

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

АФ НИЯУ МИФИ

Студент: Громов Тимур, Б23-ФЧ

Научный руководитель: Дик В.Я., Лаборатория
ядерных проблем ОИЯИ.



Алматы, 2025

Цели и Задачи:

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

Задачи:

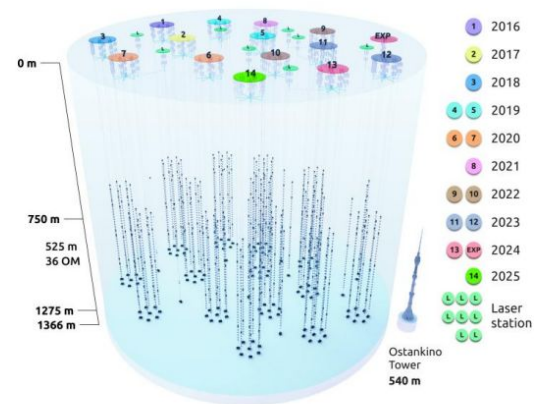
- Изучение структуры, архитектуры и принципов работы программного пакета для компьютерного моделирования Geant4.
- Проектирование и разработка модели кластера нейтринного телескопа Baikal-GVD.
- Моделирование прохождения мюонов высокой энергии через водный объем кластера и анализ характеристик их траекторий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

Введение:

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.

— Предназначен для регистрации и исследования потоков нейтрино сверхвысоких энергий($>10^{15}$ эВ) от астрофизических источников

— Телескоп состоит из 14 независимых кластеров. Каждый кластер включает в себя 8 или 9 гирлянд, содержащие по 36 оптических модулей (ОМ)

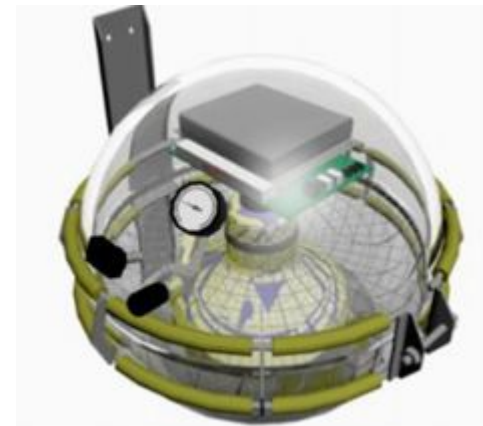


Введение:

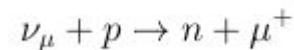
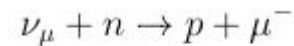
Оптические модули(ОМ) регистрируют черенковское излучение, создаваемого ультрарелятивистскими вторичными заряженными частицами, рождающимися при взаимодействии нейтрино высоких энергий.

ОМ состоит из следующих компонент:

- глубоководный корпус и разъем, узел крепления к тросу, магнитный экран и иммерсионный материал
- фотодетектор (фотоэлектронный умножитель)
- блок электроники



**Оптический модуль,
используемый в BAIKAL-GVD**



Примеры реакций с
нейтрино

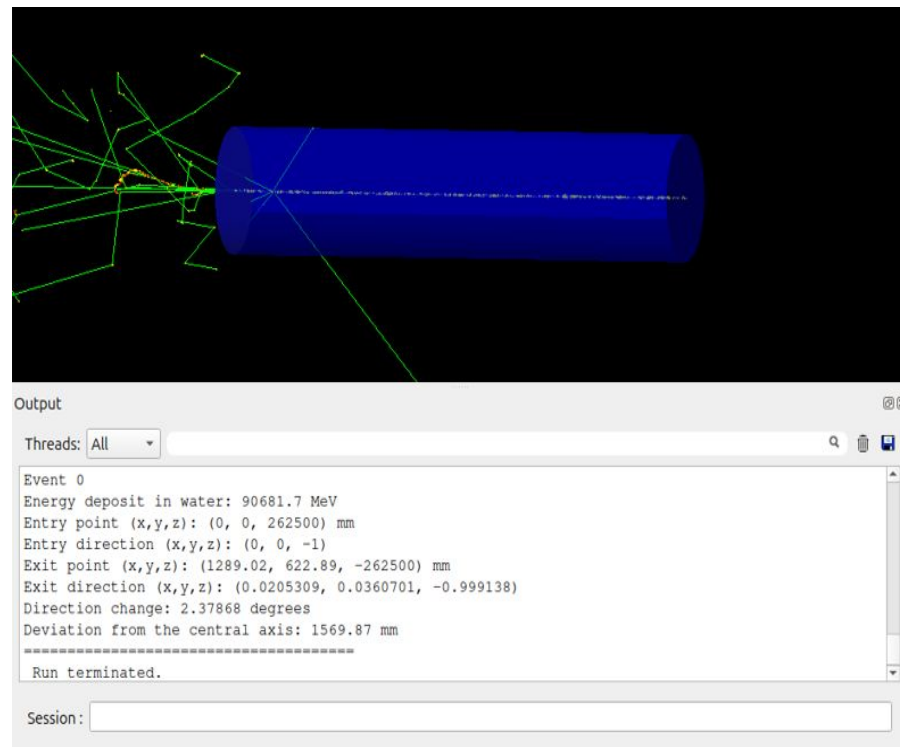
Geant4:

Geant4 — пакет библиотек на C++ для компьютерного моделирования процессов прохождения элементарных частиц через вещество, на основе совокупности подходов, вместе называемых «метод Монте-Карло». Программный пакет Geant4 предоставляет широкий набор инструментов для описания:

- Геометрии эксперимента.
- Физики взаимодействия.
- Моделирования отклика детектора.

Реализация проекта:

- 1) Итоговая модель в Geant4 представляет собой цилиндр длиной 525 метров и радиусом 60 метров, заполненный водой и имитирующий кластер нейтринного телескопа Baikal-GVD.
- 2) В данный водяной объем запускается первичная частица — мюон с энергией 200 ГэВ.
- 3) По завершении каждого события регистрируются координаты выхода мюона, а также суммарные энергетические потери в процессе прохождения среды



Анализ данных:

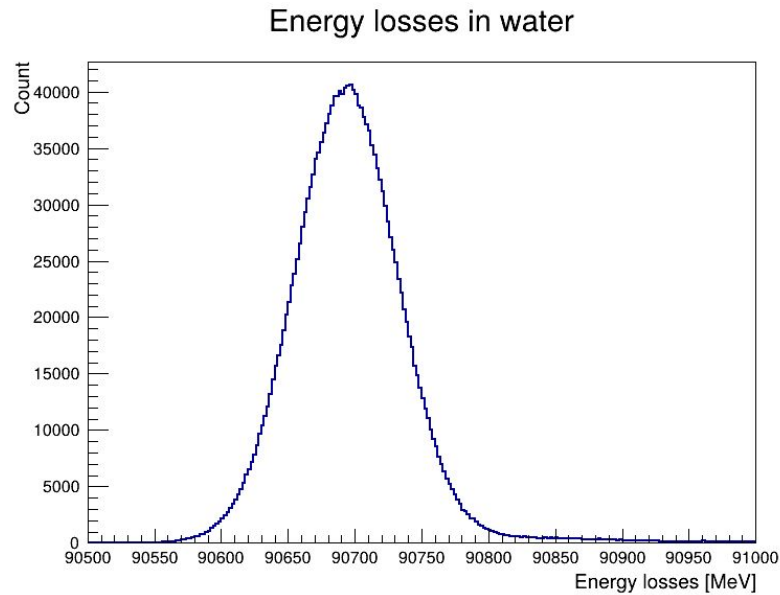
Было сгенерировано 2105000 событий

1) Получены
координаты и
направления мюонов
при выходе из
цилиндра

2) Рассчитаны углы
отклонения мюона от
первоначальной оси
движения и расстояния
смещения от центральной
оси цилиндра

3) Построены
соответствующие
распределения

Анализ данных:



$$\bar{E} = 90626.20 \pm 0.03 \text{ МэВ}$$

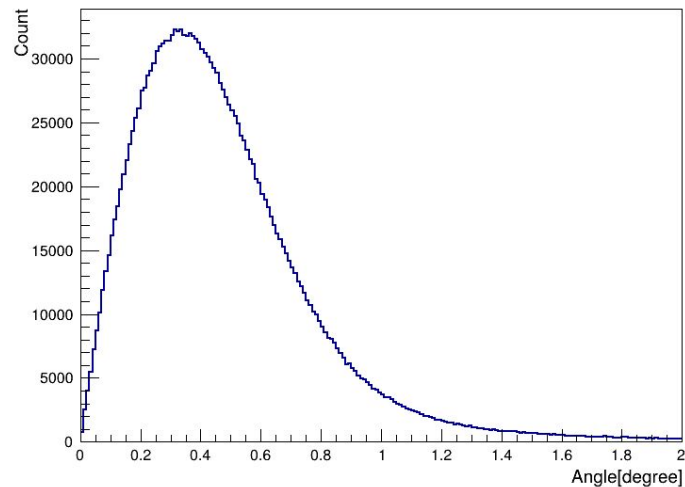
$$E_{\text{вер}} = 90697 \text{ МэВ}$$

Суммарные потери энергии.

Анализ данных:

Полученные распределения:

Angle of deviation from the central axis

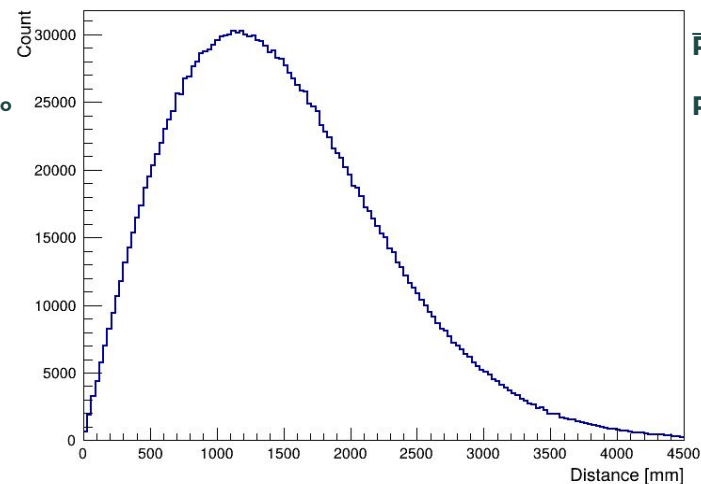


$$\bar{\Theta} = 0.4733^{\circ} \pm 0.0002^{\circ}$$

$$\Theta_{\text{вер}} = 0.335^{\circ}$$

Угол отклонения от первоначальной оси.

Distance from the central axis



$$\bar{R} = 1482.01 \pm 0.56 \text{ mm}$$

$$R_{\text{вер}} = 1125 \text{ mm}$$

Радиальное смещение от первоначальной оси.

Выводы:

По итогам научно-исследовательской работы:

- Был изучен принцип работы и задачи нейтринного телескопа Baikal-GVD.
- Освоен пакет компьютерного моделирования Geant4.
- Сделаны первые шаги в анализе данных, получаемых в ходе моделирования прохождения мюона через цилиндр, заполненный водой и имитирующий кластер Baikal-GVD.

Спасибо за внимание!

ИСТОЧНИКИ:

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/BackupVersions>. — 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