

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»

На правах рукописи

НЕЧАЕВА СЕРАФИМА АНДРЕЕВНА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА ПЕРЕХОДНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ АДРОНОВ В ТЭВНОЙ
ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА ПРОГРАММ
GEANT4**

Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»
Диссертация на соискание степени магистра

Научный руководитель,
к.ф.-м.н.

_____ В. О. Тихомиров

Москва 2021

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА ПЕРЕХОДНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ АДРОНОВ В ТЭВНОЙ
ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА ПРОГРАММ
GEANT4**

Студент	_____ С. А. Нечаева
Научный руководитель, к.ф.-м.н.	_____ В. О. Тихомиров
Рецензент, к.ф.-м.н.	_____ А. А. Савченко
Секретарь ГЭК, к.ф.-м.н.	_____ А. А. Кириллов
Зав. каф. №40, д.ф.-м.н., проф.	_____ М. Д. Скорохватов
Рук. учеб. прог., д.ф.-м.н., проф.	_____ М. Д. Скорохватов

ОГЛАВЛЕНИЕ

1	Рентгеновское переходное излучение	6
1.1	Основные теоретические сведения	6
1.1.1	Регулярная стопка пластин	7
2	Программный пакет GEANT4	10
3	Эксперимент по тестированию прототипов ДПИ на основе тон- костенных пропорциональных камер	11
3.1	Экспериментальная установка	11
3.2	Модель эксперимента в программном пакете GEANT4	13
3.2.1	Моделирование физических процессов	13
3.2.2	Учет эффекта пространственного заряда	14
3.2.3	Результаты моделирования эксперимента по тестированию прототипов ДПИ	16
4	Детектор Large TRD	18
4.1	Модель детектора в программном пакете GEANT4	20
4.2	Эффективность идентификации адронов	21
4.3	Адронные события	23
4.3.1	Методы отбора адронных событий	24
4.4	Концепция дополнительной конфигурации ДПИ	30
4.4.1	Анализ возможных конфигураций ДПИ из 3 под-детекторов	30
	Список использованных источников	38

ВВЕДЕНИЕ

В современной физике высоких энергий актуальной проблемой является идентификация адронов (заряженных пионов и каонов, а также протонов) с энергиями ЛНС (1 – 6 ТэВ, что соответствует гамма-факторам в интервале от 10^3 до 3.6×10^4)[1]. Благодаря зависимости энергии и количества фотонов переходного излучения (ПИ) от гамма-фактора частицы, детекторы переходного излучения могут быть использованы для разделения подобных частиц. С целью изучения физики адронов под малыми углами проектируется новый эксперимент – SAS (Small Angular Spectrometer)[1]. Предполагается, что детектор переходного излучения (ДПИ) на основе тонкостенных пропорциональных камер (ТПК) – Large TRD (Large Transition Radiation Detector), будет являться одной из составляющих SAS и должен служить для идентификации частиц. Этот детектор должен будет стать первым детектором переходного излучения, разделяющим адроны таких энергий. Предыдущие эксперименты с применением ДПИ проводили лишь разделение адронов энергий порядка нескольких сотен ГэВ [2; 3], при этом целью стояла не идентификация 3 сортов адронов, как в данной работе, а либо идентификация 2 сортов адронов, либо режекция пионов.

Для расчета оптимальных параметров SAS требуется создание его полноценной компьютерной модели. Подобная модель была реализована с помощью программ пакета программ для моделирования прохождения частиц сквозь вещество GEANT4 [4].

В данной работе рассматривается полноценная компьютерная модель детектора ПИ Large TRD, построенная с помощью пакета программ GEANT4, основой для которой являлась аналогичная модель эксперимента по тестированию прототипов ДПИ на основе тонкостенных пропорциональных камер [5]. Также производится сравнение данных моделирования с помощью GEANT4 и с помощью программы Atlsim MC [5; 6], базирующейся на GEANT3 и производится краткий анализ вклада адронных взаимодействий в этих моделях.

С помощью построенной модели GEANT4 были оценены эффективности

идентификации адронов (заряженных пи-мезонов, каонов и протонов) энергий 1–6 ТэВ с учетом и без учета адронных взаимодействий с веществом детектора, а также произведено их сравнение с результатами моделирования с помощью Atlsim.

Был предложен метод отбора адронных событий с целью их последующего отбрасывания с целью повышения эффективности корректной идентификации адронов, а также было оценена эффективность данного метода.

С целью повышения эффективности идентификации адронов в энергетическом диапазоне 1 – 3 ТэВ были предложены модификации основной конфигурации ДПИ Large TRD а также построены модели GEANT4 этих конфигураций. На основе данных моделирования сделан вывод о направлении оптимизации параметров ДПИ.

1. РЕНТГЕНОВСКОЕ ПЕРЕХОДНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Явление рентгеновского переходного излучения было предсказано теоретически в в 1945 году В. Л. Гинзбургом и И. М. Франком [7]. Переходное излучение является результатом неполного гашения вторичных волн, испускаемых атомами среды (или различных сред) под воздействием пролетающей заряженной частицы [8], следовательно, оно возникает при наличии неоднородности в электродинамических характеристиках среды, в которой движется заряженная частица.

Изначально в работе Гинзбурга [7] речь шла об оптической области спектра переходного излучения, однако, в последствии было теоретически описано и рентгеновское переходное излучение [9; 10], которое в дальнейшем нашло применение в детектировании частиц.

1.1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Спектрально-угловое распределение (1.1) переходного излучения, вызванного прохождением ультрарелятивистской частицей с Лоренц-фактором γ через границу раздела сред с диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 [11]:

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{\alpha}{\pi^2} \left(\frac{1}{\gamma^{-2} + \xi_1^2 + \theta^2} - \frac{1}{\gamma^{-2} + \xi_2^2 + \theta^2} \right)^2, \quad (1.1)$$

где $\gamma \gg 1$, $\xi_1^2, \xi_2^2 \ll 1$, $\theta \ll 1$. $\xi_i^2 = \omega_{Pi}^2/\omega^2 = 1 - \epsilon_i(\omega)$, где ω_{Pi} — (электронная) плазменная частота среды i ; $\alpha = 1/137$ — постоянная тонкой структуры.

Плазменная частота является характеристикой материала и задается формулой (1.2):

$$\omega_P = \sqrt{\frac{4\pi\alpha n_e}{m_e}} \approx 28.8 \sqrt{\rho \frac{Z}{A}} \text{ eV}, \quad (1.2)$$

где n_e – плотность электронов в веществе, а m_e – масса электрона; ρ – плотность вещества в г/см³, а $\frac{Z}{A}$ – среднее отношение заряда ядер вещества к их массе.

Поскольку угол испускания переходного излучения мал ($\theta \simeq \sqrt{\gamma^{-2} + \xi_2^2} \approx 1/\gamma$), конечное выражение для спектра мощности переходного излучения может быть записано в виде:

$$\left(\frac{dW}{d\omega}\right)_{\text{поверхность}} = \frac{\alpha}{\pi} \left(\frac{\xi_1^2 + \xi_2^2 + 2\gamma^{-2}}{\xi_1^2 - \xi_2^2} \ln \frac{\gamma^{-2} + \xi_1^2}{\gamma^{-2} + \xi_2^2} - 2 \right) \quad (1.3)$$

В случае прохождения заряженной частицы сквозь фольгу, следует учитывать переходное излучение от её обеих поверхностей, таким образом спектр будет иметь вид:

$$\left(\frac{d^2W}{d\omega d\Omega}\right)_{\text{фольга}} = \left(\frac{d^2W}{d\omega d\Omega}\right)_{\text{поверхность}} \times 4 \sin^2(\phi_1/2), \quad (1.4)$$

где $4 \sin^2(\phi_1/2)$ – интерференционный множитель. Фаза ϕ_1 связана с размером зоны формирования ПИ Z_i (о которой будет сказано позднее) и толщиной материала l_i .

1.1.1. РЕГУЛЯРНАЯ СТОПКА ПЛАСТИН

Для увеличения выхода переходного излучения применяются не одиночные пластины, а стопки из этих пластин, называемые радиаторами ПИ. Рассмотрим далее регулярные радиаторы. Радиатор ПИ называется регулярным, если он состоит из набора пластин (или фольг) с постоянными параметрами, такими как: толщина пластины, расстояние между пластинами, плотность и диэлектрическая проницаемость пластин и среды, разделяющей эти пластины. Для набора из N_f фольг толщиной l_1 , разделенных промежутками среды (в основном для этого используется газ) толщиной l_2 , выражение для спектра переходного излучения может быть записано следующим образом:

$$\left(\frac{d^2W}{d\omega d\Omega}\right)_{\text{набор}} = \left(\frac{d^2W}{d\omega d\Omega}\right)_{\text{фольга}} \times \exp\left(\frac{1 - N_f}{2}\sigma\right) \times \frac{\sin^2(N_f\phi_{12}/2) + \sinh^2(N_f\sigma/4)}{\sin^2(\phi_{12}/2) + \sinh^2(\sigma/4)}, \quad (1.5)$$

где $\phi_{12} = \phi_1 + \phi_2$ – фаза запаздывания $\phi_i \simeq (\gamma^{-2} + \theta^2 + \xi_i^2)\omega l_i/2$ и $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$ – сечение поглощения в материалах радиатора (фольге и газе).

Переходное излучение, генерируемое в радиаторе ПИ, может быть охарактеризовано набором параметров:

- Существенной характеристикой ПИ является длина зоны формирования излучения:

$$Z_i = \frac{1}{\gamma^{-2} + \xi_i^2} \frac{c\beta c}{\omega} \quad (1.6)$$

Данный параметр можно интерпретировать как расстояние, на большем, чем которое электромагнитное поле заряженной частицы перестраивается и излучаемый фотон отделяется от поля родительской частицы. То есть все волны, испущенные в зоне формирования излучения усиливают друг друга. Длина зоны формирования зависит от Лоренц-фактора γ заряженной частицы, энергии фотона ПИ и составляет от десятков микрон для фольги до нескольких сотен микрон для воздуха [12]. Выход ПИ подавляется (1.7) при выполнении условия $l_i \ll Z_i$. Данное явление получило название «эффект зоны формирования»:

$$\left(\frac{d^2W}{d\omega d\Omega}\right)_{\text{фольга}} = 2 \times \left(\frac{d^2W}{d\omega d\Omega}\right)_{\text{поверхность}} ; \left(\frac{d^2W}{d\omega d\Omega}\right)_{\text{набор}} = N_f \times \left(\frac{d^2W}{d\omega d\Omega}\right)_{\text{фольга}} \quad (1.7)$$

- Максимум спектра ПИ приходится на величину энергии:

$$\omega_{max} = \frac{l_1 \omega_{P1}^2}{2\pi\beta c} \quad (1.8)$$

Данная характеристика может быть использована для достижения оптимального сечения поглощения путем подбора различных параметров ДПИ (таких как толщина и материал фольг радиаторов).

- В случае $l_2 \gg l_1$ спектр ПИ в основном определяется интерференцией спектров от каждой фольги.
- При интерференции фольг в радиаторе насыщение достигается при больших значениях Лоренц-фактора заряженной частицы, превышающих значение γ_s :

$$\gamma_s = \frac{1}{4\pi\beta c} \left[(l_1 + l_2)\omega_{P1} + \frac{1}{\omega_{P1}}(l_1\omega_{P1}^2 + l_2\omega_{P2}^2) \right] \quad (1.9)$$

2. ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ GEANT4

GEANT4[4] (англ. GEometry ANd Tracking – геометрия и трекинг) – это бесплатный программный пакет, реализованный на языке C++ и включающий в себя инструменты, способные точно моделировать прохождение частиц через вещество.

Все аспекты процесса моделирования включены в инструментарий[4]:

- геометрия системы,
- используемые материалы,
- интересующие частицы,
- генерация первичных событий,
- физические процессы, регулирующие взаимодействия частиц,
- отслеживание треков частиц сквозь материалы и электромагнитные поля,
- отклик чувствительных компонентов детектора,
- генерация данных о событии,
- хранение событий и треков,
- визуализация детектора и траекторий частиц,
- сбор и анализ данных моделирования с различными уровнями детализации и уточнения.

GEANT4 впервые (в отличие от GEANT3, написанного на языке FORTRAN) включает в себя программные пакеты, предназначенные для моделирования переходного излучения, тем самым предоставляя большие возможности для моделирования детекторов переходного излучения.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ТЕСТИРОВАНИЮ ПРОТОТИПОВ ДПИ НА ОСНОВЕ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ КАМЕР

3.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

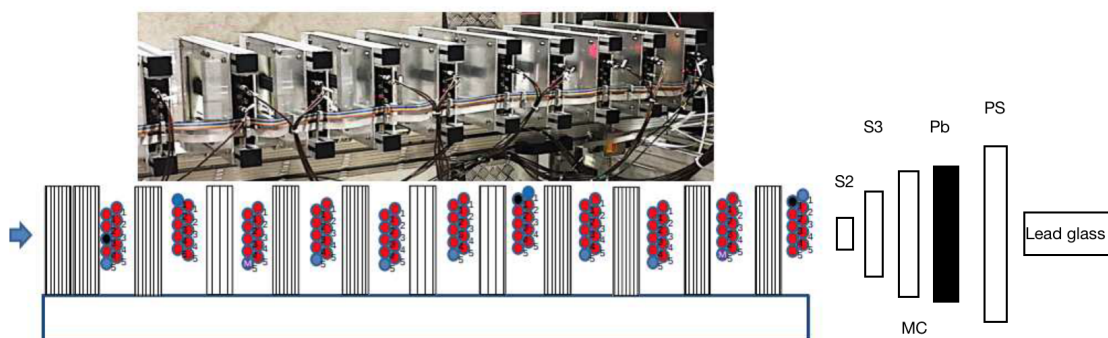


Рисунок 3.1 — Фотография (сверху) и схема эксперимента по тестированию прототипов ДПИ

Тестирование прототипов ДПИ на основе ТПК производилось на тестовом пучке ускорителя SPS в CERN (Швейцария) летом 2018 года [5].

Экспериментальная установка на основе ДПИ состоит из радиаторов ПИ, тонкостенных пропорциональных камер (ТПК), а также из триггерной системы. Данные элементы расположены перпендикулярно тестовому пучку. В установке используется 12 радиаторов ПИ: сначала пучок проходит через два радиатора, далее радиаторы ПИ чередуются со слоями цилиндрических пропорциональных камер (ТПК), имеющих форму трубок (см. Рисунок 3.1): после каждого радиатора размещено по 2 слоя ТПК, по 5 трубок в каждом слое. Ана-

логичные трубки применяются в детекторе TRT (Transition Radiation Tracker [13], эксперимент ATLAS [14], CERN).

В данном эксперименте для ТПК была использована газовая смесь, состоящая из 71.8% Хе, 25.6% CO₂ и 2.6% O₂, и находящаяся под давлением 1 атмосфера. Газовое усиление смеси порядка $\sim 2.5 \times 10^4$. Внешний вид и схема установки приведены на Рисунке 3.1.

В Таблице 3.1 приведены параметры радиаторов различных конфигураций прототипа ДПИ, при этом каждый радиатор ПИ состоит из 15 фольг, разделенных слоем воздуха. В каждой из конфигураций установки использовался только 1 тип радиаторов. В качестве дополнительной конфигурации была использована конфигурация без радиаторов ПИ.

Триггерная система (см. Рисунок 3.1) состоит из сцинтилляторных счетчиков (в скобках указаны площади поверхностей этих счетчиков, перпендикулярных пучку):

- S2 (20×20 мм²),
- S3 (25×25 мм²),
- PS (Preshower scintillator) (50×130 мм²),
- MC (Multiplicity counter) (50×80 мм²),

а также из калориметра Lead glass (100×100 мм²), выполненного из свинцового стекла.

В качестве частиц пучка в использовались электроны, заряженные пи-мезоны и мюоны; их энергии и соответствующие Лоренц-факторы приведены в Таблице 3.2.

Калибровка отклика каждой из газовых пропорциональных камер осуществлялась с помощью источника ⁵⁵Fe[5].

Таблица 3.1 — Параметры тестируемых радиаторов ПИ

материал	толщина фольг, мкм	шаг, мм	плотность, г/см ³
майлар	50	3	1.389
полиэтилен	67	2	0.954
		3	
	91	2.3	0.946

Таблица 3.2 — Лоренц-факторы частиц пучка

Частицы	Энергия	γ -фактор
e^-	20 ГэВ	3.9×10^4
π^-		0.14×10^3
μ^-	120 ГэВ	1.14×10^3
	180 ГэВ	1.80×10^3
	290 ГэВ	2.74×10^3

3.2. МОДЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТА В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ GEANT4

С помощью программного пакета GEANT4 [4] была построена компьютерная модель эксперимента по тестированию прототипов ДПИ для следующих конфигураций:

- конфигурация без радиаторов ПИ,
- конфигурация с майларовыми радиаторами (см. Таблицу 3.1),
- 3 конфигурации с полиэтиленовыми радиаторами (параметры радиаторов см в Таблице 3.1).

Результатом моделирования является набор энергосыделений в каждом из 22 слоев ТПК. В качестве основного параметра сравнения данных моделирования и данных эксперимента приводятся дифференциальные спектры энергосыделений, усредненные по всем его слоям.

3.2.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Основные электромагнитные процессы (ионизация, множественное рассеяние, Комpton-эффект, тормозное излучение и т.д.) в модели описаны с помощью класса `G4EmStandardPhysics`. Ионизация в тонких слоях вещества, а именно в газовой смеси детектора, описана с помощью класса `G4PAILModel` [15]. Переходное излучение было описано с помощью `G4VXTRenergyLoss` и `G4TransparentRegXTRadiator` [16], так как радиаторы в экспериментальной установке являются «регулярными» [8]: у этих радиаторов на протяжении всей длины не меняются такие параметры как плотность и толщина фольг, а так же плотность газового (в данном случае воздушного) промежутка между фольга-

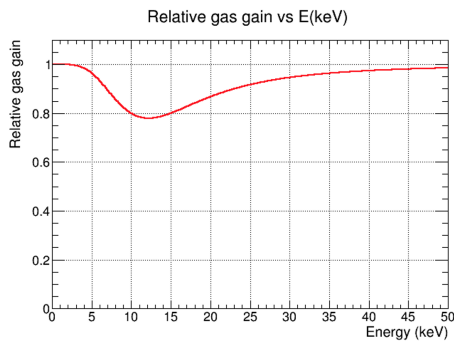
ми и его длина. Моделирование адронных взаимодействий (упругое, неупругое взаимодействие адронов с ядрами, а также процессы захвата и деления) в модели осуществляется с помощью класса `G4HadronPhysicsFTFP_BERT` [17], данный адронный физический лист является рекомендованным для использования в моделях коллайдерных экспериментов.

3.2.2. УЧЕТ ЭФФЕКТА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА

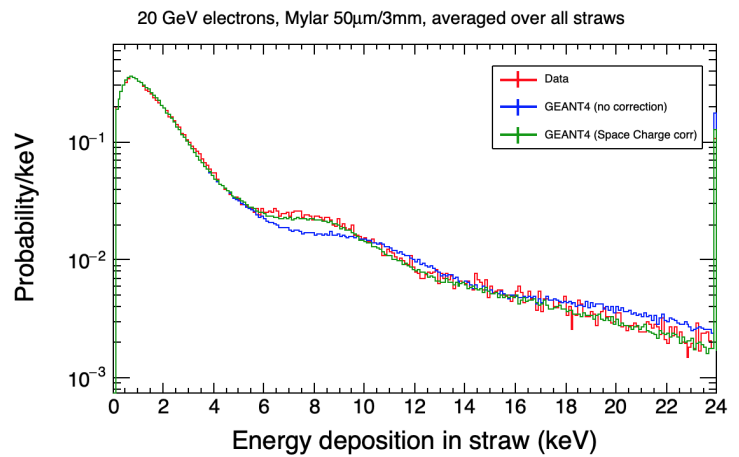
Одной из проблем моделирования эксперимента по тестированию прототипов было расхождение результатов моделирования с помощью пакета программ GEANT4 с экспериментальными данными в области энерговывделений 5 – 8 кэВ для частиц, для частиц с высокими гамма-факторами, для которых вклад переходного излучения в спектры энерговывделений становился существенным. Это расхождение было объяснено неучтенным вкладом эффекта пространственного заряда [18].

Данный эффект описывался ранее в экспериментах с использованием аналогичных ТПК [19; 20]. Он заключается в том, что при большой локальной плотности ионизации в газе камеры электроны ионизации в процессе газового усиления вблизи анода создают «облако» вторичных электронов, которое частично экранирует электрическое анодное поле. В результате происходит уменьшение коэффициента газового усиления и, как следствие – возникает некоторая непропорциональность между величиной первичной ионизации и полученного с анода сигнала. Важно отметить, что такой эффект в нашем случае имеет место в достаточно ограниченной области первичных энергетических потерь ~ 10 КэВ: при меньших потерях первичная ионизация слишком мала, чтобы вызвать экранирование электрического поля, а при больших – пробег фото- или δ -электронов в газе становится велик и плотность первичной ионизации оказывается недостаточной для того, чтобы вызвать экранирование в процессе дрейфа к аноду.

Так как функционал программного пакета GEANT4 не позволяет производить подобную коррекцию автоматически, было принято решение реализовать коррекцию вручную. Коррекция введена внутри класса чувствительного детектора, который служит для регистрации частиц в объеме газа, заполняющего ТПК. Влияние эффекта пространственного заряда заключается в том, что



(a) Функция газового усиления



(б) Спектры энерговыведения в ТПК

Рисунок 3.2 — Эффект, оказываемый введением функции пространственного заряда. Справа: красным — данные, синим — результаты моделирования до коррекции, зеленым — после

газовый детектор начинает работать в непропорциональном режиме в некоторой области энергий. Для учета этого эффекта была введена функция газового усиления (см. Рисунок 3.2а). На Рисунке 3.2б представлено сравнение экспериментальных данных энерговыведения в ТПК с данными моделирования до и после введения коррекции для одной из конфигураций эксперимента по тестированию прототипов ДПИ, аналогичный результат наблюдался и для остальных конфигураций.

3.2.3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ТЕСТИРОВАНИЮ ПРОТОТИПОВ ДПИ

Сравнение данных моделирования с помощью GEANT4 (синим) с экспериментальными данными (красным) и с данными моделирования с помощью специализированной программы Atlsim для некоторых конфигураций эксперимента по тестированию прототипов ДПИ (без радиаторов, с майларовыми радиаторами 50 мкм/ 3 мм и с полиэтиленовыми радиаторами 67 мкм / 3 мм) приведено на рисунках 3.3 – 3.5. Как можно видеть, распределения очень хорошо согласуются друг с другом, что дает основания полагать, что обе модели: как GEANT4, так и Atlsim, хорошо описывают экспериментальные данные и могут быть использованы в качестве основы для моделирования проектируемого детектора переходного излучения Large TRD.

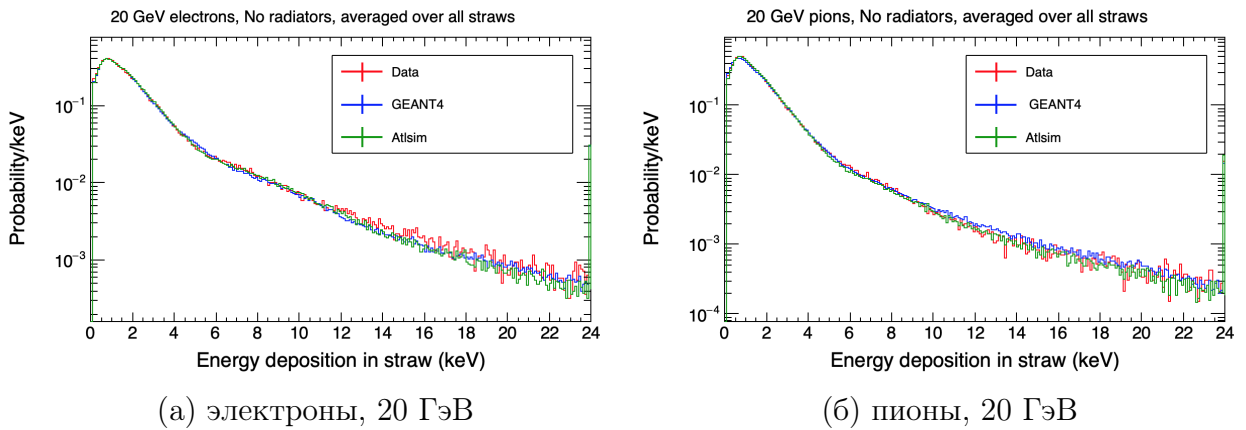


Рисунок 3.3 — Дифференциальные спектры энерговыделений в детекторе (конфигурация без радиаторов ПИ)

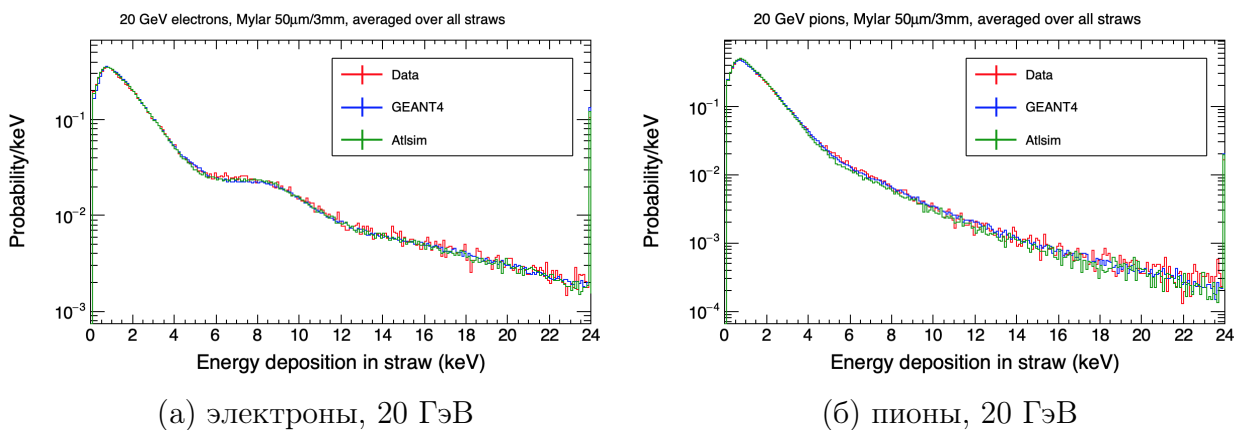


Рисунок 3.4 — Дифференциальные спектры энерговыделений в детекторе (радиаторы – майлар / 50 мкм/ 3 мм)

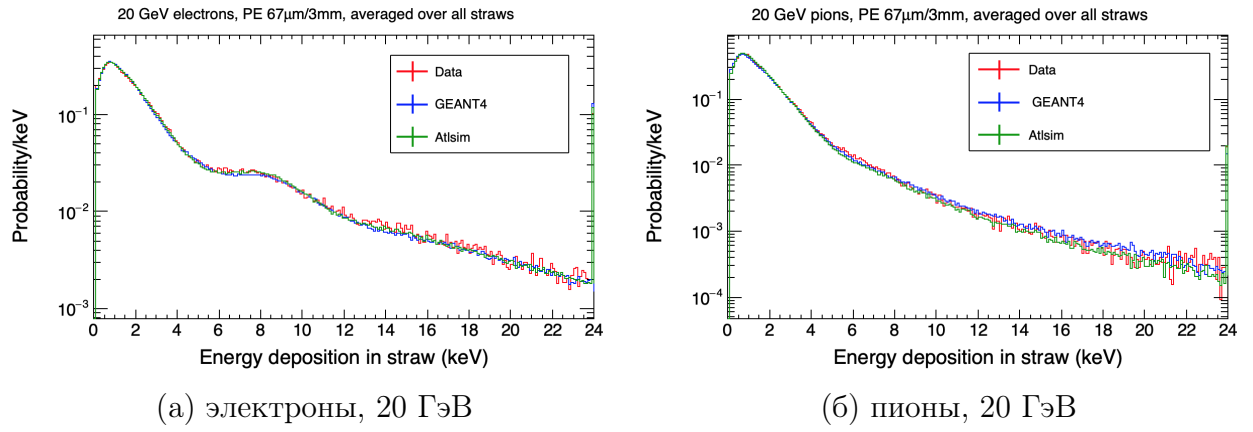


Рисунок 3.5 — Дифференциальные спектры энерговывделений в детекторе (радиаторы – полиэтилен / 67 мкм/ 3 мм)

4. ДЕТЕКТОР LARGE TRD

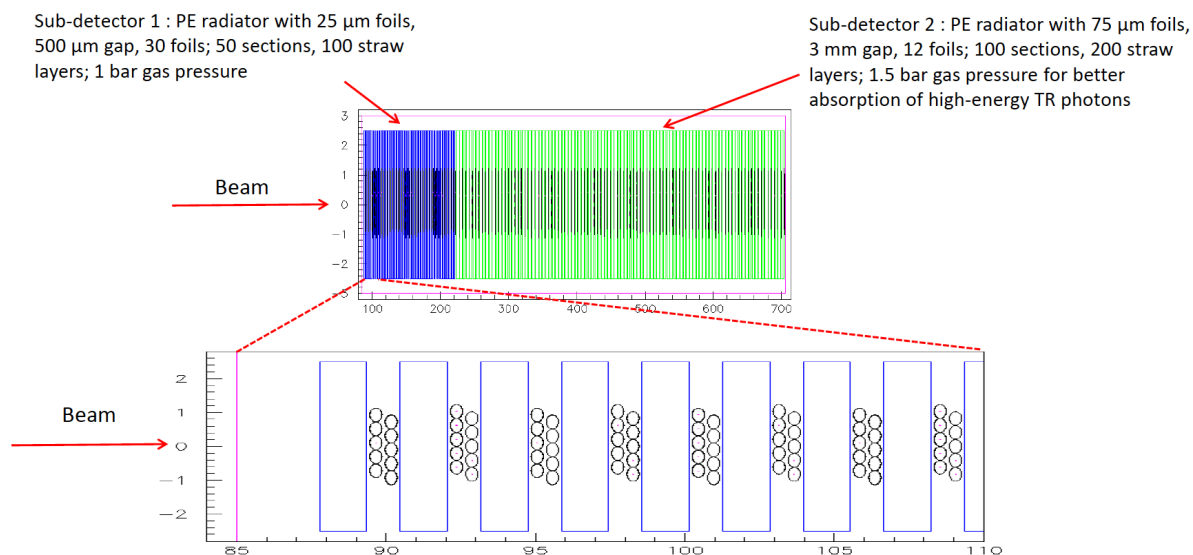


Рисунок 4.1 — Схема проектируемого детектора Large TRD

В качестве основной конфигурации Large TRD рассматривается детектор, состоящий из двух под-детекторов [21]. В первом под-детекторе предполагается применять радиаторы, состоящие из 30 фольг из полиэтилена с толщиной фольг 25 мкм и расстоянием между ними 500 мкм. Детектирующая часть состоит из сдвоенных слоев ТПК диаметром 4 мм с газовой смесью на основе ксенона при нормальном давлении. Всего первый под-детектор будет содержать 50 таких секций (100 слоев ТПК). Следующий за первым второй под-детектор предполагается состоящим из 100 секций «радиатор – сдвоенный слой ТПК». Каждый радиатор здесь будет состоять из 12 фольг толщиной 75 мкм и расстояниями между фольгами 3 мм. Поскольку во втором под-детекторе образующиеся в радиаторах кванты ПИ будут иметь более «жесткий» энергетический спектр, для их эффективного поглощения предполагается увеличить давление рабочего газа в ТПК до 1.5 атм. Общая длина данного варианта полномасштабного ДПИ должна составить около 6 м.

Разные параметры двух под-детекторов позволят получить разные характеристики излучаемых и поглощенных в них квантов ПИ и таким образом – различные зависимости отклика детектора от Лоренц-фактора регистрируе-

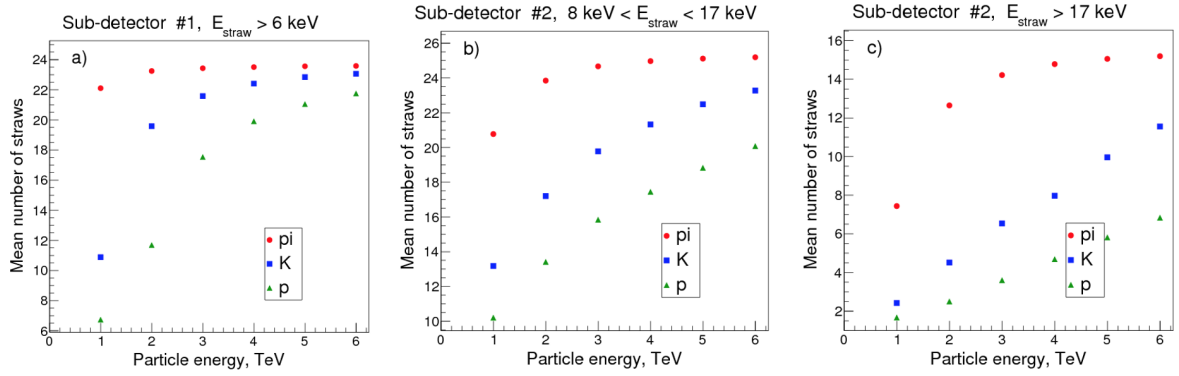


Рисунок 4.2 — Среднее число «сработавших» ТПК с разным энерговыделением в двух под-детекторах в зависимости от энергии регистрируемых адронов [21]

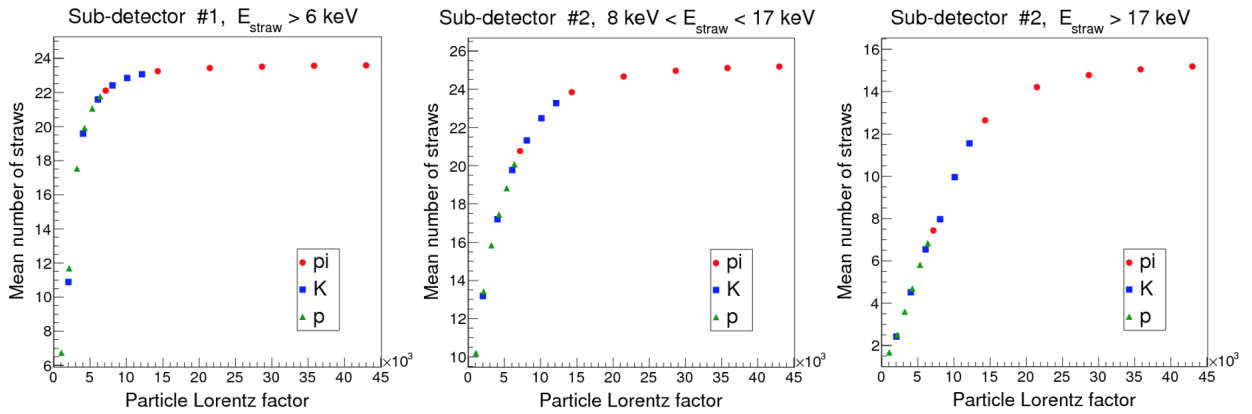


Рисунок 4.3 — Среднее число «сработавших» ТПК с разным энерговыделением в двух под-детекторах в зависимости от Лоренц-фактора регистрируемых адронов [21]

мой частицы (см. Рисунки 4.2 и 4.3). В первом под-детекторе энергетические спектры квантов ПИ получаются более «мягкими», что дает возможность для идентификации частиц с относительно небольшими Лоренц-факторами: $\sim 10^3$ — 6×10^3 . Второй под-детектор дает более «жесткие» спектры ПИ, что сдвигает Лоренц-зависимости в область больших гамма-факторов. Относительно высокий выход квантов ПИ большой энергии позволяет выделить во втором под-детекторе две области для подсчета числа сработавших ТПК: первую – с энерговыделением в камерах от 8 кэВ до 17 кэВ, и вторую – с энерговыделением больше 17 кэВ [21].

Как видно из Рисунка 4.3, Лоренц-зависимости этих двух областей регистрируемой в камерах энергии имеют разный характер, что опять же расширяет диапазон Лоренц-факторов, в котором возможна идентификация частиц.

4.1. МОДЕЛЬ ДЕТЕКТОРА В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ GEANT4

На основе модели эксперимента по тестированию прототипов ДПИ в GEANT4 была построена аналогичная модель основной конфигурации проектируемого детектора Large TRD. Способ задания физических процессов в модели Large TRD и базовой модели полностью идентичен. В качестве частиц пучка использовался следующий набор частиц:

- заряженные пионы энергий 1, 2, 3, 4, 5, 6 ТэВ,
- заряженные каоны энергий 1, 2, 3, 4, 5, 6 ТэВ,
- протоны энергий 1, 2, 3, 4, 5, 6 ТэВ.

Модель позволяет получать набор энерговыделений в каждом слое ТПК детектора для каждого события, то есть ожидаемый отклик детектора. Этот набор данных позволяет оценить в частности эффективность идентификации адронов.

Для сравнения моделей GEANT4 и Atlsim были построены дифференциальные и интегральные спектры энерговыделений, усредненные по всем слоям для каждого из двух под-детекторов. В ходе сравнения моделей было выявлено, что спектры энерговыделений больше согласуются друг с другом при условии, что в модели GEANT4 активированы только электромагнитные процессы. На Рисунке 4.4 приведено сравнение дифференциальных и интегральных спектров энерговыделений для пионов 1 ТэВ для моделей:

- красным: модель GEANT4; активированы только электромагнитные процессы, адронные процессы отключены,
- синим: модель GEANT4; активированы как электромагнитные процессы, так и адронные,
- зеленым: модель Atlsim.

Как видно из этого примера, наилучшее согласие между моделями Atlsim и GEANT4 в формах спектров энерговыделений соответствует случаю, когда адронные процессы в модели GEANT4 не активированы. Это может свидетельствовать о некорректном моделировании адронных процессов в специализированной программе Atlsim.

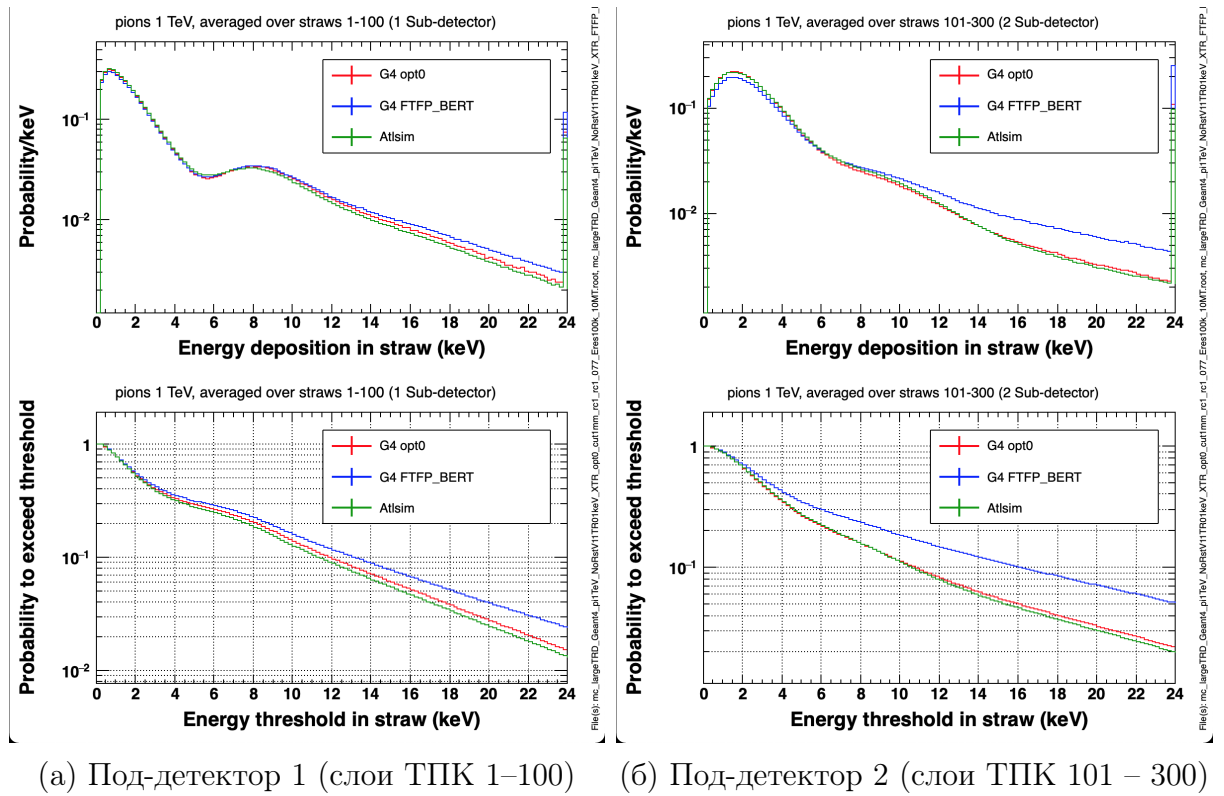


Рисунок 4.4 — Спектры энерговыделений в ДПИ для π^+ 1 ТэВ (сверху – дифференциальный, снизу – интегральный)

4.2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ АДРОНОВ

На основе наборов энерговыделений в каждом слое ДПИ в каждом событии с помощью специализированной программы методом максимального правдоподобия производится вычисление эффективностей идентификации адронов для каждой частицы из набора.

Процесс вычисления происходит следующим образом. Выбирается 3 энергетических интервала для энерговыделений в слоях ДПИ:

- 1) первый под-детектор: $E > 6$ кэВ,
- 2) второй под-детектор: $8 \text{ кэВ} < E < 17$ кэВ,
- 3) второй под-детектор: $E > 17$ кэВ.

Далее для каждого из выбранных интервалов для каждого события из части всего набора событий (например, 80 000, если полная статистика 100 000) определяется число слоев ТПК, энерговыделения в которых попадают в данный интервал. Затем для каждого интервала и сорта первичных частиц (π^+ , K^+

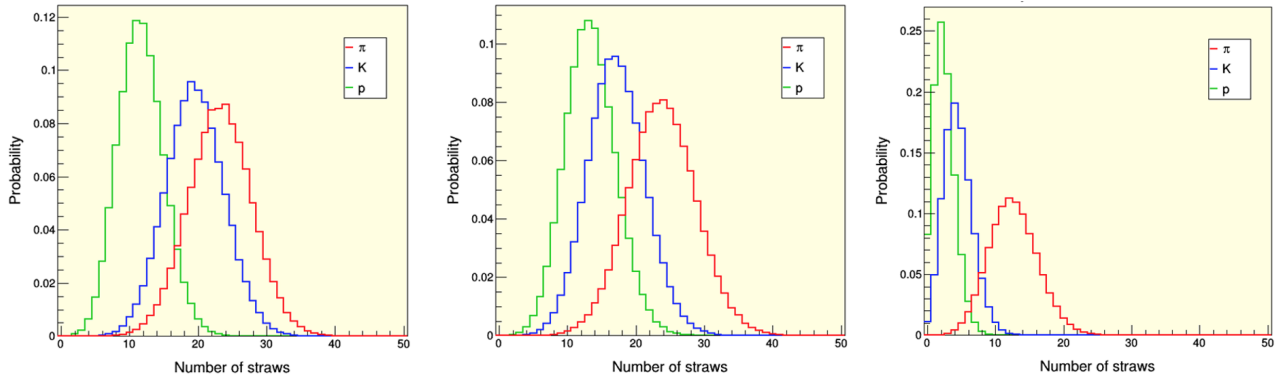


Рисунок 4.5 — Распределение по числу ТПК с энерговыведениями, попавшими в определенный интервал

или p^+) определенной энергии из набора строятся референсные распределения числа слоев ТПК, с энерговыведениями, попавшими в интервал. Пример таких распределений для 2 ТэВ продемонстрирован на Рисунке 4.5.

Далее для другой части набора событий (для выбранного примера – 20 000) производится следующая процедура. Для каждого события известен набор из 3 чисел – количества ТПК с энерговыведениями, попавшими в каждый из 3 интервалов. С помощью референсных спектров для каждого интервала далее определяются вероятности, с которыми частица может принадлежать к определенному сорту – P_{1k}, P_{2k}, P_{3k} , где k – сорт частицы (π^+, K^+ или p^+). Далее эти вероятности перемножаются и рассматриваются величины $L_k = P_{1k}P_{2k}P_{3k}$, из которых выбирается максимальное – L_i , и частица идентифицируется, как частица сорта i . Эффективностью идентификации каждого сорта частиц будет величина, равная доле частиц верно идентифицированных с помощью выше описанного способа. На рисунке 4.6 изображены значения эффективностей корректной идентификации положительно заряженных пионов и каонов, а также протонов с энергиями 1–6 ТэВ для следующих моделей:

- красным: модель GEANT4; активированы только электромагнитные процессы, адронные процессы отключены,
- синим: модель GEANT4; активированы как электромагнитные процессы, так и адронные,
- зеленым: модель Atlsim.

Различия в эффективностях корректной идентификации в большей части обусловлена различием в форме спектров энерговыведений в слоях ДПИ, которое было продемонстрировано ранее (см рисунок 4.4). Как видно из рисунка

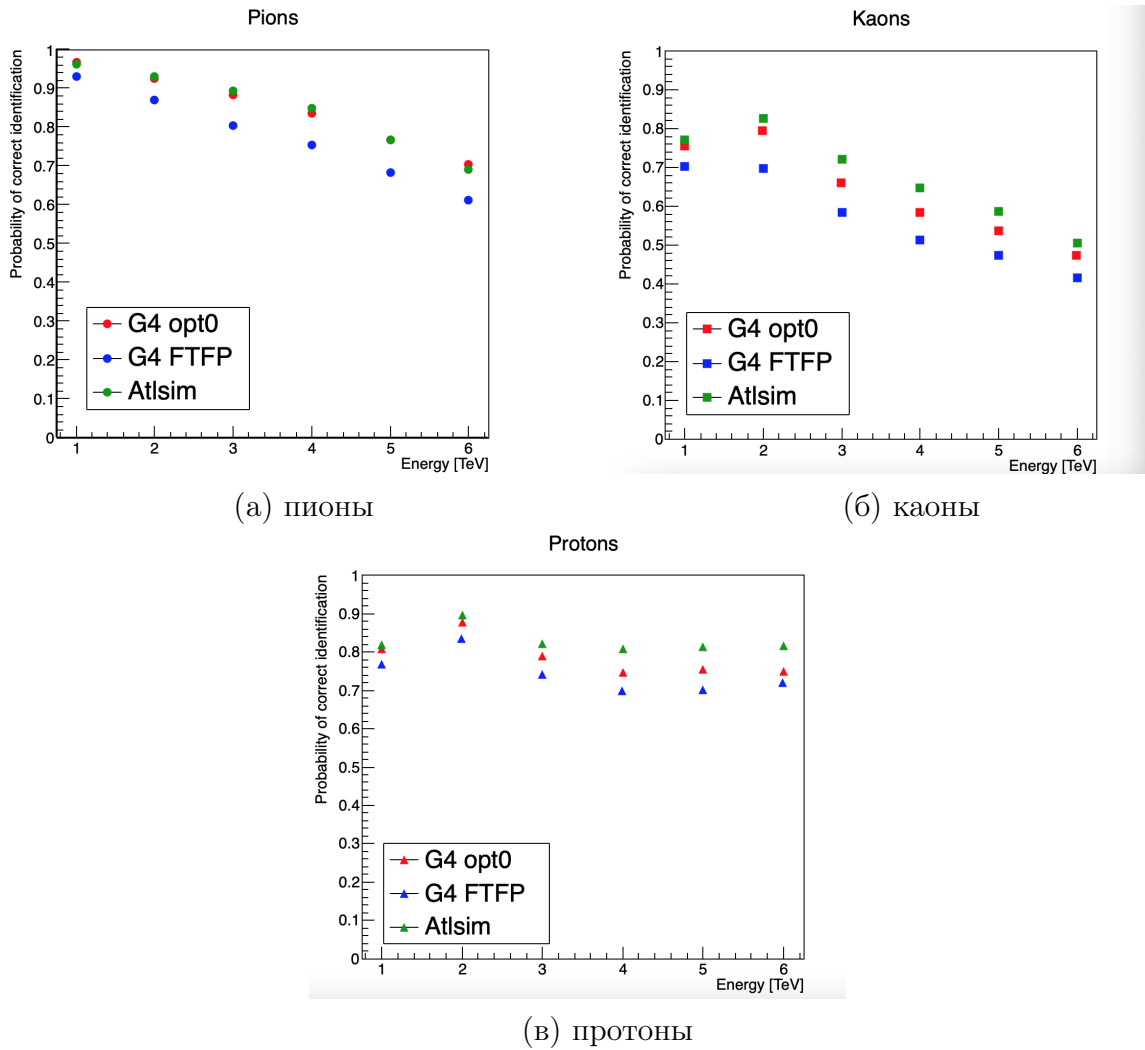


Рисунок 4.6 — Эффективность корректной идентификации каждого типа частиц в интервале энергий 1–6 ТэВ: красным – модель GEANT4 без адронных взаимодействий, синим – модель GEANT4 с адронными взаимодействиями, зеленым – модель Atlsim [6; 21]

4.6, эффективность идентификации адронов ниже для модели с учетом адронных взаимодействий с веществом детектора. Для повышения эффективности идентификации частиц следует найти способ отбора событий, в которых происходило хотя бы одно адронное взаимодействие.

4.3. АДРОННЫЕ СОБЫТИЯ

Моделирование адронных взаимодействий производится с помощью модуля физического листа FTFP_BERT [17]. Данный модуль был верифицирован и рекомендован разработчиками GEANT4 для моделирования детекторов в физике высоких энергий. Адронные взаимодействия включают в себя упругие,

неупругие взаимодействия адронов с ядрами вещества, а также распад и ядерный захват. Здесь и далее под «адронным событием» будет пониматься такое событие, в котором происходило хотя бы одно адронное взаимодействие. С целью отбора адронных событий для последующего отбрасывания были в целом с помощью средств программного пакета GEANT4 проанализированы адронные события в детекторе. Были выявлены следующие закономерности:

- 1) Вероятность того, что событие будет адронным (то есть что в событии произойдет хотя бы одно адронное взаимодействие) составляет порядка 23 — 30% в зависимости от сорта и энергии частицы. В данном диапазоне минимальное значение — 23% соответствует заряженным пи-мезонам с энергией 1 ТэВ, а максимальное значение 30 % — протонам с энергией 6 ТэВ.
- 2) Большая часть адронных событий приходится на вещество радиаторов ДПИ. Вероятность того, что хотя бы адронное взаимодействие произойдет в объеме радиатора составляет до 17–25% (в первом под-детекторе — 5–8%, во втором — 14–22%).
- 3) Вероятность того, что хотя бы адронное взаимодействие произойдет в рабочем газе детектора составляет $< 0.8\%$.

4.3.1. МЕТОДЫ ОТБОРА АДРОННЫХ СОБЫТИЙ

Для повышения эффективности идентификации адронов, требуется выработать метод отбора адронных событий с последующим отбрасыванием.

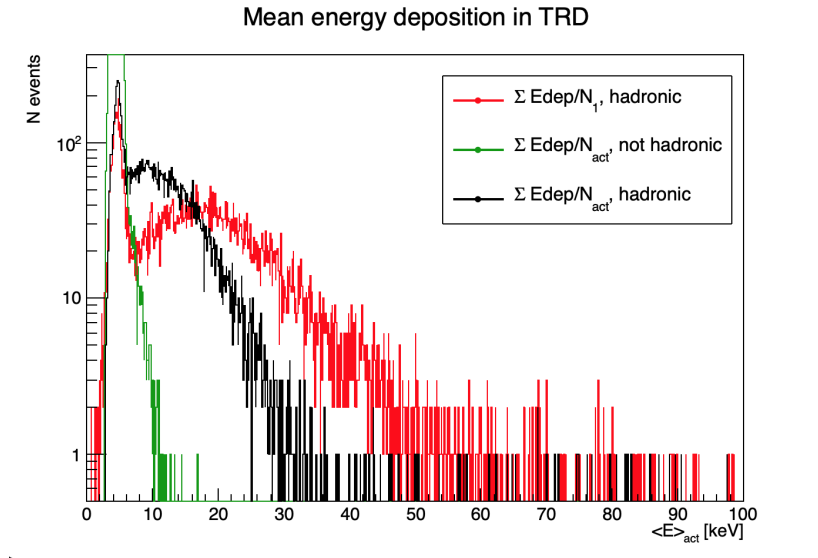
Рассмотрим следующую величину: просуммируем все ненулевые энерговыделения E_{dep} в слоях ТПК, затем разделим на число слоев ТПК N_{act} , где это энерговыделение было ненулевым:

$$\langle E \rangle_{act} = \frac{\sum_i E_{dep_i}}{N_{act}} \quad (4.1)$$

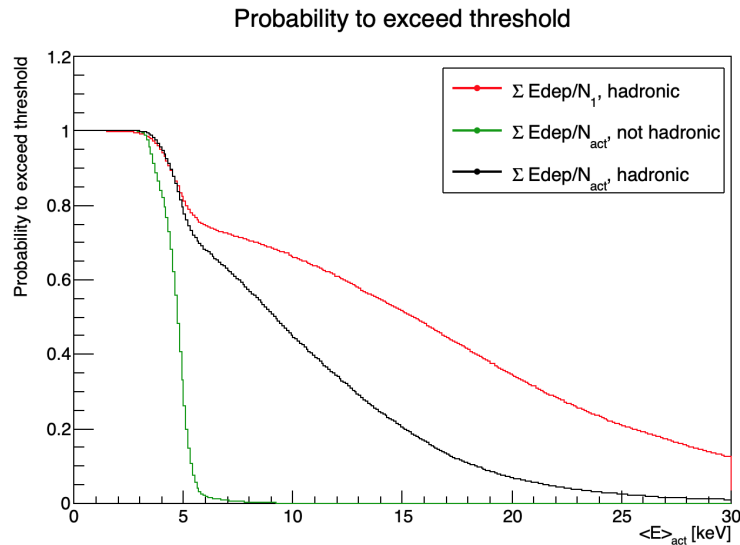
Также для событий с адронными взаимодействиями можно рассмотреть следующую величину:

$$\langle E \rangle_1 = \frac{\sum_k E_{dep_k}}{N_1}, \quad (4.2)$$

где $Edep_k$ – энергосвыделения в слоях ТПК после первой (по длине) вершины адронного взаимодействия в ДПИ. Суммирование производится в слоях с ненулевыми энергосвыделениями; число таких слоев ТПК после первой по длине ДПИ вершины адронного взаимодействия равно N_1 .



(а) Распределения усредненных энергосвыделений для пионов 1 ТэВ



(б) Вероятность превысить порог для усредненных энергосвыделений

Рисунок 4.7 — Пионы, 1 ТэВ

На рисунке 4.7а представлены распределения следующих величин для заряженных пионов 1 ТэВ:

- красным — распределение по параметру $\langle E \rangle_1$ для адронных событий,
- зеленым — распределение по параметру $\langle E \rangle_{act}$ для неадронных событий (то есть для событий, где отсутствуют адронные взаимодействия),

• черным — распределение по параметру $\langle E \rangle_{act}$ для адронных событий. На рисунке изображена вероятность превысить определенный энергетический порог для описанных выше распределений. Таким образом, задачей классификации событий является отделение адронных событий от неадронных.

Наиболее простым способом разделения таких событий является выставление порога по величине средних энерговыделений $\langle E \rangle_{act}$ (то есть разделение зеленой и черной кривой на рисунке 4.7):

$$\langle E \rangle_{act} > E_{cut} \quad (4.3)$$

Тогда события, превышающие значение E_{cut} будут классифицированы как адронные, а события с $\langle E \rangle_{act} < E_{cut}$ будут классифицированы как неадронные.

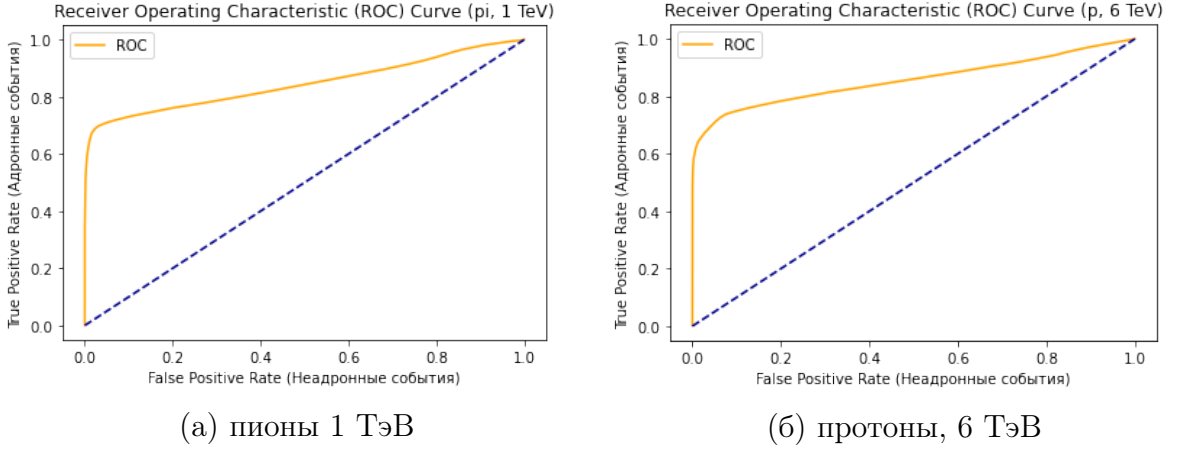


Рисунок 4.8 — ROC-кривые, характеризующие эффективность классификатора

На рисунках представлены ROC-кривые [22] для пионов 1 ТэВ и протонов 6 ТэВ соответственно. ROC-кривая характеризует эффективность описанного выше бинарного классификатора, где в качестве сигнальных событий выступают адронные взаимодействия. Площадь под кривой (AUC) как для пионов 1 ТэВ, так и для протонов 6 ТэВ составляет 0.86, что говорит о том, что во-первых классификатор работает корректно (т.к. $AUC > 0.5$), а во-вторых о том, что классификатор достаточно эффективен, поскольку значение AUC близко к 0.9.

Далее с помощью описанного метода выделения адронных событий были отброшены адронные события для всего набора частиц.

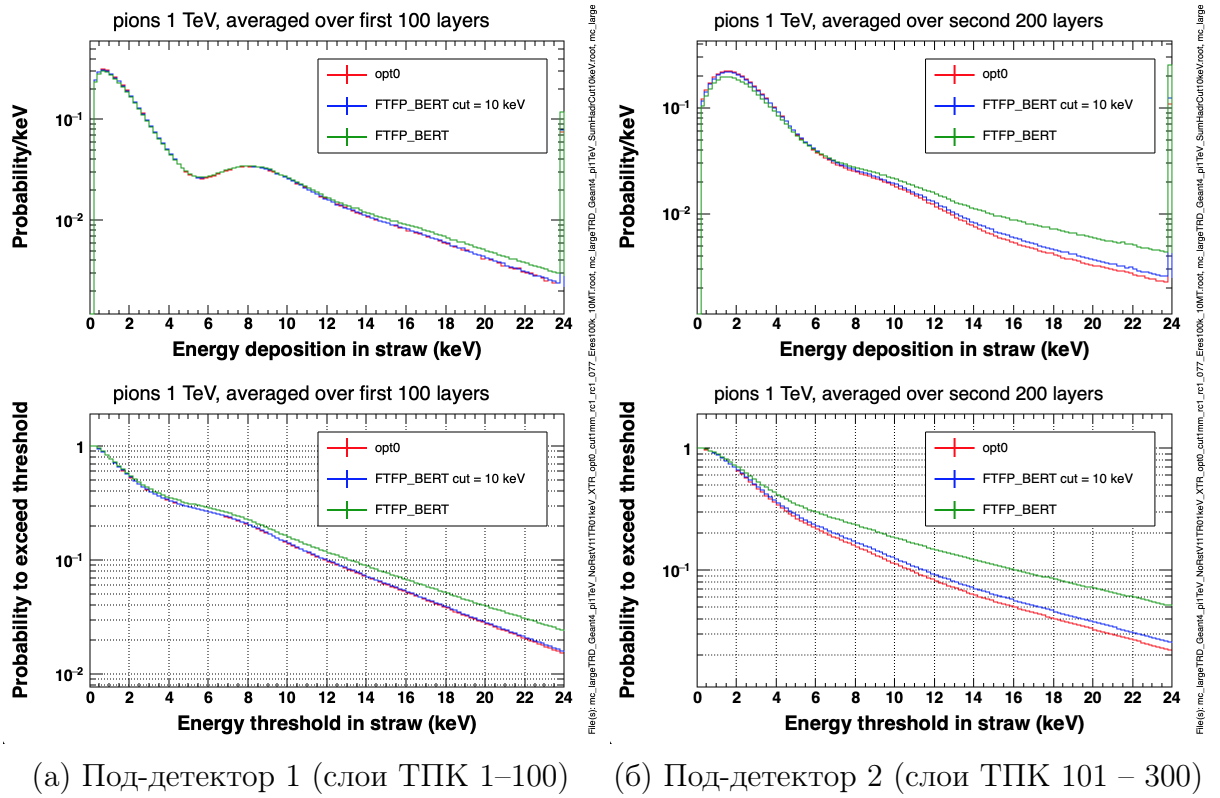


Рисунок 4.9 – Спектры энерговыделений в ДПИ для π^+ 1 ТэВ (сверху – дифференциальный, снизу – интегральный)

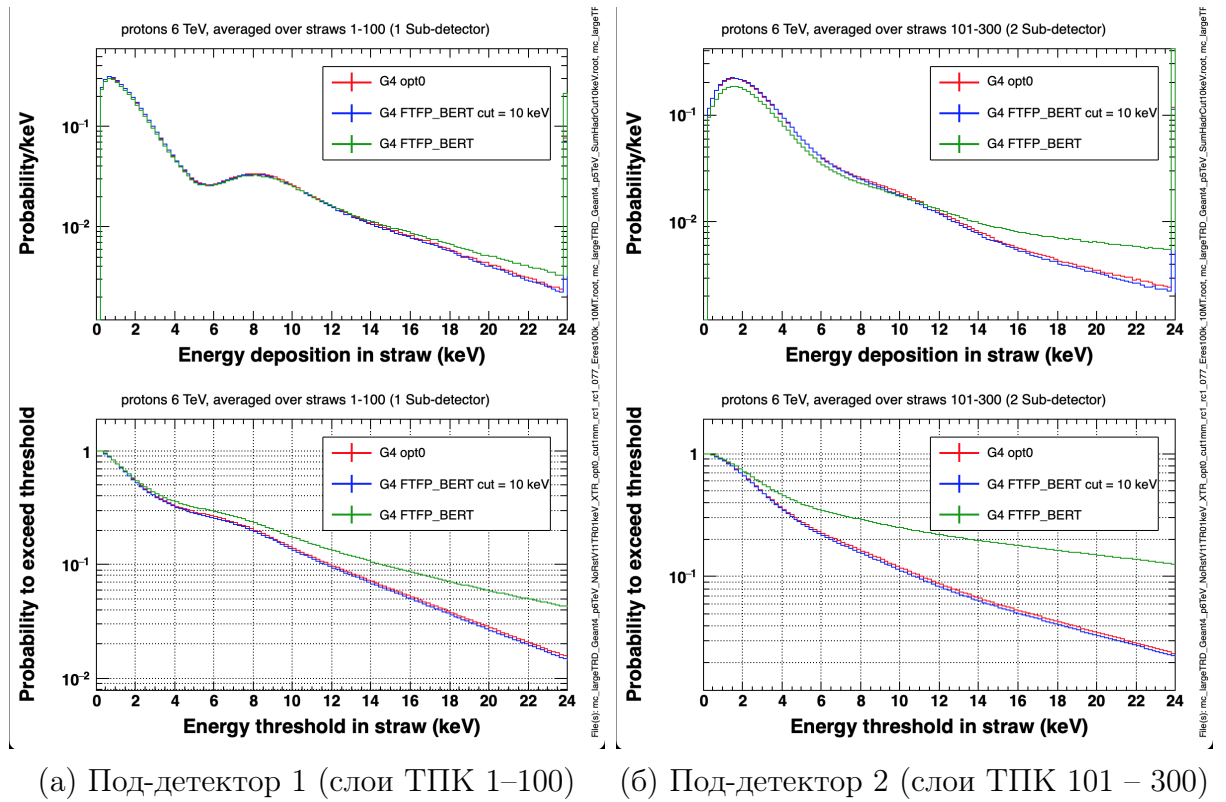


Рисунок 4.10 – Спектры энерговыделений в ДПИ для p^+ 6 ТэВ (сверху – дифференциальный, снизу – интегральный)

На рисунках 4.9 и 4.10 приведено сравнение результатов моделирования с помощью GEANT4 для пионов 1 ТэВ и для протонов 6 ТэВ соответственно:

- красным: модель GEANT4; активированы только электромагнитные процессы, адронные процессы отключены,
- синим: модель GEANT4; активированы как электромагнитные процессы, так и адронные; часть событий отброшена с помощью критерия $\langle E \rangle_{act} < E_{cut}$,
- зеленым: модель GEANT4; активированы как электромагнитные процессы, так и адронные.

Пороговым значением в данном случае было выбрано среднее энерговыделение 10 кэВ, однако в дальнейшем эта величина может быть уточнена для различных энергий первичных частиц.

Как можно видеть на рисунках 4.9 и 4.10, после выполненного отбора спектры энерговыделений для модели GEANT4 с активированными адронными взаимодействиями и для модели GEANT4 с выключенными адронными взаимодействиями почти совпадают.

Также была произведена оценка эффективности корректной идентификации адронов после отбрасывания адронных событий данным методом. Результаты оценки эффективности идентификации заряженных пионов, каонов и протонов приведены на графиках на рисунке 4.11:

- красным: модель GEANT4; активированы только электромагнитные процессы, адронные процессы отключены,
- синим: модель GEANT4; активированы как электромагнитные процессы, так и адронные; часть событий отброшена с помощью критерия $\langle E \rangle_{act} < E_{cut}$,
- зеленым: модель GEANT4; активированы как электромагнитные процессы, так и адронные.

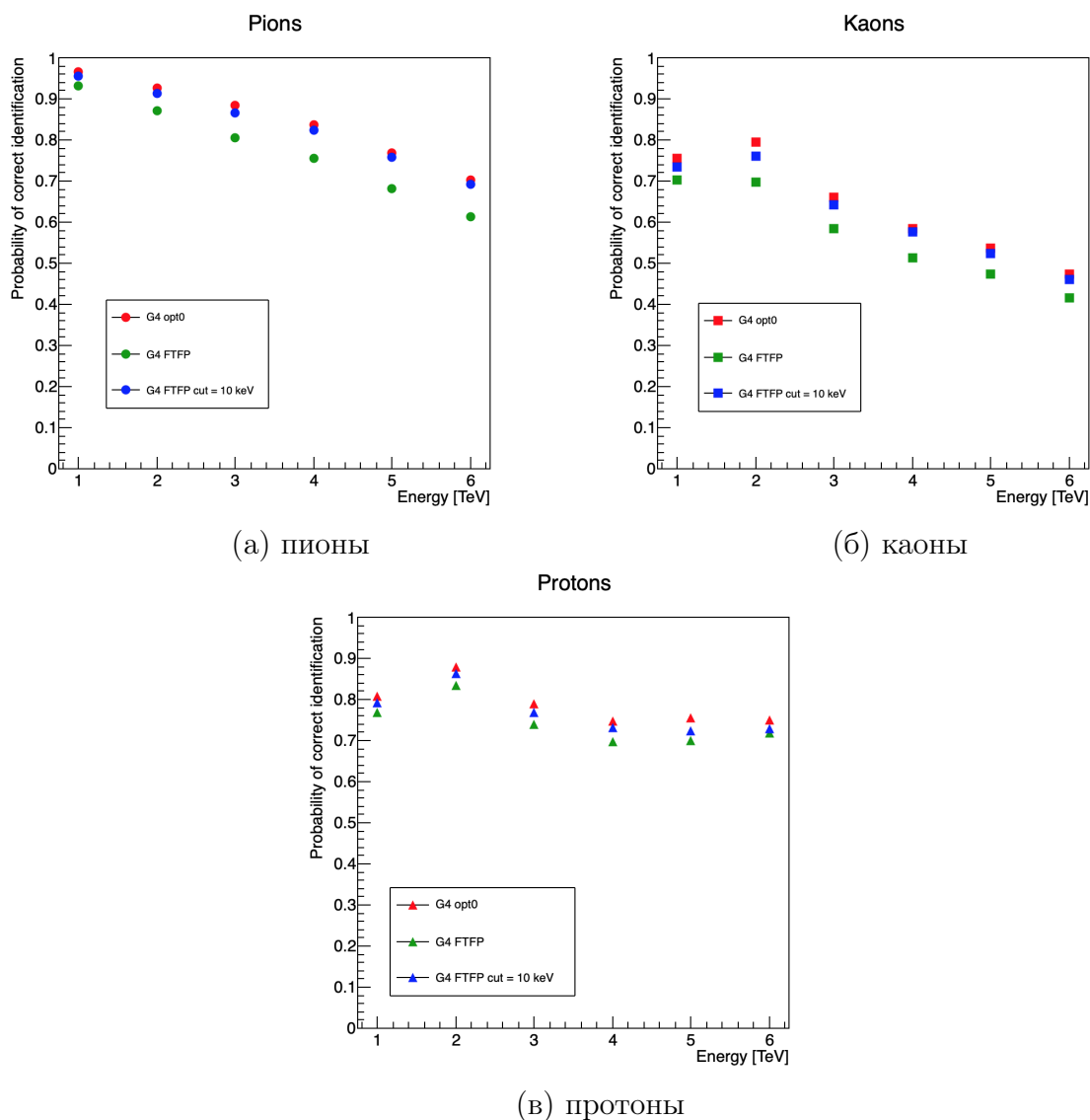


Рисунок 4.11 — Эффективность корректной идентификации каждого типа частиц в интервале энергий 1–6 ТэВ до и после отбрасывания адронных событий

Как можно видеть из приведенной оценки, отбрасывание событий с адронными эффектами в объеме ДПИ положительно сказывается на эффективности корректной идентификации адронов.

Наблюдается абсолютное увеличение эффективности идентификации адронов на величину от 1 до 8 % в результате выполненного отбора. Абсолютное же расхождение эффективности идентификации адронов при отключенных адронных процессах и при включенных адронных процессах с примененным отбором событий составляет 1 – 2 % по предварительным оценкам. Таким образом, выбранный критерий отбора подтверждает свою эффективность и может быть применен в дальнейшем для выделения и отбрасывания событий с адронными эффектами внутри ДПИ.

4.4. КОНЦЕПЦИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДПИ

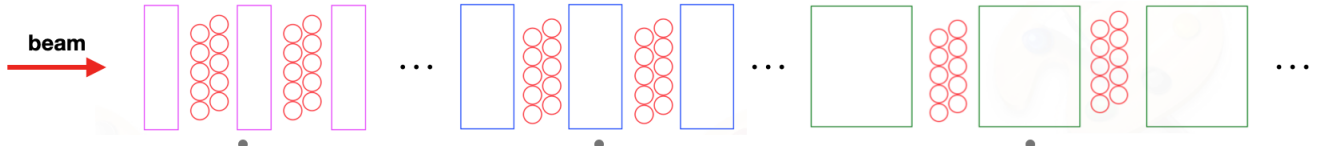


Рисунок 4.12 — Схема предлагаемого ДПИ, состоящего из 3 под-детекторов

Среди набора адронов (π^+ , K^+ , p^+) энергий 1 — 6 ТэВ наибольшую практическую пользу несут адроны энергий 1 — 3 ТэВ. С целью повысить эффективность их идентификации основная конфигурация Large TRD может быть модифицирована, а именно, в этом случае следует добавить дополнительный под-детектор на основе ТПК, состоящий из радиаторов ПИ, генерирующих более мягкий спектр ПИ. При этом необходимо сохранить общую длину ДПИ прежней: ~ 5.8 м.

Каждый из под-детекторов, как и в случае предыдущей конфигурации (из 2 под-детекторов) должен состоять из блоков «радиатор ПИ + 2 слоя ТПК» по 5 ТПК в каждом слое.

Модель GEANT4 детектора, состоящего из 2 под-детекторов, была модифицирована: добавлена возможность моделирования конфигураций ДПИ из 3 под-детекторов, а также была добавлена возможность параметризации для быстрого изменения количества блоков в каждом из под-детекторов и параметров радиаторов в этих блоках.

4.4.1. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ ДПИ ИЗ 3 ПОД-ДЕТЕКТОРОВ

С помощью пакета программ GEANT4 были построены модели ДПИ из 3 под-детекторов со следующими параметрами радиаторов и ТПК:

- Под-детектор 1: радиаторы ПИ состоят из полиэтиленовых фольг толщиной 15.5 мкм, промежуток между фольгами 220 мкм, 40 фольг в радиаторе; давление газа в ТПК 1 атм,

- Под-детектор 2: радиаторы ПИ состоят из полиэтиленовых фольг толщиной 25 мкм, промежуток между фольгами 500 мкм, 30 фольг в радиаторе; давление газа в ТПК 1 атм,
- Под-детектор 3: радиаторы ПИ состоят из полиэтиленовых фольг толщиной 75 мкм, промежуток между фольгами 3 мм, 12 фольг в радиаторе; давление газа в ТПК 1.5 атм.

Для определения направления оптимизации конфигурации детектора были рассмотрены конфигурации со следующим количеством блоков в каждом из 3 под-детекторов:

- 1) 30/38/94 блока,
- 2) 30/45/90 блоков,
- 3) 30/48/88 блоков,
- 4) 30/50/86 блоков,
- 5) 30/61/80 блоков,
- 6) 20/70/79 блоков,
- 7) 15/56/90 блоков,
- 8) 15/72/80 блоков,
- 9) 15/80/75 блоков.

Для всех перечисленных выше конфигураций методом максимального правдоподобия были рассчитаны эффективности корректной идентификации адронов (заряженных пионов, каонов и протонов) без активации адронных процессов в диапазоне энергий 1–3 ТэВ (для некоторых конфигураций также и для 4 ТэВ). Для вычисления эффективностей использовались следующие интервалы энерговывделений E :

- Под-детектор 1: $E > 6$ кэВ,
- Под-детектор 2: $E > 6$ кэВ,
- Под-детектор 3:
 - $8 \text{ кэВ} < E < 17 \text{ кэВ}$,
 - $E > 17 \text{ кэВ}$.

Для каждой конфигурации были вычислены абсолютные отклонения эффективностей идентификации адронов от соответствующих для старой конфигурации ДПИ (из 2 под-детекторов). Значения эффективностей идентификации адронов для конфигурации ДПИ из 2 под-детекторов приведено в таблице 4.1. Значения абсолютных отклонений эффективностей идентификации адро-

нов приведены в таблицах 4.2 — 4.10.

Таблица 4.1 — Эффективность идентификации адронов для конфигурации Large TRD из 2 под-детекторов (количество блоков 50/100)

	1 ТЭВ	2 ТЭВ	3 ТЭВ	4 ТЭВ
π^+	96.6%	92.3%	88.3%	83.7%
K^+	75.6%	79.4%	66.1%	58.3%
p^+	80.9%	87.9%	79.1%	74.7%

Таблица 4.2 — Абсолютное отклонение эффективности идентификации адронов от изначальной для конфигурации ДПИ из 3 под-детекторов с количеством блоков в каждом под-детекторе 30/45/90

	1 ТЭВ	2 ТЭВ	3 ТЭВ	4 ТЭВ
π^+	-1.2%	-1.9%	-2.0%	-1.6%
K^+	+7.1%	-3.1%	-3.5%	-2.1%
p^+	+7.0%	-1.2%	-1.1%	-0.6%

Таблица 4.3 — Абсолютное отклонение эффективности идентификации адронов от изначальной для конфигурации ДПИ из 3 под-детекторов с количеством блоков в каждом под-детекторе 30/48/88

	1 ТЭВ	2 ТЭВ	3 ТЭВ
π^+	-0.9%	-2.1%	-2.6%
K^+	+7.4%	-2.4%	-3.3%
p^+	+7.5%	-1.1%	-1.2%

Таблица 4.4 — Абсолютное отклонение эффективности идентификации адронов от изначальной для конфигурации ДПИ из 3 под-детекторов с количеством блоков в каждом под-детекторе 30/50/86

	1 ТЭВ	2 ТЭВ	3 ТЭВ
π^+	-0.8%	-2.7%	-3.5%
K^+	+7.5%	-3.6%	-4.3%
p^+	+7.1%	-0.5%	-1.6%

Таблица 4.5 — Абсолютное отклонение эффективности идентификации адронов от изначальной для конфигурации ДПИ из 3 под-детекторов с количеством блоков в каждом под-детекторе 30/38/94

	1 ТэВ	2 ТэВ	3 ТэВ
π^+	-2.9%	-6.5%	-7.9%
K^+	+0.6%	-11.8%	-10.9%
p^+	+3.1%	-5.5%	-3.6%

Таблица 4.6 — Абсолютное отклонение эффективности идентификации адронов от изначальной для конфигурации ДПИ из 3 под-детекторов с количеством блоков в каждом под-детекторе 15/72/80

	1 ТэВ	2 ТэВ	3 ТэВ
π^+	-0.2%	-4.2%	-5.8%
K^+	+7.6%	+2.5%	-5.8%
p^+	+7.3%	+2.0%	-1.3%

Таблица 4.7 — Абсолютное отклонение эффективности идентификации адронов от изначальной для конфигурации ДПИ из 3 под-детекторов с количеством блоков в каждом под-детекторе 15/56/90

	1 ТэВ	2 ТэВ	3 ТэВ
π^+	-0.5%	-1.4%	-1.8%
K^+	+6.1%	-1.6%	-2.3%
p^+	+5.3%	+0.3%	-0.6%

Таблица 4.8 — Абсолютное отклонение эффективности идентификации адронов от изначальной для конфигурации ДПИ из 3 под-детекторов с количеством блоков в каждом под-детекторе 30/61/80

	1 ТэВ	2 ТэВ	3 ТэВ
π^+	-0.5%	-5.3%	-6.2%
K^+	+8.8%	-4.5%	-7.5%
p^+	+8.9%	-0.6%	-2.1%

Таблица 4.9 — Абсолютное отклонение эффективности идентификации адронов от изначальной для конфигурации ДПИ из 3 под-детекторов с количеством блоков в каждом под-детекторе 20/70/79

	1 ТэВ	2 ТэВ	3 ТэВ	4 ТэВ
π^+	-0.3%	-8.7%	-6.2%	-5.9%
K^+	+7.6%	-3.1%	-6.4%	-8.0%
p^+	+8.3%	+1.5%	-1.0%	-3.3%

Таблица 4.10 — Абсолютное отклонение эффективности идентификации адронов от изначальной для конфигурации ДПИ из 3 под-детекторов с количеством блоков в каждом под-детекторе 15/80/75

	1 ТэВ	2 ТэВ	3 ТэВ	4 ТэВ
π^+	-0.1%	-5.9%	-7.8%	-8.3%
K^+	+8.3%	-3.6%	-8.1%	-9.4%
p^+	+7.5%	+2.2%	-2.0%	-3.8%

Для всех рассмотренных выше конфигураций эффективность идентификации повышается для протонов и каонов с энергией 1 ТэВ, для протонов и каонов с энергией 2 ТэВ эффективность идентификации выше, чем для ДПИ из 2 под-детекторов, лишь для конфигураций с количеством блоков 20/70/79, 15/72/80 и 15/56/90, для остальных же конфигураций эффективность идентификации оказывалась ниже, чем для ДПИ из 2 под-детекторов.

Для дальнейшей модификации ДПИ было принято решение варьировать параметры радиаторов в третьем под-детекторе с сохранением общей длины радиатора. Была рассмотрена конфигурация с количеством блоков 30/45/90. С помощью пакета программ GEANT4 было произведено моделирование конфигурации со следующим набором параметров:

- Под-детектор 1: 30 блоков, радиаторы ПИ состоят из полиэтиленовых фольг толщиной 15.5 мкм, промежуток между фольгами 220 мкм, 40 фольг в радиаторе; давление газа в ТПК 1 атм,
- Под-детектор 2: 45 блоков, радиаторы ПИ состоят из полиэтиленовых фольг толщиной 25 мкм, промежуток между фольгами 500 мкм, 30 фольг в радиаторе; давление газа в ТПК 1 атм,
- Под-детектор 3: 90 блоков, радиаторы ПИ состоят из полиэтиленовых фольг толщиной 65 мкм, промежуток между фольгами 2 мм, 17 фольг в радиаторе; давление газа в ТПК 1.5 атм.

В таблице 4.11 приведены значения абсолютных отклонений эффективностей идентификации адронов от соответствующих для старой конфигурации ДПИ (из 2 под-детекторов).

Как можно видеть из представленной таблицы, эффективность идентификации каонов и протонов 1 ТэВ значительно возрастает после подобной модификации ДПИ, а также для энергий выше 1 ТэВ наблюдается в основном небольшой рост эффективности. Из этого можно сделать вывод, что оптими-

Таблица 4.11 — Абсолютное отклонение эффективности идентификации адронов от изначальной для конфигурации ДПИ из 3 под-детекторов с количеством блоков в каждом под-детекторе 30/45/90 с измененными параметрами радиаторов в третьем под-детекторе

	1 ТэВ	2 ТэВ	3 ТэВ	4 ТэВ
π^+	+0.4%	+0.9%	-2.0%	-6.5%
K^+	+8.5%	+0.7%	-0.8%	0.0%
p^+	+8.1%	+1.2%	+1.4%	+4.8%

зация конфигурации ДПИ с целью повышения эффективности идентификации адронов с энергиями в диапазоне 1–4 ТэВ должна также сопровождаться изменениями параметров радиаторов в третьем под-детекторе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы с помощью пакета программ для моделирования прохождения частиц сквозь вещество GEANT4 была построена модель проектируемого полномасштабного детектора переходного излучения Large TRD, который планируется применять для идентификации заряженных адронов (пионов, каонов и протонов) энергий 1 – 6 ТэВ. Было произведено сравнение результатов моделирования с помощью GEANT4 с учетом и без учета адронных взаимодействий в веществе детектора с результатами моделирования данного детектора с помощью специализированной программы Atlsim [5; 6], базирующейся на GEANT3. В ходе сравнения спектров энерговыделений в слоях ТПК, было выявлено, что модель Atlsim демонстрирует лучшее согласие с данными моделирования GEANT4, в которых не учитываются адронные взаимодействия с веществом детектора. Причиной данного эффекта может являться некорректное моделирование адронных процессов (или его отсутствие) в модели Atlsim, которое не было выявлено ранее по причине того, что верификация модели Atlsim производилась путем сравнения с данными экспериментов по тестированию прототипов ДПИ, в которых максимальный процент адронных событий мал $\sim 3\%$, в то время как вклад адронных событий в проектируемом детекторе Large TRD ожидается порядка 23 – 30%.

Также в ходе данной работы были оценены эффективности корректной идентификации заряженных адронов (пионов, каонов и протонов) энергий 1 – 6 ТэВ с помощью модели GEANT4 проектируемого детектора Large TRD, а также произведено сравнение этих величин для модели GEANT4 без адронных взаимодействий, модели GEANT4 с учетом адронных взаимодействий и модели Atlsim. Было выявлено, что эффективности идентификации адронов для моделей Atlsim и GEANT4 без учета адронных взаимодействий отличаются, и это отличие может быть обусловлено различиями в формах спектров энерговыделений в слоях ТПК для всего набора частиц. Также было замечено, что эффективность идентификации адронов для модели GEANT4 с учетом адронных взаимодействий ниже, чем для модели GEANT4 без учета адронных

взаимодействий (максимальная разница составляет 8%).

С целью повышения эффективности идентификации адронов был предложен способ отбора адронных событий и оценена его применимость с помощью ROC-кривой [22]. Также было произведено сравнение спектров энерговыделений для модели GEANT4 без учета адронных взаимодействий, модели GEANT4 с учетом адронных взаимодействий и модели GEANT4 с учетом адронных взаимодействий, в которой часть событий было отброшено с помощью предложенного метода отбора.

В результате сравнения было выявлено, что спектры после отбора событий становятся очень близки к спектрам энерговыделений для модели без учета адронных взаимодействий. Также была оценена эффективность идентификации адронов после выполненного отбора событий, согласно которой наблюдается абсолютное увеличение эффективности идентификации адронов на величину от 1 до 8 %, что также говорит об эффективности выбранного метода отбора.

В дальнейшем планируется поиск альтернативных методов отбора адронных событий с целью оптимизации разделения.

С целью повышения эффективности корректной идентификации адронов энергий 1–3 ТэВ была предложена дополнительная конфигурация ДПИ, состоящая из 3 под-детекторов и имеющая ту же длину, что и ДПИ основной конфигурации, состоящей из 2 под-детекторов.

С помощью пакета программ GEANT4 была построена компьютерная модель ДПИ, состоящего из 3 под-детекторов. Для различных вариантов модификации ДПИ были оценены эффективности идентификации адронов (заряженных пионов и каонов, а также протонов) с энергиями 1 – 3 ТэВ. Было выявлено, с помощью рассмотренных конфигураций можно добиться значительного улучшения эффективности идентификации адронов с энергией 1 ТэВ, для улучшения же эффективностей идентификации адронов с большими энергиями работа, связанная с оптимизацией параметров ДПИ должна быть продолжена.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Albrow M.* A very forward hadron spectrometer for the LHC and cosmic ray physics // arXiv preprint arXiv:1811.02047. — 2018.
2. The transition radiation detector in the hyperon beam experiment WA89 at CERN / W. Brückner [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1996. — Vol. 378, no. 3. — P. 451–457.
3. Use of a transition radiation detector in a beam of high energy hadrons / D. Errede [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1991. — Vol. 309, no. 3. — P. 386–400.
4. GEANT4 — a simulation toolkit / S. Agostinelli [et al.] // Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — Vol. 506, no. 3. — P. 250–303.
5. Development of Transition Radiation Detectors for hadron identification at TeV energy scale / N. Belyaev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1390. — IOP Publishing. 2019. — P. 012126.
6. Test beam studies of possibilities to separate particles with gamma factors above 103 with straw based Transition Radiation Detector / N. Belyaev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 934. — IOP Publishing. 2017. — P. 012053.
7. *Гинзбург В., Франк И.* Излучение равномерно движущегося электрона, возникающее при его переходе из одной среды в другую // ЖЭТФ. — 1946. — т. 16. — с. 15.
8. *Гарибян Г. М., Ши Я.* Рентгеновское переходное излучение. — Изд-во АН АрмССР, 1983.

9. *Гарибян Г.* К теории переходного излучения и ионизационных потерь энергии частицы // Т. — 1959. — т. 37. — с. 527—533.
10. *Барсуков К.* Переходное излучение в волноводе // ЖЭТФ. — 1959. — т. 37. — с. 1106.
11. *Andronic A., Wessels J.* Transition radiation detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2012. — Vol. 666. — P. 130–147.
12. *Dolgoshein B.* Transition radiation detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1993. — Vol. 326, no. 3. — P. 434–469.
13. The ATLAS Transition Radiation Tracker (TRT) proportional drift tube: design and performance / E. Abat [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2008. — Vol. 3, no. 02. — P02013.
14. The ATLAS experiment at the CERN large hadron collider / G. Aad [et al.] // Jinst. — 2008. — Vol. 3. — S08003.
15. An implementation of ionisation energy loss in very thin absorbers for the GEANT4 simulation package / J. Apostolakis [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2000. — Vol. 453, no. 3. — P. 597–605.
16. *Grichine V., Sadilov S.* GEANT4 X-ray transition radiation package // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2006. — Vol. 563, no. 2. — P. 299–302.
17. Recent developments in Geant4 / J. Allison [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2016. — Vol. 835. — P. 186–225. — ISSN 0168-9002.

18. *Lau Y., Chernin D.* A review of the ac space-charge effect in electron–circuit interactions // *Physics of Fluids B: Plasma Physics*. — 1992. — Vol. 4, no. 11. — P. 3473–3497.
19. *Ferguson T., Krivchitch A., Maleev V.* Gas gain and space charge effects in aging tests of gaseous detectors // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2003. — Vol. 515, no. 1/2. — P. 283–287.
20. *Rathod N., Smyrski J., Malige A.* Study of the space charge effect in straw tube detectors for the PANDA experiment // *EPJ Web of Conferences*. Vol. 199. — EDP Sciences. 2019. — P. 05018.
21. 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*. Vol. 1690. — IOP Publishing. 2020. — P. 012043.
22. *Fawcett T.* An introduction to ROC analysis // *Pattern recognition letters*. — 2006. — Vol. 27, no. 8. — P. 861–874.