

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Филиал федерального государственного автономного образовательного  
учреждения высшего образования «Национальный исследовательский  
ядерный университет МИФИ» в городе Алматы (АФ НИЯУ МИФИ)

УДК 539.1

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Моделирование кластера нейтринного телескопа BAIKAL-GVD с  
использованием пакета компьютерного моделирования Geant4**

Научный руководитель \_\_\_\_\_ Дик В.Я.

Студент \_\_\_\_\_ Громов Т.Р.

Алматы 2025

# Содержание

|   |          |
|---|----------|
| <b>1 Введение . . . . .</b>                 | <b>2</b> |
| 1.1 Общие сведения . . . . .                | 2        |
| 1.2 Как устроен оптический модуль . . . . . | 4        |
| <b>2 Цели и Задачи . . . . .</b>            | <b>6</b> |
| <b>3 Моделирование . . . . .</b>            | <b>7</b> |
| 3.1 Geant4 . . . . .                        | 7        |
| 3.2 Реализация проекта . . . . .            | 8        |
| 3.3 Анализ данных . . . . .                 | 9        |
| 3.4 Вывод . . . . .                         | 11       |

# 1. ВВЕДЕНИЕ

## 1.1 Общие сведения

Нейтрино — это фундаментальные частицы, относящиеся к классу лептонов, которые не участвуют ни в сильных, ни в электромагнитных взаимодействиях. Они не имеют ни цветового заряда, ни электрического, и поэтому путь, проходимый нейтрино от источника до регистрирующего устройства измеряется тысячами световых лет, в зависимости от энергии частицы. Эти свойства данной частицы делают ее исследования ключевыми для поиска ответов на вопросы о природе темной материи, о ассиметрии материи и антиматерии, о внутреннем устройстве звезд, а также поиска информации о ранней вселенной. Однако эти же свойства имеют обратный эффект, делая нейтрино крайне неуловимыми для детекторов[1].

Baikal Gigaton Volume Detector (BAIKAL-GVD) — это проект нейтринного телескопа размером 1 кубический километр, который в настоящий момент уже достиг размеров в 0.7 кубического километра и продолжающий увеличиваться в объеме. Данный телескоп предназначен для регистрации и исследования потоков нейтрино сверхвысоких энергий ( $>10^{15}$  эВ) от астрофизических источников. Телескоп состоит из 14 независимых кластеров (см. рисунок 1.1), каждый из которых подключен к береговой станции посредством своего оптоэлектрического кабеля. Каждый кластер включает в себя 8 или 9 гирлянд, содержащие по 36 оптических модулей (ОМ)[3]. Оптические модули регистрируют черенковское излучение, создаваемое ультраквантами вторичными заряженными частицами, рождающимися при взаимодействии нейтрино высоких энергий. Примеры подобных реакций описываются формулами (1.1) и (1.2).



Доминирующим источником нейтринных событий, регистрируемых телескопом, являются атмосферные нейтрино. Учитывая, что поток атмосферных нейтрино резко падает с ростом энергии, предпочтительный энергетический диапазон для наблюдения астрофизических нейтрино, находится выше 30 ТэВ[1]. Возможными источниками астрофизических нейтрино считаются: двойные звезды, активные ядра галактик(блазары), вспышки гамма-излучения.

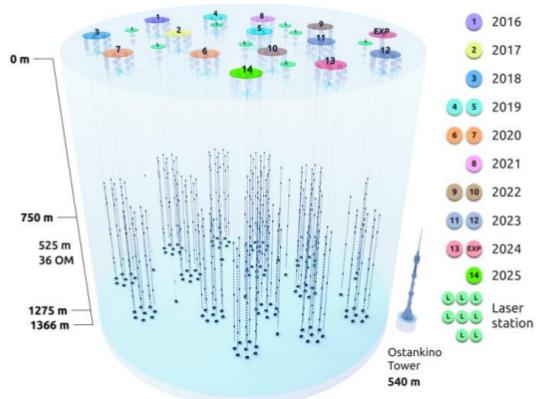


Рисунок 1.1 – Нейтринный телескоп BAIKAL-GVD в конфигурации, развернутой в феврале-марте 2025 года

## 1.2 Как устроен оптический модуль

Оптический модуль состоит из следующих компонент(см.рисунок 1.2):

- глубоководный корпус и разъем(SubConn Low Profile 5-контактный), узел крепления к тросу, магнитный экран и иммерсионный материал;
- фотодетектор;
- блок электроники;

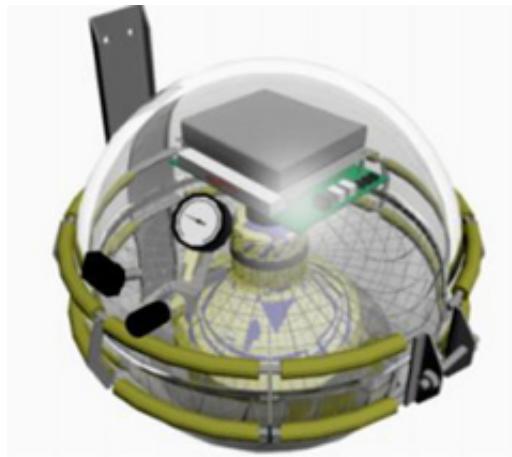


Рисунок 1.2 — Модель оптического модуля BAIKAL-GVD

Пермаллоевый экран окружает фотоэлектронный умножитель(ФЭУ) и экранирует его от магнитного поля Земли. Глубоководный разъем используется для передачи аналоговых импульсов, питания и медленного управления - низкоскоростной связи для настройки и мониторинга ОМ. Воздух в сфере может быть откачен до давления 0.7 атм. В качестве оптического детектора для ОМ выбран ФЭУ Hamamatsu R7081-100. Модель имеет полусферический SBA фотокатод диаметром 10 дюймов и квантовой эффективностью(доля чerenkovских фотонов, порождающих фотоэлектроны в ФЭУ) в пике до 35%. Для достижения требуемой величины однофотоэлектронного сигнала(25-30 мВ) сигнал с ФЭУ необходимо усиливать. Усилитель состоит из двух каналов. Первый из каналов с коэффициентом усиления  $\sim 14$  формирует аналоговый сигнал для АЦП. Второй канал имеет коэффициент усиления  $\sim 21$ ,

эти сигналы поступают на счетчик шумовых импульсов контроллера ОМ для измерения уровня шумов канала[5].

Питание ФЭУ осуществляется через пассивный высоковольтный делитель с сопротивлением 18 МОм и высоковольтный блок с положительной полярностью[5].

Калибровочная система ОМ состоит из двух источников света и генератора сигналов, имитирующих импульс с ФЭУ(проверочный импульс). Светодиодный источник света включает в свой состав синий светодиод Kingbright L7113 PBC-A и схему управления-драйвер светодиода. Длительность светового импульса составляет величину 5-7 нс[5].

Система управления оптическими модулями разработана на основе микроконтроллера SiLabs C8051F121. В функции микроконтроллера входит управление ОМ и мониторинг значений основных параметров ОМ (температуры, скорости счета шумов ФЭУ, уровней высоковольтного напряжения ФЭУ, напряжений электропитания ОМ)[5].

Перед непосредственным погружением каждый оптический модуль проходит испытания всех электронных компонентов, калибровочные процессы, а также стресс-тесты в различных режимах работы. Проверяется функционирование высоковольтного блока, фотоэлектронного умножителя, усилителей, контроллера и системы медленного управления. Финальные испытания ОМ проводятся в экранированном темном боксе с помощью цифрового запоминающего осциллографа(LeCroy HDO 4034). Оптические модули подключаются к входам осциллографа 90-метровыми коаксиальными кабелями, идентичными кабелям подводных ОМ. Процедуры испытаний проводятся после не менее чем двухчасовой экспозиции в темноте при включенном высоком напряжении ФЭУ. В качестве калибровочных источников света используются внутренние светодиоды ОМ. Таким образом выполняется установка рабочего напряжения, измерение усиления, регистрация спектра одиночного фотоэлектрона.[5][4]

## 2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

**Целью** данной научно-исследовательской работы является изучение и освоение компьютерного моделирования с использование пакета Geant4 с последующем анализом прохождения мюона с энергией 200 ГэВ через водный кластер нейтринного телескопа BAIKAL-GVD.

**Задачи:**

- Изучение структуры, архитектуры и принципов работы программного пакета для компьютерного моделирования Geant4.
- Проектирование и разработка модели кластера нейтринного телескопа BAIKAL-GVD.
- Моделирование прохождения мюонов высокой энергии через водный объем кластера и анализ характеристик их траекторий и энергетических потерь.

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

#### 3.1 Geant4

Geant4 — пакет библиотек на C++ для компьютерного моделирования процессов прохождения элементарных частиц через вещество, на основе совокупности подходов, вместе называемых «метод Монте-Карло». Под методом Монте-Карло понимается численный метод решения математических задач при помощи моделирования случайных величин.[2]

Программный пакет Geant4 предоставляет широкий набор инструментов для описания геометрии эксперимента, моделирования физических взаимодействий частиц с веществом, отслеживания их траекторий, а также регистрации отклика детекторов. Основные функциональные компоненты Geant4 включают:[2]

- Геометрия — это анализ физической схемы эксперимента, включая детекторы, поглотители и т. д., и рассмотрение того, как эта схема повлияет на путь частиц в эксперименте.
- Трекинг — это имитация прохождения частицы через материю. Это предполагает рассмотрение возможных взаимодействий и процессов распада.
- Моделирование отклика детектора при прохождении частиц через чувствительные объемы.

## 3.2 Реализация проекта

Итоговая модель в Geant4 представляет собой цилиндр длиной 525 метров и радиусом 60 метров, заполненный водой и имитирующий кластер нейтринного телескопа BAIKAL-GVD.

В данный водный объем запускается первичная частица — мюон с энергией 200 ГэВ. Выбор энергии обусловлен тем, что минимальная энергия срабатывания установки составляет порядка 100 ГэВ, а увеличение энергии мюона позволяет обеспечить его прохождение через полный объем кластера с наибольшей вероятностью. Начальное направление движения мюона совпадает с центральной осью цилиндра и ориентировано перпендикулярно его основанию.

По завершении каждого события регистрируются координаты выхода мюона, а также суммарные энергетические потери в процессе прохождения среды. Далее, полученные данные используются для анализа траектории мюона, определения угла отклонения от исходного направления и расстояния смещения относительно центральной оси.

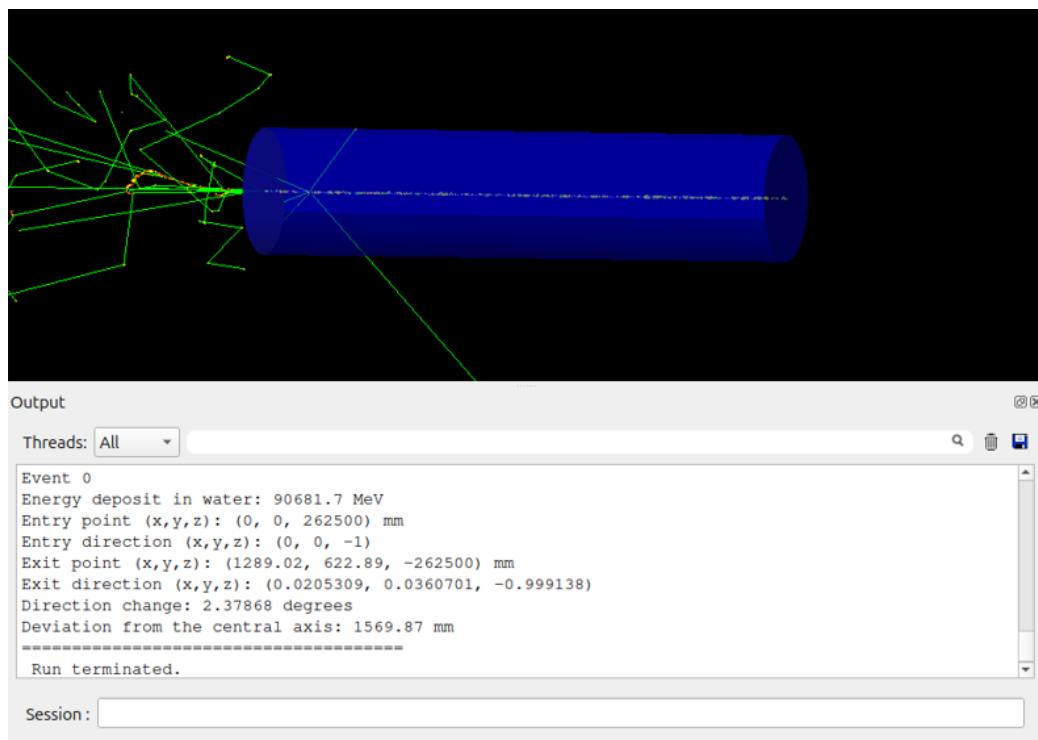


Рисунок 3.1 — Интерфейс с визуализацией модели в Geant4

### 3.3 Анализ данных

В ходе моделирования в Geant4 было сгенерировано 2105000 событий. В процессе моделирования для каждого события сохранялись следующие данные: координаты входа и выхода мюона, направление в момент входа и выхода мюона, а также энергия, потеряная им во время прохождения водяного цилиндра.

По полученным данным были рассчитаны углы отклонения мюона от первоначальной оси движения и расстояния смещения от центральной оси цилиндра. На основании этих величин были построены распределения углов отклонения, радиального смещения и энергетических потерь. Данные распределения представлены на рисунках 3.2-3.4.

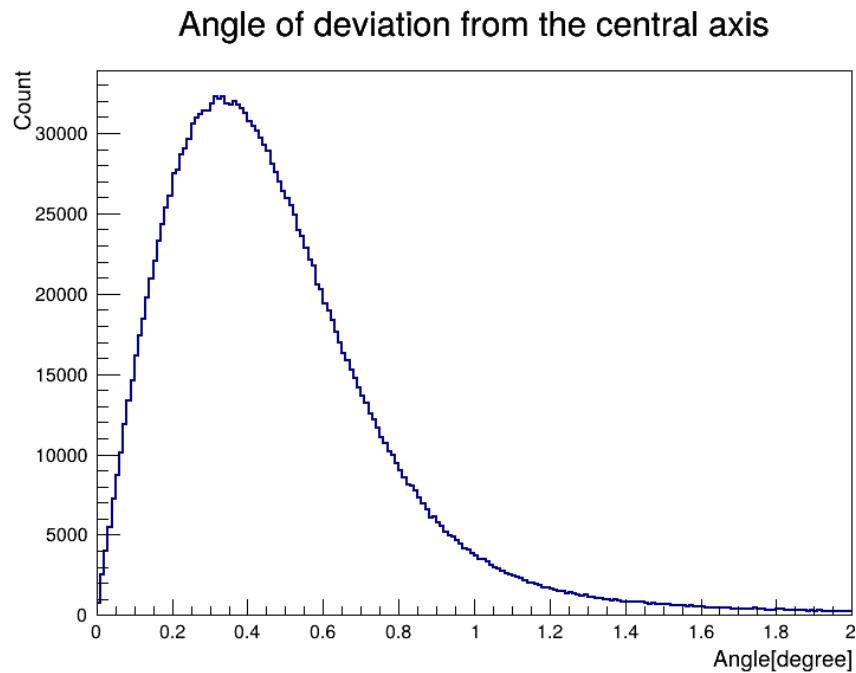


Рисунок 3.2 — Угол отклонения от первоначальной оси. Средний угол отклонения  $0.4733 \pm 0.0002$  градусов, наиболее вероятный угол отклонения 0.335 градусов

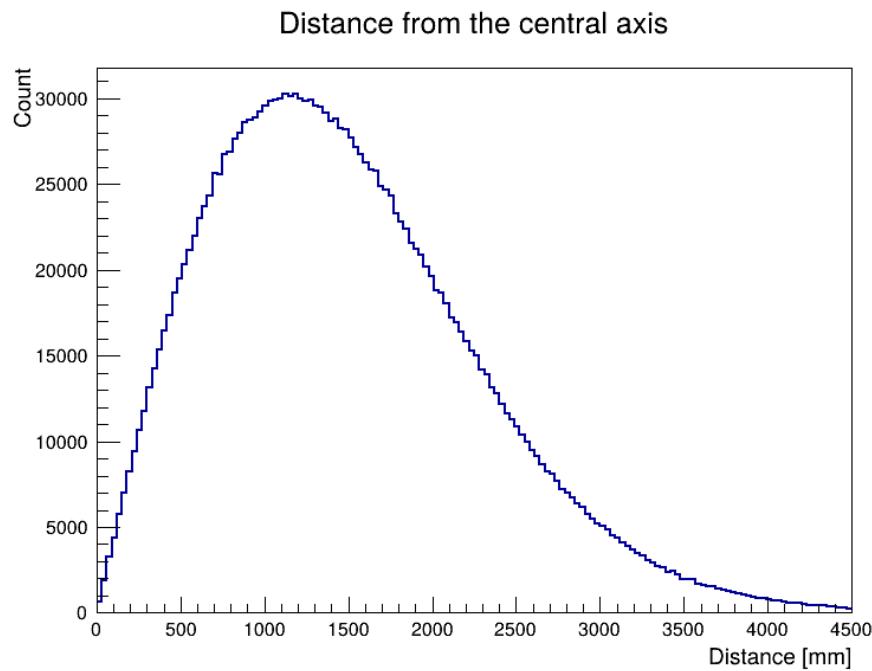


Рисунок 3.3 — Радиальное смещение от первоначальной оси. Среднее значение  $1482 \pm 0.56$  миллиметров, наиболее вероятное значение 1125 миллиметров

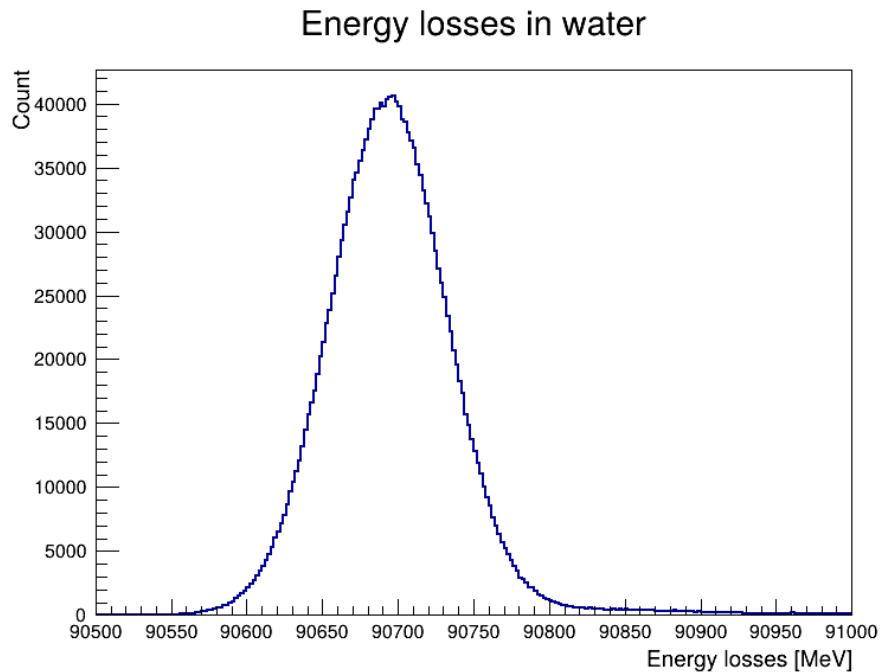


Рисунок 3.4 — Суммарные потери энергии. Среднее значение  $90626.20 \pm 0.03$  МэВ, наиболее вероятное значение 90697 МэВ

Анализ распределений позволяет количественно оценить влияние многократного рассеяния и ионизационных потерь энергии мюона при прохождении водной среды.

### 3.4 Вывод

По итогам научно-исследовательской работы была изучена структура и задачи нейтринного телескопа BAIKAL-GVD. Был изучен принцип работы оптических модулей, использующихся в данном эксперименте в качестве детекторов, регистрирующих черенковское излучение.

Основной целью работы было освоение пакета компьютерного моделирования Geant4. В ходе работы была разработана и реализована модель водного объема, сопоставимого по размерам с кластером нейтринного телескопа BAIKAL-GVD, а также проведено моделирование прохождения мюона через данный объем. Полученные результаты подтверждают применимость Geant4 для задач моделирования процессов, проходящих на эксперименте BAIKAL-GVD, и могут быть использованы в дальнейшем для более детального анализа установки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Avrorin A.D. Avrorin A.V. A. V. e. a.* High-energy neutrino astronomy and the Baikal-GVD neutrino telescope // Baikal-GVD Collaboration. — 2020.
2. Book for application developers / G. Collaboration [и др.] // URL <http://geant4-userdoc.web.cern.ch/geant4-userdoc/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/Backup> 2019. — Т. 10. — С. 5—2.
3. *Safronov G.* The status and astrophysics results of the Baikal-GVD neutrino telescope // Proceedings of Science. — 2025.
4. The Baikal-GVD detector calibration / A. Avrorin [и др.] // arXiv preprint arXiv:1908.05458. — 2019.
5. The optical module of Baikal-GVD / A. Avrorin [и др.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2016. — Т. 13, № 6. — С. 737—746.