



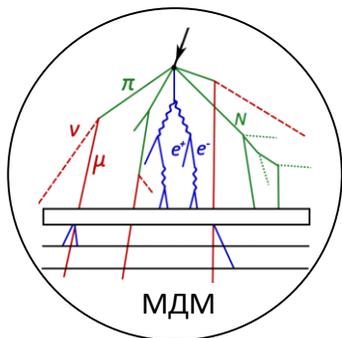
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Научно-образовательный центр НЕВОД



Многоцелевой Детектор Мюонов для исследования мюонной компоненты широких атмосферных ливней

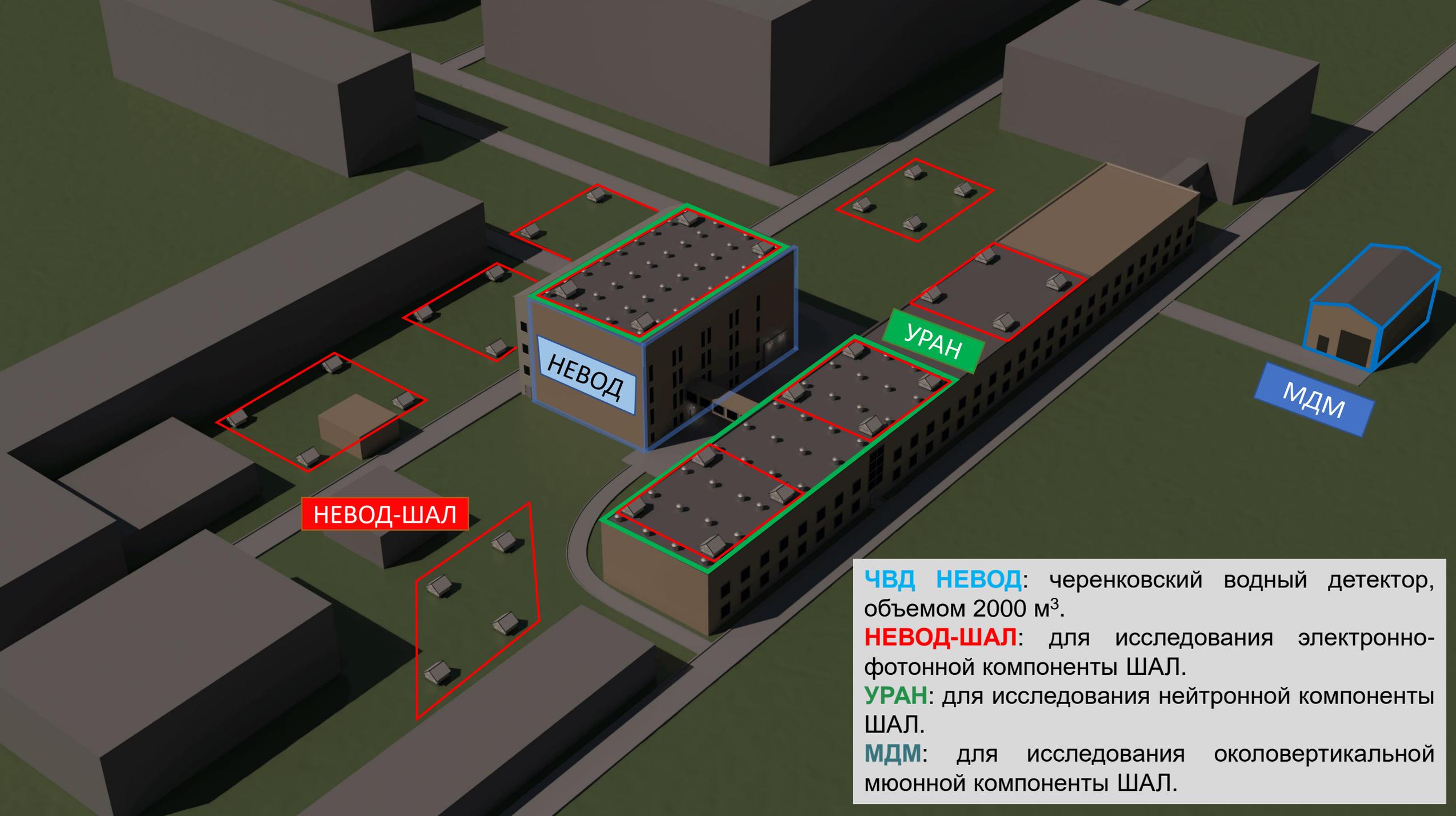
Докладчик: Трошин И.Ю.

E-mail: IYTroshin@mephi.ru



г. Новосибирск,
2026 г.





НЕВОД-ШАЛ

НЕВОД

УРАН

МДМ

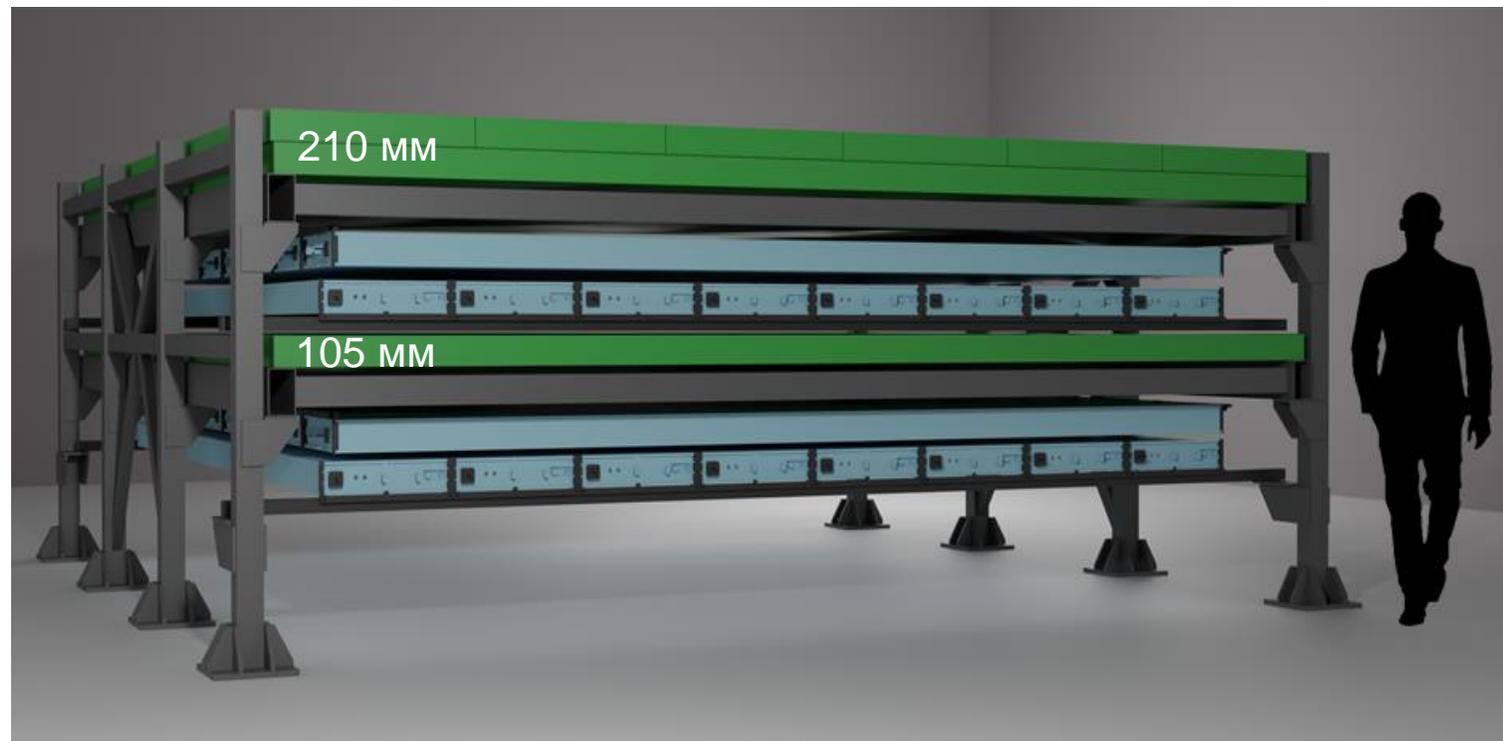
ЧВД НЕВОД: черенковский водный детектор, объемом 2000 м³.
НЕВОД-ШАЛ: для исследования электронно-фотонной компоненты ШАЛ.
УРАН: для исследования нейтронной компоненты ШАЛ.
МДМ: для исследования околоразрывной мюонной компоненты ШАЛ.

Многоцелевой Детектор Мюонов (МДМ)



Общий вид здания с размещённым
внутри детектором МДМ

МДМ состоит из 32 дрейфовых камер.
Эффективная площадь детектора 13.7 м².
Общая толщина стального поглотителя 315 мм.
Масса детектора больше 50 тонн.



Визуализация детектора МДМ

Многоцелевой Детектор Мюонов (МДМ)



Фотография детектора МДМ: дрейфовые камеры, стальной поглотитель и рамная конструкция.

Задачи детектора МДМ:

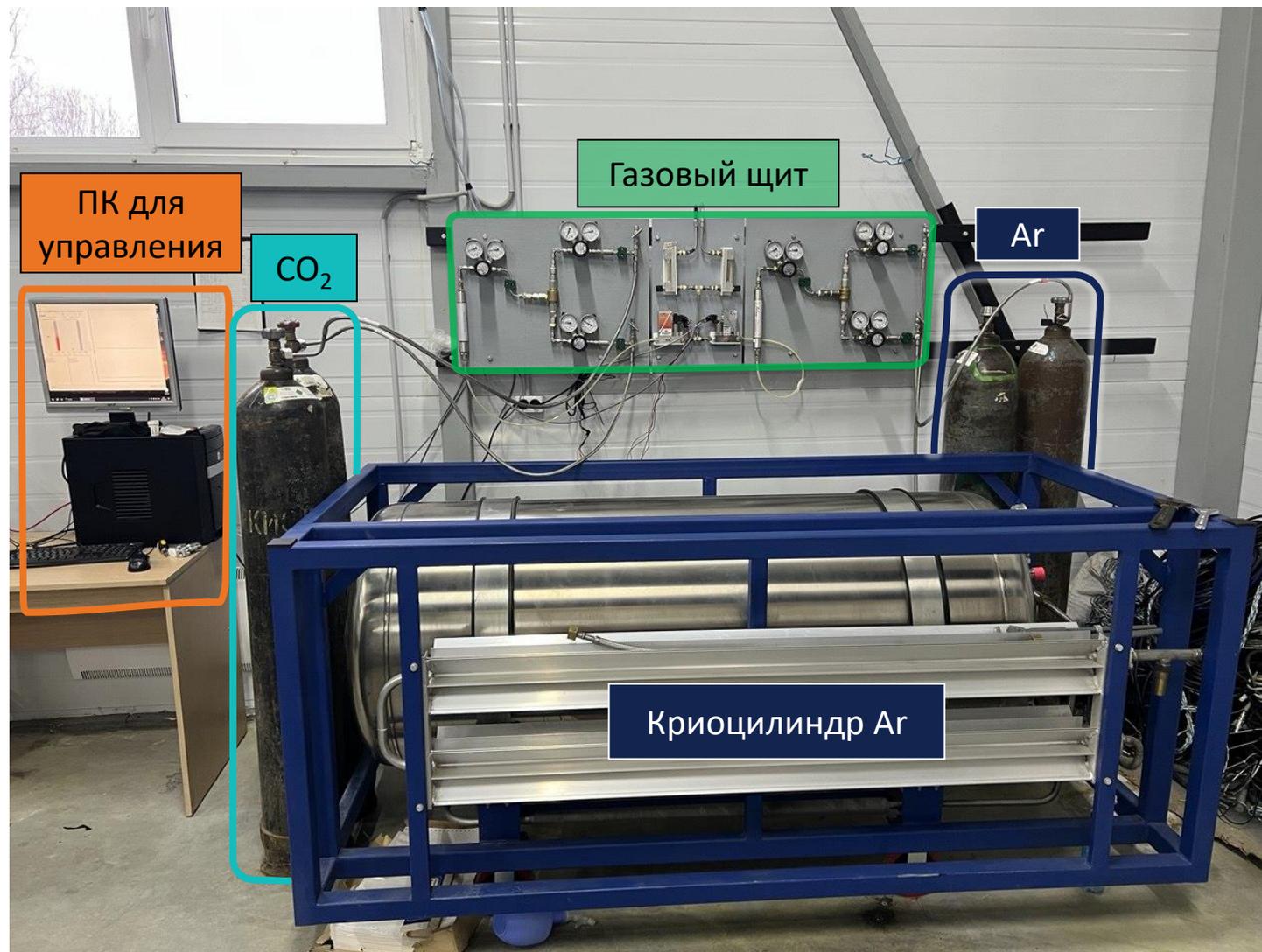
- Исследование космических лучей высоких энергий с использованием метода спектров локальной плотности мюонов (СЛПМ) для околоректального направления.
- Построение ФПР мюонов при совместной работе МДМ с другими детекторами комплекса НЕВОД.
- Исследование анизотропии одиночных и групп мюонов.
- Поиск ШАЛ, генерируемых гамма-квантами, совместно с другими установками экспериментального комплекса.
- Использование в качестве стенда для исследования пространственной однородности отклика других детекторов частиц.

Газовая система для детектора МДМ

Газовая система обеспечивает подготовку, контроль и подачу рабочей газовой смеси в дрейфовые камеры детектора МДМ.

Основные компоненты:

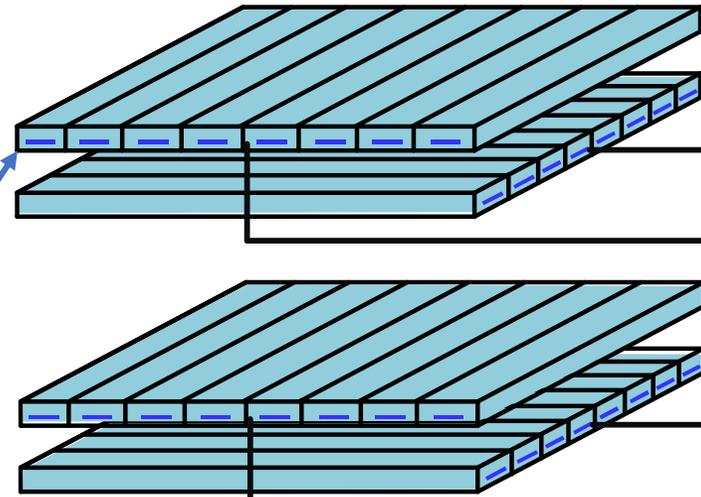
- Криоцилиндр аргона,
- Баллоны CO_2 и баллоны Ar ,
- Газовый щит с расходомерами,
- ПК для управления расходомерами.



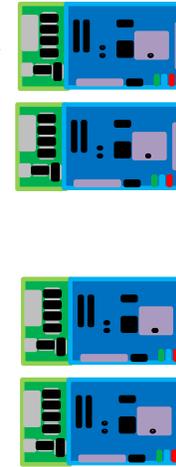
Фотография газовой системы

Сбор данных с МДМ

Плоскости дрейфовых камер



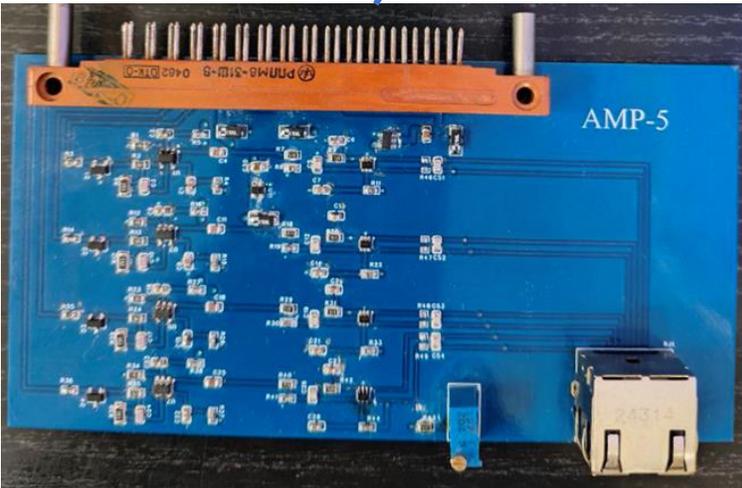
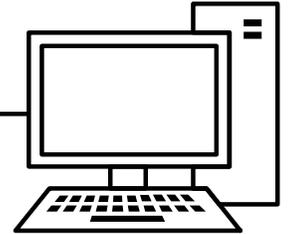
Преобразователи
и ВЦП



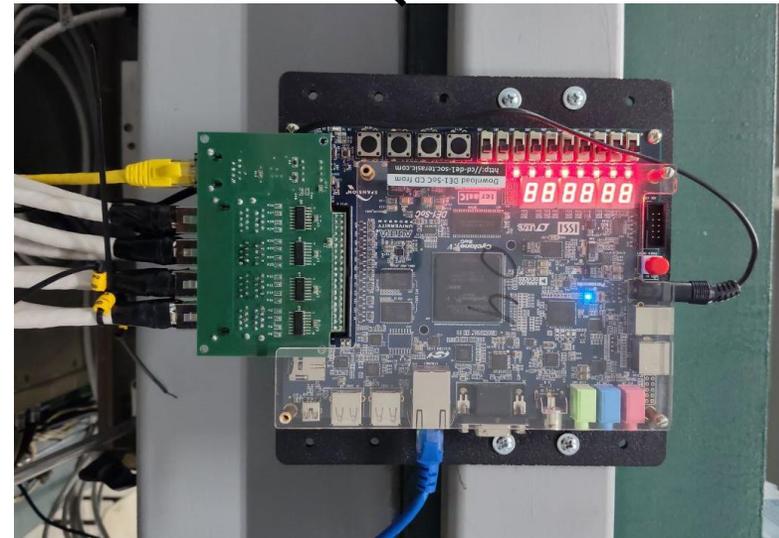
Ethernet



ЦВМ



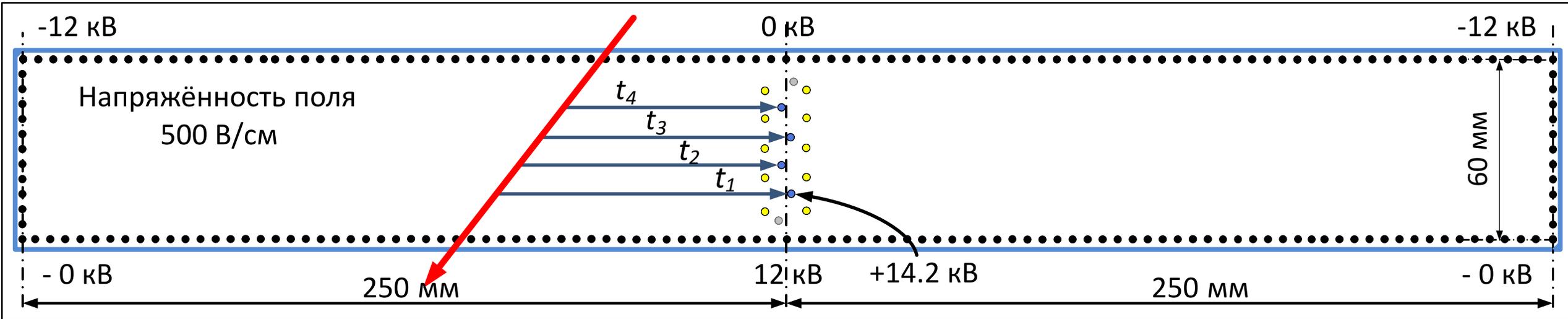
Четырёхканальный усилитель (AMP-5) с коэффициентом усиления 100 и дифференциальными выходами LVDS.



Преобразователи LVDS-TTL и ECL-TTL

ВЦП на базе FPGA (DE2-115 Development Kit).

Принцип работы дрейфовой камеры



Поперечное сечение дрейфовой камеры и схема её подключения к высокому напряжению

- – полеформирующие проволоки,
- – сигнальные,
- – катодные,
- – охранные.

Характеристики дрейфовых камер:

- Состав газовой смеси: 94% Ar + 6% CO₂
- Координатная точность ≈ 1 мм
- Угловая точность $\approx 1.5^\circ$
- Разделение двух треков ≈ 3 мм
- Время дрейфа электронов до 6 мкс
- Скорость дрейфа ≈ 0.045 мм/нс

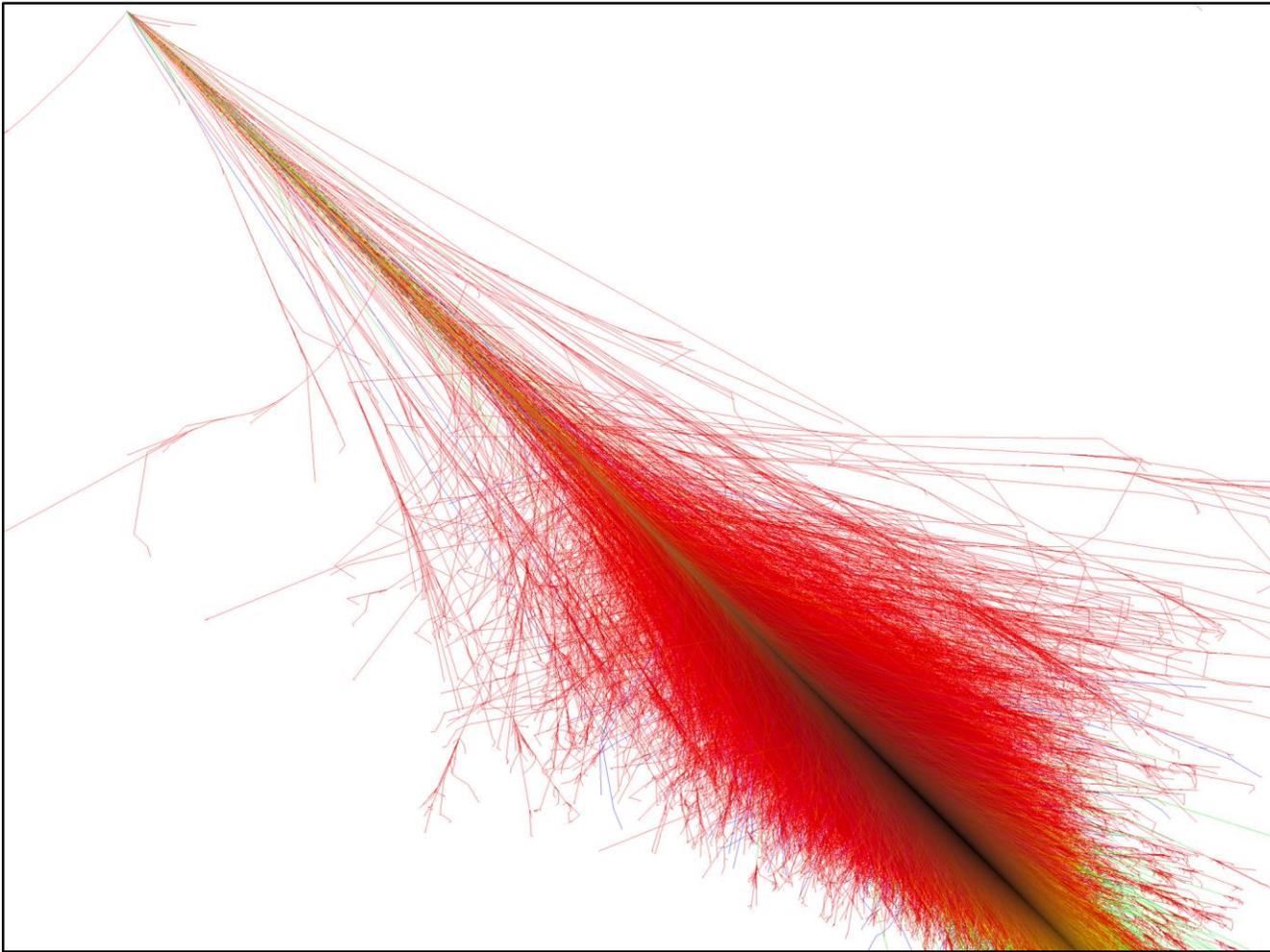
Широкие Атмосферные Ливни (ШАЛ)

Моделирование ШАЛ с использованием:
CORSIKA v7.7410.

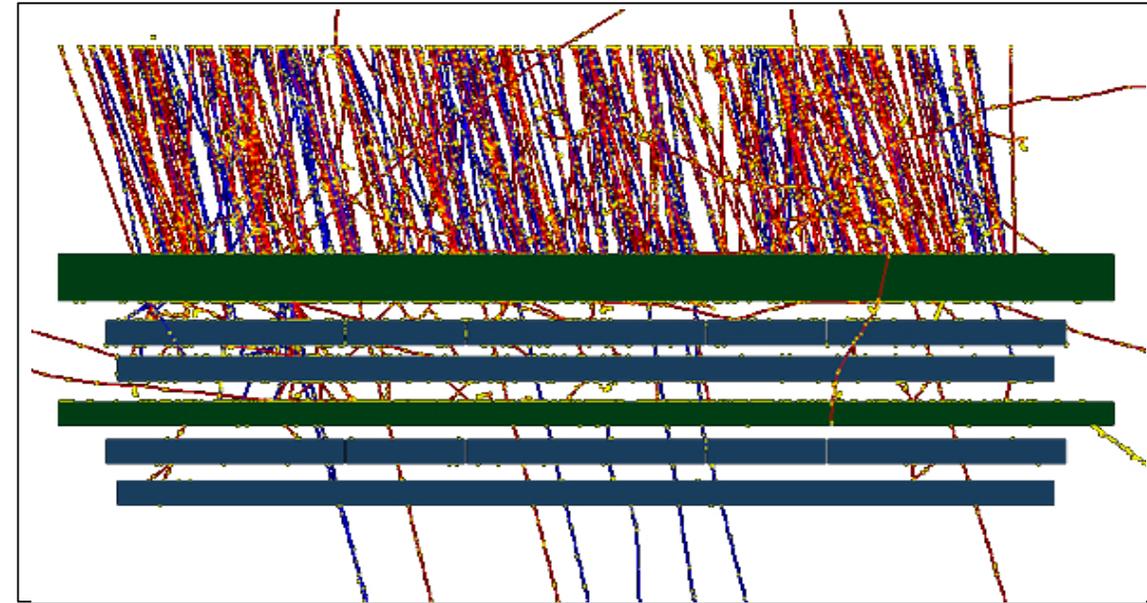
Модели адронных взаимодействий:
QGSJET-II, GHEISHA,

Модель электромагнитных взаимодействий:
EGS4

Отклик детектора смоделирован с использованием:
Geant4 v11.1.2. и FTFP_BERT

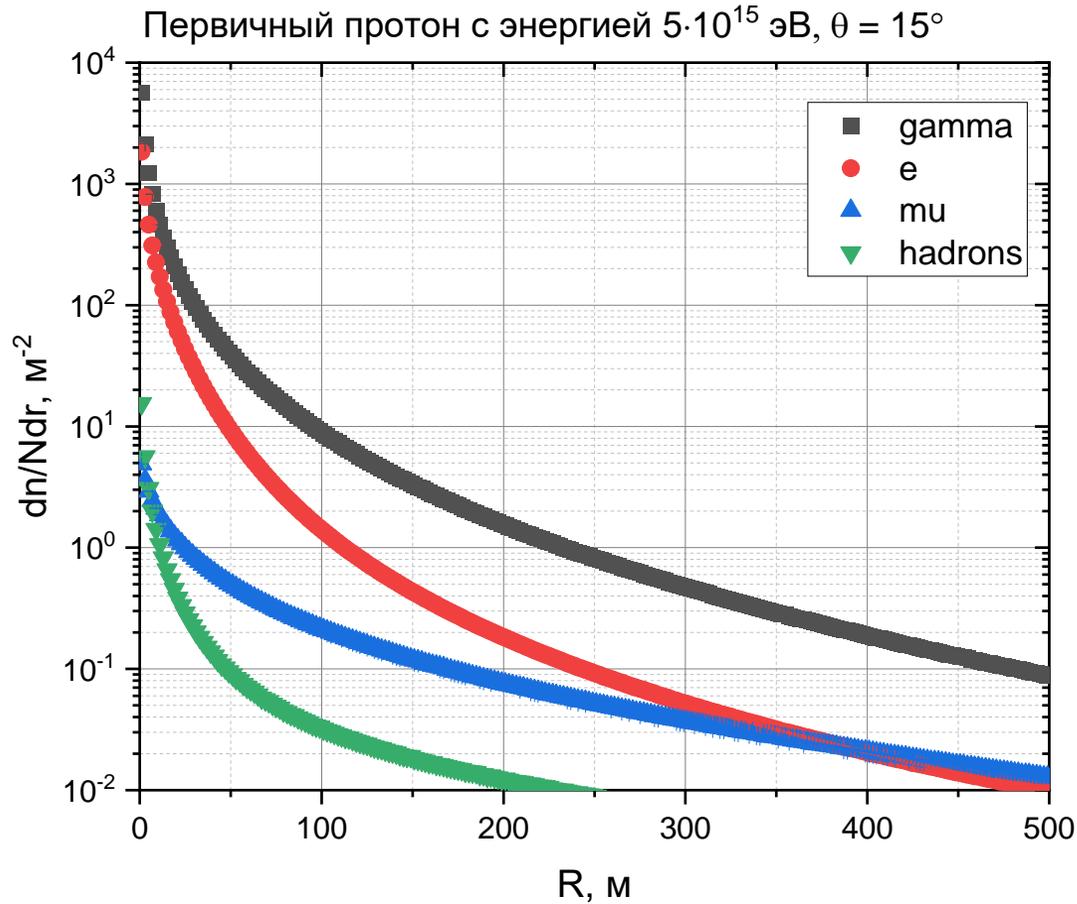


Моделированный ШАЛ от первичного протона с энергией 10^{15} эВ в программе CORSIKA.

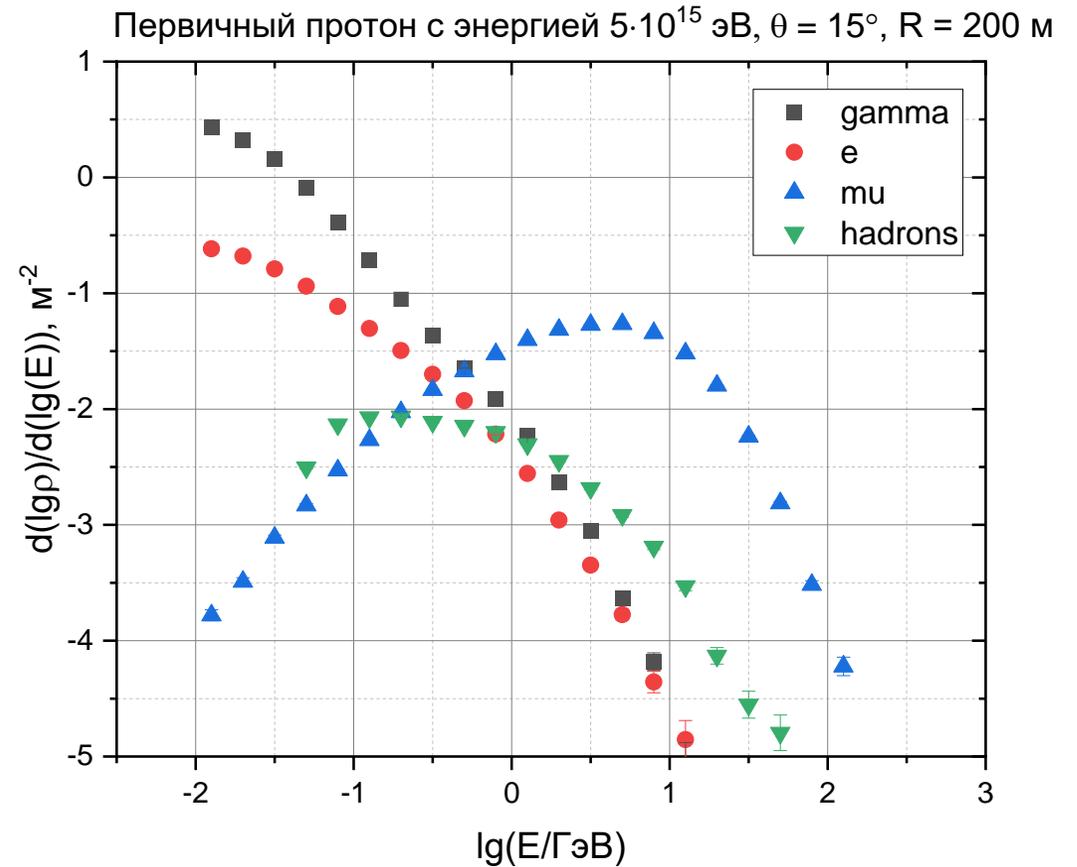


Моделирование прохождения частиц ШАЛ через детектор МДМ в программном пакете Geant4.

Основные характеристики ШАЛ

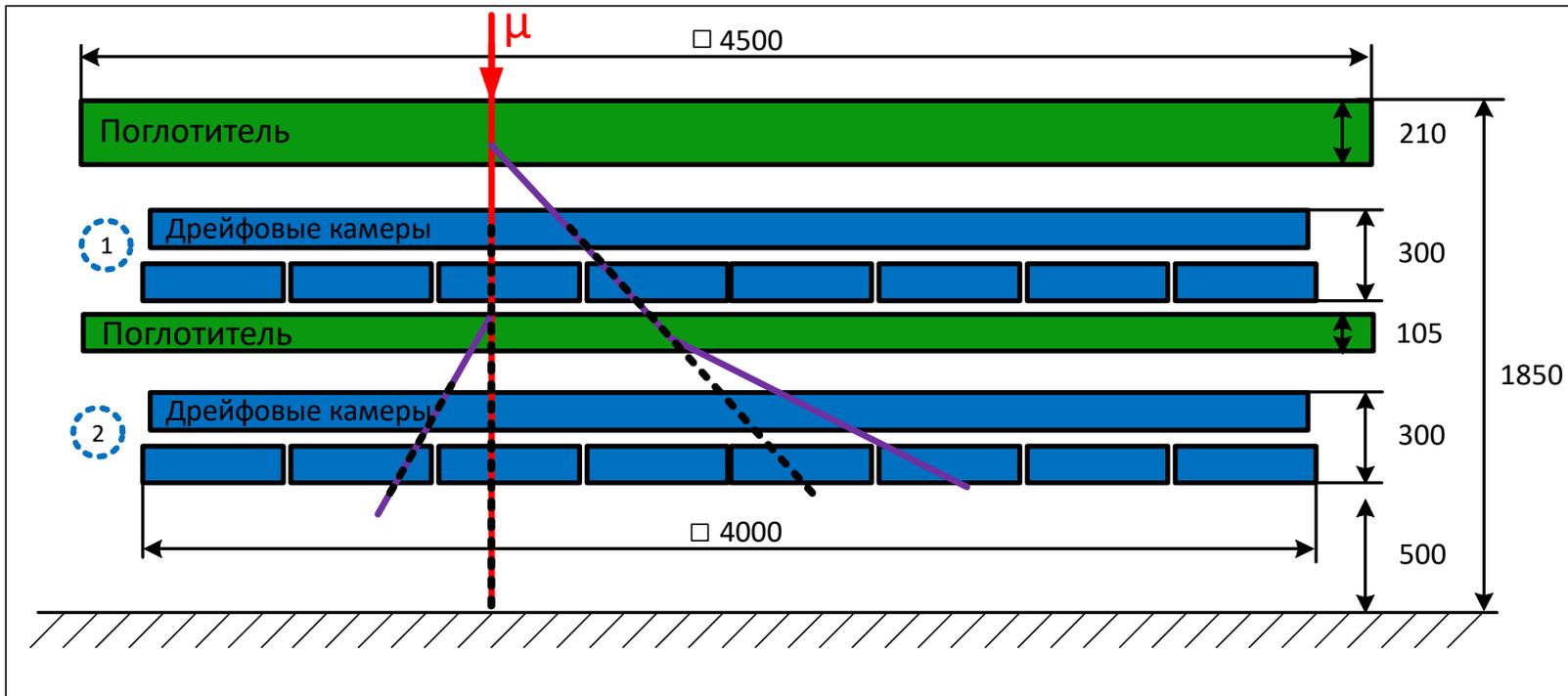


ФПР от протона с энергией $5 \cdot 10^{15}$ эВ при зенитном угле 15°

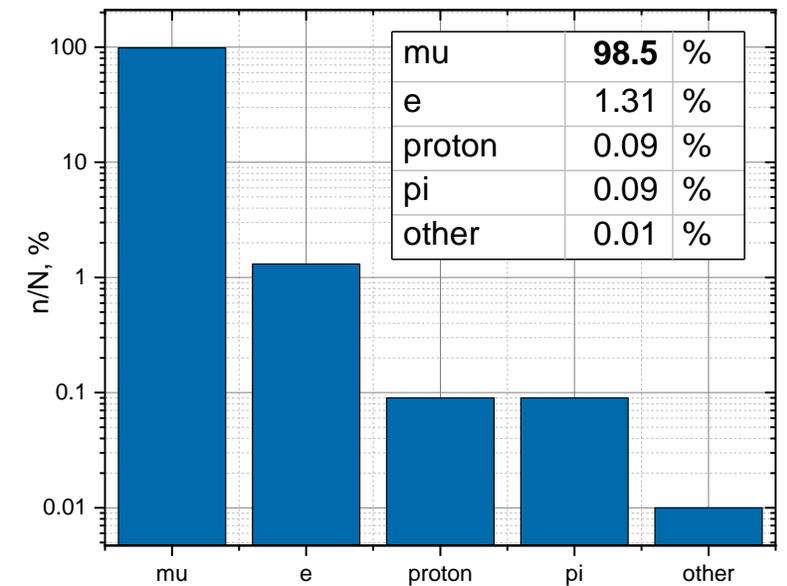


Энергетический спектр на расстоянии 200 м от оси ШАЛ

Модель МДМ и метод реконструкции



Модель детектора МДМ в Geant4 с характерными размерами **стального поглотителя** и **дрейфовых камер** и пример реконструкции события: **красный трек** – мюон, **фиолетовые треки** – вторичные частицы, **пунктирная линия** – прямолинейная экстраполяция трека.

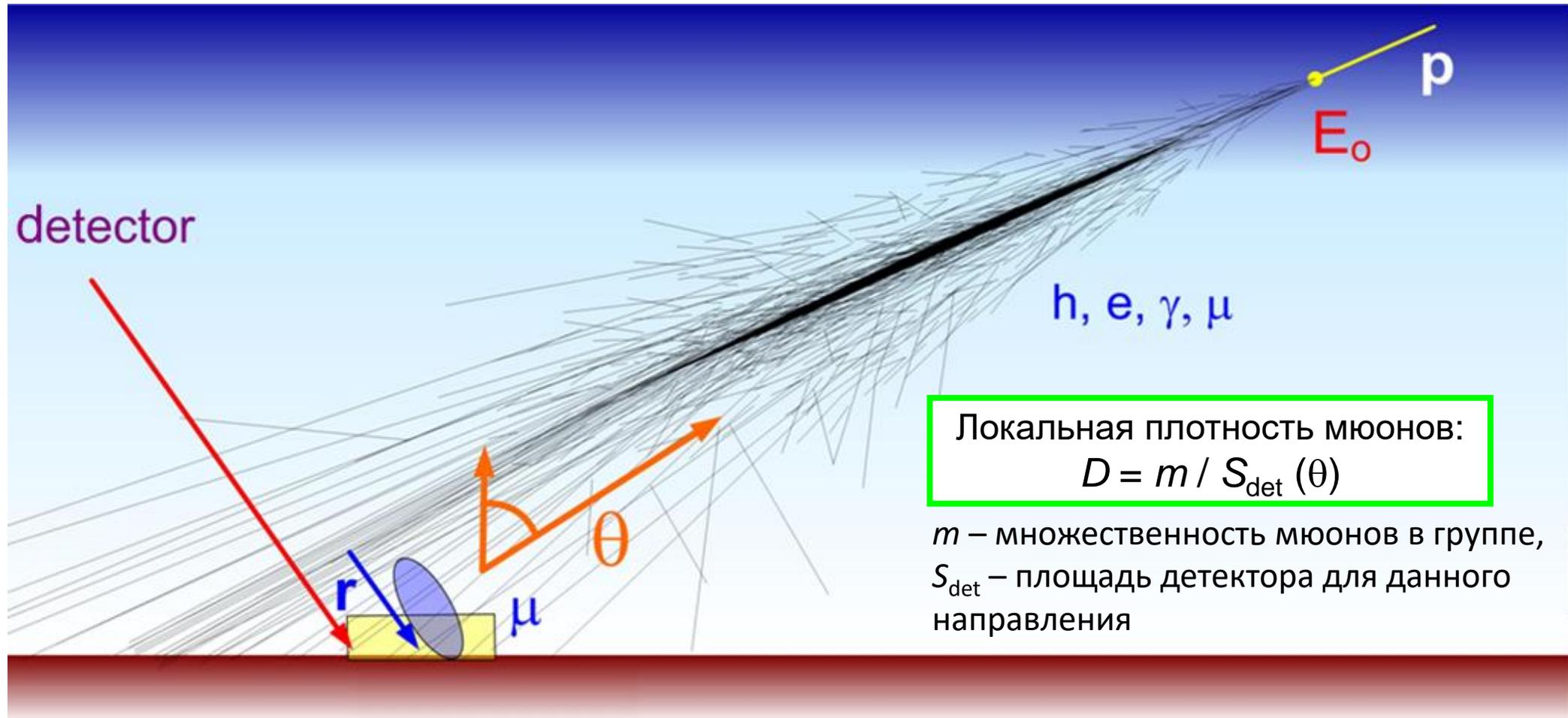


Доля частиц в параллельных группах

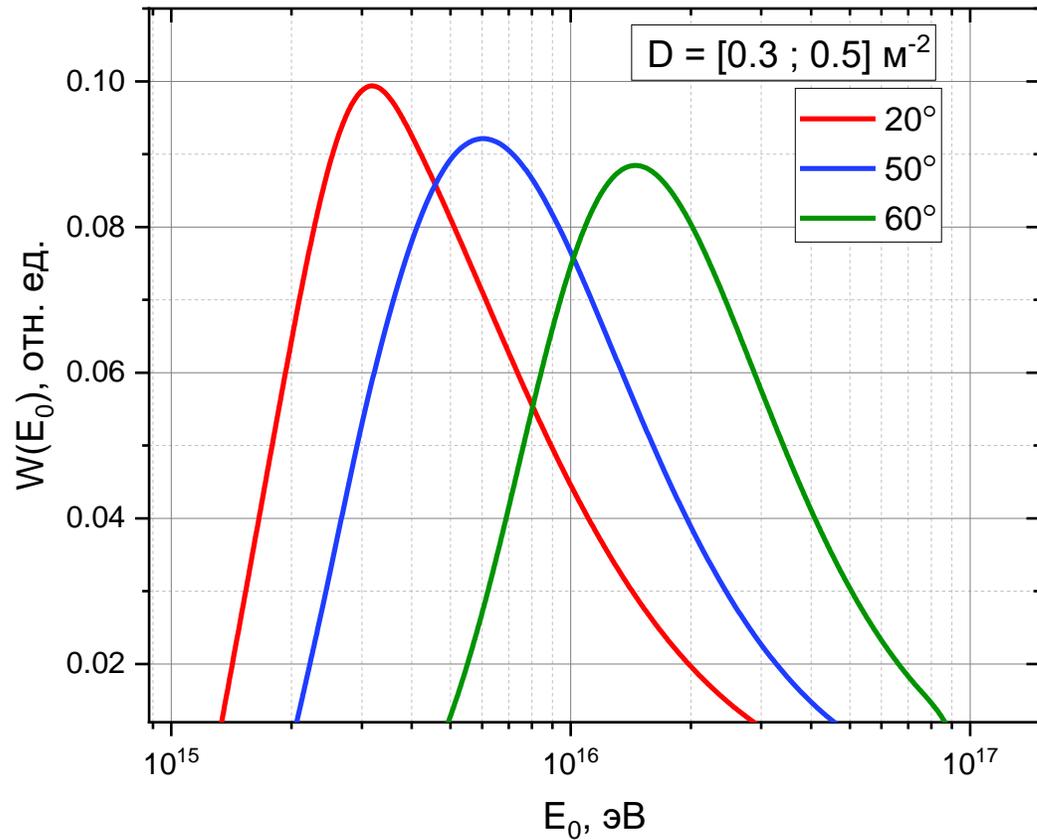
Спектр Локальной Плотности Мюонов (СЛПМ)

A.G. Bogdanov et al., *Physics of Atomic Nuclei*. 2010. V. 73. N 11. P. 1852

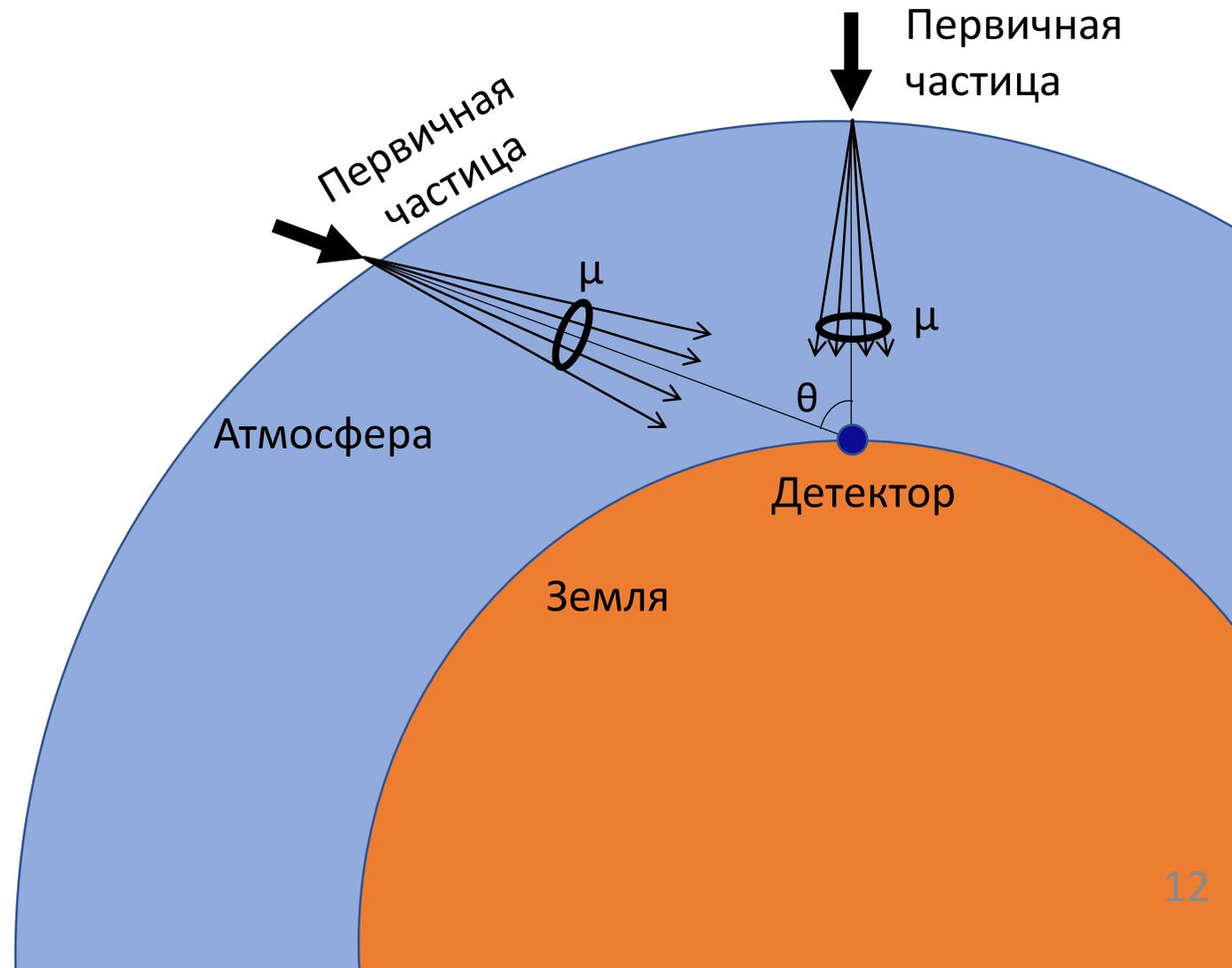
A.G. Bogdanov, ... I.Yu. Troshin, et al., *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2025. V. 89. I 6. PP. 873-878



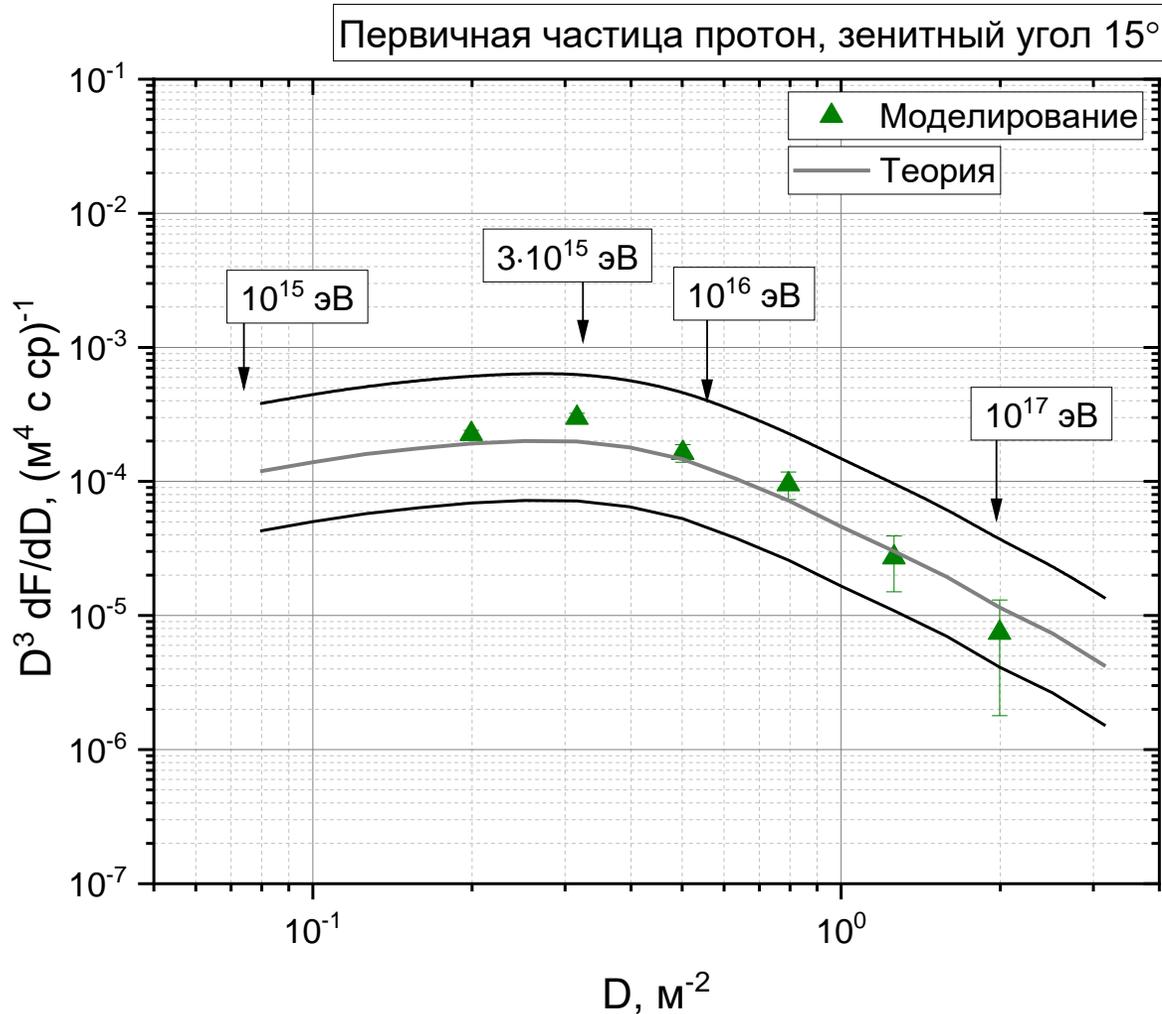
Распределение энергии первичных космических лучей



Распределение энергии первичных космических лучей, дающий вклад (W) в события с заданной локальной плотностью мюонов (D) при различных зенитных углах



Спектр локальной плотности мюонов



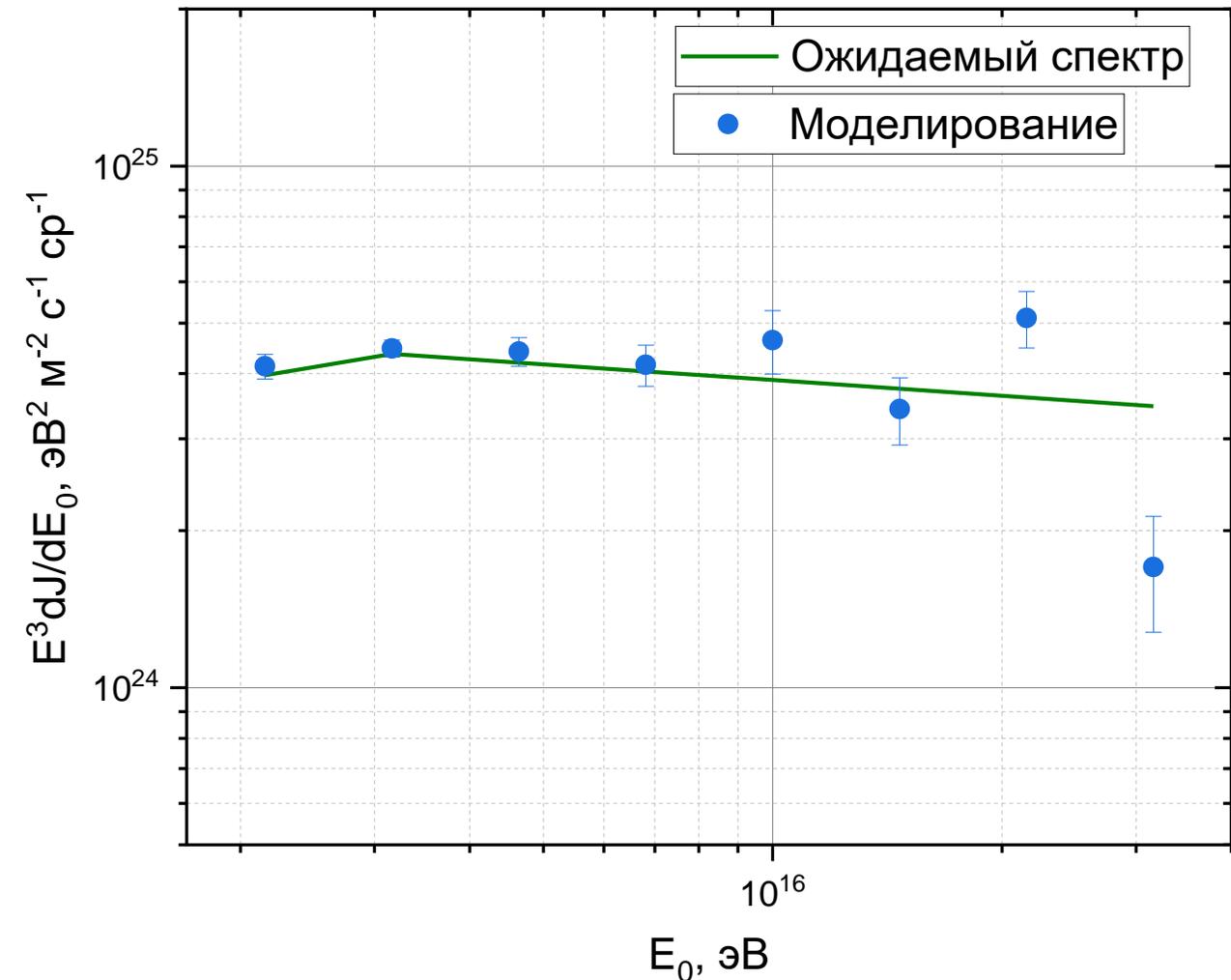
- ▲ Моделированные данные соответствуют отклику детектора МДМ, смоделированного в Geant4, где в качестве входных данных использовались события, сгенерированные в CORSIKA.

$$D^3 \frac{dN}{dD} = D^2 \cdot \frac{\sum W(\ln D, E_0)}{\Delta \ln D}$$

$W(\ln D, E_0)$ – вклад первичной частицы с энергией E_0 в события с фиксированной локальной плотностью $\ln D$.

Экспериментальные и расчетные дифференциальные спектры локальной плотности мюонов при зенитном угле 15°

Восстановление спектра первичных космических лучей методом СЛПМ



$$\left(\frac{d\bar{J}}{dE_0} \right) = \left(\frac{dJ}{dE_0} \right)_{\text{model}} \cdot \frac{(d\bar{F}/dD)_{\text{data}}}{(dF/dD)_{\text{sim}}}$$

$(dJ/dE_0)_{\text{model}}$ – предполагаемый энергетический спектр первичных частиц,

$(d\bar{F}/dD)_{\text{data}}$ – локальной плотности мюонов по результатам моделирования и реконструкции. В эксперименте эта величина определяется по экспериментальным данным.

$(dF/dD)_{\text{sim}}$ – ожидаемый спектр локальной плотности мюонов.

Заключение

- Создан и введён в эксплуатацию детектор МДМ в полной конфигурации, предназначенный для исследования мюонной компоненты широких атмосферных ливней.
- Детектор позволяет выделять мюонную компоненту ШАЛ от первичных космических лучей с энергией от 10^{15} до 10^{17} эВ.
- Согласно результатам моделирования, 98.5 % параллельных треков, регистрируемых детектором МДМ, составляют мюоны.
- Метод СЛПМ по результатам моделирования позволяет восстановить форму спектра первичных космических лучей в области «колена».
- Экспериментальные данные детектора позволят исследовать адронные взаимодействия при высоких энергиях и проверять используемые модели взаимодействий.

Спасибо за внимание

Докладчик: Трошин И.Ю.
E-mail: IYTroshin@mephi.ru

Расположение детекторов ЭК НЕВОД



Детекторы Экспериментального Комплекса НЕВОД:

ЧВД НЕВОД: водный черенковский калориметр объемом 2000 м³.

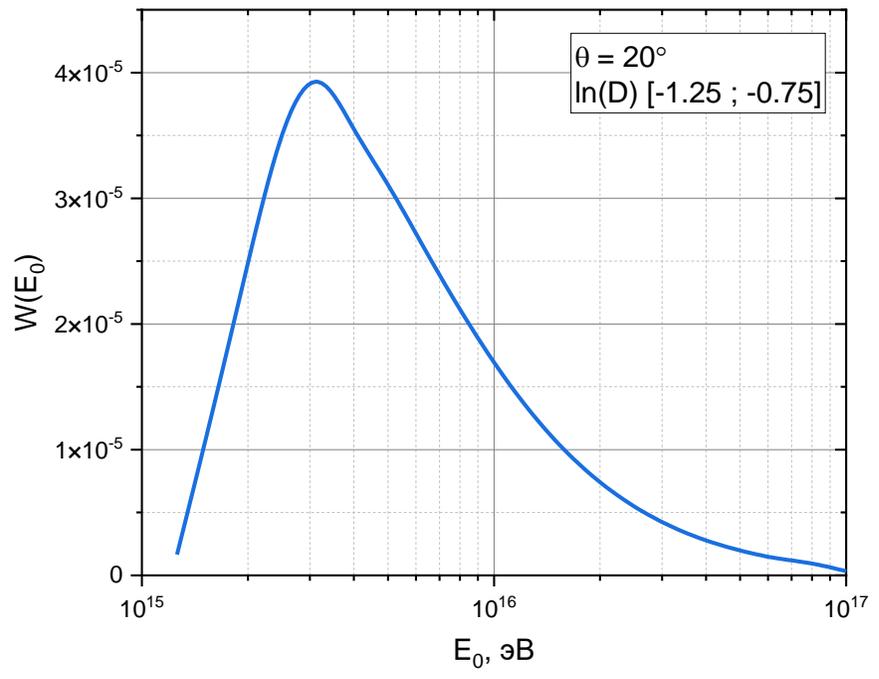
НЕВОД-ШАЛ: детектор для исследования электронно-фотонной компоненты ШАЛ.

УРАН: детектор для исследования нейтронной компоненты ШАЛ

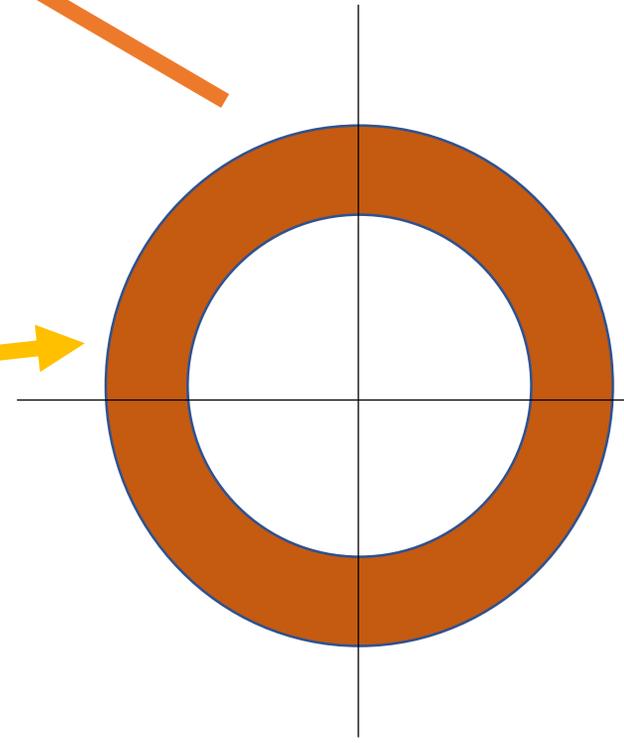
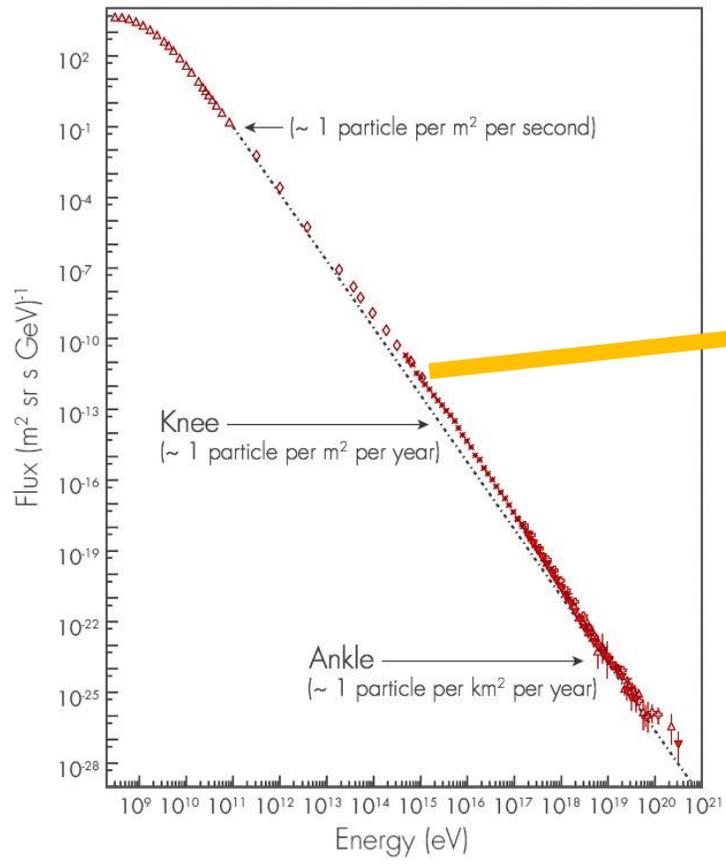
ТРЕК и **ДЕКОР:** детекторы для исследования околоразличительной мюонной компоненты ШАЛ

МДМ: детектор для исследования околоразличительной мюонной компоненты ШАЛ

$$W(E_0) \sim \frac{dN}{dE_0} \cdot \Delta S_{ring}$$



FLUXES OF COSMIC RAYS



EAS simulations were performed using CORSIKA v7.7410.

Hadronic interaction models:

- **QGSJET-II** – high-energy interactions (10^{15} – 10^{20} eV)
- **GHEISHA** – low-energy hadronic interactions (0.1–100 GeV)
- **EGS4** – electromagnetic processes (0.1 MeV–GeV range, EGSoN enabled)

Kinetic energy thresholds:

μ – 0.01 GeV

e^{\pm} – 0.001 GeV

γ – 0.05 GeV

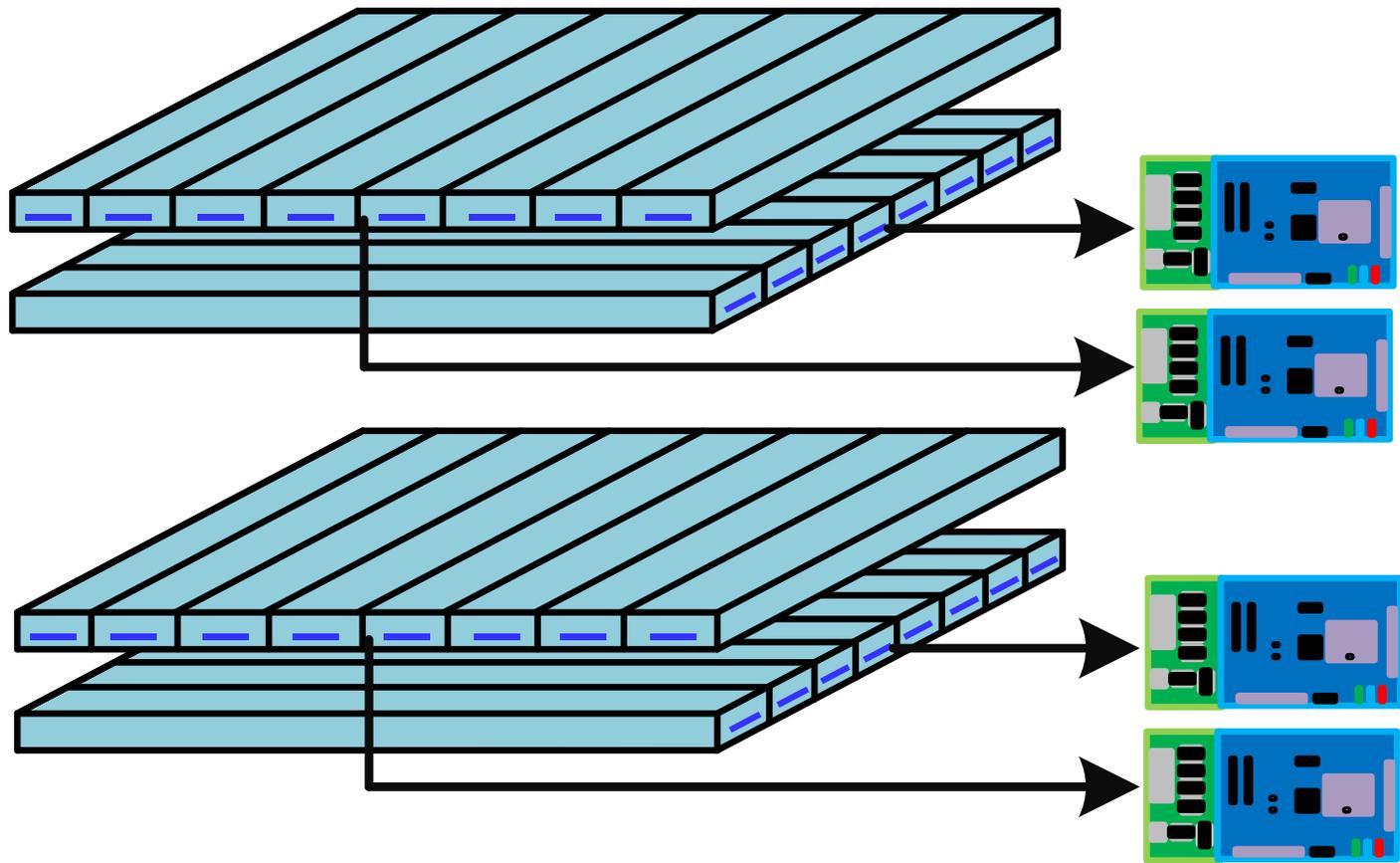
hadrons – 0.05 GeV

Earth curvature: **ON**

Cherenkov option: **OFF**

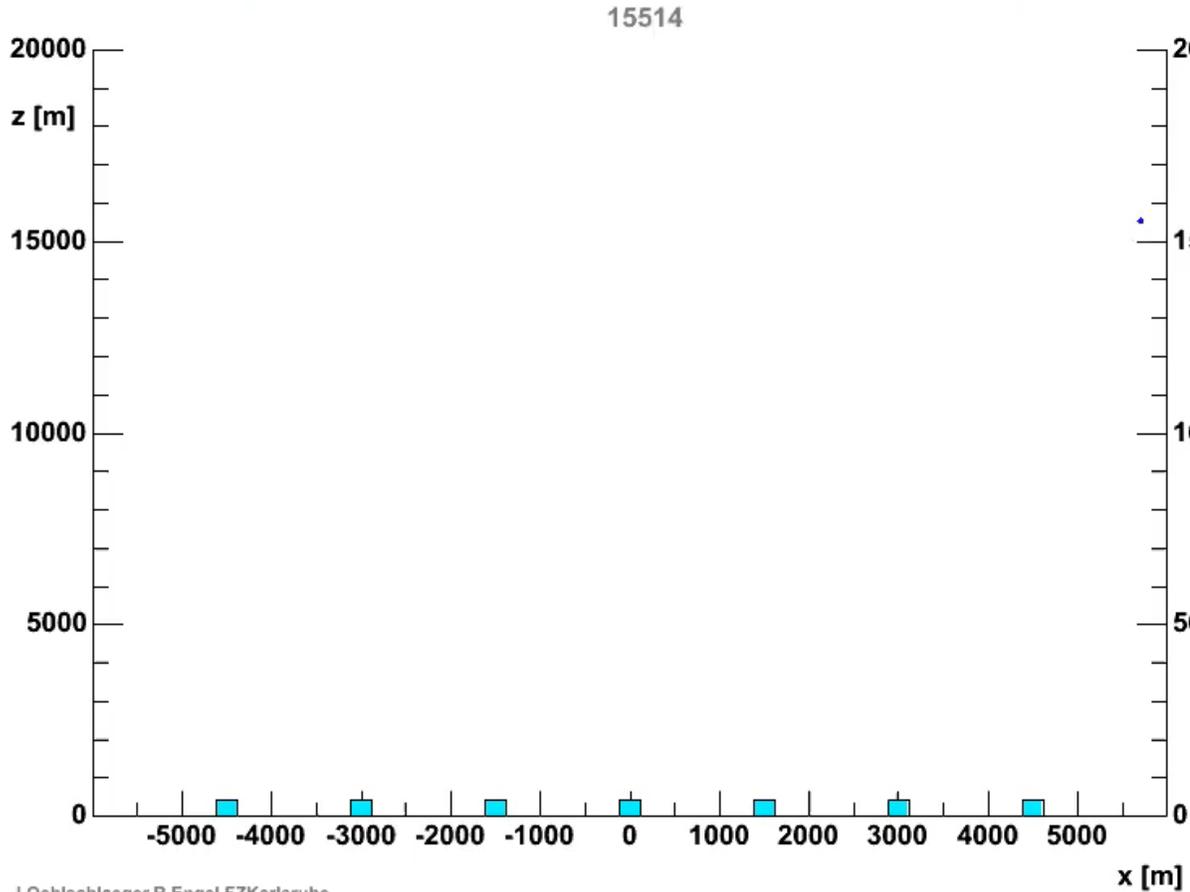
Плоскости дрейфовых камер

Преобразователи LVDS-TTL и ECL-TTL



Широкие Атмосферные Ливни (ШАЛ)

hadrons muons electrs neutrs



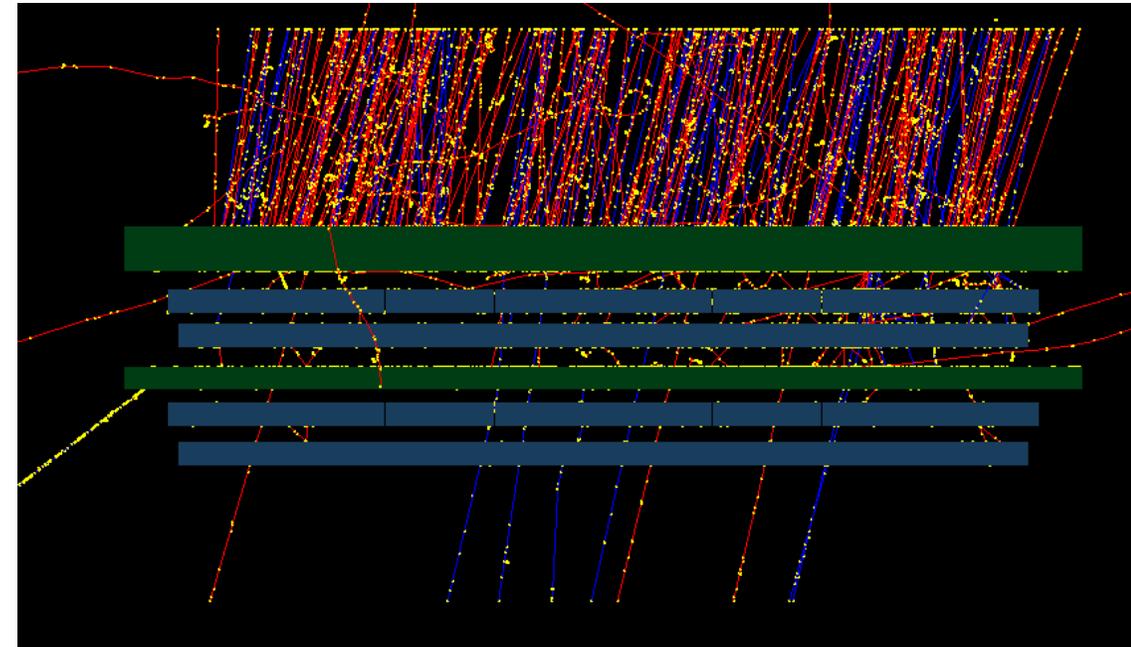
J.Oehlschlaeger,R.Engel,FZKarlsruhe

Смоделированный ШАЛ от первичного протона с энергий 10^{15} эВ в программе CORSIKA.

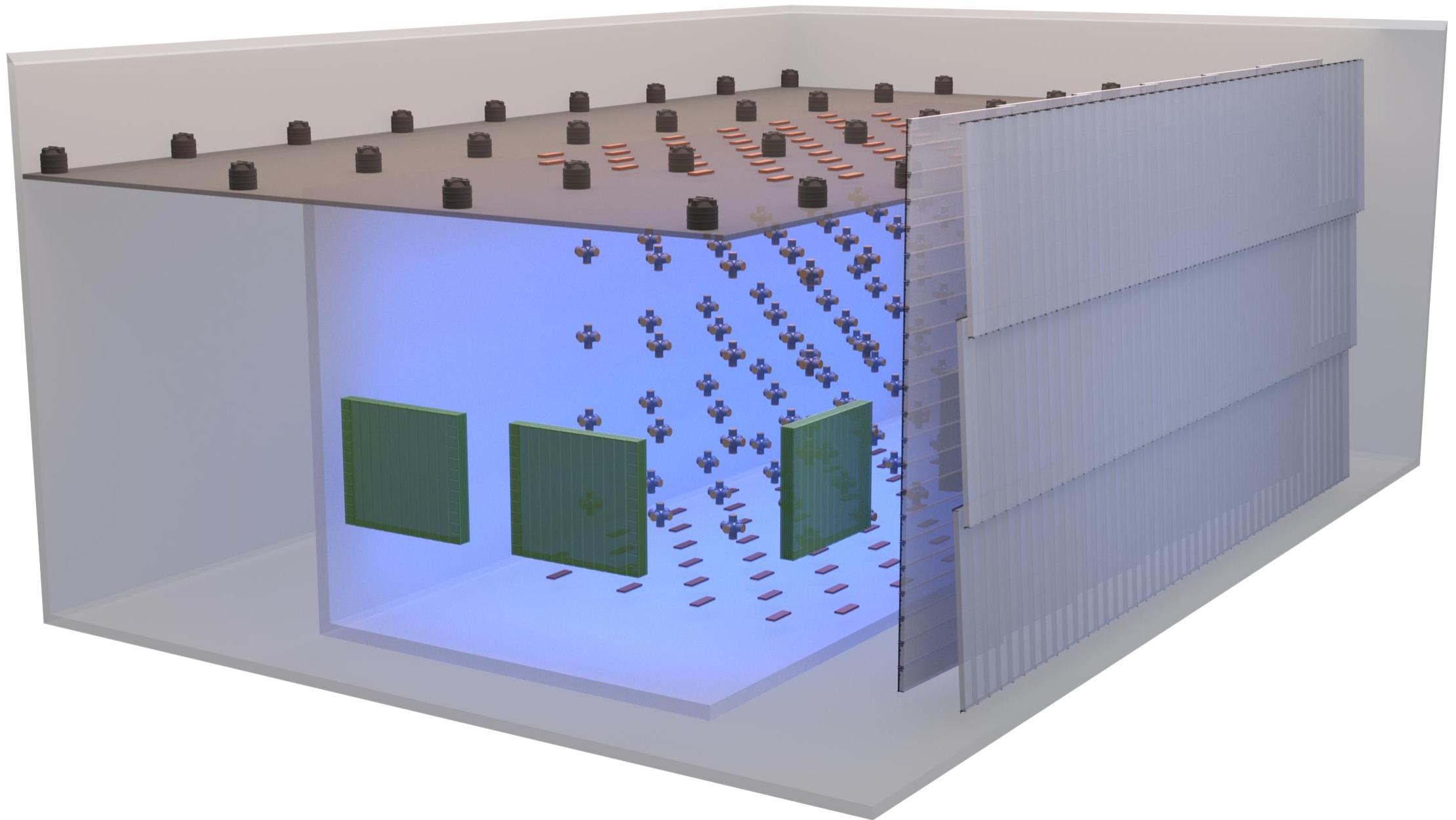
Моделирование ШАЛ при помощи: **CORSIKA v7.7410.**

Модели адронного взаимодействия: **QGSJET-II, GHEISHA, EGS4**

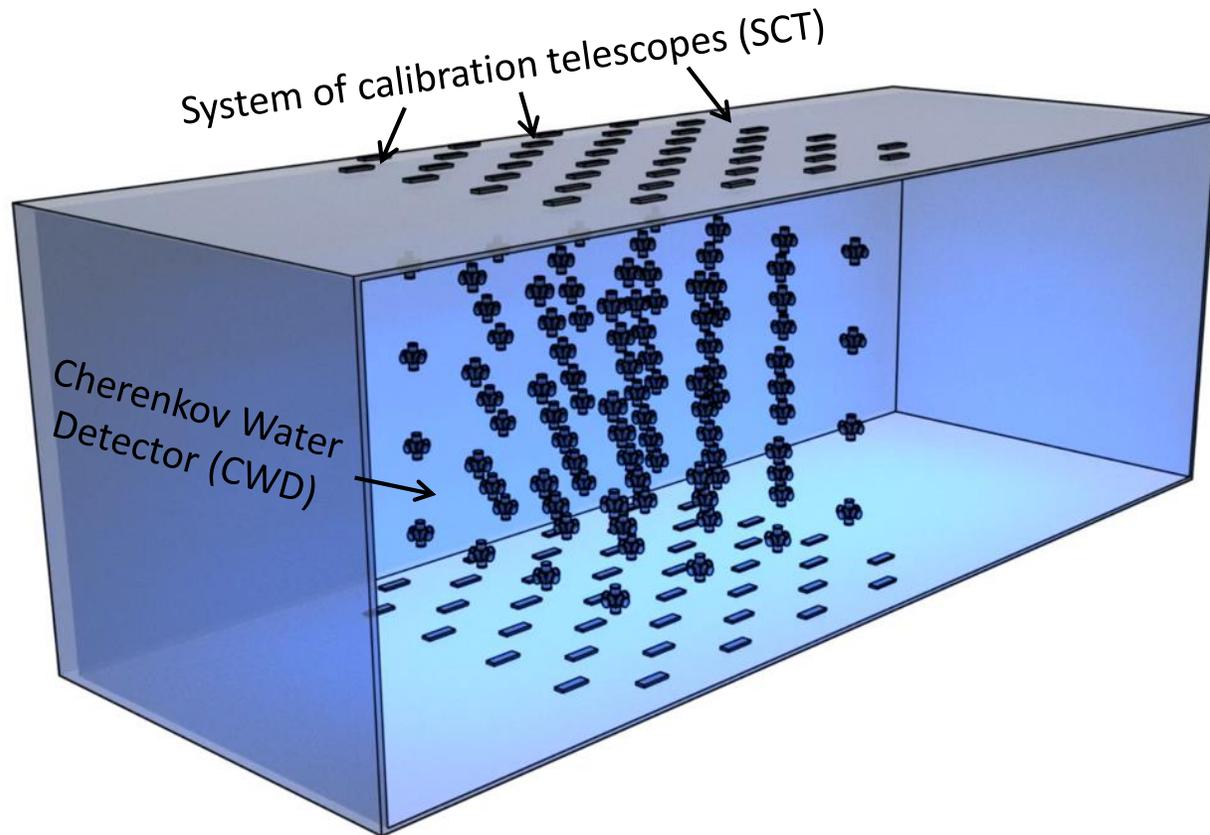
Отклик детектора смоделирован с использованием **Geant4 v11.1.2. и FTFP_BERT**



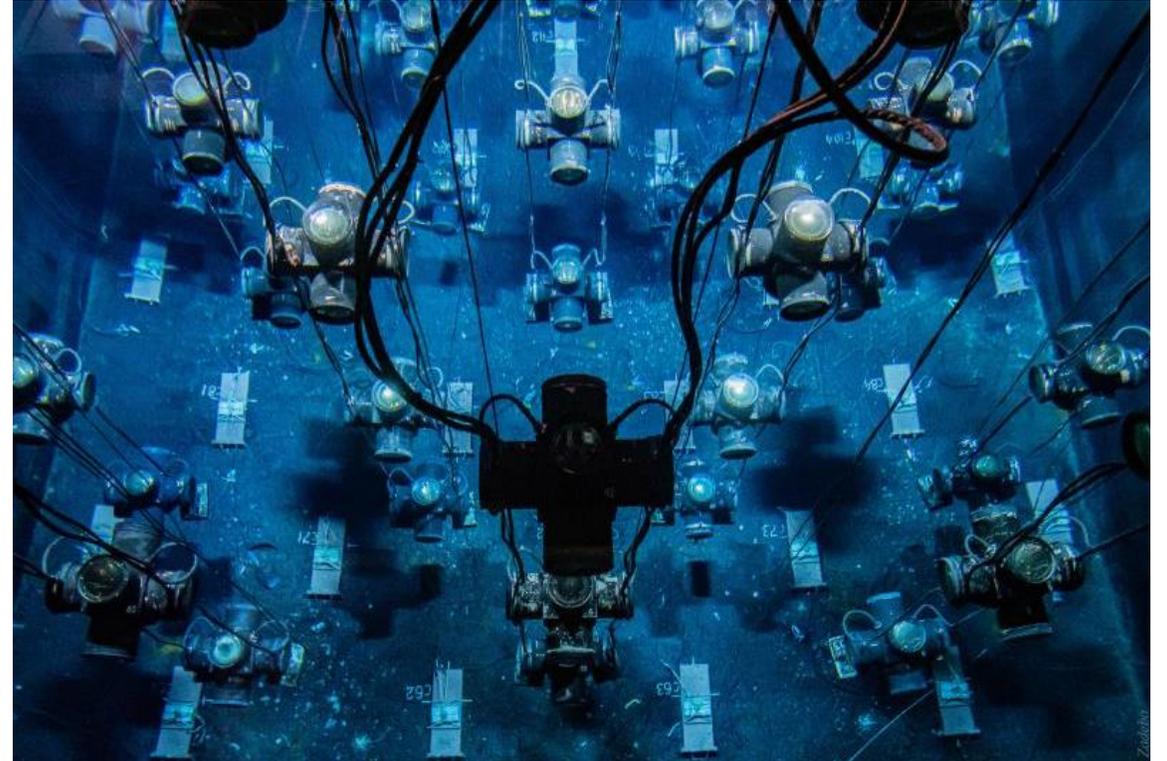
Моделирование прохождения частиц ШАЛ через детектор МДМ в программном пакете Geant4.



Cherenkov Water Detector (CWD) NEVOD



The model of the Cherenkov water detector:
volume 2000 m³, dimensions 9x9x26 m³, QSM 241

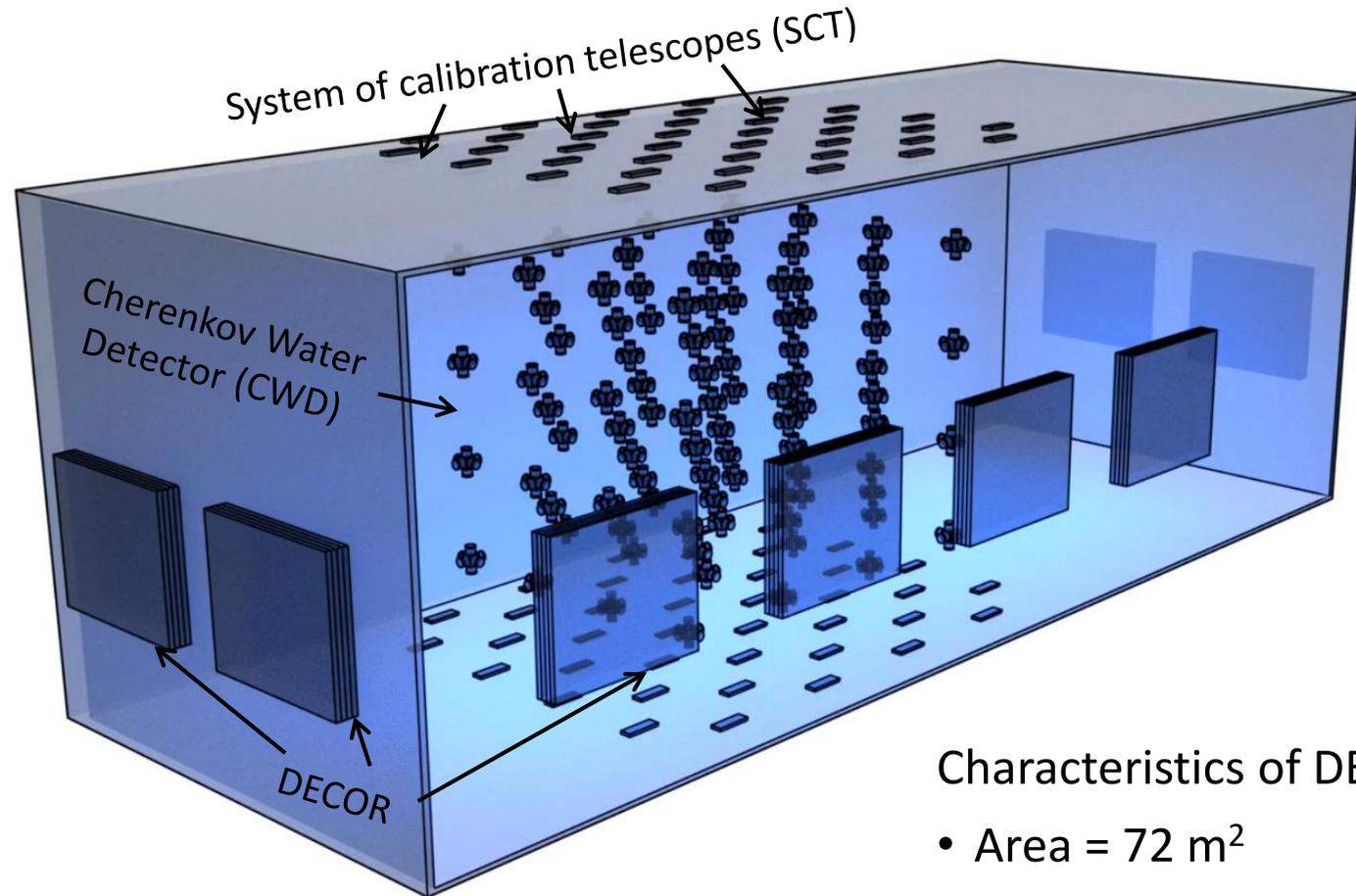


The photo of the Cherenkov detector

Coordinate detector DECOR



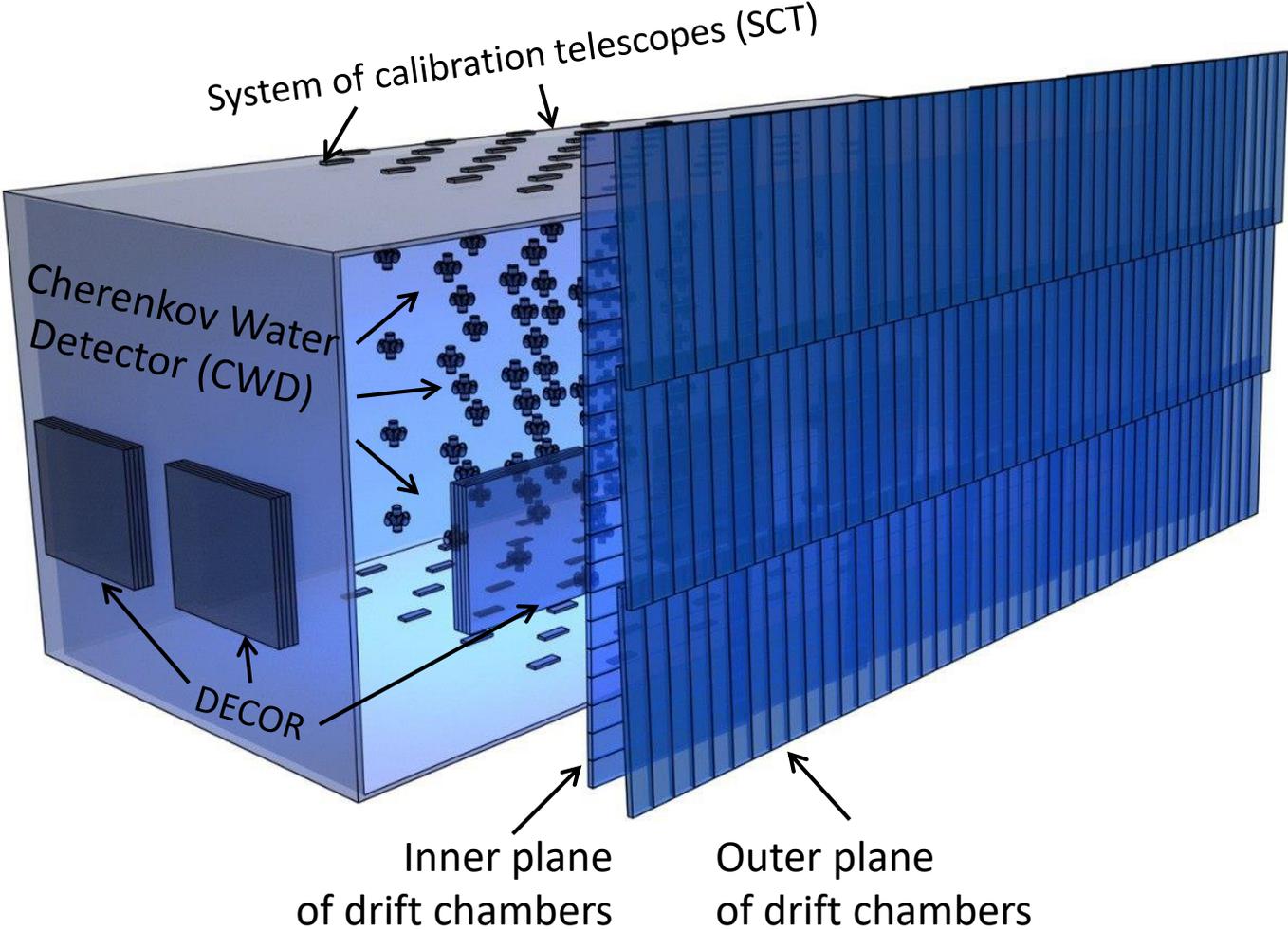
The photo of the detector DECOR



Characteristics of DECOR:

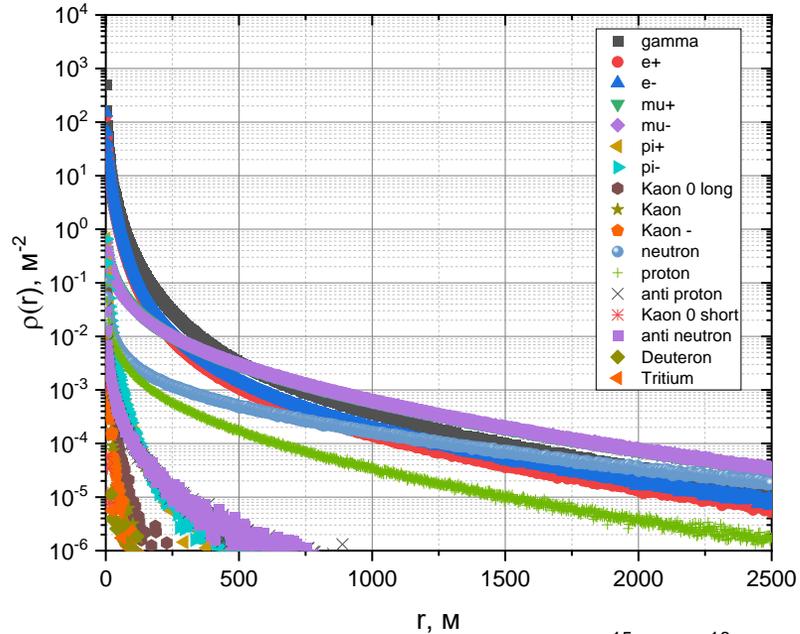
- Area = 72 m²
- Spatial accuracy ~ 1 cm
- Angular accuracy ~ 1°
- Two-track resolution ~ 3 cm

Detector TREK

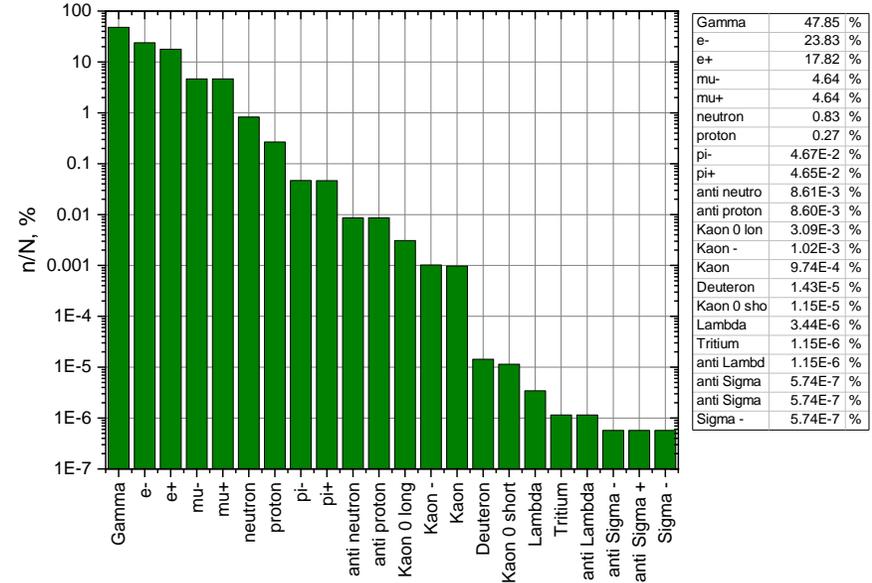


TREK consists of 264 drift chambers.
The area of one chamber is 1.85 m².
Detector TREK area is 250 m².

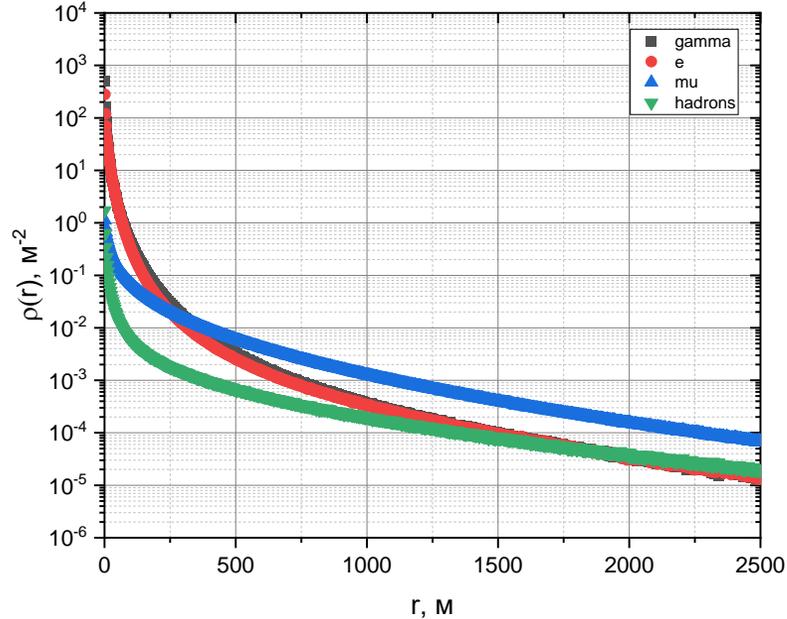
Первичная частица протон с энергией от 10^{15} до 10^{16}
Run_slope3.1_3e15-e16_theta0-90_proton_10000sh_lth_EGson



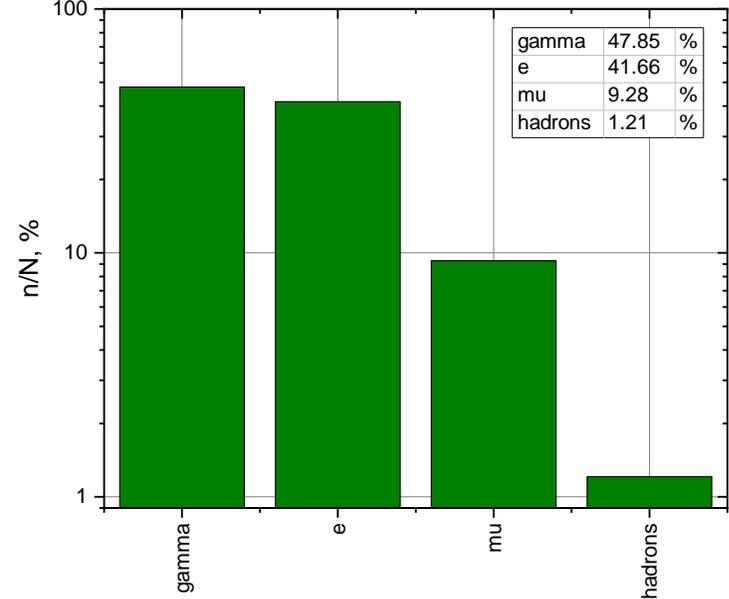
Первичная частица протон с энергией от 10^{15} до 10^{16}
Run_slope3.1_3e15-e16_theta0-90_proton_10000sh_lth_EGson



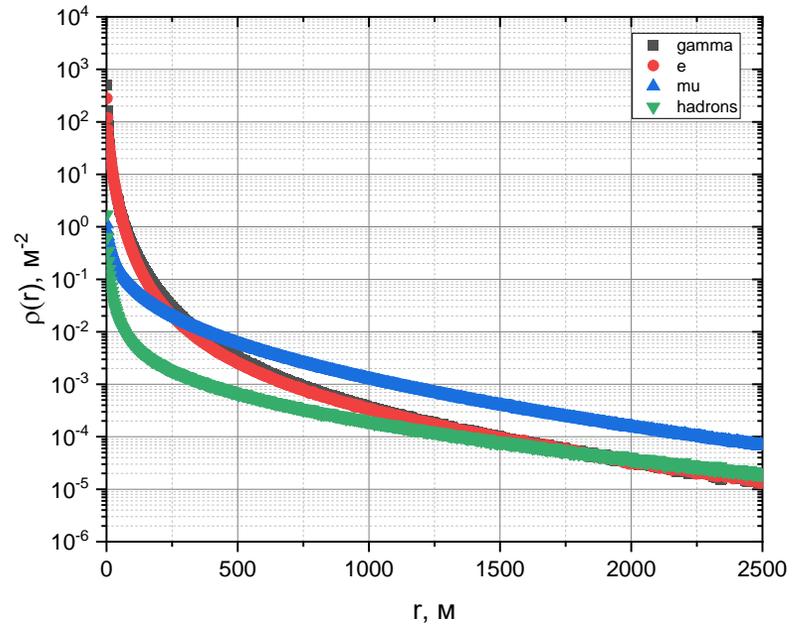
Первичная частица протон с энергией от 10^{15} до 10^{16}
Run_slope3.1_3e15-e16_theta0-90_proton_10000sh_lth_EGson



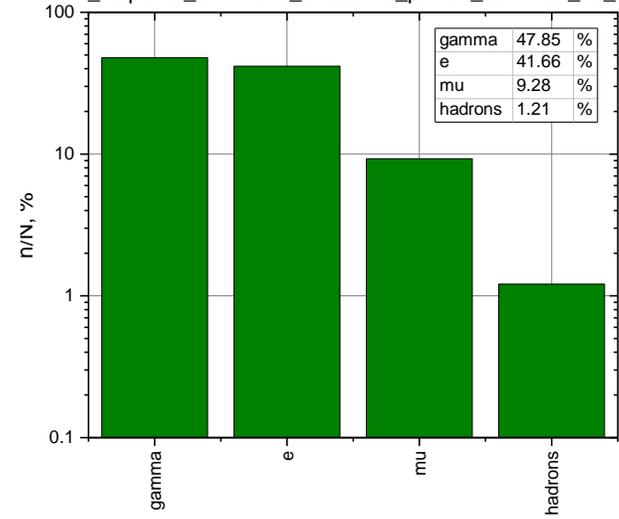
Первичная частица протон с энергией от 10^{15} до 10^{16}
Run_slope3.1_3e15-e16_theta0-90_proton_10000sh_lth_EGson



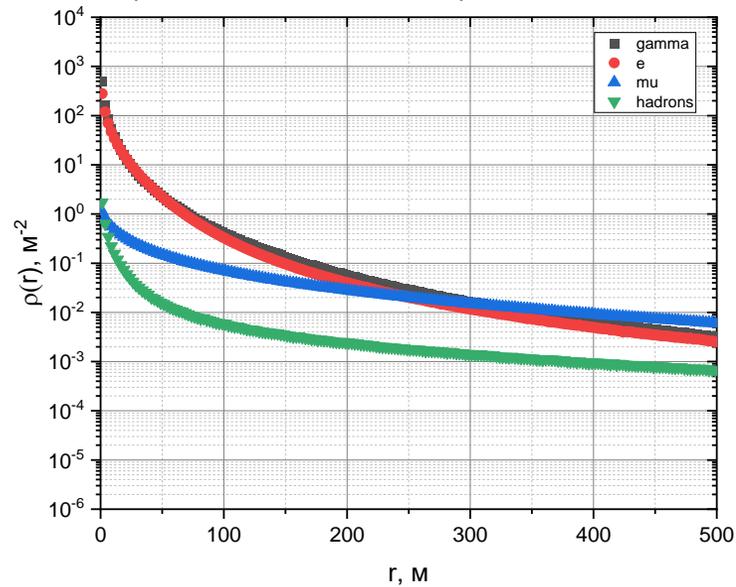
Первичная частица протон с энергией от 10^{15} до 10^{16}
 Run_slope3.1_3e15-e16_theta0-90_proton_10000sh_lth_EGson



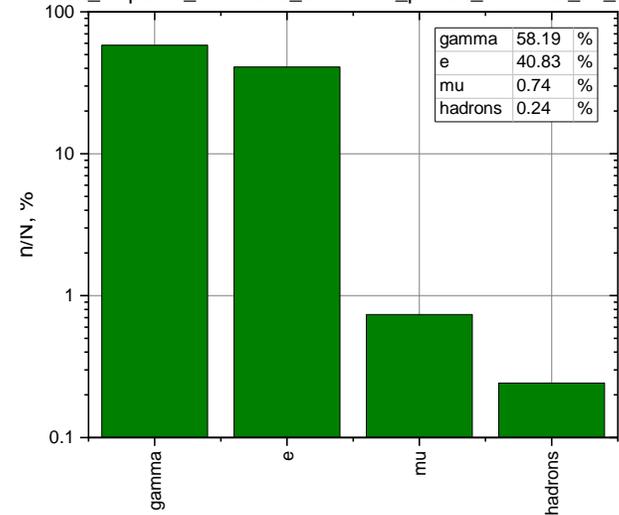
Первичная частица протон с энергией от 10^{15} до 10^{16}
 Run_slope3.1_3e15-e16_theta0-90_proton_10000sh_lth_EGson



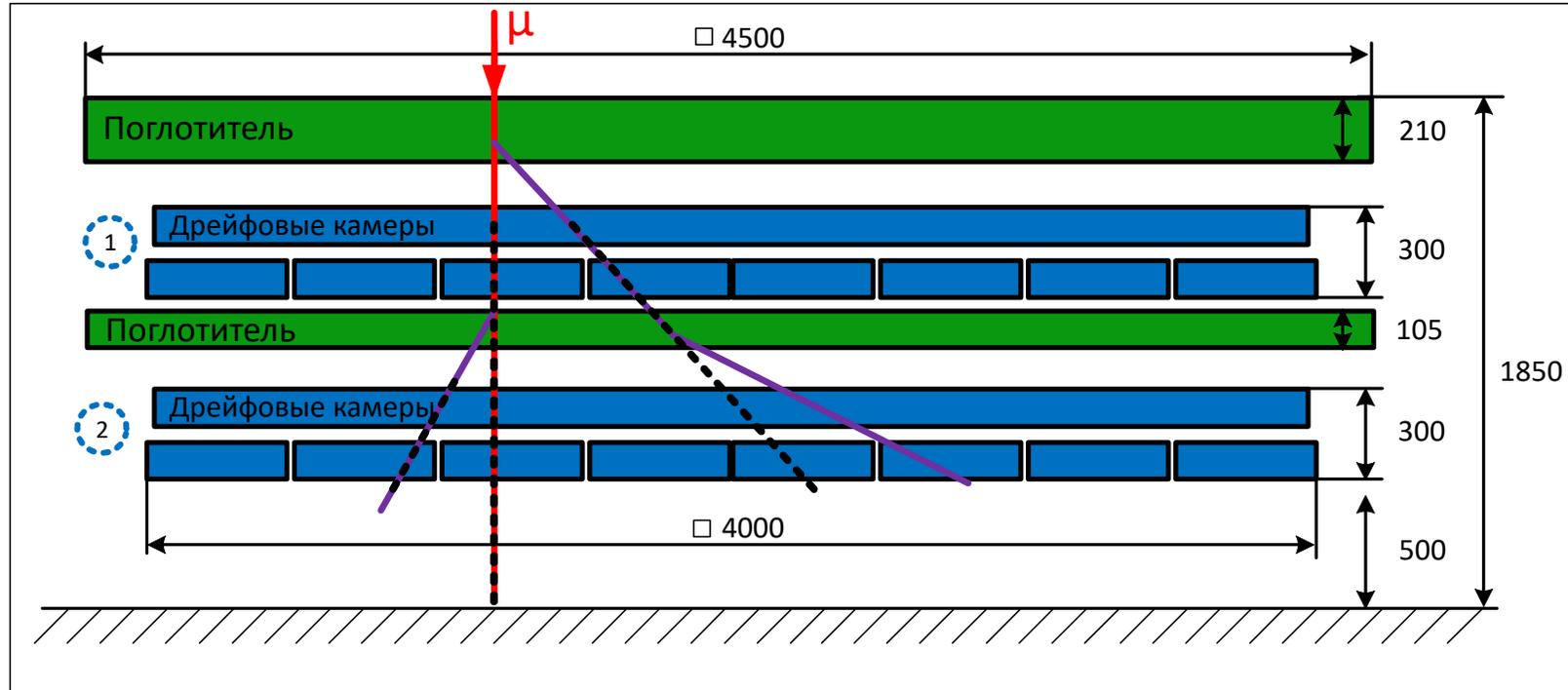
Первичная частица протон с энергией от 10^{15} до 10^{16}
 Run_slope3.1_3e15-e16_theta0-90_proton_10000sh_lth_EGson



Первичная частица протон с энергией от 10^{15} до 10^{16}
 Run_slope3.1_3e15-e16_theta0-90_proton_10000sh_lth_EGson



Реконструкция и анализ

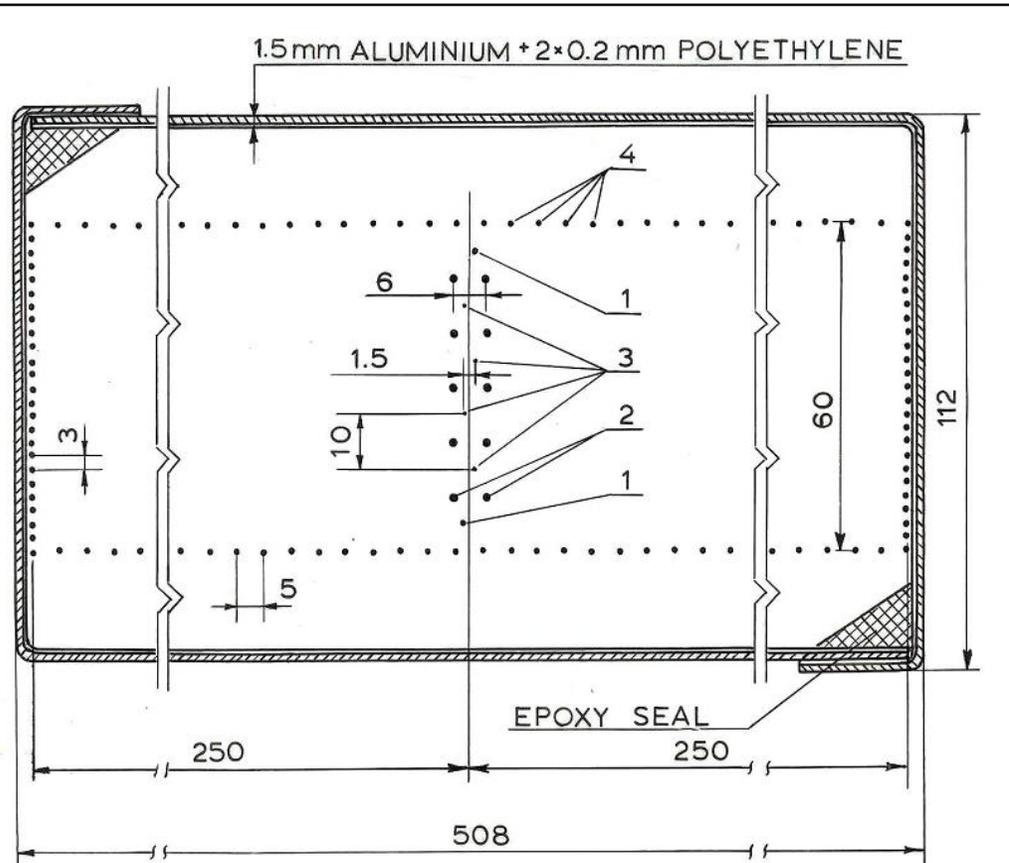


Критерии отбора:

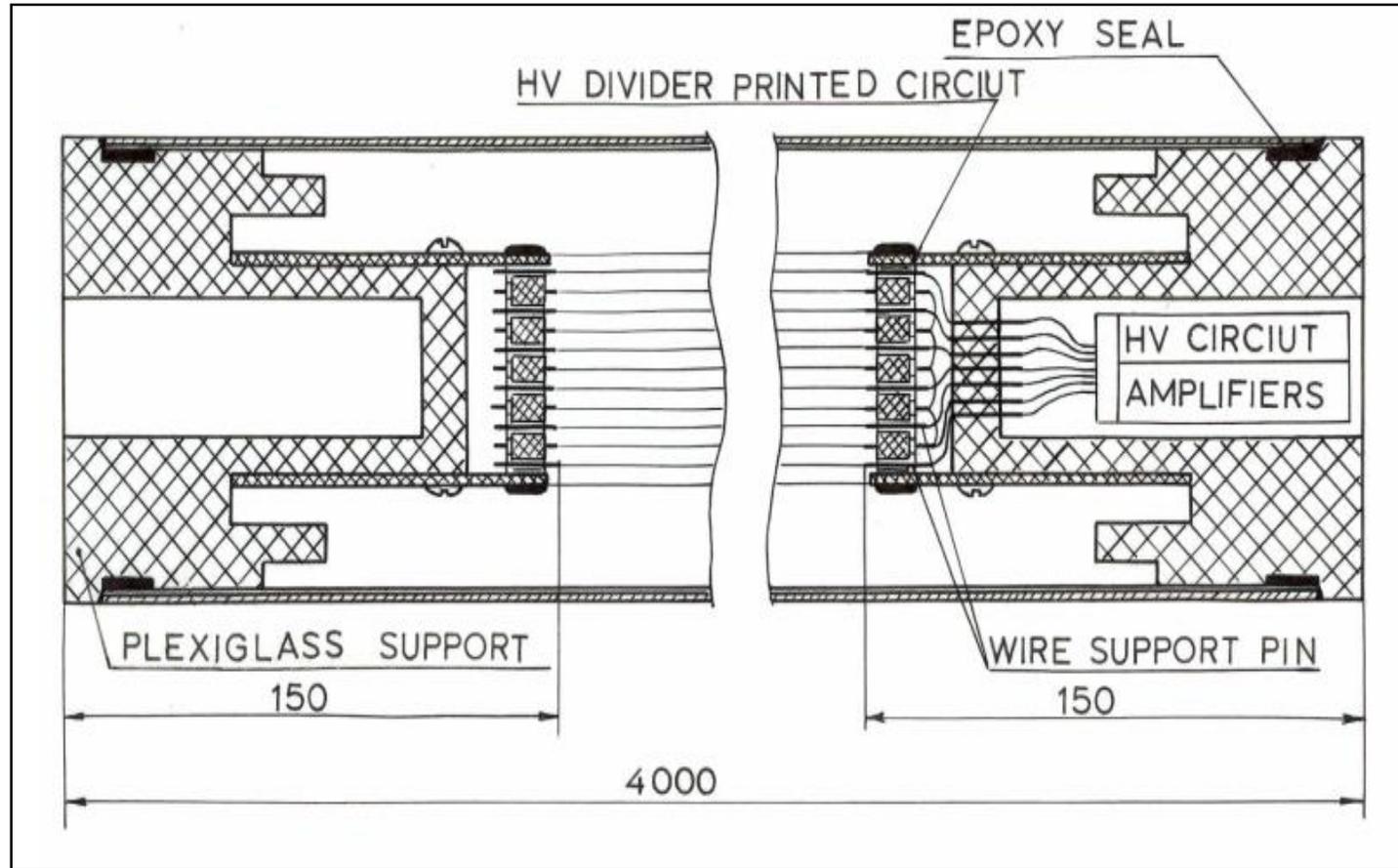
- Частица прошла через все плоскости
- Разница по зенитному углу не **более 5°**
- Разница координате не **более 5 мм**
- Между треками **больше 3 мм**
- В событии не более **200 частиц**

Реконструкция события, красный трек – мюон,
фиолетовый трек – не мюон.

Дрейфовая камера ИФВЭ



Поперечное сечение дрейфовой камеры



Продольное сечение дрейфовой камеры