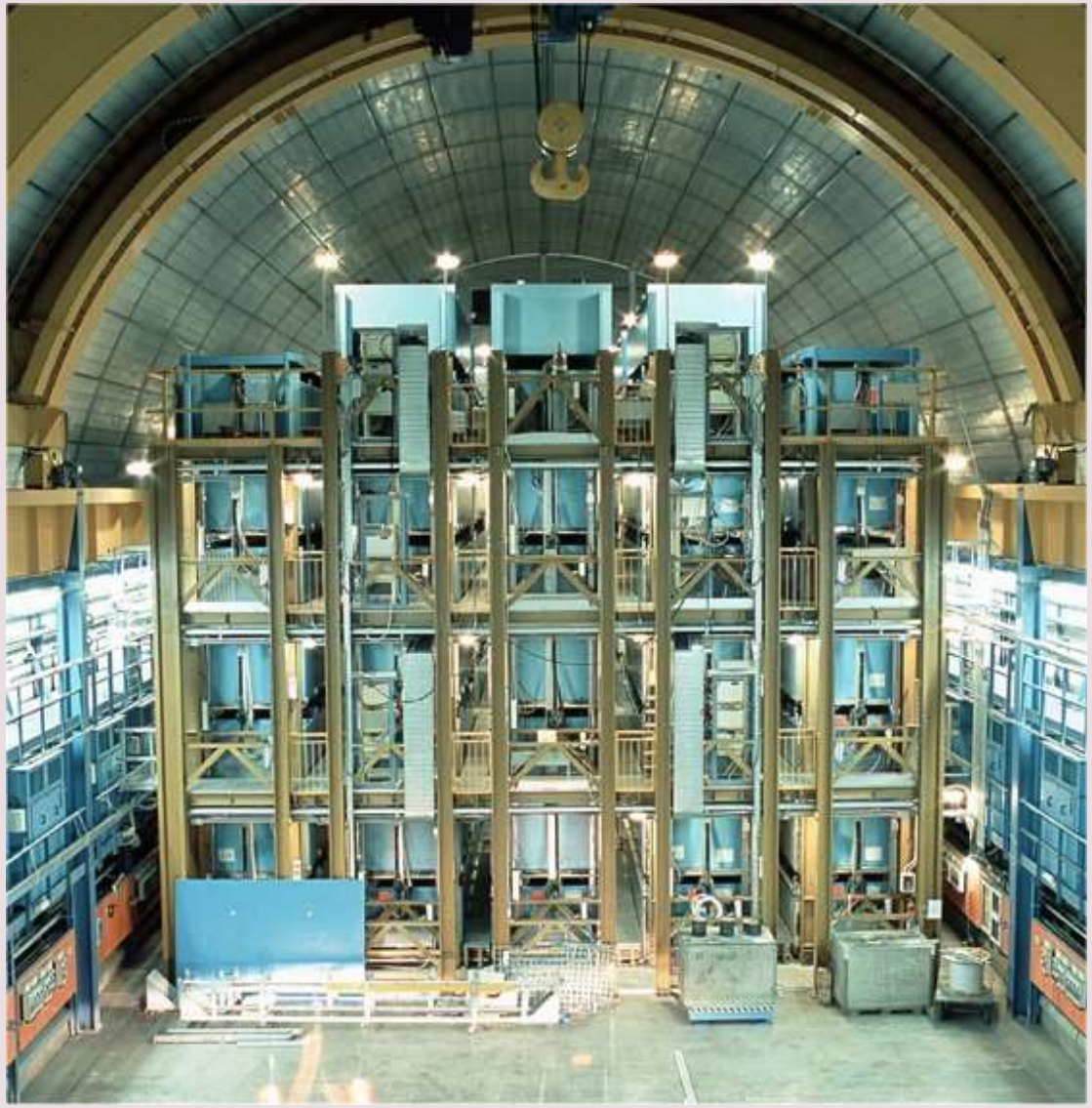
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Транспорт мюонов сквозь грунт для эксперимента LVD

Маннанова К. И., Агафонова Н. Ю., Богданов А. Г.

Дубна – июль 2026

Large Volume Detector (LVD)



Расположение: Национальная подземная лаборатория Gran Sasso (LNGS)

Глубина: около 3600 м в.э.

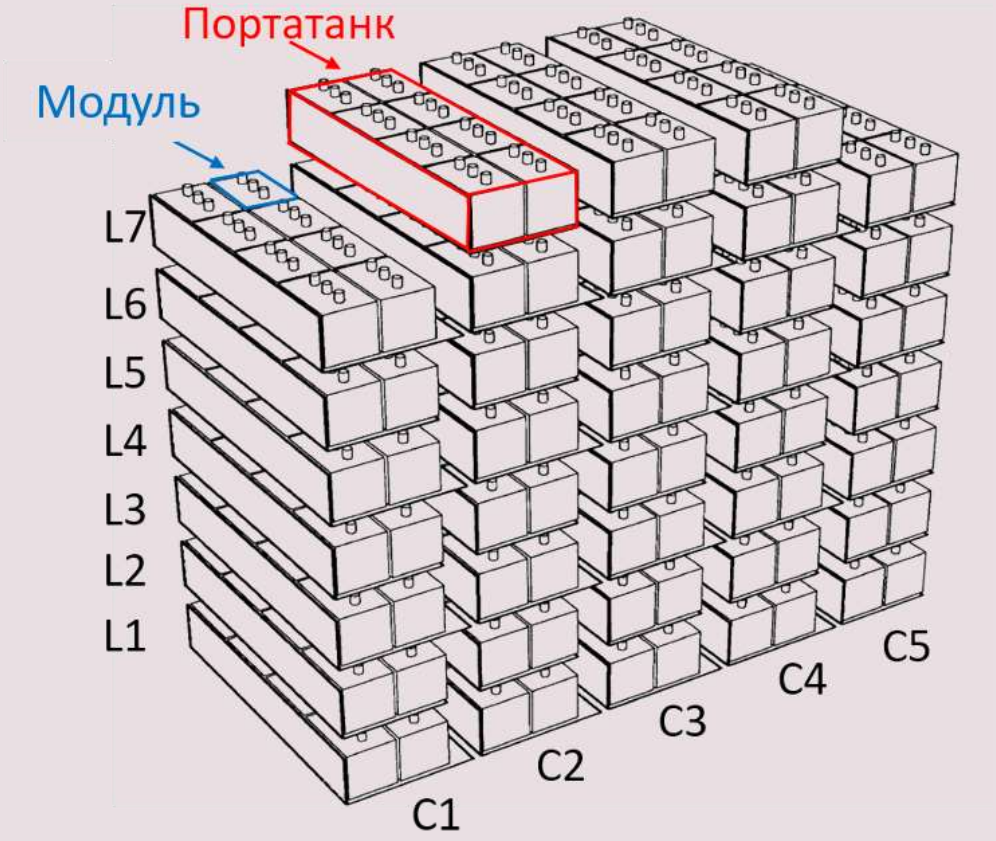
Высота: 960 м над уровнем моря

Основная задача: поиск нейтрино от взрывов сверхновых

Период работы: с 1992 по настоящее время

Размер: 3 башни, 13.4 × 10.2 × 6.3 м^3

Сцинтилляционные модули



- 840 модулей, заполненных жидким сцинтиллятором (по 8 шт. в портатанке)
- Корпус: 1 × 1.5 × 1 м^3 ,нержавеющая сталь
- 3 ФЭУ-49Б или ФЭУ-125

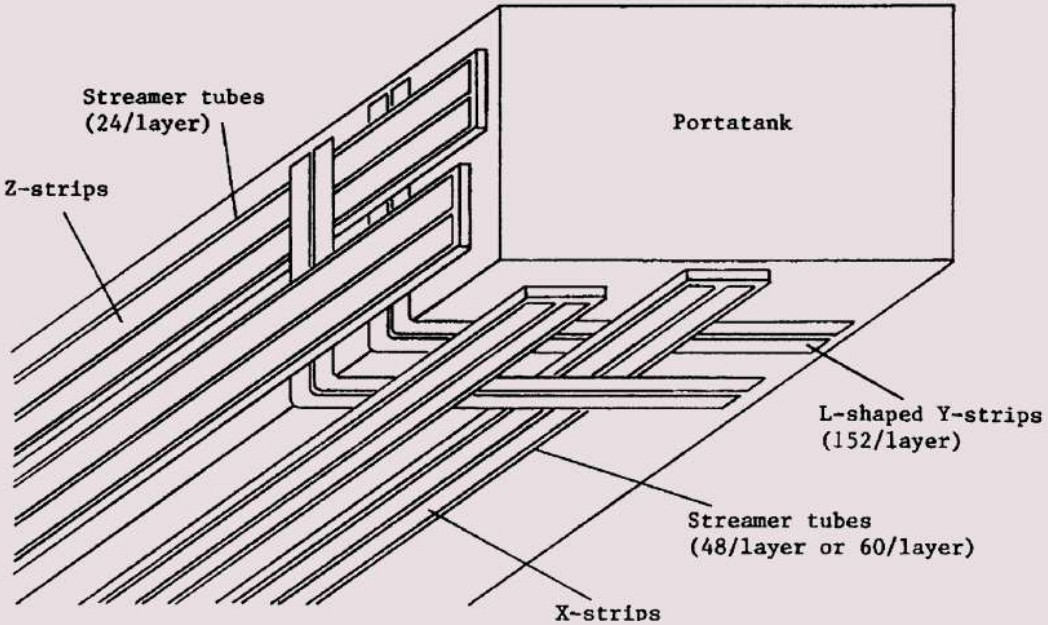
<u>Жидкий сцинтиллятор</u>:

- Основание – Уайт спирит (C_nH_{2n}, $\bar{n}$ = 9.6)
- Шифтер – POPOP (0.03 г/л)
- Активатор – PPO (1 г/л)
- ρ = 0.778 ± 0.02 г/см^2
- Удельный световыход: 6.25 фот. / кэВ
- Средняя прозрачность: 20 м

Трековая система

Стримерные камеры:

- 8 ячеек сечения 1 см^2, толщина стенок 1 мм
- Длина - 6.3 м
- Газ: 88% CO_2, 10% изобутан, 2% Ar
- Два слоя, сдвинутые на 0.5 см



Считывающие стрипы:

- Ширина: 3.9 см (4/8 ячейки)
- Длина: 6.3 м
- Два слоя, сдвинутые на 1.5 (X, Z) или 0.5 (Y) ячейки

Угловая точность: 0.5˚

Моделирование

CORSIKA 7.7550

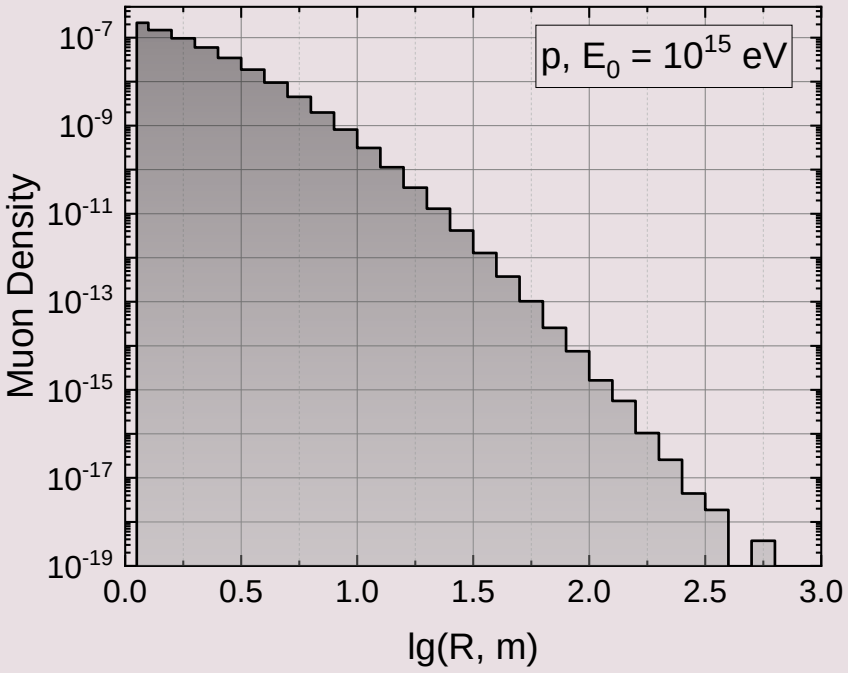
Модель адронных взаимодействий: QGSJET-II-04

Тип, энергия первичной частицы: p, $E_{prim} = 10^{14}, 10^{15}, \ldots 10^{20}$ эВ

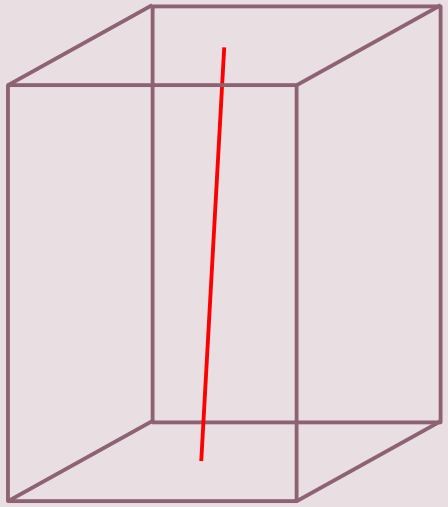
Зенитный угол: 0˚

Уровень наблюдения: 3 км над уровнем моря

Энергетические пороги: 1 ТэВ для всех частиц



Функция пространственного распределения мюонов



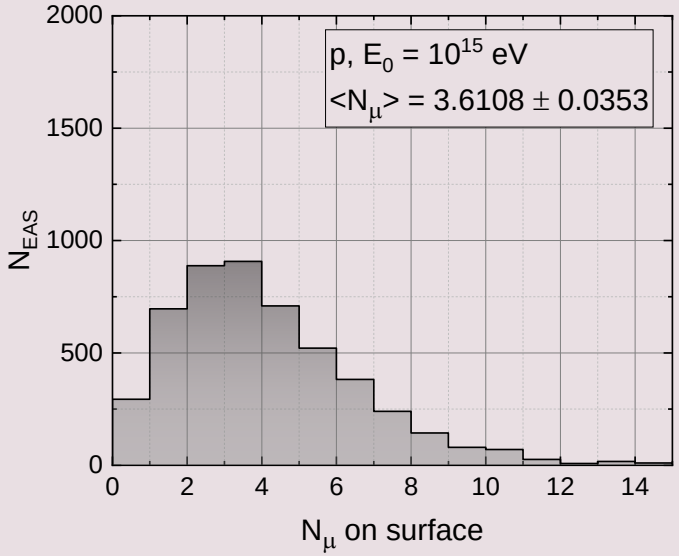
Geant4

Физическая библиотека: QGSP_BERT

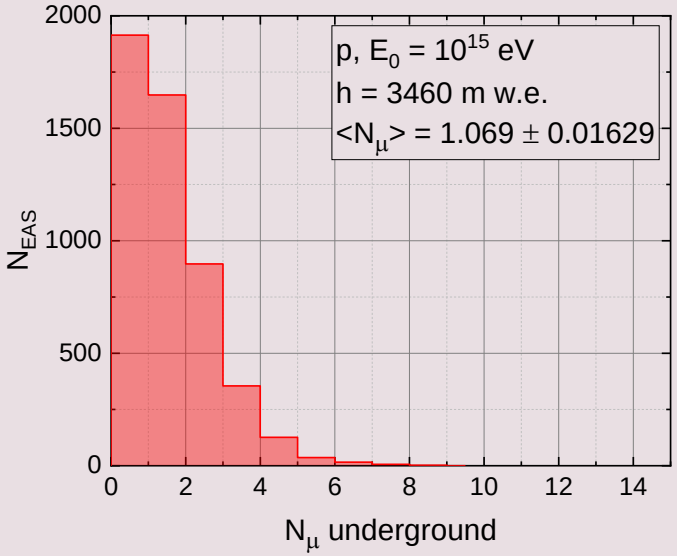
Геометрия: параллелепипед 100 × 100 × 1316 м

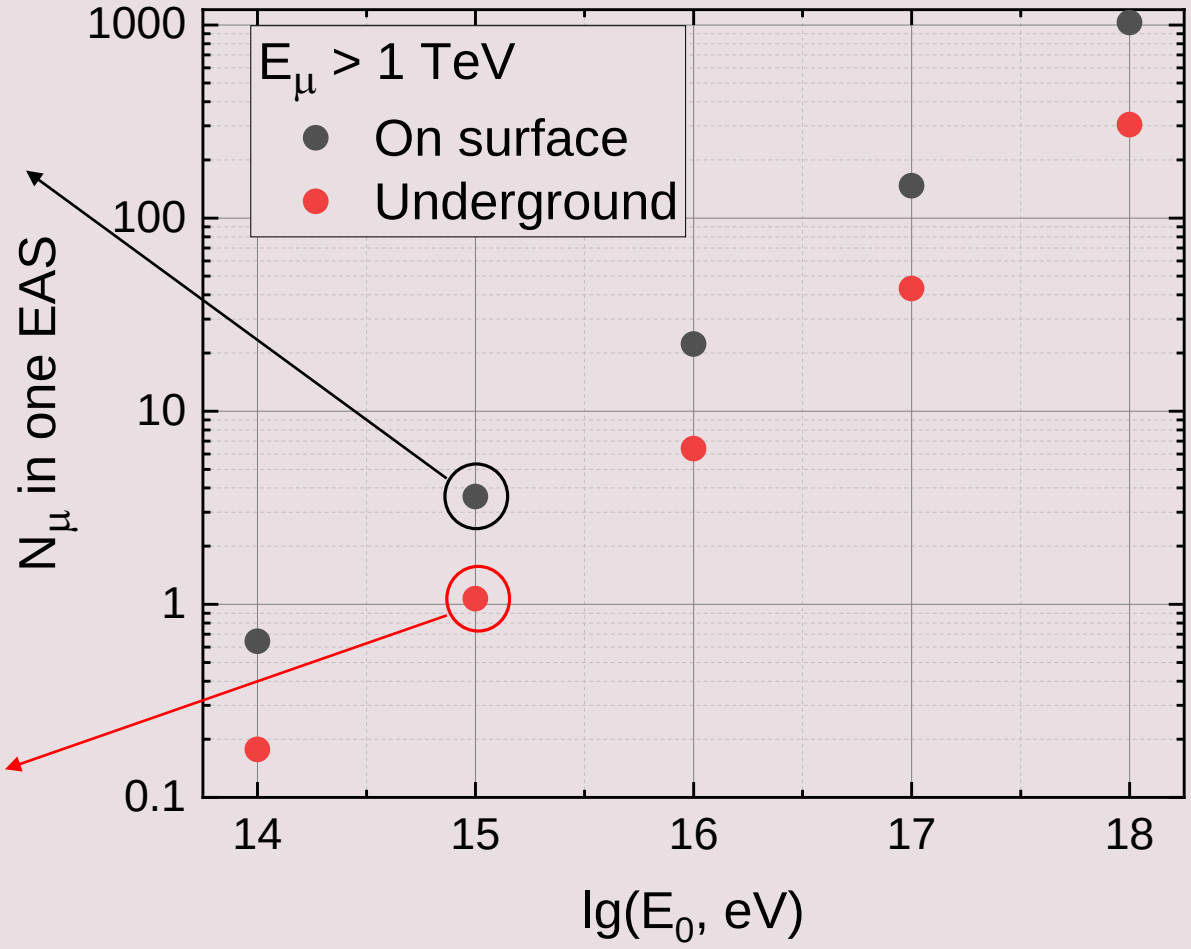
Влияние грунта на число мюонов в ШАЛ

Распределение числа ШАЛ по числу мюонов на поверхности



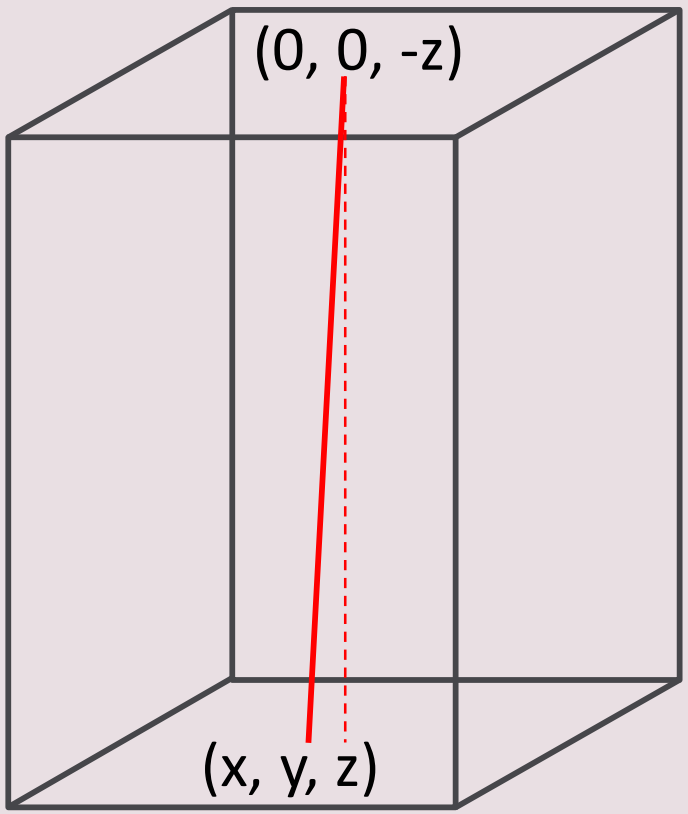
Распределение числа ШАЛ по числу мюонов на уровне LVD



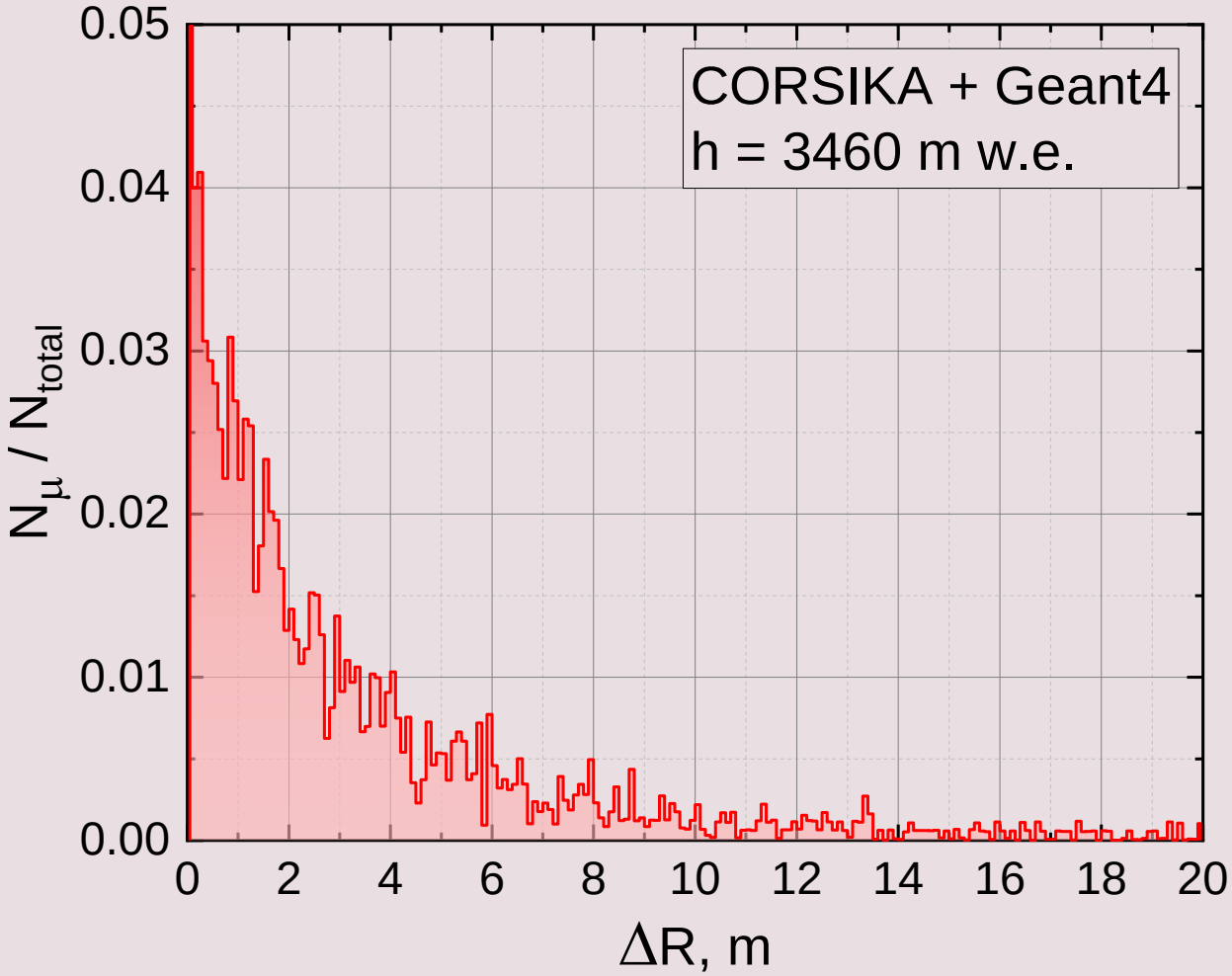


Зависимость среднего числа мюонов в ШАЛ от логарифма энергии первичной частицы

Влияние грунта на разлет мюонов



$R^2 = x^2 + y^2$



Распределение доли мюонов на уровне LVD по их отклонению от первоначальной траектории

Аналитический энергетический спектр мюонов под землей

Спектр мюонов на поверхности

$$\mathrm{N}(E_\mu, 0) = A{E_\mu}^{-\gamma-1}$$

$+$

Потери энергии мюонов

$$-\frac{dE_\mu}{dx} = a + bE_\mu$$

Дифференциальный спектр на глубине h

$$\mathrm{N}(E_\mu, h) = A \cdot\ e^{-\gamma \cdot b \cdot h}\left(E_\mu + \frac{a}{b} \cdot [1 - e^{-b \cdot h}]\right)^{-\gamma-1}$$

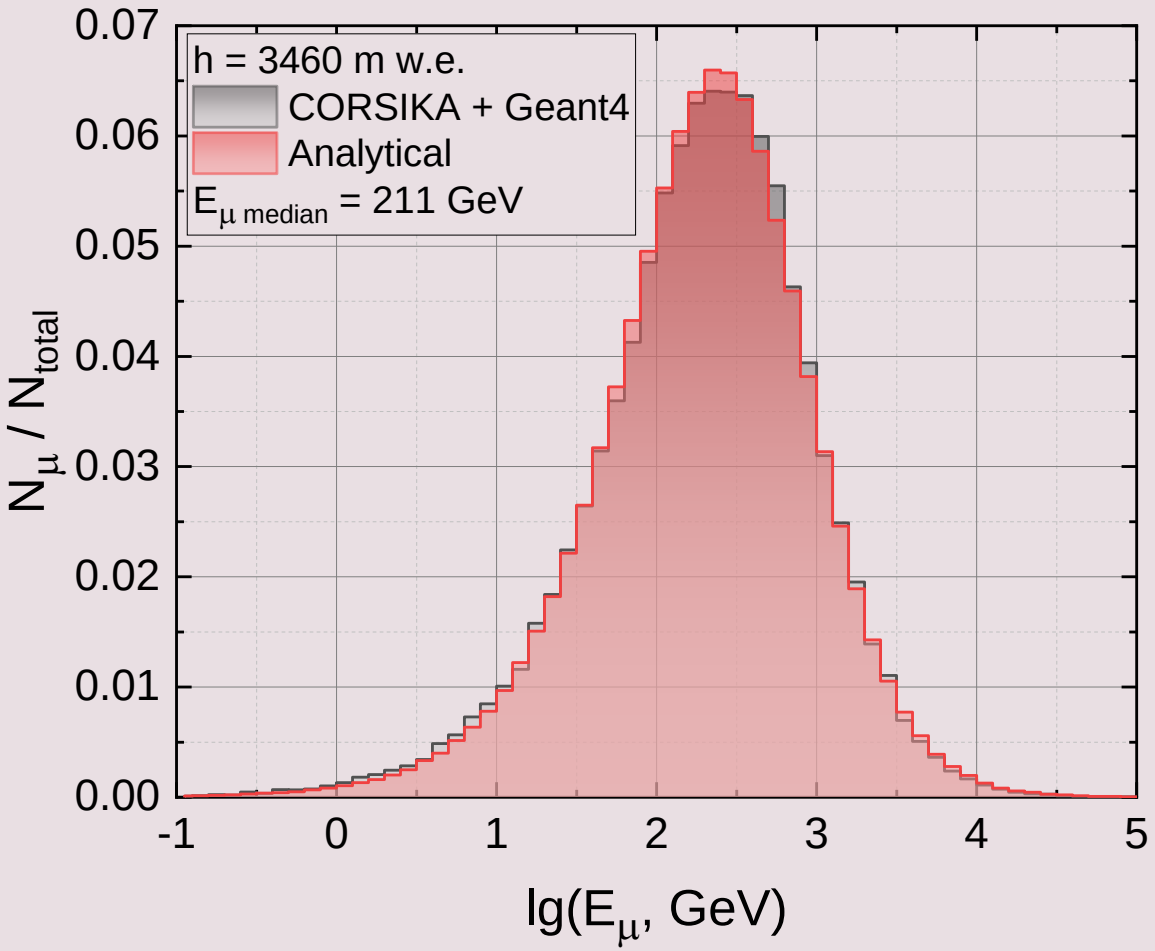
Флуктуации

$$\mathrm{N}(E_\mu, h) = A \cdot\ e^{-\gamma \cdot b_{\mathrm{eff}} \cdot h}\left(E_\mu + \frac{a}{{b'}_{eff}} \cdot \left[1 - e^{-{b'}_{\mathrm{eff}} \cdot h}\right]\right)^{-\gamma-1}$$

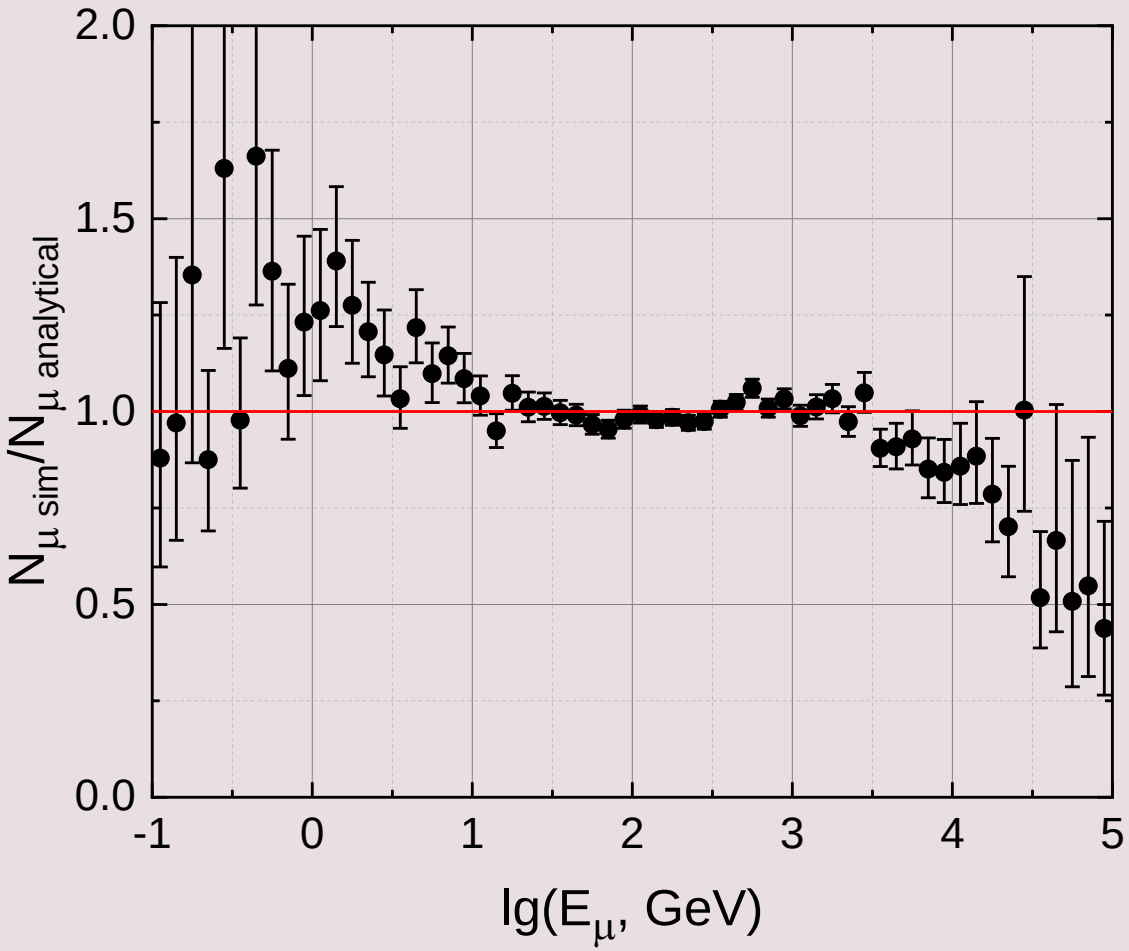
b_{eff}, ${b'}_{\mathrm{eff}}$ – поправочные коэффициенты для учета флуктуаций

Источник: Кокоулин Р. П. Развитие метода параметра для спектрометрии мюонов высоких энергий и его применение для исследования мюонов космических лучей. Дисс. д-ра физ.-мат. наук, Москва, МИФИ, 2000

Влияние грунта на энергию мюонов



Распределение доли мюонов на уровне LVD по логарифму энергии



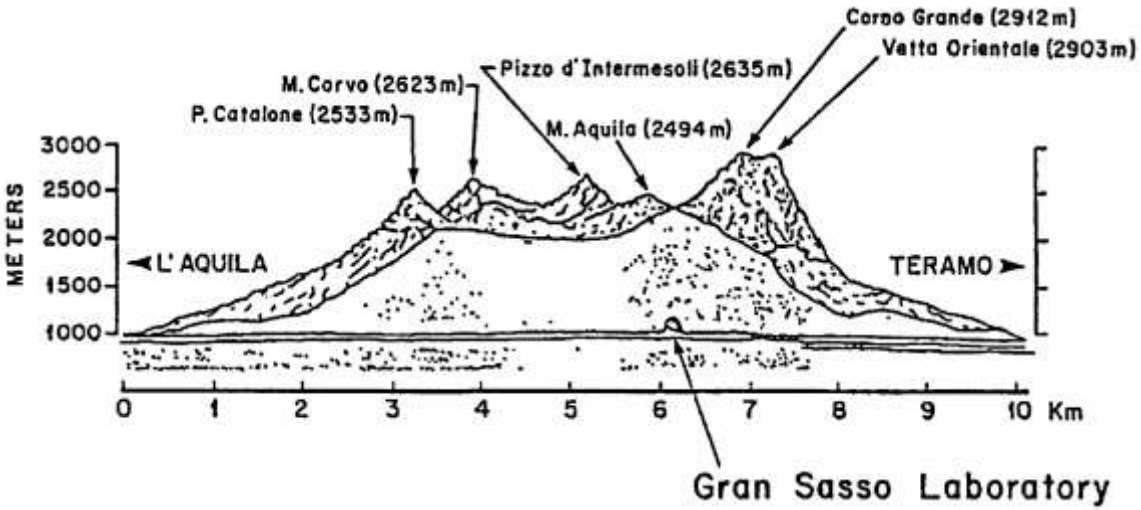
Зависимость отношения доли мюонов из моделирования и аналитического спектра от логарифма энергии

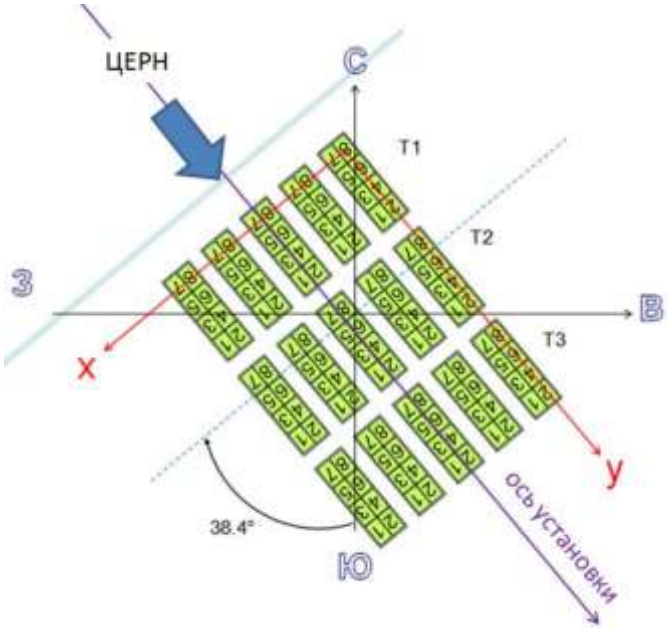
Заключение

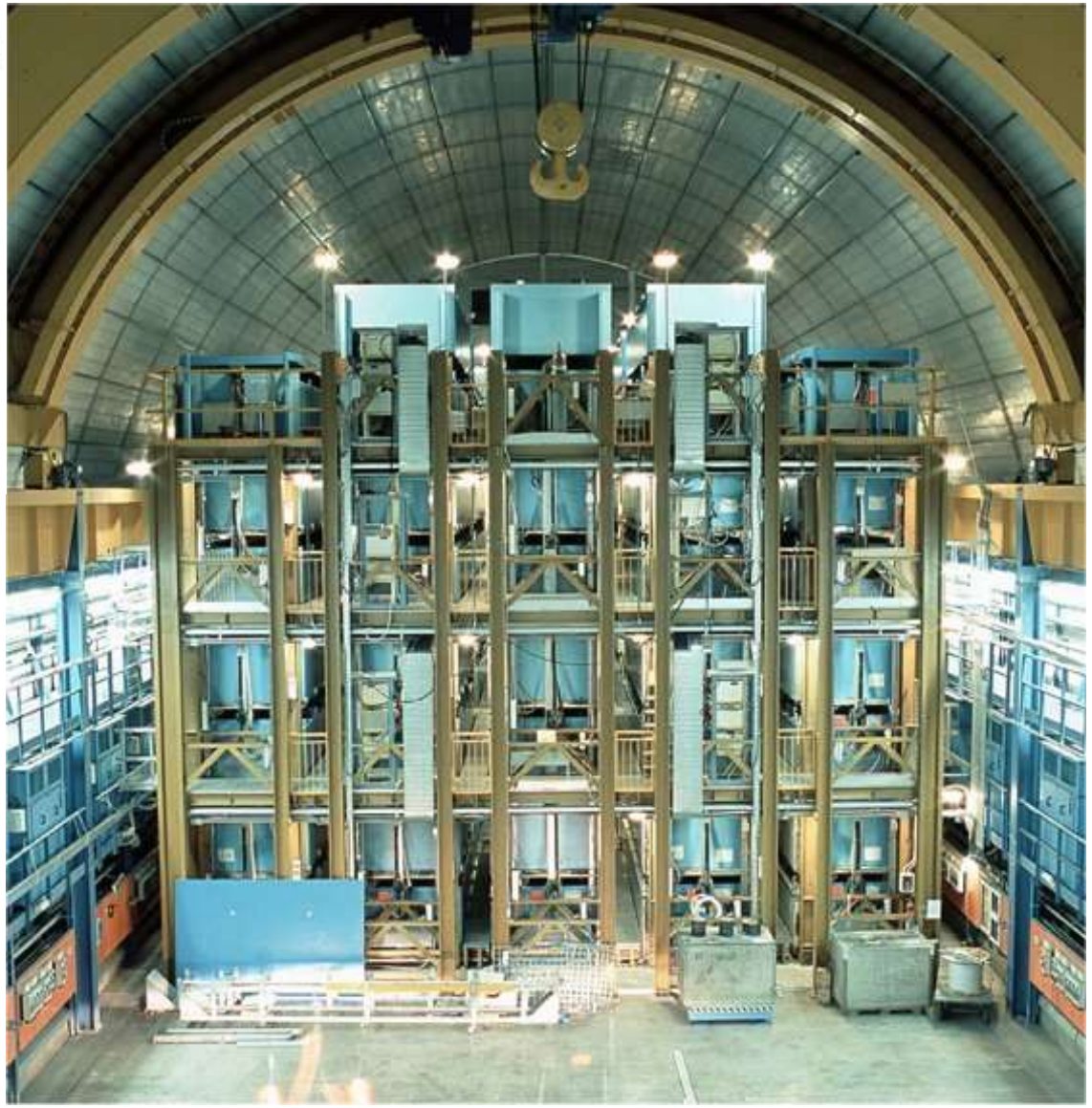
- Было проведено моделирование ШАЛ в программе CORSIKA 7 для первичных протонов в диапазоне энергии от 10^{14} до 10^{20} эВ и прохождения мюонов через грунт с помощью программного пакета Geant4.
- Число мюонов в ШАЛ после прохождения 3460 м в. э. уменьшается примерно в 3.5 раз по сравнению с поверхностью.
- Средний разлет мюонов после прохождения 3460 м в. э. составляет около 3 метров.
- Средняя энергия мюонов на уровне LVD составляет 280 ГэВ

Спасибо за внимание!

Расположение

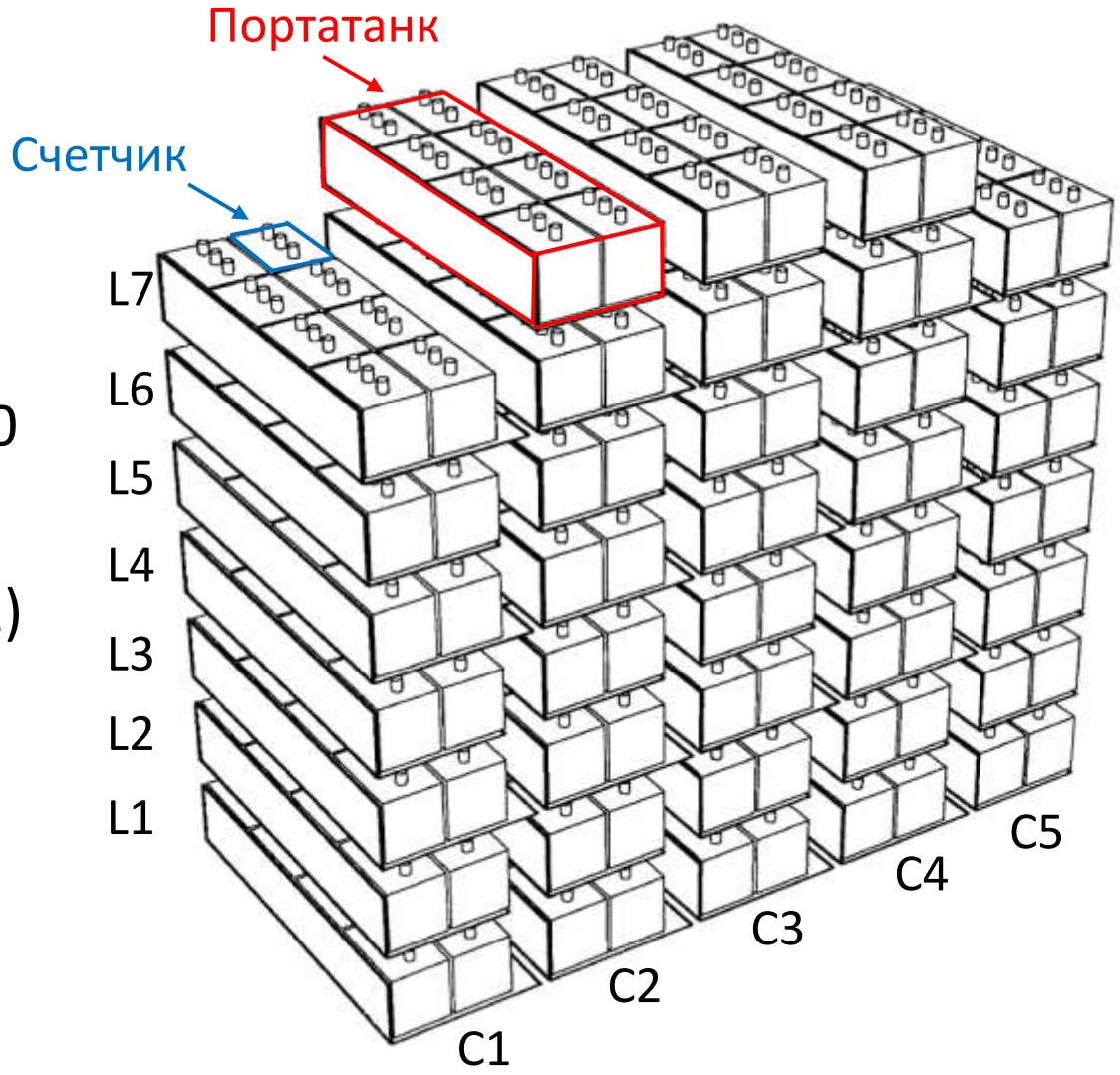






Башни

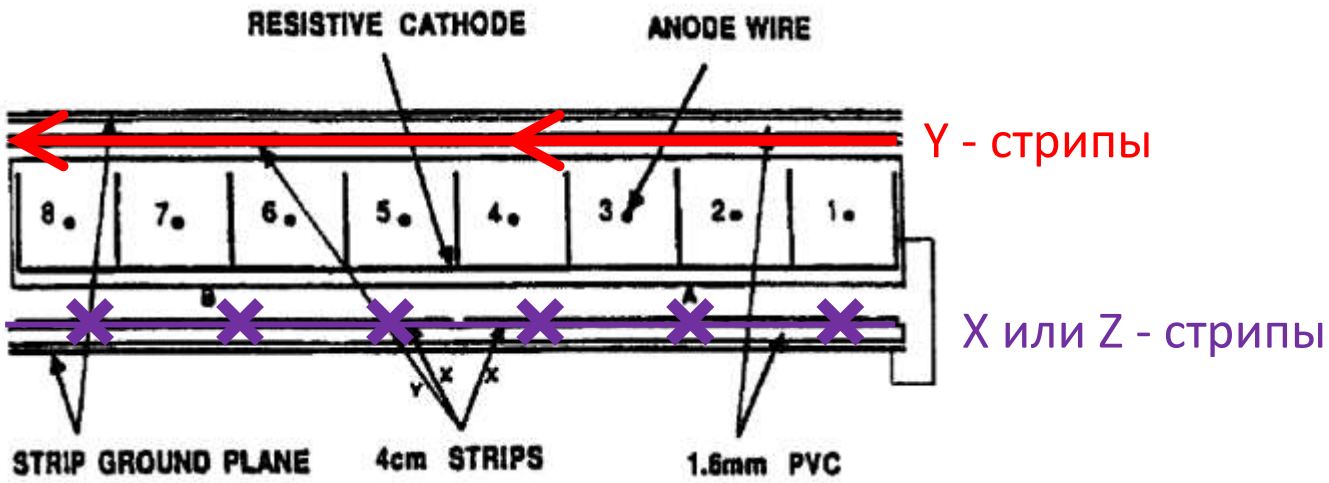
- Размер башни: 13.4 x 10.2 x 6.3 м
- 3 башни, расстояние между ними 2 м
- В одной башне 35 портатанков или 280 счетчиков
- Под башнями - защита из железа (2 см) и борированного парафина (10 см) от нейтронов

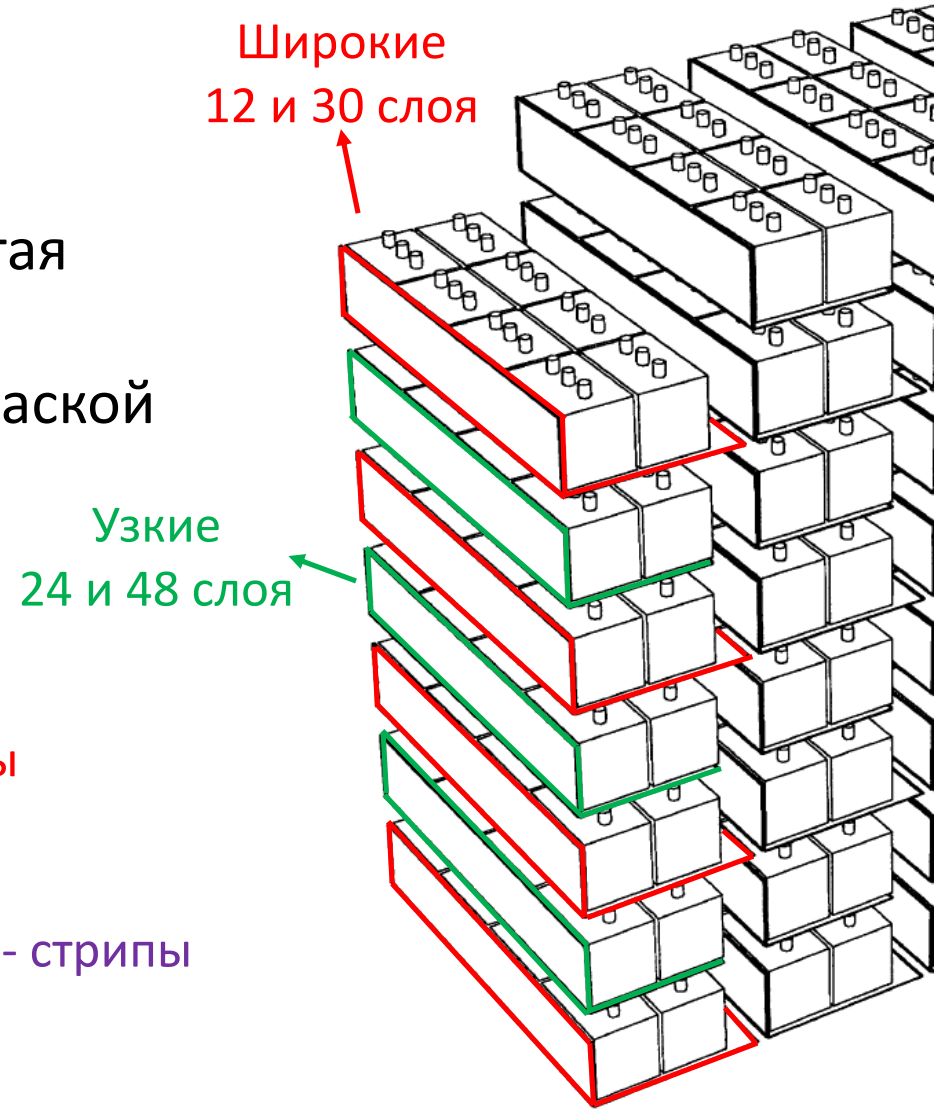


Трековая система

Стримерные камеры:

- 8 ячеек сечения 1 см^2, толщина стенок 1 мм
- Длина - 6.3 м
- Анод – проволока диаметром 100 мкм, покрытая серебром
- Катод – стенки ячеек, покрытые графитовой краской
- Газ: 88% CO_2, 10% изобутан, 2% Ar
- Два слоя, сдвинутые на 0.5 см





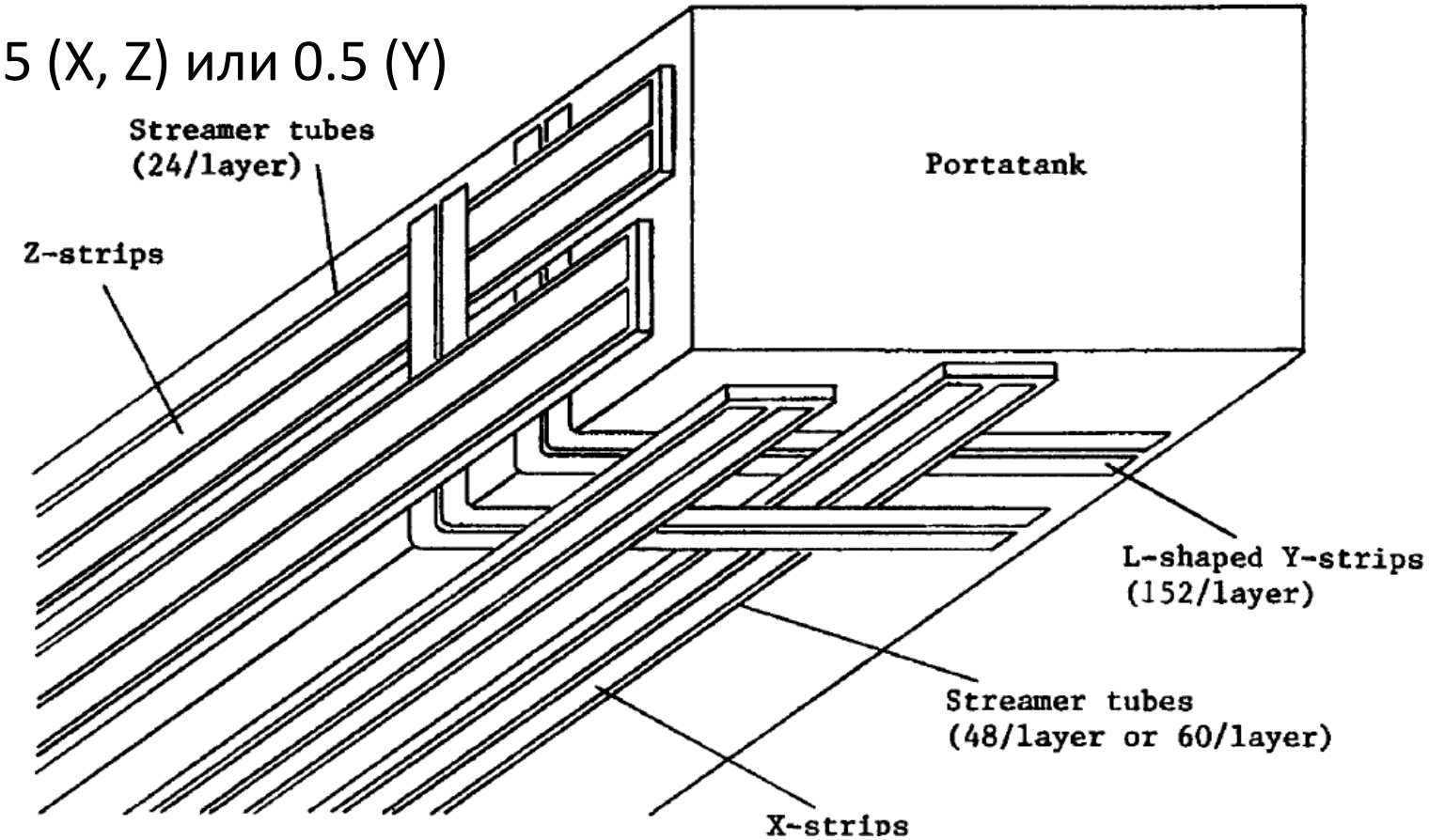
Трековая система

<u>Считывающие стрипы:</u>

- Ширина: 3.9 см (4/8 ячейки)
- Длина: 6.3 м
- Два слоя, сдвинутые на 1.5 (X, Z) или 0.5 (Y) ячейки

Угловая точность: 0.5˚

Триггер: сигнал с ≥ 4 камер



Мюоны в LVD

<u>Условие мюонного события:</u>

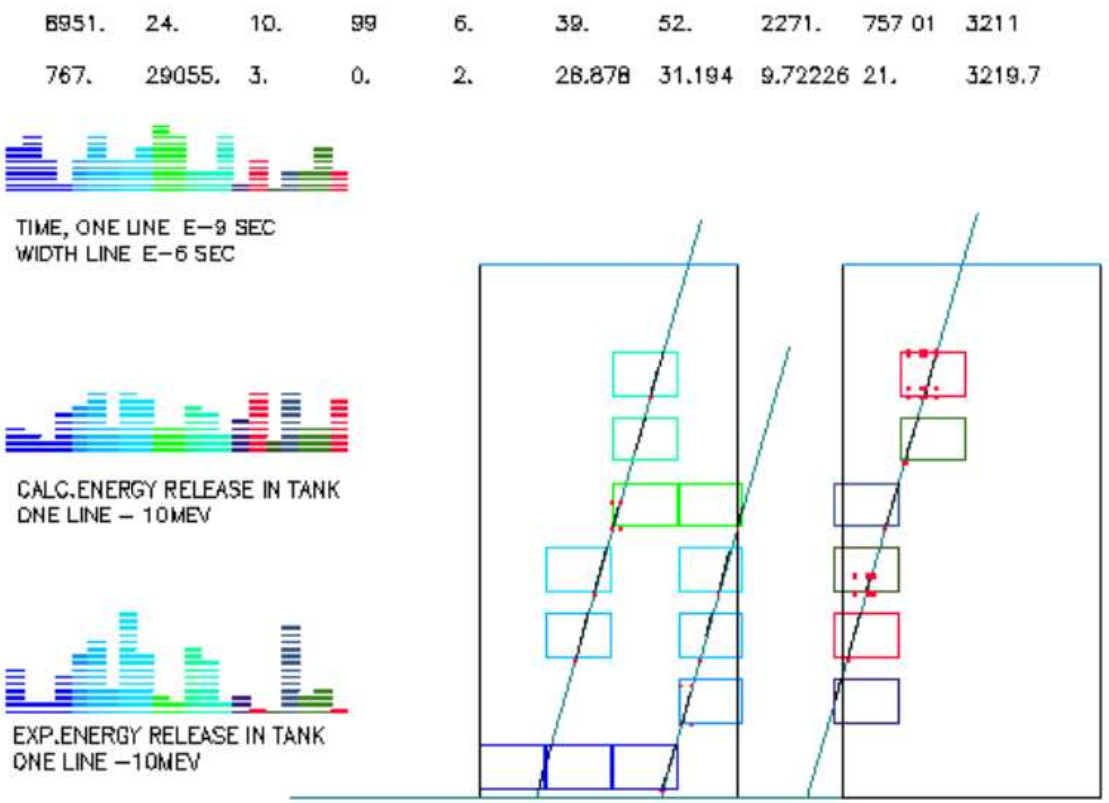
- Сработало ≥ 2 счетчиков и ≥ 3 модулей трековых плоскостей
- Сработало от 2 до 30 стрипов в трековой плоскости
- Суммарное энерговыделение во всех счетчиках ≥ 55 МэВ

В день около 4000 событий.

Одиночные мюоны: $\langle E_\mu \rangle = 270 \pm 18$ ГэВ

Мюоны в парах: $\langle E_\mu \rangle = 381 \pm 21$ ГэВ

$E_{\mu,\min} = 4$ ГэВ → для вертикали



Материал горы

```
G4double density = 2.765*g/cm3;
G4double A, Z, fraction;
G4int components, atoms, N;
G4String name, symbol;

G4Element* elementH  = new G4Element(name = "Hydrogen",  symbol = "H",  Z = 1.,  A =  1.01*g/mole);
G4Element* elementC  = new G4Element(name = "Carbon",    symbol = "C",  Z = 6.,  A = 12.01*g/mole);
G4Element* elementO  = new G4Element(name = "Oxygen",    symbol = "O",  Z = 8.,  A = 16.00*g/mole);
G4Element* elementMg = new G4Element(name = "Magnesium", symbol = "Mg", Z = 12., A = 24.31*g/mole);
G4Element* elementAl = new G4Element(name = "Aluminium", symbol = "Al", Z = 13., A = 26.98*g/mole);
G4Element* elementSi = new G4Element(name = "Silicon",   symbol = "Si", Z = 14., A = 28.09*g/mole);
G4Element* elementK  = new G4Element(name = "Potassium", symbol = "K",  Z = 19., A = 39.10*g/mole);
G4Element* elementCa = new G4Element(name = "Calcium",   symbol = "Ca", Z = 20., A = 40.08*g/mole);

G4Material *rock = new G4Material(name = "RockLNGS", density, components = 8);

rock->AddElement(elementO,  fraction = 50.81*perCent);
rock->AddElement(elementCa, fraction = 26.89*perCent);
rock->AddElement(elementC,  fraction = 12.17*perCent);
rock->AddElement(elementMg, fraction =  8.32*perCent);
rock->AddElement(elementSi, fraction =  1.05*perCent);
rock->AddElement(elementAl, fraction =  0.63*perCent);
rock->AddElement(elementK,  fraction =  0.10*perCent);
rock->AddElement(elementH,  fraction =  0.03*perCent);
```