

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 МЕТОДОВ РАЗДЕЛЕНИЯ НАЛОЖЕННЫХ КЛАСТЕРОВ В  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ КАЛОРИМЕТРЕ**

Научный руководитель

к.ф.-м.н., рук. отд. НИЦ КИ

\_\_\_\_\_ Д. С. Блау

Студент

\_\_\_\_\_ Г. Е. Фоменко

Москва 2022

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	2
Эксперимент «ALICE»	3
Фотонный спектрометр ФОС (PHOS)	4
Физика процесса	5
Описание симуляции	6
Обработка данных	7
Результаты	9
Заключение	16
Список используемых источников	17

# ВВЕДЕНИЕ

Основной целью и задачей данной работы является создание алгоритма для разделения слившихся кластеров от двух  $\gamma$ -квантов, влетевших на близком расстоянии друг к другу. Проверить применимость выбранных функций с разными параметрами фита для разделения кластеров, перевзвешивая вклады от каждой из частиц в общее энерговыделение в ячейке.

Для набора данных использовался программного пакета для моделирования GEANT4. В данном пакете программ была создана модель детектора из сцинтиляционных кристаллов  $\text{PbWO}_4(\text{PWO})$ , была проведена симуляция попадания в детектор двух частиц на некотором расстоянии друг от друга. Для обработки данных использовался программный пакет ROOT.

# ЭСПЕРИМЕНТ «ALICE»

Эксперимент «АЛИСА» изначально был спроектирован для эффективно-го исследования столкновений тяжелых ионов (Свинец), поэтому основу дан-ных «АЛИСА» составляют столкновения тяжелых ионов, имеющих энергию в системе центра масс порядка 2.76 ТэВ и 5.02 ТэВ на пару нуклонов.

Исследования проекта «АЛИСА» затрагивают широкий спектр явлений в области физики высоких энергий, в том числе затрагиваются такие вопросы как: исследование кварк-глюонной плазмы, что является основной целью экспе-римента. В ходе столкновения образуется такое состояние материи как кварк-глюонная плазма, в таком состоянии была наша вселенная в момент времени  $10^{-5}$ с с момента Большого Взрыва, существование данного состояния вещества и его свойства – это ключевой вопрос для объяснения явления «конфайнмент», которое заключается в том, что мы не можем наблюдать кварки в чистом виде, а только их агрегаты, состоящие из двух (мезоны) , трех (барионы) кварков.

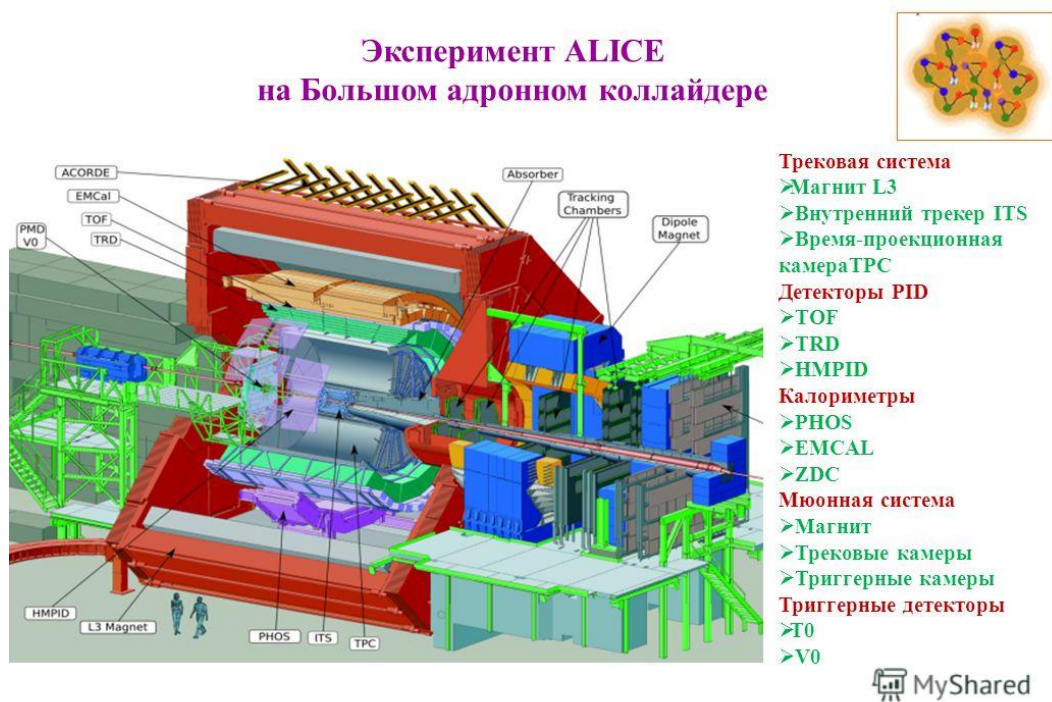


Рисунок 1 — Схема эксперимента «АЛИСА»

# ФОТОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР ФОС (PHOS)

Фотонный спектрометр «PHOS», обеспечивает получение важной информации о материи, образующейся при взаимодействии встречных пучков тяжелых ионов высоких энергий. Он позволяет регистрировать, во-первых, прямые фотоны при энергиях выше 1 ГэВ. А во-вторых,  $\pi^0$  и  $\eta^0$  – мезоны по их двухфакторным распадам.

Спектрометр представляет собой сложную сегментированную систему с площадью чувствительной поверхности 6 м<sup>2</sup> и примерно 12500 измерительных каналов на основе сцинтилляционных кристаллов вольфрамата свинца PbWO<sub>4</sub>. Для таких целей требуются специфические кристаллы, у которых низкая радиационная длина (влияет на компактность) и малый радиус Мольера, который соответствует поперечному размеру электромагнитного ливня.

Детектор «PHOS» состоит из набора кристаллов PbWO<sub>4</sub> размерами 22 × 22 × 220 мм<sup>3</sup>, ориентированными торцами к потоку регистрируемого излучения. Ливни, возникающие в кристаллах под действием фотонов высоких энергий, преобразуются в сцинтилляционное световое излучение, регистрируемое ливневым фотодиодом «APD». [1]

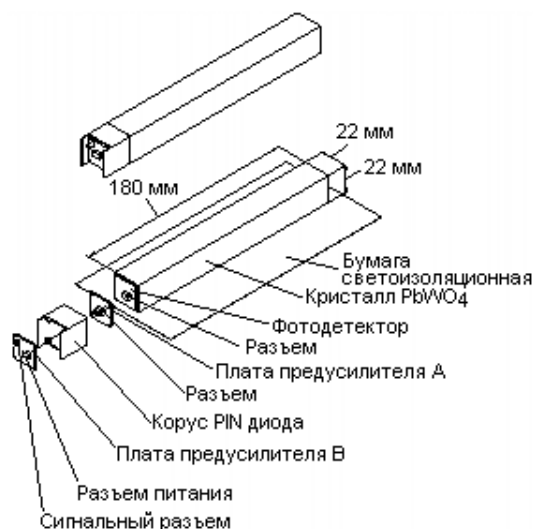


Рисунок 2 — Схема детектирующего элемента спектрометра «PHOS»

# ФИЗИКА ПРОЦЕССА

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ЛИВЕНЬ

Электроны, позитроны и гамма-кванты рожают 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, 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.

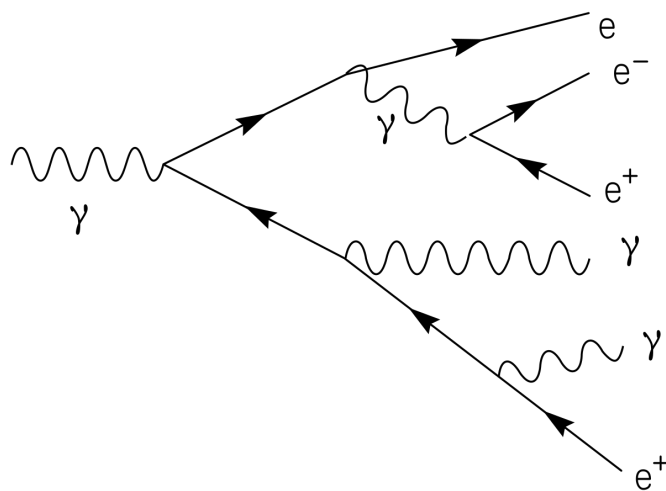


Рисунок 3 — Схема электромагнитного ливня

# ОПИСАНИЕ СИМУЛЯЦИИ

Для набора данных была создана модель в пакете для моделирования физического эксперимента GEANT4. Была создана модель сборки калориметра PHOS размером  $11 \times 11$  элементов с зазором между элементами 0.1 мм. В симуляции разыгрывались события, в каждом из которых создавалась пара частиц. Одна прилетала всегда в центр сборки, другая запускалась на заданном от центральной частицы. Были рассмотрены пары частиц с одинаковыми энергиями при энергиях в 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 6, 10 ГэВ на расстоянии в 3 см. Также были рассмотрены случаи для частиц с энергией в 6 ГэВ для расстояний 3, 4, 5, 6 см, случаи для частиц с разными энергиями на расстоянии в 3 см от центральной частицы для сочетаний энергий в 2+1, 6+3, 10+5 ГэВ.

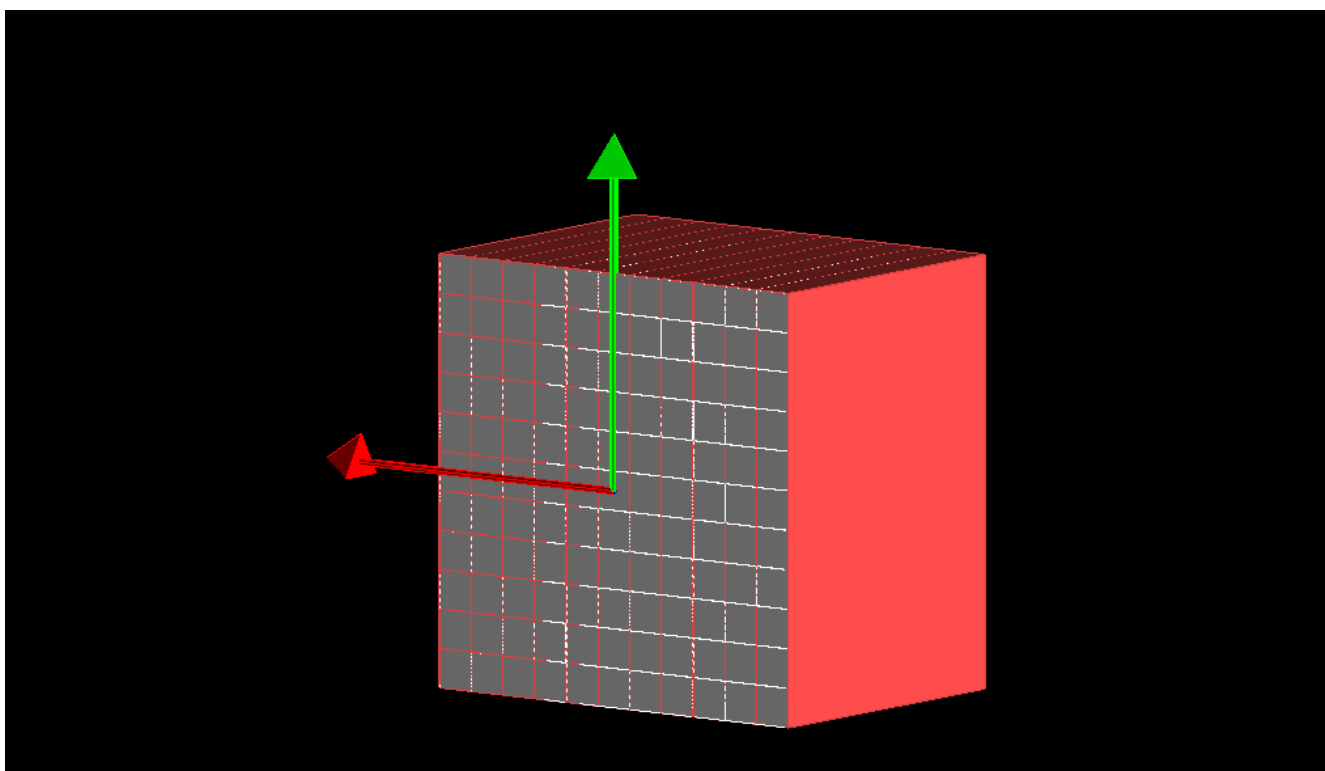


Рисунок 4 — Сборка PHOS

# ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для обработки данных были выбраны две функции для аппроксимации ими распределений энергий от частиц для дальнейшего перевзвешивания вкладов от энерговыделений каждой из частиц в отдельно взятом элементе сборки. Первая функция (далее, для простоты, она именуется как Фиттер) была взята из ALICE Technical Design Report of the Photon Spectrometer (PHOS)[2]. Применимость данной функции для описания кластера энерговыделения в кристалле PHOS была мной проверена в прошлой работе, вкратце данная функция достаточно точно восстанавливает величину энергии и расстояний между частицами, несмотря на высокий относительный  $\chi^2$ .

$$f(E, r) = \begin{cases} par[0] \cdot \exp(-r^4/par[3]) & r \leq 0.5\text{cm} \\ par[0] \cdot \max(\exp(-r^4/par[3]), par[5] \cdot \exp(-r^{0.6}/par[4])) & r > 0.5\text{cm} \end{cases} \quad (1)$$

$$r = \sqrt{(x - par[1])^2 + (y - par[2])^2}$$

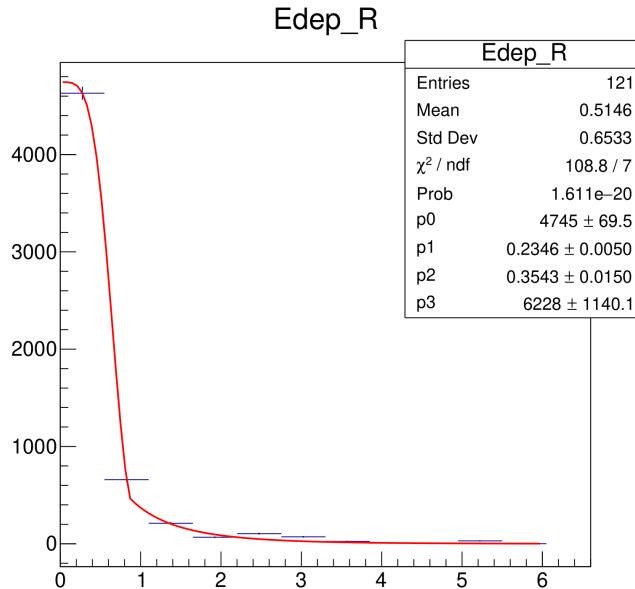


Рисунок 5 — Результат фитирования для 6 ГэВ



Вторая функция, которой мне было предложено аппроксимировать распределения энергии, это функция Гаусса. Основная идея разделения слившихся кластеров от двух частиц – это перевзвешивание. Перевзвешивание – это разделение вкладов в энерговыделение в каждом отдельном кристалле сборки от каждой из частиц.

# РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе проведенной работы, с помощью симуляции физического эксперимента, были получены и обработаны данные энерговыделения двух частиц с равными энергиями на разных расстояниях. Были получены результаты работы алгоритма разделения слившихся кластеров с использованием функции Фиттер и функции Гаусса.

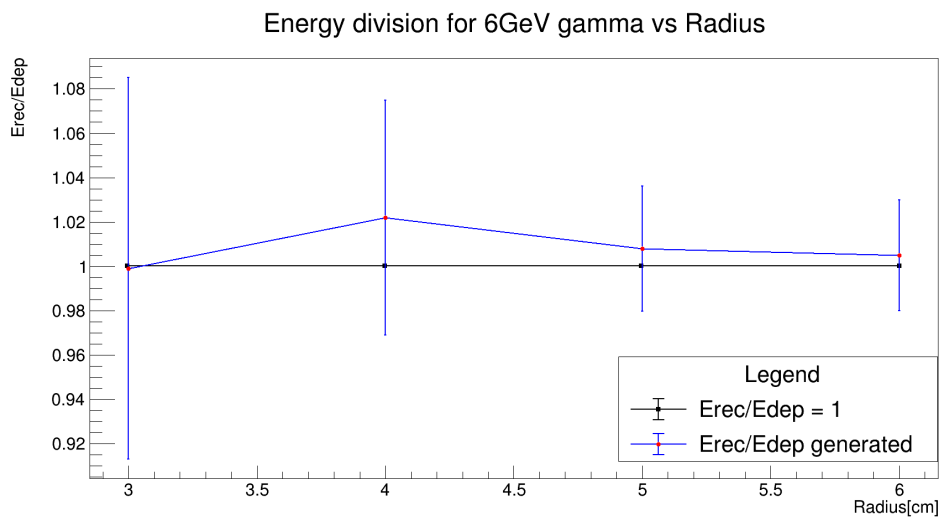


Рисунок 6 — Результат разделения энергий двух гамма квантов с энергией 6 ГэВ на различных расстояниях с использованием функции Фиттер.

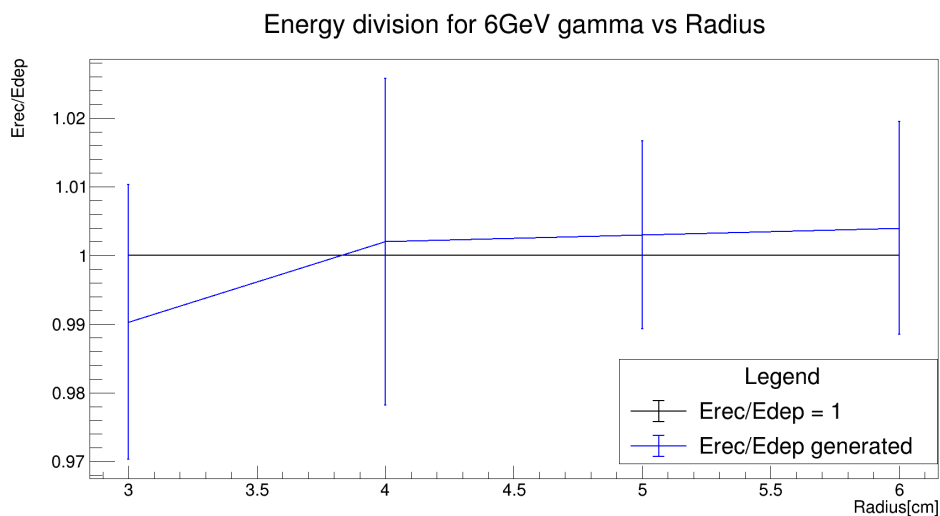


Рисунок 7 — Результат разделения энергий двух гамма квантов с энергией 6 ГэВ на различных расстояниях с использованием функции Гаусса.

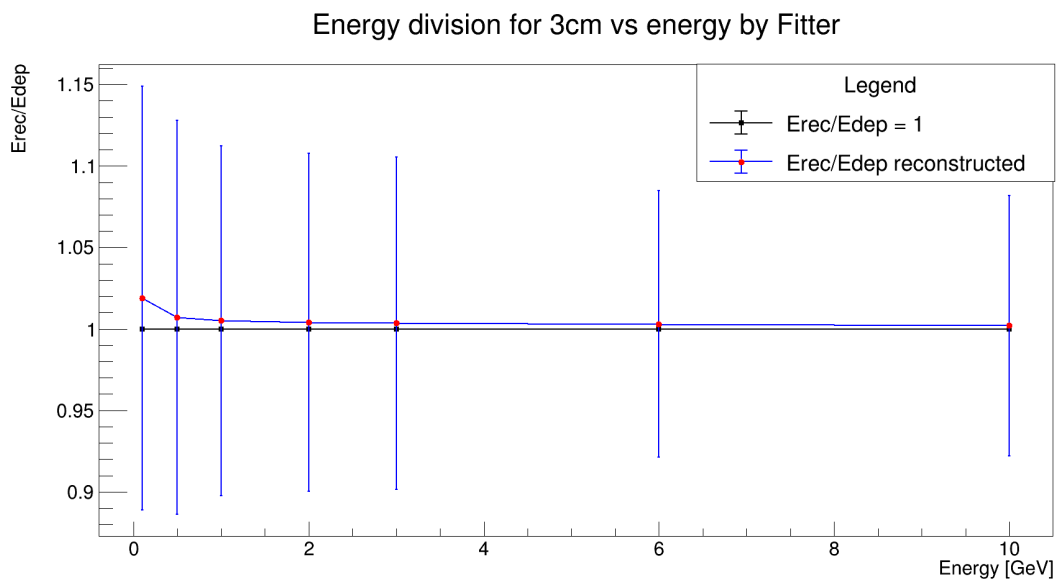


Рисунок 8 — Результат деления энергий двух гамма квантов на расстоянии 3 см с использованием функции Фиттер

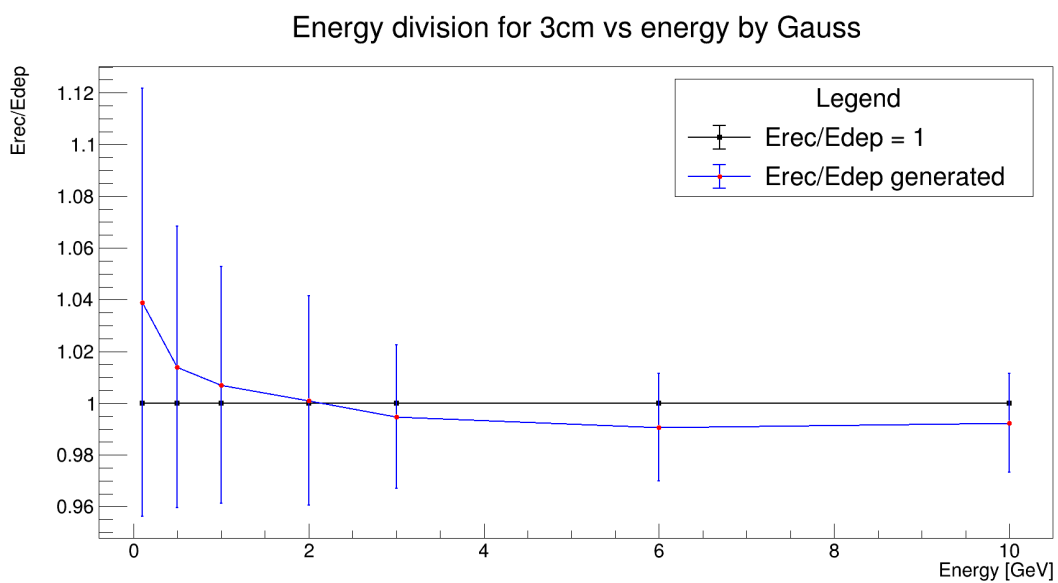


Рисунок 9 — Результат восстановления энергии первой частицы на расстоянии 3см с использованием функции Гаусса

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что и функция Гаусса, и Фиттер разделяют кластеры как на больших расстояниях, так и близкие частицы при различных энергиях. Можно сделать вывод и Гаусс, и Фиттер, оба лучше справляются с разделением частиц с высокими энергиями, нежели с низкими.

Были также получены данные для восстановления расстояний между частицами с применением функций Фиттер и Гаусса.

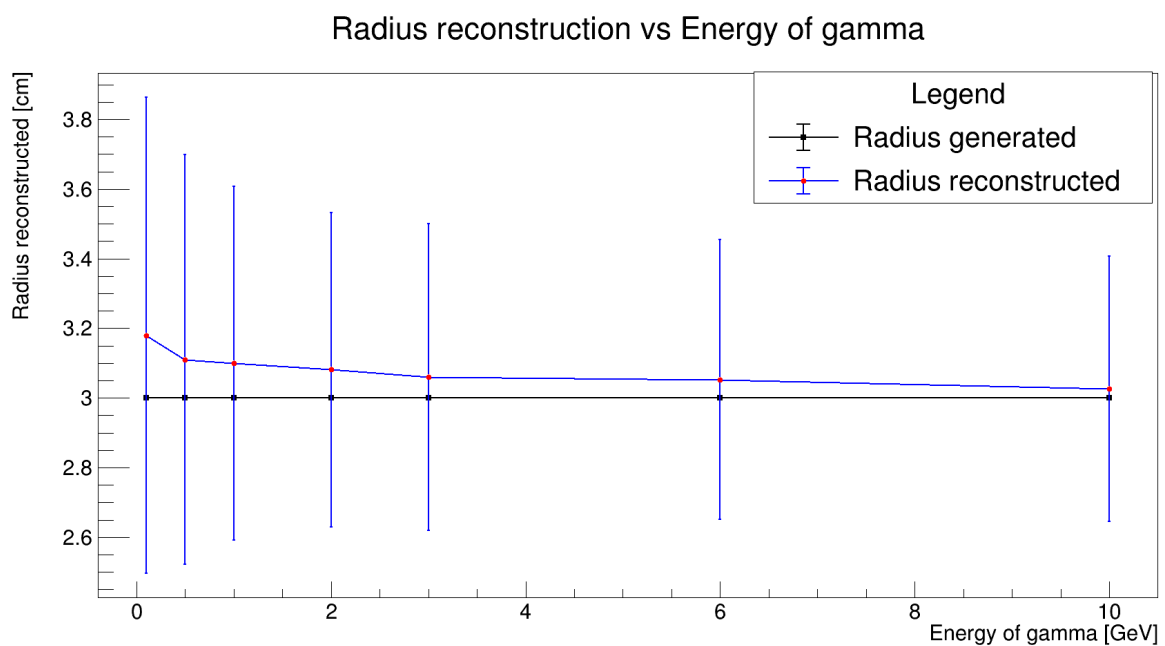


Рисунок 10 — Результат восстановления расстояния между частицами для различных энергий с помощью функции Фиттер

Также представлено распределение значений восстановленного расстояния между частицами для энергий в 6 ГэВ

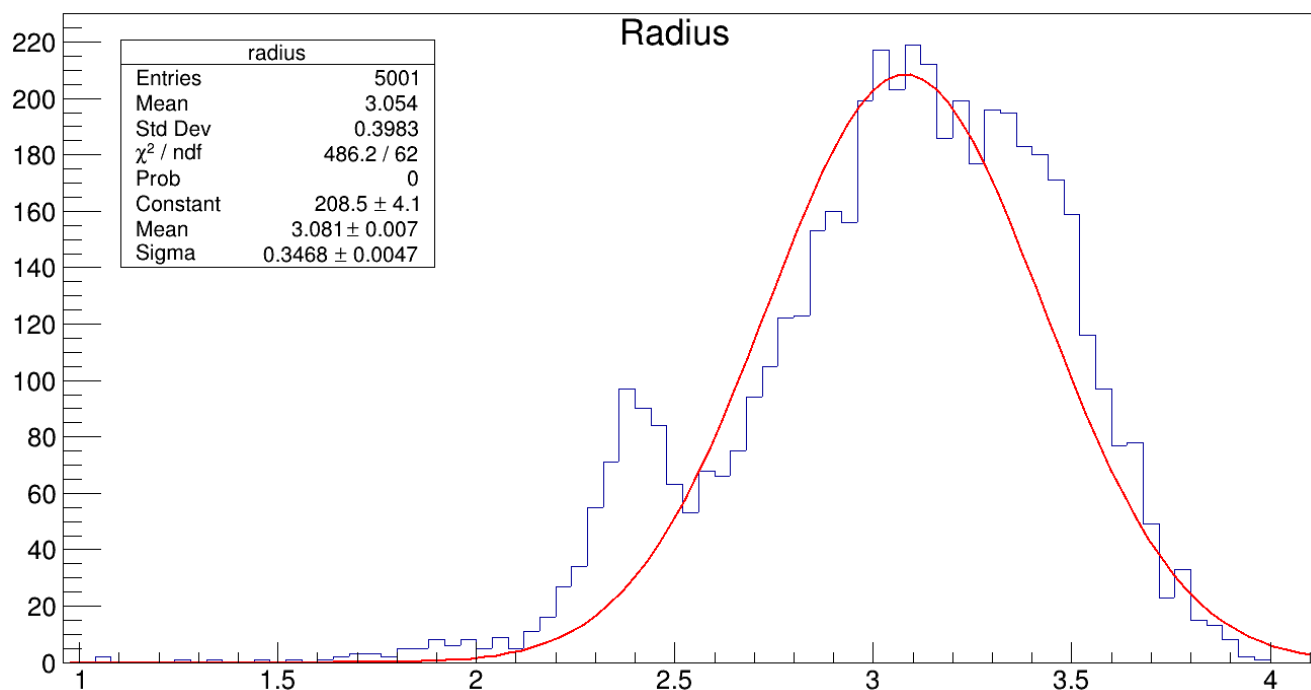


Рисунок 11 — Распределение величины восстановленного расстояния между частицами для энергии 6 ГэВ, полученное с помощью функции Фиттер

Также были получены те же данные для функции Гаусса.

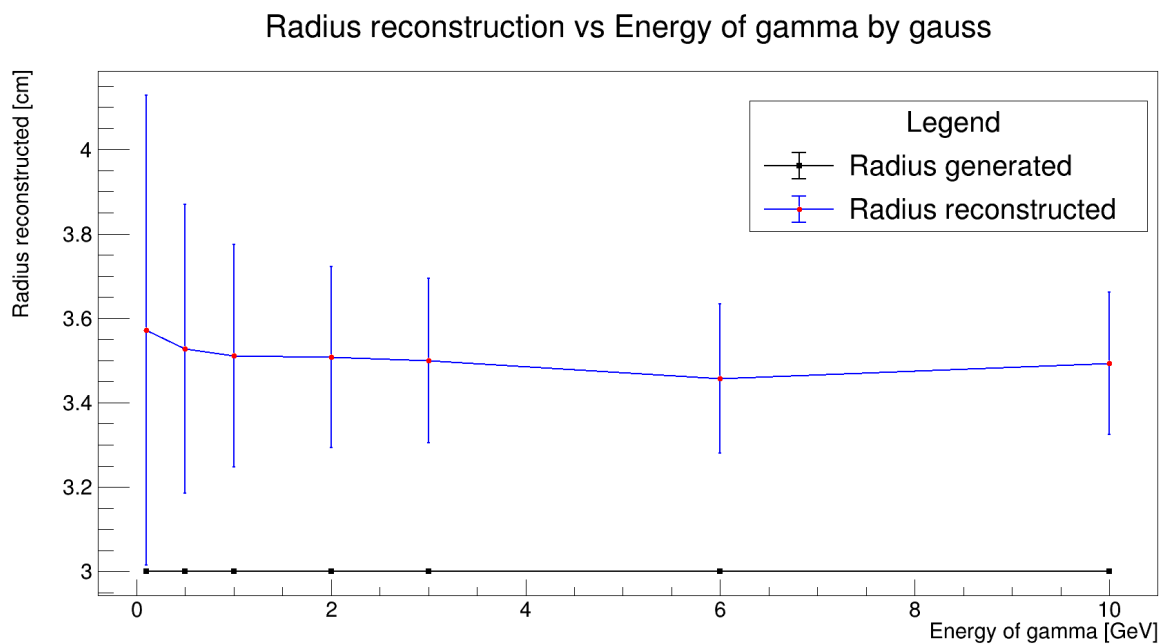


Рисунок 12 — Результат восстановления расстояния между частицами для различных энергий с помощью функции Гаусса

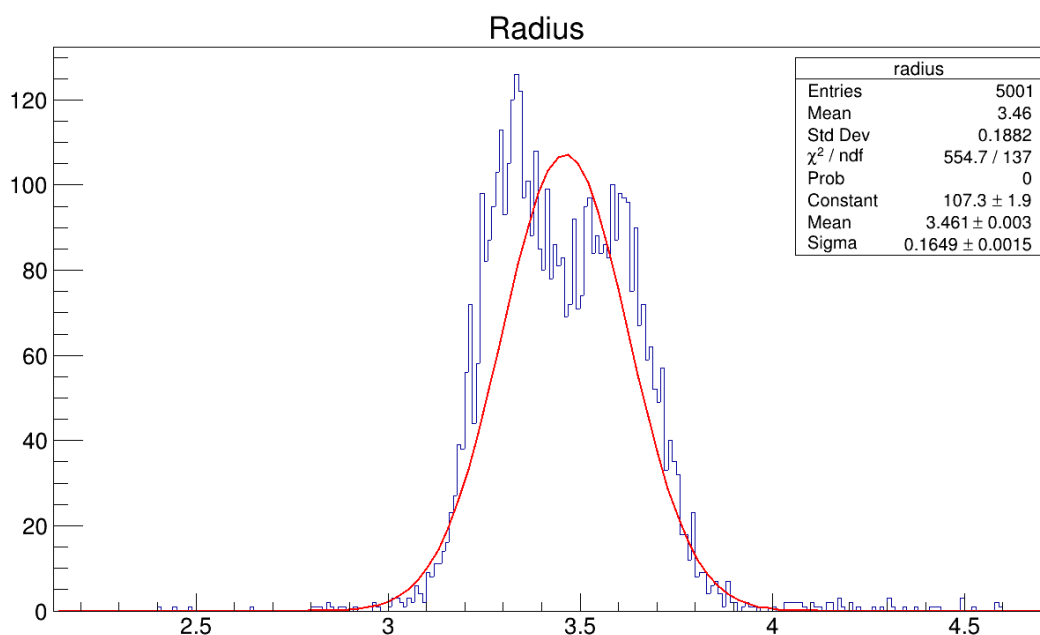


Рисунок 13 — Распределение величины восстановленного расстояния между частицами для энергии 6 ГэВ, полученное с помощью функции Гаусса

Из полученных результатов для функции Гаусса было принято решение рассмотреть восстановления расстояний в зависимости от изначально заданного расстояния, а не от энергии.

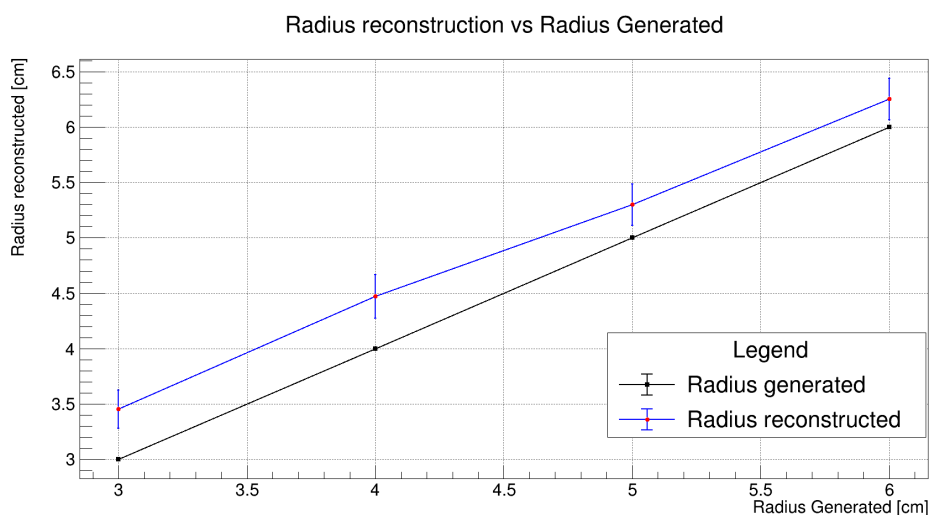


Рисунок 14 — Зависимость восстановленной величины расстояния от заданной для функции Гаусса

Из полученных данных был сделан вывод, что функция Гаусса не может восстановить расстояние между частицами, при этом величина отклонения расстояния с некоторой погрешностью может считаться постоянной. Было принято решение рассмотреть результаты работы алгоритма при использовании различных параметров фита при разделении кластеров.

Получены данные о работе алгоритма при различных параметрах фита для радиусов 3 и 6 см с использованием предложенных функций

Функция фита	Гаусс						Фиттер			
	3см			6см			3см		6см	
Параметр	L	I	None	L	I	None	L	I	L	I
Среднее значение $R_{rec}$ [cm]	3.450	2.687	3.007	6.252	5.937	6.006	3.054	3.039	6.010	6.058
Стандартное отклонение $R_{rec}$ [cm]	0.1882	0.1413	0.1413	0.1881	0.3209	0.2206	0.1706	0.4063	0.2755	0.3549
Процент событий в пике	98.9%	99.8%	59.7%	99.7%	100%	100%	99.3%	100%	99.1%	99.9%
Среднее значение $E_{rec}/E_{dep}$	0.991	1.009	1.005	1.004	1.005	1.005	0.998	1.019	1.007	0.998
Стандартное отклонение $E_{rec}/E_{dep}$	0.01618	0.03946	0.01659	0.01453	0.03463	0.01540	0.08115	0.04312	0.01762	0.02021
Процент событий в пике	97.2%	99.8%	57.5%	99.26%	99.8%	99.6%	88.9%	99.3%	97.9%	99.9%

Из полученных данных можно сделать вывод, что параметр I никак не влияет на результат, поэтому в дальнейшем он проверяться не будет, так как применение данного параметра увеличивает время работы алгоритма на порядок (Fitter для 1000 событий для частиц с энергией 6 ГэВ обрабатывался более 13 часов).

Функция фита	Гаусс						Фиттер		
	2+1		6+3		10+5		2+1	6+3	10+5
Параметр	L	None	L	None	L	None	L		
Среднее значение $R_{rec}$ [cm]	3.547	2.986	3.570	2.935	3.497	3.006	2.988	3.028	3.022
Стандартное отклонение $R_{rec}$ [cm]	0.2472	0.3203	0.2159	0.2196	0.1797	0.1419	0.598	0.3983	0.3495
Процент событий в пике	93.0%	82.0%	96.2%	72.4%	97.3%	61.7%	91.3%	93.7%	94.7%
Среднее значение $E_{rec1}/E_{dep1}$	0.9847	0.9762	0.974	0.9902	0.9713	0.9904	0.9784	0.9736	0.9752
Стандартное отклонение $E_{rec1}/E_{dep1}$	0.02547	0.01671	0.01741	0.01641	0.01430	0.01525	0.07615	0.06905	0.07032
Процент событий в пике	87.4%	58.1%	90.5%	61.3%	89.2%	61.7%	76.4%	86.3%	85.9%
Среднее значение $E_{rec2}/E_{dep2}$	1.028	1.047	1.054	1.021	1.005	1.021	0.9902	1.054	1.007
Стандартное отклонение $E_{rec2}/E_{dep2}$	0.04425	0.05005	0.03816	0.03024	0.02835	0.02528	0.09236	0.09247	0.09817
Процент событий в пике	86.0%	57.8%	92.4%	60.7%	89.2%	59.1%	62.3%	69.3%	68.7%

В данной таблице приведены результаты работы алгоритма при разделении частиц, с неравными энергиями на расстоянии 3 см. Из результатов видно, что алгоритм также разделяет неравные частицы, за исключением восстановления расстояния функцией Гаусса.

После анализа полученных данных было принято решение приблизить рассматриваемую физическую модель к реальному эксперименту и добавить каты на энергию ниже 10 МэВ. Результаты приведены в таблице ниже для частиц с энергией 6 ГэВ на расстоянии 3 см.

Функция фита	Гаусс		Фиттер	
Наличие ката	⊕	⊖	⊕	⊖
Среднее значение $R_{rec}$ [cm]	3.288	3.455	3.079	3.070
Стандартное отклонение $R_{rec}$ [cm]	0.1697	0.1685	0.3880	0.3742
Процент событий в пике	99.1%	99.2%	98.5%	98.5%
Среднее значение $E_{rec}/E_{dep}$	0.9934	0.9904	0.9929	0.9981
Стандартное отклонение $E_{rec}/E_{dep}$	0.01987	0.02027	0.08355	0.08109
Процент событий в пике	98.2%	97.5%	89.2%	89.5%

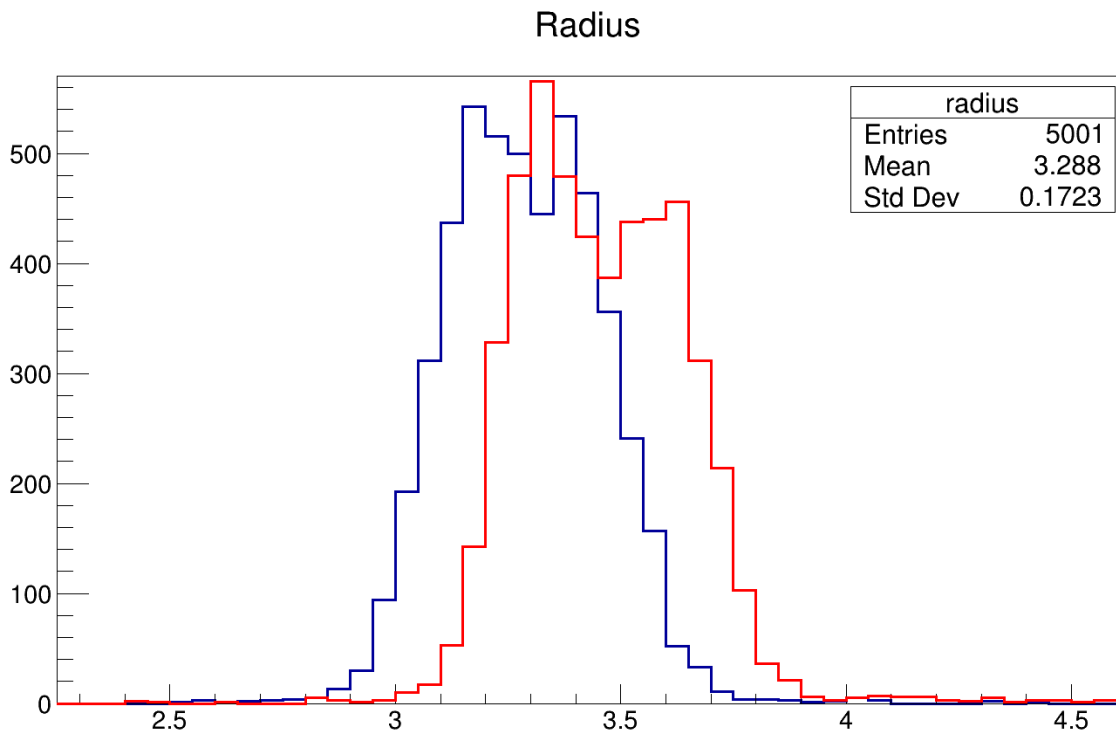


Рисунок 15 — Распределение величин радиусов по событиям при наличии и отсутствии катов для  $\gamma$ -квантов с энергией 6 ГэВ на расстоянии 3 см

Исходя из результатов, предоставленных в таблице, можно сделать вывод, что применение катов на энергию действительно улучшают работу алгоритма с использованием функции Гаусса, при этом на функцию Фиттер каты не оказывают никакого влияния.



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы была создана симуляция детектирования  $\gamma$ -кванта в сборке кристаллов  $\text{PbWO}_4$ , модель была создана в программном пакете **GEANT4**. Данные полученные в ходе симуляции были обработаны в пакете программ **Root**. Были получены данные восстановления величины энергии от гамма-квантов для частиц находящихся на различном расстоянии друг от друга с применением двух выбранных функций.

Были получены данные о точности работы алгоритма при восстановлении расстояния между частицами для различных энергий с применением выбранных функций. Для выбранных функций были собраны и обработаны алгоритмом данные для различных опций фита. Также был рассмотрен случай неравного вклада частиц в общее энерговыделение. Проводимая симуляция была приближена к реальному физическому эксперименту установлением катов на энергию ниже 10 МэВ.

Полученные результаты могут говорить о том, что функция Гаусса, не смотря на неудовлетворительное восстановление расстояния между частицами, все равно остается более предпочтительным вариантом для применения, нежели функция Фиттер. Возможна комбинация функций при обработке данных. Основными преимуществами функции Гаусса является: стабильность работы, скорость счета, фундаментальное значение самой функции и простота интерпретации параметров. Основным недостатком является систематическое завышение величины расстояния между частицами при восстановлении. Для функции Фиттер преимуществами является: точность описания самого распределения, точность восстановления всех необходимых параметров. Недостатки применения функции Фиттер: нестабильность работы (при неверно заданных параметрах скомпилированный код может выдать ошибку), низкая скорость счета, сложность самой функции и интерпретации ее параметров (величина радиуса в степени 0.6 дает основной вклад в увеличение времени работы).

# СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Gustafsson H.-A.* The ALICE experiment at the CERN LHC // Journal of Instrumentation. — 2008. — т. 3. — с. 88—91.
2. *Schukraft J., Manko V.* ALICE Technical Design Report of the Photon Spectrometer. 1999.
3. *Howard A.* Geant4 User's Guide for Application Developers. — 2007.
4. *Halterman R. L.* Fundamentals of Programming C++. — School of Computing Southern Adventist University, 2018.
5. *Acharya S.* Calibration of the photon spectrometer PHOS of the ALICE experiment // Journal of instrumentation. — 2019. — т. 14.
6. *Berger F.* Particle identification in modular electromagnetic calorimeters. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. — 1992. — с. 152—164.