



Исследование отклика Байкальского глубоководного нейтринного телескопа на атмосферные мюоны

Оразгали Токжан

Космические лучи

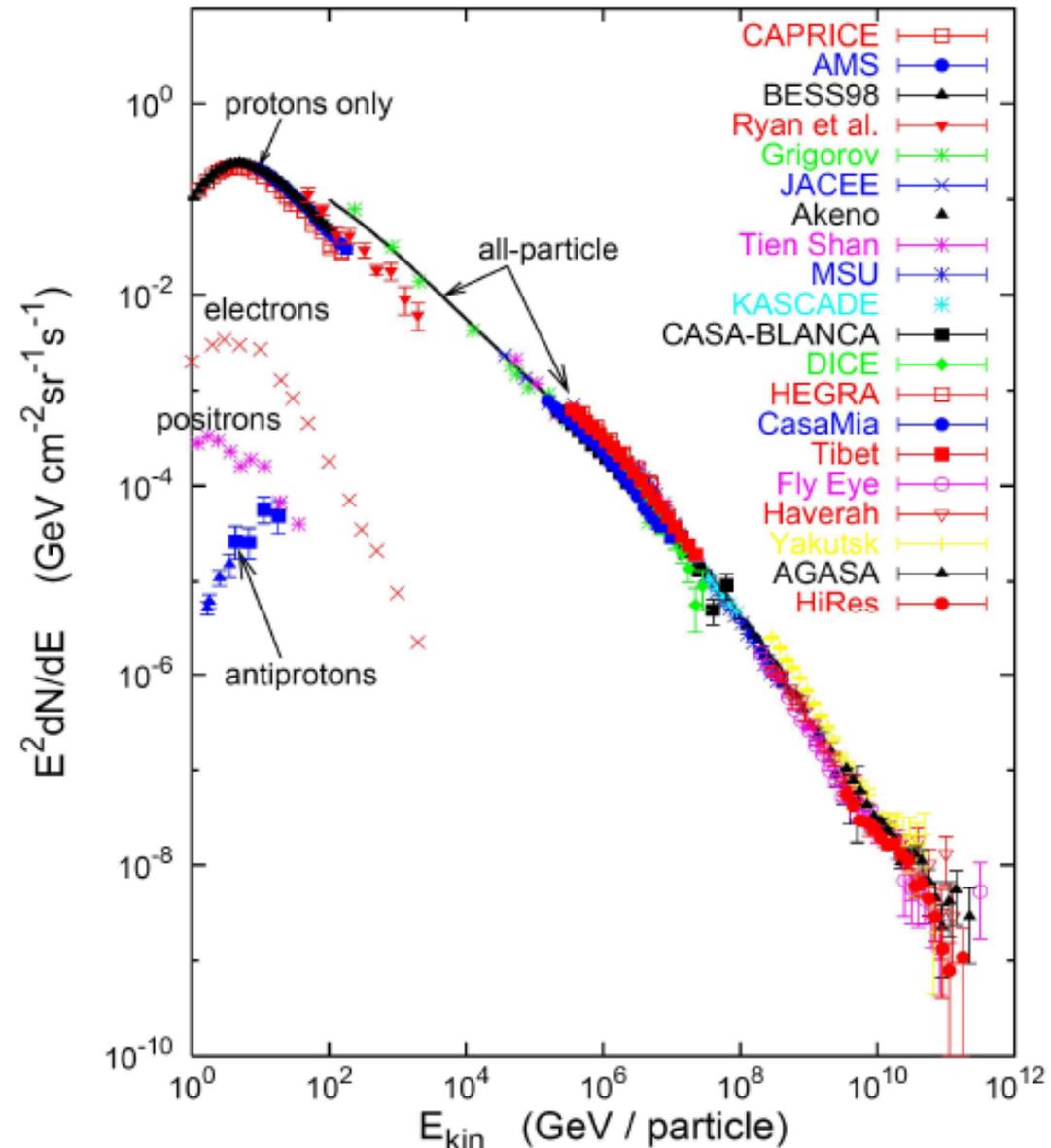
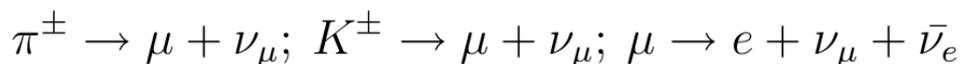
- Это протоны и атомные ядра, разогнанные до высоких энергий астрофизическими объектами в нашей Галактике и за ее пределами.
- Были открыты В. Гессом в 1912 г.
- Состоят в основном из протонов (89%), гелия 10% и более тяжелых ядер 1%.
- Энергетический спектр имеет нетепловое происхождение и описывается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

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

где γ - индекс спектра.

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

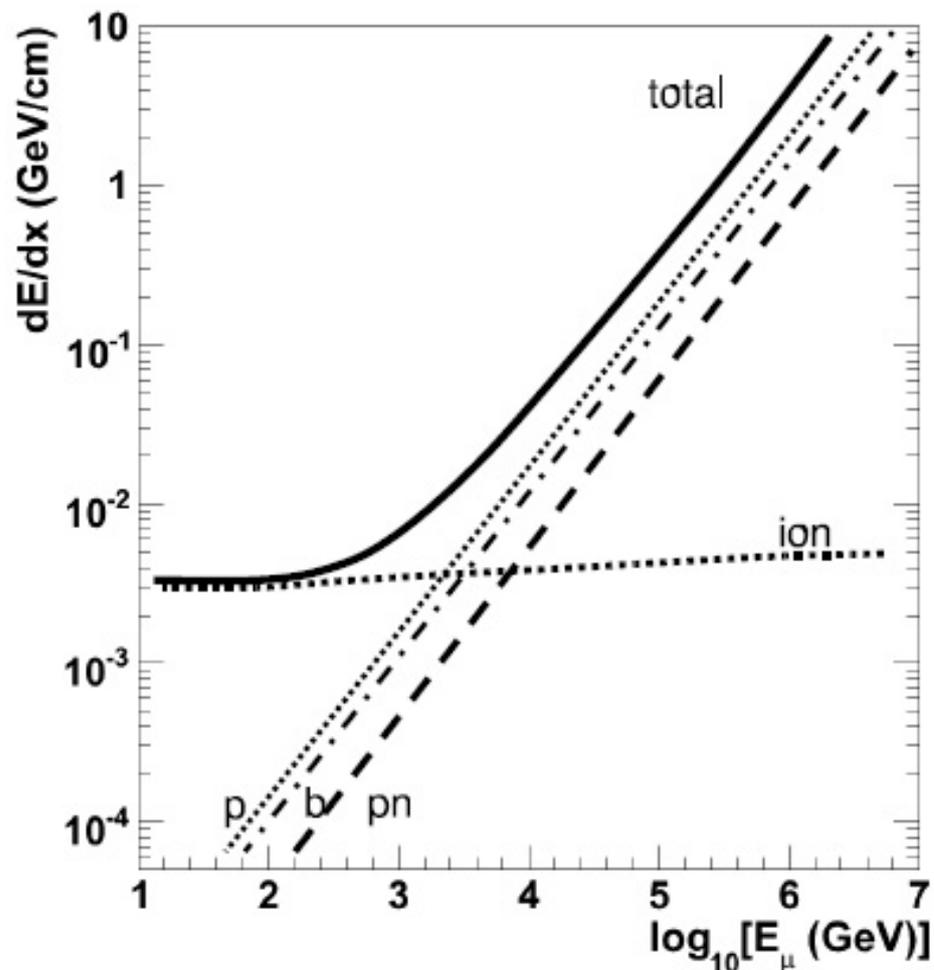
- При взаимодействии космических лучей с веществом атмосферы рождается большое количество мюонов и нейтрино, в результате распадов пионов, каонов:



Спектр космических лучей от 10⁹ до 10²¹ 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, β - скорость частиц в единицах c .

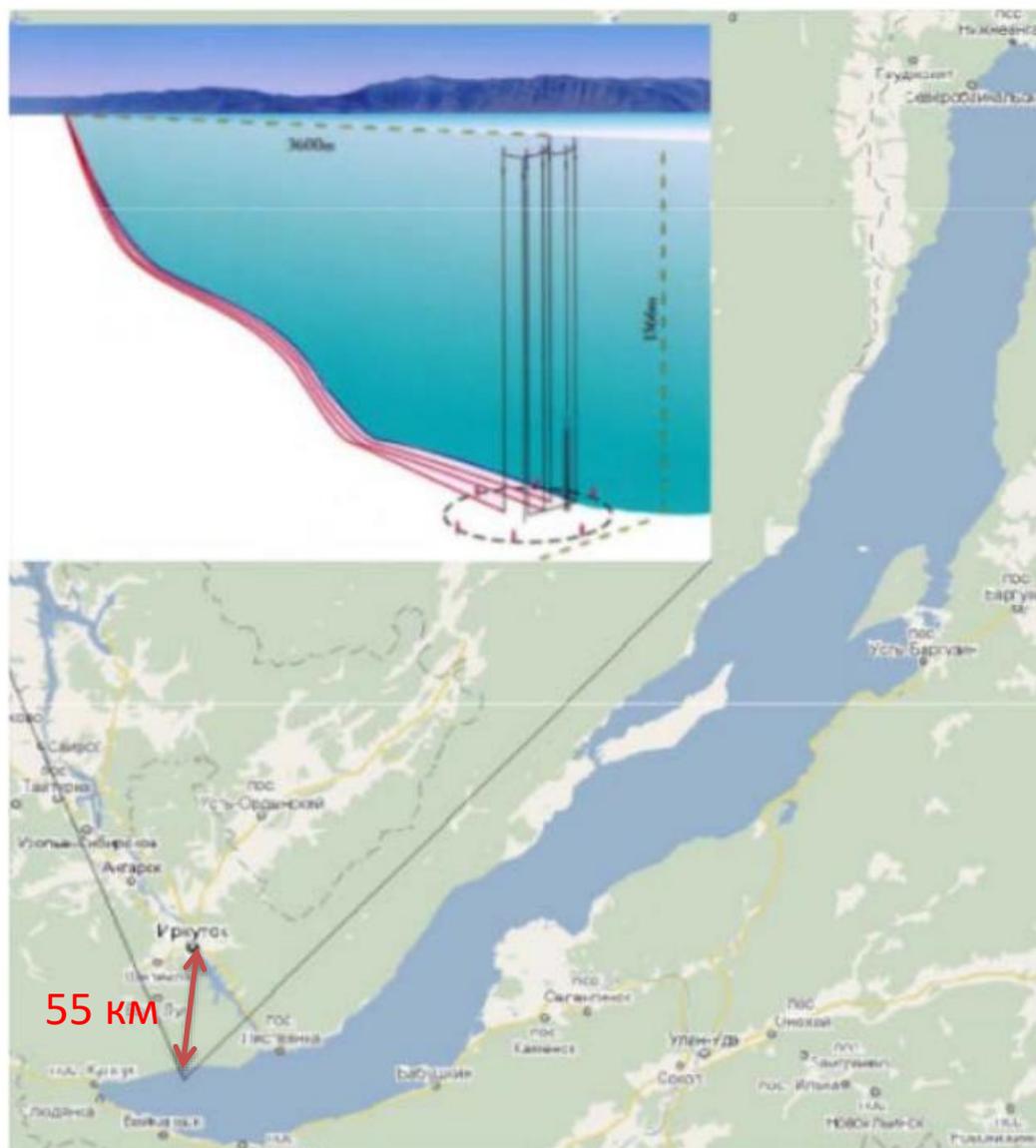
- для релятивистских частиц ($\beta \simeq 1$) и для показателя преломления дистиллированной воды ($n \simeq 1,3330$) черенковский угол равен $\Theta \simeq 41^\circ$.
- Количество черенковских фотонов N_γ , излучаемых на единицу длины волны λ и за пройденное расстояние dx частицей с зарядом e определяется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

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

где λ - 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



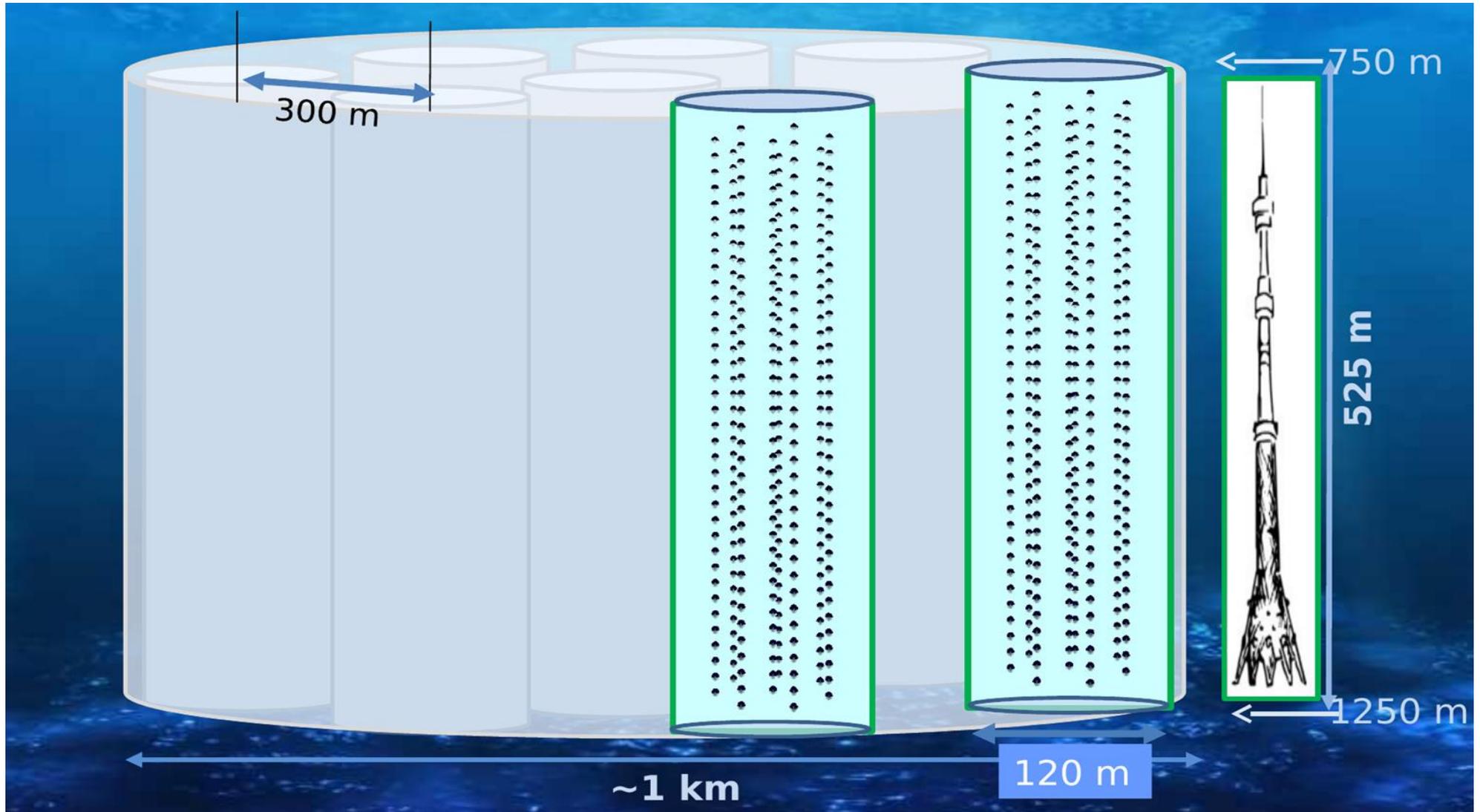
Оптический модуль

- 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



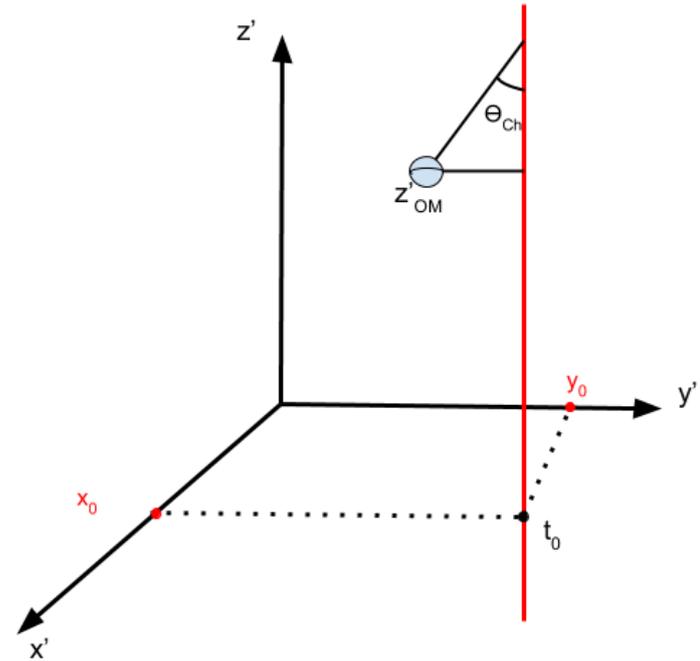
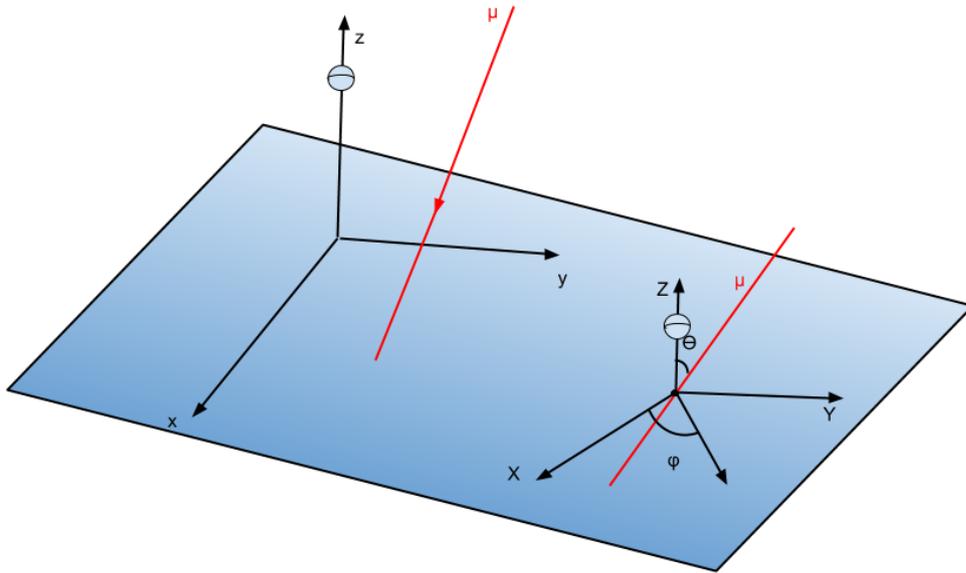
- Глубина озера 1366 м
- Гирлянда состоит 36 ОМ, шаг 15 м
- Центральная гирлянда и 7 периферийных гирлянд на расстоянии 60 м
- Расстояние между центральными гирляндами 300 м
- На данный момент установлены два кластера: 576 ОМ
- К 2020 году планируется развернуть 8 таких кластеров.

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

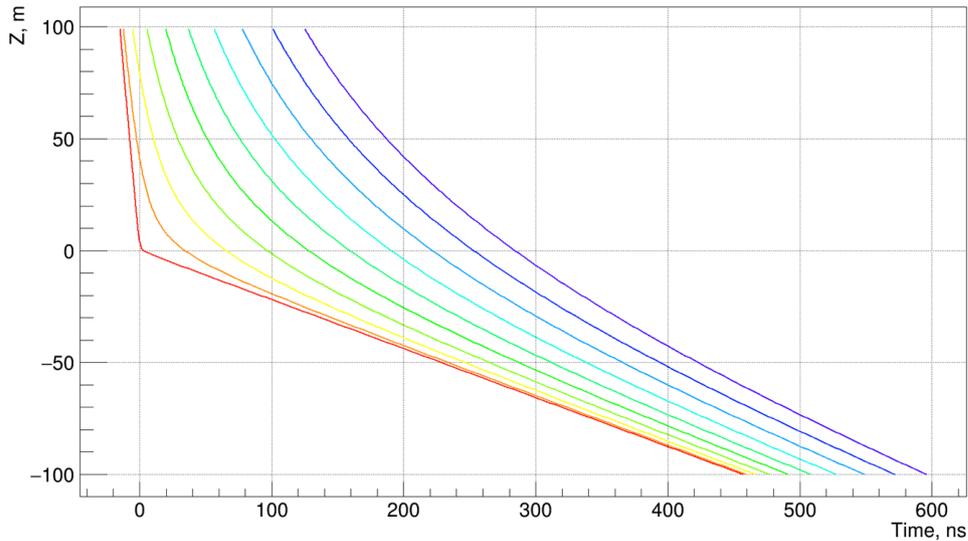
Параметризация трека мюона в установке



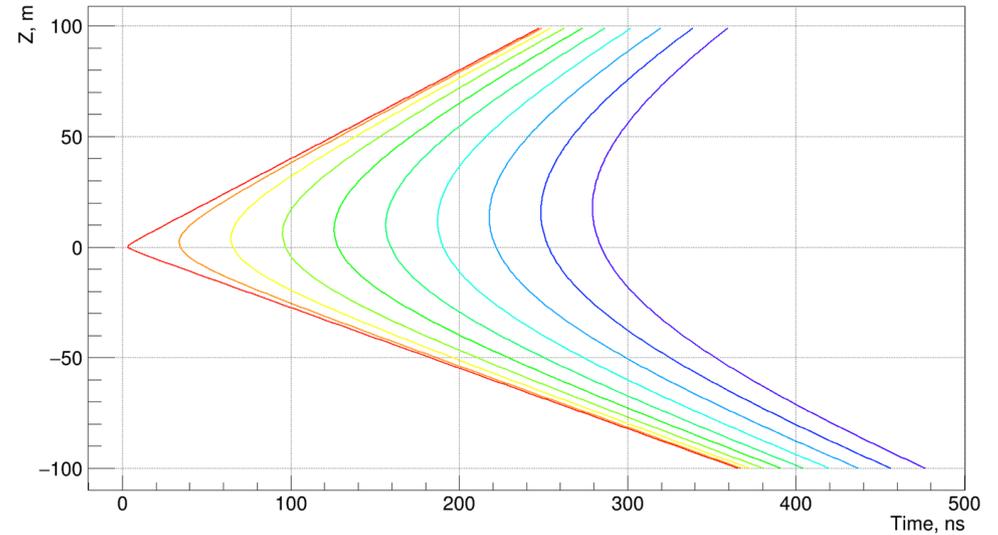
Время появления черенковского света на OM:

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

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

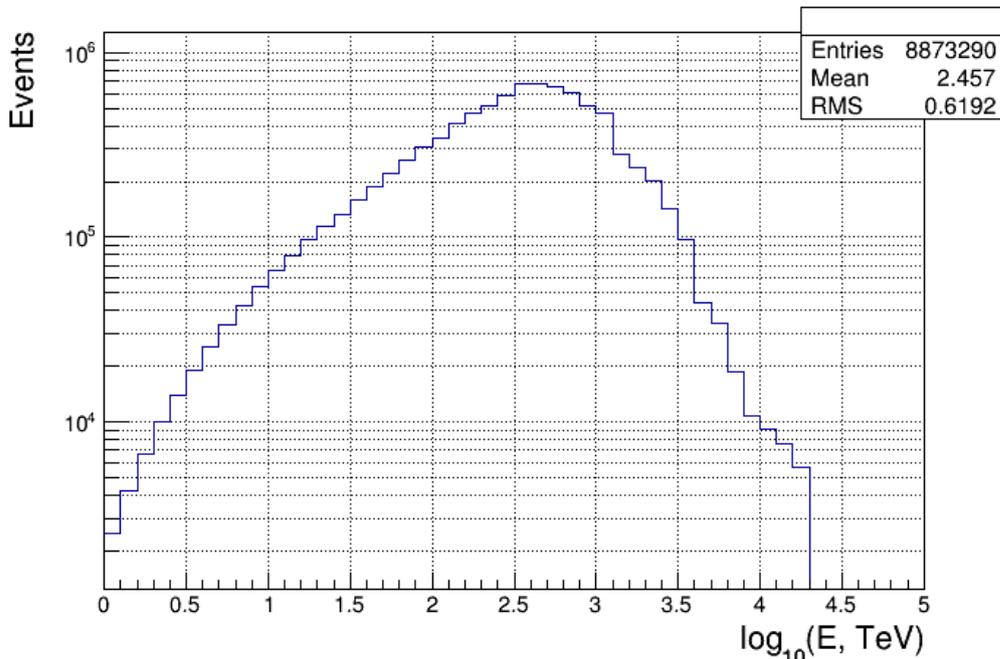
а) трек мюона с зенитным углом 45° ;

б) трек мюона с зенитным углом 80° .

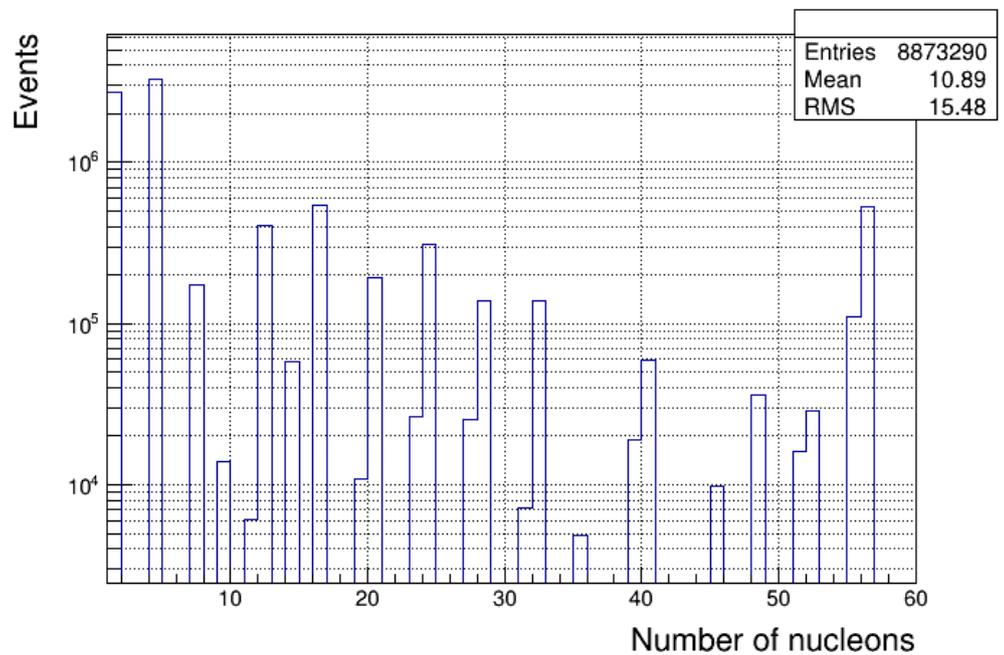
Точка $z = 0, t = 0$ определяет точку наибольшего сближения между треком и линией детектора. Красной кривой соответствует расстояние между треком и гирляндой равное 1 м, фиолетовой кривой - 91 м.

Анализ модельных данных

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

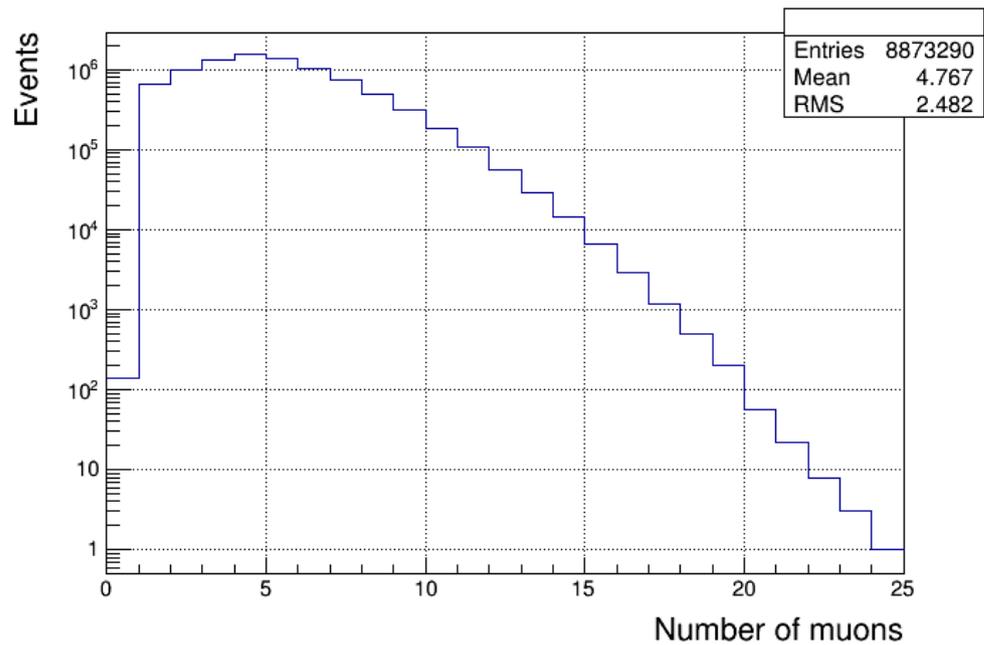


Распределение по энергиям первичных частиц космических лучей

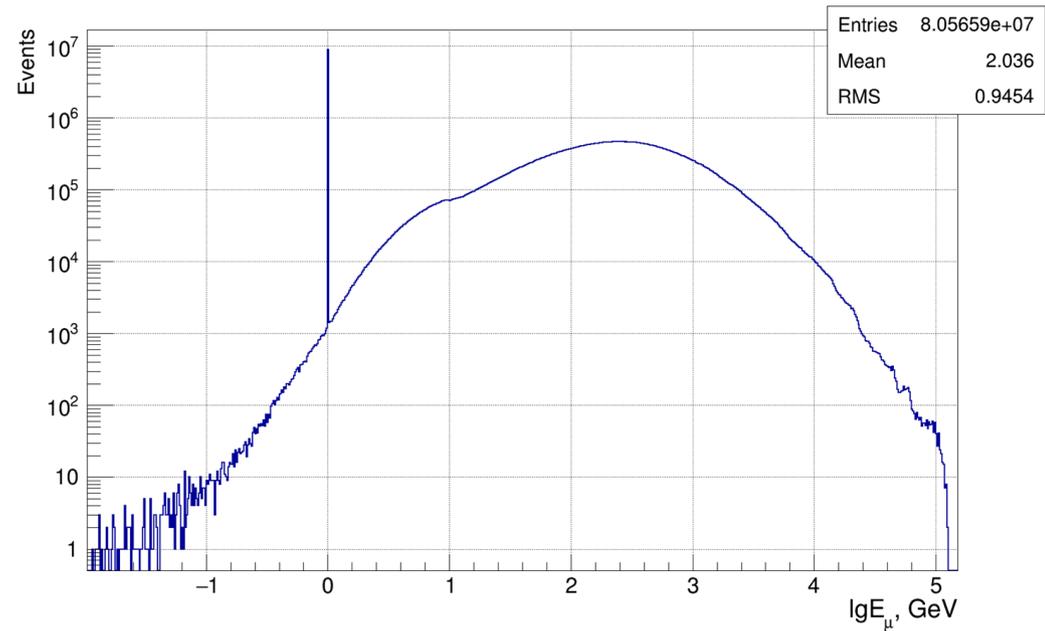


Зависимость количества событий от числа нуклонов первичной частицы

Анализ модельных данных

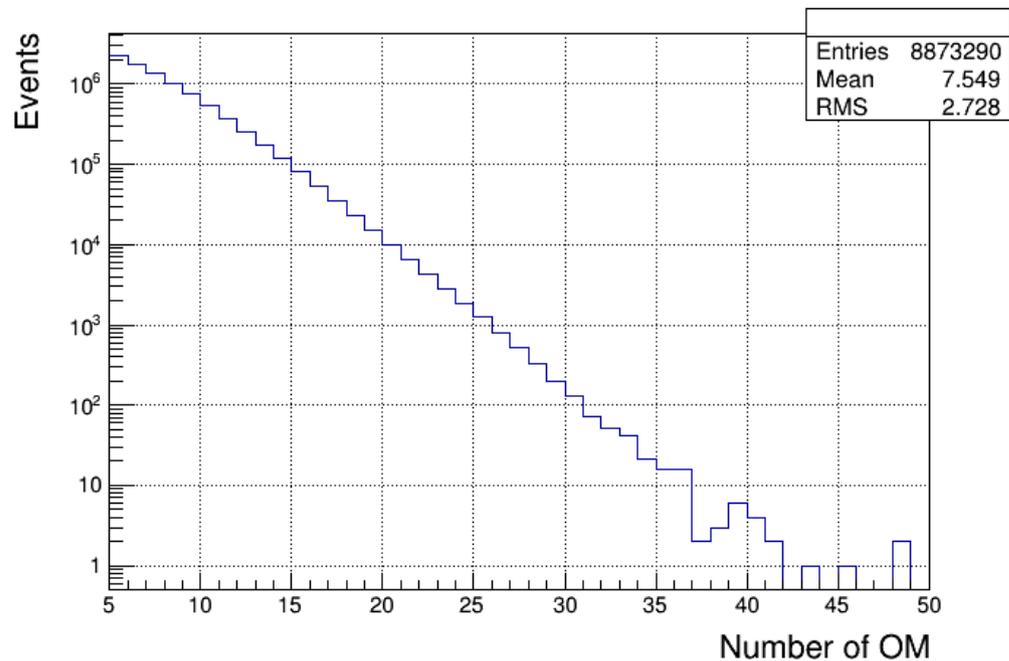


Зависимость количества событий от числа мюонов после фильтрации

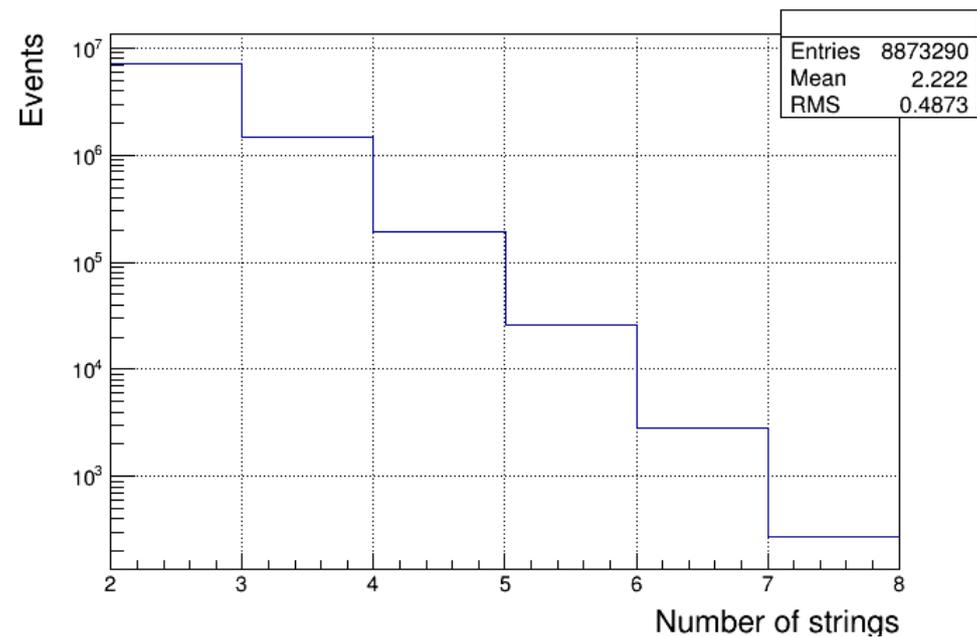


Энергетическое распределение мюонов на уровне установки

Анализ модельных данных

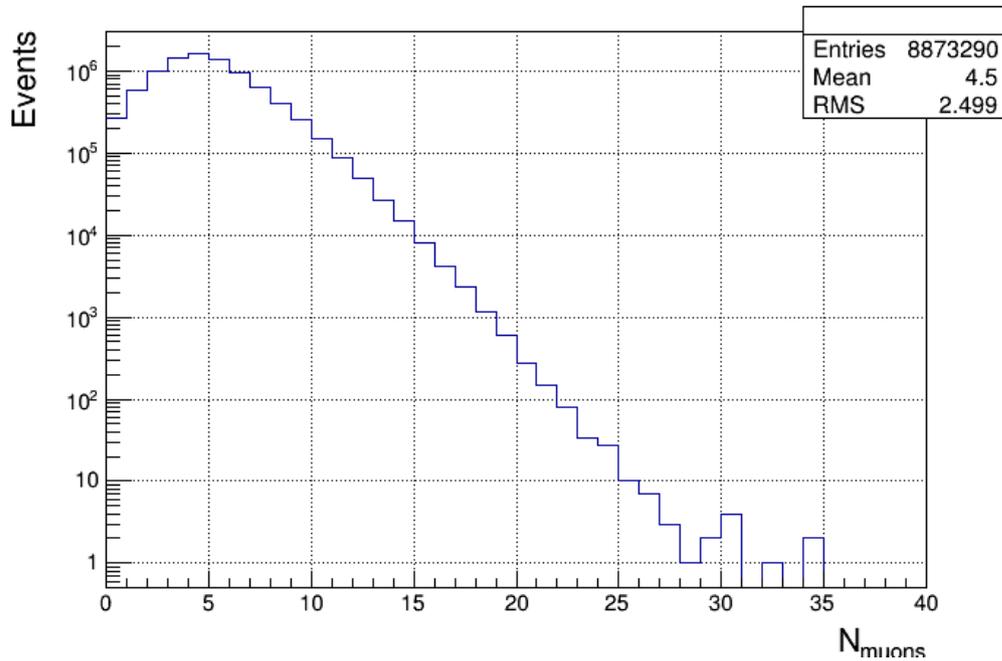


Зависимость количества событий от числа сработавших ОМ

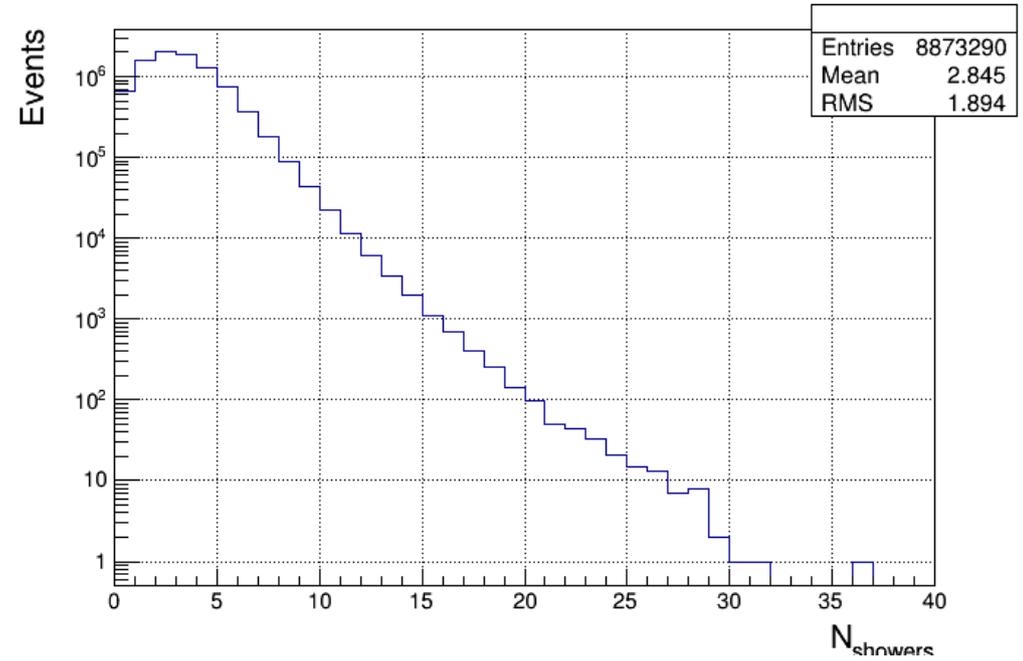


Зависимость количества событий от числа сработавших гирлянд

Анализ модельных данных

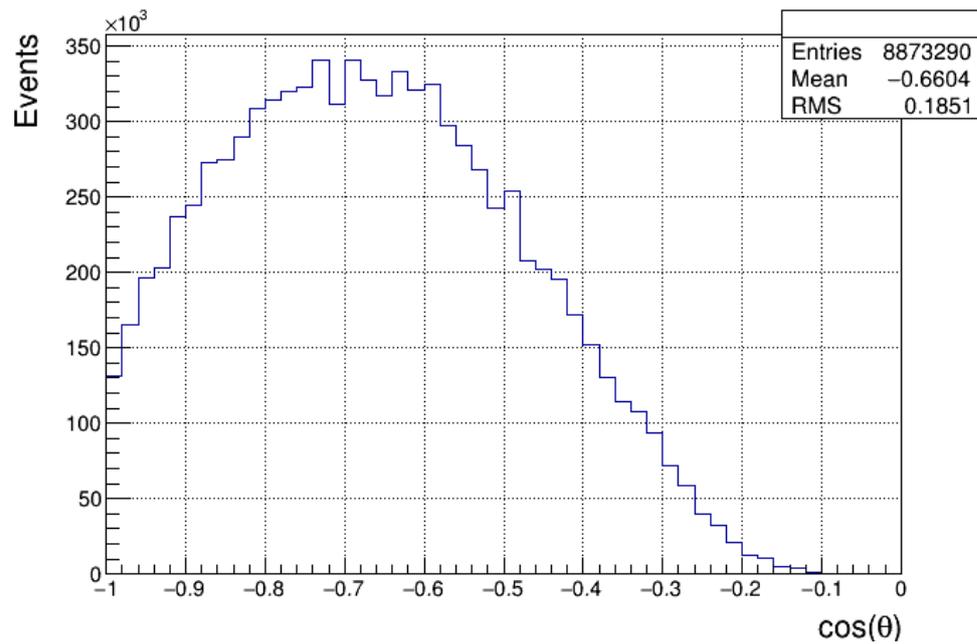


Зависимость количества событий от числа каналов, сработавших от черенковского света мюона

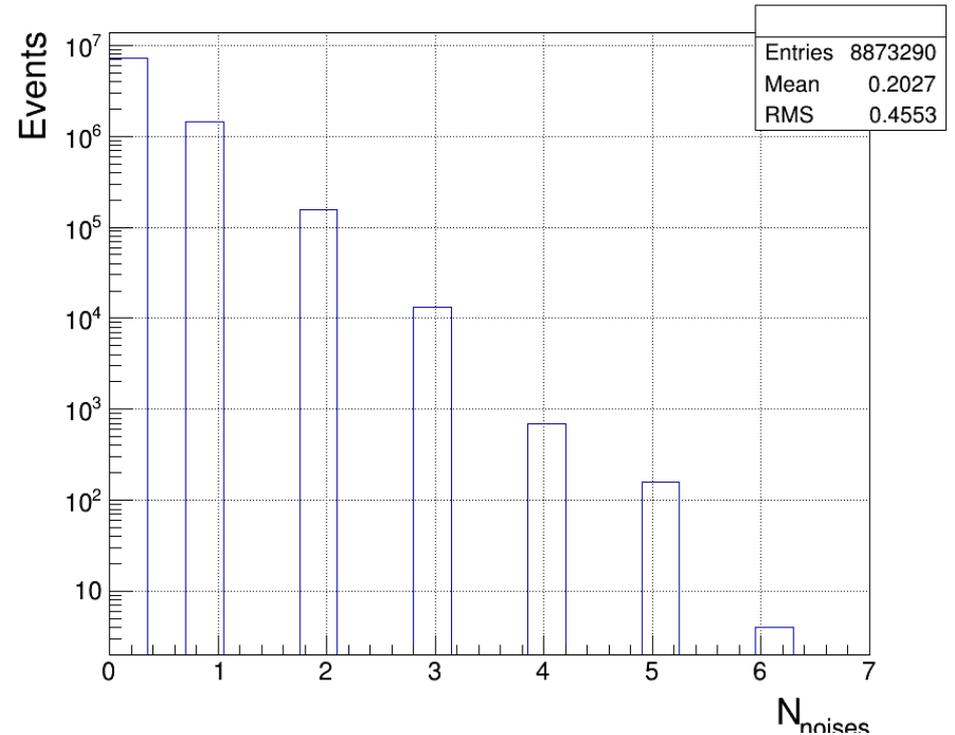


Зависимость количества событий от числа каналов, сработавших от черенковского света сопровождения мюона

Анализ модельных данных

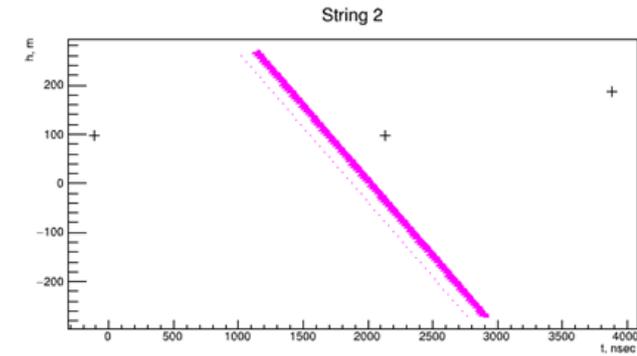
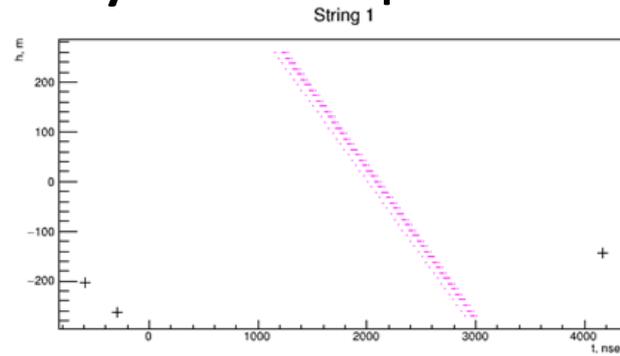


Зависимость количества событий от косинуса полярного угла

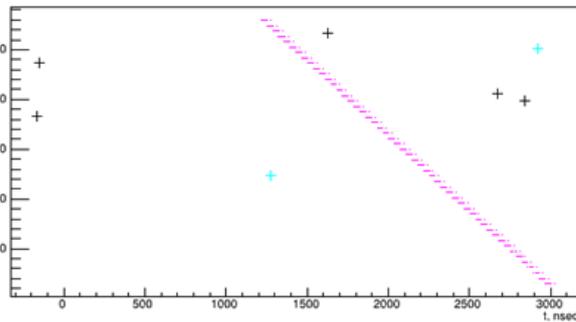


Зависимость количества событий от числа каналов, сработавших от свечения озера и темного тока ФЭУ

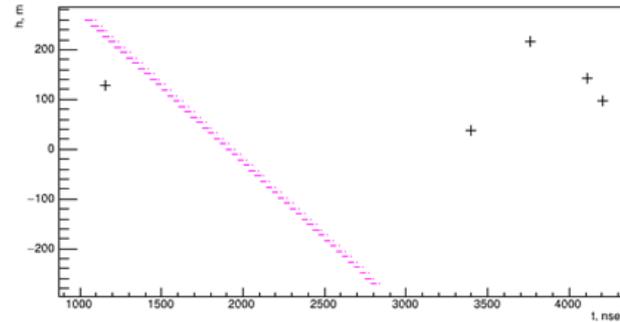
Пример визуализации события



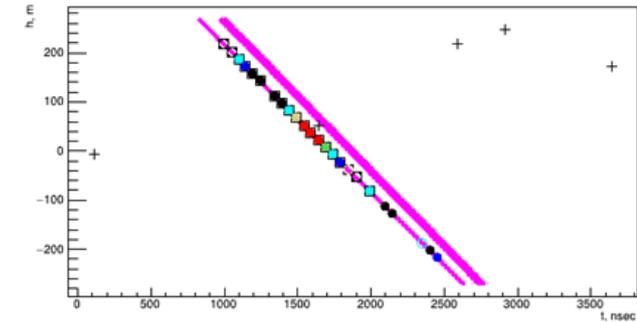
String 7



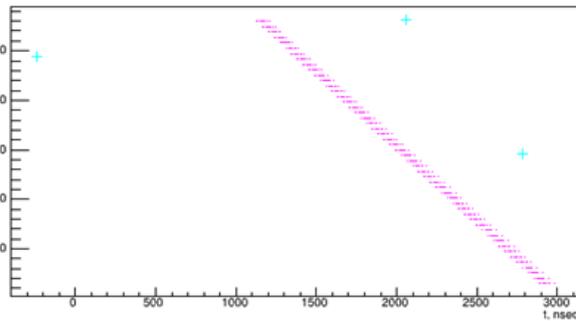
String 8



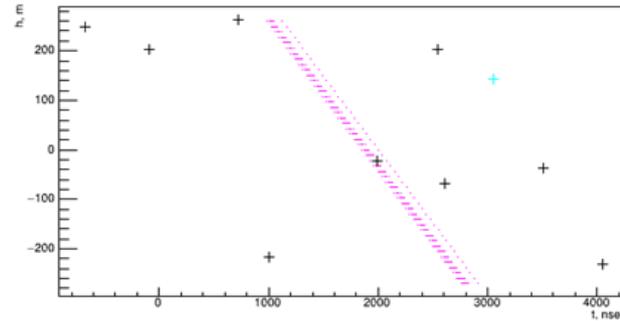
String 3



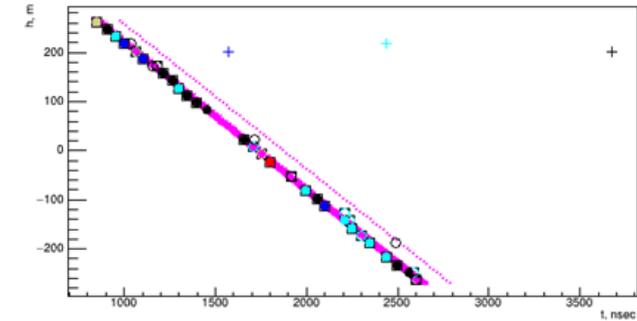
String 6



String 5



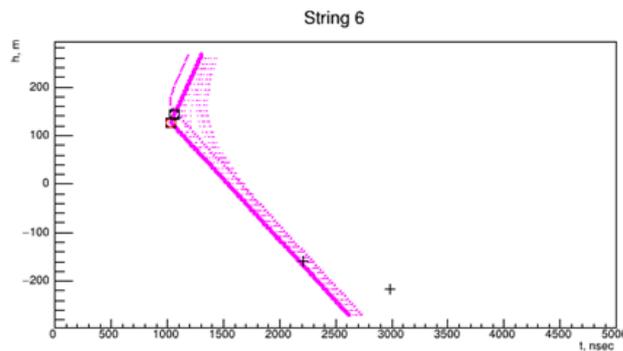
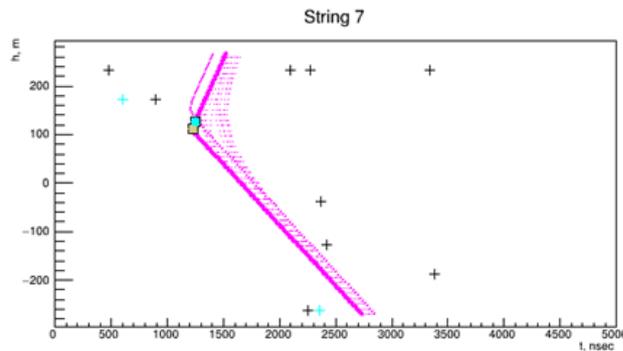
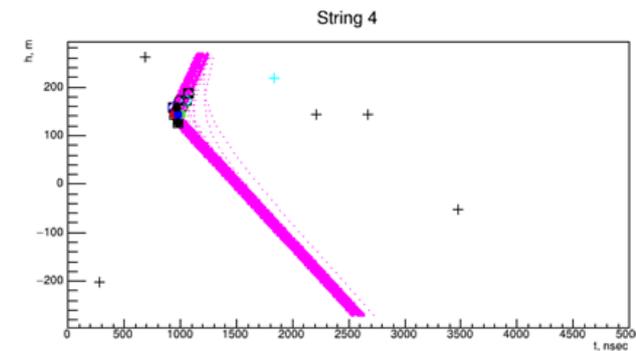
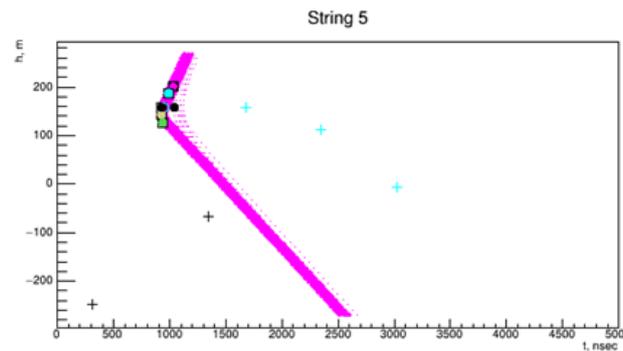
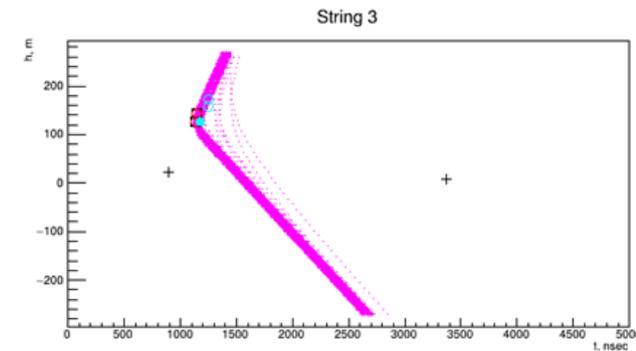
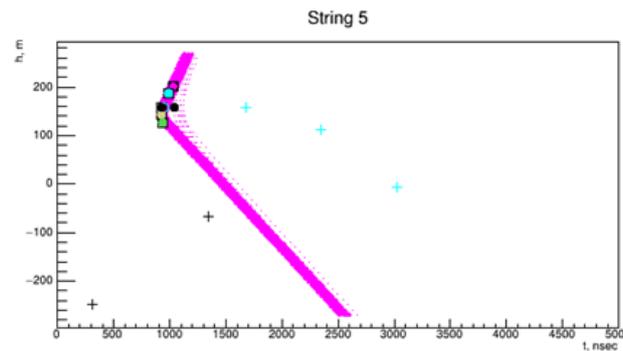
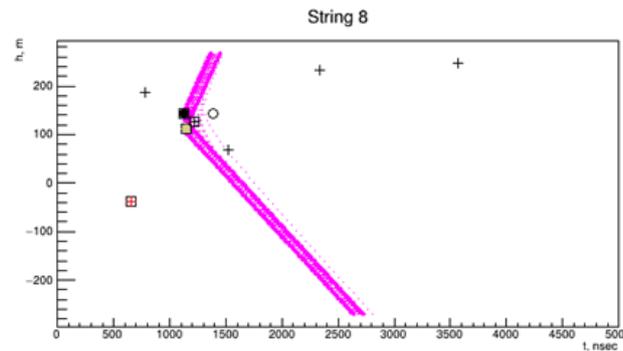
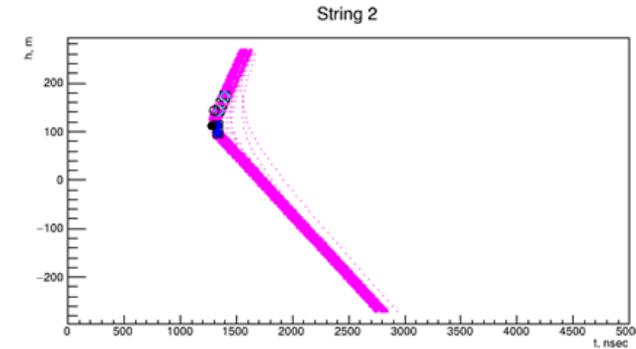
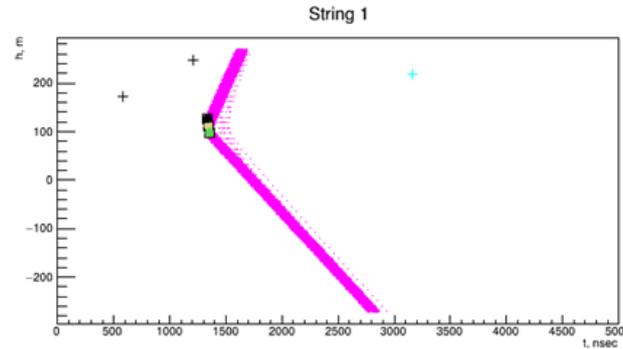
String 4



Характеристика события:

- Энергия первичных космических лучей 915.61 ТэВ,
- полярный угол 178.93° ,
- 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° ,
- 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!