

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

УДК 539.17

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ
СБОРКИ КРИСТАЛЛОВ RbWO₄**

Научный руководитель

к.ф.-м.н., нач. лаб. НИЦ КИ

_____ Д. С. Блау

Студент

_____ Г. Е. Фоменко

Москва 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
Калориметр PHOS	3
Фотонный спектрометр PHOS	3
Общая механическая структура	3
Физика процесса	5
Электромагнитный ливень	5
Радиус Мольера	6
Програмная реализация	7
Результаты	9
Заключение	13
Список используемых источников	14

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является создание программного комплекса для моделирования детектора PHOS, определения радиуса Мольера, снятия продольного и радиального распределения энергии в детекторе, проверка соответствия данных полученных в ходе моделирования с теорией.

КАЛОРИМЕТР PHOS

ФОТОННЫЙ СПЕТКРОМЕТР PHOS

. Фотонный спектрометр PHOS [1] — электромагнитный калориметр с высокой разрешающей способностью по энергии и по пространственным координатам. Назначение PHOS — изучение регистрация прямых фотонов с малыми поперечными импульсами. Спектрометр фотонов PHOS, обеспечивает получение важной информации об излучениях, возникающих при взаимодействии встречных пучков тяжелых ионов высоких энергий. Он позволяет регистрировать, во-первых, прямые фотоны высоких энергий. А во-вторых, пи0- и eta-мезоны при больших импульсах (энергия порядка 25 ГэВ), когда разрешение спектрометра для этих частиц становится лучше, чем у трековых детекторов. Наиболее эффективной средой для спектрометра PHOS, на данный момент, является вольфрамат свинца $PbWO_4$, это пока единственный материал, удовлетворяющий требованиям, касающимся радиуса Мольер и радиационной длинны.

ОБЩАЯ МЕХАНИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

Детектор PHOS состоит из набора кристаллов $PbWO_4$ размерами 22x22x180 мм, ориентированными торцами 22x22 мм к потоку регистрируемого излучения. Ливни, возникающие в кристаллах под действием фотонов высоких энергий, преобразуются в сцинтилляционное световое излучение, регистрируемое PIN-диодом (здесь и далее по тексту под понятием PIN-диод подразумевается конструкция, состоящая из фотодетектора, приклеиваемого к торцу кристалла оптически прозрачным клеем, и предусилителя в общем корпусе).

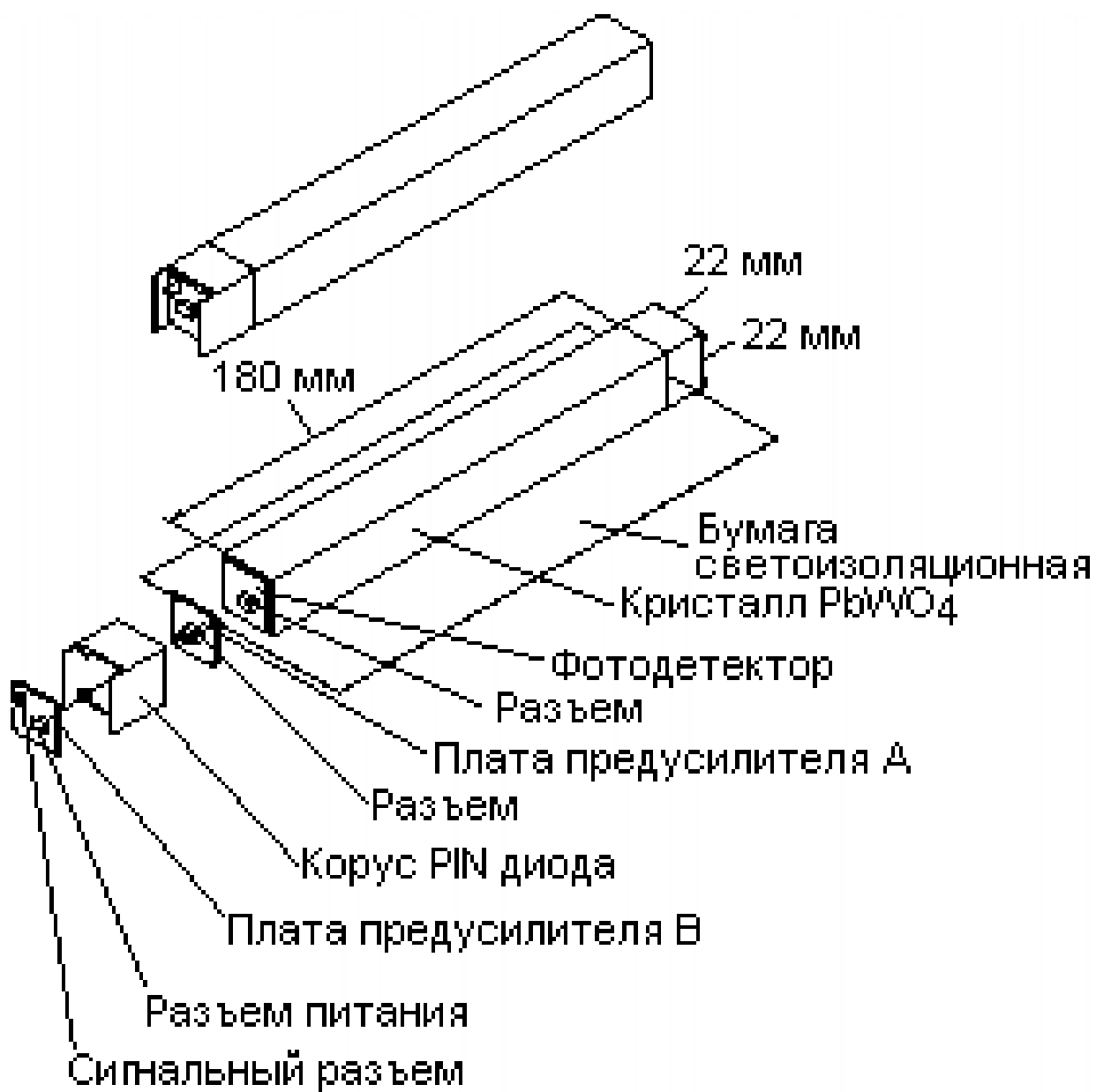


Рисунок 1 — Схема устройства элемента сборки

ФИЗИКА ПРОЦЕССА

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ЛИВЕНЬ

Электроны, позитроны и гамма-кванты рождают в веществе калориметра электромагнитные ливни (рис. 1). При энергии > 1 ГэВ основной процесс для фотона – рождение электрон-позитронной пары, для электрона (позитрона) – рождение тормозного фотона. При этом оба процесса уже мало зависят от энергии частицы. Рассмотрим формирование электромагнитного ливня на примере влетающего в калориметр фотона. Влетающий в калориметр фотон рождает электрон-позитронную пару. В свою очередь, если энергия электронов (позитронов) больше критической* E_c , они производят тормозное излучение (фотоны). Количество частиц в ливне будет быстро расти, пока средняя энергия не понизится до критической и основным механизмом для заряженных частиц не станет ионизация. Удельные потери на тормозное излучение

$$\frac{(dE)}{dx} = -\frac{(E)}{X_0} \quad (1)$$

где X_0 – радиационная длина, E_0 – энергия первичной частицы.

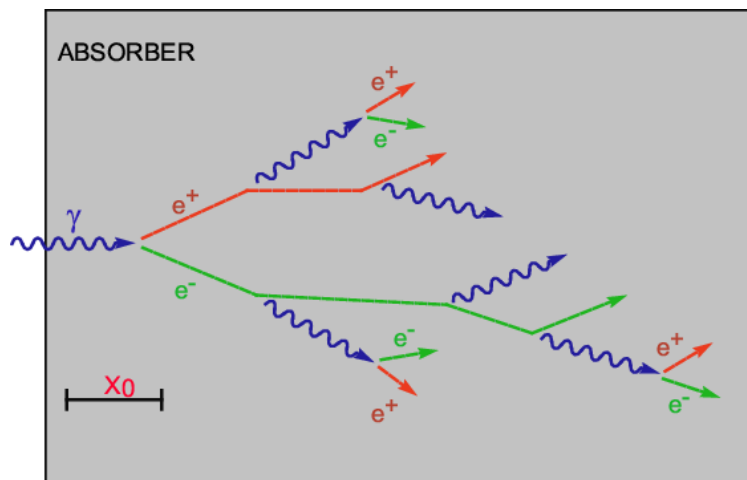


Рисунок 2 — Схема электромагнитного ливня.

РАДИУС МОЛЬЕРА

Поперечный размер электромагнитного ливня в основном определяется многократным рассеянием электронов и позитронов. Тормозные фотоны, испускаемые этими электронами и позитронами также вносят свой вклад. Поперечные размеры по всей глубине ливня даются радиусом Мольера. Радиус мольера примечателен тем, что внутри цилиндра данного радиуса сосредоточено 90% выделенной (потерянной) фотоном энергии.

$$R_M = 0.0265 * X_0 * (Z + 1.2) \quad (2)$$

В цилиндре с радиусом же в 2 величины радиуса Мольера поглощается 95% энергии ливня.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

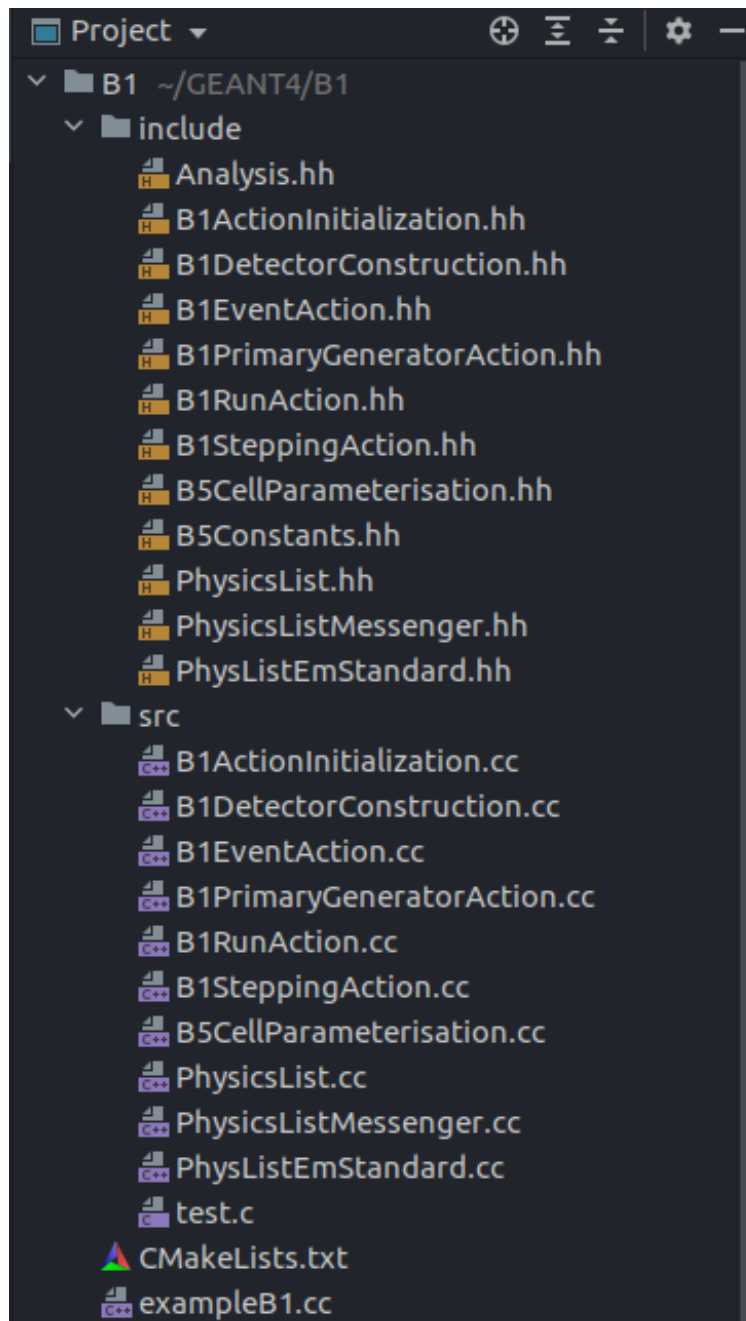


Рисунок 3 — Реализованный программный комплекс.

Для выполнения данной работы использовался пакет программ для моделирования процессов при прохождении частицей через вещество. Была реализована геометрия детектора по техническому заданию: размер одного элемента 22x22x180 мм, при этом сборка представляет собой матри-

цу элементов 11x11, всего 121 элемент. Геометрия реализована с в классах `B1DetectorConstruction` и `B5CellParametrisation`. Кристаллам детектора был присвоен материал `PbWO4` из взятый из NER таблицы, плотность материала $8,28 \text{ г/см}^3$. Все остальные логические объёмы были заданы как глубокий вакуум `G4Galactic` с плотностью 10^{-25} г/см^3 . В физический лист был собран стандартный набор физик предлагаемой разработчиками для моделирования электромагнитных процессов например фотоэффект и образование электронно-позитронных пар для фотонов, ионизация и возбуждение атомов среды для заряженных частиц, упругое и неупругое рассеяния для адронных процессов. Были написаны `Root` скрипты для расчетов величин относительных потерь энергии, радиуса мольера, рассчитаны погрешности методом наименьшего квадрата, для распределений энергии, погрешность была определена как корень из величины события.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе данной работы была построена модель детектора на основе сборки 11x11 вольфрамата свинца с зазором между модулями в 1мм.

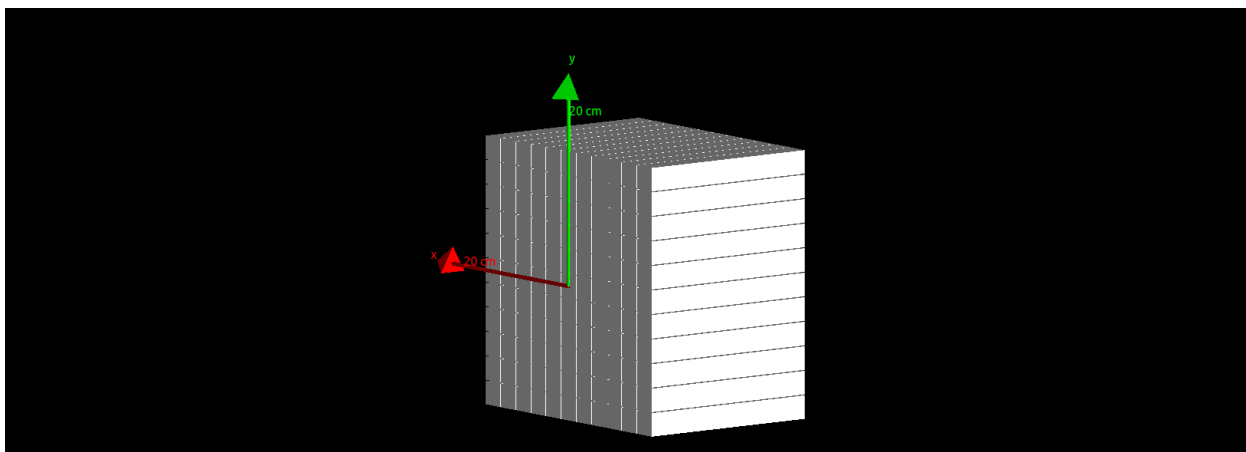


Рисунок 4 — 3D модель сборки кристаллов сцинтилятора.

Были получены распределения энергий по координатам OX и OY, также были получены радиальные распределения энергии. Из них был рассчитан радиус мольера для сцинтилятора PbWO₄. Также были определены относительные потери энергии фотоном при прохождении сборки.

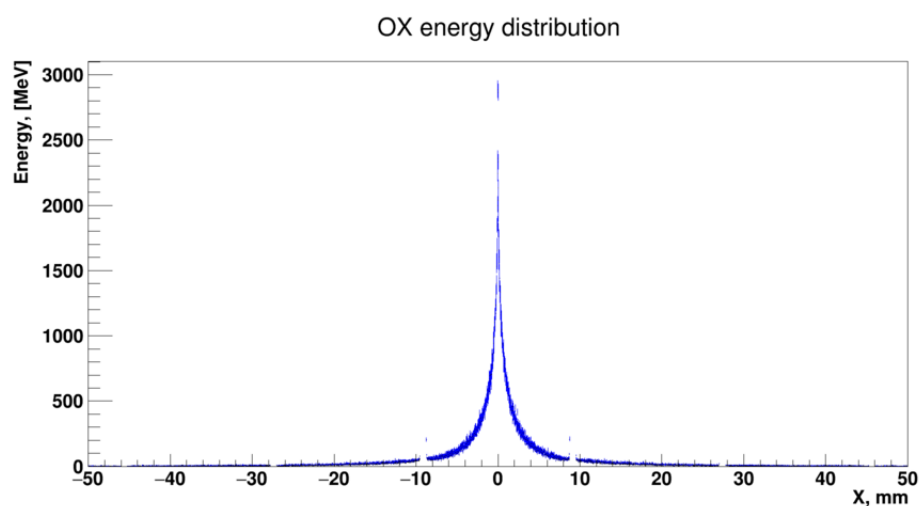


Рисунок 5 — Распределение энергетических потерь по оси OX.

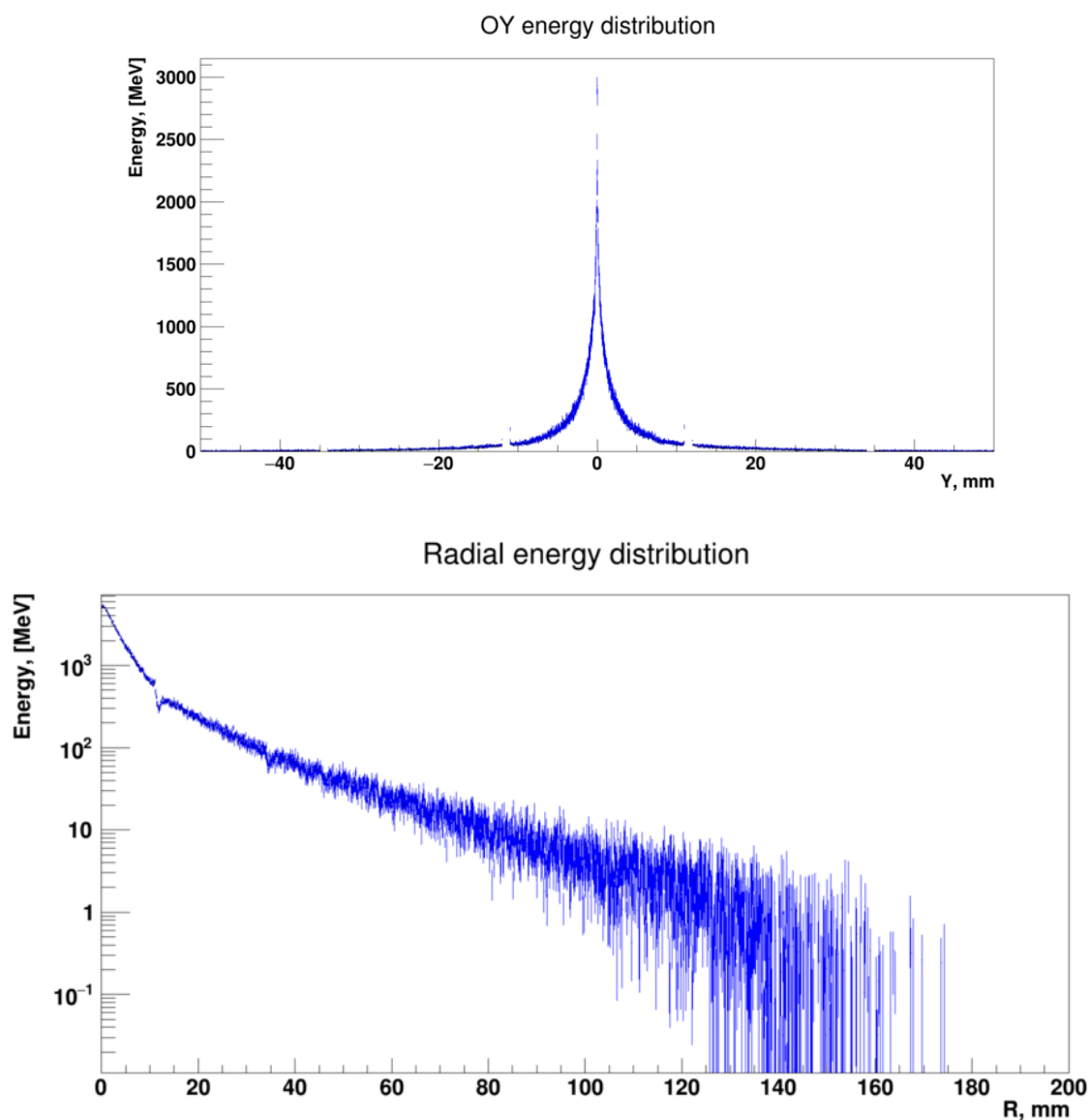


Рисунок 7 — Радиальное распределение энергетических потерь фотонов

Также были получены продольные профили потерь энергии фотона для разных энергий..

Были рассчитаны Радиус Мольера для разных значений энергии фотона пучка из 100 штук, также были рассчитаны относительные потери энергии пучка фотонов при различных величинах энергии каждого, построен график зависимости этих величин.

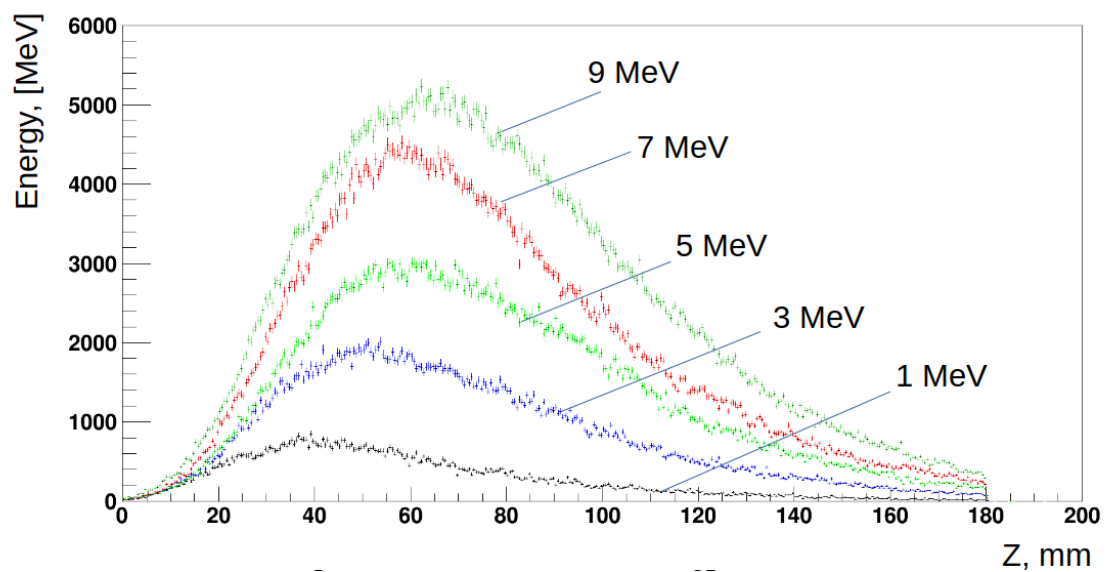


Рисунок 8 — Гистограмма породольных распределений энергии для разных энергий пучков фотонов

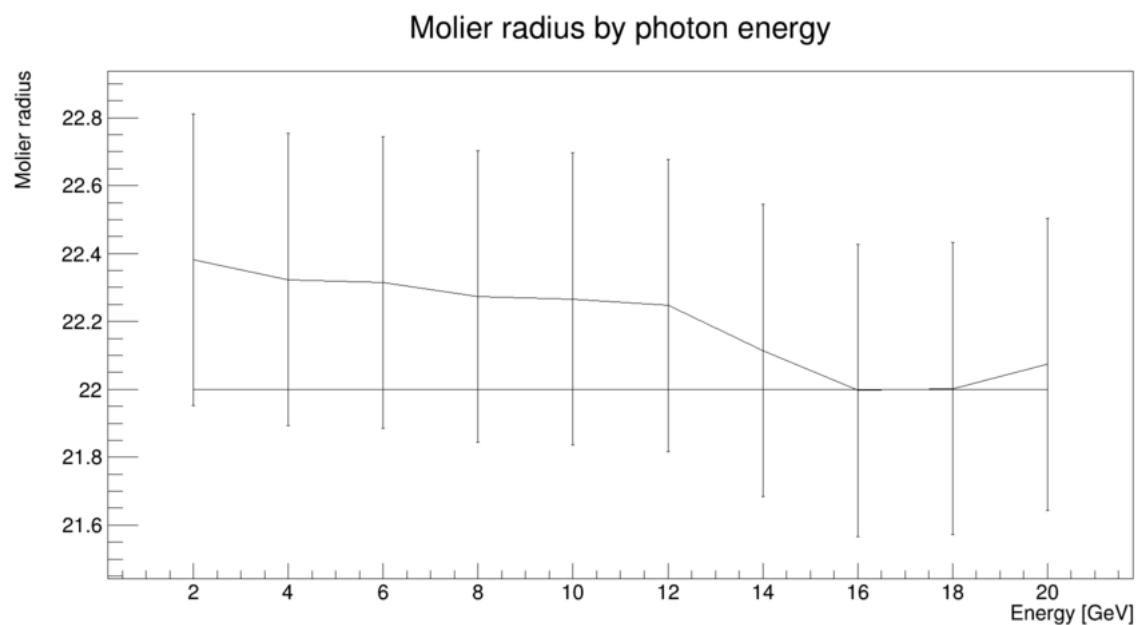


Рисунок 9 — График зависимости радиуса мольера от значения энергии фотона

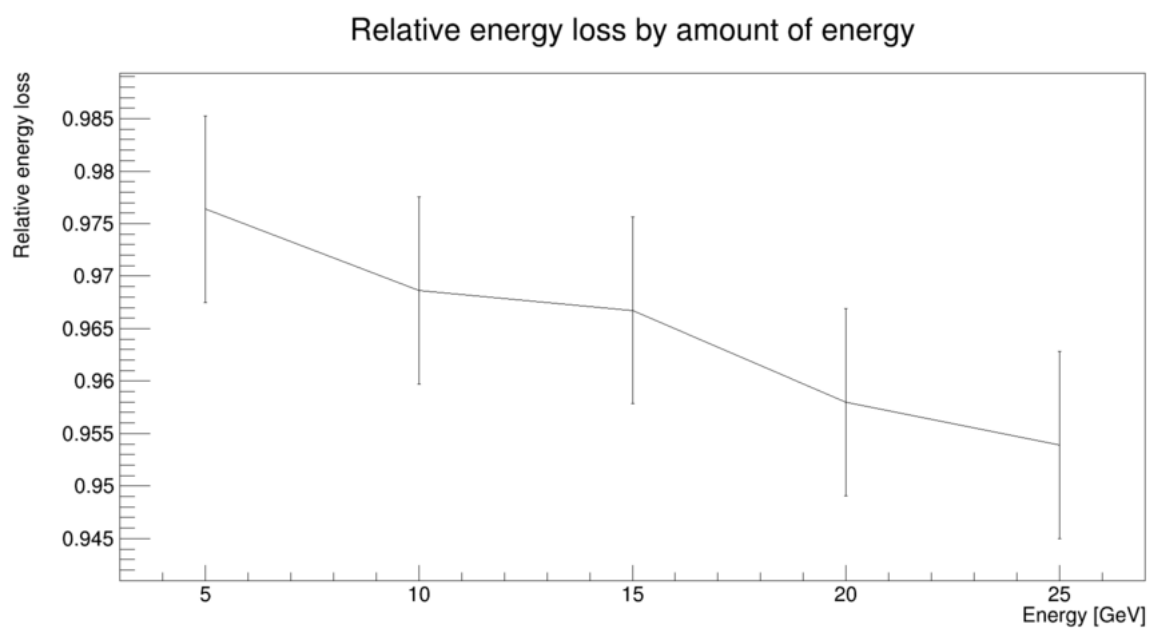


Рисунок 10 — График зависимости относительных потерь энергии пучка от величины энергии пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы была создана модель детектора в программе GEANT4 на основе сборки кристаллов PbWO_4 . Были сняты такие данные как породольное и радиальные распределения потерь энергии от соответствующих координат. Были рассчитаны радиус Мольера, который в рамках погрешности совпадает с теоритической величиной, это говорит о том, что построенная модель является соответствующей реальным физическим процессам и может быть в дальнейшем использована для создания новых моделей детекторов. Также было определено, что выделяемая энергия пучка, проходящего через сборку падает с ростом энергии этого пучка, это связано с тем, что хвосты ливня по Z всё больше выходят за длину кристалла и просто не детектируются.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Acharya S.* Calibration of the photon spectrometer PHOS of the ALICE experiment // Journal of instrumentation, JINST. — 2019. — Vol. 14.
2. *Gustafsson H.-A.* The ALICE experiment at the CERN LHC // Journal of Instrumentation. — 2008. — Vol. 3. — P. 88–91.
3. *Jowett J. M.* The LHC as a nucleus–nucleus collider // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. — 2008. — Vol. 35. — P. 104028.
4. *Halterman R. L.* Fundamentals of Programming C++. — School of Computing Southern Adventist University, 2018.
5. ***Richard L. Halterman.*** Geant4 User’s Guide for Application Developers. — 2007.