

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

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЕКТИРУЕМОГО
ДЕТЕКТОРА ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ АДРОНОВ,
РОЖДАЕМЫХ НА LHC ПОД МАЛЫМИ
УГЛАМИ**

Научный руководитель _____ В. О. Тихомиров

Студент _____ С. А. Нечаева

Москва 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание	1
1 Введение	2
2 Основная часть	3
2.1 Программный пакет GEANT4	3
2.2 Тестирование прототипов ДПИ на основе тонкостенных пропорциональных камер	4
2.2.1 Эксперимент по тестированию прототипов TRT Test Beam 2018	4
2.2.2 Модель эксперимента по тестированию прототипов	5
2.3 Проектируемый ДПИ, предназначенный для идентификации адронов энергий ЛНС под малыми углами	10
2.3.1 Модель проектируемого ДПИ Large TRD	13
3 Заключение	15
Список использованных источников	16

1 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 3.6×10^4) [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 можно реализовать с помощью программ пакета программ для моделирования прохождения частиц сквозь вещество GEANT4 [2].

В данной работе рассматривается компьютерная модель детектора ПИ Large TRD, построенная с помощью пакета программ GEANT4, основанием 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.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Цитирую Гарибяна: [5]

2.1 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.

2.2 Тестирование прототипов ДПИ на основе тонкостенных пропорциональных камер

2.2.1 Эксперимент по тестированию прототипов TRT Test Beam 2018

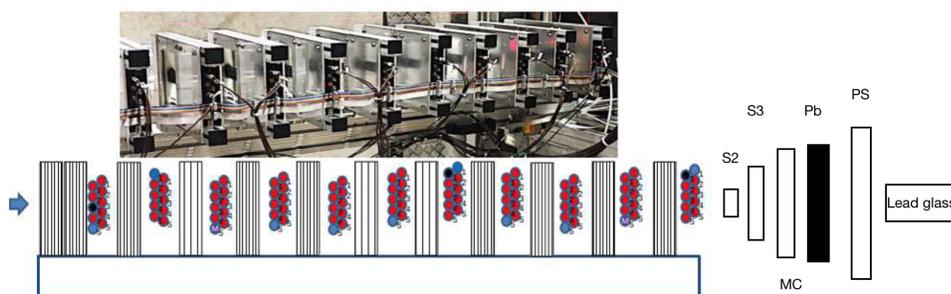


Рисунок 1 — Фотография (сверху) и схема эксперимента по тестированию прототипов ДПИ

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 1). Аналогичные трубки применяются в TRT [6] (Transition Radiation Tracker, эксперимент ATLAS [7], CERN). В данном эксперименте для ТПК была использована газовая смесь, состоящая из 71.8% Xe, 25.6% CO₂ и 2.6% O₂, с газовым усилением порядка $\sim 2.5 \times 10^4$. Внешний вид и схема установки при-

ведены на Рисунке 1.

В Таблице 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 1) состоит из сцинтилляторных счетчиков (в скобках указаны площади поверхностей этих счетчиков, перпендикулярных пучку):

- S2 ($20 \times 20 \text{ мм}^2$),
- S3 ($25 \times 25 \text{ мм}^2$),
- PS (Preshower scintillator) ($50 \times 130 \text{ мм}^2$),
- MC (Multiplicity counter) ($50 \times 80 \text{ мм}^2$),

а также из калориметра Lead glass ($100 \times 100 \text{ мм}^2$), выполненного из свинцового стекла.

В качестве частиц пучка в использовались электроны, пи-мезоны и мюоны; их энергии и соответствующие Лоренц-факторы приведены в Таблице 2.

Калибровка каждой из газовых пропорциональных камер осуществлялась с помощью источника ^{55}Fe [3].

Таблица 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

2.2.2 Модель эксперимента по тестированию прототипов

С помощью программного пакета для прохождения частиц сквозь вещество GEANT4 [2] ранее была построена модель эксперимента по тестированию

Таблица 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

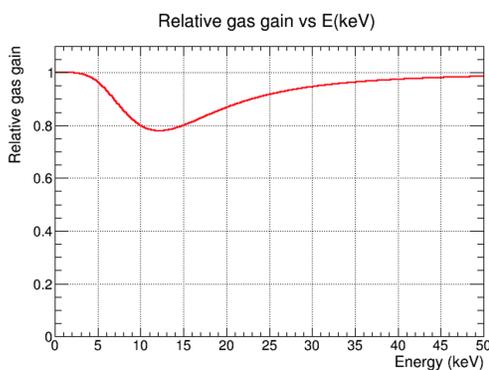
прототипов ДПИ, произведенного на ускорителе SPS (CERN) в 2018 году. В этом семестре производилось усовершенствование этой модели.

Модель прототипа ДПИ включает в себя

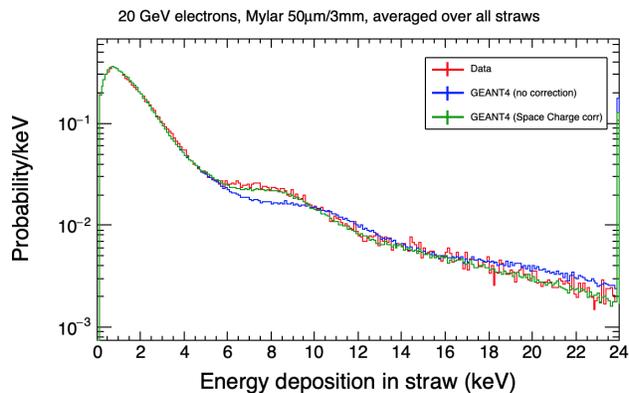
В рамках научно-исследовательской работы производилось усовершенствование построенной ранее модели прототипа детектора переходного излучения на основе тонкостенных пропорциональных камер с использованием программного пакета GEANT4. Так, были внесены следующие изменения:

- Введена корректировка, учитывающая эффект пространственного заряда;
- Изменен «физический лист», используемый в модели, на более корректно описывающий ионизационный пик;
- Произведена корректировка порогов на рождение частиц в различных «регионах» модели;
- Был написан класс в целом дублирующий работу класса исходного кода GEANT4.10.05, но при этом позволяющий корректировать извне число фотонов ПИ, генерируемых радиатором.

В предыдущей версии модели детектора переходного излучения не принимался во внимание эффект пространственного заряда. 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 эф-



(а) Функция газового усиления



(б) Спектры энерговыделения в ТПК

Рисунок 2 — Эффект, оказываемый введением функции пространственного заряда. Справа: красным — данные, синим — результаты моделирования до коррекции, зеленым — после

эффекта пространственного заряда заключается в том, что газовый детектор начинает работать в непропорциональном режиме в некоторой области энергий. Для учета этого эффекта была введена функция газового усиления (см. Рисунок 2а). На Рисунке 2б представлено сравнение экспериментальных данных энерговыделения в ТПК с данными моделирования до и после введения коррекции для одной из конфигураций ДПИ.

Также в рамках усовершенствования программы для моделирования прототипов ДПИ на основе ТПК была произведена замена физического листа модели, отвечающего за электромагнитные процессы. Было выяснено, что ионизационный пик при данных условиях точнее описывается с помощью класса `G4EmStandardPhysics_option4`, до этого применялся класс `G4EmStandardPhysics_option3`. Влияние этих изменений отображено на Рисунке 3.

Было произведено сравнение данных моделирования с помощью GEANT4 и с помощью специализированной программы Atlsim (базирующейся на GEANT3), связанное с изучением описания спектров переходного излучения, испущенных одним радиатором при прохождении пучка электронов с энергией 20 ГэВ.

Были исследованы следующие параметры спектров:

- число фотонов ПИ за событие,

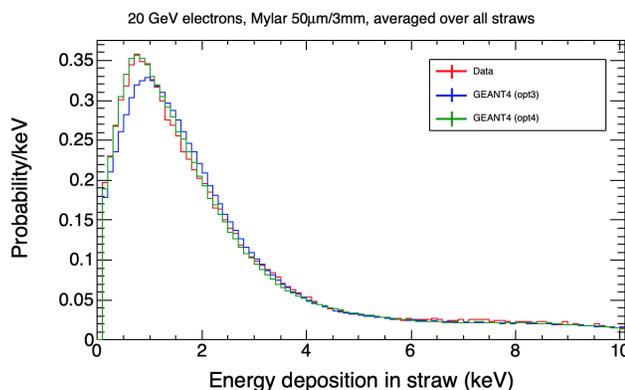


Рисунок 3 — Ионизационный пик дифференциального спектра энерговыделения в ТПК

- суммарная энергия фотонов ПИ за событие,
- энергия каждого фотона ПИ,
- суммарная энергия фотонов ПИ за событие, когда в событии:
 - 1 фотон ПИ,
 - 2 фотона ПИ,
 - 3 фотона ПИ.

В процессе сравнения данных моделирования с помощью GEANT4 и с помощью специализированной программы Atlsim (базирующейся на GEANT3) было обнаружено, что исходящие спектры переходного излучения от радиаторов отличаются, при этом, если ввести корректирующий множитель, увеличивающий среднее число фотонов ПИ, то данные моделирования (а именно исходящие спектры ПИ от радиаторов) с помощью этих двух подходов совпадают. Было принято решение в дальнейшем корректировать среднее число фотонов ПИ, испущенных радиатором, для упрощения поиска других возможных расхождений этих двух моделей.

Введение подобного корректирующего множителя предусмотрено в исходном коде пакета программ GEANT4, однако, по умолчанию он равен 1, при этом его изменение доступно только с сопутствующей пересборкой про-

граммного пакета, при этом невозможно учитывать разный коэффициент для разных радиаторов.

Для того, чтобы производить коррекцию среднего числа фотонов ПИ для нескольких типов радиаторов был написан класс, дублирующий работу класса `G4VXTREnergyLoss`, однако в него была добавлена возможность менять извне параметр `radiatorCof`, отвечающий за пропорциональное увеличение среднего числа фотонов ПИ.

2.3 Проектируемый ДПИ, предназначенный для идентификации адронов энергий ЛНС под малыми углами

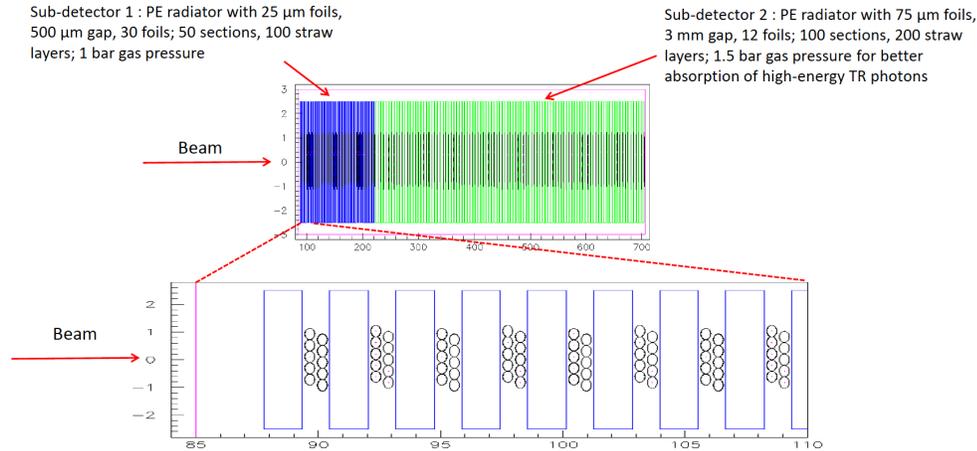


Рисунок 4 — Схема проектируемого детектора Large TRD

В качестве рабочей конфигурации Large TRD рассматривается детектор, состоящий из двух под-детекторов [8]. 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 5 и 6). В первом под-детекторе энергетические

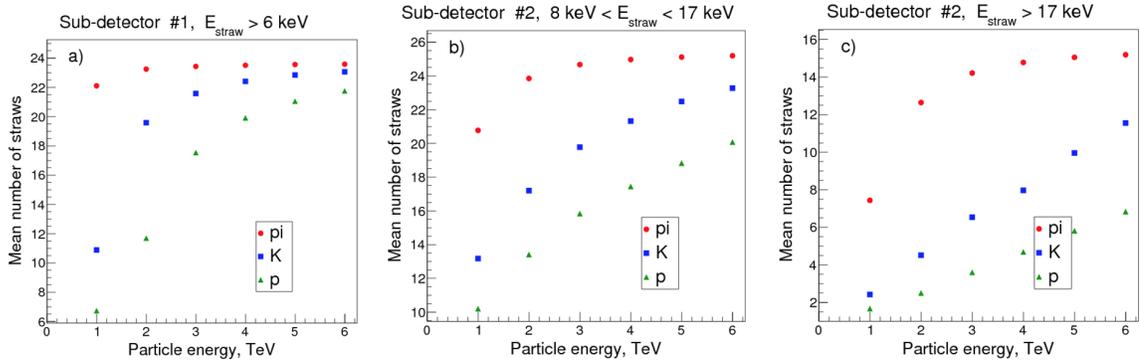


Рисунок 5 — Среднее число «сработавших» ТПК с разным энерговыделением в двух под-детекторах в зависимости от энергии регистрируемых адронов

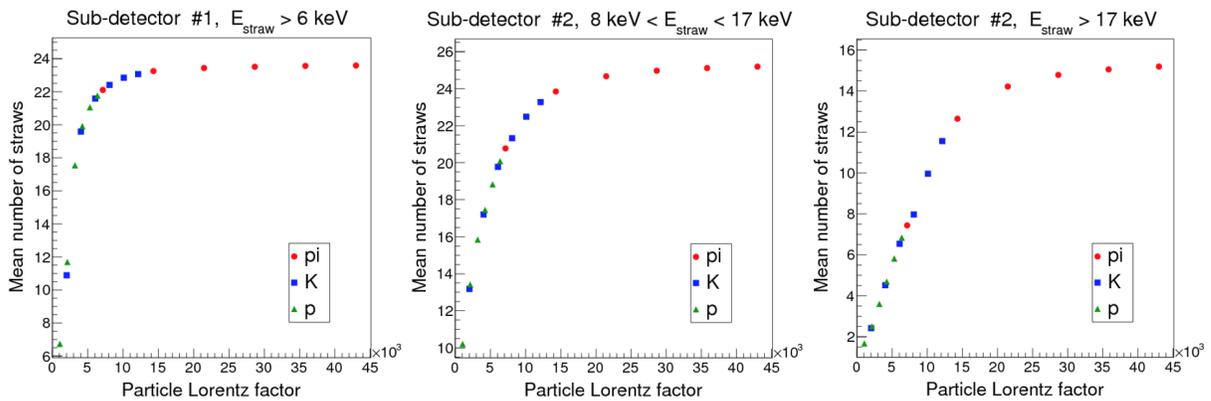


Рисунок 6 — Среднее число «сработавших» ТПК с разным энерговыделением в двух под-детекторах в зависимости от Лоренц-фактора регистрируемых адронов

спектры квантов ПИ получаютсЯ более «мягкими», что дает возможность для 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 [8].

Как видно из Рисунка 6, Лоренц-зависимости этих двух областей регистрируемой в камерах энергии имеют разный характер, что опять же рас-

ширяет диапазон Лоренц-факторов, в котором возможна идентификация частиц. На данный момент подобная оценка параметров проектируемого детектора существует только при помощи сиспользованием специализированной программы Atlsim[4; 8]. Для проведения аналогичных исследований разрабатывается модель, выполненная с использованием программного пакета GEANT4.

2.3.1 Модель проектируемого ДПИ Large TRD

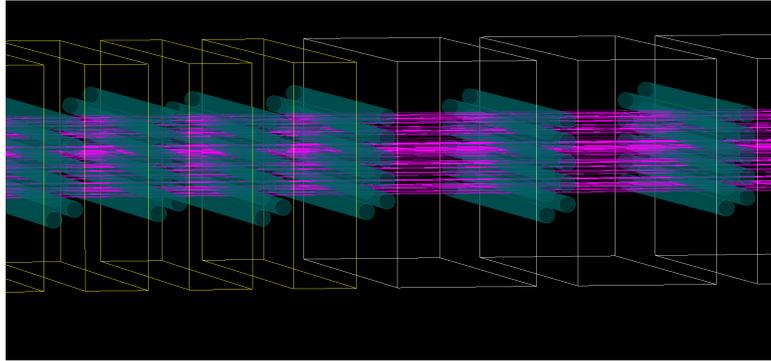
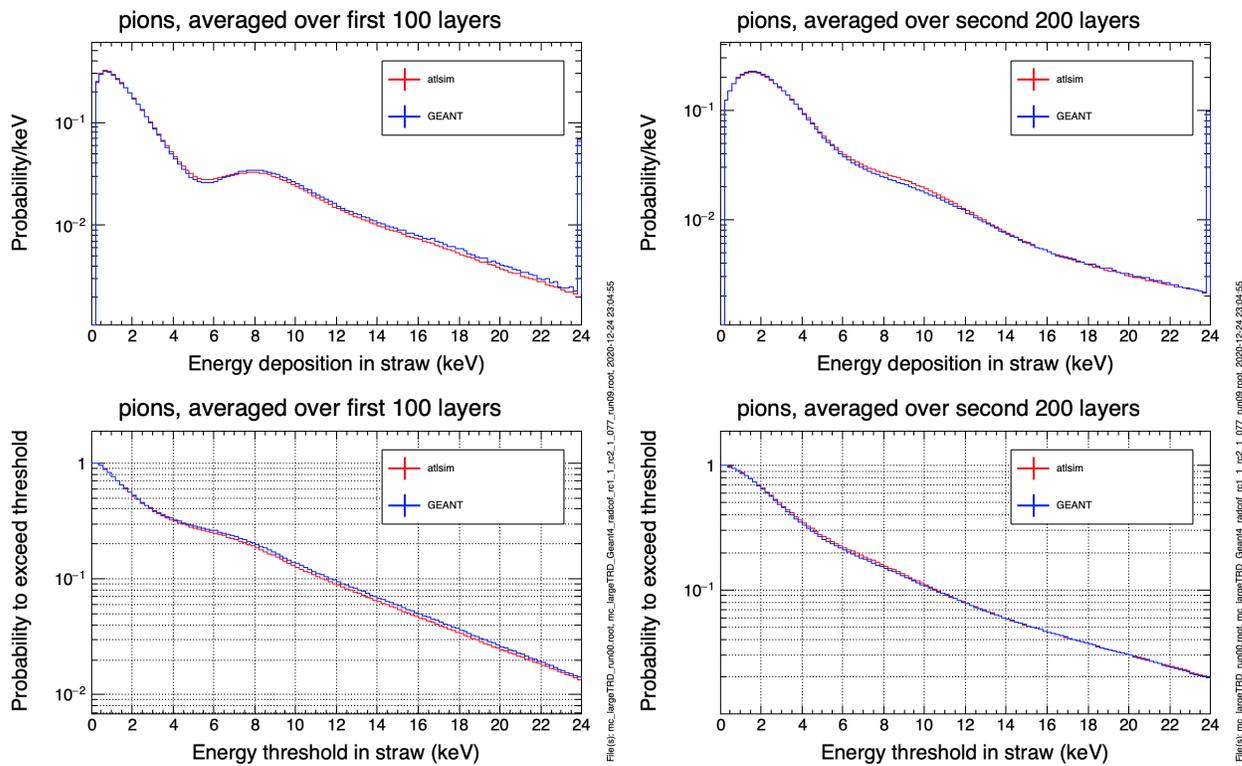


Рисунок 7 — Фрагмент визуализации модели GEANT4 детектора Large TRD

В рамках данной работы на языке C++ с использованием программного пакета GEANT4 была написана программа, представляющая собой физическую модель проектируемого ДПИ на основе ТПК Large TRD. На Рисунке 7 представлен фрагмент визуализации модели. Основой данной модели является доработанная модель эксперимента 2018 года по тестированию прототипов ДПИ.

Результатом моделирования является набор энерговывделений в каждом из 300 слоев ТПК для каждого события. Далее на основе этих энерговывделений можно получить следующие распределения:

- дифференциальные спектры энергий, зарегистрированных под-детектором, усредненные по всем его слоям, для первого и второго под-детекторов,
- интегральные спектры энергий, зарегистрированных под-детектором, усредненные по всем его слоям, для первого и второго под-детекторов,
- вероятность зарегистрировать энергию больше 6 кэВ в каждом из 100 слоев ТПК первого под-детектора,
- вероятность зарегистрировать энергию в интервале от 8 до 17 кэВ в каждом из 200 слоев ТПК второго под-детектора,
- вероятность зарегистрировать энергию больше 17 кэВ в в каждом из 200 слоев ТПК второго под-детектора.



(а) Первый под-детектор ($p = 1$ атм)

(б) Второй под-детектор ($p = 1.5$ атм)

Рисунок 8 — Дифференциальные (сверху) и интегральные (снизу) спектры энерговыделений в первом и втором под-детекторах. Красным — симуляция с помощью Atlsim, синим — с помощью GEANT4

На Рисунке 8 представлено сравнение данных моделирования с помощью специализированной программы Atlsim (базирующейся на GEANT3) и с помощью GEANT4. Далее эти распределения можно будет использовать для оценки параметров детектора, относящихся к эффективности идентификации адронов.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы было произведено усовершенствование построенной ранее модели эксперимента по тестированию прототипов детектора переходного излучения на основе тонкостенных пропорциональных камер с помощью программного пакета для прохождения частиц сквозь вещество GEANT4.

Также на основе модели эксперимента по тестированию ДПИ на основе ТПК была построена модель проектируемого детектора переходного излучения Large TRD, предназначенного для идентификации адронов энергий ЛНС под малыми углами, способная заменить существующую модель, построенную на базе программного пакета GEANT3. Данная модель в том числе может стать основой для модели гибридного детектора переходного излучения, базирующегося как на ТПК, так и на пиксельных модулях на основе арсенида галлия (GaAs).

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. *Agostinelli S.* [et al.]. GEANT4 — a simulation toolkit // Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — Vol. 506, no. 3. — P. 250–303.
3. *Belyaev N.* [et al.]. Development of Transition Radiation Detectors for hadron identification at TeV energy scale // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1390. — IOP Publishing. 2019. — P. 012126.
4. *Belyaev N.* [et al.]. Test beam studies of possibilities to separate particles with gamma factors above 10³ with straw based Transition Radiation Detector // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 934. — IOP Publishing. 2017. — P. 012053.
5. *Гарибян Г. М., Шу Я.* Рентгеновское переходное излучение. — Изд-во АН АрмССР, 1983.
6. *Abat E.* [et al.]. The ATLAS Transition Radiation Tracker (TRT) proportional drift tube: design and performance // Journal of Instrumentation. — 2008. — Vol. 3, no. 02. — P02013.
7. *Aad G.* [et al.]. The ATLAS experiment at the CERN large hadron collider // Jinst. — 2008. — Vol. 3. — S08003.
8. *Belyaev N.* [et al.]. A concept of the transition radiation detector for a hadron separation in a forward direction of the LHC experiments // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1690. — IOP Publishing. 2020. — P. 012043.