

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 539.1.07

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
**ПРОВЕДЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ЭКСПЕРИМЕНТА С ПРОТОТИПОМ ДЕТЕКТОРА НА  
ОСНОВЕ АРСЕНИД ГАЛЛИЯ НА ПУЧКЕ ЭЛЕКТРОНОВ И  
МЮОНОВ.**

Студент \_\_\_\_\_ В. С. Попов

Научный руководитель \_\_\_\_\_ С. Ю. Смирнов

Москва 2024

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>2</b>
Актуальность . . . . .	2
Цель работы . . . . .	3
Описание экспериментальной установки . . . . .	4
<b>1 Моделирование детектора</b>	<b>6</b>
1.1 Фоновый спектр . . . . .	6
1.2 Размер кластера . . . . .	7
<b>2 Заключение</b>	<b>12</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>13</b>

# ВВЕДЕНИЕ

Переходное излучение – это вид электромагнитного излучения, возникающего при пересечении заряженной частицей границы раздела сред с разными диэлектрическими проницаемостями.

Наибольший интерес представляет переходное излучение, созданное ультррелятивистской частицей ( $\gamma \gg 1$ ), основная энергия которого лежит в области рентгеновского спектра. Рентгеновские лучи излучаются в диапазоне от нескольких кэВ до десятков кэВ в прямом направлении под малыми углами.

В рентгеновском спектре переходное излучение имеет сильную зависимость от Лоренц-фактора ( $\gamma$ ). Метод определения частиц, основанный на переходном излучении в рентгеновском спектре, является одним из четырех неразрушающих методов определения частиц и охватывает диапазон  $\gamma \gtrsim 500$

Для определения частиц с  $\gamma \sim 10^5$  дополнительно используется зависимость угла распространения переходного излучения  $\theta$  от  $\gamma$ .

## АКТУАЛЬНОСТЬ

Рождение адронов с малым поперечным импульсом  $p_T$  в столкновениях с  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ мало изучено, что является большим упущением. Измерение спектров частиц с большим значением фейнмановской скейлинговой переменной  $x_F = p_z/p_{BEAM}$  с импульсами от сотен ГэВ до нескольких ТэВ крайне полезно. Существует несколько различных моделей, дающих различающиеся на порядки результаты, описывающих эту область фазового пространства. Точное измерение спектров рождения частиц с малым  $p_T$  в протон-протонных столкновениях не только поможет уточнить модели описывающие данные процессы, но и может привести к новому понима-

нию КХД. Также изучение космических лучей высоких энергий зависит от наших знаний о рождении адронов с большим  $x_F$ . Например, аномальное количество мюонов в них может быть следствием распада адронов, содержащих кварки очарования и красоты, которые никогда не изучались при больших  $\sqrt{s}$ .

Для изучения описанных выше физических вопросов, понадобится детектор имеющий возможность идентифицировать заряженные частицы при больших гамма. Принципиально новым для данных целей может стать детектор переходного излучения на основе чипа Timerix3 [1–4]. Отличие этого детектора от остальных детекторов переходного излучения заключается в том, что кроме идентификации частицы он способен определять координату частицы с точностью в несколько мкм. Детектор переходного излучения состоит из радиатора и детектора, в традиционных детекторах переходного излучения используется газовый детектор. Такая координатная точность описываемого в работе детектора переходного излучения может быть достигнута благодаря использованию пиксельного чипа высокого разрешения подключенного к полупроводниковому матричному сенсору в роли детектора.

Для эффективной работы данного детектора радиатор должен состоять из нескольких сотен пленок (для образования достаточного количества фотонов переходного излучения), по причине большого количества материала мягкая часть спектра переходного излучения будет поглощаться самим радиатором. Однако разделение фотонов переходного излучения по энергиям не дает большого преимущества в идентификации частиц. Вместо этого для идентификации частицы может использоваться угловая информация переходного излучения имеющая зависимость от  $\gamma$ .

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является проведение Монте-Карло моделирования эксперимента, на пучке электронов, для различных радиаторов и отладка параметров моделирования при помощи сравнения с экспериментальными данными, полученными на ускорителе SPS в ЦЕРНе.

Для достижения описанных целей было установлено соответствующее

щее ПО, проведены тестовые расчеты, созданы фоновые спектры, которые до этого не были созданы. Было найдено несоответствие между данными и моделированием, была проведена вариация параметров моделирования, и получены графики, демонстрирующие зависимость разницы между экспериментом и моделированием от значений параметров моделирования.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В ходе работы использовалась программа, моделирующая эксперимент на установке (Схема установки 1 из статьи [5]), которая представляет из себя: многослойный радиатор, находящийся на расстоянии порядка 2 м от детектора; трубу, заполненную гелием для предотвращения поглощения фотонов переходного излучения в воздухе; сенсор из компенсированного хромом GaAs толщиной 500 мкм, соединенный с TimePix3 чипом, используемый как детектор с квадратной матрицей  $256 \times 256$  пикселей с размером пикселя в 55 мкм. За GaAs располагается ливневый детектор и калориметр из свинцового стекла, перед радиатором находится черенковский детектор. Вместе они образуют систему определения частицы (эта система не моделировалась). В статье [5] описываются некоторые результаты измерений 2018 года.

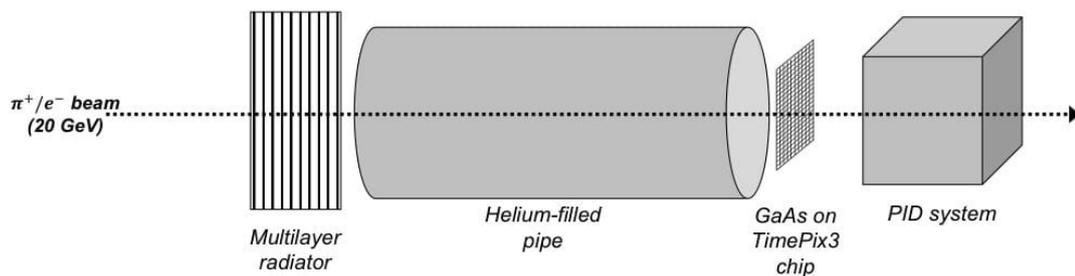


Рисунок 1 — Схема экспериментальной установки

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТЫ

В ходе работы основное внимание было посвящено размерам кластеров переходных фотонов в моделировании и эксперименте. Точное моделирование размера кластера крайне важно для повышения координатной точности в дальнейшем. Координату вхождения частицы в детектор можно определять разными методами. Например, взять за координату вхождения центр наиболее энергичного пикселя. Это простой метод, однако, не очень точный ( $\sigma = \frac{l}{\sqrt{12}}$ , где  $l$ -ширина пикселя). Можно определять координату методом центра гравитации.  $x_{COG} = \frac{\sum E_i x_i}{E_i}$  где  $x_i$  координата центра  $i$ -го пикселя, а  $E_i$  энергия выделившаяся в нем.

Метод центра гравитации имеет систематическую ошибку, которая может быть устранена при помощи коррекции [6; 7]. Для коррекции используется S-кривая, являющаяся зависимостью истинной точки вхождения в детектор от точки вхождения рассчитанной при помощи метода центра гравитации. В зависимости от параметров пиксельного детектора таких как размеры пикселя, материал детектора и прочих зависит S-кривая. Предполагается получить S-кривую для данного детектора при помощи Монте-Карло симуляции [8], а для этого необходимо добиться очень точного совпадения экспериментальных данных с моделированием.

# 1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА

## 1.1 ФОНОВЫЙ СПЕКТР

В эксперименте на детектор кроме пучковых частиц и фотонов переходного излучения так же падают фотоны иного происхождения, рождаемые при взаимодействии пучковой частицы с материалом радиатора, а не при пересечении раздела сред. По сути, эти фотоны являются фоновыми, однако для совпадения моделирования с экспериментом необходимо генерировать и их. Моделирование фотонов переходного излучения происходит на основе теории переходного излучения, однако моделировать фон на основе теории не представляется возможным в виду слишком большого количества процессов, которые могут приводить к рождению фоновых частиц.



Рисунок 1.1 — Схема получения налетающего фонового спектра.

Для моделирования фона используются экспериментальные спектры, полученные на радиаторах пустышках. Радиатор пустышка представляет из себя прямоугольный параллелепипед из материала такого же что и обычный радиатор, и длинной вдоль оси пучка равной сумме толщин всех фольг в обычном радиатор. Радиатор пустышка не является радиатором буквально, однако позволяет экспериментально получить фоновый спектр без переходного излучения.

Для получения налетающего фонового спектра, который будет использоваться в моделировании, из зарегистрированного эксперименталь-

ного фонового спектра, необходимо зарегистрированный спектр разделить на эффективность детектора. Эффективность рассчитывается при помощи программы моделирования. Моделируется падение на детектор равномерного по углу и энергии спектра фотонов, далее зарегистрированный спектр делится на падающий, результатом будет эффективность.

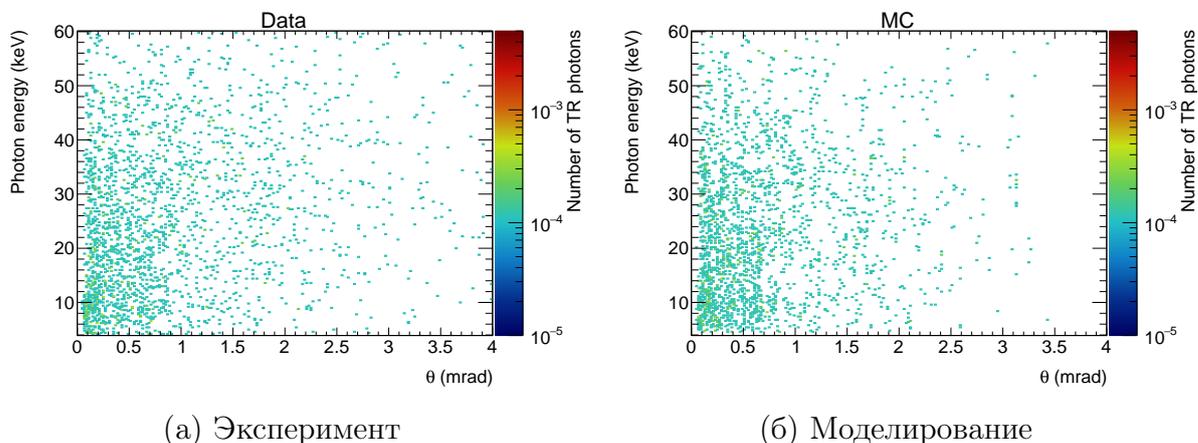


Рисунок 1.2 — Фоновый спектр

## 1.2 РАЗМЕР КЛАСТЕРА

В ходе работы было обнаружено расхождение между экспериментом и моделированием. Как видно из рисунка 1.3 распределение по размеру кластеров фотонов переходного излучения смещено относительно экспериментальных данных в большую сторону для фотонов высоких энергий и в меньшую сторону для фотонов средних энергий. Предположительно данная проблема может быть связана с неверными параметрами диффузии.

$$diff = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{2D \frac{d}{V}}$$

$D$  - коэффициент диффузии,  $V$  - скорость дрейфа электронов,  $d$  - расстояние проходимое э-м лавиной,  $\sigma_0$  - начальная диффузия

Коэффициент диффузии и скорость дрейфа в GaAs являются известными параметрами, и сильное изменение этих параметров моделирования не соответствовало реальности, а при малых изменениях коэффициента

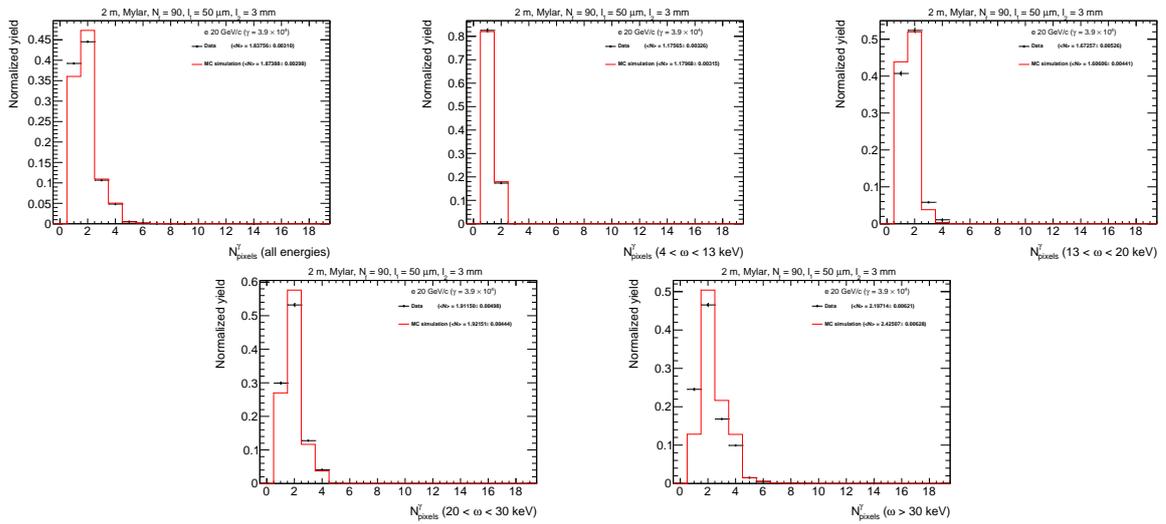


Рисунок 1.3 — Распределение по размеру кластеров фотонов переходного излучения

диффузии устранения расхождения не наблюдается, что выглядит логично учитывая, что, увеличивая коэффициент диффузии мы увеличиваем диффузию для всех энергетических диапазонов одинаково. Начальная диффузия является величиной, зависящей от энергии фотона, точная форма этой зависимости не известно поэтому возможным решением проблемы является выбор более подходящего  $\sigma_0$ .

Имеется недостаток диффузии при средних энергиях и превышение при больших, нужно подобрать функцию, которая достаточно резко бы росла в начале, а при больших значениях вела себя более плавно.

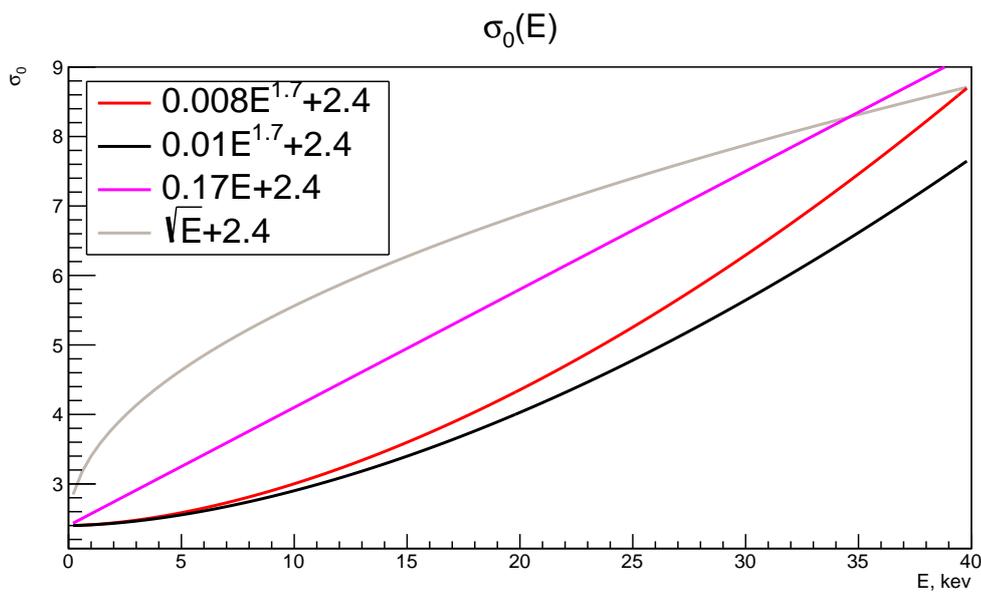


Рисунок 1.4 — Зависимость  $\sigma_0$  от энергии

Были опробованы различные  $\sigma_0$ , наиболее логичным из представленных на рисунке 1.4 было бы использование корневой зависимости. При малых энергиях наблюдается согласие между экспериментальными данными и моделированием из чего следует что свободный член в выражении для 1.4 подходящий, и изменять нужно коэффициент перед энергией. Выберем выражение для начальной диффузии как  $\sigma_0 = K \cdot \sqrt{E} + 2.5$ .

На рисунке 1.5 представлено отношение количества кластеров определенного размера (цвет графика) полученных при помощи моделирования к экспериментальным данным как функция коэффициента перед энергией. Ошибки – статистические. На рисунке 1.6 представлено отношение количества кластеров определенного размера, полученных при помощи моделирования к экспериментальным данным как функция размера кластера, цветом обозначены графики для различных коэффициентов перед энергией.

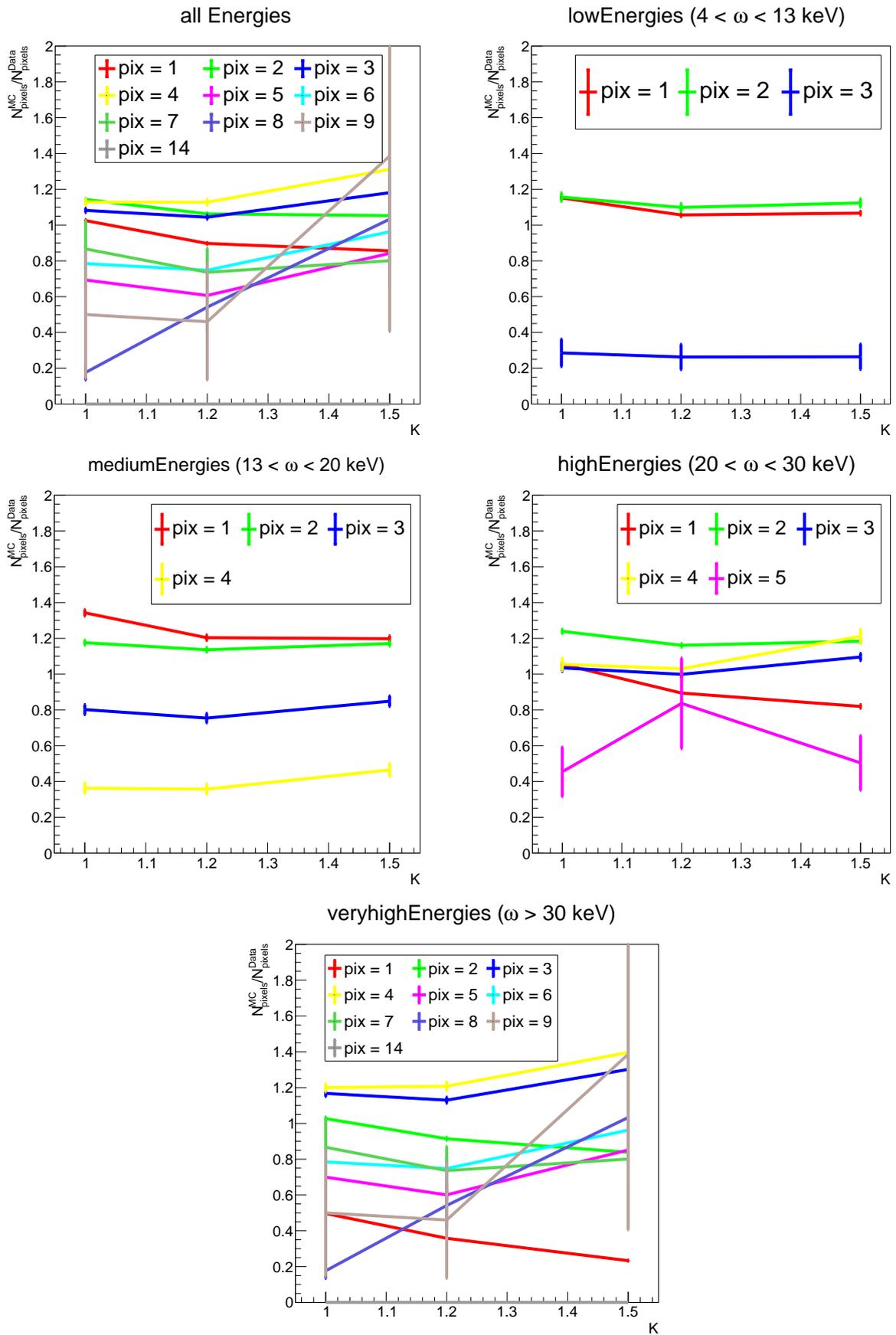


Рисунок 1.5 — отношение количества кластеров в моделировании и эксперименте

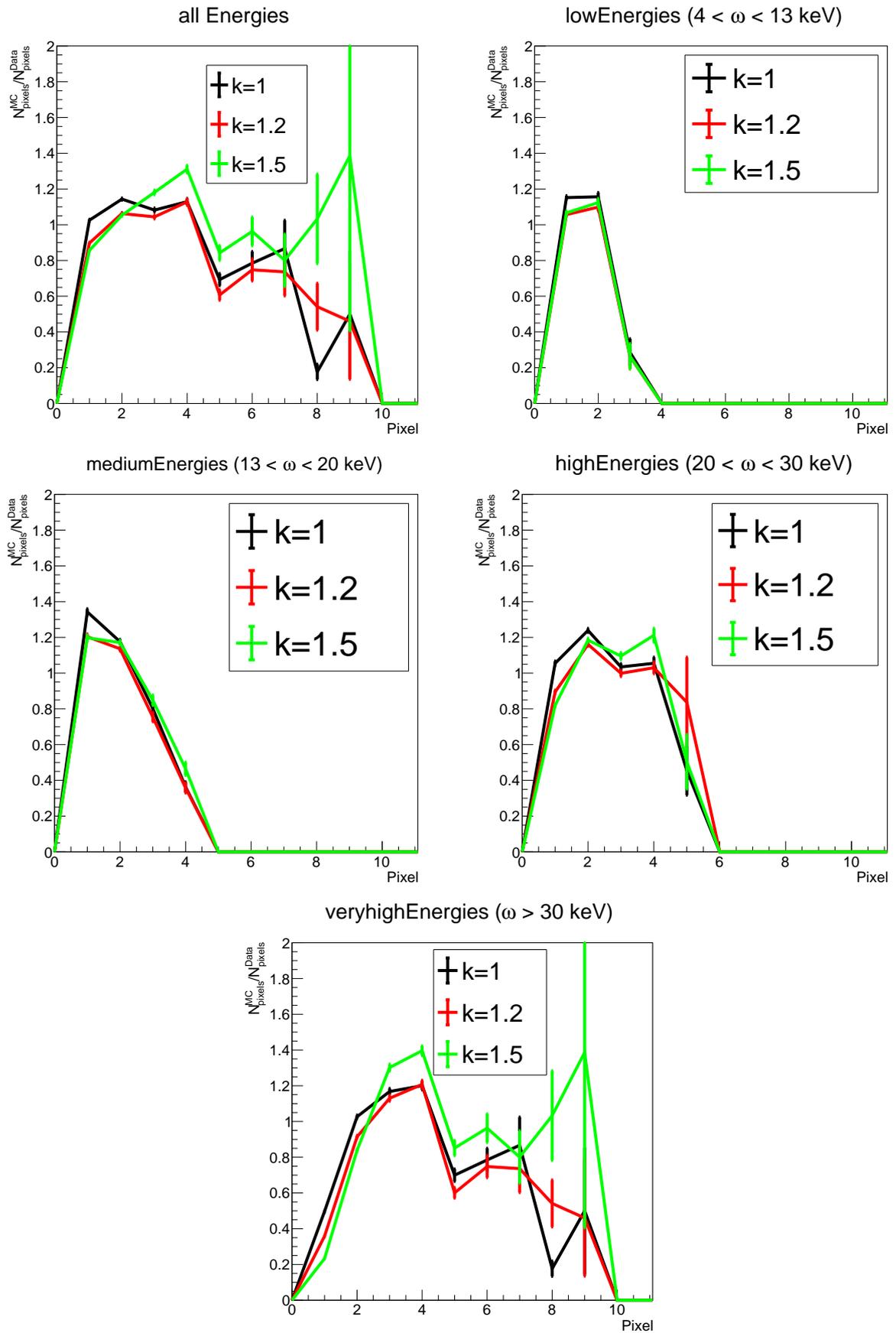


Рисунок 1.6 — отношение количества кластеров в моделировании и эксперименте

## 2 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы было обнаружено несоответствие распределений по размеру кластеров переходных фотонов, полученных при моделировании с экспериментально полученными гистограммами. Причиной несоответствия является неверно выбранная зависимость начальной диффузии от энергии или ошибка в программе. Предложена форма зависимости, уменьшающая расхождение, однако, не устраняющая его полностью. В дальнейшем планируется продолжить экспериментировать с начальной диффузией для подбора более подходящей зависимости. Также в ходе работы были созданы налетающие фоновые спектры для различных радиаторов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. A concept of the transition radiation detector for a hadron separation in a forward direction of the LHC experiments / N. Belyaev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1690, no. 1. — P. 012043.
2. Studies of the spectral and angular distributions of transition radiation using a silicon pixel sensor on a Timepix3 chip / J. Alozy [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2020. — Vol. 961. — P. 163681.
3. Transition radiation measurements with a Si and a GaAs pixel sensor on a Timepix3 chip / F. Dachs [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2020. — Vol. 958. — P. 162037.
4. Transition radiation detectors for hadron separation in the forward direction of LHC experiments / M. Albrow [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2023. — Т. 1055. — С. 168535. — ISSN 0168-9002.
5. Registration of the transition radiation with GaAs detector: Data/MC comparison / J. Alozy [et al.] // J. Phys. Conf. Ser. / ed. by P. Teterin. — 2020. — Vol. 1690, no. 1. — P. 012041.
6. *Landi G.* Properties of the center of gravity as an algorithm for position measurements: two-dimensional geometry // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — Т. 497, № 2/3. — С. 511—534. — ISSN 0168-9002.

7. *Landi G.* Properties of the center of gravity as an algorithm for position measurements // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2002. — Т. 485, № 3. — С. 698—719. — ISSN 0168-9002.
8. *Yahya M. F. O., Kocak F.* Determination of Position Resolution for LYSO Scintillation Crystals Using Geant4 Monte Carlo Code // Advances in High Energy Physics / под ред. В. Bilki. — 2021. — Т. 2021. — С. 1—5. — ISSN 1687-7357.