



Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»

Научно-образовательный центр

НЕВОД



Экспериментальный комплекс НЕВОД (состояние и перспективы)

А.А. Петрухин

36-ая ВККА

29 сентября 2020 г.

Экспериментальный комплекс НЕВОД

Основание для создания

Постановление ЦК КПСС и СМ СССР от 16.07.1987 № 831-196
«О мерах по развитию материально-технической базы физики высоких энергий»

Состав комплекса сегодня:

Центральная часть

Черенковский водный детектор (**ЧВД**) НЕВОД объемом 2000 куб. м

Система калибровочных телескопов (**СКТ**) – 2 плоскости по 40 детекторов - 90 кв. м

Координатно-трековый детектор **ДЕКОР** площадью 72 кв. м

Мюонный годоскоп **УРАГАН** площадью 4 x 11.5 кв. м

Периферийная часть

Прототип нейтронной установки **ПРИЗМА-32** площадью 500 кв. м

Установка для регистрации атмосферных нейтронов (**УРАН**) площадью 1000 кв. м

Установка **НЕВОД-ШАЛ** площадью 10 000 кв. м

Координатно-трековая установка из дрейфовых камер (**КТУДК**) площадью 30 кв. м

В настоящее время создается:

Полномасштабный координатно-трековый детектор ТРЕК площадью 250 кв. м
для регистрации мюонов под большими зенитными углами (до горизонта).

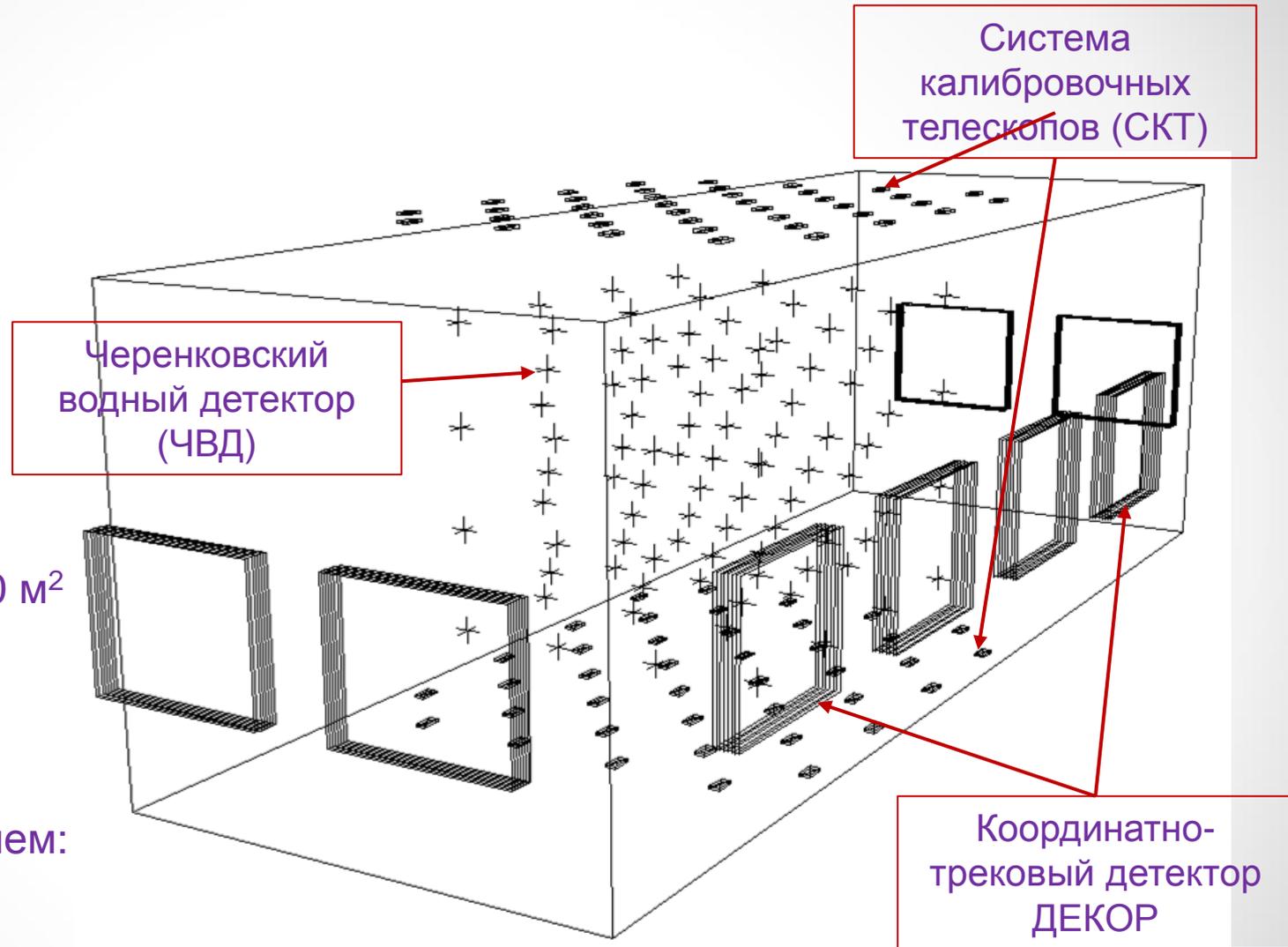


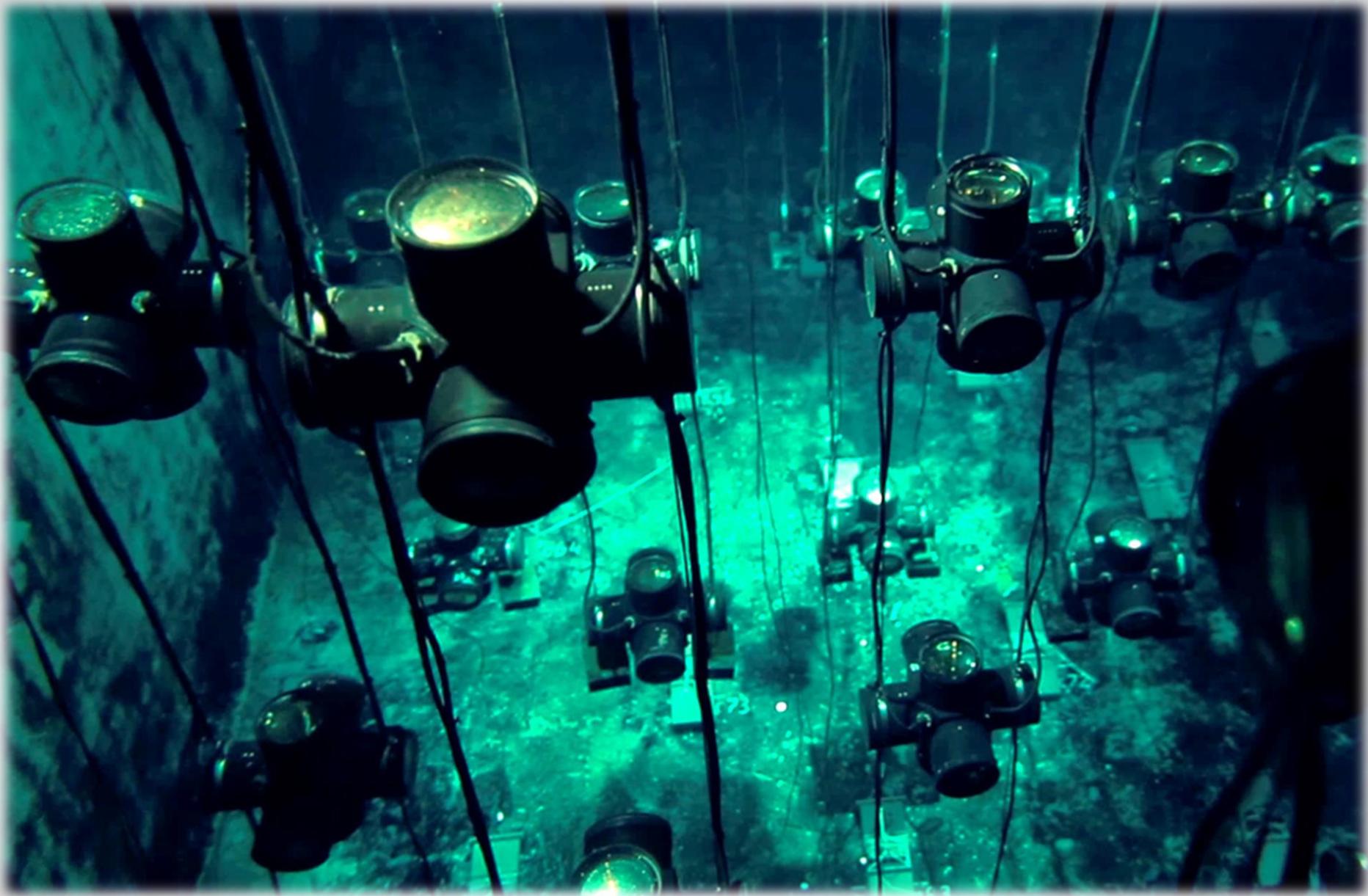
Комплекс ЧВД-СКТ-ДЕКОР

ЧВД:
2000 м³
91 КСМ
546 ФЭУ

СКТ:
2 × 40 счетчиков
 $S_d = 800 \text{ см}^2$
Толщина = 2 см
Площадь = $8 \times 10 \text{ м}^2$

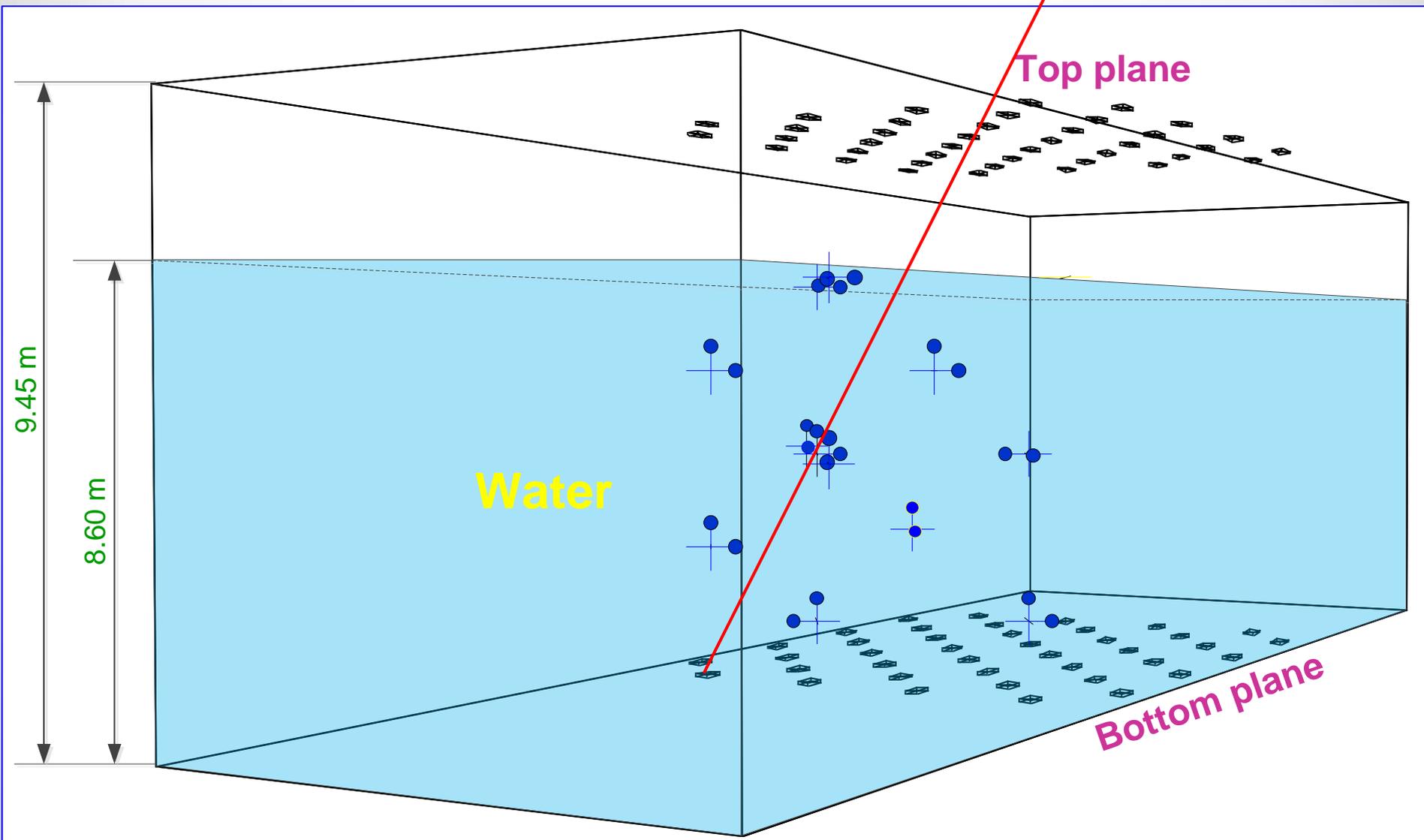
ДЕКОР:
Площадь ~ 70 м²
Точность лучше чем:
1 см и 1 градус



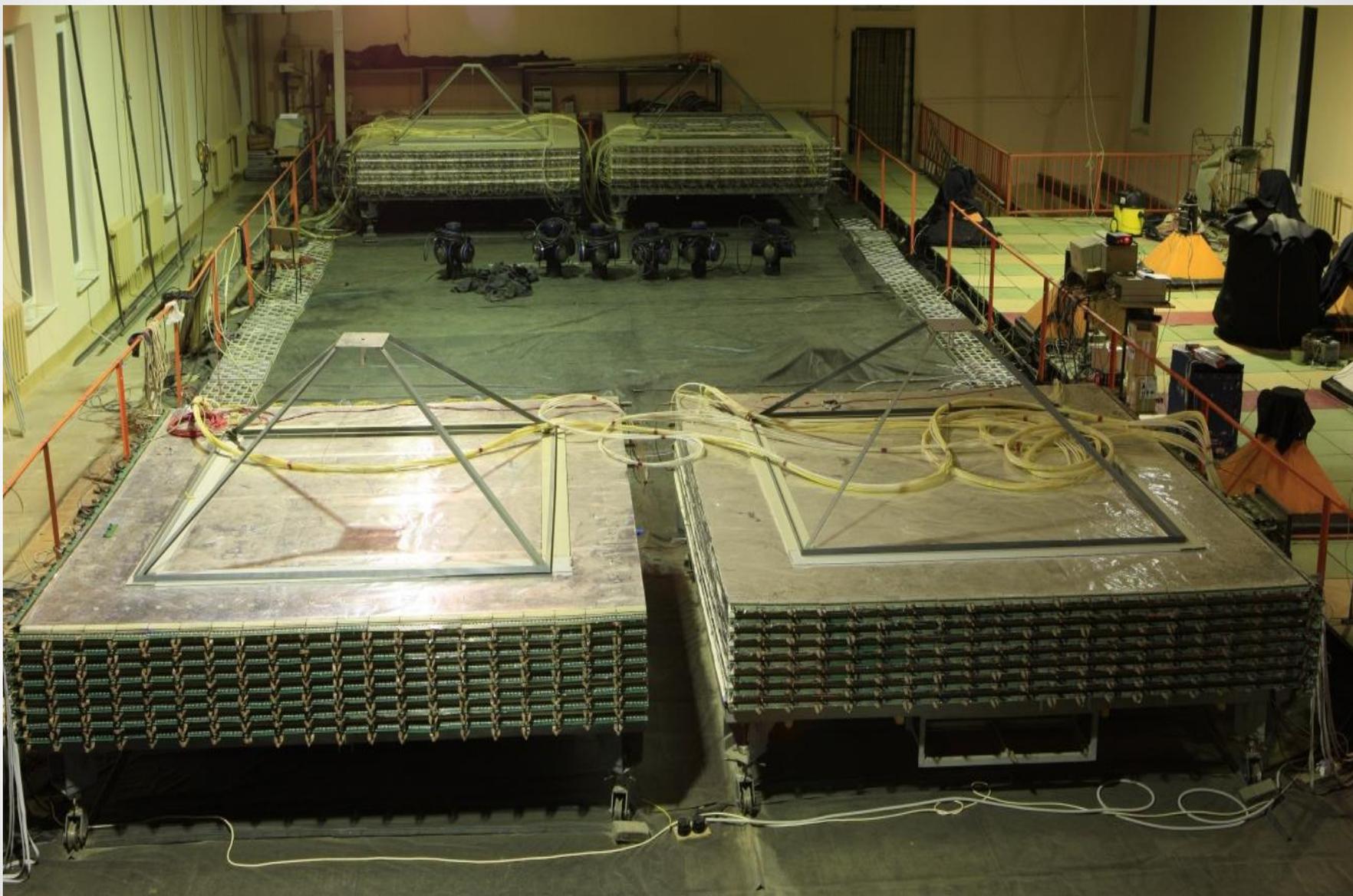




Система калибровочных телескопов (СКТ)



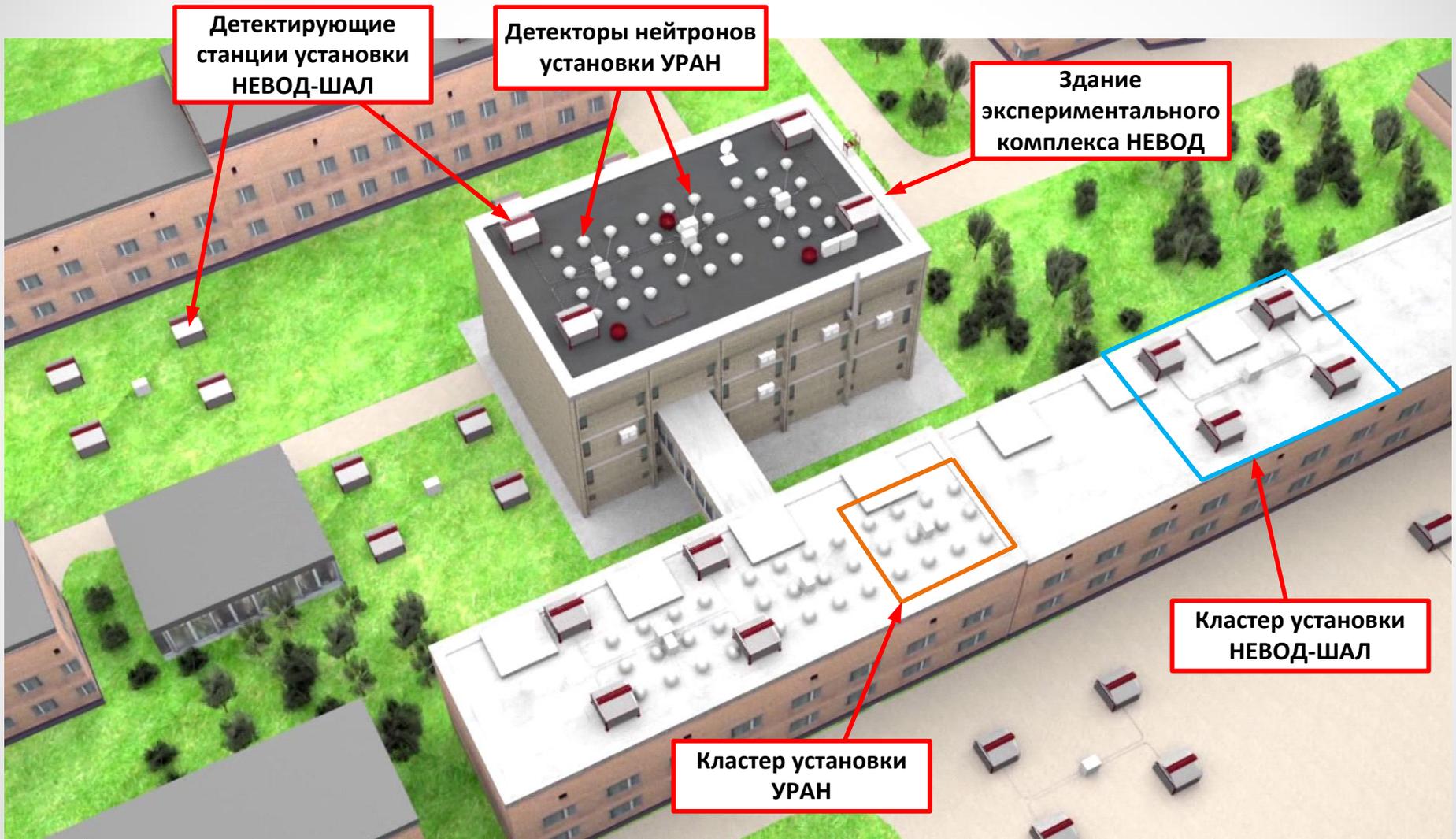
Мюонный годоскоп УРАГАН



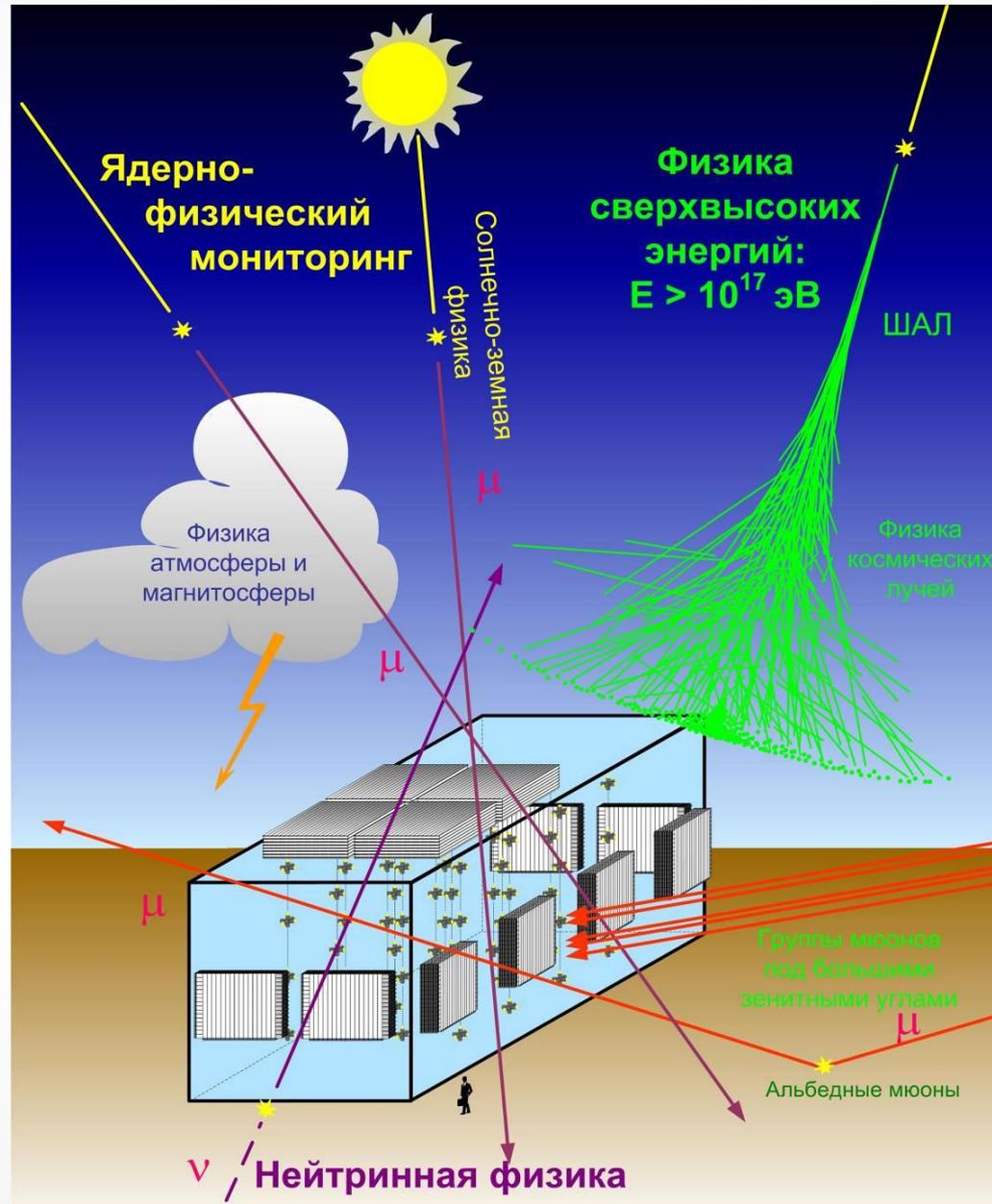
Центральная часть периферийных детекторов



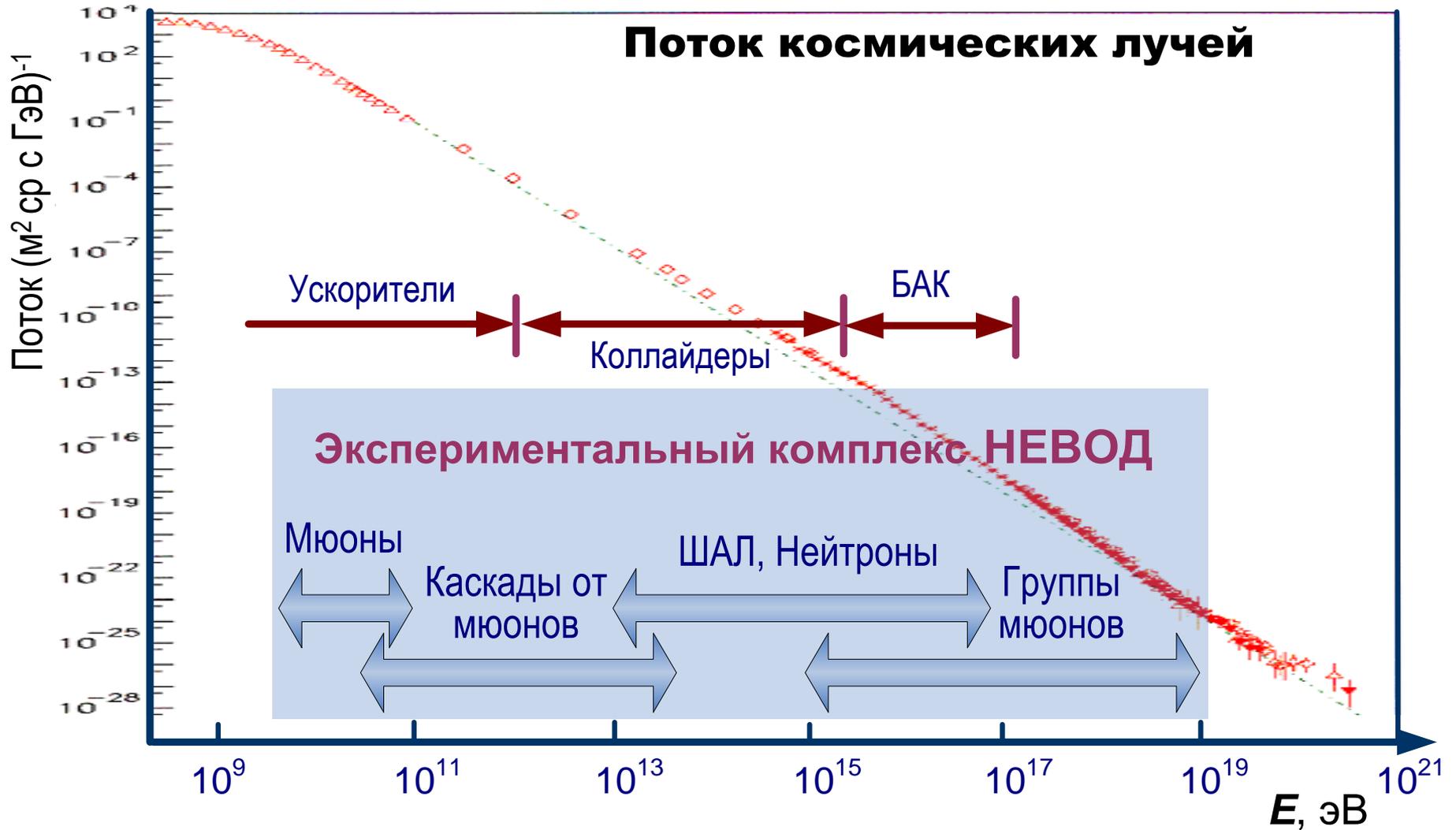
Схема размещения периферийных детекторов



Основные направления исследований

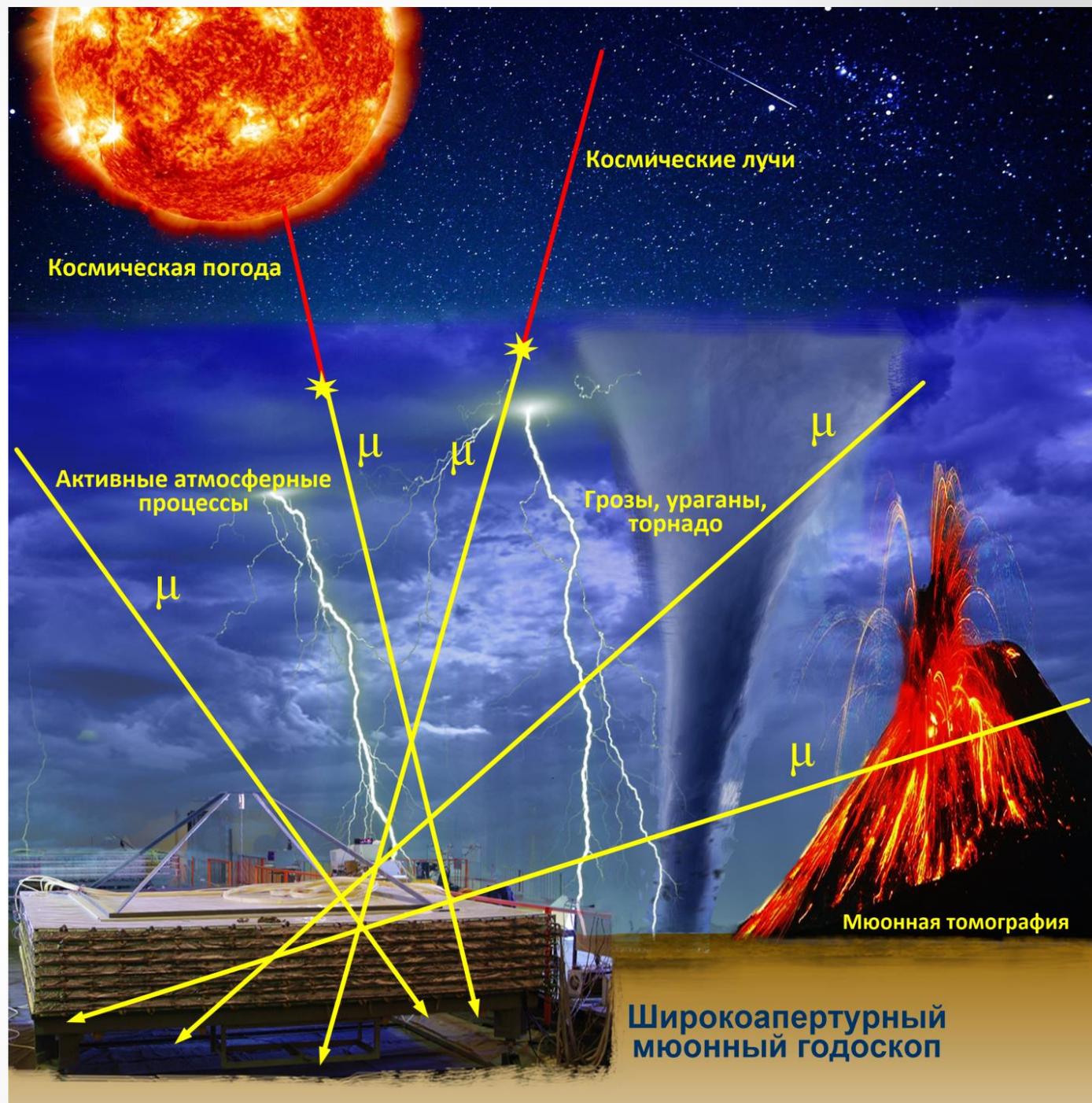


Область изучаемых энергий



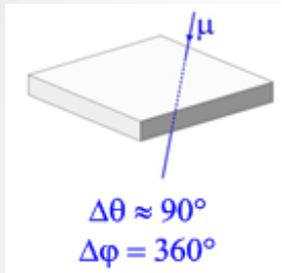
Мюнонография

У Р А Г А Н

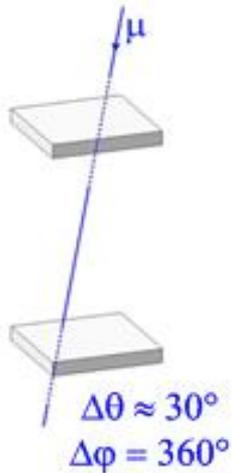


Различные типы мюонных детекторов

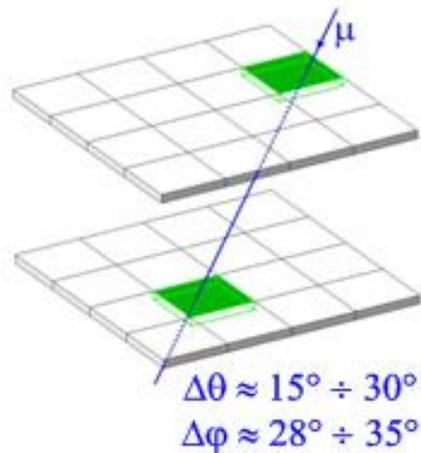
Мюонный детектор



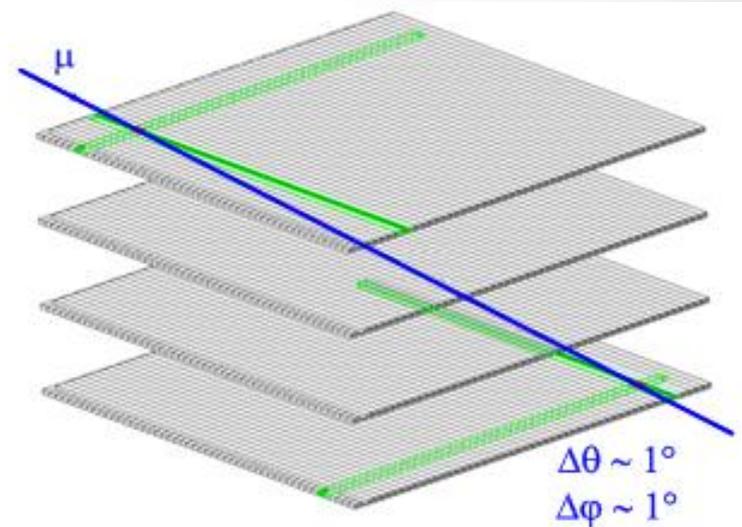
Мюонный телескоп



Многонаправленный мюонный телескоп



Мюонный годоскоп

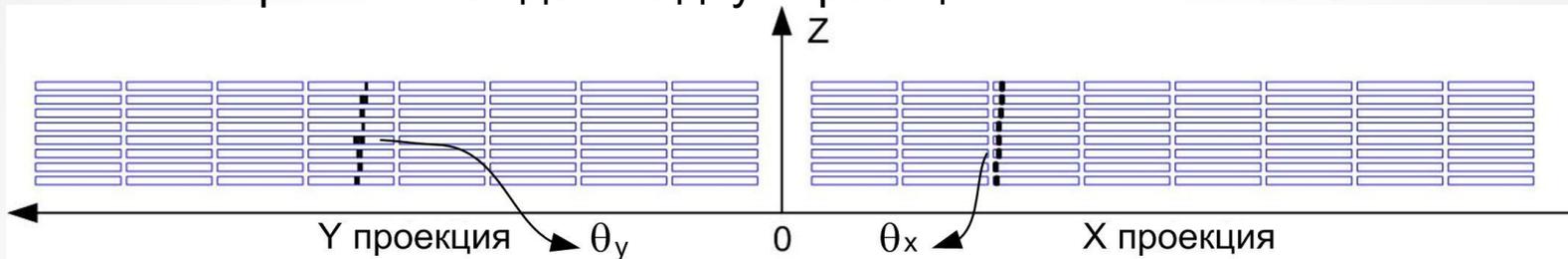


Главная особенность мюонного годоскопа – **реконструкция трека каждого зарегистрированного мюона** с высокой угловой и пространственной точностью

Годоскоп происходит от греческих "hodos" – путь и "skopos" - наблюдатель.

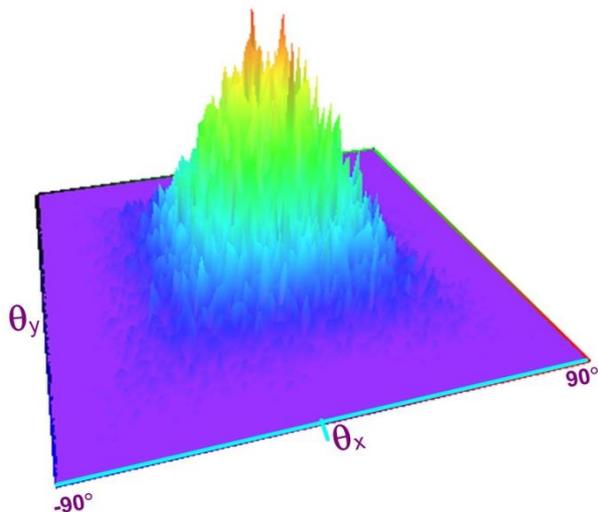
Матричный способ регистрации мюонов

Отклик мюонного годоскопа представляет собой информацию о сработавших стрипах в каждой из двух проекционных плоскостей XZ и YZ.



2D-матрицы:

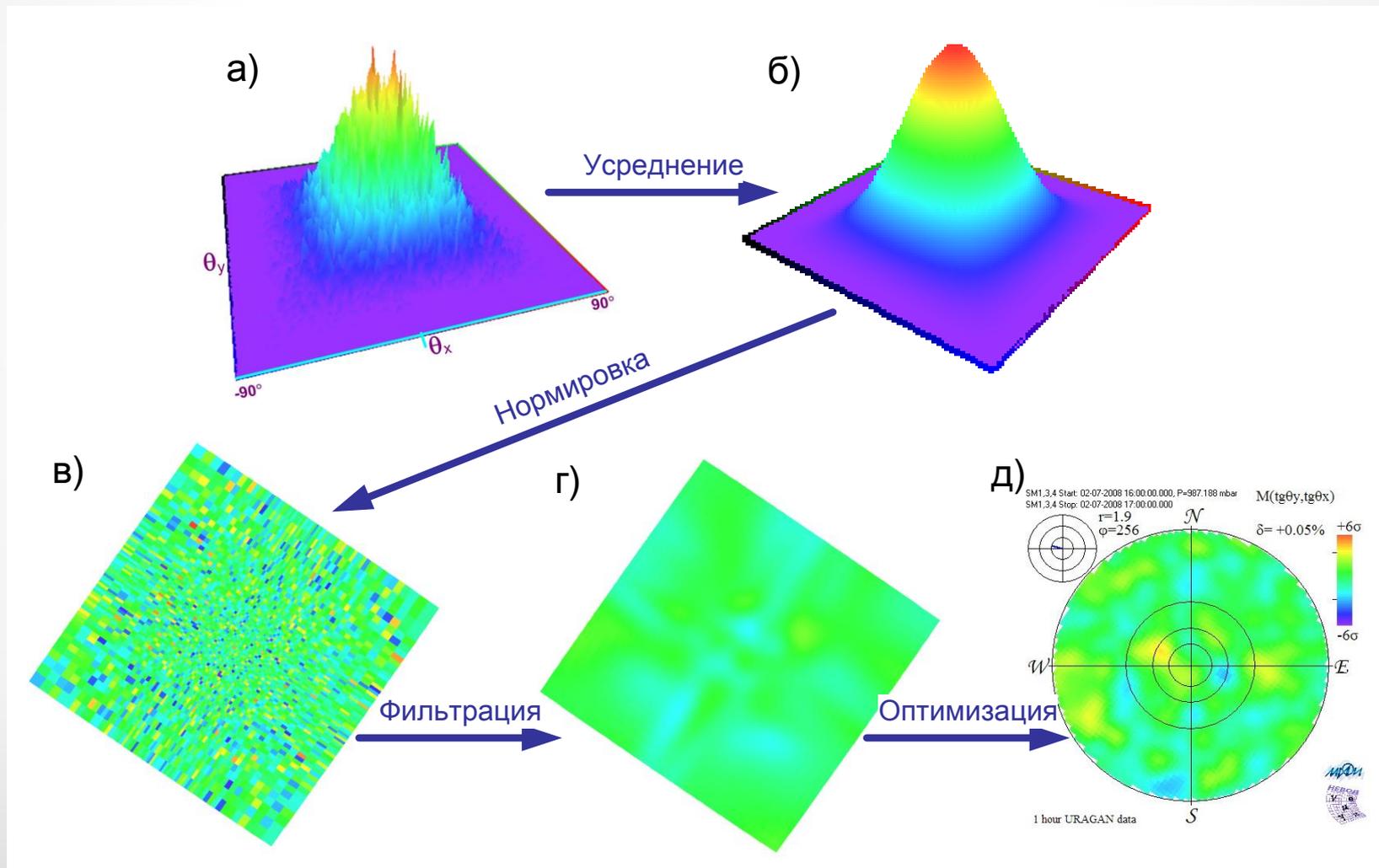
- регистрация 1 минута;
- средний темп счета 1700 Гц
(около $7 \div 8 \times 10^4$ мюонов в мин);
- угловая матрица 91×91 ячеек;
- статистическая ошибка $\sim 0.1 \%$
(для 10-минутного интервала).



В режиме реального времени определяется направление прихода каждого мюона и это событие добавляется в соответствующую ячейку **матрицы проекционных углов** размером 2×2 градуса.

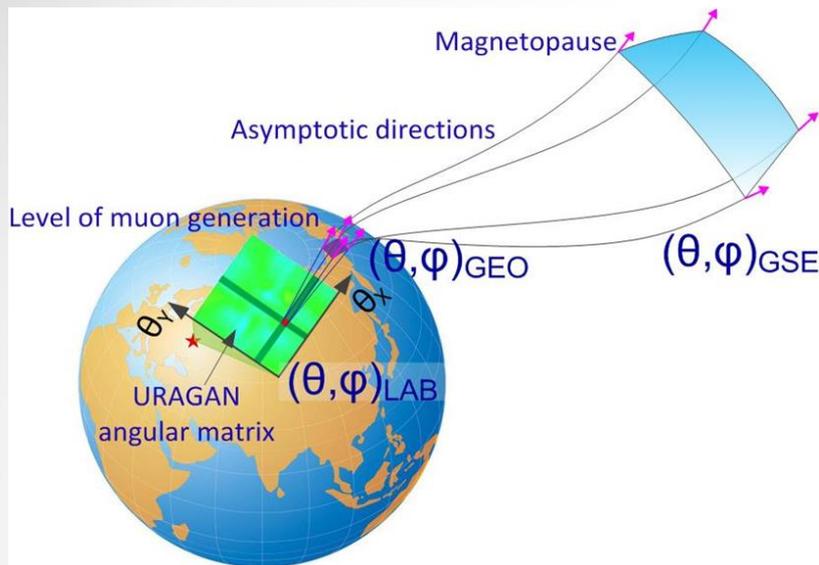
Построение мюонных изображений вариаций интенсивности

Для визуализации изменений пространственно-углового распределения интенсивности потока мюонов во времени удобны мюонные «снимки» – мюонографии, которые позволяют изучать двумерную динамику потока мюонов.

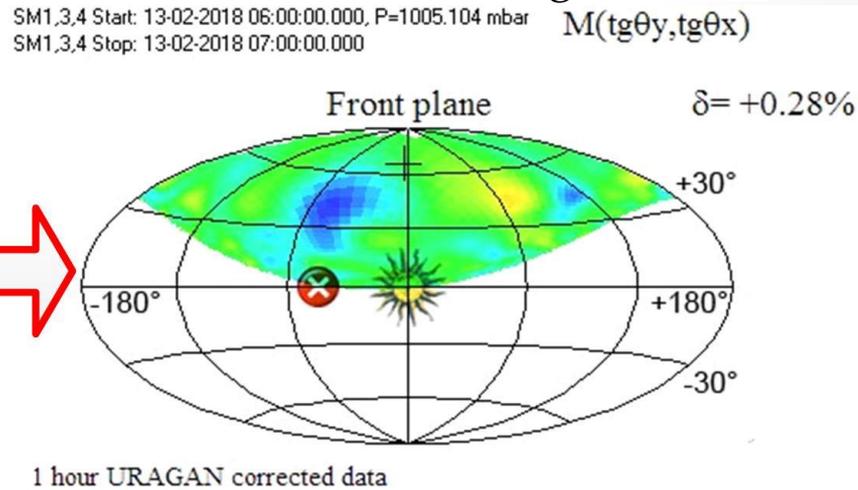
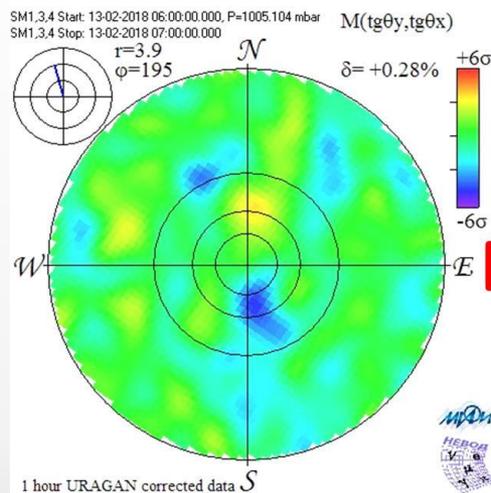
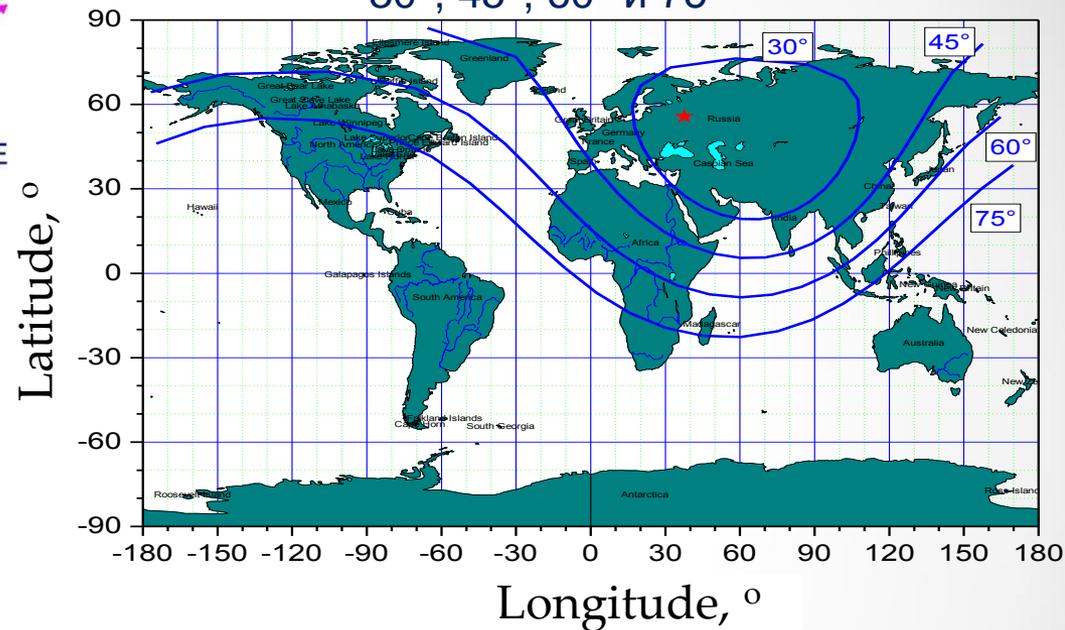


Мюнографии на границе магнитопаузы.

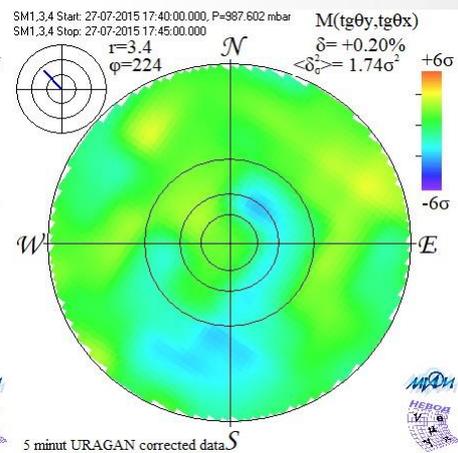
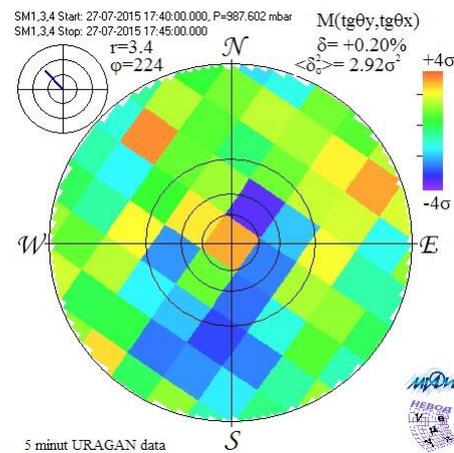
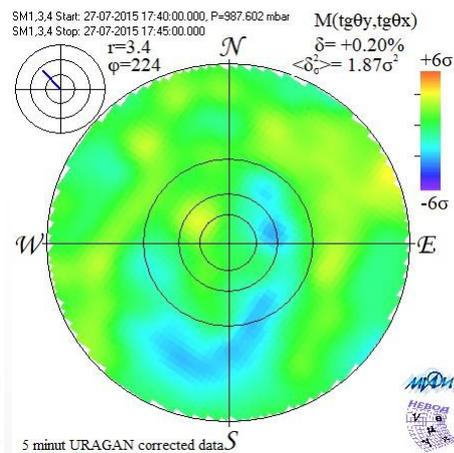
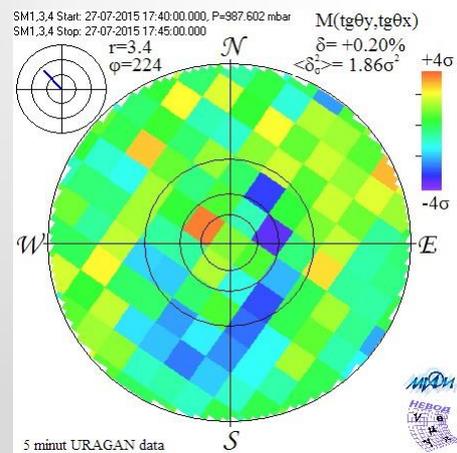
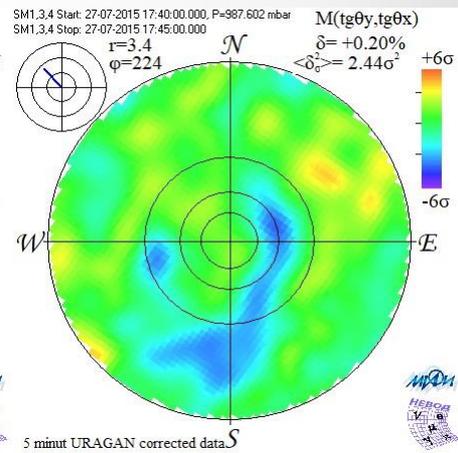
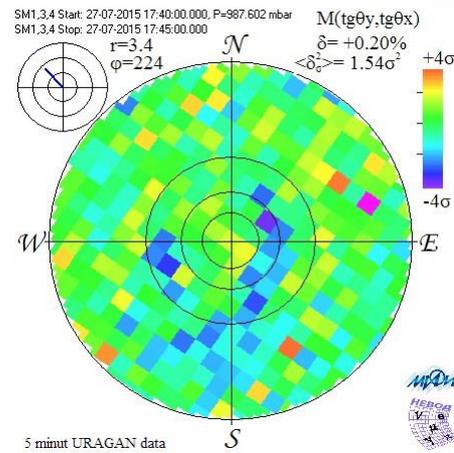
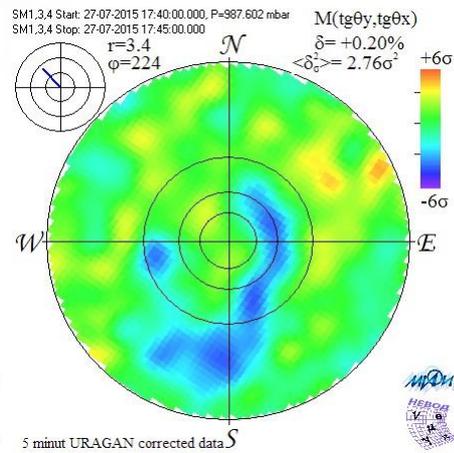
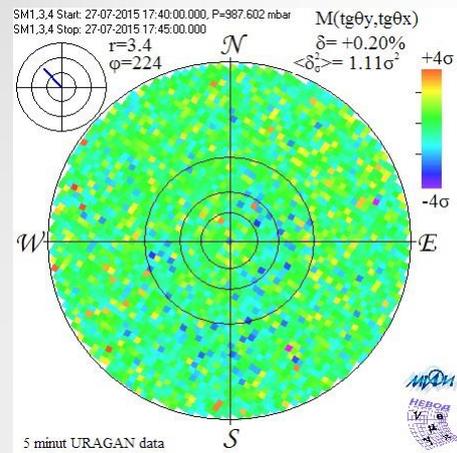
Асимптотические направления



Асимптотические направления протонов КЛ для
зенитных углов регистрируемых мюонов
30°, 45°, 60° и 75°



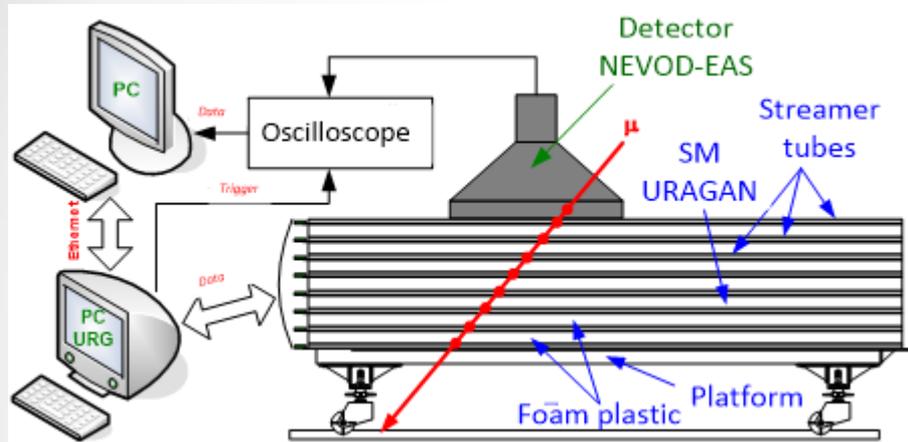
От мюонного годоскопа к многонаправленному мюонному телескопу



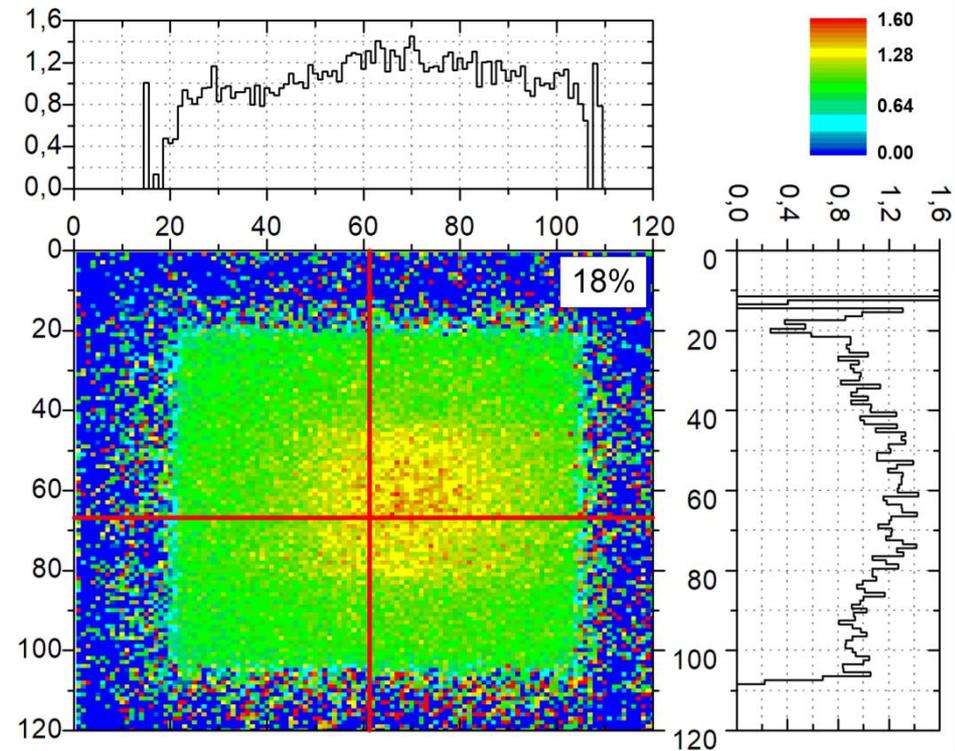
Мюнография детекторов заряженных частиц (неоднородность отклика по объему детектора)

Мюнография отклика детектора частиц ШАЛ

Схема измерения

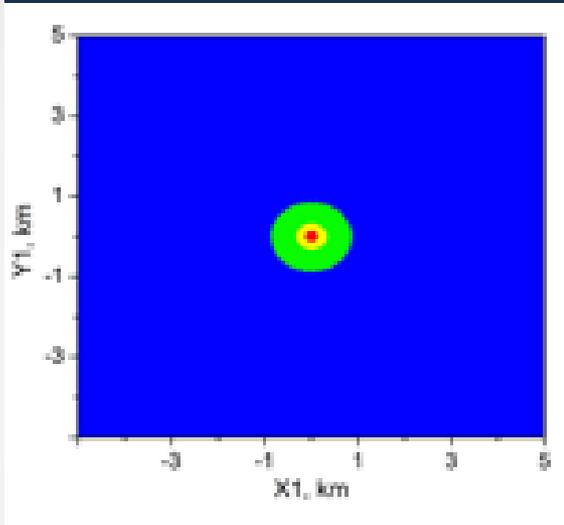


Цвет соответствует амплитуде (заряду) относительного отклика детектора при прохождении одиночного мюона через ячейку чувствительной области с размерами $1 \times 1 \text{ см}^2$.

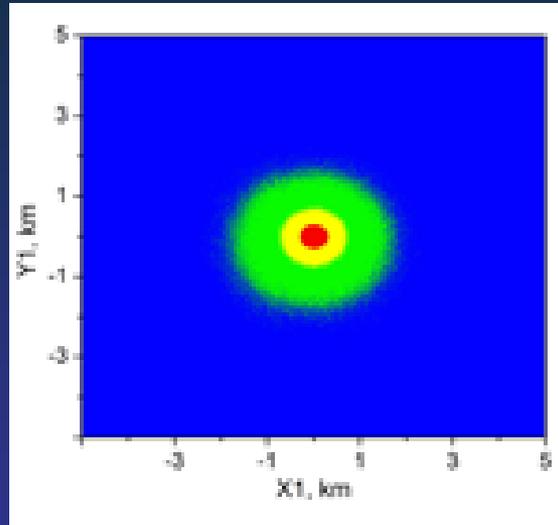


**Группы мюонов
космических лучей
сверхвысоких энергий**

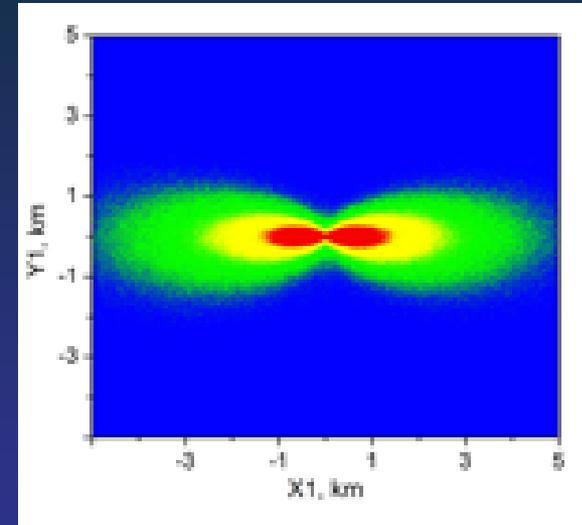
Размер ШАЛ в зависимости от зенитного угла



35° without EMF



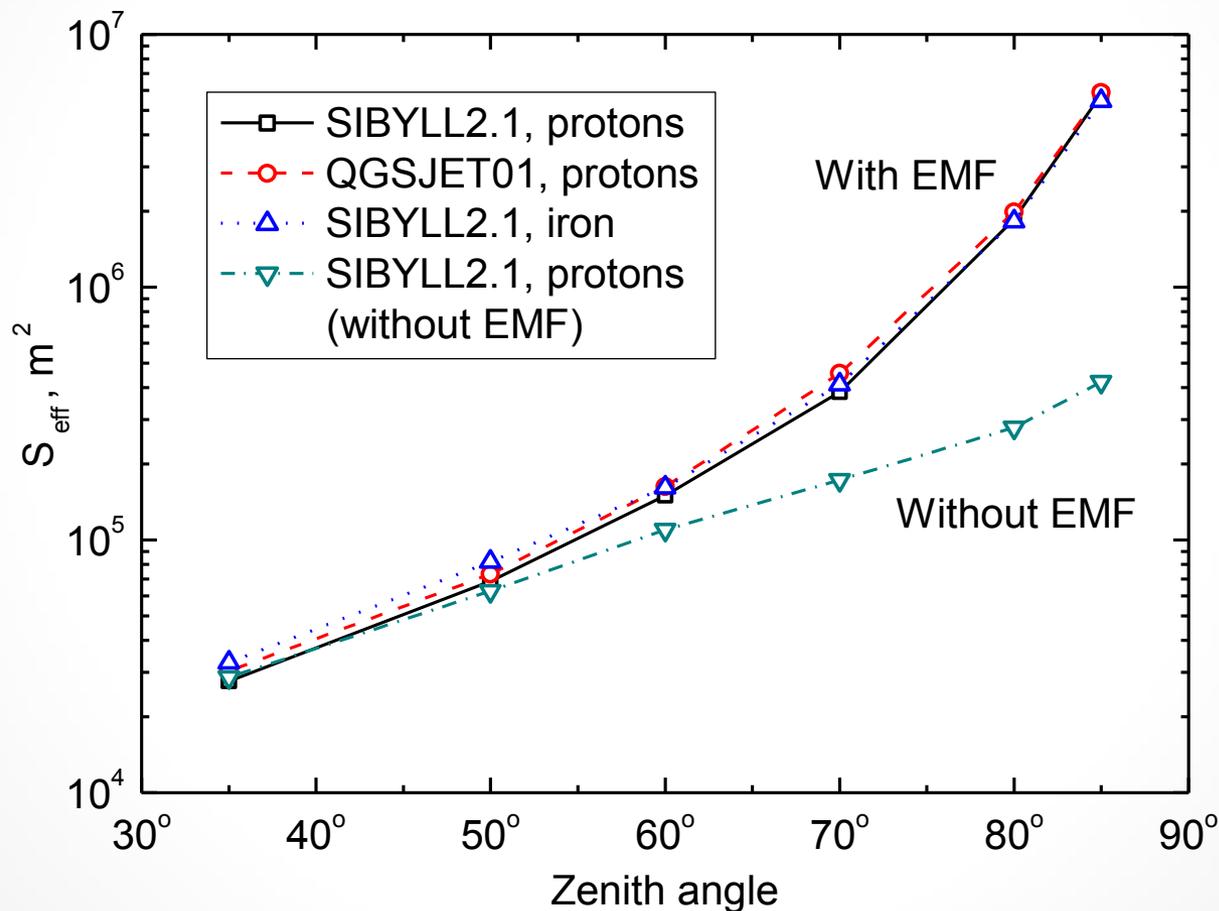
80° without EMF



80° with EMF

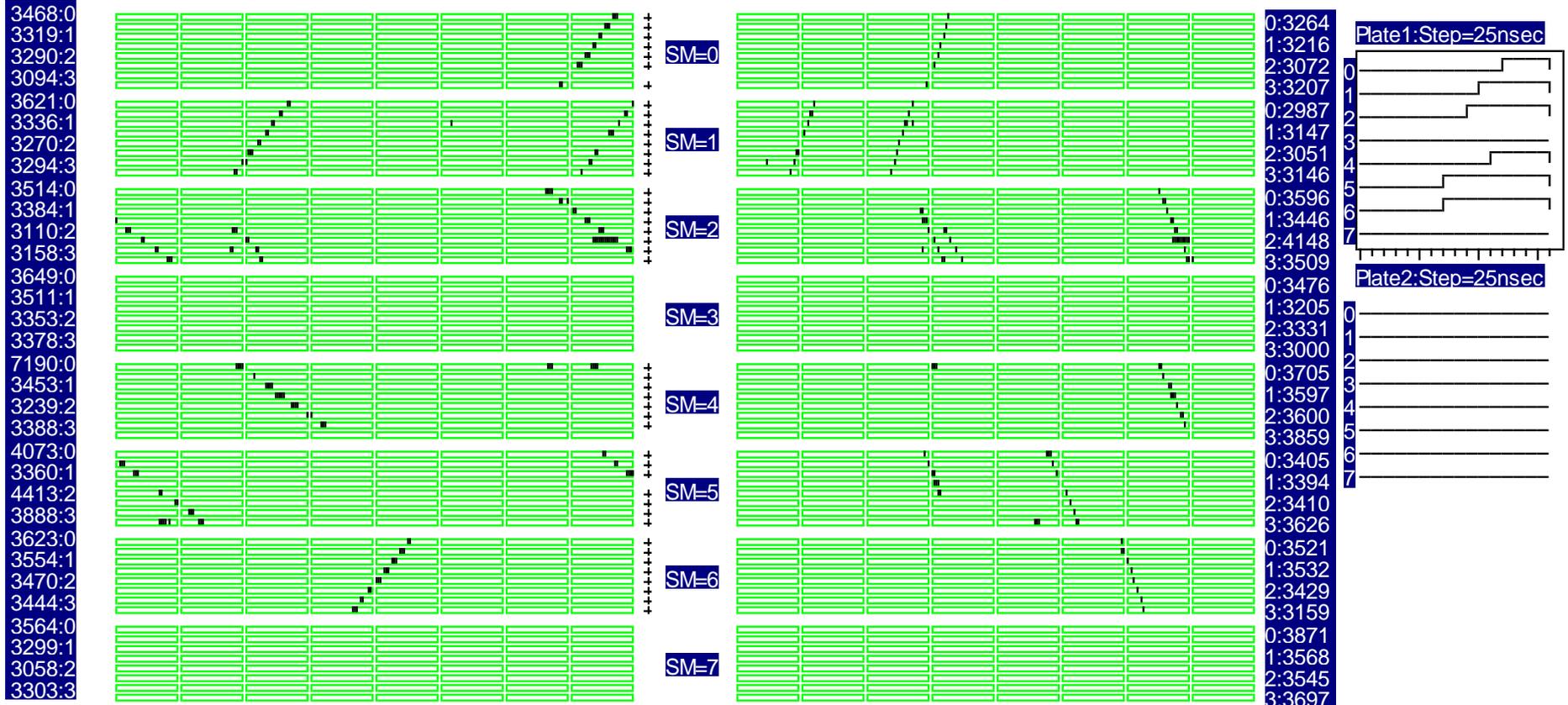
CORSIKA (SIBYLL+FLUKA), p, $E_0 = 10^{17}$ eV, 100 EAS, $E_\mu \geq 1$ GeV

Зависимость эффективной площади сбора ШАЛ в методе СЛПМ от зенитного угла



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

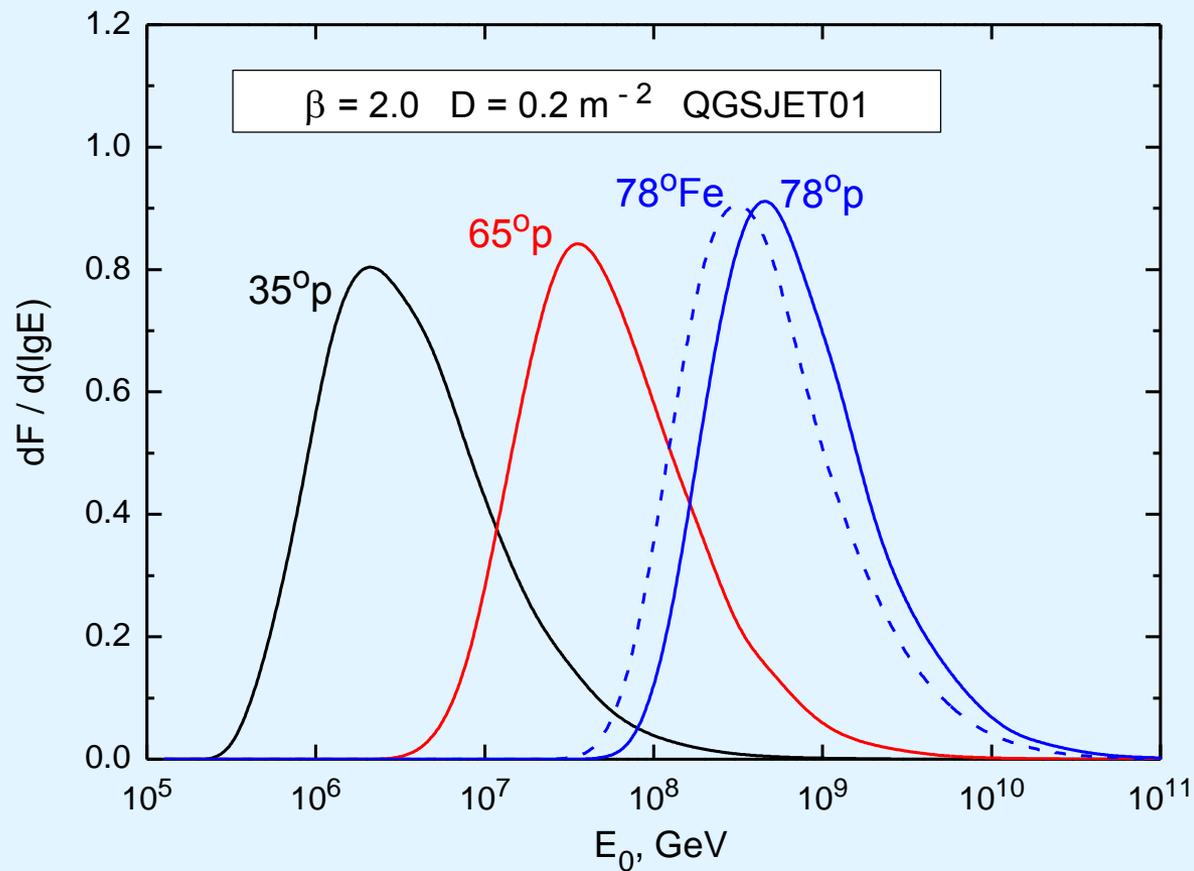
Run 8 --- Event 219242 ----06-12-2004 23:25:26.27 Trigger(1-16):01110100 00000000 Weit Time:109.072 msec



Y-projection

Time

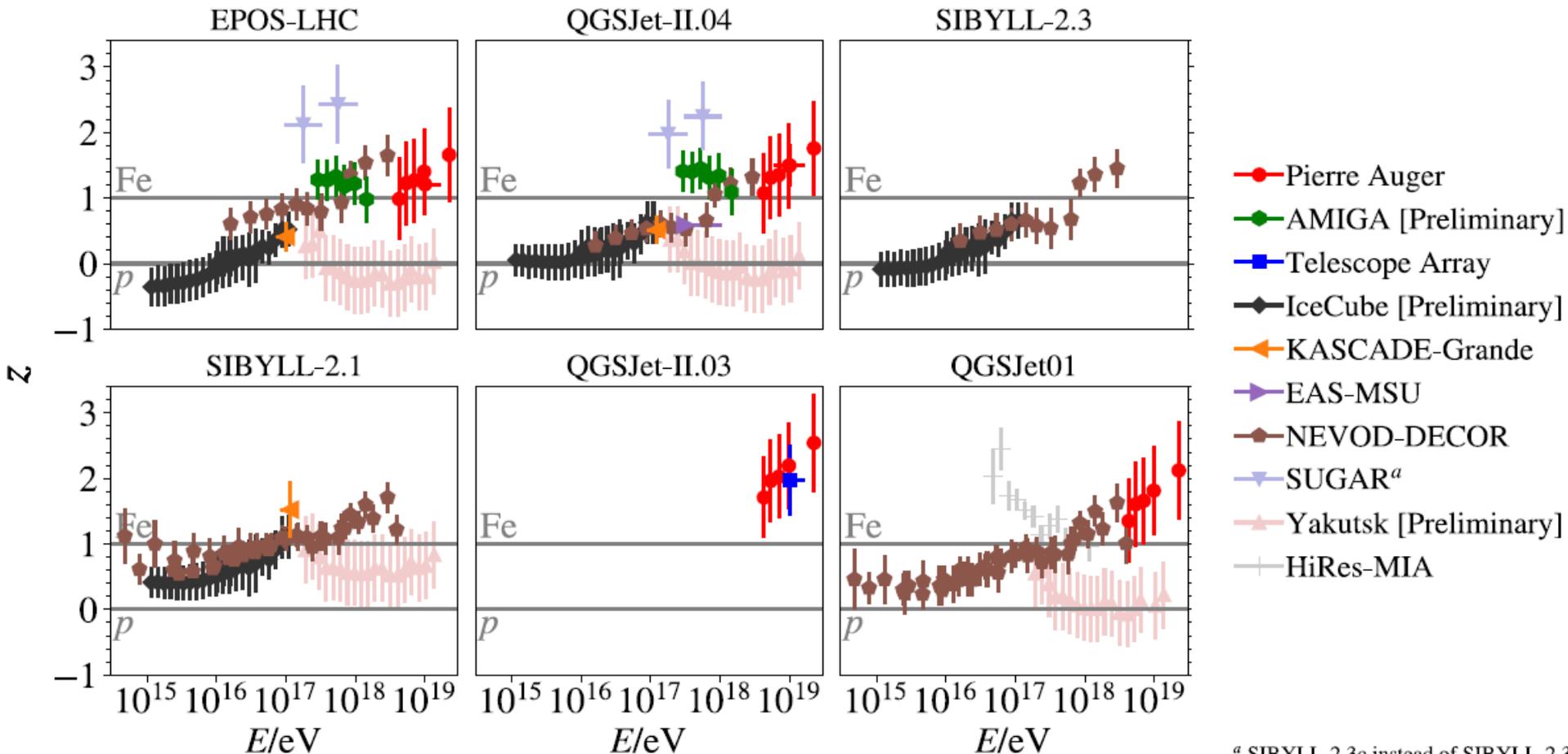
Вклад первичных энергий под разными зенитными углами



Combining muon measurements

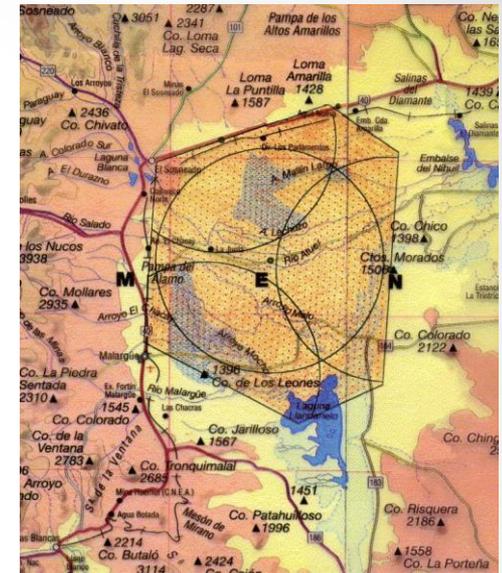
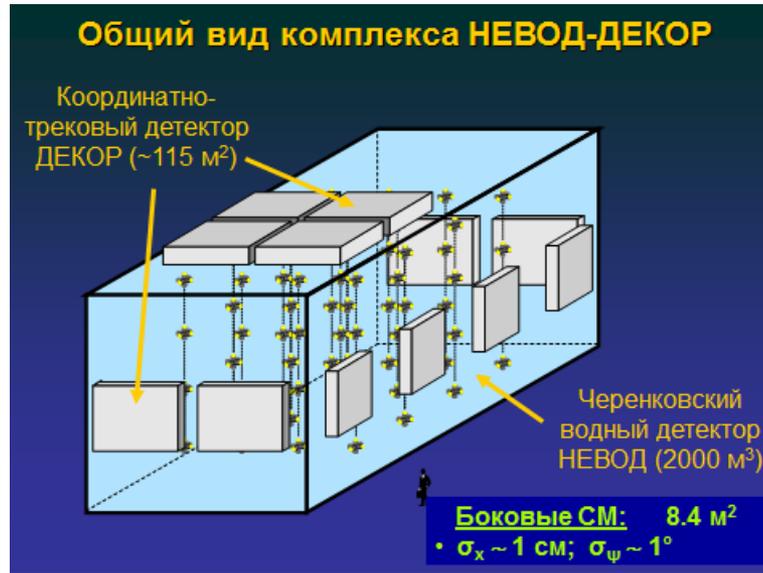
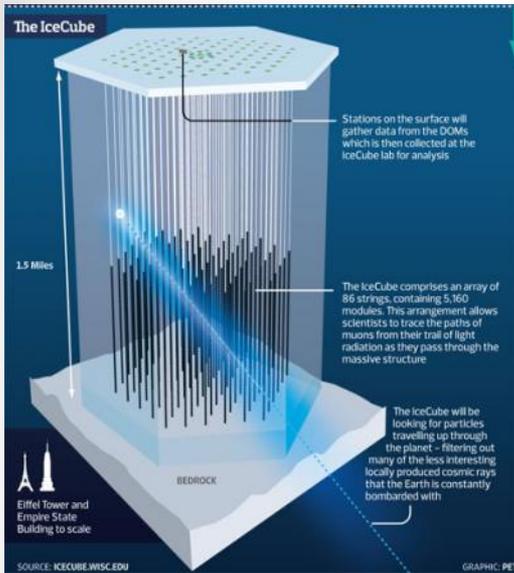
Step 1: Convert all measurements to z-scale $z = \frac{\ln N_{\mu}^{\text{det}} - \ln N_{\mu,p}^{\text{det}}}{\ln N_{\mu,\text{Fe}}^{\text{det}} - \ln N_{\mu,p}^{\text{det}}}$

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

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

NEVOD-DECOR

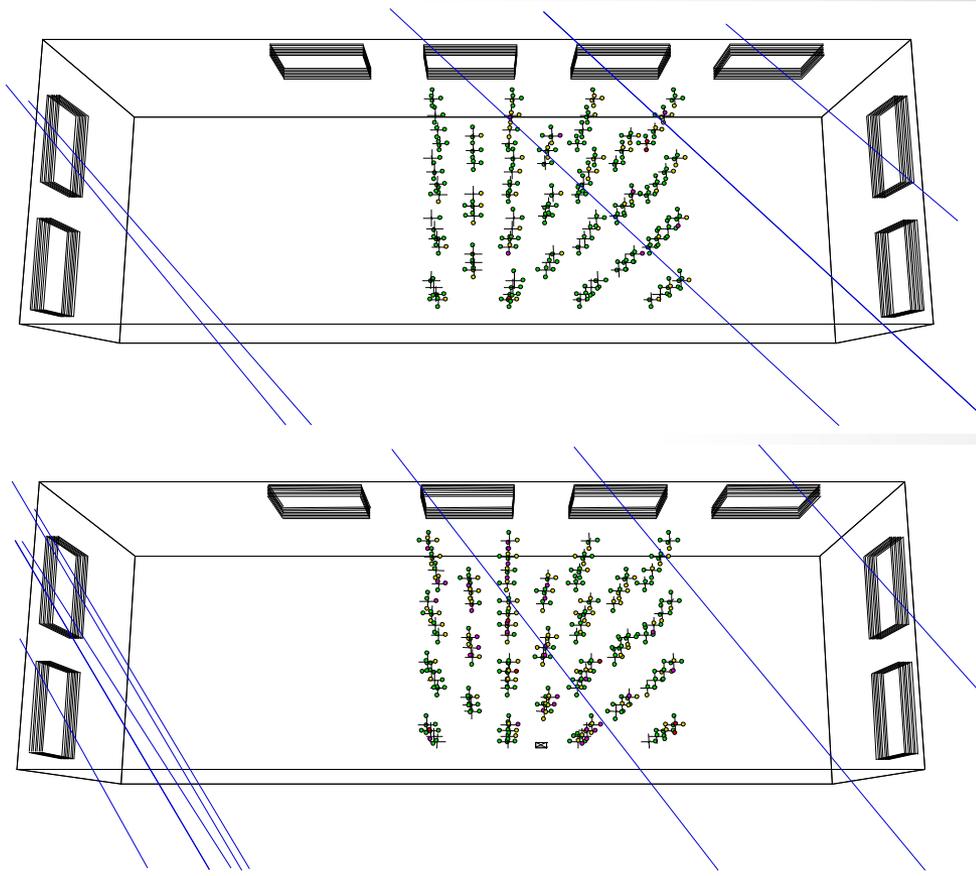
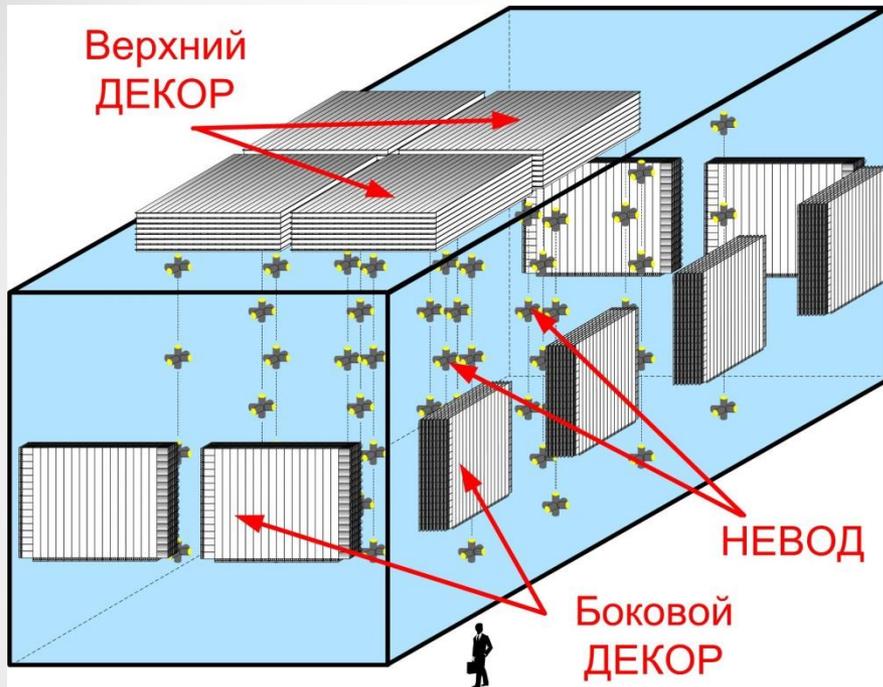
$S = 100$ кв. м (!!!)
 $3 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{18}$ эВ
 2010
 ???

Pierre Auger

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

О новых результатах по группам мюонов будет рассказано в докладе Кокоулина Р.П. и Богданова А.Г. в четверг 1 октября.

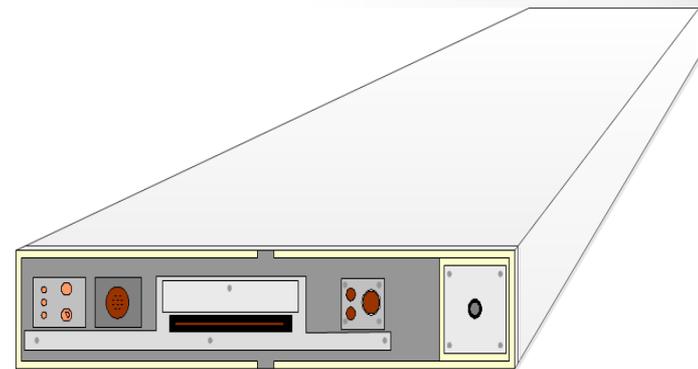
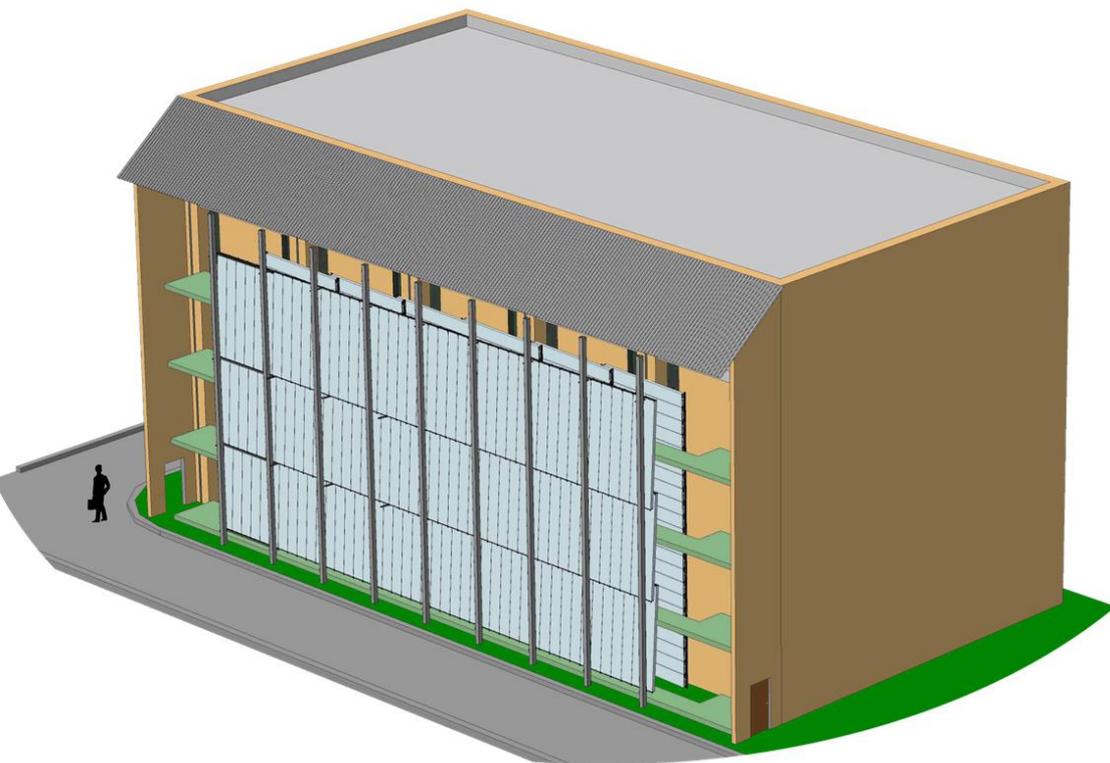
Проблемы эксперимента НЕВОД-ДЕКОР



Недостатки: небольшая площадь и не сплошное перекрытие координатно-трекового детектора ДЕКОР, его разрешение 1 см.
В черенковском водном детекторе используется не весь объем (40%).

Дальнейшее развитие комплекса НЕВОД

1. Создание нового координатно-трекового детектора ТРЕК *из дрейфовых камер* (ИФВЭ НИЦ КИ).
2. Расширение и модернизация черенковского водного детектора.
3. Расширение установок НЕВОД-ШАЛ и УРАН



Площадь детектора ТРЕК **250 м²**
в 7 раз больше чем у ДЕКОРа.

Статосшибка уменьшится **в 2,5 раза**.

Размеры дрейфовой
камеры (**400 × 50 × 12**) см³
Всего **4** измерительных канала
Разрешение **1 мм**,
в 10 раз лучше, чем у ДЕКОРа,
позволит достичь **10¹⁹ эВ**.

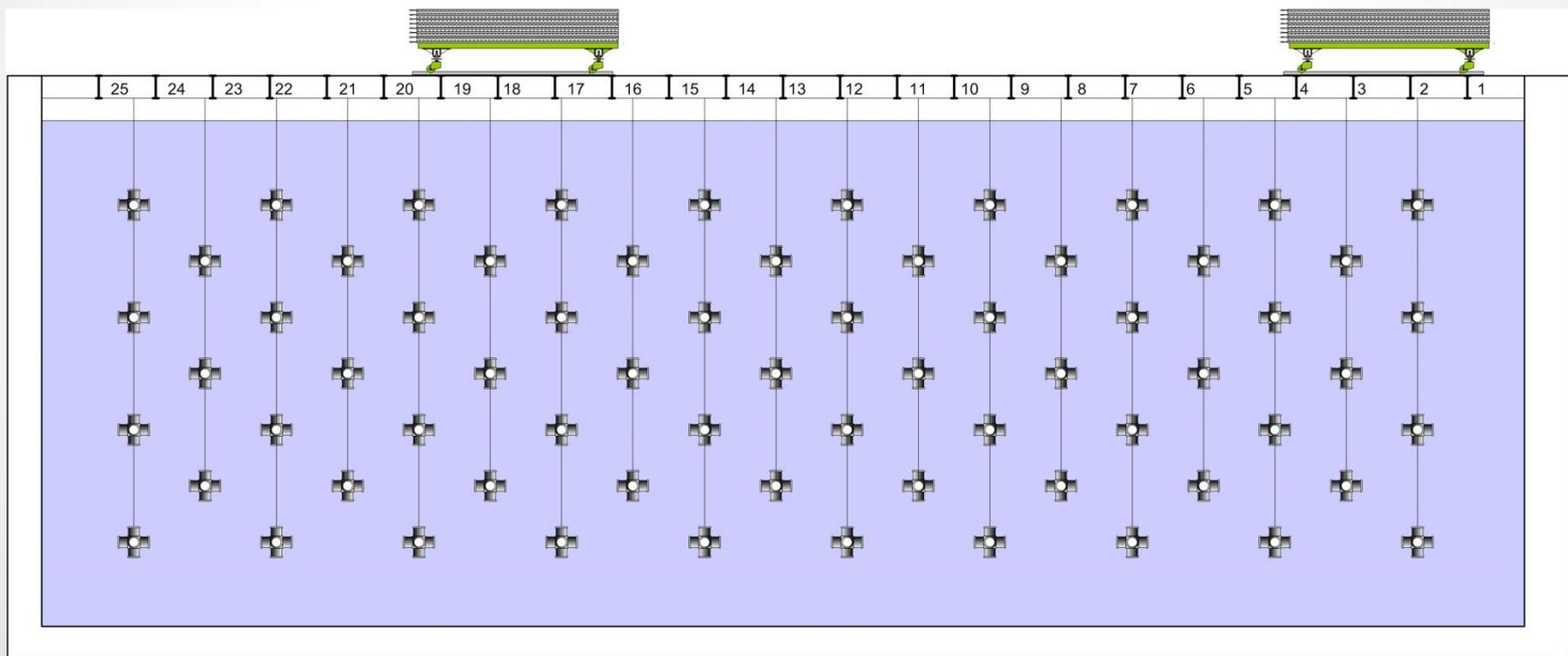
ЧВД НЕВОД-241 и СКТ-188

Первоначальный проект НЕВОДа – 241 КСМ

В 1991 – 1994 гг. НЕВОД-91.

Практически кубическая решетка из 7 плоскостей по каждой оси.

Переход от НЕВОД-91 к НЕВОД-241 (минимум НЕВОД-160)



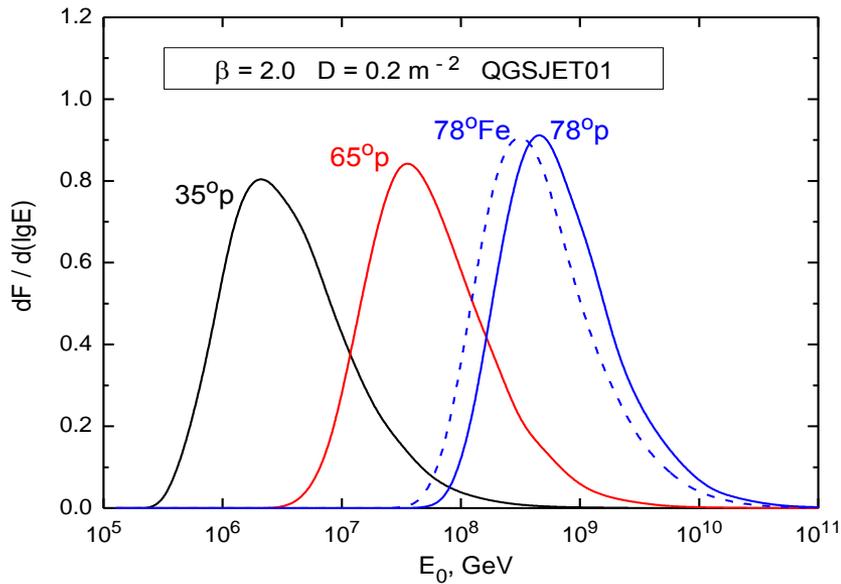
В 2,5 раза увеличится объем детектора для изучения энерговыделения групп мюонов и каскадных ливней, соответственно СКТ увеличится до 94 + 94 детекторов.

Проект НЕВОД-ШАЛ

(Совместный проект с Туринским университетом и INFN)



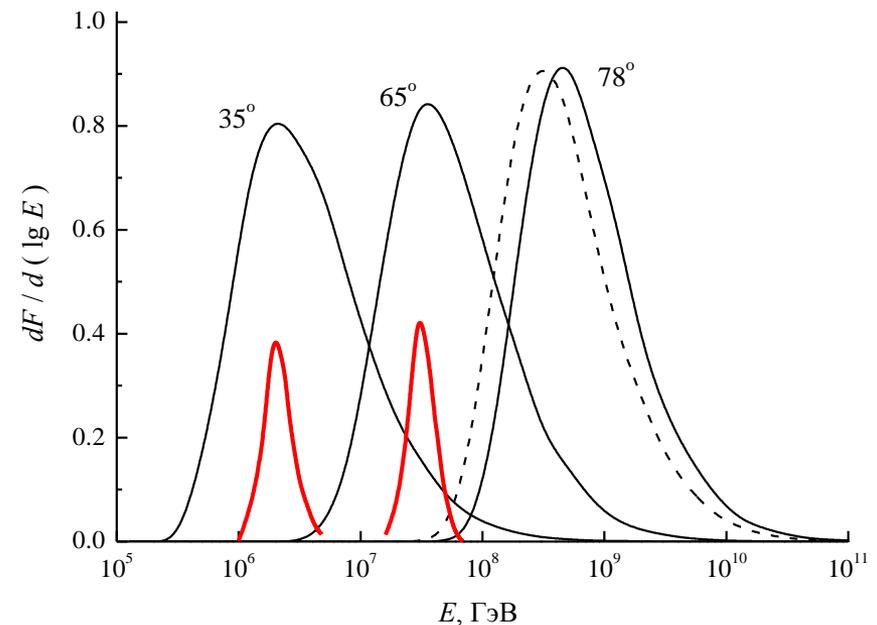
Решение проблемы привязки групп мюонов к энергии первичных частиц



Большой разброс определяется неизвестным положением оси ШАЛ.

Если измерять положение оси, то картина существенно изменится.

Если измерять независимо энергию ШАЛ, то это будет своеобразная калибровка метода.



Заключение

1. Уникальный экспериментальный комплекс НЕВОД класса “megascience”, но не “megamoney”, успешно развивается и дает **результаты мирового уровня**.
2. В настоящее время он является **единственным в мире для решения мюонной загадки**, и а в дальнейшем будет использоваться для долговременных исследований космических лучей в рекордной области энергий **$10^9 - 10^{19}$ эВ** при решении различных астрофизических и космофизических задач.
3. Расположение уникального экспериментального комплекса непосредственно **в вузе** и практически неограниченный объем постоянно обновляющихся экспериментальных данных создают прекрасные возможности для **обучения студентов непосредственно в процессе проведения научных исследований** и в значительной степени снимают проблему обслуживания комплекса.