

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

УДК 537.531.3

ПРЕДДИПЛОМНАЯ ПРАКТИКА  
НА ТЕМУ

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

Научный руководитель \_\_\_\_\_ В. О. Тихомиров

Студент \_\_\_\_\_ С. А. Нечаева

Москва 2021

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>1 Программный пакет GEANT4</b>	<b>6</b>
<b>2 Эксперимент по тестированию прототипов ДПИ на основе тонко- костенных пропорциональных камер</b>	<b>7</b>
2.1 Экспериментальная установка . . . . .	7
2.2 Модель эксперимента в программном пакете GEANT4 . . . . .	9
2.2.1 Моделирование физических процессов . . . . .	9
<b>3 Детектор Large TRD</b>	<b>11</b>
3.1 Модель детектора в программном пакете GEANT4 . . . . .	13
3.2 Эффективность идентификации адронов . . . . .	14
3.3 Адронные события . . . . .	16
3.3.1 Методы отбора адронных событий . . . . .	17
3.4 Концепция дополнительной конфигурации ДПИ . . . . .	21
<b>Список литературы</b>	<b>24</b>

# ВВЕДЕНИЕ

В современной физике высоких энергий актуальной проблемой является идентификация адронов с энергиями ЛНС (1 – 6 ТэВ, что соответствует гамма-факторам в интервале от  $10^3$  до  $3.6 \times 10^4$ )[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. Для расчета оптимальных параметров SAS требуется создание его полноценной компьютерной модели. Подобную модель была реализована с помощью программ пакета программ для моделирования прохождения частиц сквозь вещество GEANT4 [2].

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 [3]. Также производится сравнение данных моделирования с помощью GEANT4 и с помощью программы Atlsim MC [3; 4], 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 по-

вышения эффективности идентификации адронов в энергетическом диапазоне 1 – 3 ТэВ была предложена модификация основной конфигурации ДПИ Large TRD, в дальнейшем планируется построение компьютерной модели данной конфигурации с помощью GEANT4, а также оценка эффективностей корректной идентификации адронов с помощью предложенной конфигурации.

# 1. ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ GEANT4

GEANT4[2] (англ. GEometry ANd Tracking – геометрия и трекинг) – это бесплатный программный пакет, состоящий из инструментов, которые способны точно моделировать прохождение частиц через вещество.

Все аспекты процесса моделирования были включены в инструментарий[2]:

- 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.

# 2. ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ТЕСТИРОВАНИЮ ПРОТОТИПОВ ДПИ НА ОСНОВЕ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ КАМЕР

## 2.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

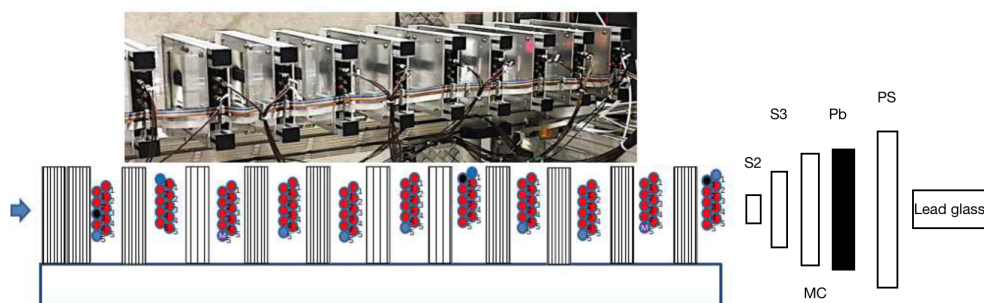


Рисунок 2.1 — Фотография (сверху) и схема эксперимента по тестированию прототипов ДПИ

Тестирование прототипов ДПИ на основе ТПК производилось на тестовом пучке ускорителя SPS в CERN (Швейцария) летом 2018 года [3].

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 2.1): после каждого радиатора размещено по 2 слоя ТПК, по 5 трубок в каждом слое. Аналогичные трубки применяются в TRT [5] (Transition Radiation Tracker, эксперимент

ATLAS [6], CERN). В данном эксперименте для ТПК была использована газовая смесь, состоящая из 71.8% Хе, 25.6% CO<sub>2</sub> и 2.6% O<sub>2</sub>, и находящаяся под давлением 1 атмосфера. Газовое усиление смеси порядка  $\sim 2.5 \times 10^4$ . Внешний вид и схема установки приведены на Рисунке 2.1.

В Таблице 2.1 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 2.1) состоит из сцинтилляторных счетчиков (в скобках указаны площади поверхностей этих счетчиков, перпендикулярных пучку):

- S2 ( $20 \times 20$  мм<sup>2</sup>),
- S3 ( $25 \times 25$  мм<sup>2</sup>),
- PS (Preshower scintillator) ( $50 \times 130$  мм<sup>2</sup>),
- MC (Multiplicity counter) ( $50 \times 80$  мм<sup>2</sup>),

а также из калориметра Lead glass ( $100 \times 100$  мм<sup>2</sup>), 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 2.2.

Калибровка отклика каждой из газовых пропорциональных камер осуществлялась с помощью источника <sup>55</sup>Fe[3].

Таблица 2.1 — Параметры тестируемых радиаторов ПИ

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

Таблица 2.2 — Лоренц-факторы частиц пучка

Частицы	Энергия	$\gamma$ -фактор
$e^-$	20 ГэВ	$3.9 \times 10^4$
$\pi^-$		$0.14 \times 10^3$
$\mu^-$	120 ГэВ	$1.14 \times 10^3$
	180 ГэВ	$1.80 \times 10^3$
	290 ГэВ	$2.74 \times 10^3$

## 2.2. МОДЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТА В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ GEANT4

С помощью программного пакета GEANT4 [2] была построена компьютерная модель эксперимента по тестированию прототипов ДПИ для следующих конфигураций:

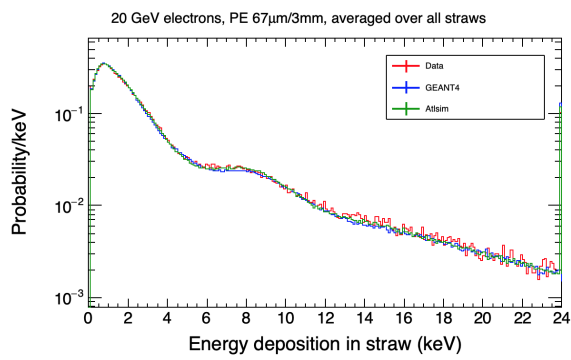
- конфигурация без радиаторов ПИ,
- конфигурация с майларовыми радиаторами (см. Таблицу 2.1),
- 3 конфигурации с полиэтиленовыми радиаторами (параметры радиаторов см в Таблице 2.1).

### 2.2.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

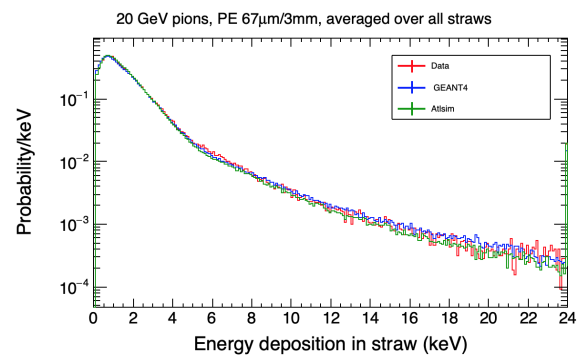
Основные электромагнитные процессы (ионизация, множественное рассеяние, Комpton-эффект, тормозное излучение и т.д.) в модели описаны с помощью класса `G4EmStandardPhysics`. Ионизация в тонких слоях вещества, а именно в газовой смеси детектора, описана с помощью класса `G4PAlModel`. Переходное излучение было описано с помощью `G4VXTRenergyLoss` и `G4TransparentRegXTRadiator`, так как радиаторы в экспериментальной установке являются «регулярными» [7]: 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 фольгами 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` [8], данный адронный физический лист является рекомендованным для использования в



моделях коллайдерных экспериментов.



(а) электроны, 20 ГэВ



(б) пионы, 20 ГэВ

Рисунок 2.2 — Дифференциальные спектры энерговыделений в детекторе: красным — экспериментальные данные, синим — модель GEANT4, зеленым — модель Atlsim

### 3. ДЕТЕКТОР LARGE TRD

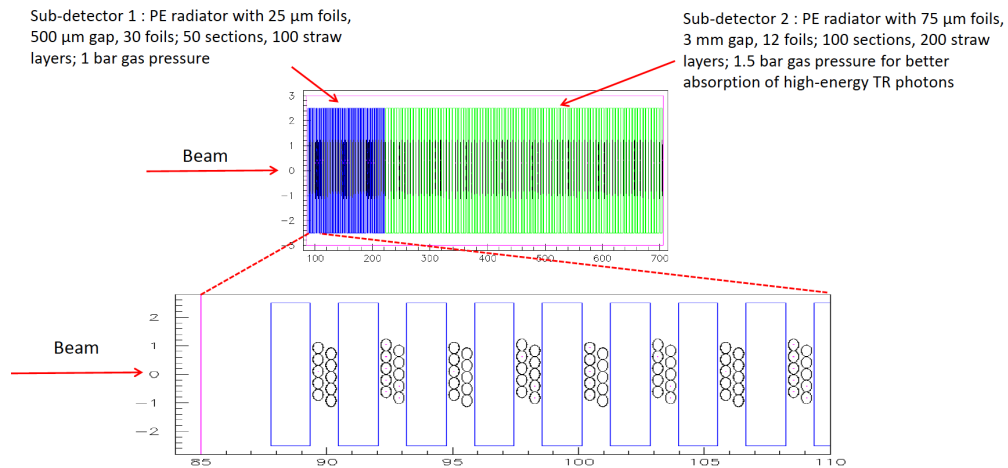


Рисунок 3.1 — Схема проектируемого детектора Large TRD

В качестве основной конфигурации Large TRD рассматривается детектор, состоящий из двух под-детекторов [9]. 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 регистрируемой частицы (см. Рисунки 3.2 и 3.3). В первом под-детекторе энергетические спектры квантов ПИ получаются более «мягкими», что дает возможность для

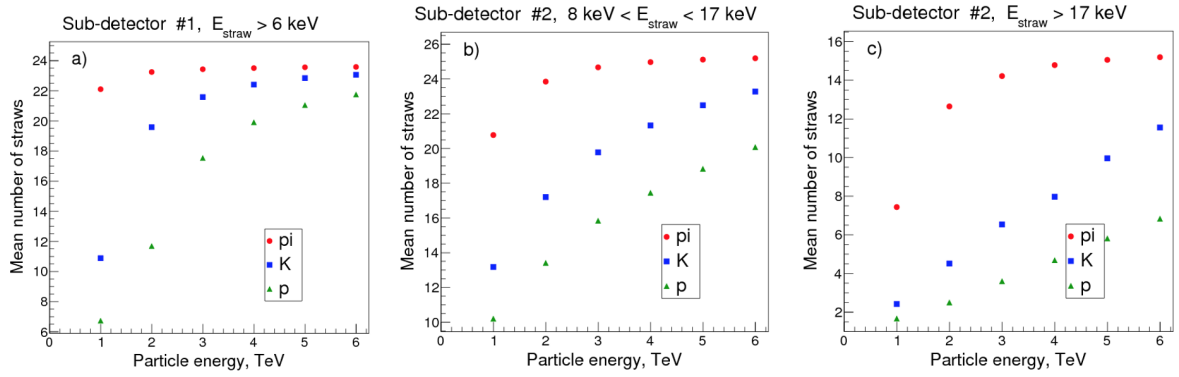


Рисунок 3.2 — Среднее число «сработавших» ТПК с разным энерговыделением в двух под-детекторах в зависимости от энергии регистрируемых адронов [9]

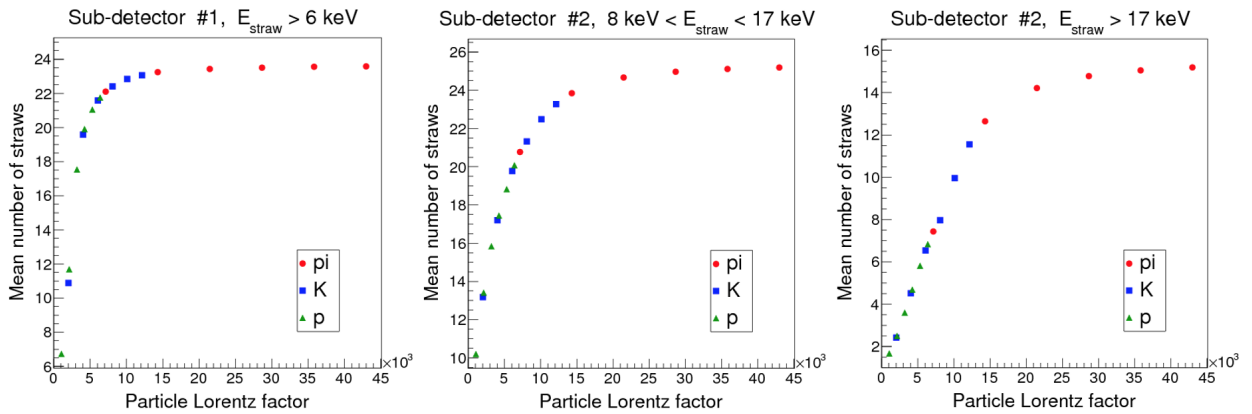


Рисунок 3.3 — Среднее число «сработавших» ТПК с разным энерговыделением в двух под-детекторах в зависимости от Лоренц-фактора регистрируемых адронов [9]

идентификации частиц с относительно небольшими Лоренц-факторами:  $\sim 10^3$  —  $6 \times 10^3$ . 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 [9].

Как видно из Рисунка 3.3, Лоренц-зависимости этих двух областей регистрируемой в камерах энергии имеют разный характер, что опять же расширяет диапазон Лоренц-факторов, в котором возможна идентификация частиц.

## 3.1. 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:

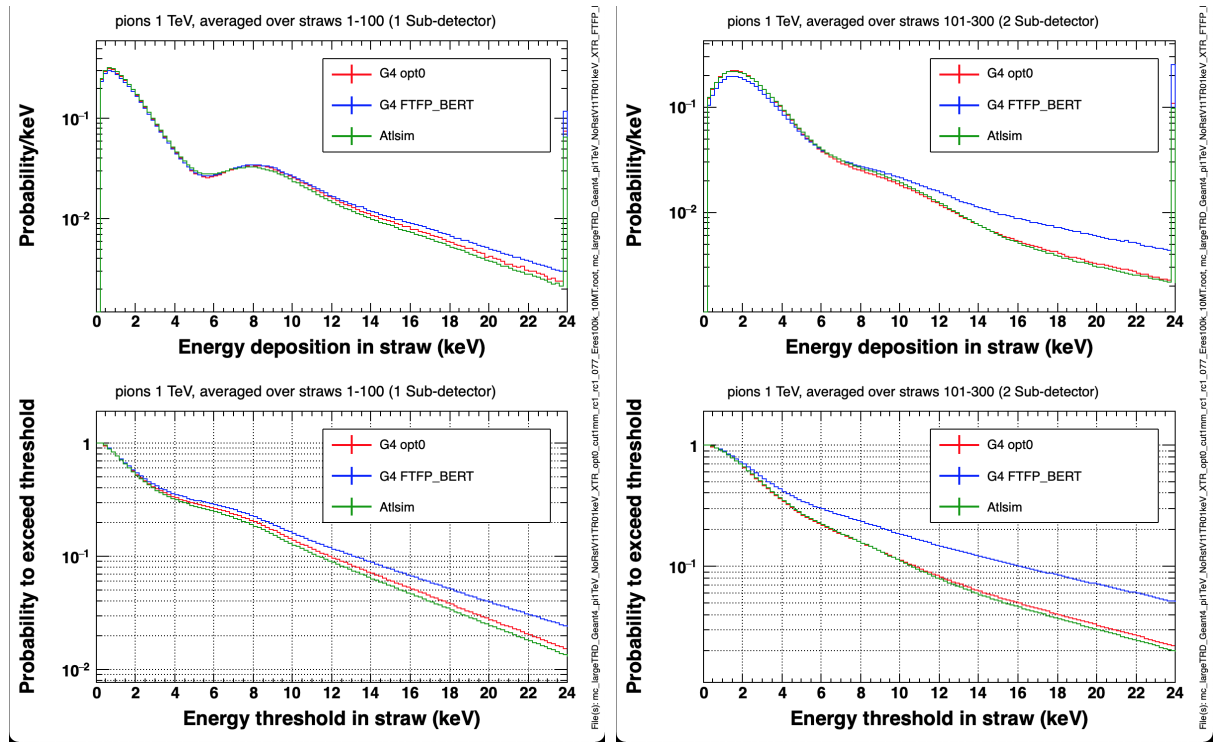
- заряженные пионы энергий 1, 2, 3, 4, 5, 6 ТэВ,
- заряженные каоны энергий 1, 2, 3, 4, 5, 6 ТэВ,
- протоны энергий 1, 2, 3, 4, 5, 6 ТэВ.

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 3.4 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.



(a) Под-детектор 1 (слои ТПК 1–100)      (б) Под-детектор 2 (слои ТПК 101 – 300)

Рисунок 3.4 — Спектры энерговывделений в ДПИ для  $\pi^+$  1 ТэВ (сверху – дифференциальный, снизу – интегральный)

## 3.2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ АДРОНОВ

На основе наборов энерговывделений 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 энерговывделений 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, энерговывделения в которых попадают в данный интервал. Затем для каждого интервала и сорта первичных частиц ( $\pi^+$ ,  $K^+$

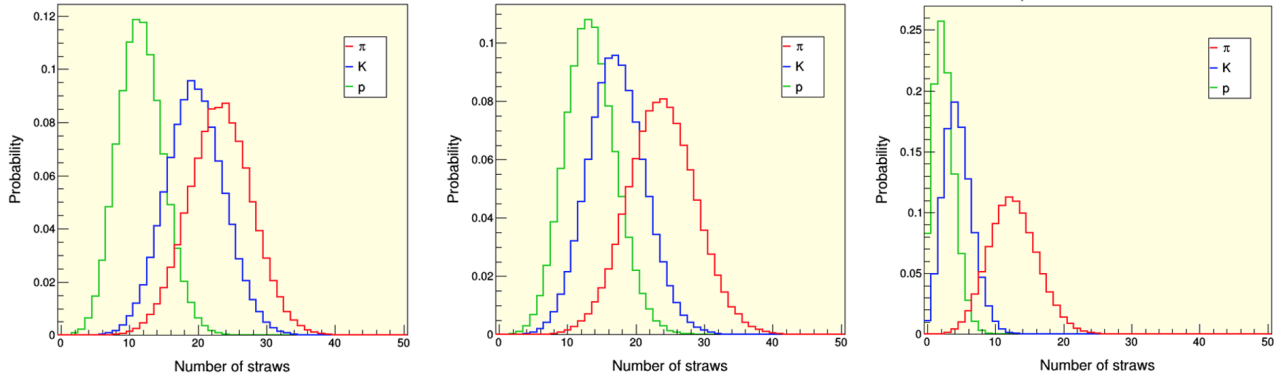


Рисунок 3.5 — Распределение по числу ТПК с энерговыведениями, попавшими в определенный интервал

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 3.5.

Далее для другой части набора событий (для выбранного примера – 20 000) производится следующая процедура. Для каждого события известен набор из 3 чисел – количеств 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 ( $\pi^+, K^+$  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 3.6 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 3.4). Как видно из рисунка



- 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  $< 0.8\%$ .

### 3.3.1. 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:

$$\langle E \rangle_{act} = \frac{\sum_i E_{dep_i}}{N_{act}} \quad (3.1)$$

Также для событий с адронными взаимодействиями можно рассмотреть следующую величину:

$$\langle E \rangle_1 = \frac{\sum_k E_{dep_k}}{N_1}, \quad (3.2)$$

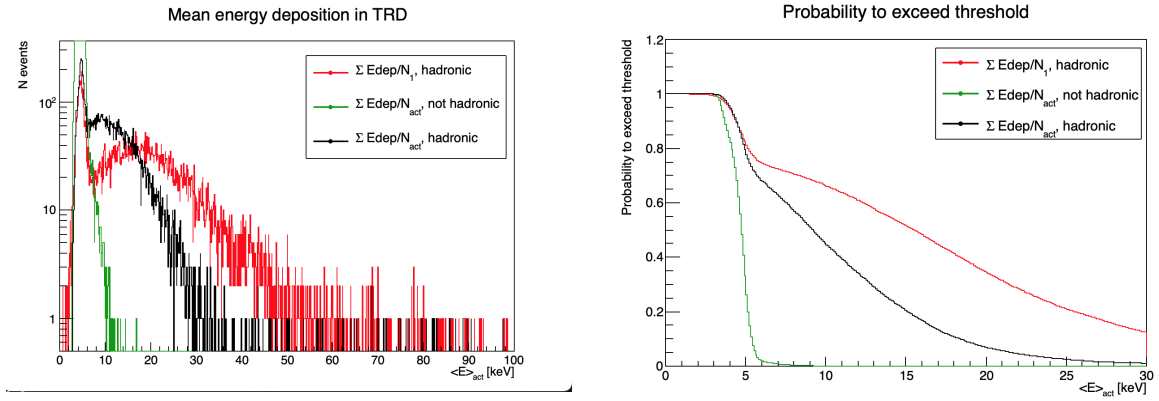
где  $E_{dep_k}$  – энерговыделения в слоях ТПК после последней (по длине) вершины адронного взаимодействия в ДПИ. Суммирование производится в слоях с ненулевыми энерговыделениями; число таких слоев ТПК после последней по длине ДПИ вершины адронного взаимодействия равно  $N_1$ .

На рисунке 3.7а 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 классифи-





(а) Распределения усредненных энерговыделений для пионов 1 ТэВ (б) Вероятность превысить порог для усредненных энерговыделений

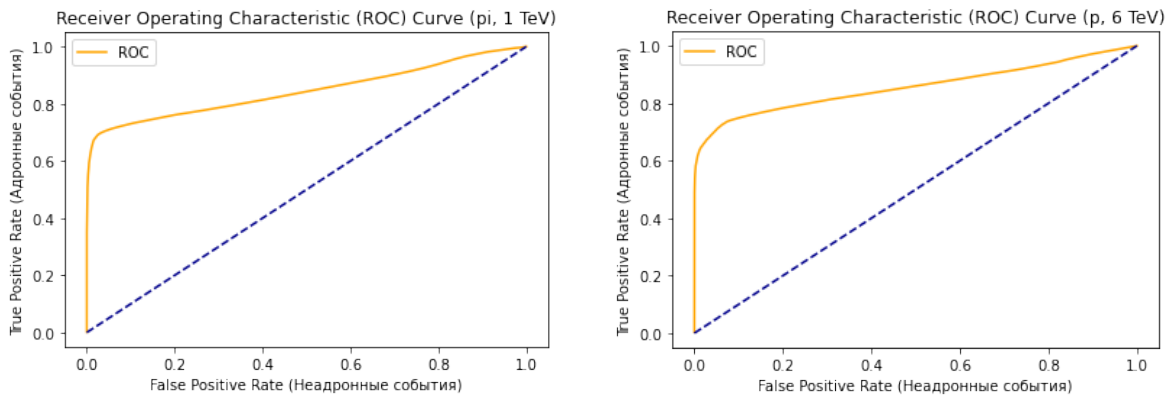
Рисунок 3.7 — Пионы, 1 ТэВ

кации 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 3.7):

$$\langle E \rangle_{act} > E_{cut} \quad (3.3)$$

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



(а) пионы 1 ТэВ

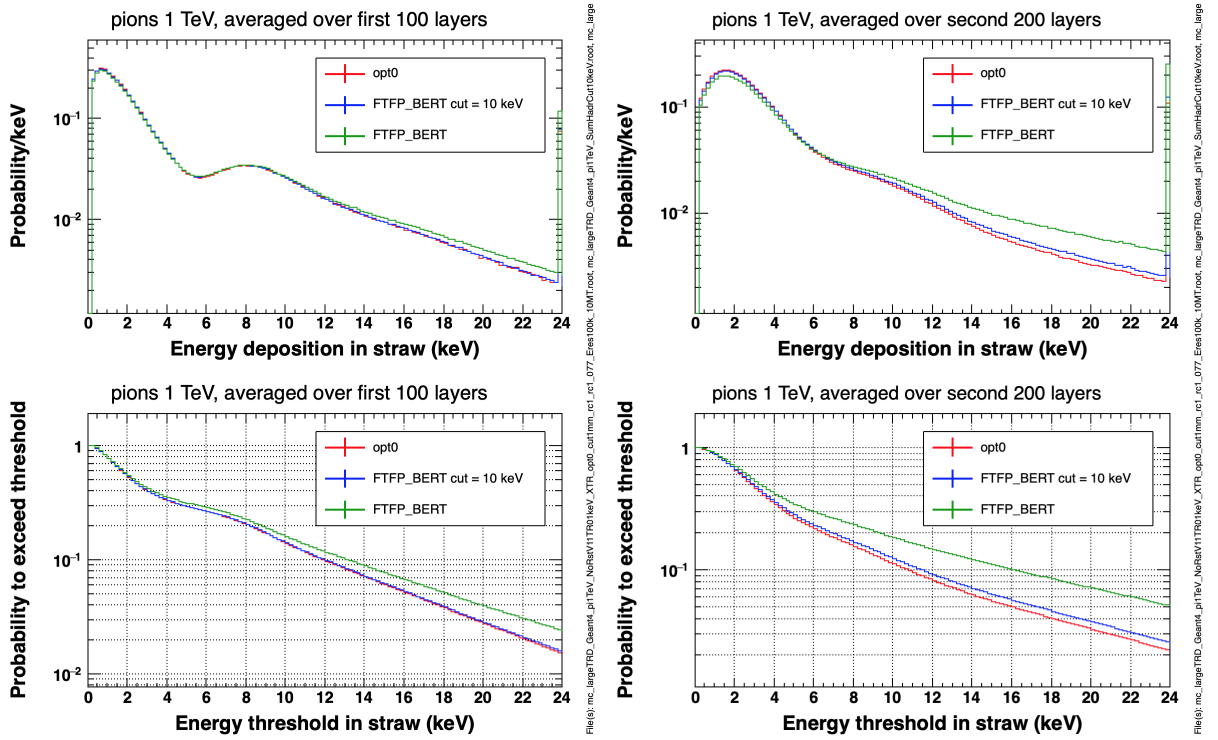
(б) протоны, 6 ТэВ

Рисунок 3.8 — ROC-кривые, характеризующие эффективность классификатора

На рисунках представлены ROC-кривые [10] 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

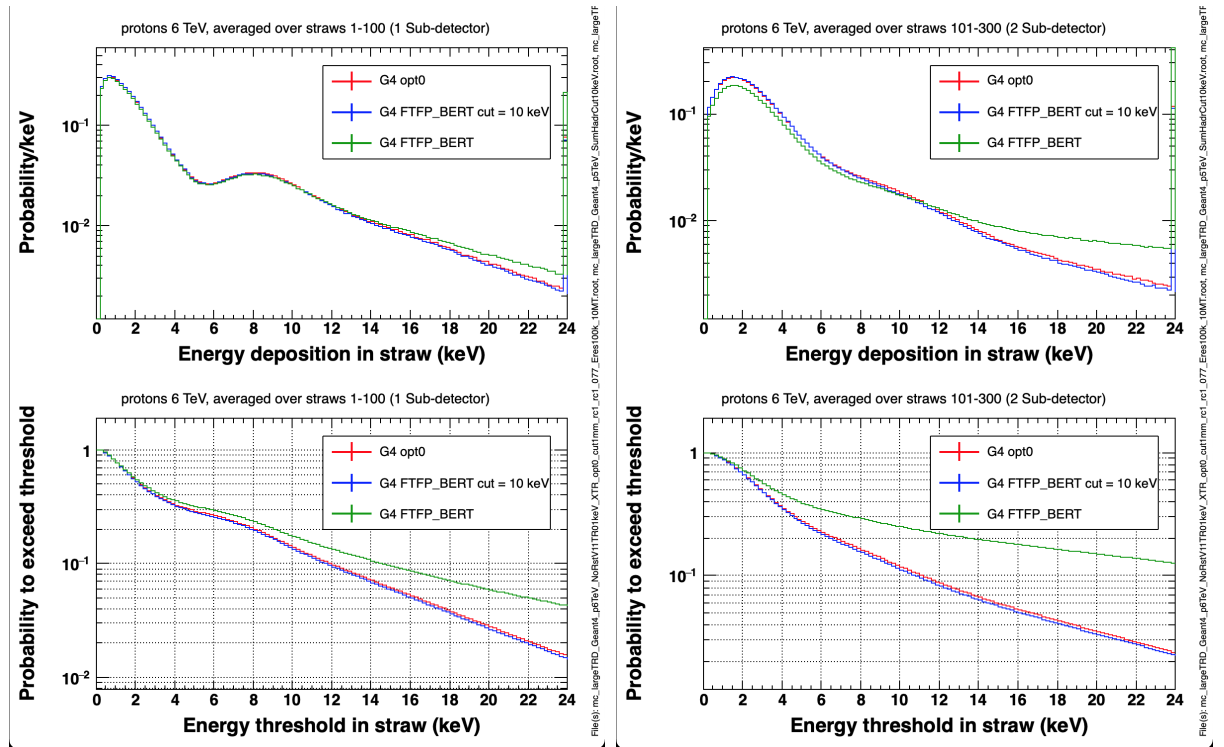
1 ТэВ, так и для протонов 6 ТэВ составляет 0.86, что говорит о том, что во-первых классификатор работает корректно (т.к.  $AUC > 0.5$ ), а во-вторых о том, что классификатор достаточно эффективен, поскольку значение  $AUC$  близко к 0.9.

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



(а) Под-детектор 1 (слои ТПК 1–100)      (б) Под-детектор 2 (слои ТПК 101 – 300)

Рисунок 3.9 — Спектры энерговывделений в ДПИ для  $\pi^+$  1 ТэВ (сверху – дифференциальный, снизу – интегральный)



(а) Под-детектор 1 (слои ТПК 1–100)      (б) Под-детектор 2 (слои ТПК 101 – 300)

Рисунок 3.10 — Спектры энерговыделений в ДПИ для  $p^+$  6 ТэВ (сверху – дифференциальный, снизу – интегральный)

На рисунках 3.9 и 3.10 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 3.9 и 3.10, после выполненного отбора спектры энерговыделений для модели GEANT4 с активированными адронными взаимодействиями и для модели GEANT4 с выключенными адронными взаимодействиями почти совпадают. Это является свидетельством того, что следует ожидать повышение эффективности идентификации адронов в оставшихся со-

бытиях.

### 3.4. КОНЦЕПЦИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДПИ

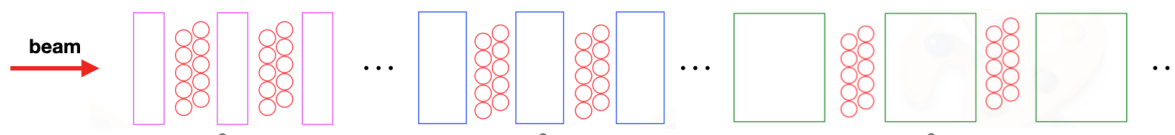


Рисунок 3.11 — Схема предлагаемого ДПИ, состоящего из 3 под-детекторов

Среди набора адронов ( $\pi^+$ ,  $K^+$ ,  $p^+$ ) 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. Каждый из под-детекторов должен состоять из блоков «радиатор ПИ + 2 слоя ТПК» по 5 ТПК в каждом слое. Предлагаются следующие параметры ДПИ:

- 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: 95 блоков, 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.

Общая длина такого ДПИ, как и в случае основной конфигурации должна составить порядка 6 м. В дальнейшем планируется с помощью программного пакета GEANT4 создать модель этой конфигурации и оценить эффективность идентификации адронов энергий 1 — 3 ТэВ.

# 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 [3; 4], 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 [10]. 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, 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. В дальнейшем планируется построить компьютерную модель этой конфигурации с помощью GEANT4, а также оценить эффективность идентификации адронов с её помощью.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Albrow M.* A very forward hadron spectrometer for the LHC and cosmic ray physics // arXiv preprint arXiv:1811.02047. — 2018.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. The ATLAS experiment at the CERN large hadron collider / G. Aad [et al.] // Jinst. — 2008. — Vol. 3. — S08003.
7. *Гарибян Г. М., Ши Я.* Рентгеновское переходное излучение. — Изд-во АН АрмССР, 1983.
8. 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.
9. 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.

10. *Fawcett T.* An introduction to ROC analysis // Pattern recognition letters. — 2006. — Vol. 27, no. 8. — P. 861–874.