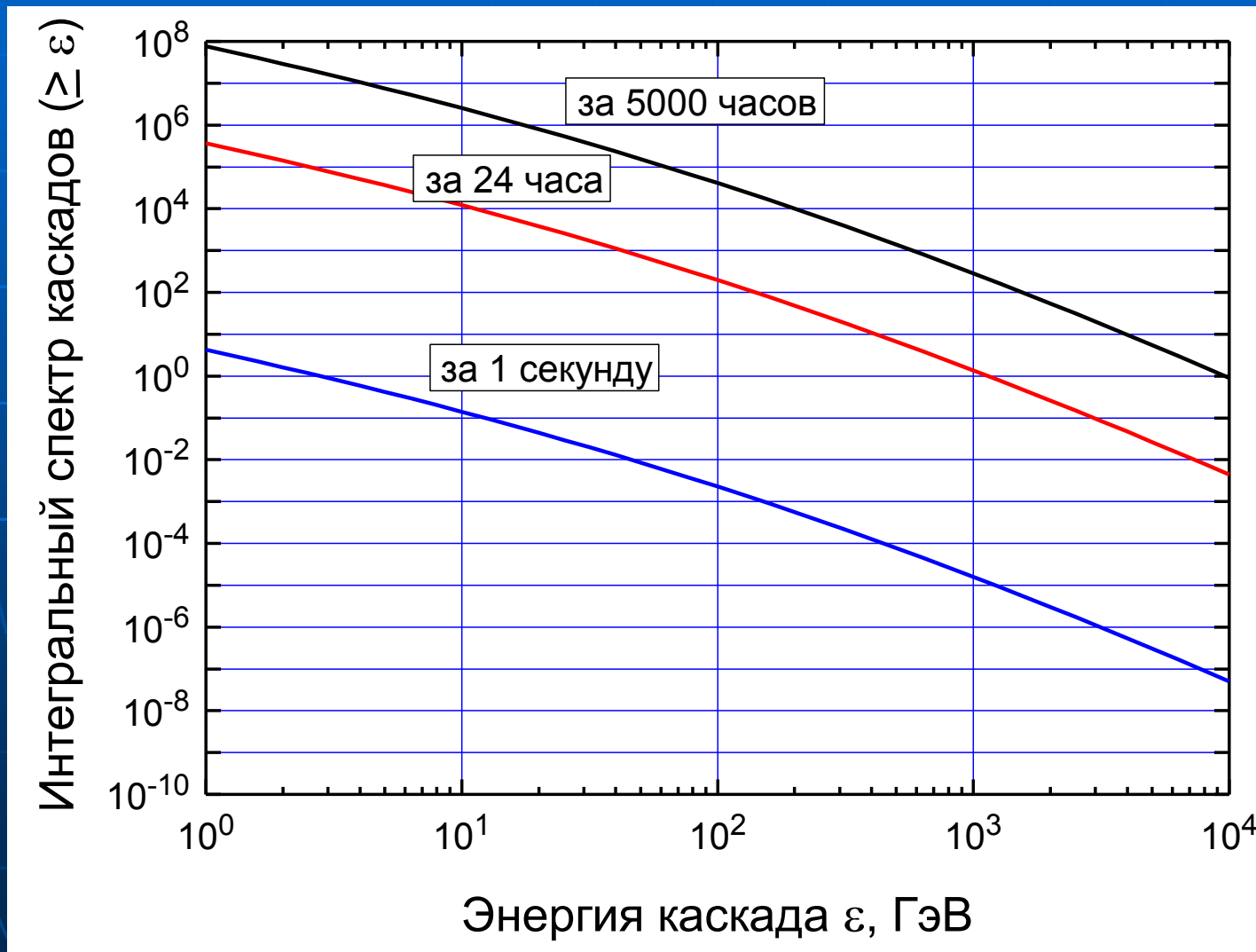
Вклад различных процессов в образование каскадов с энергией ϵ



Дифференциальный спектр каскадов



Ожидаемый спектр каскадных ливней в ЧВД НЕВОД для диапазона зенитных углов 60° - 90°



Заключение

- Черенковский водный детектор с плотной пространственной решеткой измерительных модулей позволяет восстанавливать каскадную кривую в воде и проводить исследования каскадных ливней с энергиями от 10 ГэВ до 10 ТэВ, генерируемых мюонами высоких энергий.
- Результаты проведенных измерений до 1 ТэВ согласуются со спектром мюонов, рассчитанным в предположении $\gamma_{\pi} = -2.7$.
- Переход к «широкой» геометрии позволит на порядок расширить область исследуемых энергий.
- Длительные измерения дадут возможность исследования долговременных вариаций энергетического спектра космических лучей.

Спасибо за внимание!



Научно-образовательный центр НЕВОД
www.nevod.mephi.ru