

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

УДК 539.12.01

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕСТОВЫХ ИСПЫТАНИЙ
ДЕТЕКТОРА ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В
ПУЧКАХ УСКОРИТЕЛЯ

Научный руководитель

к.ф.-м.н.

Студент

_____ В. О. Тихомиров

_____ С. Д. Ильиных

Москва 2023

Содержание

Перечень сокращений и обозначений	3
Введение	4
1 Обзор экспериментальной установки	4
2 Полупроводниковые детекторы на основе GaAs	7
3 Физические процессы, подключенные в моделирование	8
4 Моделирование конфигураций установки	9
4.1 Радиатор из майлара с набором из 90 пленок	10
4.2 Радиатор из майлара с набором из 30 пленок	12
4.3 Радиатор из полиэтилена с набором из 90 пленок (толщина пленки 67 мкм, расстояние между пленками 3 мм)	14
Заключение	16

Перечень сокращений и обозначений

В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения и обозначения:

SPS протонный суперсинхротрон

ПИ переходное излучение

ДПРЛ детектор предварительного развития ливня (preshower)

ППД полупроводниковый детектор

Введение

Одной из ключевых задач в экспериментах по физике высоких энергий является идентификация частиц. В данный момент разрабатываются детекторы ПИ, в частности, на основе GaAs. Для усовершенствования детекторов ПИ и корректной интерпретации полученных результатов применяются вспомогательные детекторы: ДПРЛ и калориметр из свинцового стекла.

Ранее исследовался экспериментальный метод выделения частиц с помощью вспомогательных детекторов. Целью данной работы является моделирование эксперимента на SPS при помощи среды Geant4 (инструментарий для моделирования прохождения элементарных частиц через вещество с использованием методов Монте-Карло) и сравнение экспериментальных данных с смоделированными для дальнейшей интерпретации экспериментальных данных. Также были подключены физические процессы, происходящие в реальном детекторе, для восстановления экспериментальных данных.

1 Обзор экспериментальной установки

Эксперимент проводится на SPS в ЦЕРНе. На пути пучка частиц располагается установка, приведенная на рис. 1.

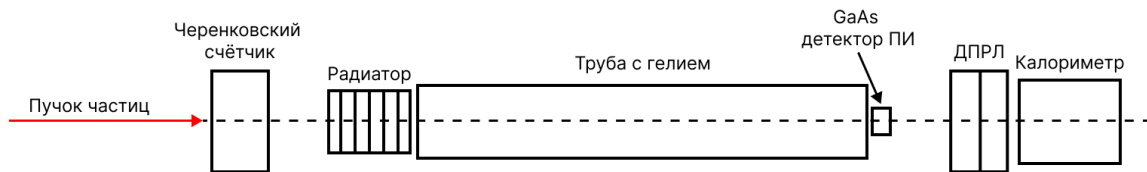


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Поскольку эксперимент проводится на смешанном пучке электронов и π -мезонов, для исследования детектора ПИ [1], состоящего из радиатора и GaAs детектора, необходимо использовать вспомогательные детекторы, расположенные после GaAs детектора. Ниже приведены краткие характеристики каждого элемента установки.

- Черенковский счётчик
Черенковский детектор фиксирует черенковское излучение, что позволяет отделить более легкий электрон от более тяжелого π -мезона.
- Радиатор
Съемные радиаторы ПИ состоят из набора пленок, сделанных из майлара ($C_5H_4O_2$), полиэтилена или полипропилена. В радиаторе рождаются кванты ПИ (γ -кванты) вследствие разных показателей диэлектрической проницаемости воздуха и вещества радиатора. Вероятность рождения квантов ПИ зависит от Лоренц-фактора частицы. При фиксированной энергии пучка в 20 ГэВ вероятность рождения квантов ПИ электронов много больше вероятности рождения квантов ПИ π -мезоном из-за малой массы электрона по сравнению с π -мезоном.

- Труба, заполненная гелием
Рожденные в радиаторе γ -кванты излучаются под очень малым углом. Если поставить GaAs детектор сразу после радиатора, гамма-квант в детекторе будет просто не различим от основного пучка. Для того, чтобы квант ПИ успел отклониться на расстояние, достаточное для детектирования, детектор отодвигается от радиатора. Между ними помещается труба, заполненная гелием, для того, чтобы γ -кванты не поглотились в воздухе во время полета между радиатором и GaAs детектором.
- GaAs детектор
Данный детектор с толщиной слоя вещества в 500 мкм прикреплен к считывающей микросхеме, имеющей пиксельную структуру [2, 3], параметры поперечного сечения которой указаны на рис. 2. Подробнее детектор описан в главе 2.

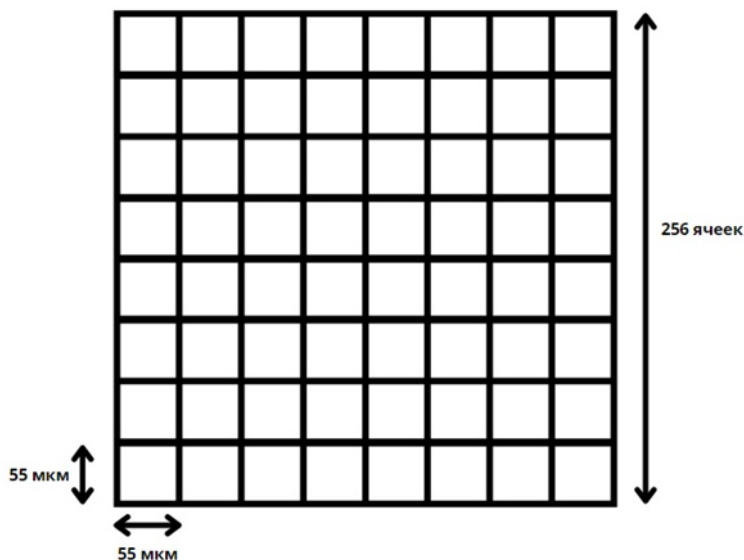


Рис. 2: Параметры GaAs детектора

- Сцинтилляционные счетчики
После GaAs детектора расположены два сцинтилляционных счетчика, которые контролируют, что частица прошла через детектор.
- Счётчик на множественный пролет
Счетчик на множественный пролет также состоит из сцинтиллятора. Он работает на антисовпадение, чтобы исключить события, в которых через детектор пролетело более одной частицы.
- ДПРЛ
Данный детектор состоит из свинцовой пластины толщиной 5 мм, за которой стоит сцинтиллятор. Если частица является электроном, то с большой вероятностью в свинцовой пластине начинают развиваться электромагнитные ливни, фиксирующиеся в сцинтилляторе. В противном случае детектируется только энергия, затраченная на ионизацию, которая сравнимо меньше энергии электромагнитного ливня от электрона. Данное явление связано с различными сечениями взаимодействия электрона и π -мезона.

- Калориметр

Аналогично предыдущему детектору калориметр состоит из свинцового стекла, в котором электрон с большой вероятностью успевает полностью развить электромагнитный ливень, и детектируется сигнал, численно равный энергии электрона. В случае π -мезона в большинстве случаев калориметр регистрирует энергию, примерно равную энергии ионизации одной частицы.

В данной работе описан детектор ПИ, состоящий из радиатора и GaAs детектора, разделенных трубой, наполненной гелием. На рис. 3 показан пример моделирования прохождения электрона через экспериментальную установку.

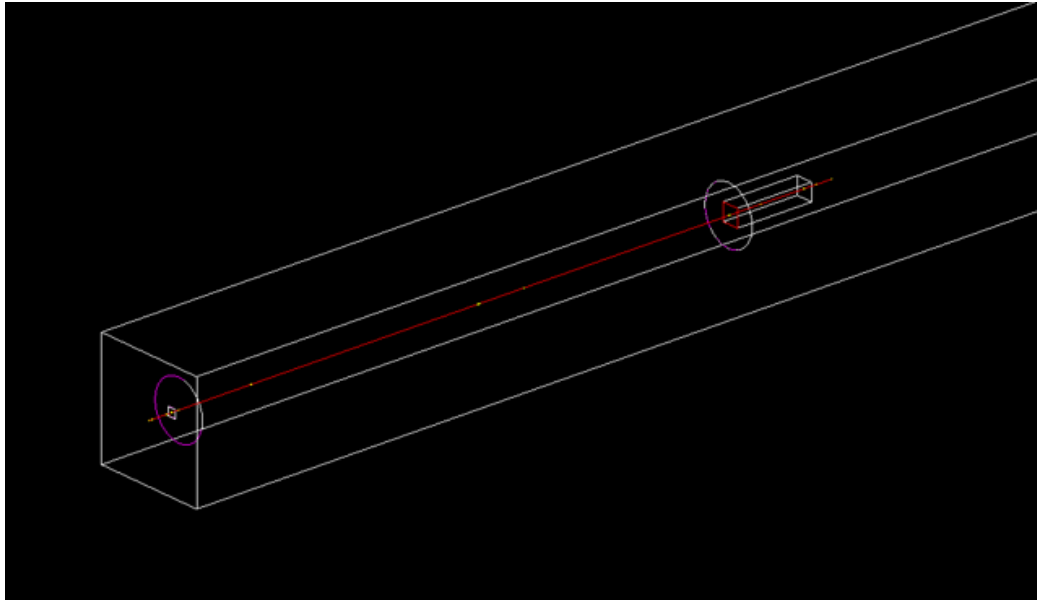


Рис. 3: Моделирование одного события

2 Полупроводниковые детекторы на основе GaAs

Преимущества полупроводниковых ионизационных детекторов (ППД) перед газовыми и сцинтилляционными детекторами заключаются в их малых габаритах, простоте изготовления и высоком энергетическом и пространственном разрешении. Первые ППД в основном изготавливались из германия и кремния. Это было связано с хорошо разработанными методами выращивания этих материалов.

Арсенид галлия представляет особый интерес для исследователей по многим причинам. Во-первых, GaAs как материал для изготовления детекторов удачно сочетает в себе свойства германия и кремния. Имея близкие к Ge значение плотности ($5,32 \text{ г/см}^3$) и атомного номера (31 для Ge и 33 для As), он имеет высокую эффективность регистрации γ -квантов, которая зависит от Z^n (Z - суммарный заряд ядер атомов химических элементов в составе полупроводника). Кроме того, детекторы на основе арсенида галлия могут работать так же, как кремниевые детекторы, при комнатной температуре. Второй особенностью детекторов на основе GaAs является их высокая радиационная устойчивость по сравнению с кремнием. Это важно для использования в физике высоких энергий. По этой причине в последние годы большое внимание уделяется ППД на основе GaAs [4].

В данной работе описан детектор на основе GaAs. Детектор имеет пиксельную структуру и состоит из 65536 (265×256) ячеек с площадью $3025 \mu\text{m}^2$ каждая (рис. 2). Благодаря микроскопической структуре детектора появляется возможность получить угловые распределения поглощенных γ -квантов с высоким разрешением.

3 Физические процессы, подключенные в моделирование

В ходе работы были описаны физические процессы, происходящие в реальном детекторе и радиаторе, для сравнения смоделированных данных с экспериментальными и восстановления исходных экспериментальных данных.

1. Диффузия заряда во время его дрейфа к считывающему чипу в объеме детектора.
Частица, попадая в объем детектора, ионизирует вещество. Электроны, образованные частицей, дрейфуют к электроду детектора, однако, вследствие диффузии, заряд попадает не в один пиксель детектора, а в несколько. Таким образом, стоит задача восстановить энергию исходной частицы по значению выделенной частицей энергии в кластере пикселей, а не в единичном пикселе. В таком случае, одной из проблем анализа экспериментальных данных является энерговыделение в одном из пикселей значения энергии ниже установленного порога (3,7 кэВ).
2. Перекрестные помехи между соседними пикселями детектора.
Перекрестные помехи порождают дополнительный сигнал в пикселе считывающего микрочипа, вызванные сигналом из соседних пикселей. Перекрестные помехи отрицательно влияют на качество данных анализа, поскольку могут искусственно увеличивать сигнал в зависимости от сигнала из окружающих пикселей.
3. Моделирование сигнала dummy радиатора
В реальной экспериментальной установке невозможно создать монопучок частиц, состоящий из e^- или π^- -мезонов. Моделирование эксперимента таким недостатком не обладает. Таким образом, в моделирование необходимо добавить т.н. dummy радиатор, генерирующий фотоны, испущенные в радиаторе частицами, отличными от e^- или π^- -мезонов, для согласования экспериментальных данных со смоделированными.

4 Моделирование конфигураций установки

В проделанном ранее исследовании в среде Geant4 были описаны вспомогательные детекторы: ДПРЛ и калориметр из свинцового стекла. Целью настоящей работы является моделирование различных конфигураций детектора ПИ. В эксперименте, проведенном в 2018 году, проводились испытания, изменяя:

- вещество, из которого изготовлен радиатор;
- число пленок в радиаторе;
- толщину пленок радиатора и расстояние между ними;
- длину трубы, заполненной гелием.

Параметры радиаторов, использованных при моделировании эксперимента, приведены в таблице 1. Результатом моделирования эксперимента являются распределения числа пикселей детектора, приходящихся на одну частицу, а также энергии и угла квантов ПИ в объеме детектора.

Вещество радиатора	Майлар		Полиэтилен			
Толщина пленки, мкм	50		67	67	91	
Расстояние между пленками, мм	3		3	2	2,3	
Число пленок	30	90	30	90	90	30

Таблица 1: Параметры радиаторов, описанных в данной работе

Результатом работы являются распределения, полученные для смоделированного эксперимента, в сравнении с экспериментальными данными.

4.1 Радиатор из майлара с набором из 90 пленок

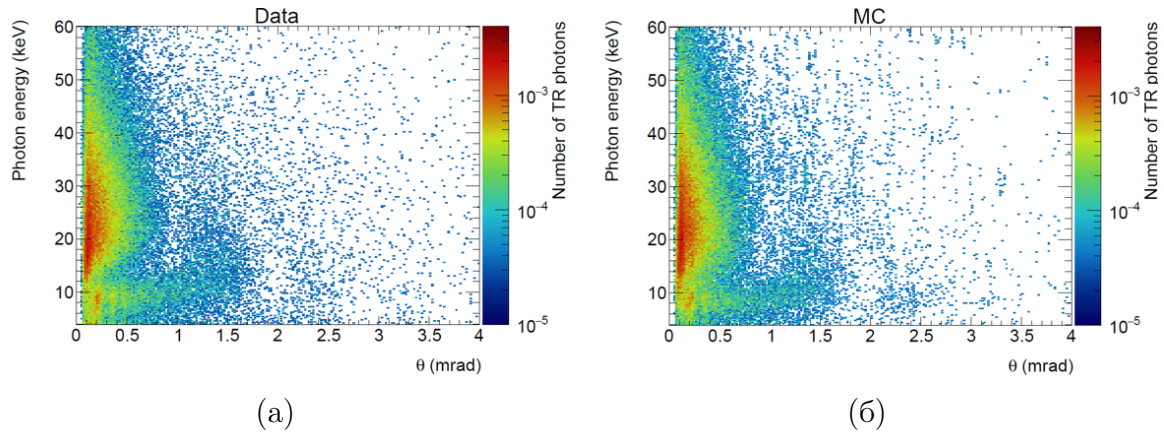


Рис. 4: Двумерные распределения энергии (в кэВ) и угла (в мрад) квантов ПИ, зарегистрированных в детекторе. Сравнение экспериментальных (а) и смоделированных (б) данных.

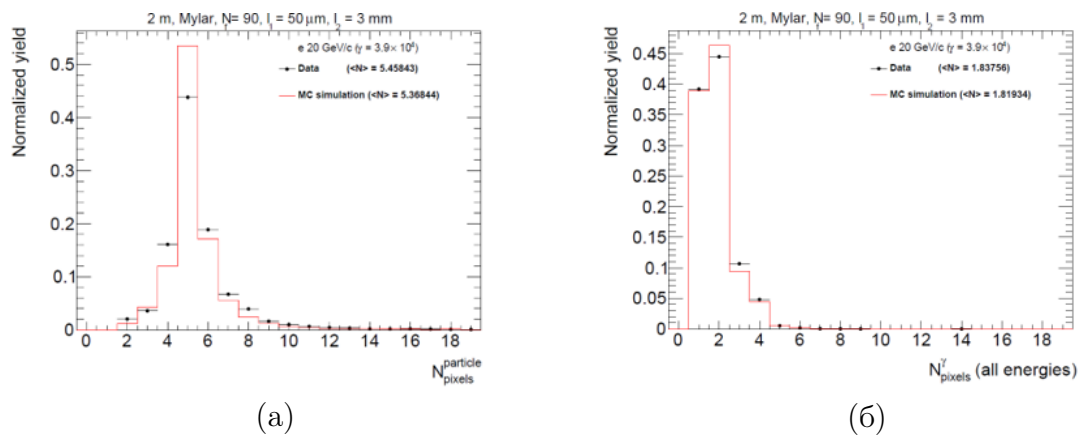


Рис. 5: Распределения числа пикселей в кластере, сработавших при пролете первоначальной частицы (а) и кванта ПИ (б) через объем детектора.

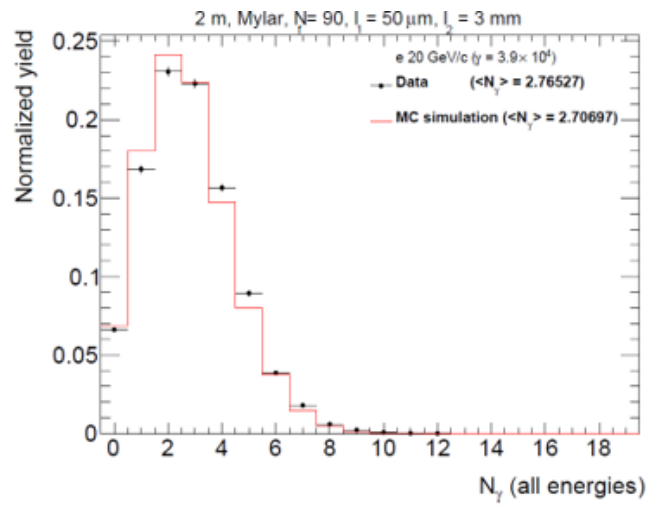
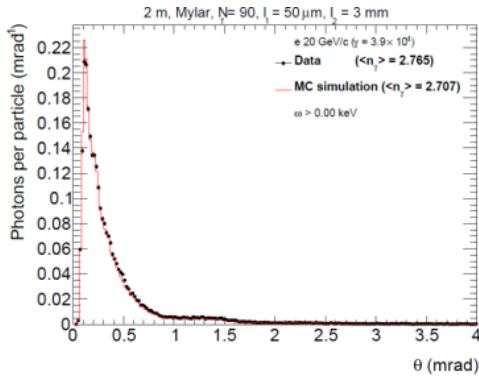
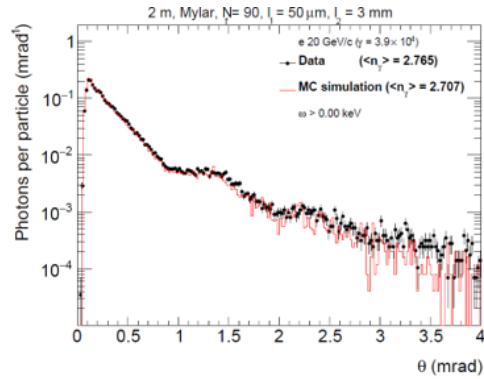


Рис. 6: Распределение числа квантов ПИ, зарегистрированных в детекторе.



(а)



(б)

Рис. 7: Распределения угла (в мрад) квантов ПИ, зарегистрированных в детекторе, в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабе.

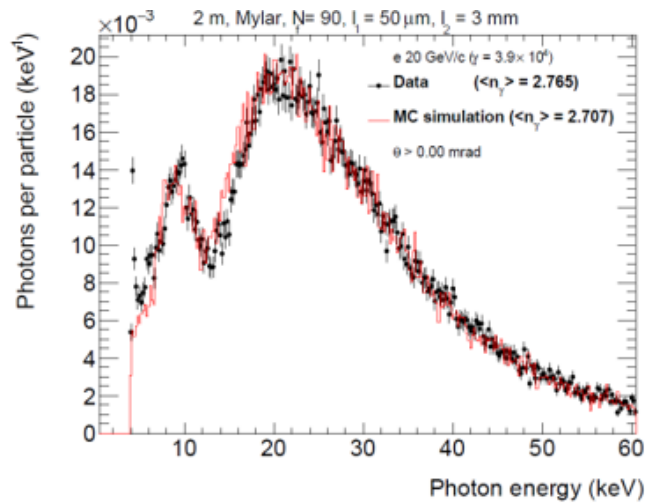


Рис. 8: Распределение энергии (в кэВ) квантов ПИ, зарегистрированных в детекторе.

4.2 Радиатор из майлара с набором из 30 пленок

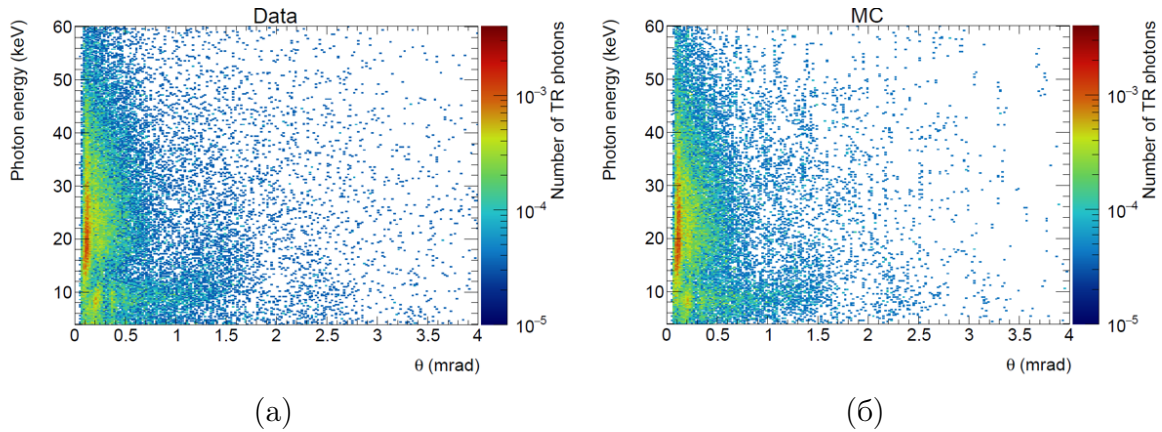


Рис. 9: Двумерные распределения энергии (в кэВ) и угла (в мрад) квантов ПИ, зарегистрированных в детекторе. Сравнение экспериментальных (а) и смоделированных (б) данных.

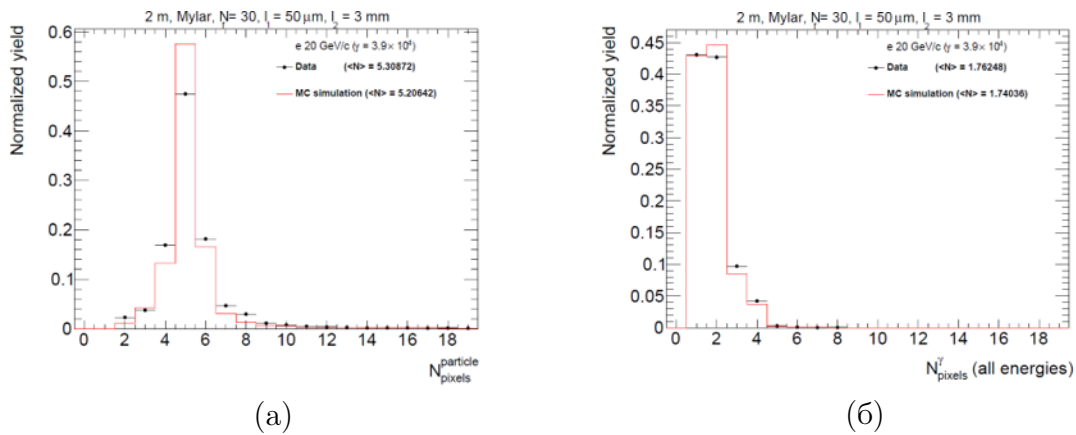


Рис. 10: Распределения числа пикселей в кластере, сработавших при пролете первоначальной частицы (а) и кванта ПИ (б) через объем детектора.

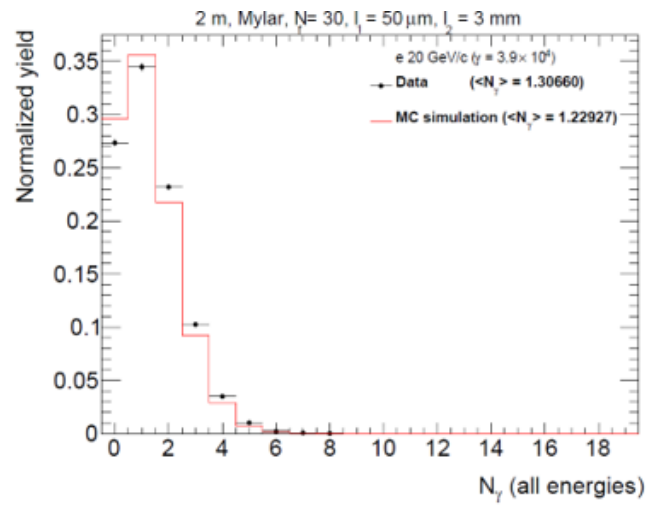
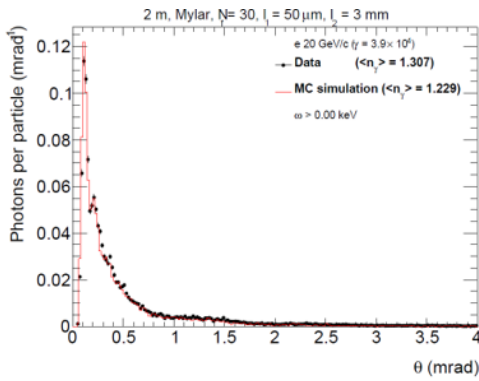
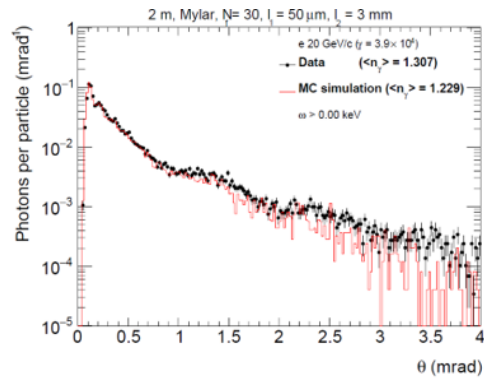


Рис. 11: Распределение числа квантов ПИ, зарегистрированных в детекторе.



(а)



(б)

Рис. 12: Распределения угла (в мрад) квантов ПИ, зарегистрированных в детекторе, в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабе.

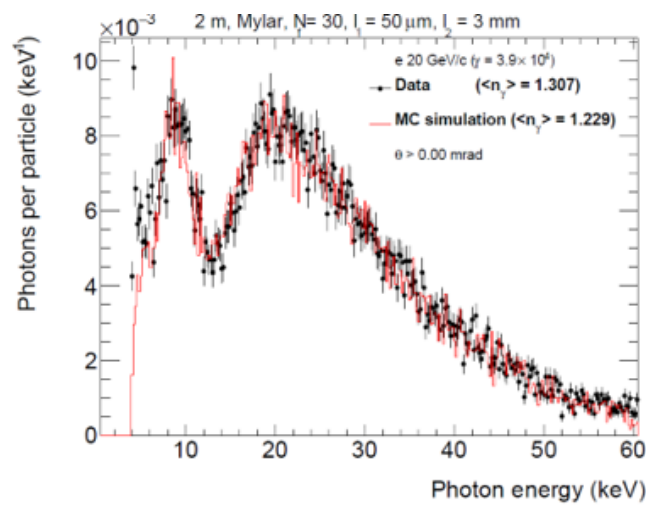


Рис. 13: Распределение энергии (в кэВ) квантов ПИ, зарегистрированных в детекторе.

4.3 Радиатор из полиэтилена с набором из 90 пленок (толщина пленки 67 мкм, расстояние между пленками 3 мм)

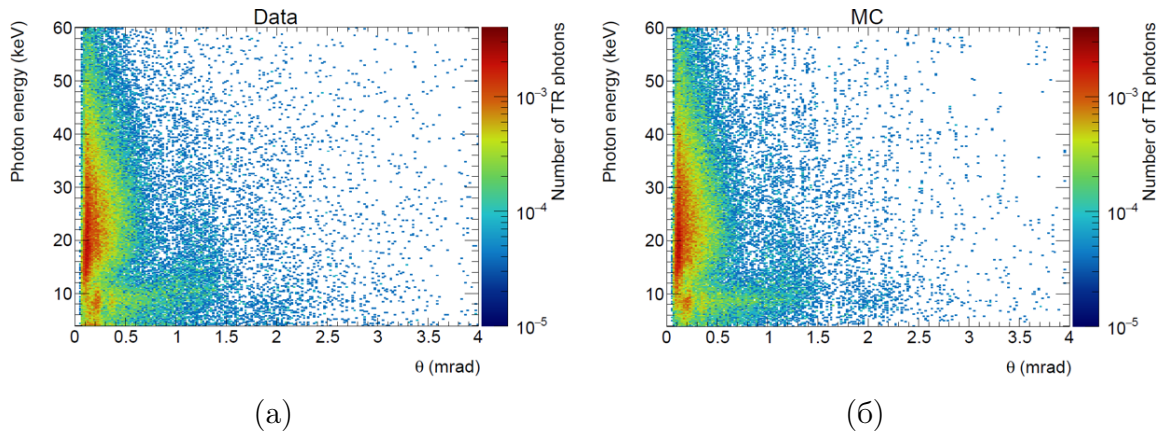


Рис. 14: Двумерные распределения энергии (в кэВ) и угла (в мрад) квантов ПИ, зарегистрированных в детекторе. Сравнение экспериментальных (а) и смоделированных (б) данных.

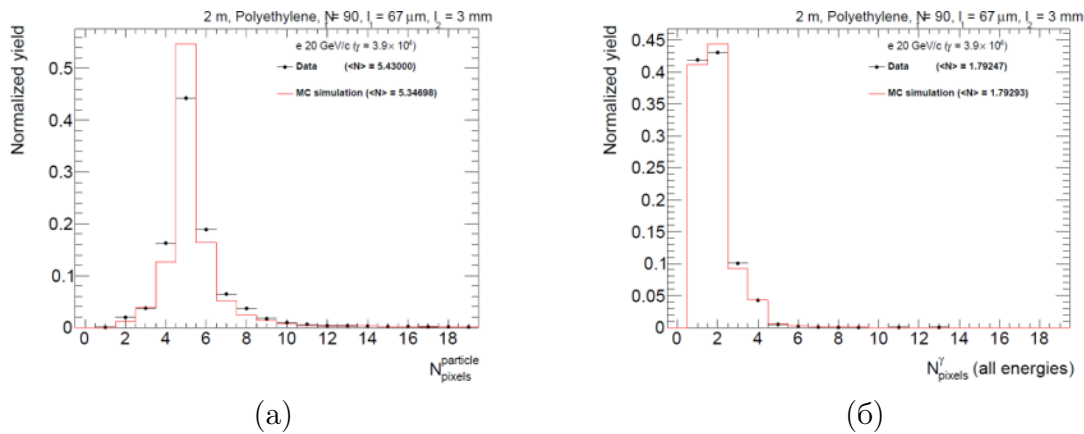


Рис. 15: Распределения числа пикселей в кластере, сработавших при пролете первоначальной частицы (а) и кванта ПИ (б) через объем детектора.

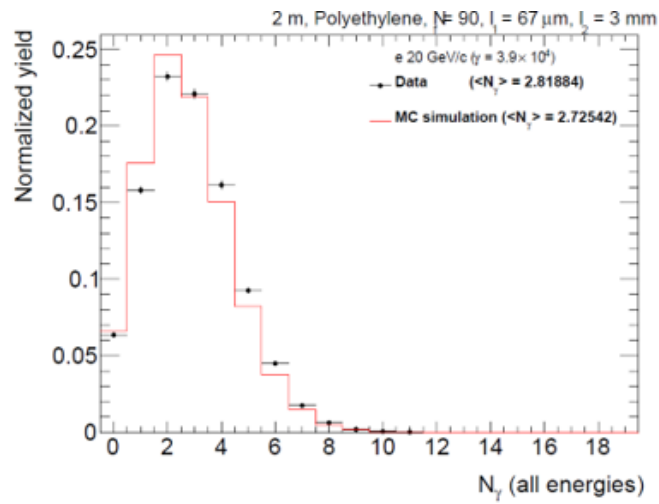
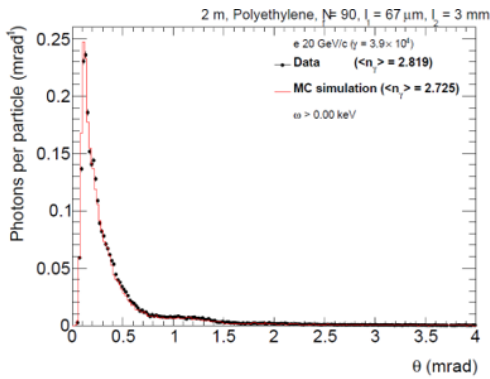
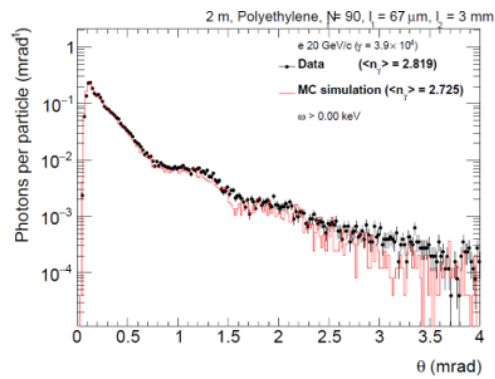


Рис. 16: Распределение числа квантов ПИ, зарегистрированных в детекторе.



(а)



(б)

Рис. 17: Распределения угла (в мрад) квантов ПИ, зарегистрированных в детекторе, в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабе.

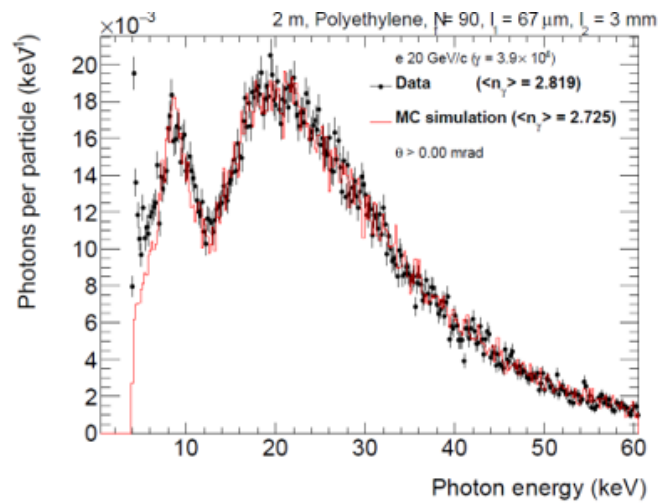


Рис. 18: Распределение энергии (в кэВ) квантов ПИ, зарегистрированных в детекторе.

Заключение

В среде Geant4 описан детектор ПИ, состоящий из радиатора и GaAs детектора, разделенных трубкой, наполненной гелием. Целью работы являлось моделирование радиаторов разных типов для последующего использования программы в целях модернизации детектора ПИ на основе GaAs.

В работе изменялись параметры радиатора, а именно: вещество, из которого изготовлен радиатор; число пленок в радиаторе; толщина пленок и расстояние между ними. Получены распределения энергии и угла квантов ПИ, испущенных в радиаторе и поглощенных в GaAs детекторе.

Также подключены эффекты, происходящие в реальном детекторе, такие как диффузия заряда в объеме детектора и перекрестные помехи в считывающем микрочипе.

Представленная работа позволит создать итоговую модель GaAs-полупроводникового детектора, на основании которой можно будет восстанавливать полученные экспериментальные данные, а также реализовать подбор необходимых параметров детектора и радиатора.

Список литературы

- [1] B. Dolgoshein. Transition radiation detectors. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 326:434–469, 1993.
- [2] J. Alozy et al. Studies of the spectral and angular distributions of transition radiation using a silicon pixel sensor on a Timepix3 chip. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 961:163681, 2020.
- [3] F. Dachs et al. Transition radiation measurements with a Si and a GaAs pixel sensor on a Timepix3 chip. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 958:162037, 2020.
- [4] P. Smolyanskiy, B. Bergmann, G. Chelkov, S. Kotov, U. Kruchonak, D. Kozhevnikov, Y. Mora Sierra, I. Stekl, and A. Zhemchugov. Properties of GaAs:Cr-based Timepix detectors. *JINST*, 13(02):T02005, 2018.