

**Московский государственный университет**

**имени М.В. Ломоносова**

**Физический факультет**

**Кафедра физики элементарных частиц**

**КУРСОВАЯ РАБОТА**

на тему:

«Разработка ПО для моделирования эксперимента Baikal-GVD»

Выполнил:

студент 2 курса 212 группы

Зубченко Даниил Валерьевич

Научный руководитель:

д. ф.-м. н.

Наумов Дмитрий Вадимович

Консультант:

магистрант физического факультета МГУ

Завьялов Сергей Игоревич

Москва, 2023

## Содержание

1. Введение
2. Пакет моделирования для нейтринных телескопов NTSim
3. Моделирование фона от солнечного света
4. Заключение
5. Список литературы

## Введение.

Телескоп Baikal-GVD – самый большой в Северном полушарии и второй по размеру в мире. Телескоп находится в 3-4 километрах от берега на глубине приблизительно от 750 до 1250 метров. Главной задачей Baikal-GVD является наблюдение астрофизических нейтрино и определение их источников с помощью детектирования излучения Вавилова-Черенкова, испускаемого продуктами взаимодействий нейтрино. Независимой структурной единицей телескопа является кластер. На сегодняшний день введено в строй 12 кластеров, расположенных на расстоянии 250–300 м друг от друга. С 8 апреля 2023 года они работают в режиме набора данных. Каждый кластер представляет собой самостоятельный детектор из 8 вертикальных гирлянд, на которых размещены оптические модули (по 36 на каждой гирлянде). Компоненты оптического модуля находятся внутри сферы диаметром 42 сантиметра, изготовленной из стекла, выдерживающего большое давление. В настоящее время телескоп содержит около 3500 фотоприёмников. На данный момент телескоп обладает эффективным объёмом 0.5 кубического километра при регистрации ливневых событий взаимодействия нейтрино с энергиями выше 100 ТэВ. По проекту объём установки к 2027 году должен составить порядка одного кубического километра.

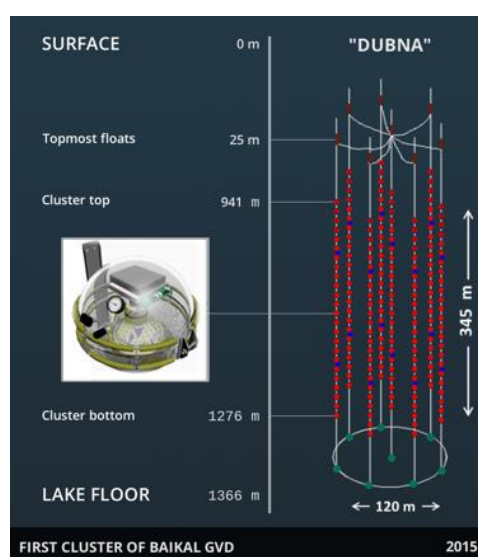


Рисунок 1: Схема одного из кластеров Baikal-GVD

## **Пакет для моделирования нейтринных телескопов NTSim.**

Для понимания процессов, происходящих в телескопе, разрабатываются пакеты программ для их моделирования. Одним из таких пакетов является NTSim – Neutrino Telescope Simulation. С его помощью можно моделировать различные частицы и знать, какие процессы стоит ожидать в эксперименте. Также разрабатывается визуальный многофункциональный интерфейс "VIOLINE" для представления результатов моделирования, позволяющий посмотреть на смоделированные процессы и прочесть данные о них.

Процесс моделирования начинается с определения трёх начальных условий: свойств среды, геометрии детекторов, а также первичных частиц, распространение которых нужно смоделировать. На данный момент в качестве первичной частицы можно выбрать любую частицу, включая нейтрино, лазерный свет, фотоны от Солнца.

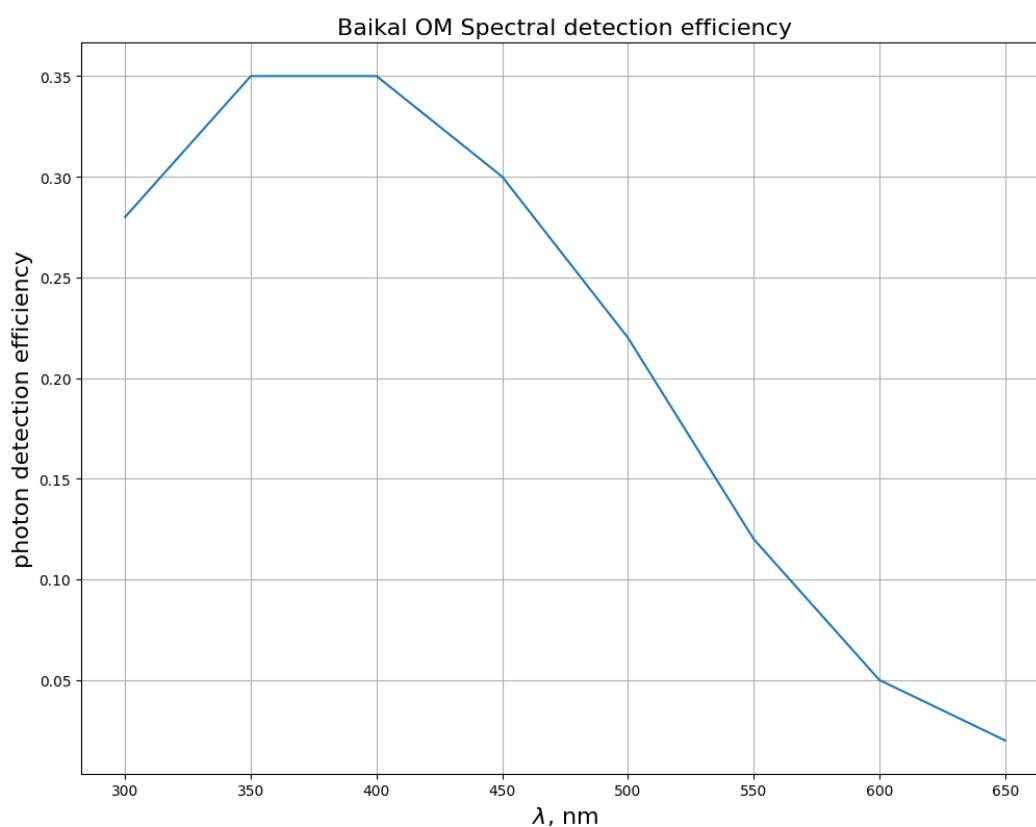
После инициализации среды и геометрии происходит конфигурация начального положения и параметров первичной частицы. Затем частицы «протаскиваются» через среду и считаются попадания фотонов в оптические модули с учётом заданных ранее параметров моделирования, относящихся к свойствам как среды и геометрии, так и первичной частицы, например, числа шагов рассеяния, анизотропии среды, клонирования, числа событий.

Объектами, с которыми работает NTSim, являются события, частицы, фотоны, треки, взаимодействия с детекторами (gEvents, gParticles, gPhotons, gTracks, gHits). Объект класса gEvent состоит из объектов остальных классов. Именно они и являются данными о моделировании, которые записываются в файл формата HDF5, представляющий собой таблицы. Каждый из объектов имеет собственные характеристики, свойственные его классу, к примеру, координаты, энергии, проекции импульса частиц.

## Моделирование фона от солнечного света.

Первые оптические модули расположены на глубине приблизительно 750 метров от поверхности озера. Возникает вопрос: достигнут ли фотоны, пришедшие от Солнца, этой глубины и какой фон они могут создать?

Фотоэлектронные умножители оптического модуля чувствительны не ко всему диапазону длин волн одинаково.



**Рисунок 2:** Спектральная чувствительность ФЭУ

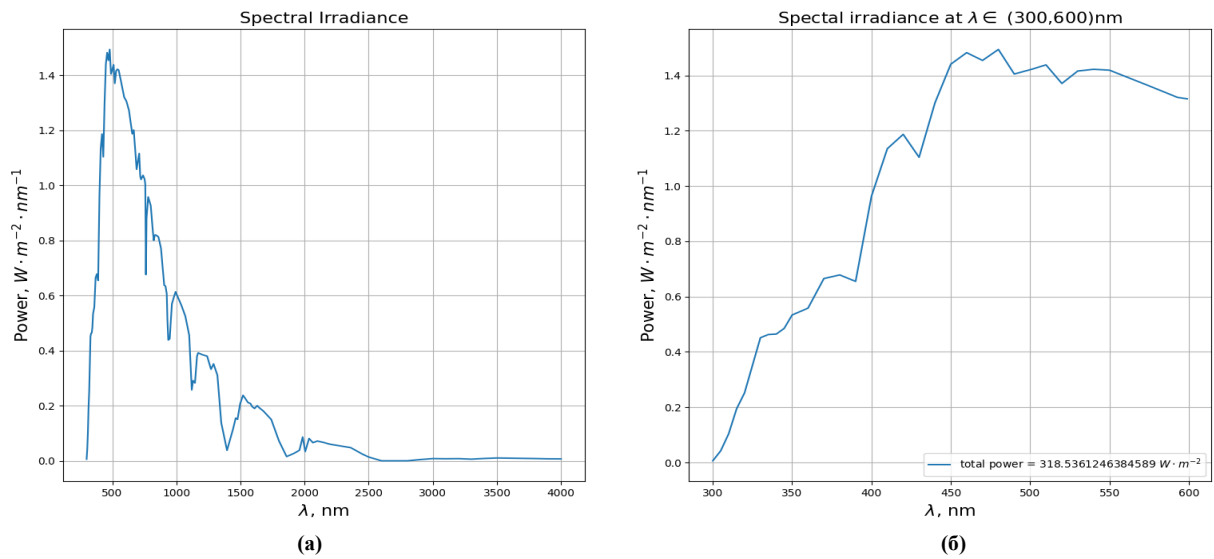
Спектральная чувствительность ФЭУ довольно быстро убывает после максимума, поэтому для исследования был выбран интервал длин волн от 300 до 600 нанометров.

Излучение Солнца по своему спектральному составу близко к излучению абсолютно чёрного тела, максимум спектральной плотности которого

приходится на длину волны  $\lambda_{max} = 480$  нм. Зависимость спектральной плотности энергии абсолютно чёрного тела описывается формулой Планка:

$$\rho_{\lambda} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (1)$$

Для получения спектра излучения Солнца на поверхности Земли используется библиотека PVLIB Python.



**Рисунок 3:** Спектр излучения Солнца на поверхности озера. а) Для длин волн от 300 до 4000 нм.  
б) Для длин волн от 300 до 600 нм.

Зная спектр излучения Солнца, можно получить число фотонов каждой длины волн.

$$P_{\lambda} = \frac{E_{\lambda}}{m^2 \cdot \text{сек}} = \frac{N_{\lambda} \cdot hc}{m^2 \cdot \text{сек} \cdot \lambda} \quad (2)$$

$$n_{\lambda} = \frac{N_{\lambda}}{m^2 \cdot \text{сек}} = \frac{P_{\lambda} \cdot \lambda}{hc} \quad (3)$$

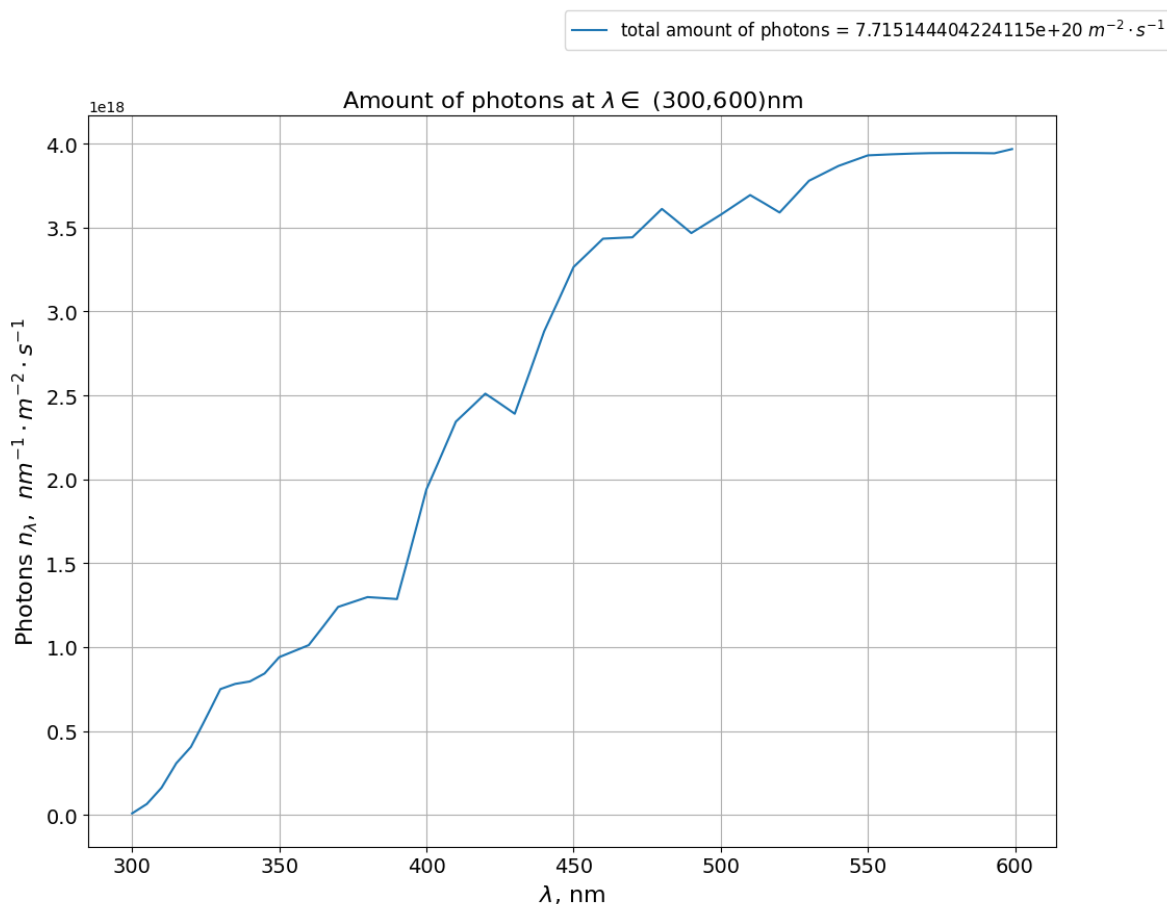
$P_{\lambda}$  — мощность света длины волны  $\lambda$ ,

$E_{\lambda}$  — энергия фотонов длины волны  $\lambda$ ,

$N_{\lambda}$  — число фотонов длины волны  $\lambda$ ,

$n_{\lambda}$  — число фотонов длины волны  $\lambda$  в ед. времени в ед. площади

$c$  – скорость света,  $h$  – постоянная Планка

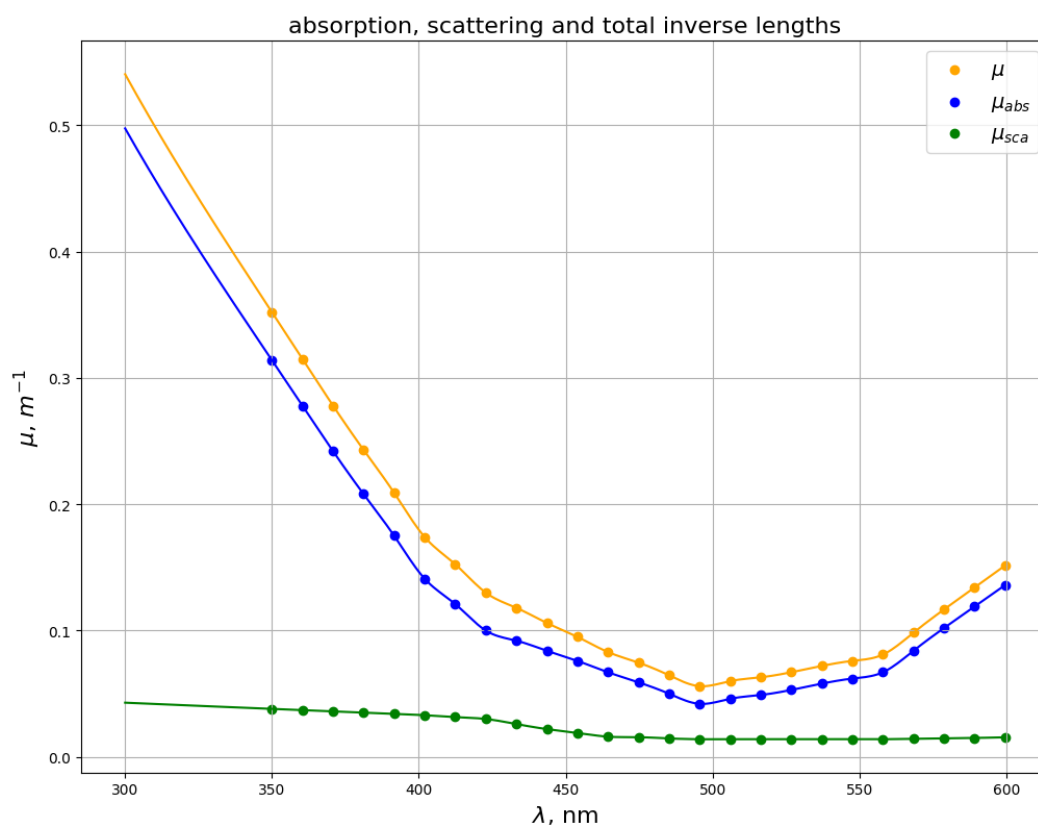


**Рисунок 4:** Спектр фотонов от Солнца длин волн от 300 до 600 нм, приходящих на поверхность озера

Проинтегрировав спектр фотонов от Солнца по длинам волн от 300 до 600 нанометров, была получена оценка общего количества фотонов в этом интервале равная  $7,715 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Распространение в среде столь большого числа частиц нельзя смоделировать, поэтому в генераторе фотонов от Солнца создаются «банчи» с таким количеством фотонов, которое может вычислить компьютер. Фотоны в банче имеют такой же спектр, как и реальные, однако каждый смоделированный фотон определённой длины волны несёт в себе информацию о нескольких реальных частицах той же длины волны. Отношение общего числа фотонов к количеству смоделированных частиц является весом смоделированных фотонов. Приходящие на поверхность озера фотоны можно распределить по кругу

заданного радиуса или пустить их все в одну точку. Помимо координаты на поверхности в аргументах моделирования можно указать дату и время с точностью до минуты, в которые будет вычислен как спектр излучения, так и угол падения на гладь воды с учётом долготы, широты и высоты озера над уровнем моря. Смоделированные банчи фотонов являются объектами класса `gPhotons`, записывающегося в файл.

Распространение света в воде определяется двумя основными явлениями – поглощением и рассеянием. В первом случае фотон пропадает, во втором он меняет направление. Эти явления принято описывать с помощью длины поглощения и длины рассеяния, которые зависят не только от среды, но и от длины волны излучения.



**Рисунок 5:** Обратные длины поглощения и рассеяния фотона в воде Байкала, а также их сумма

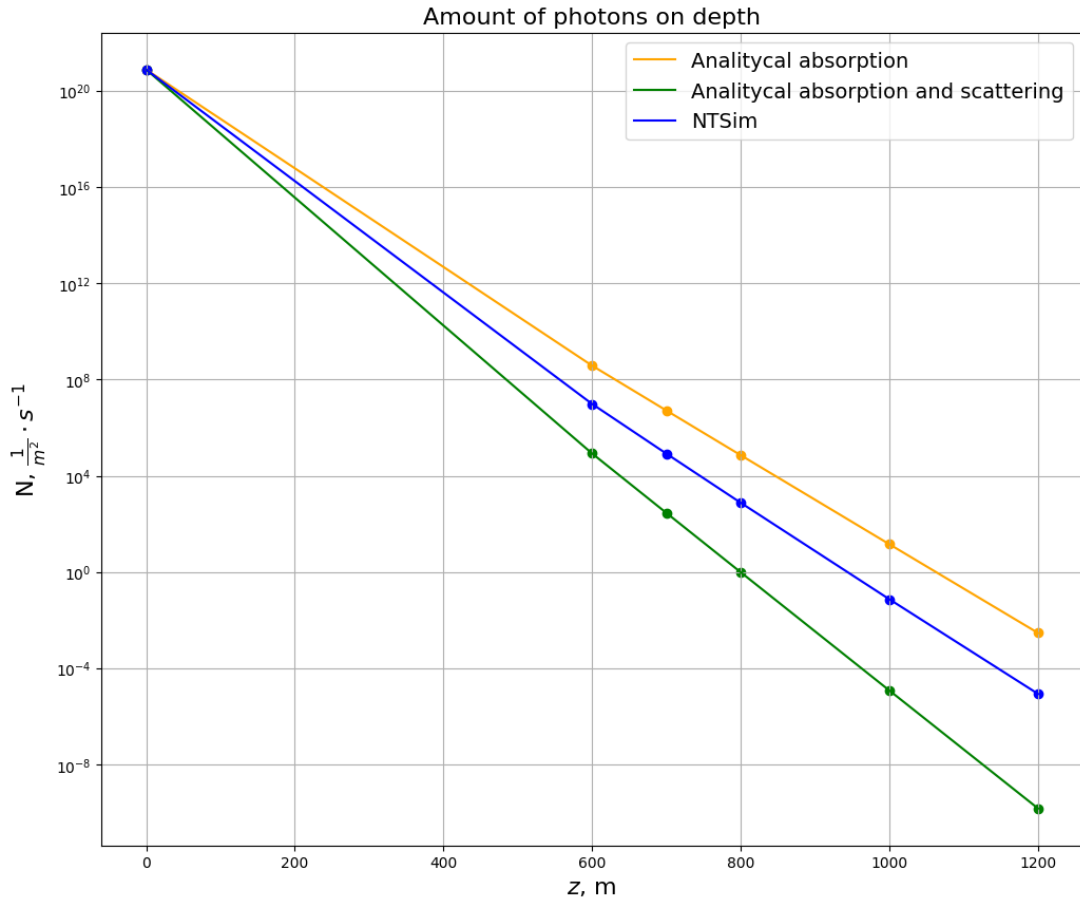
Число частиц длины волны  $\lambda$ , распространяющихся в среде вдоль оси  $OZ$ , задаётся выражением:

$$n_\lambda = n_0 \cdot e^{-\mu z} \quad (4)$$

$$\mu = \mu_{abs} + \mu_{sca} \quad (5)$$

$\mu_{abs}$  – обратная длина поглощения,  $\mu_{sca}$  – обратная длина рассеяния,

$n_0$  – число частиц в точке  $z = 0$

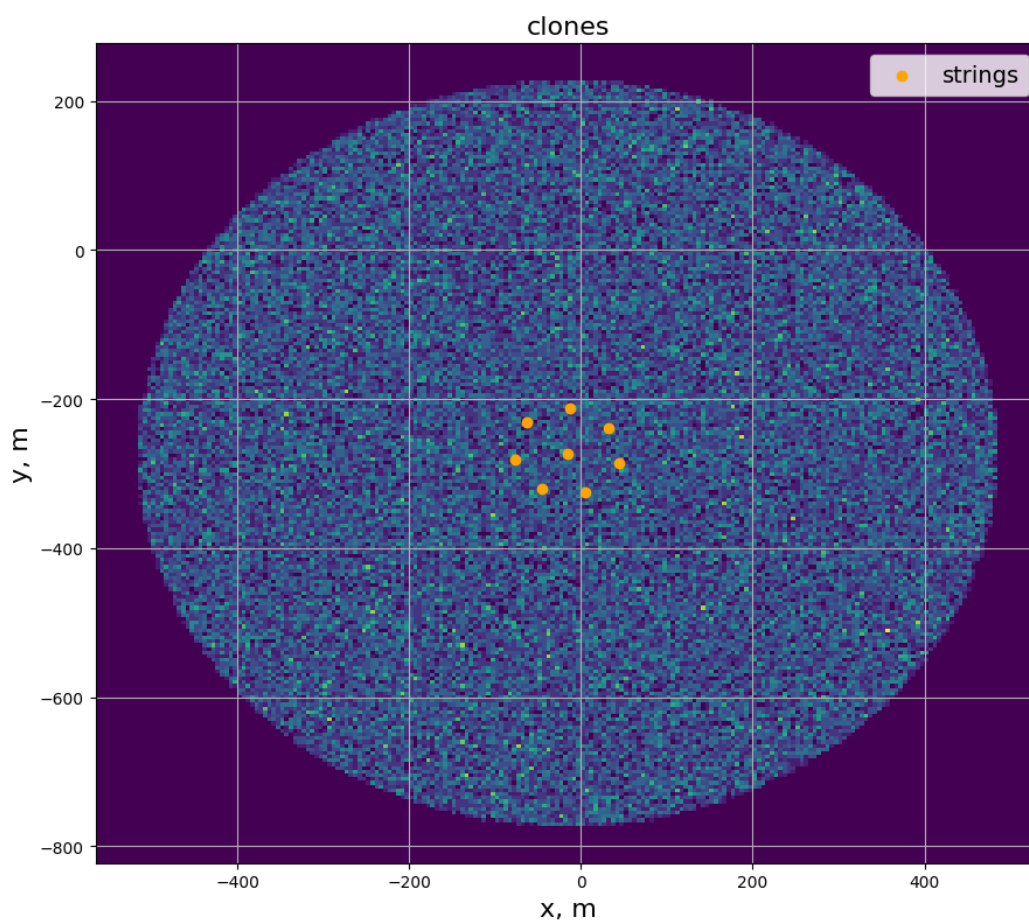


**Рисунок 6:** Зависимость числа фотонов от глубины.

График зависимости числа фотонов от глубины, полученный через NTSim, лежит между двумя прямыми, отвечающими аналитическим зависимостям. Рассеявшийся фотон всё ещё может достичь некоторой глубины, но ему для этого понадобится больше времени, поэтому NTSim даёт большее число частиц, чем зависимость, учитывающая поглощение вместе с рассеянием. В то же время количество фотонов, оставшихся после поглощения, больше числа частиц, полученного через NTSim, который использует методы Монте-Карло. Таким образом, задача распространения света в пространстве требует другого аналитического решения.

С увеличением глубины озера число фотонов будет уменьшаться, а значит и фон, который они могут дать, будет снижаться. NTSim протаскивает банчи фотонов с учётом характеристик явлений поглощения и рассеяния. После того, как получено распространение всех частиц, они клонируются. Алгоритм клонирования включает в себя следующее:

- 1) По заданному радиусу области, внутри которой должны находиться частицы, вычисляется смещение координат в плоскости  $(x, y)$  – массив случайных чисел, подчиняющихся равномерному распределению.
- 2) К координатам каждого шага рассеяния фотонов прибавляется смещение, то есть меняют положение не только фотоны на поверхности, но и фотоны на глубине.
- 3) Пункты 1) и 2) повторяются  $n_{clones}$  раз, где  $n_{clones}$  – число клонов.

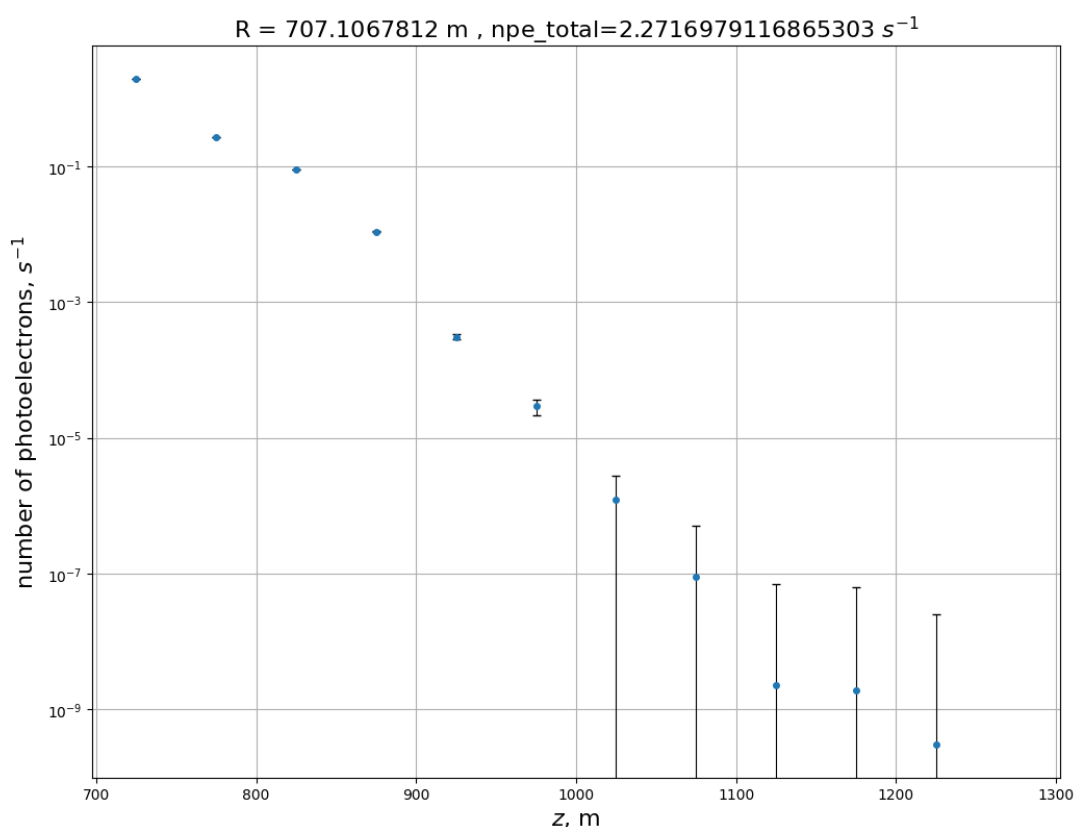


**Рисунок 7:** Распределение клонов по поверхности

Таким образом, NTSim не протаскивает фотоны ещё раз, что позволяет ускорить процесс моделирования.

За данные о взаимодействиях именно клонированных фотонов с оптическими модулями отвечают объекты класса gHits, которые несут в себе информацию о номере оптического модуля, координатах, времени попадания фотона в детектор, уникальном номере фотона, специальных весах.

По данным моделирования, записанным в HDF5 файле, можно вычислить число фотоэлектронов.



**Рисунок 8:** Зависимость числа фотоэлектронов от глубины озера

Было смоделировано распространение 100000 фотонов, приходящих в точку, и 500000 клонов. Общее число фотоэлектронов в одном кластере составило 2,272 с<sup>-1</sup>, оно и является фоном, создаваемым фотонами, пришедшими от Солнца. Видно, что верхние оптические модули, расположенные на глубинах

от 700 до 800 метров, будут заметно засвечены. Ожидаемое для этих этажей оптических модулей число фотоэлектронов в секунду, полученное исходя из спектральной чувствительности ФЭУ и зависимости числа фотонов от глубины имеет порядок  $10^3$ .

Глубина, м	Число фотоэлектронов, $s^{-1}$
725	$1,9041 \mp 0,0020$
775	$0,2668 \mp 0,0007$
825	$0,0896 \mp 0,0004$

Для уточнения полученной оценки необходимо набрать статистику моделирования с большим количеством клонов и фотонов в каждом клоне.

### **Заключение.**

В ходе работы были освоены методы численного моделирования, а также библиотеки языка программирования python: PVLIB, NumPy, SciPy, Mathplotlib, ntsim. Была изучена физика процессов распространения частиц в среде. Было проведено исследование фона, создаваемого солнечным светом. Фон убывает с увеличением глубины.

## **Список литературы.**

- 1) A. Avrorin, V. Aynutdinov, I. Belolapnikov et al. «Asp-15—A stationary device for the measurement of the optical water properties at the NT200 neutrino telescope site»; <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.06.035>, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2012
- 2) Л. П. Авакянц, С. В. Колесников, А. М. Салецкий. «Введение в квантовую физику. Методика решения задач»— М.: Физический факультет МГУ, 2012.