



# **Исследование отклика Байкальского глубоководного нейтринного телескопа на атмосферные мюоны**

Оразгали Токжан

# Космические лучи

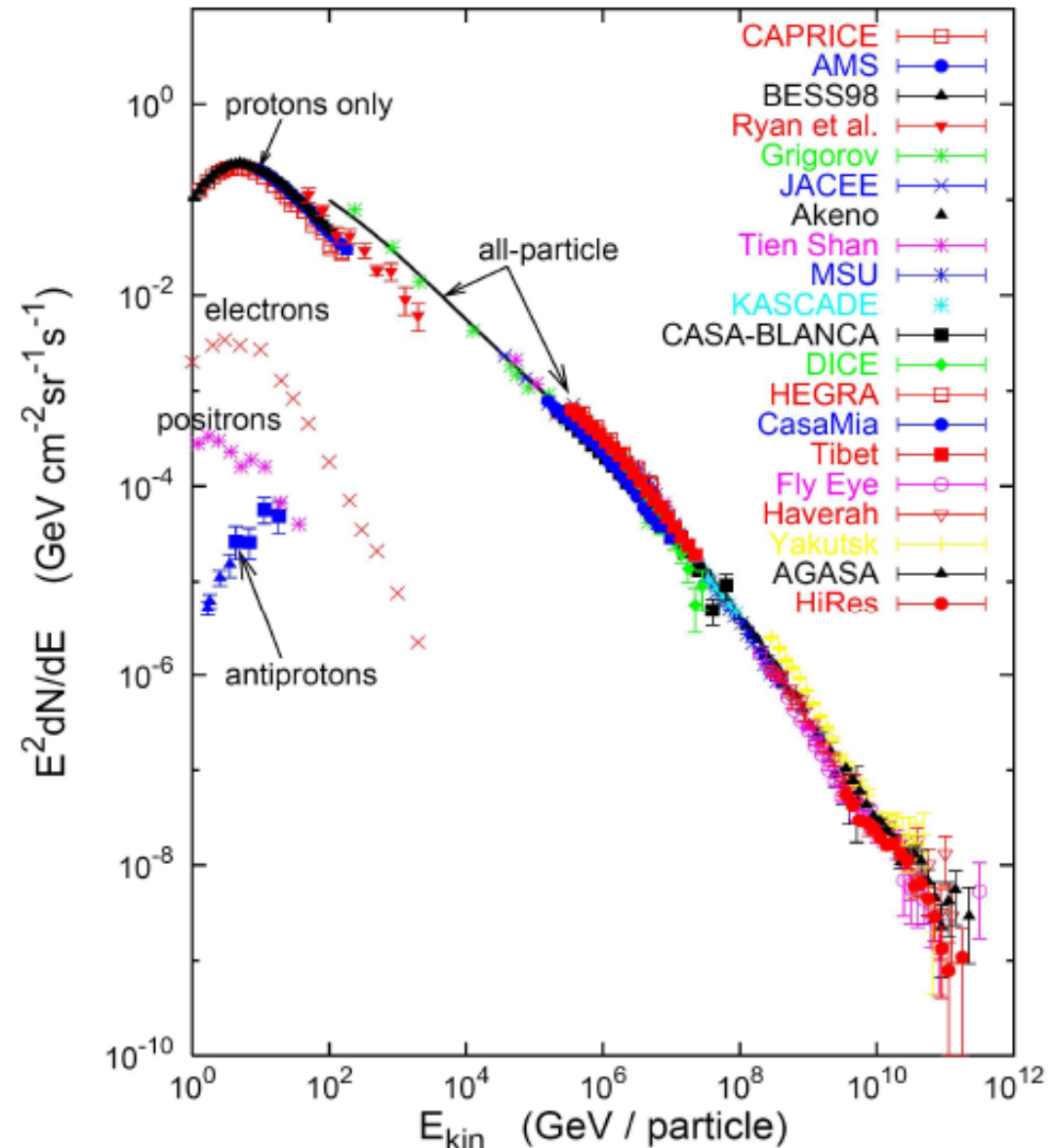
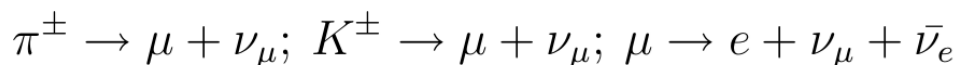
- Это протоны и атомные ядра, разогнанные до высоких энергий астрофизическими объектами в нашей Галактике и за ее пределами.
- Были открыты В. Гессом в 1912 г.
- Состоят в основном из протонов (89%), гелия 10% и более тяжелых ядер 1%.
- Энергетический спектр имеет нетепловое происхождение и описывается степенным законом:

$$\frac{dN_P}{dE} = K \cdot E^{-\gamma}$$

где  $\gamma$ - индекс спектра.

Измеренный спектр космических лучей имеет индекс  $\gamma = 2.7$  до энергий  $3.5 \cdot 10^{15}$  эВ. Выше этой энергии индекс становится  $\gamma = 3.1$

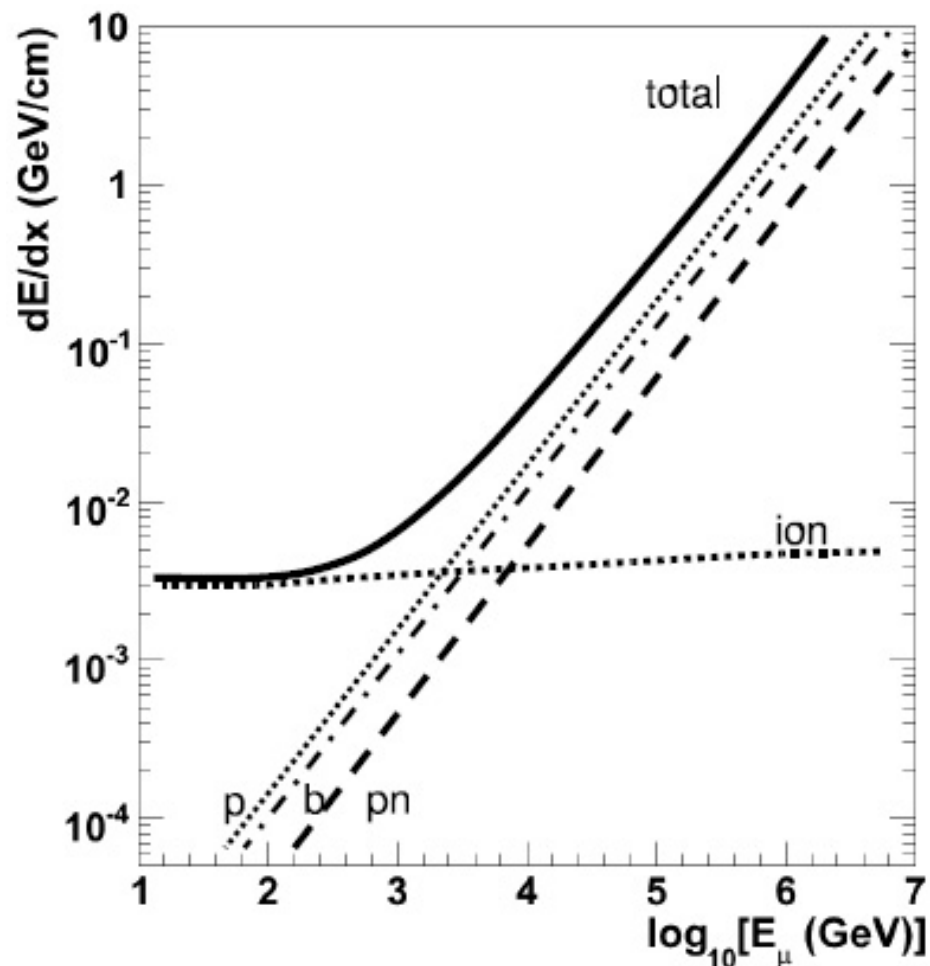
- При взаимодействии космических лучей с веществом атмосферы рождается большое количество мюонов и нейтрино, в результате распадов пионов, каонов:



Спектр космических лучей от 10<sup>9</sup> до 10<sup>21</sup> эВ, измеренный на Земле.

# Мюоны

## Потери энергии мюона в воде



Потери энергии мюона в воде:

- p - образование пар;
- b - тормозное излучение;
- pn – фотоядерное взаимодействие;
- ion – ионизация.

$$dE_\mu/dx = \alpha(E_\mu) + \beta(E_\mu) \cdot E_\mu$$

где  $\alpha(E_\mu)$  - почти постоянный член, который учитывает ионизацию,  $\beta(E_\mu)$  - радиационные потери

# Мюоны

## Черенковское излучение

- рождается, когда заряженная частица распространяется в среде со скоростью большей скорости света в этой среде.

$$\cos\theta_c = \frac{c/n}{\beta c} = \frac{1}{\beta n}$$

где  $n$  - показатель преломления среды,  $\beta$  - скорость частиц в единицах  $c$ .

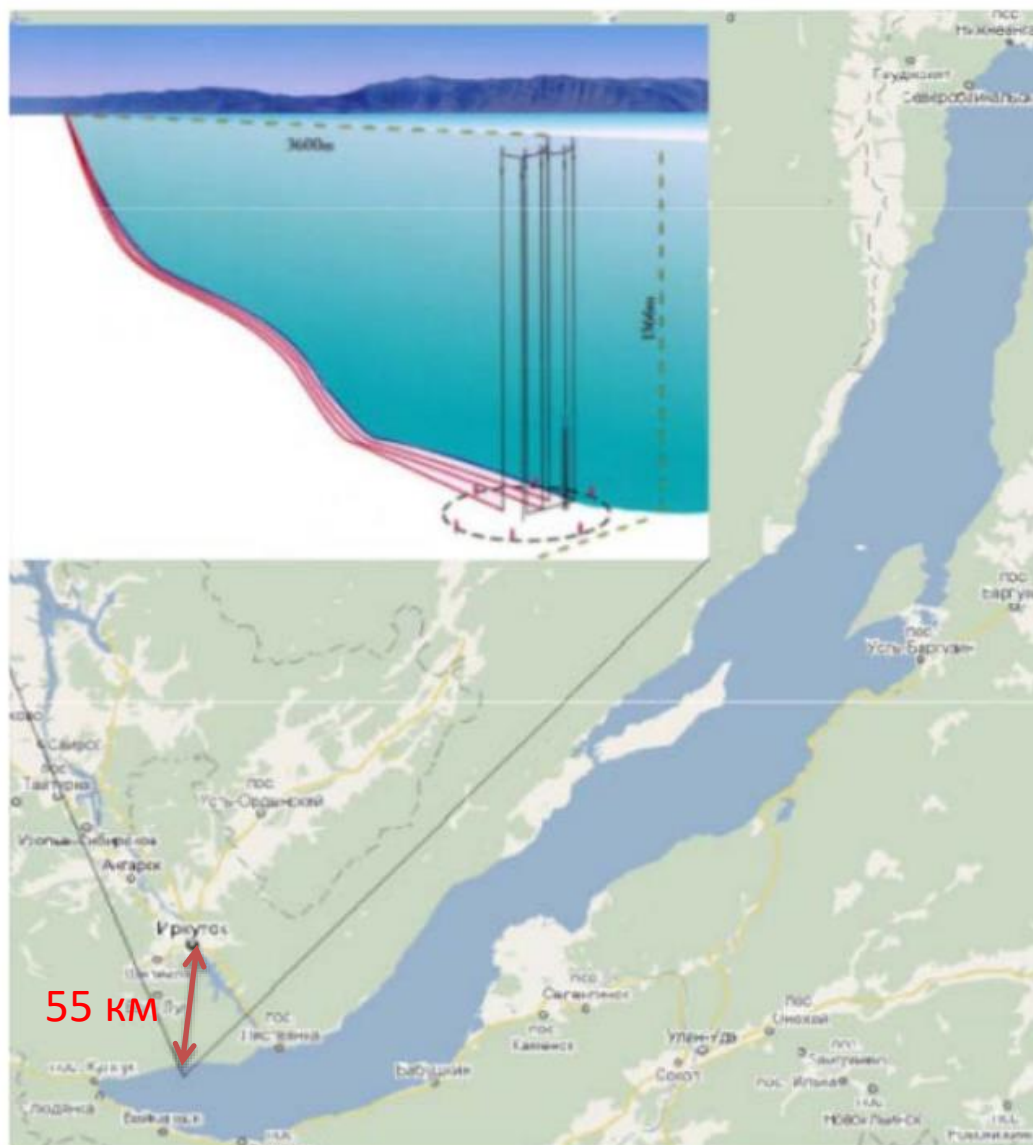
- для релятивистских частиц ( $\beta \simeq 1$ ) и для показателя преломления дистиллированной воды ( $n \simeq 1,3330$ ) черенковский угол равен  $\Theta \simeq 41^\circ$ .
- Количество черенковских фотонов  $N_\gamma$ , излучаемых на единицу длины волны  $\lambda$  и за пройденное расстояние  $dx$  частицей с зарядом  $e$  определяется выражением:

$$\frac{d^2N}{dx d\lambda} = 2\pi\alpha \frac{e}{\lambda^2} \left( 1 - \frac{1}{n^2\beta^2} \right)$$

где  $\lambda$  - длина волны светового излучения.

# Место проведения эксперимента

- Глубина 1366 м на небольшом расстоянии от берега (3.6 км)
- Развитая инфраструктура (ж/д, ЛЭП)
- Пресная вода (простота механических решений, нет фонового свечения от  $K^{40}$ )
- Нет биолюминесценции, носящей вспышечный характер
- Прочный ледовый покров в течение 2 месяцев в году



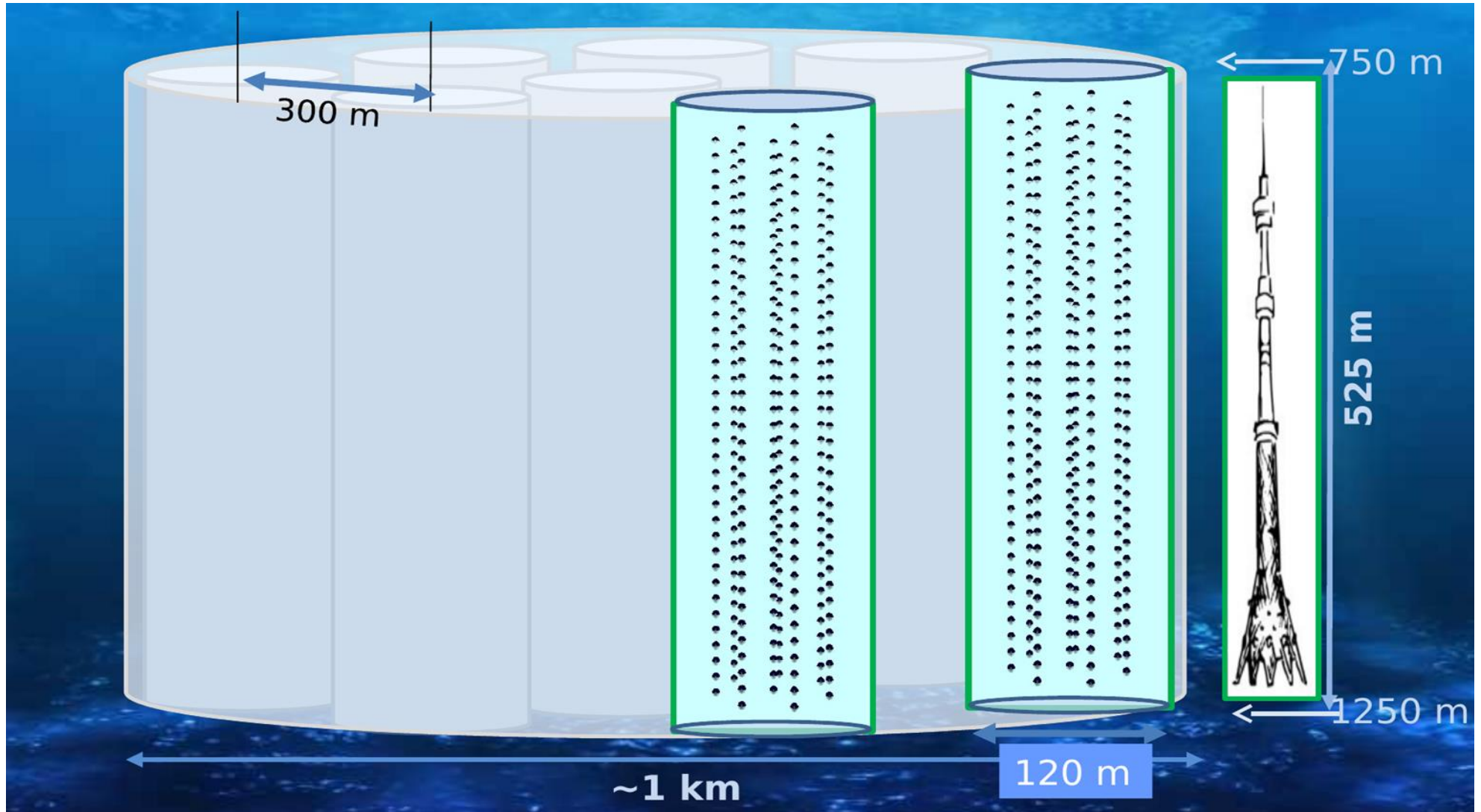
# Оптический модуль

- 10" (25.4 см) ФЭУ Hamamatsu R7081HQE,  $Q_{\text{eff}} \sim 0.35$
- 17" (43 см) стеклосфера VITROVEX
- 5-штырьковый глубоководный разъем Subconn
- 2-канальный усилитель, контроллер, блок высокого напряжения
- 2 калибровочных светодиода:  $10^8$  ф.э., 430 нм, 5 нс
- Металлическая сетка
- Гель



Внешний вид оптического модуля

# Схематический вид нейтринного телескопа НТ-1000



- Глубина озера 1366 м
- Гирлянда состоит 36 ОМ, шаг 15 м
- Центральная гирлянда и 7 периферийных гирлянд на расстоянии 60 м
- Расстояние между центральными гирляндами 300 м
- На данный момент установлены два кластера: 576 ОМ
- К 2020 году планируется развернуть 8 таких кластеров.

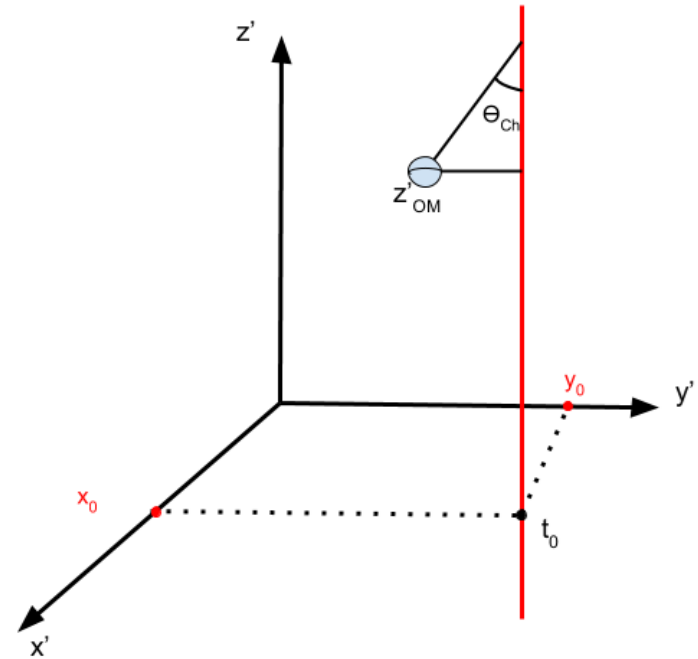
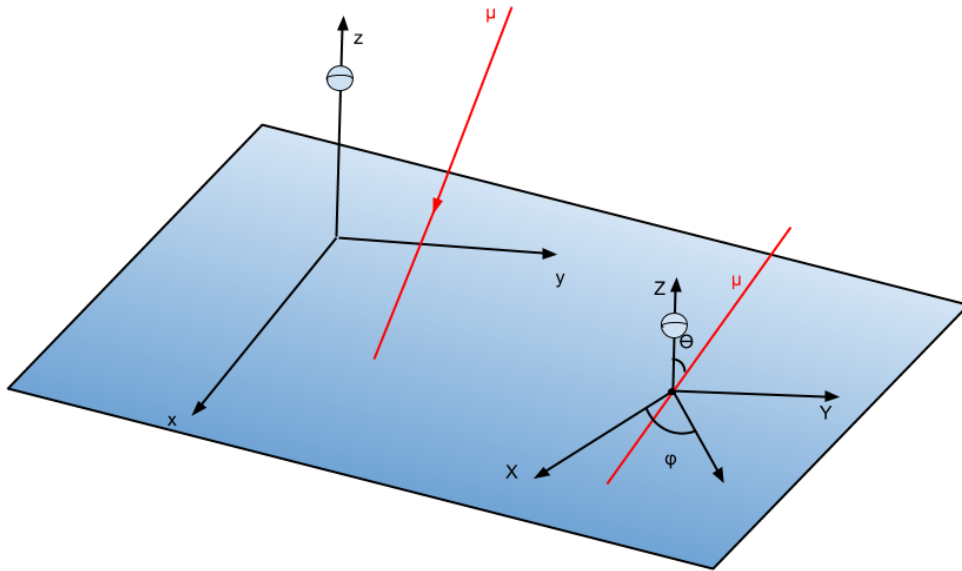
# Анализ модельных данных

Анализовались модельные данные, соответствующие реально работавшему кластеру в 2016 году:

- 96 суток экспозиции детектора
- Общее количество событий 86 702 070
- 288 ОМ, расстояние между ОМ 15 м
- периферийные гирлянды находятся на расстоянии 60 м вокруг центральной гирлянды;
- триггерное условие: срабатывание двух соседних ОМ во временном окне 100 нс



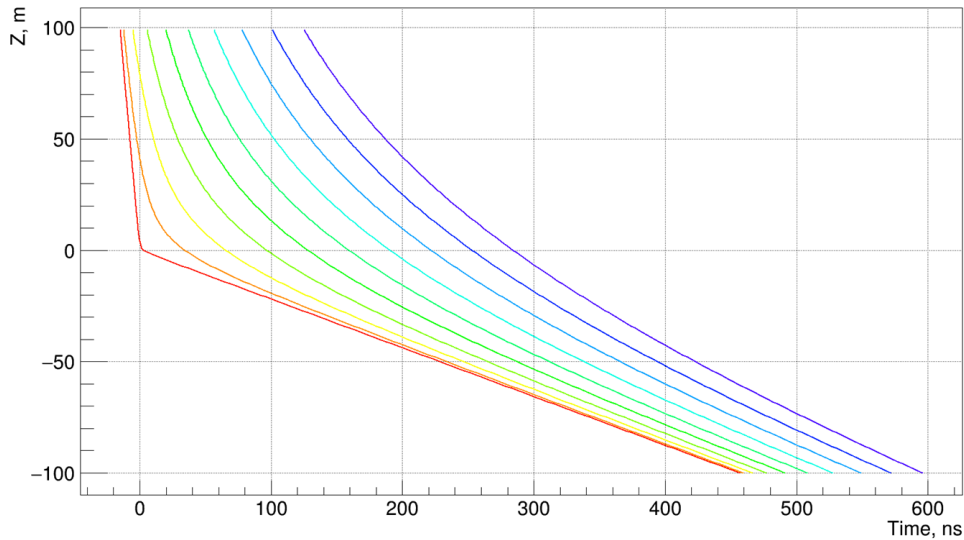
# Параметризация трека мюона в установке



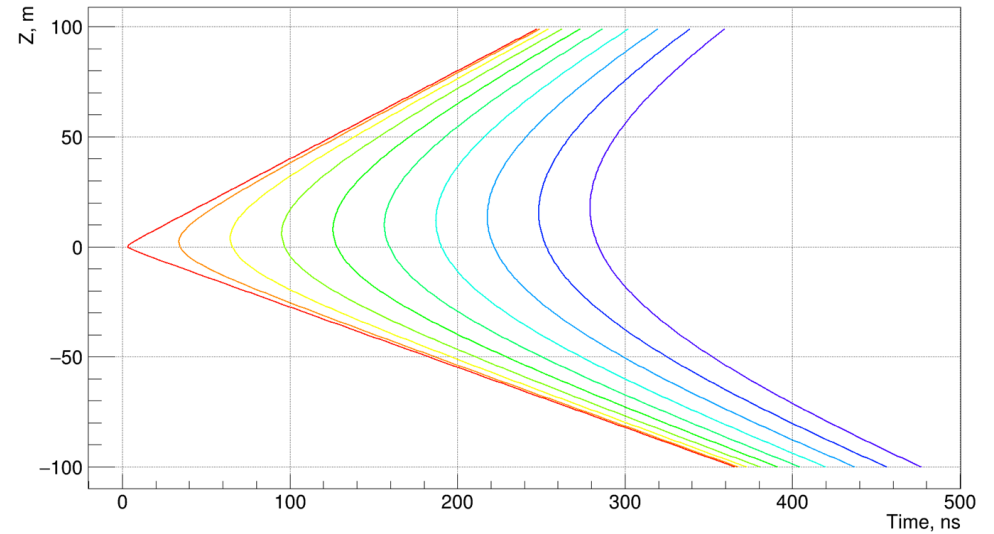
Время появления черенковского света на OM:

$$t_Y = t_0 - \frac{z'_{OM}}{c} + \frac{\rho}{c} \left( \frac{n_{gr}}{\sin \theta_{ch}} - \frac{1}{\operatorname{tg} \theta_{ch}} \right)$$

# Параметризации трека мюона в установке



а)



б)

**Появление черенковского света от мюонного трека в точке с координатой  $Z$ , лежащей на гирлянде: в зависимости от времени**

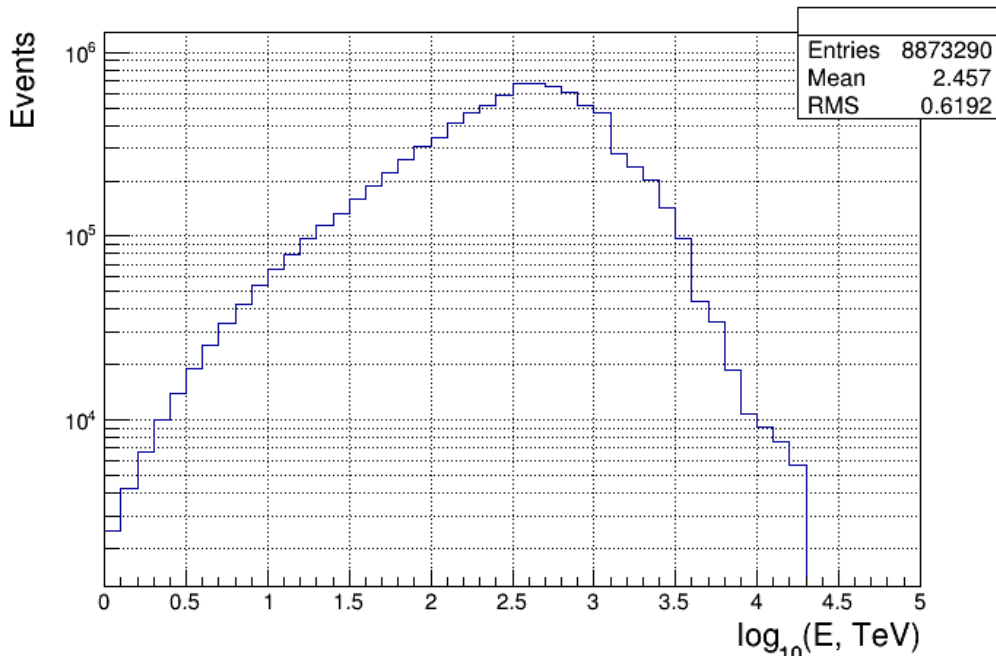
а) трек мюона с зенитным углом  $45^\circ$ ;

б) трек мюона с зенитным углом  $80^\circ$ .

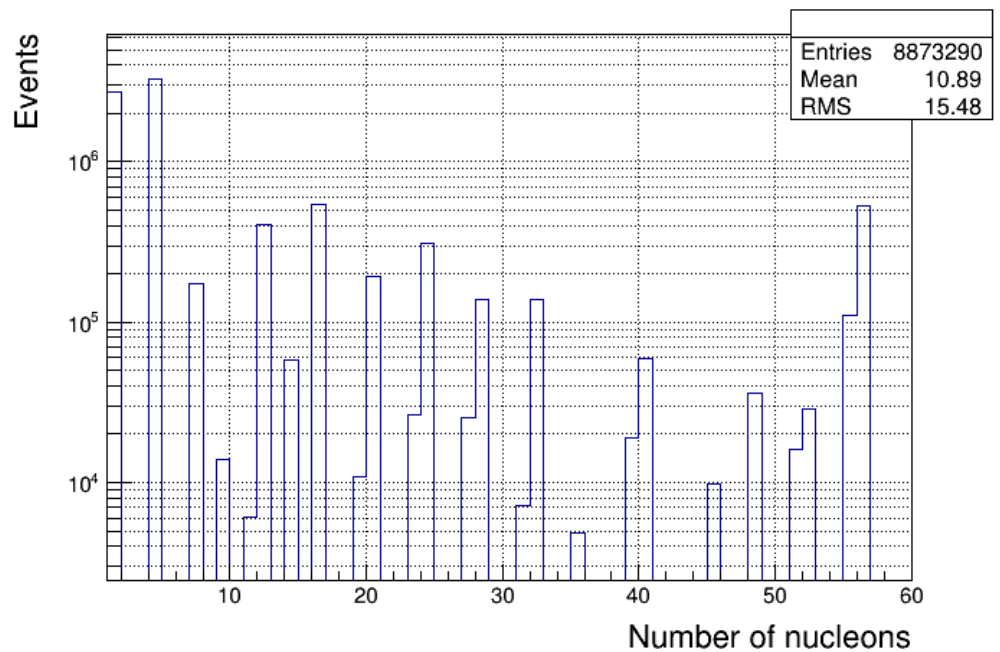
Точка  $z = 0, t = 0$  определяет точку наибольшего сближения между треком и линией детектора. Красной кривой соответствует расстояние между треком и гирляндой равное 1 м, фиолетовой кривой - 91 м.

# Анализ модельных данных

- Была проведена процедура фильтрации шумов
- Был сделан отбор событий с  $N_{\text{hit}} \geq 5$   $N_{\text{hitstr}} \geq 2$

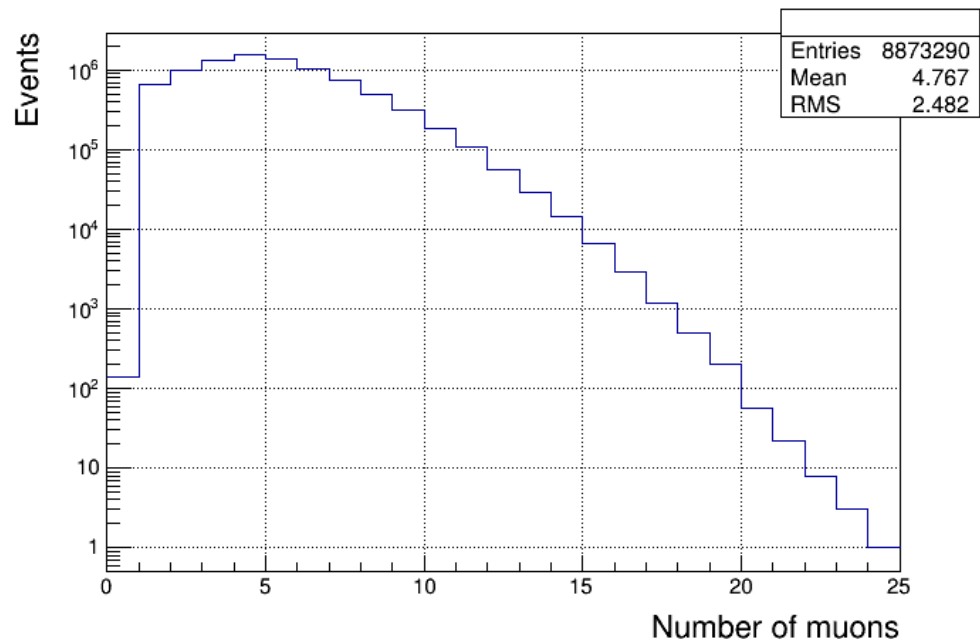


Распределение по энергиям первичных частиц космических лучей

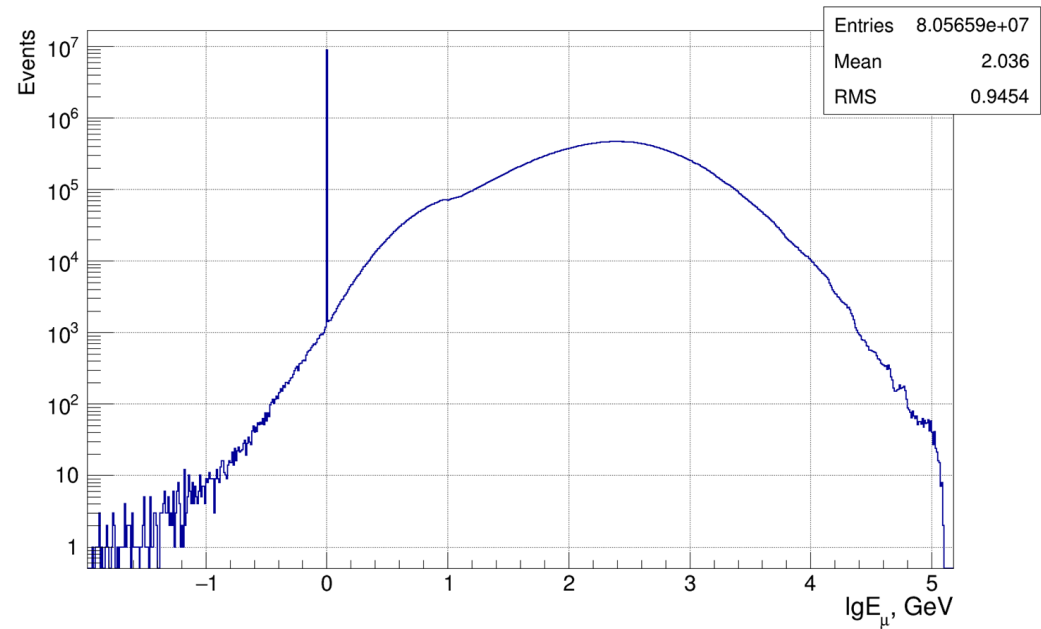


Зависимость количества событий от числа нуклонов первичной частицы

# Анализ модельных данных

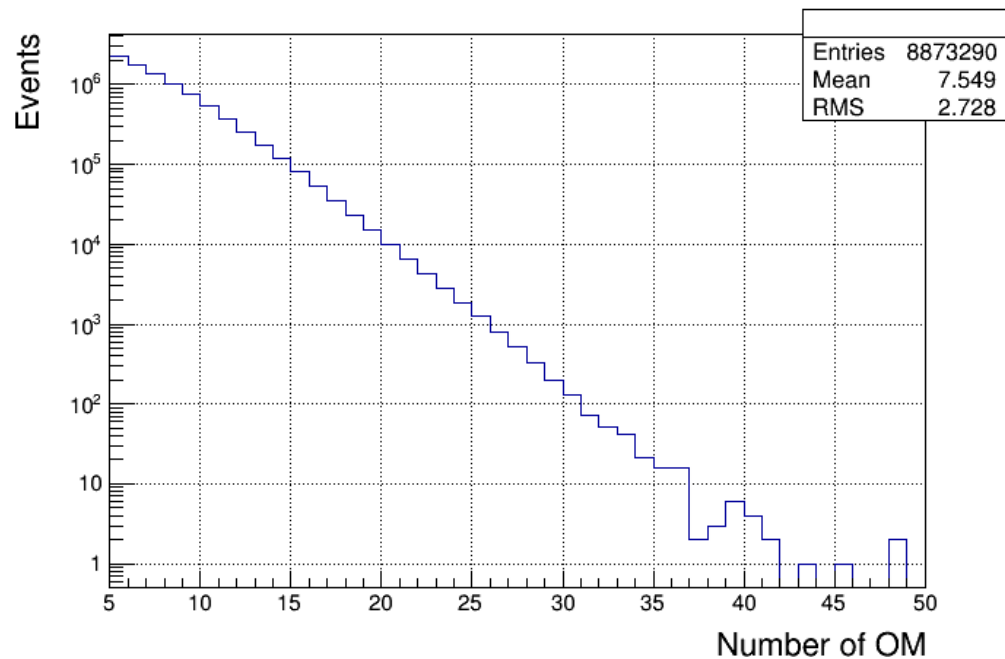


Зависимость количества событий от числа мюонов после фильтрации

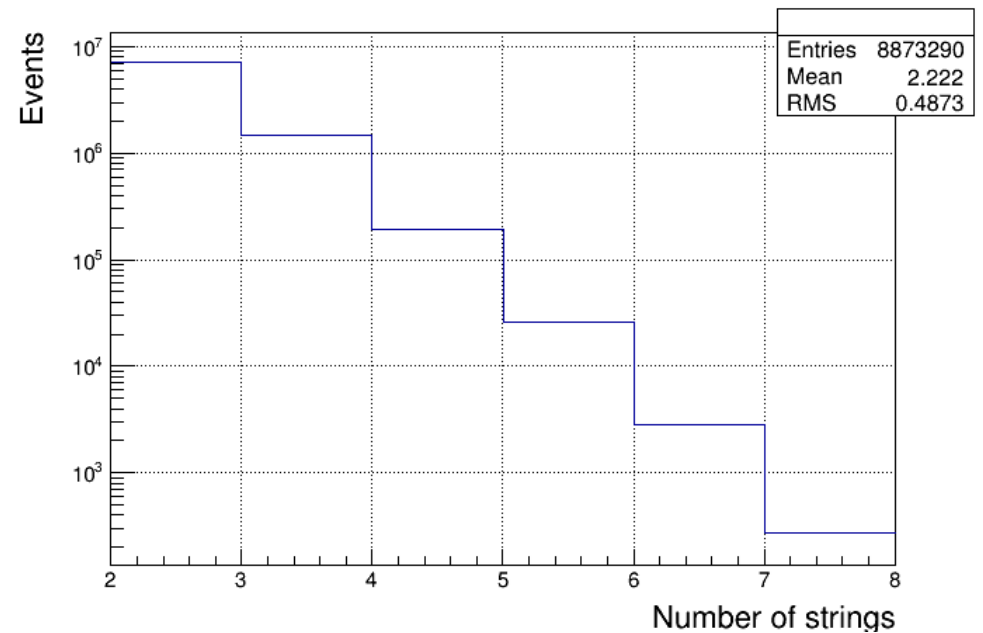


Энергетическое распределение мюонов на уровне установки

# Анализ модельных данных

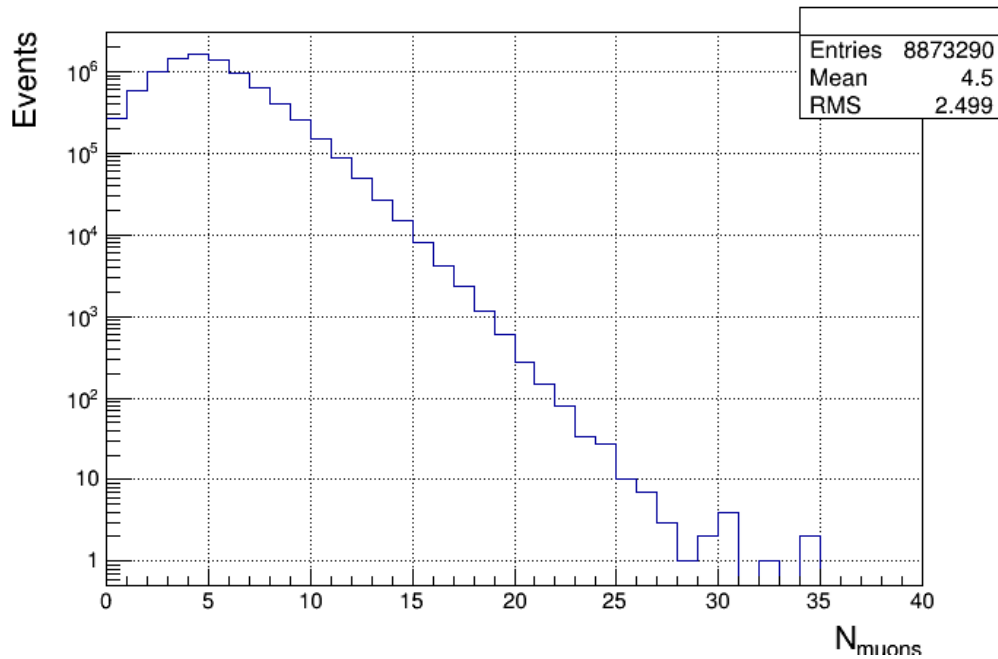


Зависимость количества событий от числа сработавших ОМ

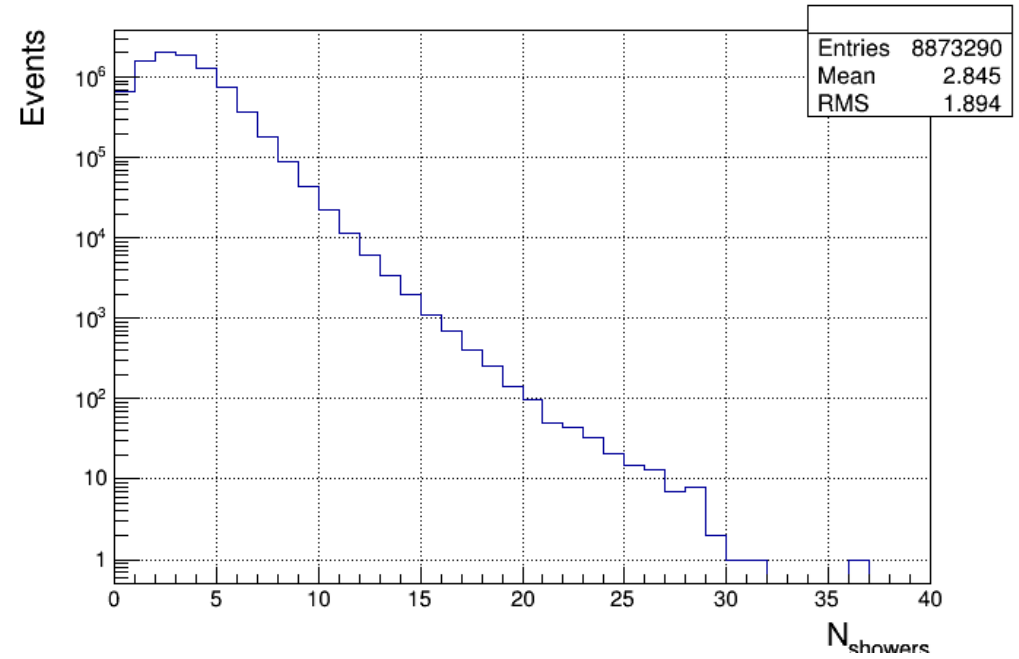


Зависимость количества событий от числа сработавших гирлянд

# Анализ модельных данных

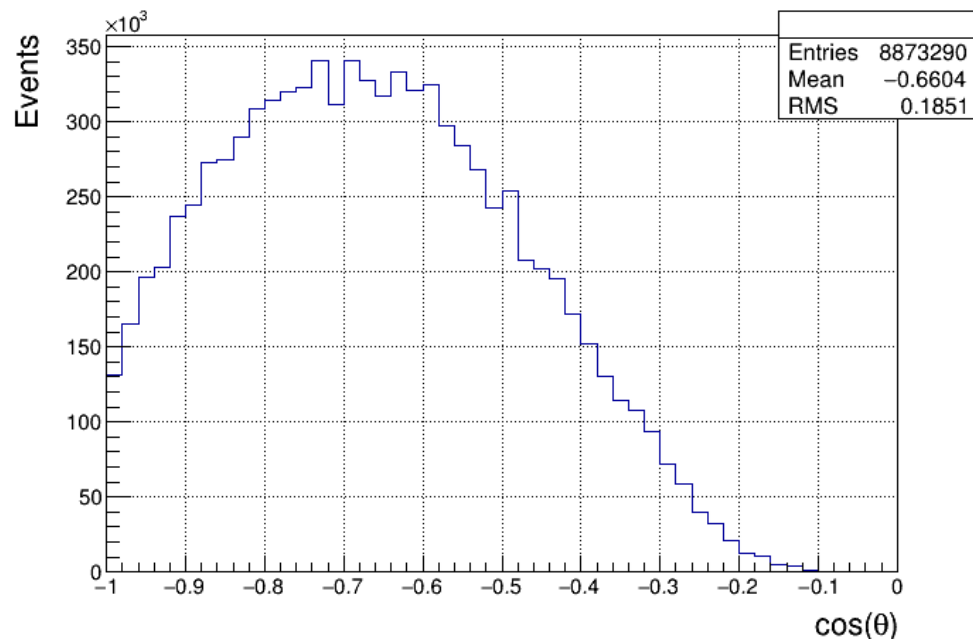


Зависимость количества событий от числа каналов, сработавших от черенковского света мюона

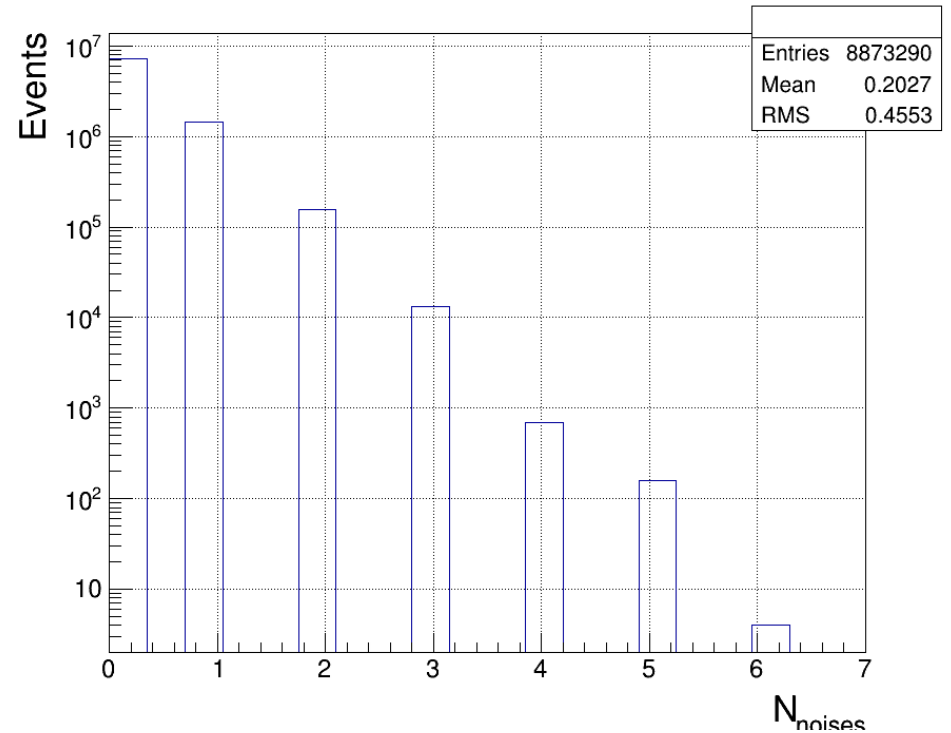


Зависимость количества событий от числа каналов, сработавших от черенковского света сопровождения мюона

# Анализ модельных данных

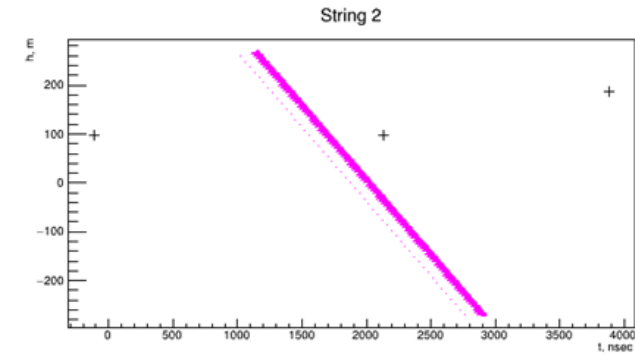
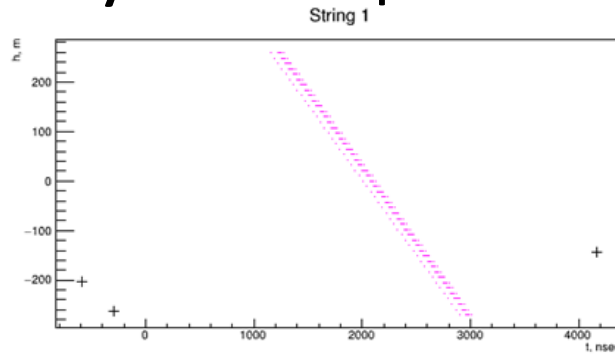


Зависимость количества событий от косинуса полярного угла

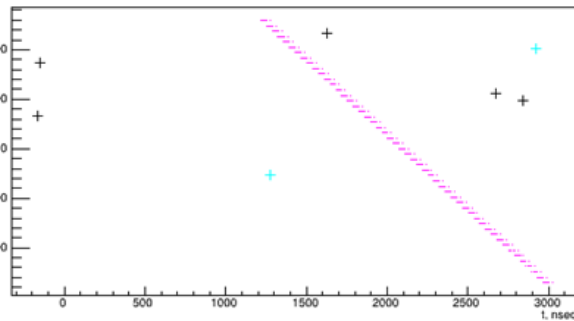


Зависимость количества событий от числа каналов, сработавших от свечения озера и темного тока ФЭУ

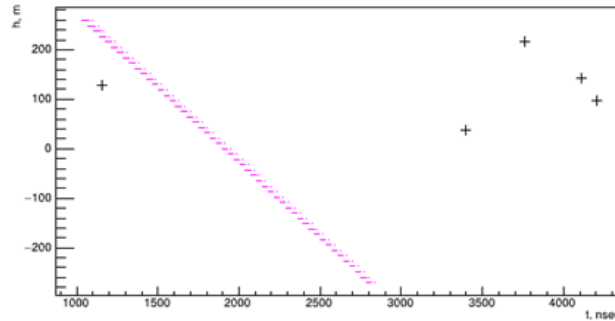
# Пример визуализации события



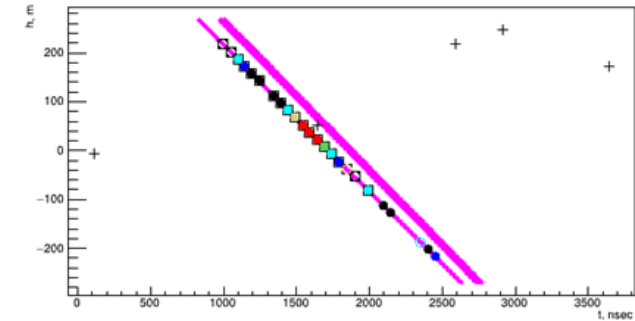
String 7



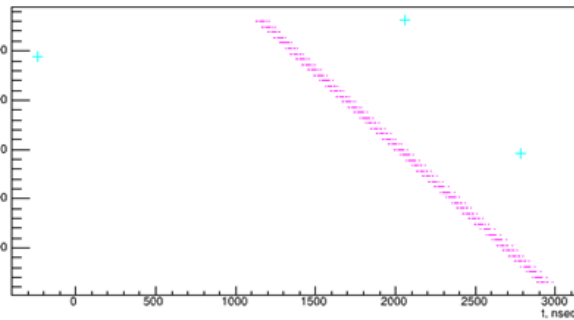
String 8



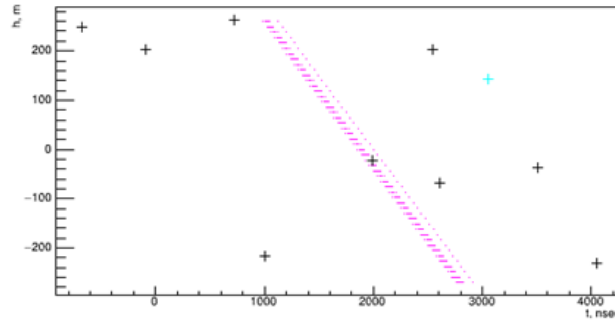
String 3



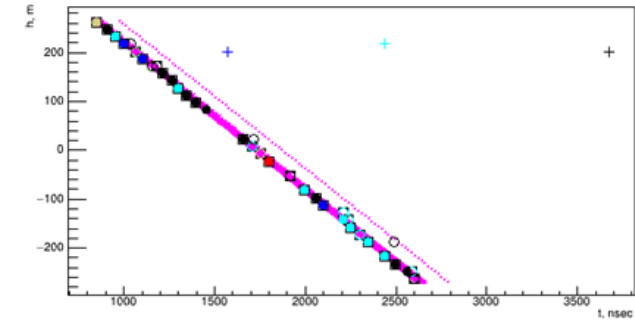
String 6



String 5



String 4

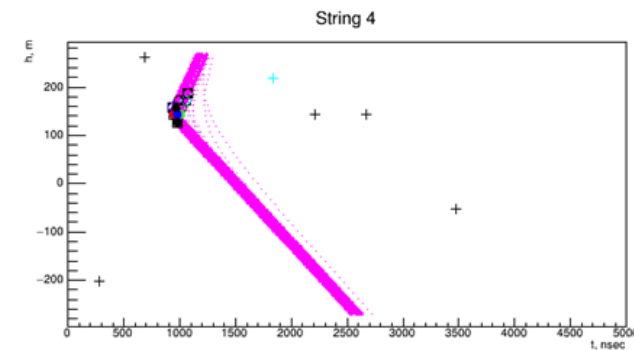
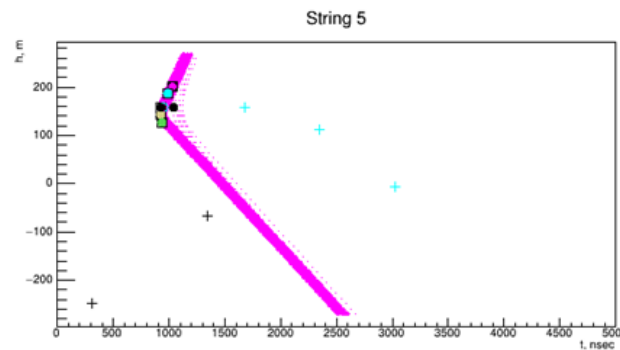
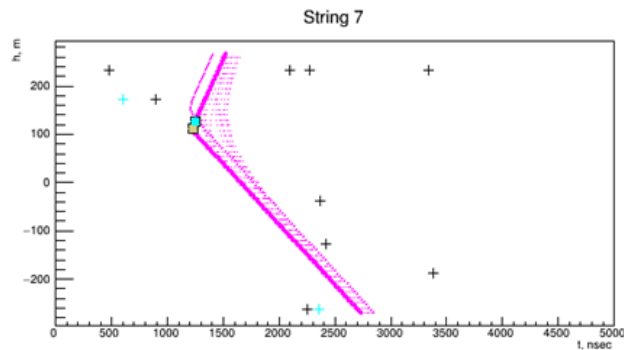
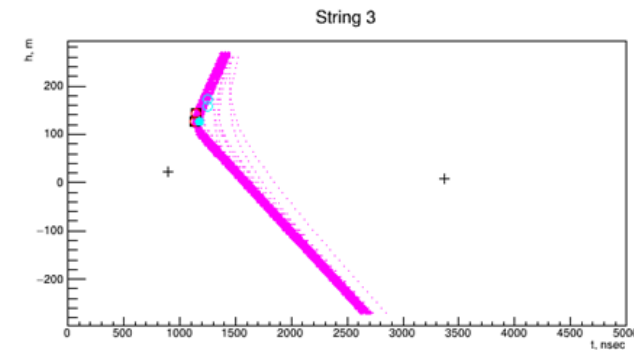
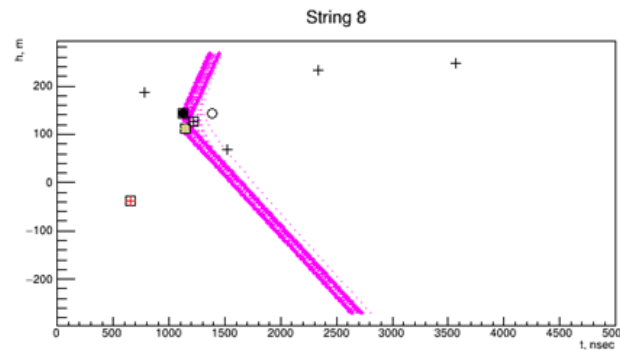
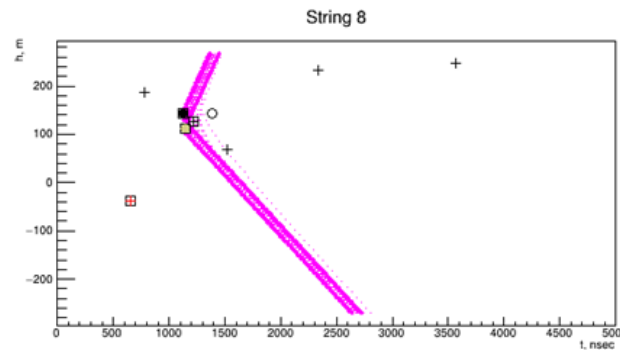
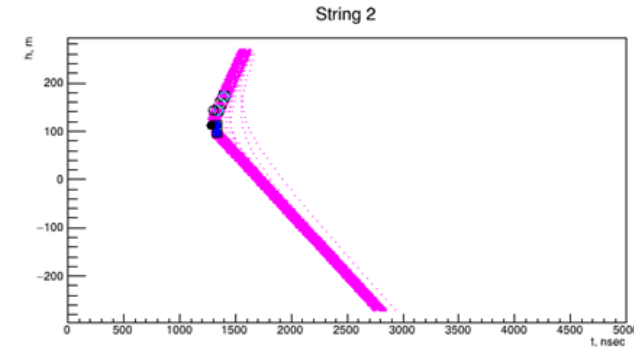
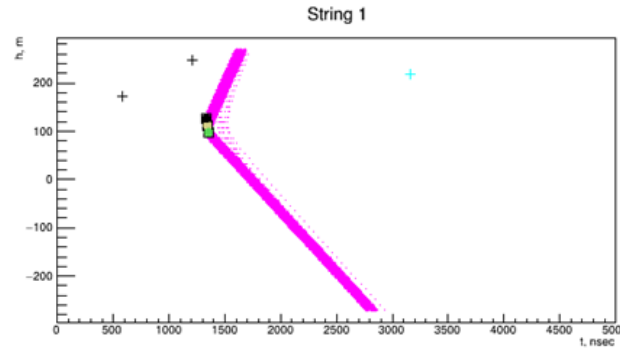


## Характеристика события:

- Энергия первичных космических лучей 915.61 ТэВ,
- полярный угол  $178.93^\circ$ ,
- число нуклонов первичной частицы 24,
- число мюонов после фильтрации 11,
- число сработавших ОМ - 48,
- число сработавших гирлянд 2,
- число каналов, сработавших от черенковского света мюона 34,
- число каналов, сработавших от черенковского света сопровождения мюона 14,
- число каналов, сработавших от свечения озера и темного тока ФЭУ 0.



# Пример визуализации события



## Характеристика события:

- Энергия первичных космических лучей 4307.81 ТэВ,
- полярный угол  $107.71^{\circ}$ ,
- число нуклонов первичной частицы 12,
- число мюонов после фильтрации 28,
- число сработавших ОМ -28,
- число сработавших гирлянд 8,
- число каналов, сработавших от черенковского света мюона 15,
- число каналов, сработавших от черенковского света сопровождения мюона 11,
- число каналов, сработавших от свечения озера и темного тока ФЭУ 2.

# Заключение

- В данной работе был представлен краткий обзор космических лучей, прохождения мюонов через вещество, механизма черенковского излучения;
- дано описание Байкальского глубоководного нейтринного телескопа НТ-1000, рассмотрена измерительная его часть;
- были обработаны и проанализированы модельные данные телескопа, представлены количественные результаты по отклику детектора на поток атмосферных мюонов, а также по первичным космическим лучам;
- реализована программа визуализации событий, наглядно и подробно представляющая отклик детектора на атмосферные мюоны.

Спасибо за внимание!