

Школа инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии
 Отделение школы отделение ядерно-топливного цикла

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы Геометрическое выравнивание детекторов на основе трековой реконструкции в эксперименте COMPASS CERN

УДК 539.1.074

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A7B	Бирюков Кирилл Петрович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Рыжакова Н.К.	к.ф.-м.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	Любовицкий В.Е.	д.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОСГН	Гасанов Магеррам Али оглы	д.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Передерин Юрий Владимирович	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Бычков П.Н.	к.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном и иностранном (-ых) языке
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	способностью использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ОПК(У)-2	способностью понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны
ОПК(У)-3	владением основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	способностью использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и информационные ресурсы в своей предметной области
ПК(У)-2	способностью проводить математическое моделирование процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований
ПК(У)-3	готовностью к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов
ПК(У)-4	способностью использовать технические средства для измерения

	основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций
ПК(У)-5	готовностью к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок
ПК(У)-6	способностью использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу исходных данных для проектирования приборов и установок
ПК(У)-7	способностью к расчету и проектированию деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования
ПК(У)-8	готовностью к разработке проектной и рабочей технической документации, оформлению законченных проектно-конструкторских работ
ПК(У)-9	способностью к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам
ПК(У)-10	готовностью к проведению предварительного технико-экономического обоснования проектных решений при разработке установок и приборов
ПК(У)-12	способностью к контролю за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования
ПК(У)-13	способностью к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции
ПК(У)-14	готовностью к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем
ПК(У)-15	способностью к монтажу, наладке, настройке, регулировке, испытанию и сдаче в эксплуатацию оборудования и программных средств
ПК(У)-17	способностью к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда
ПК(У)-18	готовностью разрабатывать способы применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, сверхвысокочастотных и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем
ПК(У)-20	способностью к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа _____ инженерная школа ядерных технологий _____
 Направление подготовки _____ 14.03.02 Ядерные физика и технологии _____
 Отделение школы _____ отделение ядерно-топливного цикла _____

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Бычков П.Н.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А7Б	Бирюков Кирилл Петрович

Тема работы:

Геометрическое выравнивание детекторов на основе трековой реконструкции в эксперименте COMPASS CERN	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	29.01.2021, 29-47/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2021
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Данные с геометрией детекторов; – Экспериментальные данные с тестовых запусков COMPASS за 2018 год.
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Ознакомление с теоретическими аспектами геометрического выравнивания; – Ознакомление с программным обеспечением для осуществления геометрического выравнивания; – Проведение процедуры геометрического выравнивания; – Проведение исследования процедуры геометрического выравнивания вдоль оси z путем внесения искусственной невязки координаты; – Анализ полученных данных на предмет качества проведенной процедуры
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	Презентация
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Гасанов Магеррам Али оглы</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Передерин Юрий Владимирович</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Нет</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>16.03.2021</p>
--	-------------------

Задание выдал руководитель / консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент ОЯТЦ</p>	<p>Рыжакова Н.К.</p>	<p>к.ф.-м.н.</p>		
<p>Профессор ИШФВП</p>	<p>Любовицкий В.Е.</p>	<p>д.ф.-м.н.</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>0А7Б</p>	<p>Бирюков Кирилл Петрович</p>		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа _____ инженерная школа ядерных технологий _____
 Направление подготовки _____ 14.03.02 Ядерные физика и технологии _____
 Уровень образования _____ бакалавриат _____
 Отделение школы _____ отделение ядерно-топливного цикла _____
 Период выполнения _____ весенний семестр 2020 /2021 учебного года _____

Форма представления работы:

бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2021
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
25.03.21	Подбор и изучение материалов по теме	10
28.03.21	Выбор направления исследования	5
23.05.21	Проведение процедуры геометрического выравнивания	25
27.05.21	Проведение исследования процедуры геометрического выравнивания вдоль оси z	15
30.05.21	Анализ полученных данных на предмет качества проведенной процедуры	25
05.06.21	Оформление ВКР	10
08.06.21	Подготовка к защите ВКР	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Рыжакова Н.К.	к.ф.-м.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор ИШФВП	Любовицкий В.Е.	д.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ	Бычков П.Н.	К.т.н.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А7Б	Бирюков Кирилл Петрович

Школа	ИШЯТ	Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/Физика атомного ядра и частиц

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; анкетирование; опрос.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта</i>
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Определение целей и ожиданий, требований проекта. Определение заинтересованных сторон и их ожиданий.</i>
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НТИ</i>
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Оценка экономической эффективности выбранной методики калибровки детектора</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>«Портрет» потребителя результатов НТИ</i>
2. <i>Сегментирование рынка</i>
3. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
4. <i>Матрица SWOT</i>
5. <i>График проведения и бюджет НТИ</i>
6. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</i>
7. <i>Потенциальные риски</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гасанов М. А.	д.э.н.		27.02.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Б	Бирюков К. П.		27.02.2021

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А7Б	Бирюков Кирилл Петрович

Школа	ИЯШТ	Отделение (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/Физика атомного ядра и частиц

Тема ВКР:

Геометрическое выравнивание детекторов на основе трековой реконструкции в эксперименте COMPASS CERN

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Экспериментальные данные с тестовых запусков COMPASS за 2018 год.</i>
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – ГОСТ 30494-96 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением N 1). – СНиП 23-05-95* Естественное и искусственное освещение (с Изменением N 1). – СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (в ред. изм. № 1, утв. приказом МЧС России от 09.12.2010 № 643). – ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – ГОСТ 12.1.009-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Термины и определения. – ГОСТ Р12.1.019-2017 ССБТ Электробезопасность. – ГОСТ Р МЭК 61140-2000 Защита от поражения электрическим током. Общие положения по
--	--

	<p>безопасности, обеспечиваемой электрооборудованием и электроустановками в их взаимосвязи.</p> <ul style="list-style-type: none"> – СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. – СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – ГОСТ 32548-2013 Вентиляция зданий. Воздухораспределительные устройства. Общие технические условия. – СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование. – ГОСТ 12.1.029-80 Средства и методы защиты от шума. – ГОСТ 12.4.026-76* Система стандартов безопасности труда. Цвета сигнальные и знаки безопасности. – СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 О введении в действие санитарно-эпидемиологических правил и нормативов. – ГОСТ 12.1.006-84 Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. – ГОСТ Р 22.0.02-2016 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения.
<p>2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Микроклимат – возможное отклонение в показателе микроклимата – Шум – возможное превышение уровня шума – Освещенность рабочей зоны – возможная отклонение от санитарных норм – Пожароопасность – возможное несоответствие нормам пожарной безопасности – Электробезопасность – возможное несоответствие нормам электробезопасности – Радиационная безопасность – возможное несоответствие нормам радиационной безопасности
<p>3. Экологическая безопасность:</p>	<p>Данное исследование не наносит вреда окружающей среде, но может быть нанесен вред в процессе создания вычислительного оборудования</p>
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Возникновение пожара – Удар электрическим током - Падение

	с высоты собственного роста – Падение с лестницы Наиболее типичная ЧС: падение с высоты собственного роста
--	---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	22.04.2021
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Передерин Ю. В.	к.т.н.		22.04.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Б	Бирюков К. П.		22.04.2021

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 93 страницы, 17 рисунков, 21 таблица, 41 источник, 2 приложения.

Ключевые слова: геометрическое выравнивание детекторов, детектор элементарных частиц, трековая реконструкция, процесс Дрелла-Яна, глубоко неупругое рассеяние.

Объектом исследования являются данные, полученные со спектрометра COMPASS. Целью данной работы является проведение процедуры геометрического выравнивания детекторных плоскостей эксперимента COMPASS CERN. В процессе исследования было проведено: внесение изменений в код программного обеспечения, проведение процедуры геометрического выравнивания, исследование процедуры геометрического выравнивания вдоль оси z путем добавления искусственной невязки в файл геометрии детекторов.

Таким образом, в ходе исследования было проведено геометрическое выравнивание детекторов, полученные поправки внесены в файлы геометрии детекторов.

Областью применения результата является физический анализ данных эксперимента COMPASS.

Содержание

Введение	15
1 Описание структуры адронов	18
1.1 Процесс глубокого неупругого рассеяния	18
1.2 Кинематика глубокого неупругого рассеяния	18
1.3 Структура нуклона	21
1.4 Процесс Дрелла-Яна	25
2 Эксперимент COMPASS	30
2.1 Общие данные о спектрометре	30
2.2 Трековые детекторы	31
3 Реконструкция треков частиц	34
3.1 Принципы трековой реконструкции	34
4 Теоретическое описание процедуры	37
4.1 Общие принципы	37
4.2 Параметры выравнивания	39
4.3 Геометрическое выравнивание в отсутствии магнитного поля	40
4.4 Выравнивание в присутствии магнитного поля	41
5 Реализация процедуры геометрического выравнивания	42
5.1 Геометрическое выравнивание детекторов для сеанса набора данных 2018 года	44
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	48
6.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	48
6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	48
6.1.2 Анализ конкурентных технических решений	48

6.1.3	SWOT-анализ	49
6.2	Планирование научно-исследовательских работ	51
6.2.1	Структура работ в рамках научного исследования	51
6.2.2	Определение трудоемкости выполнения работ	53
6.2.3	Разработка графика проведения научного исследования	53
6.3	Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	55
6.3.1	Расчет затрат на оборудование для научно-экспериментальных работ	56
6.3.2	Основная заработная плата исполнителей темы	56
6.3.3	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	58
6.3.4	Накладные расходы	59
6.3.5	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	59
6.4	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	60
7	Социальная ответственность	63
7.1	Оценка вредных и опасных факторов	63
7.1.1	Микроклимат	64
7.1.2	Шум	65
7.1.3	Освещение	66
7.1.4	Электромагнитные поля	69
7.1.5	Взрывопожаробезопасность	70
7.1.6	Электробезопасность	71
7.1.7	Радиационная безопасность	72
7.2	Выводы по главе	76
	Заключение	77
	Список литературы	78
	Приложение А	82

ВВЕДЕНИЕ

Одной из фундаментальных проблем современной физики элементарных частиц является исследование структуры адронов, которое позволяет извлечь важную информацию о природе сильных взаимодействий, формировании спектра масс и динамических характеристиках адронов. Важной вехой на этом пути явилось открытие Хиггсовского бозона независимо двумя коллаборациями ЦЕРНа (Европейская Организация Ядерных Исследований) – CMS (Compact Muon Solenoid) и ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS). Это фундаментальное открытие не только подтвердило существование последней недостающей частицы Стандартной Модели, но и блестяще доказало Хиггсовский механизм генерации масс частиц. В последствие двум физикам-теоретикам Франсуа Энглеру и Питеру Хиггсу, внесшим решающий вклад в это открытие, была присвоена Нобелевская премия по физике “за теоретическое открытие механизма, способствующего нашему пониманию существования массы у субатомных частиц . . .”. [1] [2]

Опираясь на данные NASA, около 95,4% всей массы Вселенной составляют темная материя и энергия. Наблюдаемой материи, в свою очередь, остается только 4,6% [3], из которых лишь 0,1% можно напрямую объяснить Хиггсовским механизмом. Основным источником массы наблюдаемой материи являются нуклоны, которые, в свою очередь, построены из кварков и глюонов (частиц-переносчиков сильного взаимодействия). Таким образом, изучение природы возникновения массы нуклонов тесно связано с изучением их внутренней структуры.

Одной из лидирующих экспериментальных коллабораций, занимающихся данной проблемой, является COMPASS, объединяющий более 200 ученых из 12 стран, в том числе из Томского Политехнического Университета. Эксперимент COMPASS выполняется на суперсинхротронном ускорителе в ЦЕРНе. Основными задачами исследования COMPASS являются адронная спектроскопия, динамические характеристики адронов, такие как функции распределения партонов и спиновые эффекты. Изучение структуры адронов проводится в пучках поляризованных мюонов с энергией 100-200 ГэВ в реакциях рассеяния поляризованных мюонов на поляризованных нуклонах.

В качестве реакций рассеяния могут быть использованы следующие процессы:

- DIS – глубоко неупругое рассеяние;
- SIDIS – полуинклюзивное глубоко неупругое рассеяние;
- процесс Дрелла-Яна (DY);
- DVCS – глубоко виртуальное комптоновское рассеяние.

Правильная интерпретация структуры адронов требует точной реконструкции треков рассеянных частиц. Точность же реконструкции напрямую зависит от точности как самих детекторов, так и их положений в пространстве друг относительно друга.

В то время, как проблема точности детекторов была решена (на данный момент пространственное разрешение детекторов эксперимента 10-100 мкм), погрешность установки детектора может достигать вплоть до 1 мм, что недопустимо для такого рода экспериментов.

Для решения данной проблемы существует процедура геометрического выравнивания при помощи предварительной трековой реконструкцией, которая является одним из важнейших этапов в обработке результатов эксперимента. С помощью данной процедуры можно снизить погрешность измерений положения вершин взаимодействия, угловых характеристик 4-векторов частиц и т.д.

Целью данной выпускной квалификационной работы является проведение процедуры геометрического выравнивания детекторных плоскостей эксперимента COMPASS CERN.

В рамках выполнения ВКР были поставлены следующие задачи:

1. изучить физику процессов, используемых в эксперименте COMPASS;
2. изучить алгоритм реконструкции треков и математический аппарат геометрического выравнивания;
3. освоить программное обеспечение для процедуры геометрического выравнивания;
4. внести изменения в код программного обеспечения;

5. провести процедуру выравнивания;
6. провести исследование процедуры выравнивания вдоль оси z ;
7. провести анализ полученных результатов.

Предметом исследования являются данные, полученные со спектрометра COMPASS во время специального набора данных для выравнивания (alignment runs); метод исследования – минимизация χ^2 -критерия невязки измеренных координат частиц.

1 Описание структуры адронов

1.1 Процесс глубокого неупругого рассеяния

Процессы рассеяния играют важную роль в изучении внутренней структуры материи. Упругое рассеяние позволяет изучить базовую структуру атома, на чем и был основан эксперимент Резерфорда [4]. В эксперименте измерялся размер ядра, а также его форма и форм-факторы упругого рассеяния нуклона. Глубокое неупругое рассеяние (англ. deep inelastic scattering (DIS)), включающее в себя неупругое рассеяние лептонов на частице-мишени, позволило изучать внутреннюю структуру нуклона и его динамику. Измерения, проведенные на SLAC в 1968 году доказали, что нуклоны не являются элементарными частицами, а состоят из точечных частиц, названных партонами (partons – parts of proton) [5].

Далее началось использование поляризованного глубокого неупругого рассеяния, в котором были продольно поляризованные лептоны и продольно или поперечно поляризованные нуклоны-мишени, позволившее изучить продольную составляющую спина нуклона с помощью спиральных функций распределения партонов в нуклоне. Также структура поперечной составляющей спина описывается поперечными функциями распределения или TMDs, обладающими свойством киральной нечетности. К сожалению, процессы с киральной нечетностью не могут быть изучены с помощью глубокого неупругого рассеяния, но полуинклюзивное глубокое неупругое рассеяние и процесс Дрелла-Яна дают эту возможность.

1.2 Кинематика глубокого неупругого рассеяния

Глубокое неупругое рассеяние это процесс рассеяния заряженного или электрически нейтрального лептона с импульсом k на нуклоне H с импульсом P . Уравнение реакции представлен в формуле (1).

$$l(k) + H(P) \rightarrow l'(k') + X \quad , \quad (1)$$

где X – любое конечное состояние адрона, созданное из-за переноса части энергии лептона. Если $X = H$ и $l = l'$, то уравнение (1) описывает упругое рассеяние.

Частицами-переносчиками взаимодействия могут быть или фотоны, или Z -бозоны, но в данной главе мы рассмотрим только фотон как частицу-переносчик взаимодействия. Диаграммы Фейнмана низшего порядка для упругого и неупругого электрон-протонного рассеяния показаны на рисунке 1.

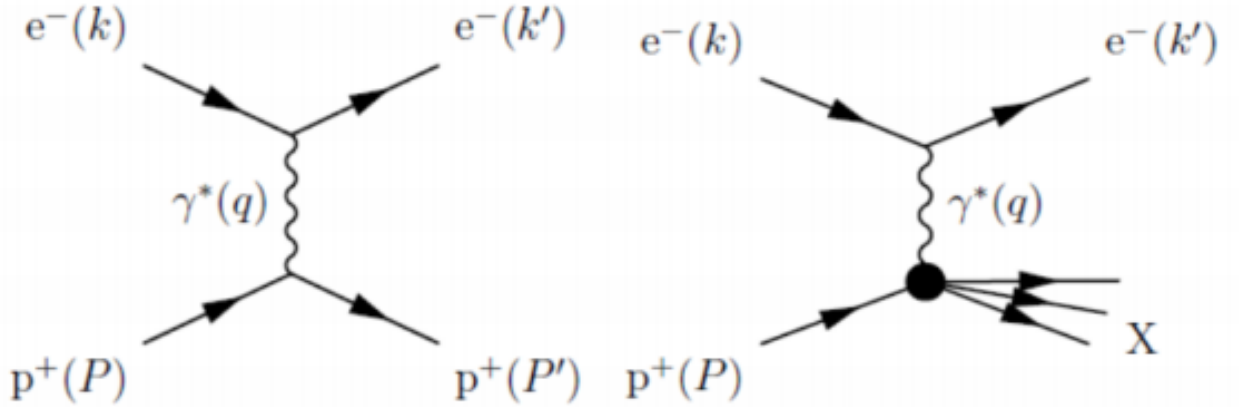


Рисунок 1 — Диаграммы Фейнмана низшего порядка: слева - упругое лептон-протонное рассеяние, справа - неупругое лептон-протонное рассеяние [6]

Следующие Лоренц-инвариантные переменные обычно используются для описания глубокого неупругого рассеяния [7]:

$$s \equiv (k + P)^2 = M^2 + 2k \cdot P = M_p (2E_{lab} + M_p) \quad , \quad (2)$$

$$Q^2 \equiv -q^2 = -(k - k')^2 = 2k \cdot k' = 2EE' \sin^2 \left(\frac{\vartheta}{2} \right) \quad , \quad (3)$$

$$x \equiv \frac{Q^2}{2P \cdot q} = \frac{Q^2}{2M_p v} = \frac{Q^2}{Q^2 + W^2 - M_p^2} \quad , \quad (4)$$

$$y \equiv \frac{q \cdot P}{k \cdot P} = \frac{E_{lab} - E'_{lab}}{E_{lab}} = \frac{v}{E_{lab}} = \left(\frac{s - M_p^2}{s} \right) \frac{1 - \cos \vartheta^*}{2} \quad , \quad (5)$$

$$W^2 \equiv (q + P)^2 = \frac{Q^2(1 - x)}{x} + M_p^2 \quad , \quad (6)$$

где W – инвариантная масса адронной системы X , полученной посредством поглощения виртуального фотона нуклоном. Переменная Мандельстама s – квадрат энергии системы лептон-протон в системе отсчета, связанной с центром инерции (СЦИ), M_p – масса протона. В данных формулах мы пренебрегаем массой лептона, так как она много меньше массы протона. E и E' – начальная и конечная энергии лептона в СЦИ соответственно. ϑ – угол рассеяния лептона. Q^2 – отрицательный квадрат четырех-вектора виртуального фотона, который интерпретируется как переход импульса между лептоном и адронной системой. y – энергия, перешедшая от лептона к адронной системе. x – переменная Бьёркена, показывающая коэффициент упругости взаимодействия. Переменная x изменяется в интервале значений от 0 до 1, причем при рассеяние упругое. Используя ультрарелятивистский предел, можно выразить квадрат четырех-вектора виртуального фотона как $Q^2 \approx sxy$. Это означает, что в отсутствии поляризации при заданной переменной s только две переменные независимы.

Рассмотрим, для начала, выражение для дифференциального сечения взаимодействия процесса в общем виде $(1 + 2 \rightarrow 3 + 4 + \dots + n)$ [8]:

$$d\sigma = \frac{(2\pi)^4}{|\vec{v}_1 - \vec{v}_2|} \frac{1}{2E_1} \frac{1}{2E_2} |M_{fi}|^2 \prod_{i=3}^n \frac{dp_i}{(2\pi)^3 2E_i} \delta^{(4)} \left(p_1 + p_2 - \sum_{i=3}^n p_n \right) S \quad , \quad (7)$$

где \vec{v}_i – вектор скорости частицы в начальном состоянии, $p_i = (E_i, \vec{p}_i)$ – четырех-вектор i -й частицы. M_{fi} – Лоренц инвариантная амплитуда вероятности перехода от начального к конечному состоянию. S – множитель, необходимый для случая образования тождественных частиц в конечном состоянии.

В лабораторной системе координат дифференциальное сечение взаимодействия выглядит следующим образом [9]:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{lab}} = \sigma_{Mott} \frac{E'_{lab}}{E_{lab}} \left[1 + \frac{Q^2}{2M^2} \tan^2 \left(\frac{\vartheta_{lab}}{2} \right) \right], \quad \sigma_{Mott} = \frac{\alpha^2 \cos^2(\vartheta/2)}{4E_{lab}^2 \sin^4(\vartheta_{lab}/2)} \quad , \quad (8)$$

где σ_{Mott} – формула Мотта для рассеяния релятивистской Дираковской частицы (неполяризованной) на статическом электрическом поле точечного заряда, α – постоянная тонкой структуры.

Данная формула требует модификации, если мы будем считать протон частицей со внутренней структурой. В формулу необходимо добавить форм-факторы

или структурные функции. Получим следующее выражение [9]:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{lab}} = \sigma_{Mott} \frac{E'_{lab}}{E_{lab}} \left[\frac{G_E^2 + \tau G_M^2}{1 + \tau} + 2\tau G_M^2 \tan^2 \left(\frac{\vartheta_{lab}}{2} \right) \right] , \quad (9)$$

где $\tau = \frac{Q^2}{4M^2}$ и G_E^2 и G_M^2 – электрический и магнитный форм-факторы соответственно.

Следующие преобразования необходимы из-за того факта, что при глубоком неупругом рассеянии кинетическая энергия не сохраняется. Соответственно, необходимо учесть неупругие электромагнитные форм-факторы протона [9]:

$$\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4} \left[\left(1 - y - \frac{M^2 xy}{s} \right) \frac{F_2(x, Q^2)}{x} + y^2 F_1(x, Q^2) \right] , \quad (10)$$

$$\frac{d^2\sigma}{dE' d\Omega_{lab}} = \sigma_{Mott} \left[\frac{M}{v} W_2(x, Q^2) + 2W_1(x, Q^2) \tan^2 \left(\frac{\vartheta_{lab}}{2} \right) \right] , \quad (11)$$

где $F_1(x, Q^2)$ и $F_2(x, Q^2)$, так же, как и $W_1(v, Q^2)$ и $W_2(v, Q^2)$ – неупругие электромагнитные форм-факторы или структурные функции протона.

1.3 Структура нуклона

Впервые опыт по исследованию структуры нуклона и упругих форм-факторов при помощи электрон-протонного глубокого неупругого рассеяния был реализован в лаборатории SLAC (Stanford Linear Accelerator) в конце 60-х годов прошлого столетия. Результаты эксперимента показали, что при увеличении квадрата переданного импульса Q^2 наблюдается быстрое уменьшение упругих форм-факторов, в то время, как увеличивался до постоянного ненулевого значения неупругих форм-факторов. Первое объяснение данному явлению было дано Ричардом Фейнманом, предположившим, что, если нуклон обладает какой-либо внутренней структурой, то при увеличении энергии столкновения вероятность рекомбинации уменьшается. Такое поведение форм-факторов было предсказано Джеймсом Бьёркеном [10]. Далее было обнаружено, что Бьёркеновское масштабирование является неточным,

так как неупругие форм-факторы, конечно, ведут себя асимптотически относительно нуля, но подходят к нему очень медленно.

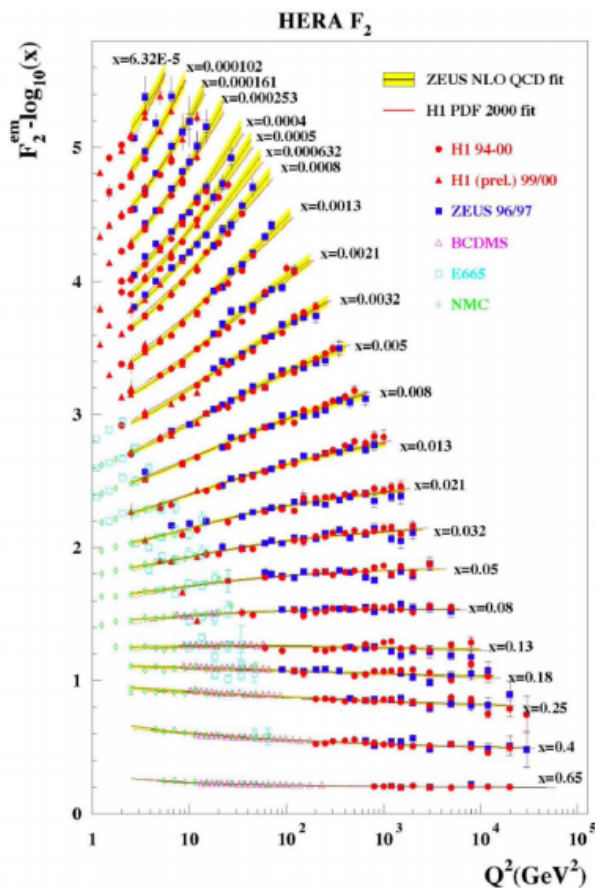


Рисунок 2 — Экспериментальные значения масштабирования форм-фактора протона, исследованного с помощью электромагнитного рассеяния позитронного пучка на покоящейся протонной мишени на эксперименте ZEUS (HERA) для x , электронного пучка на эксперименте SLAC и мюонного пучка на экспериментах BCDMS, E665 и NMC [11]

На основании экспериментальных данных Р. Фейнман ввел партонную теорию. В партонной теории DIS рассматривается в системе отсчета, в которой у протона бесконечный импульс. В такой системе отсчета все составляющие протона сильно замедляются из-за сокращения временного интервала специальной теории относительности (СТО). Следовательно, эти частицы можно рассматривать во время соударения как свободные, так как время жизни партонов гораздо больше времени столкновения. Такое рассмотрение процесса делает партонную модель допустимой только при высоких энергиях. По рисунку 3 видно, что

процесс адронизации (конверсия партонов в конечный адрон) происходит позже непосредственно столкновения. Предположим, что перпендикулярная составляющая импульса партона намного меньше продольной, в дальнейшем ей пренебрегая. Так же будем пренебрегать энергией покоя партона. Следовательно, продольный импульс партона можно представить как часть импульса протона. Запишем закон сохранения импульса для протонного узла рисунка 1:

$$(\eta_i P')^2 = (\eta_i P)^2 - Q^2 + 2\eta_i Pq \Rightarrow Q^2 = 2\eta_i Pq \quad . \quad (12)$$

Используя предположение $s \rightarrow \infty$, а, следовательно, переменная y пренебрежимо мала, дифференциальное сечение упругого рассеяния электрона на протоне с зарядом можно записать следующим образом:

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2 e_p^2}{Q^4} \quad . \quad (13)$$

Продифференцировав данную формулу по x , ее можно переписать следующим образом:

$$\frac{d\sigma}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2 F_2(x, Q^2)}{Q^4 x} = \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4} \sum_i e_i^2 f_i(x) \quad , \quad (14)$$

где $f_i(x)$ интерпретируется как вероятность нахождения i -го партона с зарядом и импульсом в протоне. Функции $f_i(x)$ называются функциями распределения партонов (PDFs – Parton Distribution Functions).

Функция $F_2(x, Q^2)$ записывается следующим образом:

$$F_2(x, Q^2) = F_2(x) = x \sum_i e_i^2 f_i(x) \quad . \quad (15)$$

Связь между $F_i(x)$ функциями можно аппроксимировать с помощью соотношения Каллана-Гросса для партонов со спином $1/2$: $F_2(x) = 2xF_x(x)$. В 70-х годах прошлого столетия заряженные партоны в нуклоне называли кварками, пришедшими из аддитивной кварковой модели, введенную для объяснения спектра адрона. Данное действие повело за собой некоторые расхождения. Одно из расхождений между теорией и экспериментальными данными было связано со структурной функцией $F_2(x)$. По правилу суммирования импульсов:

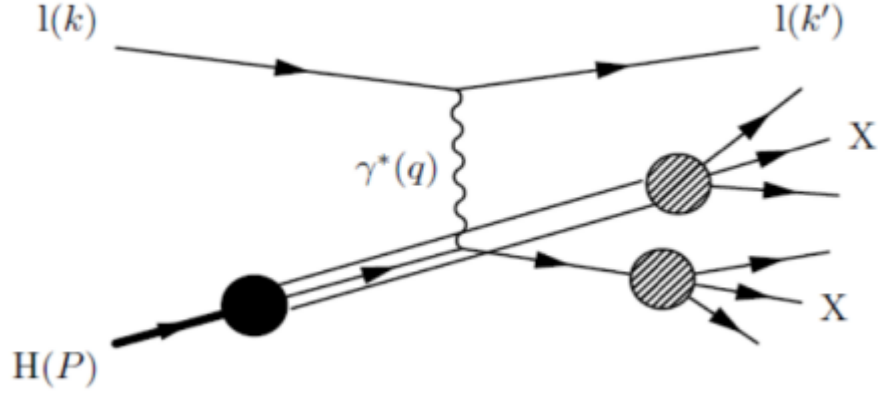


Рисунок 3 — Схема глубокого неупругого рассеяния в партонной модели [12]

$$\sum_i \int_0^1 x f_i(x) dx = 1 \quad . \quad (16)$$

Однако, экспериментальные данные показали только значение, равное 0,5 [13], что свидетельствовало о нахождении дополнительных частиц, не подвергавшимся электромагнитному взаимодействию.

Предполагая, что протон состоит из кварков, возникает следующая проблема. Так как протон может состоять только из u , d , s кварков (b и t кварки слишком тяжелые, чтобы быть составляющими протона), структурная функция протона может быть записана следующим образом:

$$F_2^p = x \frac{4}{9} [f_u(x) + f_{\bar{u}}(x) + f_c(x) + f_{\bar{c}}(x)] + x \frac{1}{9} [f_d(x) + f_{\bar{d}}(x) + f_s(x) + f_{\bar{s}}(x)] \quad , \quad (17)$$

Интегрирование данной формулы по x получим среднеквадратичное значение заряда партона. По экспериментальным данным, данное значение равно $0,17 \pm 0,009$ [9], что гораздо меньше, чем точное значение для 3-кварковой модели.

Также поведение функции распределения партонов является проблемой, так как она пропорциональна $1/x$ при $x \rightarrow 0$, следовательно, интеграл от данной функции расходится. Это означает, что в партоне находится бесконечное число заряженных партонов. Определим так называемые валентную PDFs и морскую PDFs как комбинации функций распределения кварков и антикварков следующим

образом [9]:

$$f_q^{val}(x) \equiv f_q(x) - f_{\bar{q}}(x), \quad f_q^{sea}(x) \equiv \bar{f}_q(x) \quad , \quad (18)$$

в то время, как морская PDFs расходится. В дальнейшем данные проблемы были решены при помощи КХД, неабелевой калибровочной теорией сильных взаимодействий.

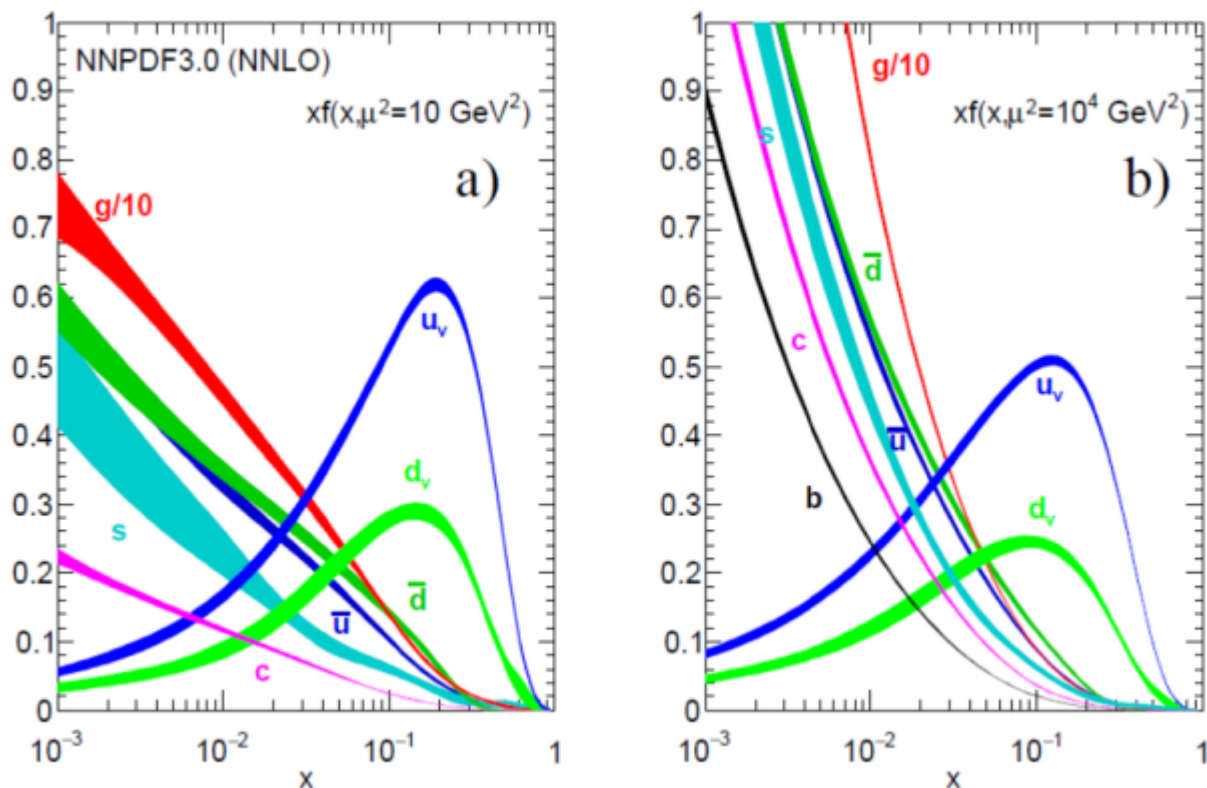


Рисунок 4 — Графики произведения x и неполяризованных PDFs $f(x)$ для валентных и морских кварков и глюонов в протоне при $\mu^2 = (10\text{GeV}/c)^2$ и $\mu^2 = 10^4(\text{GeV}/c)^2$ и $\alpha_s(M_Z^2) = 0,118$ [14]

1.4 Процесс Дрелла-Яна

Процесс Дрелла-Яна был впервые представлен в 1970 году [15]. Данный процесс является реакцией между двумя адронами. Реакция происходит за счет аннигиляции кварка и антикварка с образованием массивной лептонной пары:

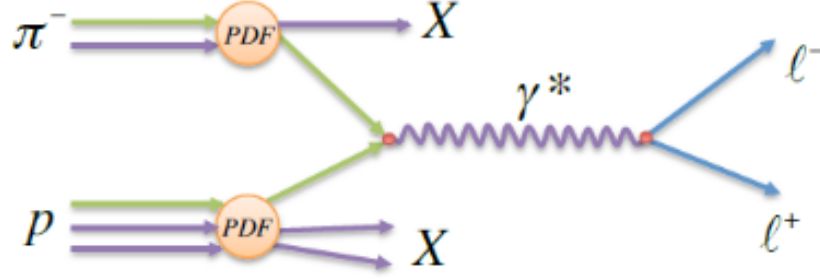


Рисунок 5 — Диаграмма Фейнмана процесса Дрелла-Яна: кварк-антикварк аннигиляция с образованием лептонной пары. PDF – функция распределения партонов. Адроны, участвующие в реакции – π^- и p

$$H_\alpha(P_a) + H_s(P_s, S_s) \rightarrow \gamma^*(q) + X \rightarrow l^-(k, s) + l^+(k', s') + X \quad , \quad (19)$$

где $P_{a,b}$ – импульсы адронов; S_b – спин адрона-мишени (в контексте эксперимента COMPASS будут рассмотрены только поляризованные мишени), обладающий следующими свойствами: $S_p \cdot P_p = 0$ и $S_p^2 = -1$; k и k' – импульсы лептонов со спинами s и s' ; $q = k + k'$ – суммарный импульс лептонной пары или импульс виртуального фотона.

Система отсчета адрон-адронного взаимодействия направлена вдоль оси z . Запишем следующие Лоренц-инвариантные кинематические переменные:

$$\begin{aligned} s &= (P_a + P_b)^2 \quad , \\ x_{e,b} &= \frac{q^2}{(2P_{s,k}q)} \quad , \\ x_F = x_a - x_s &\cong \frac{2q}{\sqrt{s}} \quad , \\ \tau &= \frac{4m^2}{s} \quad , \\ M_u^2 = Q^2 = q^2 &\cong sx_a x_b \quad , \end{aligned} \quad (20)$$

где s – квадрат полной энергии в системе центра инерции, x_a и x_b – переменные Бьеркона, x_F – переменная Фейнмана. В партонной модели сечение в неполяризованном случае равно:

$$\frac{d\sigma}{dm^2 dx_F} = \frac{1}{3} \left[\frac{4\pi\alpha^2}{3m^2} \right] \sum_i e_i^2 \iint f_{1i}(x_\alpha) \bar{f}_{1i}(x_s) \delta(x_\alpha x_b s - m^2) \times \\ \times s (x_e - x_b - x_F) dx_a dx_b \quad , \quad (21)$$

где выражение в квадратных скобках является сечением партон-антипартонной аннигиляции. Дробь $\frac{1}{3}$ – вероятность того, что взаимодействующие кварк и антикварк будут одного цвета, так как только кварк и антикварк одного цвета могут аннигилировать в бесцветный фотон. После интегрирования выражения (21) получим:

$$\frac{m^3 d\sigma}{dm dx_F} = \frac{8\pi\alpha^2}{9\sqrt{x_F^2 + \tau}} \left[\sum_i e_i^2 f_{1i}(x_1) \bar{f}_1(x_2) \right] \quad , \quad (22)$$

$$x_{1,2} = \frac{1}{2} \left(\pm x_F + \sqrt{x_F^2 - \tau} \right) \quad . \quad (23)$$

Наряду с глубоко неупругим рассеянием, неполяризованный процесс Дрелла-Яна играет важную роль в проверке партонной модели. Однако, в отличие от процесса глубоко неупругого рассеяния, процесс Дрелла-Яна позволяет определить функции распределения партонов пионов и каонов, а поляризованный случай является подходящим инструментом для изучения поперечного распределения партонов, что было доказано в [16]. Тем не менее, измерения поляризованного процесса Дрелла-Яна является достаточно сложным процессом из-за малого сечения [17]. Поэтому экспериментальное изучение поляризованных процессов Дрелла-Яна стало доступным лишь за последнее десятилетие с развитием детектерных технологий, быстродействующей электроники и методик анализа экспериментальных данных.

Для изучения сечения процесса Дрелла-Яна можно использовать множество различных систем отсчета. В данной работе процесс будет рассмотрен с использованием двух систем отсчета: систему покоящейся мишени, и, так называемую, систему Коллинса-Сопера. Вторая система является системой, связанной с дилептонным центром инерции, оси z направлена по бисектрисе угла между направлением импульса частицы-мишени и направлением пучка. Ось x расположена в плоскости, построенной на векторах импульсов лептонов, под углом θ к оси

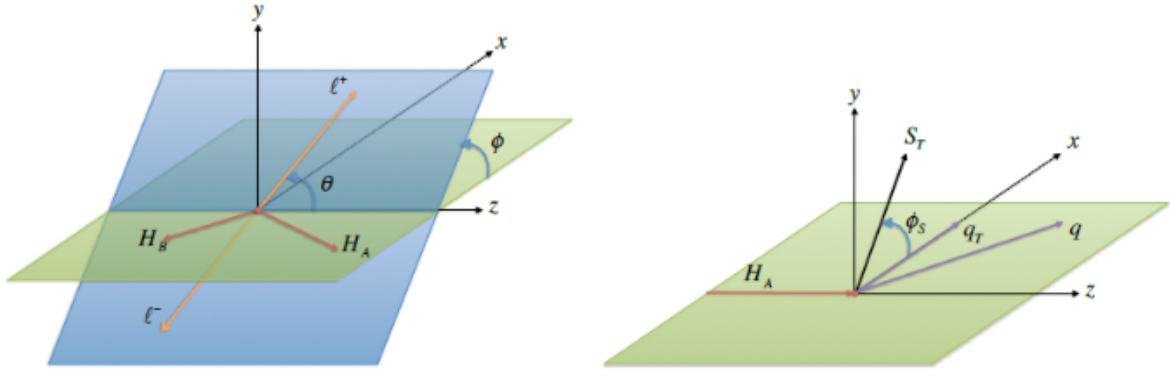


Рисунок 6 — Системы отсчета для изучения процесса Дрелла-Яна: а) система Коллинса-Сопера; б) система покоящейся мишени.

z . Оси y направлена перпендикулярно обеим осям, образуя правую тройку [18]. Пренебрегая массами лептонов, распишем их импульсы:

$$l^-_{cs} = \frac{k}{2}(1, \sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta) \quad , \quad (24)$$

$$l^+_{cs} = \frac{k'}{2}(1, -\sin \theta \cos \phi, -\sin \theta \sin \phi, -\cos \theta) \quad . \quad (25)$$

В системе покоя мишени ось z направлена по направлению пучка, оси x – по перпендикулярной компоненте дилептонного импульса q , а $\hat{y} = \hat{z} \times \hat{x}$. Получим следующие выражения:

$$P_{a,TF}^\mu = (P_{a,TF}^0, 0, 0, P_{a,TF}^3) \quad , \quad (26)$$

$$P_{s,TF}^\mu = (M_b, 0, 0, 0) \quad , \quad (27)$$

$$q_{TF}^\mu = (q_{TF}^0, 0, 0, q_{TF}^3) \quad , \quad (28)$$

$$S_{TF}^\mu = (0, S_T \cos \phi_s, S_T \sin \phi_s, S_L) \quad , \quad (29)$$

где a и b означают пучок и адрон-мишень соответственно. На рисунке 6 показаны все углы, используемые в вышеперечисленных выражениях.

Через углы в вышеперечисленных двух системах отсчета можно выразить сечение процессе Дрелла-Яна следующим образом [17] [19]:

$$\begin{aligned}
\frac{d\sigma}{d^4q d\Omega} &= \frac{\alpha^2}{F q^2} \hat{\sigma}_U \left(1 + A_U^1 \cos^2 \theta + \sin 2\theta A_U^{\cos \phi} \cos \phi + \sin^2 \theta A_U^{\cos 2\phi} \cos 2\phi \right) \\
&\pm \left| \vec{S}_T \right| \left[\left(A_T^{\sin \phi} + \cos^2 \theta \hat{\theta}_T^{\sin \phi} \right) \sin \phi_S + \sin 2\theta \left(A_T^{\sin(\psi+\Delta)} \sin(\phi + \phi_S) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + A_T^{\sin(\phi-\phi_S)} \sin(\phi - \phi_S) \right) + \sin^2 \theta \left(A_T^{\sin(2\phi+\phi_S)} \sin(2\phi + \phi_S) + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + A_T^{\sin(2\phi-\phi_S)} \sin(2\phi - \phi_S) \right) \right] \} \tag{30}
\end{aligned}$$

где $F = 4\sqrt{(p_a \cdot p_b)^2 - M_a^2 M_b^2}$ – выражение, определяющее поток частиц; α – постоянная тонкой структуры; $\hat{\sigma}_U = (F_1 + F_2)$ – выражение, описывающее вклад в сечение от неполяризованного случая; F_1 и F_2 – неполяризованные структурные функции. Данное выражение используется для извлечения асимметрий в эксперименте COMPASS.

Так как сечение процесса Дрелла-Яна изучается с использованием различных угловых модуляций, для корректного экспериментального расчета сечения необходимо достаточно точно определить угловые коэффициенты. Данная задача накладывает высокие требования на точность экспериментальной установки и трековой реконструкции. Требуемой точности установки можно добиться только после применения процедур геометрического выравнивания детекторных плоскостей. Точно проведенная процедура трековой реконструкции, в свою очередь, может сглаживать неточности, возникающие от физической установки.

2 Эксперимент COMPASS

Идея создания данного эксперимента пришла в 1995 году. У двух исследовательских групп были проекты, связанные с адронной спектроскопией с использованием адронного пучка и структурой нуклона с использованием мюонного пучка. В 1997 году эксперимент COMPASS (или NA58) для изучения адронной спектроскопии и структуры нуклонов был утвержден в 1997 году. Запуск произошел в 2002 году и продолжался до остановки ускорителей ЦЕРНа в 2005 году. После первого запуска эксперимент претерпел ряд модификаций: установку нового поляризованного магнита для мишени [20] и детектора RichWall. В 2010 году второй эксперимент COMPASS-II был утвержден и далее запущен в 2012 году с получением информации о эффекте Примакова и глубоком виртуальном комптоновском рассеянии. Запуск длился 2 года. Далее на протяжении двух лет длилось накопление информации о процессе Дрелла-Яна, и далее, с 2016 до 2017 года проводилось накопление информации о глубоком виртуальном комптоновском рассеянии.

2.1 Общие данные о спектрометре

Фиксированная мишень расположена в канале M2, в котором могут производиться мюонные пучки с импульсом 160-200 ГэВ и вторичные адронные пучки с импульсом 120-180 ГэВ [19], используя первичный пучок протонов с ускорителя SPS (Super Proton Synchrotron). Вторичный адронный пучок образуется на бериллиевой мишени T6, расположенной в 1 км от эксперимента. Далее пучок с необходимой энергией получают с помощью отклоняющих магнитов.

Спектрометр COMPASS состоит из трех частей: детекторы на пути пучка к мишени (для отслеживания состояния пучка), спектрометра LAS и спектрометра SAS. Схема спектрометра представлена на рисунке 7.

В адронном пучке приблизительно 97% пионов, 2, 3% каонов и 0, 7% антипротонов и других частиц. Мюонный пучок получается путем распада заряженного пиона ($\pi^- \rightarrow \mu^- \nu_\mu$). Перед мишенью располагаются детекторы: BMS, SciFi и кремниевые детекторы. Детектор BMS (Beam Momentum Station), измеряющий

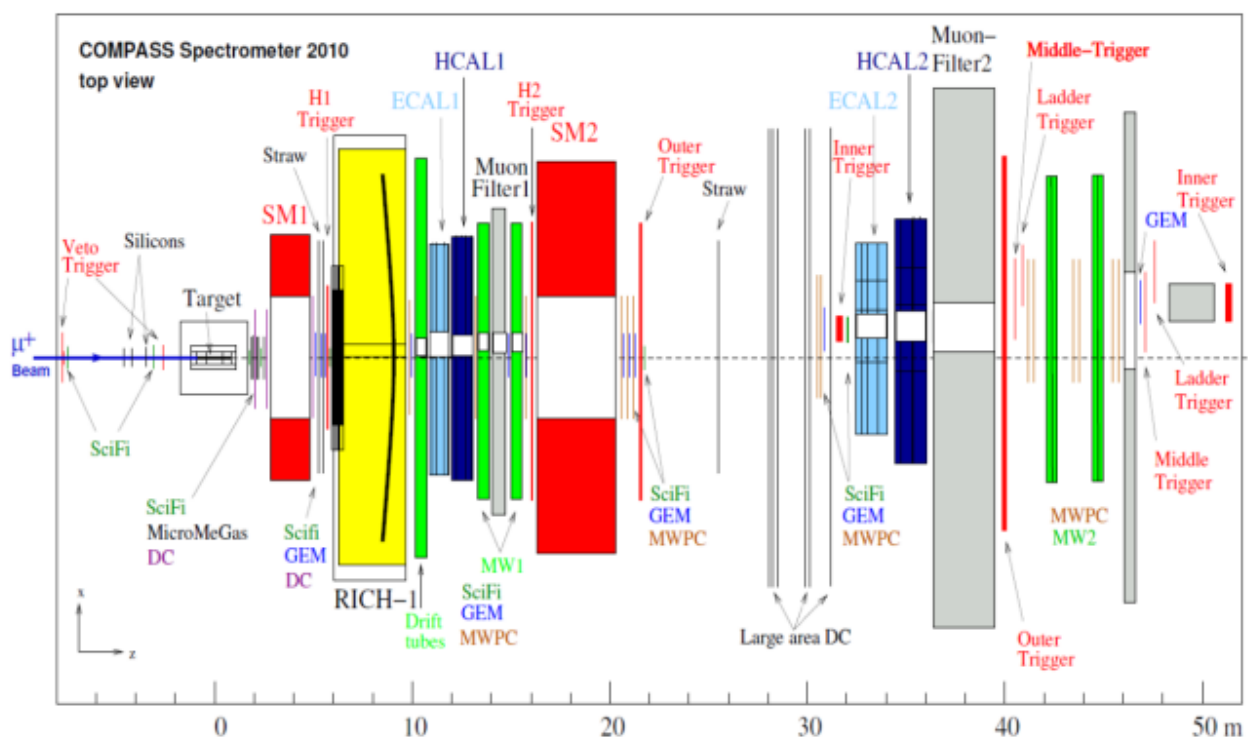


Рисунок 7 — Схема спектрометра COMPASS, вид сверху [18].

импульс налетающих мюонов, расположен примерно в 100 метрах от мишени. Однако, данный детектор можно использовать только для мюонного пучка. Сразу за ним располагается ВТ (Beam telescope), который фиксирует точное расположение частиц в пучке. Он состоит из сцинтилляторов и кремниевых детекторов. Последние же также не могут использоваться с адронным пучком. Детекторы SciFi используются для трековой реконструкции (по причине высокого разрешения).

Спектрометр LAS (Large Angle Spectrometer) состоит из дипольного магнита SM1, измеряющего импульс частиц с апертурой в $229 \times 152 \text{ см}^2$, дающий ± 180 мрад разрешения и интегральное значение магнитного поля в 1 Тл. Дипольный магнит SM2, располагающийся в спектрометре SAS имеет интегральное значение магнитного поля в 4,4 Тл и апертуру $1 \times 2 \text{ м}^2$.

2.2 Трековые детекторы

Детекторы на экспериментах на выведенных пучках располагаются таким образом, чтобы с приближением к оси пучка и к мишени пространственное и

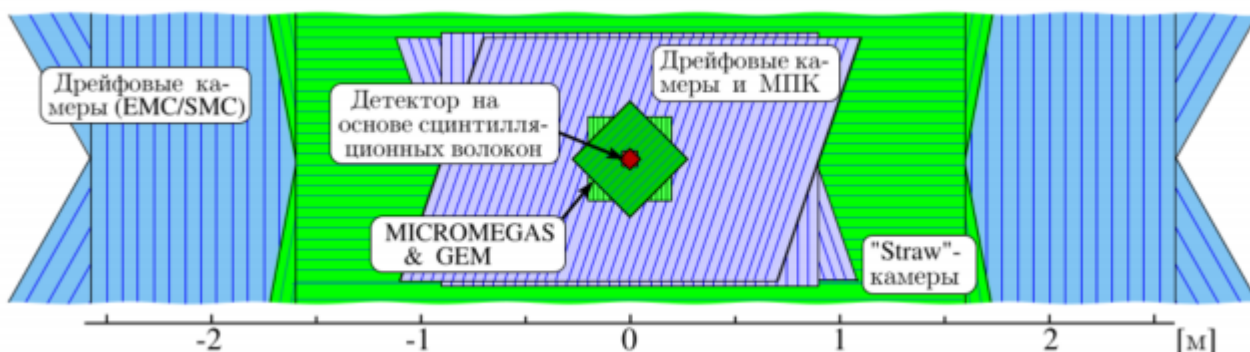


Рисунок 8 — Схема трековых детекторов с видом по направлению пучка [21]

временное разрешения увеличивалось. Также необходимо наименьшее количество вещества на пути пучка, чтобы максимально снизить число вторичных взаимодействий. На рисунке 6 представлена схема трековых детекторов в плоскости, перпендикулярной прямой направления мюонного пучка.

Для определения траекторий частиц используются трековые детекторы, причем на разных расстояниях от оси пучка используются разные трековые детекторы.

Ближайшими к мишени и пучку являются сцинтилляционные детекторы. На них и накладываются наибольшие требования к разрешению. Размеры данных детекторов составляют от 4 до 12 см.

Далее на расстоянии от 2,5 см от оси пучка располагаются 22 детекторов Gas Electron Multiplier (GM) и 12 детекторов Pixel Micromegas (PMM). Каждая пара детекторов GM объединена в одну станцию, в которой угол между двумя детекторами равен 45° . Площадь активной зоны – $31 \times 31 \text{ см}^2$. Каждые 4 детектора PMM, расположенные параллельно, объединены в станции. Площадь активной зоны детекторов – $40 \times 40 \text{ см}^2$.

Сразу после станций GM и PMM располагаются детекторы, необходимые для регистрирования частиц, вылетающих под большими углами к оси пучка:

- 3 дрейфовые камеры DC (Drift Chamber) с активной поверхностью $1,8 \times 1,3 \text{ см}^2$ и центральной мертвой зоной диаметром 30 см;
- станция дрейфовых трубок ST03 с двумя детектирующими плоскостями $323 \times 280 \text{ см}^2$, одной $325 \times 243 \text{ см}^2$ (у каждой плоскости есть центральное квадратное отверстие $20 \times 20 \text{ см}^2$);

— 14 станций многопроволочных пропорциональных камер MWPC (Multi-Wire Proportional Chamber) с размерами активной зоны в интервале $1,8 \times (0,9 - 1,2) \text{ м}^2$ и диаметром центральной мертвой зоны в диапазоне от 16 до 22 см.

3 Реконструкция треков частиц

3.1 Принципы трековой реконструкции

Трековая реконструкция — процедура определения базовых кинематических характеристик заряженных частиц. В эксперименте COMPASS процедура трековой реконструкции состоит из трех этапов [22]:

1. определение прямых участков;
2. сшивка сегментов трека;
3. фитирование трека.

На первом этапе восстанавливаются части треков в областях с отсутствующими рассеивающими элементами и магнитным полем. На таких участках треки заряженных частиц можно с высокой точностью аппроксимировать прямой.

Спектрометр условно делят на пять зон, в каждой из которой независимо рассчитывается прямой участок трека частицы. В каждой из зон находится определенное число детектирующих плоскостей. Группы детектирующих плоскостей, измеряющих координаты пролетающих частиц по одной оси, образуют плоскость, параллельную оси z . Если происходит обнаружение в одной плоскости двух точек (попадания частиц), через точки строится "коридор ось которого соединяет две найденные точки по прямой, а его ширина определяется разрешением детектора. Таким образом, через каждые две точки, лежащие в плоскости, строится коридор. При этом, все точки, попавшие в коридор, принадлежат только одному участку трека.

Данный процесс также необходимо зациклить, причем с каждым последующим циклом требуется увеличивать ширину "коридора". С помощью увеличения ширины коридора появляется возможность поиска изогнутых участков траектории в областях с ненулевым магнитным полем. В конце каждого цикла те участки, в которых обнаружено малое число попаданий, отбрасываются. Далее из участков с большим числом точек отбираются участки с малым разбросом и большей длиной.

После получения проекций частей треков (как показано на рисунке 9), их необходимо восстановить в объеме. Восстановление производится путем сов-

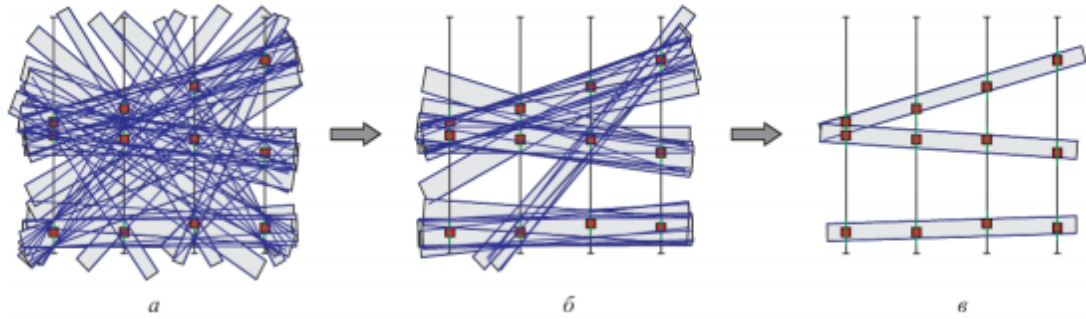


Рисунок 9 — Расчет линейных участков трека: а) "коридоры" от любых двух точек; б) после удавления "коридоров" с малым числом точек; в) итоговые проекции участков трека

падения проекций на двух любых плоскостях. Для проверки используются все остальные плоскости. При несоответствии групп, участок отбрасывается.

В зонах около магнитов вышеописанная процедура реконструкции не подходит, так как треки заряженных частиц, взаимодействующих с магнитным полем, аппроксимировать линией с достаточным уровнем точности не представляется возможным. Для реконструкции участков трека в таких зонах предварительно задают все возможные траектории. Для фиксированного положения по оси z составляется таблица возможных значений следующих параметров:

- x и y - координаты осей глобальной системы координат;
- $\frac{dx}{dz}$ и $\frac{dy}{dz}$ - тангенсы углов наклона к оси z ;
- $\frac{q}{p}$ - отношение заряда к абсолютному значению импульса.

По значениям из данной таблицы рассчитываются точки пересечения трека с детекторными плоскостями. Промежутки между рассчитанными точками интерполируются. Параметры реального трека определяются из табличных путем соответствия точек попадания известных треков.

Далее рассчитанные участки трека необходимо сшивать. Данный этап производится с помощью экстраполяции уже известных участков трека до границ зон и оценки параметров на граничных точках. На следующие параметры будут накладываться ограничения:

- разница координат x и y ;

- угол между участками треков;
- время возникновения сигнала.

Для экстраполяции также необходим расчет импульса частиц. Значение импульса определяется как отношение интеграла магнитного поля к углу отклонения.

На последнем этапе необходимо определить все параметры трека с учетом многократного рассеяния (фитирование). На эксперименте COMPASS для данных задач используется фильтр Калмана [23].

4 Теоретическое описание процедуры

4.1 Общие принципы

Трековые детекторы на эксперименте с фиксированной мишенью состоят из детектирующих плоскостей, установленных друг за другом. На плоскостях расположено большое количество чувствительных элементов. Их плотность определяет разрешение детектора. Детектирующие плоскости и определяют положение частицы при пролете через них.

Большинство трековых детекторов работают по принципу определения расстояния между точкой, в которой прошла заряженная частица через детектирующую плоскость, и ближайшему к этой точке чувствительному элементу. Собственное пространственное разрешение детектора имеет типичную величину порядка 10-100 мкм. Координата частицы в лабораторной системе координат определяется как сумма полученной координаты частицы на детекторной плоскости и координаты плоскости. Координаты детекторных плоскостей, в свою очередь, определены с гораздо большей погрешностью, чем их внутреннее разрешение. Таким образом, точность измерения координаты частицы сводится к точности геодезического измерения координаты центра детекторной плоскости. Значение данной величины составляет 1 мм, что не отвечает требованиям к точности эксперимента [24].

Пусть известно положение детекторной плоскости с ошибкой α (рисунок 10б). Тогда, с учетом данной ошибки, трек будет реконструирован неправильно (рисунок 11а). Для корректной реконструкции трека необходимо использование поправки, как показано на рисунке 2б.

В эксперименте COMPASS выравнивание производится при помощи минимизации χ^2 -критерия, который определяется как:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{n_{track}} \sum_{j=1}^{n_{det}} \frac{[S_{ij}(u_{ij}, \alpha_i^t, \alpha_j^a)]^2}{\sigma_j^2}, \quad (31)$$

где S_{ij} – расстояние от координаты частицы до реконструированного трека, u_{ij} – координаты частицы, i – номер трека, j – номер детектора, α_i^t – геометрические параметры трека частицы, α_j^a – искомые поправочные параметры выравнивания, σ_j – внутреннее разрешение детектора [26].



Рисунок 10 — Схема реконструкции трека частицы: а) идеальный случай; б) пример с отклонением детектора от его предполагаемого положения [25]

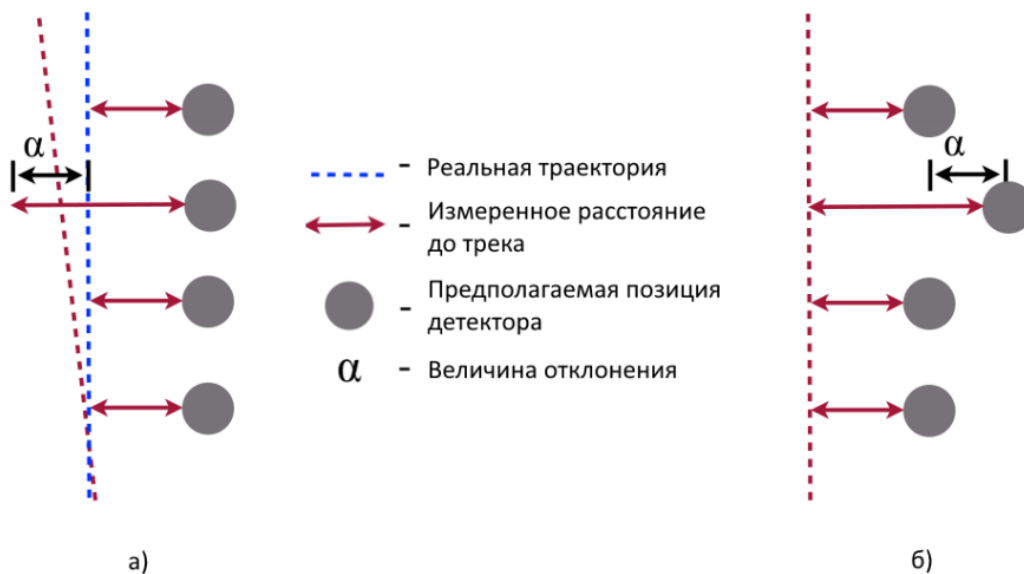


Рисунок 11 — Схема реконструкции трека частицы: а) до применения поправки к координате; б) после применения поправки [25]

S_{ij} можно разложить в степенной ряд до первого порядка:

$$S_{ij} = S_{ij}^0 + \sum_k \frac{\partial S_{ij}}{\partial \alpha_k} \alpha_k \quad , \quad (32)$$

Требование минимума χ^2 эквивалентно условию равенства первой производной нулю. Таким образом, получим систему из N линейных неоднородных алгебраических уравнений, искомыми величинами которых являются параметры трека и выравнивания a , где N – общее число параметров

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \chi^2}{\partial \alpha_m} = \sum_i \sum_j \frac{1}{\sigma^2} \frac{\partial S_{ij}}{\partial \alpha_m} \left(S_{ij}^0 + \sum_k \frac{\partial S_{ij}}{\partial \alpha_k} \alpha_k \right) = 0 \quad . \quad (33)$$

Решая данную систему уравнений, получим отклонения координат детекторов α^t . С помощью внесения данных поправок к геодезическим измерениям можно уточнить координаты детекторов. Повторяя данную процедуру итеративно, получаем возможность вычислить координаты детекторов с точностью, сравнимой с внутренним разрешением детектора [24].

4.2 Параметры выравнивания

В глобальной системе координат оси расположены таким образом, что z направлена вдоль пучка, y – вверх, а x направлена перпендикулярно плоскости (zOy), направление определяется по правилу правой тройки. Также для каждой детектирующей плоскости вводится локальная система координат, где z совпадает с осью z глобальной системы координат. Оси u и v направлены перпендикулярно и параллельно чувствительным элементам детектора соответственно.

Для геометрического выравнивания детектора используется три основных параметра:

- δu – отклонение положения детектора по оси u ;
- $\delta \theta$ – угловое отклонение детектора в плоскости ($uO'v$);
- δz – отклонение положения детектора вдоль оси z .

Кроме вышеперечисленных параметров дополнительно используется параметр pitch (δp). Pitch (p) – расстояние между двумя соседними чувствительными

элементами детекторной плоскости. Параметр связан с отклонением по z следующим выражением:

$$\delta p = \frac{\delta z}{z} . \quad (34)$$

Другие параметры при процедуре выравнивания не используются.

4.3 Геометрическое выравнивание в отсутствии магнитного поля

В уравнение (3) входят коэффициенты, являющиеся производными по параметрам α^t и α^a . При отсутствии магнитного поля трек аппроксимируется прямой. Рассмотрим 4 параметра трека $\alpha^t = (x_0, y_0, t_{x_0}, t_{y_0})$, где (x_0, y_0) – координаты трека в плоскости $z = 0$; (t_{x_0}, t_{y_0}) – тангенс угла наклона к соответствующей оси. В качестве принимаются параметры из (2.1.2). Координаты трека в плоскости детектора j определяются как:

$$\begin{cases} x_j = x_0 + t_{x_0}(z_j - z_0); \\ y_j = y_0 + t_{y_0}(z_j - z_0); \end{cases} \quad (35)$$

Тогда для плоскости имеем:

$$S_j = \{ \cos \theta [x_0 + t_{x_0}(z_j - z_0)] + \sin \theta [y_0 + t_{y_0}(z_j - z_0)] \} - u_j , \quad (36)$$

где θ – угол между осями u и x .

Введем параметры выравнивания, добавляя ко всем переменным малое отклонение. Параметр pitch входит в формулу, как масштабирующий коэффициент [24]:

$$S_j = (1 + \delta p) (\cos(\theta + \delta \theta) [x_0 + t_{x_0}(z_j + \delta z - z_0)] + \sin(\theta + \delta \theta) \cdot [y_0 + t_{y_0}(z_j + \delta z - z_0)]) - (u_j + \delta u) , \quad (37)$$

После дифференцирования (7) получим искомые коэффициенты. Производные по параметрам трека:

$$\begin{cases} \frac{\partial S_j}{\partial x_0} = \cos \theta \\ \frac{\partial S_j}{\partial y_0} = \sin \theta \\ \frac{\partial S_j}{\partial t_{x_0}} = \cos \theta (z_j - z_0) \\ \frac{\partial S_j}{\partial t_{y_0}} = \sin \theta (z_j - z_0) \end{cases} \quad (38)$$

Производные по параметрам выравнивания:

$$\begin{cases} \frac{\partial S_j}{\partial \delta u} = -1 \\ \frac{\partial S_j}{\partial \delta z} = t_{x_0} \cos \theta + t_{y_0} \sin \theta \\ \frac{\partial S_j}{\partial \delta \theta} = -\sin \theta [x_0 + t_{x_0} (z_j - z_0)] + \cos \theta [y_0 + t_{y_0} (z_j - z_0)] \\ \frac{\partial S_j}{\partial \delta p} = \cos \theta [x_0 + t_{x_0} (z_j - z_0)] + \sin \theta [y_0 + t_{y_0} (z_j - z_0)] \end{cases} \quad (39)$$

Последние два выражения из (9) упростим с помощью формулы (5):

$$\begin{cases} \frac{\partial S_j}{\partial \delta u} = -1 \\ \frac{\partial S_j}{\partial \delta z} = t_{x_0} \cos \theta + t_{y_0} \sin \theta \\ \frac{\partial S_j}{\partial \delta \theta} = -\sin \theta x_j + \cos \theta y_j \\ \frac{\partial S_j}{\partial \delta p} = \cos \theta x_j + \sin \theta y_j \end{cases} \quad (40)$$

Параметр S_j^0 принимаем за $-u_j$.

Используя полученные коэффициенты можно численно решить систему уравнений (3).

4.4 Выравнивание в присутствии магнитного поля

Кроме процедуры выравнивания детекторных плоскостей при отключенных магнитах, необходимо также провести процедуру выравнивания при включенных, так как детекторные плоскости намагничены. Следовательно, при включении магнитного поля в таком случае произойдет смещение чувствительных элементов.

В отличие от процедуры выравнивания без магнитного поля, при включенном поле требуется новая модель, так как изгибающиеся треки заряженных

частиц, взаимодействующих с магнитным полем, аппроксимировать прямой не представляется возможным.

Новая модель основана на представлении треков, используемых программой CORAL. В данной модели трек описывается параметрами $(x_j^0, y_j^0, t_{x_j}, t_{y_j})$ в j -ом детекторе, реконструированными пакетом CORAL, с добавлением линейных поправок.

$$\begin{cases} x_j = x_j^0 + \delta x_0 + \delta t_{x_0}(z_j - z_0) & , \\ y_j = y_j^0 + \delta y_0 + \delta t_{y_0}(z_j - z_0) & , \end{cases} \quad (41)$$

где $\delta x_0, \delta y_0, \delta t_{x_0}, \delta t_{y_0}$ – малые поправки к параметрам треков реконструированных программным пакетом CORAL. Таким образом, для такой процедуры можно использовать реконструкцию CORAL, в то время, как линейные поправки позволяют применять итеративную минимизацию.

Используя (12) получим:

$$S_j = (1 + \delta p) \{ \cos(\theta + \delta\theta) [x_j^0 + t_{x_j} \delta z + \delta x_0 + \delta t_{x_0}(z_j + \delta z - z_0)] + \sin(\theta + \delta\theta) [y_j^0 + t_{y_j} \delta z + \delta y_0 + \delta t_{y_0}(z_j + \delta z - z_0)] \} - (u_j + \delta u) \quad . \quad (42)$$

По сравнению с (7), в данном уравнении появились дополнительные поправки. Следует заметить, что производные (8)-(10) не изменятся за исключением замены t_{x_0} и t_{y_0} на t_{x_j} и t_{y_j} соответственно.

5 Реализация процедуры геометрического выравнивания

Для проведения процедуры геометрического выравнивания в рамках выпускной квалификационной работы было использовано программное обеспечение CORAL с помощью технологии Docker контейнеров. Также были получены исходные данные от научного руководителя.

Для непосредственного проведения геометрического выравнивания использовались три процедуры: *traf*, *align*, *updateFromAlign*. Процедура *traf* принимает на вход данные с детекторов и файл, в котором расположена информация о геометрии спектрометра. Полученный выход передается на вход процедуре *align*,



Рисунок 12 — Блок-схема алгоритма геометрического выравнивания

которая непосредственно решает систему линейных алгебраических уравнений (33). Результатом проведения данной процедуры является текстовый файл, в котором внесены поправки для всех включенных в геометрическую реконструкцию детекторных плоскостей. Для проведения следующих итераций процедуры *align* необходимо обновление файла с геометрией спектрометра, для чего и применяется третья процедура - *updateFromAlign*. Данная процедура вносит поправки из выходного файла процедуры *align* в файл с геометрией спектрометра.

Для работы с вышеперечисленными процедурами необходимо вносить изменения в сопутствующие им файлы. Таким образом, для процедур *traf* и *align* настраивается:

- наличие/отсутствие магнитного поля;
- список детекторов, данные с которых учитываются при реконструкции;

- дополнительные ограничения на реконструируемые треки;
- пути к выходным и входным файлам

и другие опции. Для расчета поправок к координатам:

- набор параметров выравнивания α^a ;
- список детекторов, данные с которых будут учитываться при выравнивании;
- список детекторов, положения которых фиксируются;
- ограничения на число используемых треков;
- пути к входным и выходным файлам.

На основе измененной геометрии и реконструированных треков вычисляется среднеквадратичное отклонение координат попаданий частиц для каждого детектора. Если значения не превышают внутреннего разрешения, то алгоритм считается завершенным. Иначе выполняются последующие итерации до необходимого уменьшения значения среднеквадратичного отклонения.

5.1 Геометрическое выравнивание детекторов для сеанса набора данных 2018 года

Первый сеанс набора данных для выполнения процедуры геометрического выравнивания в рамках проведения выпускной квалификационной работы состоялся 15 мая 2021 года. Далее в программном пакете CORAL, локализованном с помощью Docker контейнера, вносились изменения в сопутствующие для процедуры *align* файлы. Далее итеративно проводилась процедура с обновлением входных реконструированных треков и геометрии детекторов. По полученным данным строились гистограммы невязки координат [27].

Для выравнивания были выбраны детекторы GEM (01, 02, 03 и 04) (газовый электронный умножитель), FI04 (сцинтилляционные волокна) и DC (00, 01 и 04) (дрейфовая камера).

Пространственное разрешение детекторов для процедуры выравнивания.

Таблица 1 — Пространственное разрешение детекторов для процедуры выравнивания

Наименование детектора	GEM (01, 02, 03, 04)	FI04	DC (00, 01, 04)
Разрешение детектора, мкм	70	50	190

Четыре верхние гистограммы построены до выполнения процедуры выравнивания для детектора GEM01. Далее представлены гистограммы скорректированной геометрии. Значения среднеквадратичного отклонения равно 204 мкм, 206 мкм, 210 мкм и 172 мкм для плоскостей U, V, Y и X соответственно.

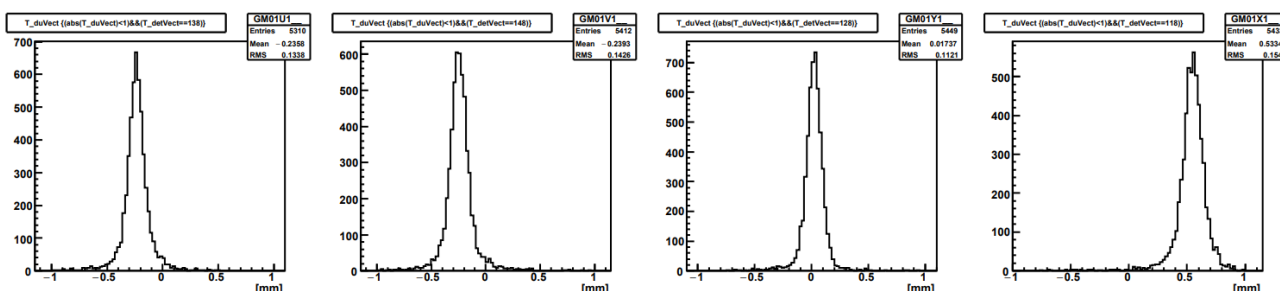


Рисунок 13 — Гистограммы невязки координаты для детектора GM01 до проведения процедуры выравнивания

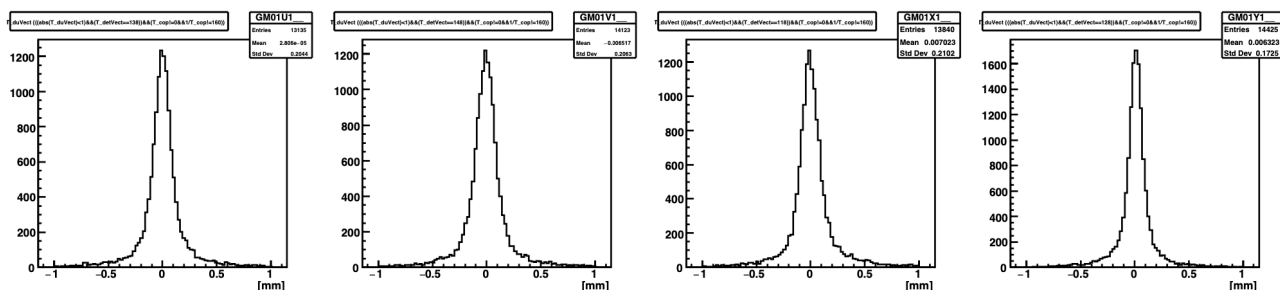


Рисунок 14 — Гистограммы невязки координаты для детектора GM01 после проведения процедуры выравнивания

В таблице ниже представлены средние значения абсцисс для данного детектора до и после выравнивания. По таблице можно отметить, что модули средних значений заметно уменьшились, что позволяет говорить о значительном сдвиге пика к нулевому значению координаты. Также следует отметить существенное увеличение симметрии гистограмм.

По оси абсцисс отложена невязка, рассчитанная по следующей формуле:

$$\Delta u = u_{hit} - u_{track} \quad , \quad (43)$$

где u_{hit} – координата прохождения частицы через детекторную плоскость: u_{track} – координата пересечения реконструированного трека с детекторной плоскостью. Соответственно, после проведения процедуры выравнивания координаты прохождения частицы и пересечения трека с плоскостью детектора стали существенно ближе по значению, что говорит об успешной процедуре выравнивания.

Таблица 2 — Среднее значение абсциссы до и после выравнивания

	U	V	Y	X
До выравнивания, мкм	-236	-239	17	533
После выравнивания, мкм	-0,03	-6	7	6

Кроме непосредственно геометрического выравнивания было проведено исследование процедуры геометрического выравнивания вдоль оси z путем искусственного введения ошибки вдоль координаты к используемым для процедуры детекторам. Искусственная ошибка принимала значение для всех детекторов одинаковое и равное 0,5 мм и 5 мм.

При добавлении к координатам детекторных плоскостей ошибку в 5 мм, процедура геометрического выравнивания не провела минимизацию χ^2 -критерия.

В случае добавки равной 0,5 мм была выполнена полноценная процедура геометрического выравнивания. Таким образом, на устранение такой ошибки понадобилось 3 итерации.

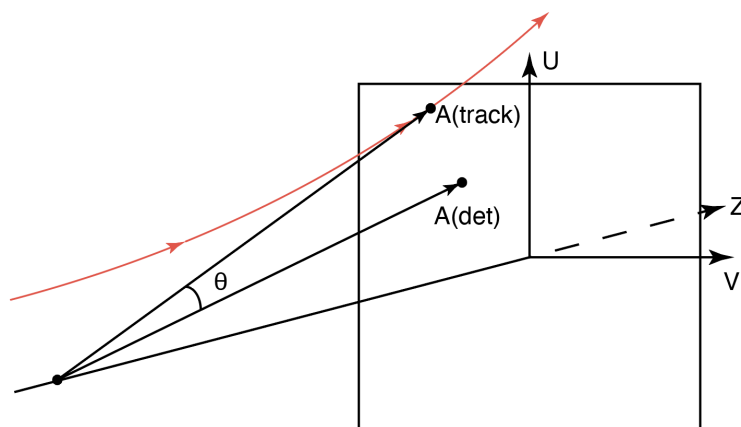


Рисунок 15 — Локальная система координат

Также с помощью программного обеспечения CERN ROOT [27] были построены графики зависимости изменения невязки координаты от угла θ (схема представлена на рисунке 15), представленные на рисунке 16.

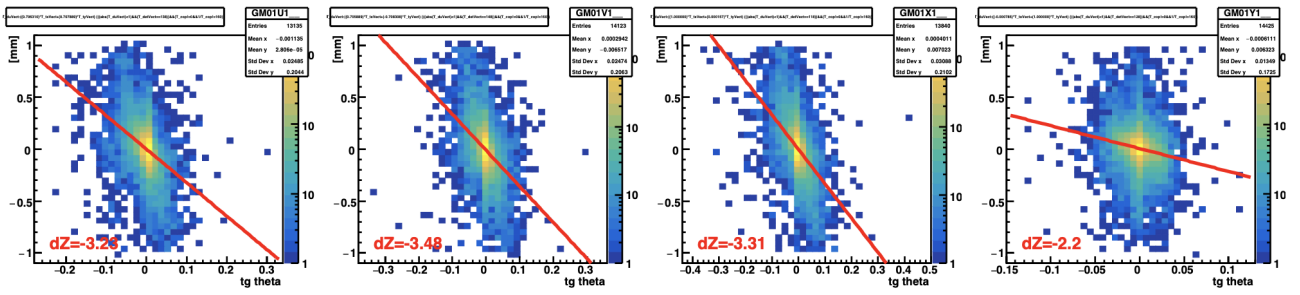


Рисунок 16 — Графики зависимости невязки координаты от угла θ

Диаграммы невязки координаты для других детекторов представлены в приложениях А и Б.

6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

6.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Геометрическое выравнивание детекторных плоскостей является одной из наиболее важных операций, предшествующих физическому эксперименту. Основной целью геометрического выравнивания является более точное определение координат чувствительных элементов в детекторных плоскостях. Наличие неточных значений координат чувствительных элементов поведет за собой неверные расчеты времени жизни частиц и вершин взаимодействия, что приведет к ошибочным выводам по итогам проведенного эксперимента.

6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Потребителями данной научно-исследовательской работы могут быть только участники эксперимента NA58 COMPASS, так как процедура выравнивания ведется по данным данного эксперимента для возможности дальнейшего его анализа. Адаптировать работу под промышленные задачи не представляется возможным.

6.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Для предварительной оценки научной работы был проведен детальный анализ различных методов геометрического выравнивания детекторных плоскостей. Такой анализ позволяет оценить сильные и слабые стороны конкурирующих методик, и, если это необходимо, внести своевременные коррективы в рассматриваемую методику для поддержания ее конкурентоспособности.

Анализ конкурентных технических решений проводился с использованием оценочной карты, приведенной в таблице 3. В этой таблице сравниваются критерии технической ресурсоэффективности и экономической эффективности различных методик калибровки. Численное значение каждого критерия выбирается

экспертным путем по пятибальной шкале, где 1 — наиболее низкое значение, а 5 — наиболее высокое. Значения весов критериев определяются экспертным путем так, чтобы их сумма равнялась 1. Значения критериев трудоемкости и технической сложности тем выше, чем проще конкретный метод в реализации.

1. B_{ϕ} — геометрическое выравнивание детекторных плоскостей по оси z;
2. B_{k1} — геометрическое выравнивание детекторных плоскостей по координатам u и v локальной системы координат;
3. B_{k2} — геометрическое выравнивание детекторных плоскостей по pitch.

Таблица 3 — Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Бф	Бк1	Бк2	Кф	Кк1	Кк2
Технические критерии							
1. Увеличение точности	0,4	4	4	3	1,6	1,6	1,2
2. Технологическая сложность	0,2	2	1	2	0,4	0,2	0,4
3. Трудоемкость	0,15	4	2	3	0,6	0,3	0,45
Экономические критерии оценки эффективности							
4. Финансирование научной разработки	0,15	1	3	5	0,15	0,45	0,75
5. Стоимость осуществления процедуры	0,1	3	4	1	0,3	0,4	0,1
Итого	1				3,05	2,95	2,9

По результатам проведенного анализа делаем вывод, что процедура геометрического выравнивания детекторных плоскостей по координате z превосходит конкурирующие процедуры.

6.1.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – комплексный анализ научно-исследовательского проекта, проводящийся в несколько этапов.

Результаты первого этапа SWOT-анализа, заключающегося в выявлении сильных и слабых сторон проекта, возможностей его развития и угроз, представлены в таблице 4.

Второй этап заключается в построении интерактивных матриц возможностей и угроз, позволяющих оценить эффективность проекта, а также надежность

Таблица 4 — Первый этап SWOT-анализа

Сильные стороны	Слабые стороны
1. Увеличение точности расчета треков частиц; 2. Процедура автоматизирована.	1. Необходимость в эксперименте; 2. Невозможность снизить погрешность координат до нуля.
Возможности	Угрозы
1. Проведение процедуры для различных координат; 2. Работа с помощью удаленного соединения с сервером.	1. В случае ошибки воспроизведения программы могут возникнуть неточности в выравнивании; 2. Неопределенность во времени выполнения процедуры.

его реализации, на основании матрицы SWOT. Соотношения параметров представлены в таблицах 5, 6, 7 и 8.

Таблица 5 — Интерактивная матрица проекта «Сильные стороны и возможности»

Сильные стороны			
Возможности		C1	C2
	B1	+	+
	B2	–	+

Таблица 6 — Интерактивная матрица проекта «Сильные стороны и угрозы»

Сильные стороны			
Угрозы		C1	C2
	У1	+	–
	У2	–	–

Таблица 7 — Интерактивная матрица проекта «Слабые стороны и возможности»

Сильные стороны			
Угрозы		Сл1	Сл2
	B1	+	+
	B2	+	–

Таблица 8 — Интерактивная матрица проекта «Слабые стороны и угрозы»

Сильные стороны			
Угрозы		Сл1	Сл2
	У1	–	+
	У2	–	+

Таким образом, в рамках третьего этапа должна быть составлена итоговая матрица SWOT-анализа (таблица 9).

В результате SWOT-анализа показана перспективность работы ввиду ее пользы для аналитических целей. Основной уязвимость проекта является потен-

Таблица 9 — Итоговая матрица SWOT-анализа

		Сильные стороны	Слабые стороны
		1. Увеличение точности расчета треков частиц; 2. Процедура автоматизирована.	1. Необходимость в эксперименте; 2. Невозможность снизить погрешность координат до нуля
Возможности	1. Проведение процедуры для различных координат; 2. Работа с помощью удаленного соединения с сервером.	Процедура выравнивания позволит максимально возможно снизить погрешность реконструкции треков, что позволит наиболее правильно интерпретировать данные. Так же при выполнении процедуры выравнивания у работника появляется мультизадачность (автоматизация процедуры) и отсутствие привязки к рабочему месту.	Так как процедура ведется на реальных данных, можно анализировать и изменять различные параметры детекторной системы.
Угрозы	1. В случае ошибки воспроизведения программы могут возникнуть неточности в выравнивании; 2. Неопределенность во времени выполнения процедуры.	Обнаружение неточностей в коде можно произвести с помощью сравнения данных реконструкции до выравнивания и после. Таким образом, появляется возможность в усовершенствовании и оптимизации процедуры.	В случае большого времени, необходимого на полную процедуру выравнивания, могут возникнуть вопросы о целесообразности ее проведения и оптимизации.

циальное возникновение ошибок программы из-за ее объема и сложности.

6.2 Планирование научно-исследовательских работ

6.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование призвано обеспечить рациональное использование времени и при формировании научно-исследовательской работы является, несомненно, важным этапом. Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования; – определение участников каждой работы;

- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться от 3 до 15 человек. В рамках данной работы была сформирована рабочая группа, в состав которой вошли: научный руководитель и студент-бакалавр. В данном разделе был составлен перечень этапов и работ по выполнению НИР, который представлен в таблице 10.

Таблица 10 — Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работы	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Научный руководитель, бакалавр
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Научный руководитель, бакалавр
	4	Разработка методики выполнения работ	Научный руководитель
	5	Составление календарного плана	Научный руководитель, бакалавр
Теоретическое исследование	6	Поиск литературы	Научный руководитель, бакалавр
	7	Изучение литературы	Бакалавр
Практическая часть	8	Внедрение изменений в код программного обеспечения для геометрического выравнивания по Z-координате	Бакалавр
	9	Проведение процедуры геометрического выравнивания	Бакалавр
Обобщение и оценка результатов	10	Проведение анализа полученных результатов, проверка влияния выравнивания вдоль Z на качество трековой реконструкции	Научный руководитель, бакалавр
Проведение ВКР			
Оформление комплекта документации по ВКР	11	Составление отчета	Бакалавр

6.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожи}$ используется следующая формула (44):

$$t_{0i} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (44)$$

где t_{0i} — ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.; t_{mini} — минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -й работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.; t_{maxi} — максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -й работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{pi} = \frac{t_i}{\mathcal{C}_i}, \quad (45)$$

где T_{pi} — продолжительность одной работы, раб.дн.; t_i — ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел. – дн; i — численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

6.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

В соответствии с календарным планом выполнения работ был построен ленточный график выполнения дипломной работы в форме диаграммы Ганта.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (46)$$

где T_{ki} — продолжительность выполнения i -и работы в календарных днях; T_{pi} — продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях; $k_{\text{кал}}$ — коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле (47):

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} \quad , \quad (47)$$

где $T_{\text{кал}}$ — количество календарных дней в году; $T_{\text{вых}}$ — количество выходных дней в году; $T_{\text{пр}}$ — количество праздничных дней в году.

Таким образом:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{Вых}} - T_{14}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48 \quad .$$

Таблица 11 — Временные показатели проведения научного исследования

№	Содержание работы	Исполнитель	tmin	tmax	тож	Ч	Тп	Тк
1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель	2	4	2,8	4	0,7	1,0
2	Выбор направления исследований	Научный руководитель, бакалавр	2	3	2,4	2	1,2	1,8
3	Подбор и изучение материалов по теме	Научный руководитель, бакалавр	5	10	7	2	3,5	5,2
4	Разработка методики выполнения работ	Научный руководитель	2	3	2,4	1	2,4	3,6
5	Составление календарного плана	Научный руководитель, бакалавр	1	2	1,4	2	0,7	1,0
6	Поиск литературы	Научный руководитель, бакалавр	4	6	4,8	2	2,4	3,6
7	Изучение литературы	Бакалавр	12	24	16,8	1	16,8	24,9
8	Внедрение изменений в код программного обеспечения	Бакалавр	1	5	2,6	1	2,6	3,8
9	Проведение процедуры геометрического выравнивания	Бакалавр	6	10	7,6	1	7,6	11,2
10	Проведение анализа полученных результатов	Научный руководитель, бакалавр	2	3	2,4	2	1,2	1,8
11	Составление отчета	Бакалавр	5	10	7	1	7	10,4

На основании полученных данных был построен план-график в виде диаграммы Ганта. График строился с разбивкой по месяцам и неделям (7 дней) за период времени дипломирования.

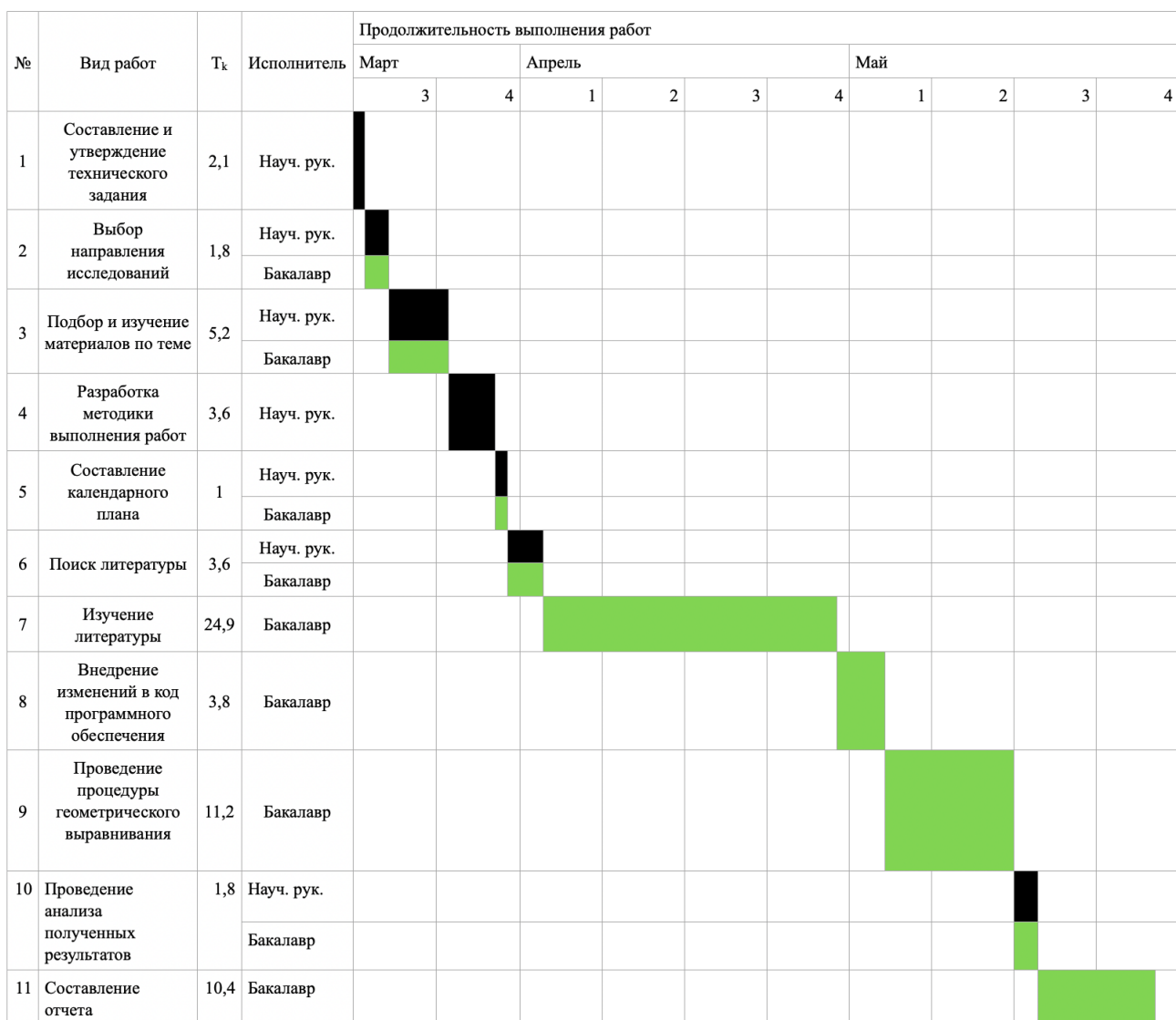


Рисунок 17 — Диаграмма Ганта

6.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

1. материальные затраты НТИ;
2. атраы на основное оборудование для научно-экспериментальных работ;
3. основная заработная плата исполнителям темы;

4. дополнительная заработная плата исполнителей темы;
5. отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
6. накладные расходы.

6.3.1 Расчет затрат на оборудование для научно-экспериментальных работ

Расчет затрат на оборудование сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения этой работы.

Норма амортизации вычисляется по следующей формуле:

$$N_a = \frac{1}{n}, \quad (48)$$

где n – срок полезного использования, измеряемый в годах.

Амортизация оборудования линейным способом рассчитывается следующим образом:

$$A = \frac{N_a \cdot N \cdot m}{12}, \quad (49)$$

где N – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

Единственным оборудованием, использованным в работе был ноутбук Apple macbook pro 13, приобретенный в марте 2017 года за 117990 рублей. Срок полезного использования ноутбука составляет 5 лет. В итоге общая сумма амортизационных отчислений составила:

$$A = \frac{0,2 \cdot 117990 \cdot 2,5}{12} \approx 5000 \text{ру.}$$

6.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии и доплаты) и дополнительную заработную плату.

Также включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20-30% от тарифа или оклада:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} , \quad (50)$$

где $Z_{осн}$ — основная заработная плата; $Z_{доп}$ — дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{осн}$).

Основная заработная плата руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p , \quad (51)$$

где T_p — продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (таблица 10); $Z_{дн}$ — среднедневная заработная плата работника, руб. Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z = \frac{Z_M \cdot M}{F_d} , \quad (52)$$

где Z_M — месячный должностной оклад работника, руб.; M — количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 24 раб.дня = 11, 2 месяца, 5-дневная неделя;
- при отпуске в 48 раб.дней = 10, 4 месяца, 6-дневная неделя;

F_d — действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн. (таблица 12).

В таблице 12 приведен баланс рабочего времени каждого работника НТИ. Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p , \quad (53)$$

где $Z_{тс}$ — заработная плата по тарифной ставке, руб.; $k_{пр}$ — премиальный коэффициент, равный 0,3; k_d — коэффициент доплат и надбавок составляет 0,2; k_p — районный коэффициент, для г. Томска равный 1,3.

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 13.

Таблица 12 — Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Бакалавр
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней выходные дни;	104	104
праздничные дни;	14	14
Потери рабочего времени отпуск;	24	24
невыходы по болезни;	7	7
Действительный годовой фонд рабочего времени	216	216

Таблица 13 — Расчет основной заработной платы

Категория	Зтс, руб.	кд	кпр	кр	Зм, руб.	Здн, руб.	Тр, раб. дн.	Зосн, руб.
Научный руководитель								
ППС3	22000	0,3	0,2	1,3	42900	2224,4	19,1	42486,9
Бакалавр								
ППС1	9000	0,3	0,2	1,3	17550	910	63,7	57967,0
Итого								100453,9

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} , \quad (54)$$

где $k_{\text{доп}}$ — коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,15).

Исполнитель	Зосн, руб.	Здоп, руб.	Ззп, руб.
Научный руководитель	42486,9	6373,035	48859,935
Бакалавр	57967	8695,05	66662,05
Итого	100453,9	15068,1	115522,0

6.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} , \quad (55)$$

где $k_{\text{внеб}}$ — коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 6.14.

Таблица 14 — отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Научный руководитель	42486,9	6373,035
Бакалавр	57967	8695,05
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,302	
Итого	34887,6	

6.3.4 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергия, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot (\text{сумма статей 1} - 4) \quad , \quad (56)$$

где $k_{\text{нр}}$ — коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 20%:

$$Z_{\text{накл}} = 0,2 \cdot (5000 + 100453,9 + 15068,1 + 34887,6) = 31081,9 \quad .$$

6.3.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основной для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведен в таблице 15.

Таблица 15 — Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	5000	Амортизационные отчисления
Затраты по основной заработной плате исполнителей	100453,9	Таблица 12
Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей	15068,1	Таблица 12
Отчисления во внебюджетные фонды	34887,6	Таблица 13
Накладные расходы	31081,9	20% от суммы первых четырех статей
Бюджет затрат НИИ	186491,5	Сумма всех статей

Как видно из таблицы 15, основные затраты НИИ приходятся на заработную плату исполнителей.

6.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсо-эффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп. } i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad , \quad (57)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп. } i}$ — интегральный финансовый показатель разработки; Φ_{pi} — стоимость i -го варианта исполнения; Φ_{max} — максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i b_i \quad , \quad (58)$$

где I_{pi} — интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки; a_i — весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки; b_i^a, b_i^p — балльная оценка i -го варианта исполнения разработки; устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания; n — число параметров сравнения. Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в форме таблице 16.

Таблица 16 — Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп. 2	Исп. 3
1. Трудоемкость реализации	0,4	4	3	1
2. Скорость проведения методики	0,4	3	1	5
3. Инструментальные особенности	0,2	3	3	1
ИТОГО		3,4	2,2	2,6

Сравнив значения интегральных показателей ресурсоэффективности можно сделать вывод, что реализация методики в текущем проекте является более эффективным вариантом для проектирования с позиции ресурсосбережения.

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{исп.i}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп.1}}{I_{финр.1}} I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп.2}}{I_{финр.2}} \text{ И Т.Д.} \quad (59)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см. таблицу 17) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{ср}$):

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}} \quad (60)$$

Вывод: сравнительный анализ интегральных показателей эффективности показывает, что предпочтительным для процедуры геометрического выравнивания

Таблица 17 — Сравнительная характеристика разработки

№	Показатели	Текущий проект	Исп. 2	Исп. 3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,94	0,94	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,4	2,2	2,6
3	Интегральный показатель эффективности	3,6	2,3	2,6
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,00	0,65	0,72

детекторных плоскостей является первый вариант исполнения, так как является наиболее экономичным и ресурсоэффективным.

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. В результате анализа конкурентных решений выяснили, что выбранная процедура выравнивания является наиболее эффективной.
2. В ходе планирования для научного руководителя, консультантов по социальной ответственности и экономической части и бакалавра был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определено следующее: общее число дней для выполнения работ составляет дней.
3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 186491,5 руб.

Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы:

1. Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,94.
2. Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИИР составляет 3,4, в то время как при других вариантах исполнения значения показателя составляют 2,8 и 3.
3. Значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 3,5 по сравнению с 2,3 и 2,6, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР является наиболее эффективным вариантом исполнения.

7 Социальная ответственность

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы проводилось геометрическое выравнивание детекторных плоскостей на эксперименте COMPASS (NA58). Основная часть работы выполнялась на ПК, находящемся в лабораторной аудитории № 248 11-го корпуса ТПУ.

Работа заключалась в программном выравнивании детекторных плоскостей, основанном на трековой реконструкции.

7.1 Оценка вредных и опасных факторов

В данном пункте приведен анализ всех вредных и опасных факторов, которые могут возникать при работе в лаборатории. Все вредные и опасные факторы, характерные для лабораторной среды представлены в таблице 18.

Таблица 18 — Возможные вредные и опасные факторы

Факторы (ГОСТ 12,0,003-2015 [5 ₀])	Нормативные документы
1. Микроклимат	ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях [28]
2. Шум	ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением N 1) [29]
3. Освещенность рабочей зоны	СНиП 23-05-95*. Естественное и искусственное освещение (с Изменением N 1) [30]
4. Пожароопасность	СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (в ред. изм. № 1, утв. приказом МЧС России от 09.12.2010 № 643) [31] ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования [32]
5. Электробезопасность	ГОСТ 12.1.009-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ) [33] ГОСТ Р12.1.019-2017 ССБТ Электробезопасность [34] ГОСТ Р МЭК 61140-2000 Защита от поражения электрическим током. Общие положения по безопасности, обеспечиваемой электрооборудованием и электроустановками в их взаимосвязи [35]
6. Радиационная безопасность	СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 [36]

7.1.1 Микроклимат

Основными факторами, характеризующими микроклимат производственной среды, являются: температура, подвижность и влажность воздуха. Отклонение этих параметров от нормы приводит к ухудшению самочувствия работника, снижению производительности его труда и к возникновению различных заболеваний.

Работа в условиях высокой температуры сопровождается интенсивным потоотделением, что приводит к обезвоживанию организма, потере минеральных солей и водорастворимых витаминов, серьезным изменениям в деятельности сердечно-сосудистой системы, увеличению частоты дыхания, а также оказывает влияние на функционирование других органов и систем (ослабление внимания, ухудшение координации движений, замедление реакции тела и т.д.).

Высокая относительная влажность при высокой температуре воздуха способствует перегреву организма, при низкой же температуре увеличивается теплоотдача с поверхности кожи, что ведет к переохлаждению организма. Низкая влажность вызывает неприятные ощущения в виде сухости слизистых оболочек дыхательных путей работающего.

При нормировании метеорологических условий в производственных помещениях учитывают время года, физическую тяжесть выполняемых работ, а также количество избыточного тепла в помещении. Оптимальные и допустимые метеорологические условия температуры и влажности устанавливаются согласно [28] и приведены в таблице 19.

Для удобства работы в помещении необходимо нормирование параметров микроклимата, то есть необходимо проведение мероприятий по контролю способов и средств защиты от высоких и низких температур, системы отопления, вентиляции и кондиционированию воздуха, искусственное освещение и т.п.

Таблица 19 — Оптимальные показатели микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, С	Температура поверхностей, С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia (до 139)	22-24	21-25	40-60	Не более 0,1
Теплый	Ia (до 139)	23-25	22-26	40-60	Не более 0,1

Необходима система центрального отопления, обеспечивающая заданный уровень температуры в зимний период по [37]. В зимний период в аудитории для поддержания необходимой температуры используется система водяного отопления. Эта система надежна в эксплуатации и обеспечивает возможность регулирования температуры в широких пределах. При устройстве системы вентиляции и кондиционирования воздуха в помещении лаборатории необходимо соблюдать определенные требования пожарной безопасности. В зимнее время в помещении необходимо предусмотреть систему отопления. Она должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление.

По защите исследователя от действия вредного фактора отклонения показателей микроклимата создаются микроклиматические условия отоплением, обменной вентиляцией и кондиционированием воздуха согласно [28] [37].

Для расчета кратности воздухообмена вентилятора в аудитории №248 11-го корпуса ТПУ объемом $V = S \cdot h = 121 \cdot 4 = 484 \text{ м}^3$, который будет обеспечивать циркуляцию воздушных масс в помещении, воспользуемся формулой:

$$W = V \cdot k \quad , \quad (61)$$

где k — нормированная кратность воздухообмена (для лаборатории $k = 3$). Подставляя данные в формулу (61) получим характеристику кратности воздухообмена вентилятора:

$$W = 484 \cdot 3 = 1452 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} \quad .$$

Таким образом, в аудиторию необходимо поставить вентилятор канальный Soler and Palau ILB/6-250 мощностью $1500 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$.

7.1.2 Шум

Превышение уровня шума. возникает при работе механических и электромеханических изделий. Для оценивания шумовой обстановки допускается использовать числовую характеристику, называемую уровнем звука (измеряется в дБ). В соответствии с [29] допустимый уровень шума при работе, требующей со-

средоточенности, работе с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами на рабочих местах в помещениях лабораторий с шумным оборудованием, составляет 75 дБ. Зоны с уровнем звука 80 дБ должны быть обозначены знаками безопасности согласно [38].

В лабораторной аудитории 248 основными источниками шума являются кондиционер, компьютеры (охлаждение внутри системного блока, оптические приводы DVD-ROM).

В соответствии со спецификацией на компьютер DNS Office XL, уровень шума блока питания компьютера составляет 5-10 дБ, уровень шума охлаждающего устройства процессора 15-20 дБ, остальные элементы охлаждения являются пассивными и их уровень шума не учитывается. Шум, вызываемый работой оптических приводов, также не учитывается, так как они используются в работе незначительно малое время.

В рассматриваемый лабораторной аудитории дополнительная звукоизоляция не требуется, так как предельное значение уровня шума не достигается.

Для профилактики возникновения вредных шумов следует регулярно осуществлять осмотр системных блоков компьютеров (очистка от пыли и смазывание движущихся частей охлаждающих установок, замена излишне шумных комплектующих).

Защита от повышенных уровней шума осуществляется методами его снижения в источнике образования и на пути распространения, устройством экранов и звукопоглощающих облицовок, средствами индивидуальной защиты согласно [29] [38].

7.1.3 Освещение

Недостаточная освещенность рабочей зоны также считается одним из факторов, влияющих на работоспособность человека. Для промышленных предприятий оптимальная освещенность территории и помещений является важной и непросто технической задачей, решение которой обеспечивает нормальные гигиенические условия для работающего персонала. Правильно подобранные источники

света и их проектирование создают условия для производственного труда, корректности выполнения технологических операций, соблюдения правил и техники безопасности.

Главной задачей светотехнических расчётов для искусственного освещения является определение требуемой мощности электрической осветительной установки для создания заданной освещённости.

Внутри помещений по способу размещения светильников и распределению освещения различают следующие системы искусственного освещения: общее и комбинированное.

Общим называется освещение, светильники которого освещают всю площадь помещения, как занятую оборудованием или рабочими местами, так и вспомогательную. В зависимости от расположения светильников различают равномерное и локализованное общее освещение. При общем равномерном освещении светильники располагаются в верхней зоне помещения равномерно, обеспечивая тем самым одинаковую освещённость всего помещения. Оно применяется, как правило, когда расположение рабочих зон при проектировании неизвестно либо при гибкой планировке. При общем локализованном освещении светильники размещают с учетом расположения технологического оборудования, создавая на отдельных поверхностях требуемый уровень освещения.

Комбинированная система освещения состоит из общего и местного освещения. Общее освещение предназначено для освещения проходов и участков, где работы не производятся, а также для выравнивания яркости в поле зрения работающих. Местное освещение обеспечивается светильниками, располагаемыми непосредственно на рабочих местах. Ему следует отдавать предпочтение, если в нескольких рабочих зонах помещения должны решаться различные зрительные задачи и поэтому для них требуются различные уровни освещённости. Оно также необходимо, когда рабочие места территориально отдалены друг от друга. При этом следует иметь в виду, что устройство только местного освещения недопустимо, так как оно создает большую разность освещённости рабочих поверхностей и окружающего пространства, что неблагоприятно сказывается на зрении.

При учете особенностей процесса работ на компьютере допускается применение системы общего равномерно освещения.

Для общего освещения применяются газоразрядные лампы: дневной (ЛД), холодно-белой (ЛХБ), тепло-белой (ЛТБ) и белой цветности (ЛБ). Определим необходимое количество источников света для полного освещения аудиторного помещения с рабочим компьютером люминесцентными потолочными светильниками.

Световой поток для люминесцентных ламп, мощностью 56 Вт:

$$F = Ra \cdot P \quad , \quad (62)$$

где $Ra = 80 \frac{\text{Лм}}{\text{Вт}}$ – минимальный индекс цветопередачи для люминесцентной лампы.

$$F = 80 \cdot 56 = 4480 \text{ Лм} \quad .$$

Необходимое число ламп для освещения лабораторной аудитории:

$$N = \frac{E \cdot S \cdot z \cdot k}{K \cdot F \cdot n} \quad , \quad (63)$$

где E — освещенность, Лк (при системе общего освещения $E = 300$ Лк); K — переходный коэффициент, 4,5; n — коэффициент использования светового потока осветительной установки, 45%; k — коэффициент запаса, 4,5; S — площадь освещаемого помещения, 121 м²; z — поправочный коэффициент, учитывающий неравномерность освещения, 0,9.

$$N = \frac{300 \cdot 121 \cdot 0,9 \cdot 4,5}{4,5 \cdot 4480 \cdot 0,45} = 16,2 \text{ шт} \quad .$$

Рассчитанное значение количества светильников округляем в большую сторону до целого числа. Получаем, что для надлежащего освещения аудитории необходимо 17 светильников.

Для защиты от недостаточной освещенности рабочей зоны естественное освещение по своему спектру является наиболее приемлемым, но не всегда его оказывается достаточно. Это связано во многом с режимом работы. Обычно рекомендуется применять общее и комбинированное освещение. Нормы освещенности рабочего места соответствуют [30].

7.1.4 Электромагнитные поля

Основным вредным фактором при использовании ЭВМ является электромагнитное излучение от составляющих частей компьютера. Нормы вредных допустимых уровней (ВДУ) электромагнитного излучения ЭВМ установлены в документе [35], которые показаны в таблице 20.

Распространение электромагнитного поля (ЭМП) происходит с помощью электромагнитных волн, которые в свою очередь излучают заряженные частицы, молекулы и атомы. Вред электромагнитного излучения официально доказан и подтвержден соответствующими исследованиями ученых, поэтому по мере возможности нужно ограничивать его влияние на организм человека.

Таблица 20 — Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемые ПЭВМ

Наименование параметров		Величина допустимого уровня
Напряженность электрического поля	В диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	В диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	В диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	В диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана монитора		500 В

Экран и системные блоки ЭВМ также производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна соответствовать [32].

Повышенный уровень электромагнитного излучения может негативно влиять на организм человека, а именно приводить к нервным расстройствам, нарушению сна, значительному ухудшению зрительной активности, ослаблению иммунной системы, расстройствам сердечно-сосудистой системы. Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

В указанной лаборатории излучение соответствует нормам [35] [32].

7.1.5 Взрывопожаробезопасность

В зависимости от характеристик веществ и материалов, находящихся в помещении, по взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г и Д в соответствии с [39]. Рассматриваемое помещение относится к категории В, так как в нем содержатся твердые горючие вещества в холодном состоянии. Возможные причины возгорания:

1. работа с открытой электроаппаратурой;
2. короткие замыкания в блоках питания;
3. несоблюдение правил пожарной безопасности.

В целях снижения риска возникновения пожара и минимизации возможного ущерба производятся профилактические мероприятия, которые подразделяются на организационно-технические, эксплуатационные и режимные. Организационно-технические мероприятия заключаются в проведении регулярных инструктажей сотрудников ответственным за пожарную безопасность, обучении сотрудников надлежащей эксплуатации оборудования и необходимым действиям в случае возникновения пожара, паспортизацию веществ, материалов и изделий в части обеспечения пожарной безопасности, изготовление и применение средств наглядной агитации по обеспечению пожарной безопасности [40]. К эксплуатационным мероприятиям относят профилактические осмотры оборудования. Мероприятия режимного характера включают установление правил организации работ и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

1. содержание помещений в соответствии с требованиями пожарной безопасности;
2. надлежащая эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электропитания, контроль нагрева оборудования);
3. обучение производственного персонала правилам пожарной безопасности;
4. наличие, правильное размещение и использование средств пожаротушения.

В помещении с электрооборудованием, во избежание поражения электрическим током, целесообразно использовать углекислотные или порошковые огнетушители. Данные огнетушители предназначены для тушения загораний различных веществ и материалов, электроустановок под напряжением до 1000 В, горючих жидкостей. Химические и пенные огнетушители не допустимы. Огнетушители следует располагать на защищаемом объекте в соответствии с требованиями таким образом, чтобы они были защищены от воздействия прямых солнечных лучей, тепловых потоков, механических воздействий и других неблагоприятных факторов (вибрация, агрессивная среда, повышенная влажность и т. д.). Они должны быть хорошо видны и легкодоступны в случае пожара. Предпочтительно размещать огнетушители вблизи мест наиболее вероятного возникновения пожара, вдоль путей прохода, а также около выхода из помещения. Огнетушители не должны препятствовать эвакуации людей во время пожара. Согласно требованиям пожарной безопасности [32], на этаже находится 2 огнетушителя ОПЗ огнетушители переносные порошковые, лестничные пролеты оборудованы гидрантами, имеется кнопка пожарной сигнализации.

7.1.6 Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электродуги, электромагнитного поля и статического электричества согласно [33]. Электрический ток, проходя через тело человека, производит тепловое, химическое и биологическое воздействие, тем самым нарушая нормальную жизнедеятельность. Работники, принимаемые для выполнения работ в электроустановках, должны иметь профессиональную подготовку, соответствующую характеру работы.

Поражение электрическим током возникает при соприкосновении с электрической цепью, в которой присутствуют источники напряжения и/или источники тока, способные вызвать протекание тока по попавшей под напряжение части тела. Обычно чувствительным для человека является пропускание тока силой более 1 мА. Кроме того, на установках высокого напряжения возможен удар электриче-

ским током без прикосновения к токоведущим элементам, в результате утечки тока или пробоя воздушного промежутка с образованием электродуги.

В рамках текущей работы не производились контакты с открытыми источниками электрического тока. Ток, протекающий в компьютерной периферии (компьютерная мышь, клавиатура), не представляет существенной опасности для здоровья человека. Согласно классификации, данная лаборатория подходит под помещения 1 класса, в котором рабочие напряжения не превышают 1 000 В [33] [34].

7.1.7 Радиационная безопасность

Повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне. К опасным и вредным производственным факторам, связанным с повышенным уровнем ионизирующих излучений, относят следующие виды излучений [36]:

1. коротковолновое электромагнитное излучение (потoki фотонов высоких энергий) - рентгеновское излучением и гамма-излучение;
2. потоки частиц:
 - бета-частиц (электронов и позитронов);
 - альфа частиц;
 - нейтронов;
 - протонов, других ионов, мюонов и др.;
 - осколков деления (тяжелый ионов, возникающих при делении ядер);
3. излучение, вызванное радиоактивным загрязнением (выше природного фона), в том числе загрязнением техногенными радионуклидами:
 - радиоактивное загрязнение воздуха рабочей зоны (из-за наличия радиоактивных газов радона, торона, актинона, продуктов их радиоактивного распада, аэрозолей, содержащих радионуклиды);
 - радиоактивное загрязнение поверхностей и материалов производственной среды, включая средства защиты работающих и их кожные покровы.

В результате воздействия ионизирующих излучений на организм человека нарушается нормальное течение биохимических процессов и обмен веществ. В зависимости от величины поглощенной дозы излучения и от индивидуальных особенностей организма. Вызванные изменения могут быть обратимыми или необратимыми. Любой вид ионизирующего излучения вызывает биологические изменения в организме как при внешнем облучении, когда источник облучения находится вне организма, так и при внутреннем облучении, когда радиоактивные вещества попадают внутрь организма.

В ходе выполнения научного исследования, предполагающего теоретические расчеты с использованием суперкомпьютера и не более, работы с источниками ионизирующего излучения не осуществлялись [36].

Чрезвычайные ситуации

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей [32]. Есть два вида чрезвычайных ситуаций:

- техногенная;
- природная.

К техногенным ЧС можно отнести пожары, взрывы, диверсии, выбросы ядовитых веществ. К природным ЧС относятся природные катаклизмы. Наиболее вероятной техногенной ЧС являются пожары. К опасным не контролируемым источникам энергии относятся: движущийся предмет, неуправляемое движение или энергия.

Рассмотрим возможные аварийные ситуации в аудиторной лаборатории № 248 учебного корпуса № 11 ТПУ, а именно:

1. возникновение пожара;
2. удар электрическим током;
3. падение с высоты собственного роста;

4. падение с лестницы.

Мероприятия по предотвращению и ликвидации вышеуказанных чрезвычайных ситуаций представлены в таблице 21.

В данном разделе рассмотрены потенциальные чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть при работе в лабораторной аудитории № 248 учебного корпуса № 11. Рассмотрены мероприятия по предотвращению и ликвидации последствий этих ситуаций, согласно [516].

Таблица 21 — чрезвычайные ситуации

№	Чрезвычайная ситуация	Мероприятия по предотвращению	Мероприятия по ликвидации последствий чрезвычайной ситуации
1	Травмирование в результате падения с высоты собственного роста	<ol style="list-style-type: none"> 1. Содержание помещения в надлежащем порядке. 2. Ограничение рабочего пространства. 3. Своевременное проведение инструктажа. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Осмотреть или опросить пострадавшего; 2. Если необходимо – вызвать скорую помощь; (тел. 103 или 112) 3. Остановить кровотечение, если оно имеется; 4. Если есть подозрение, что у пострадавшего сломан позвоночник (резкая боль в позвоночнике при малейшем движении), необходимо обеспечить пострадавшему полный покой в положении лежа на спине до оказания квалифицированной медицинской помощи.
2	Травмирование в результате падения с лестницы	<ol style="list-style-type: none"> 1. Установка поручней на лестницу. 2. Покрытие ступенек лестницы антискользящим покрытием. 3. Своевременное проведение инструктажа. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вызвать скорую помощь; (тел. 103 или 112) 2. Остановить кровотечение, если оно имеется; 3. Если есть подозрение, что у пострадавшего сломан позвоночник (резкая боль в позвоночнике при малейшем движении), необходимо обеспечить пострадавшему полный покой в положении лежа на спине до оказания квалифицированной медицинской помощи.
3	Травмирование в результате удара электрическим током	<ol style="list-style-type: none"> 1. Заземление всех электроустановок. 2. Ограничение рабочего пространства. 3. Обеспечение недоступности токоведущих частей аппаратуры. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Быстро освободить пострадавшего от действия электрического тока [32]; 2. Вызвать скорую помощь; (тел. 103 или 112) 3. Если пострадавший потерял сознание, но дыхание сохранилось, его следует удобно уложить, расстегнуть стесняющую одежду, создать приток свежего воздуха и обеспечить полный покой; 4. Пострадавшему надо дать понюхать нашатырный спирт, сбрызнуть лицо водой, растереть и согреть тело; 5. При отсутствии дыхания нужно немедленно делать искусственное дыхание и массаж сердца.
4	Пожар	<ol style="list-style-type: none"> 1. Своевременное проведение инструктажа. 2. Установление средств автоматического пожаротушения в помещениях. 3. Установка датчиков дыма и огня. 4. Обеспечение путей эвакуации и поддержание их в надлежащем состоянии. 5. Контроль работы электроприборов. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обесточить помещение, прекратить поступление воздуха; 2. Немедленно сообщить о пожаре дежурному или на пост охраны; вызвать противопожарную службу; (тел. 101 или 112) 3. По возможности принять меры по эвакуации людей, тушению пожара и спасению материальных ценностей.

7.2 Выводы по главе

В главе рассмотрены вредные и опасные факторы:

- микроклимат [28][37];
- шум [29][38];
- освещенность [30];
- пожаровзрывоопасность [41][39] [32];
- электробезопасность [33] [34];
- электромагнитное излучение [35];
- радиационная безопасность [36];

причины возникновения и средства защиты, рассмотрены чрезвычайные и аварийные ситуации, меры их предупреждения, меры ликвидации их последствий. Отдельно были рассмотрена радиационная безопасность работы и потенциальная опасность со стороны электромагнитного излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе обоснована необходимость проведения процедуры выравнивания перед анализом экспериментальных данных.

Были внесены изменения в код процедуры для возможности проведения выравнивания вдоль оси z . Именно проводилось обновление опций в коде.

В программном обеспечении CORAL была проведена процедура геометрического выравнивания по осям u , v и z . После проведения процедуры внесены поправки в геометрию детекторов.

Была реализована проверка результатов процедуры выравнивания методом гистограмм невязки координаты, используя программный фреймворк для анализа данных CERN ROOT [27].

Путем внесения искусственных ошибок в файл геометрии детекторов было проведено исследование работоспособности процедуры выравнивания вдоль z . По результатам проведения была выявлена необходимость в поиске возможных невязок по оси z вспомогательными средствами.

Все задачи, поставленные на период преддипломной практики выполнены. Цель достигнута в полном объеме.

Список литературы

1. Higgs Peter W. Nobel lecture: evading the Goldstone theorem // *Reviews of Modern Physics*. — 2014. — Vol. 86, no. 3. — P. 851.
2. Englert François. Nobel Lecture: The BEH mechanism and its scalar boson // *Reviews of Modern Physics*. — 2014. — Vol. 86, no. 3. — P. 843.
3. What is the Universe Made Of? — Access mode: <https://wmap.gsfc.nasa.gov/universe/unimatter.html>.
4. Rutherford Ernest. LXXIX. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom // *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. — 1911. — Vol. 21, no. 125. — P. 669–688.
5. Coward D. H. et al. ELECTRON - PROTON ELASTIC SCATTERING AT HIGH MOMENTUM TRANSFERS // *Phys. Rev. Lett.* — 1968. — Vol. 20. — P. 292–295.
6. Matoušek Jan. Studies of Drell-Yan process at Compass experiment. — 2013.
7. Peskin Michael. An introduction to quantum field theory. — CRC press, 2018.
8. Sakurai Jun John, Commins Eugene D. Modern quantum mechanics, revised edition. — 1995.
9. Chyla J. From Hermann Weyl to Yang and Mills to Quantum Chromodynamics // *Nuclear Physics A*. — 2005. — Vol. 749. — P. 23–32.
10. Bjorken James D. Asymptotic sum rules at infinite momentum // *Physical Review*. — 1969. — Vol. 179, no. 5. — P. 1547.
11. Pešek Michael. Low temperature proton polarized target for nucleon structure studies at COMPASS. — 2012.
12. Williams WSC. Nuclear Instability // *Nuclear and Particle Physics*; Oxford University Press: Oxford, UK. — 1991. — P. 66–80.
13. Devenish Robin, Cooper-Sarkar Amanda. Deep inelastic scattering. — OUP Oxford, 2011.

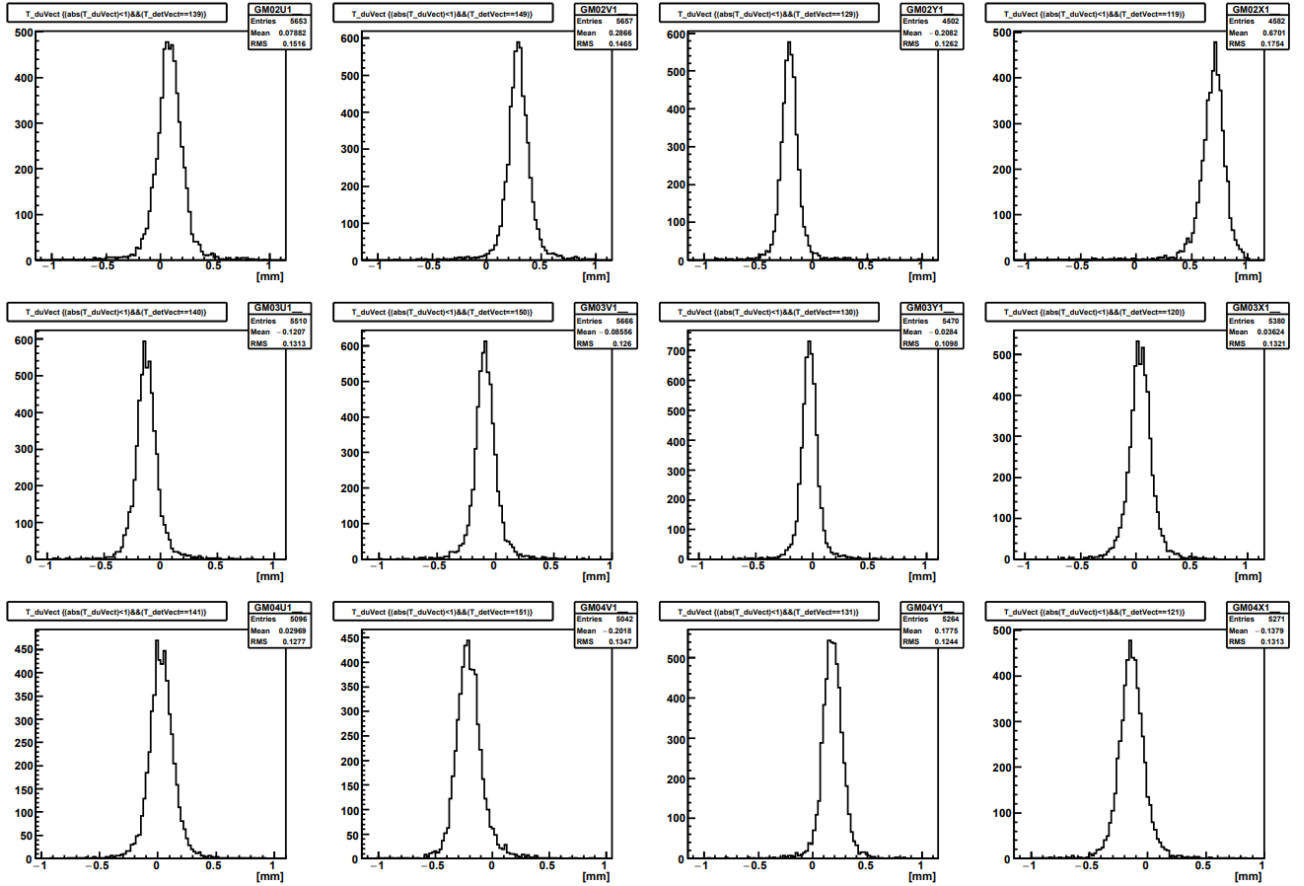
14. Collaboration NMC. M. Arneodo et al // Nucl. Phys. B. — 1997. — Vol. 483, no. 3. — P. 296.
15. Drell Sidney D, Yan Tung-Mow. Massive lepton-pair production in hadron-hadron collisions at high energies // Physical Review Letters. — 1970. — Vol. 25, no. 5. — P. 316.
16. Brodsky Stanley J, Hwang Dae Sung, Schmidt Ivan. Initial-state interactions and single-spin asymmetries in Drell–Yan processes // Nuclear Physics B. — 2002. — Vol. 642, no. 1-2. — P. 344–356.
17. Arnold S, Metz Andreas, Schlegel Marc. Dilepton production from polarized hadron hadron collisions // Physical Review D. — 2009. — Vol. 79, no. 3. — P. 034005.
18. Quaresma Marcia. Transverse Momentum Dependent Parton Distribution Functions through SIDIS and Drell-Yan at COMPASS : Ph. D. thesis / Marcia Quaresma ; Lisbon, IST. — 2016.
19. Compass-ii proposal : Rep. ; Executor: F Gautheron, W Eyrich, V Konstantinov et al. : 2010.
20. The COMPASS experiment at CERN / Ph Abbon, E Albrecht, V Yu Alexakhin et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2007. — Vol. 577, no. 3. — P. 455–518.
21. Pešková Markéta. Study of azimuthal asymmetries in COMPASS Drell-Yan data. — 2017.
22. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ СОБЫТИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ COMPASS / ВЮ Алексахин, Я Бедферб, СГ Герасимов, АЮ Корзенев.
23. Frühwirth Rudolf. Application of Kalman filtering to track and vertex fitting // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1987. — Vol. 262, no. 2-3. — P. 444–450.
24. COMPASS spectrometer alignment : Rep. / COMPASS Note 2003-4 ; Executor: Hugo Pereira, Jean-Marc Le Goff : 2003.

25. Alison John. The road to discovery: Detector alignment, electron identification, particle misidentification, ww physics, and the discovery of the Higgs Boson. — University of Pennsylvania, 2012.
26. Klimaszewski Konrad. Determination of gluon polarisation in the nucleon from events with high-pT hadron pairs in COMPASS experiment // Soltan Institute for Nuclear Studies, Warsaw. — 2010.
27. CERN ROOT – пакет объектно-ориентированных библиотек для обработки данных физики высоких энергий. — Access mode: <https://root.cern.ch/>.
28. ГОСТ 30494-96 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.
29. ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением N 1).
30. СНиП 23-05-95* Естественное и искусственное освещение (с Изменением N 1).
31. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (в ред. изм. № 1, утв. приказом МЧС России от 09.12.2010 № 643).
32. ГОСТ Р 22.0.02-2016 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения.
33. ГОСТ 12.1.009-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Термины и определения.
34. ГОСТ Р 12.1.019-2017 ССБТ Электробезопасность.
35. ГОСТ 12.1.006-84 Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля.
36. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009.
37. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
38. ГОСТ 12.1.029-80 Средства и методы защиты от шума.

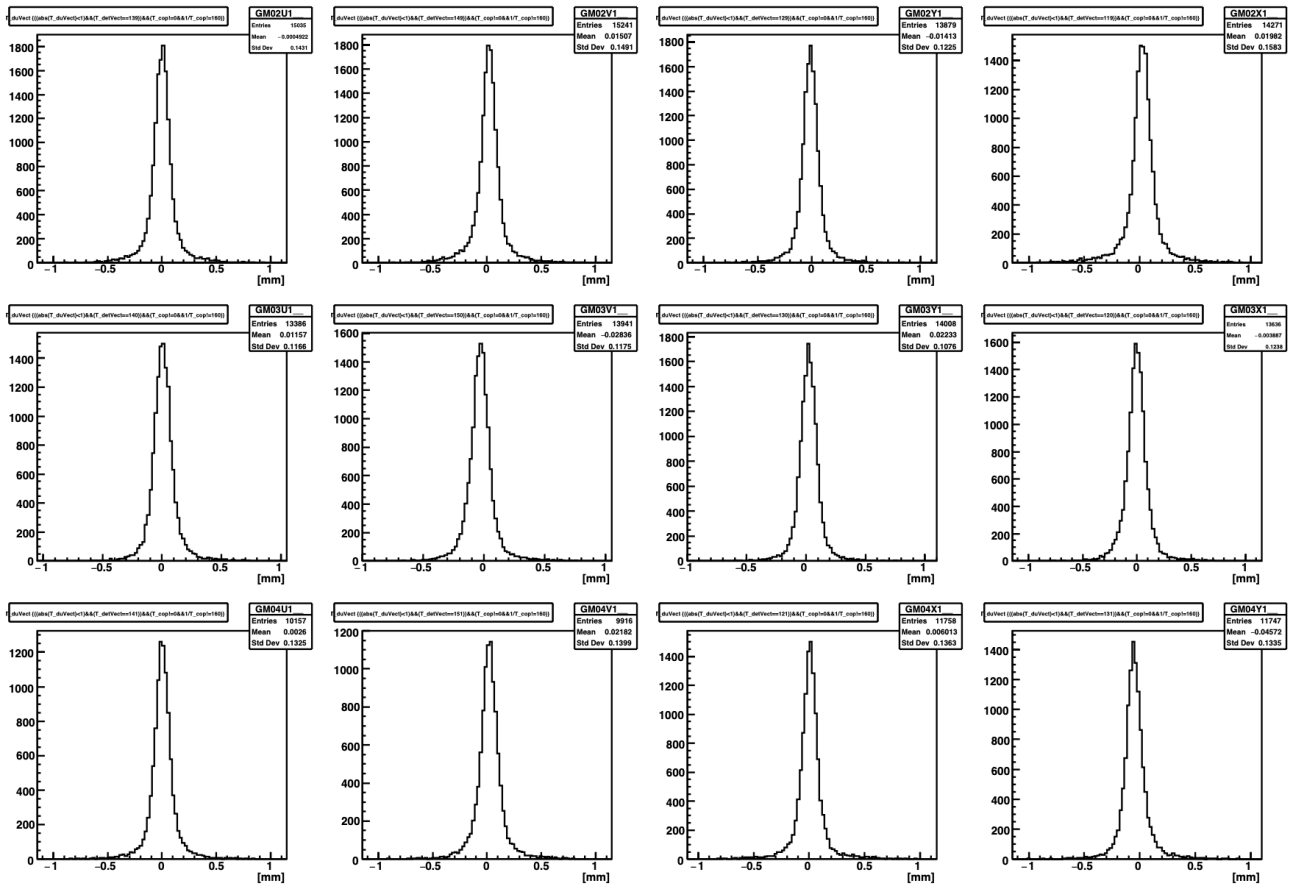
39. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 О введении в действие санитарно-эпидемиологических правил и нормативов.
40. ГОСТ 12.4.026-76* Система стандартов безопасности труда. Цвета сигнальные и знаки безопасности.
41. ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования.

Приложение А

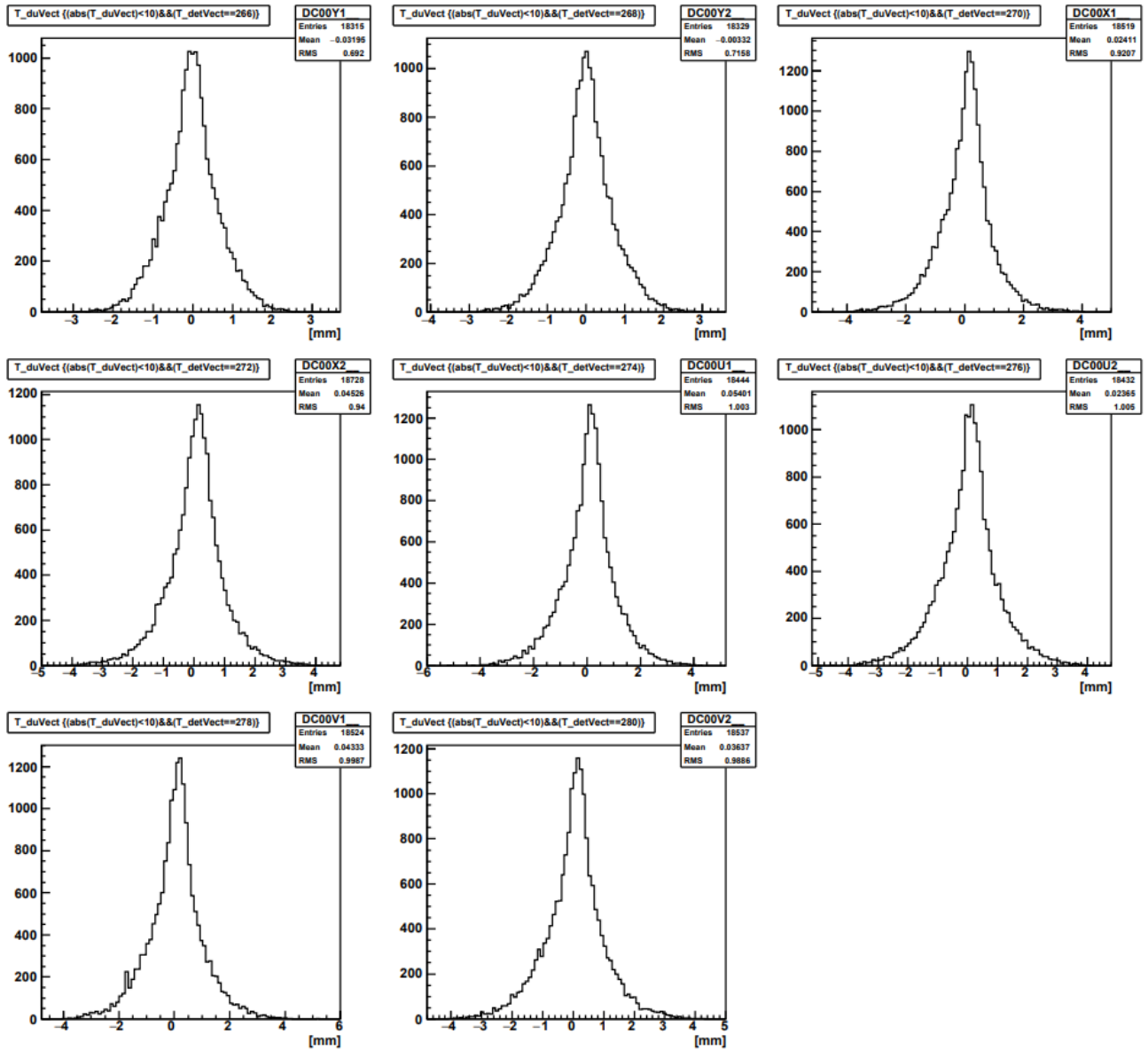
Диаграммы невязки координаты для детекторов GM02, GM03, GM04 до проведения процедуры геометрического выравнивания.



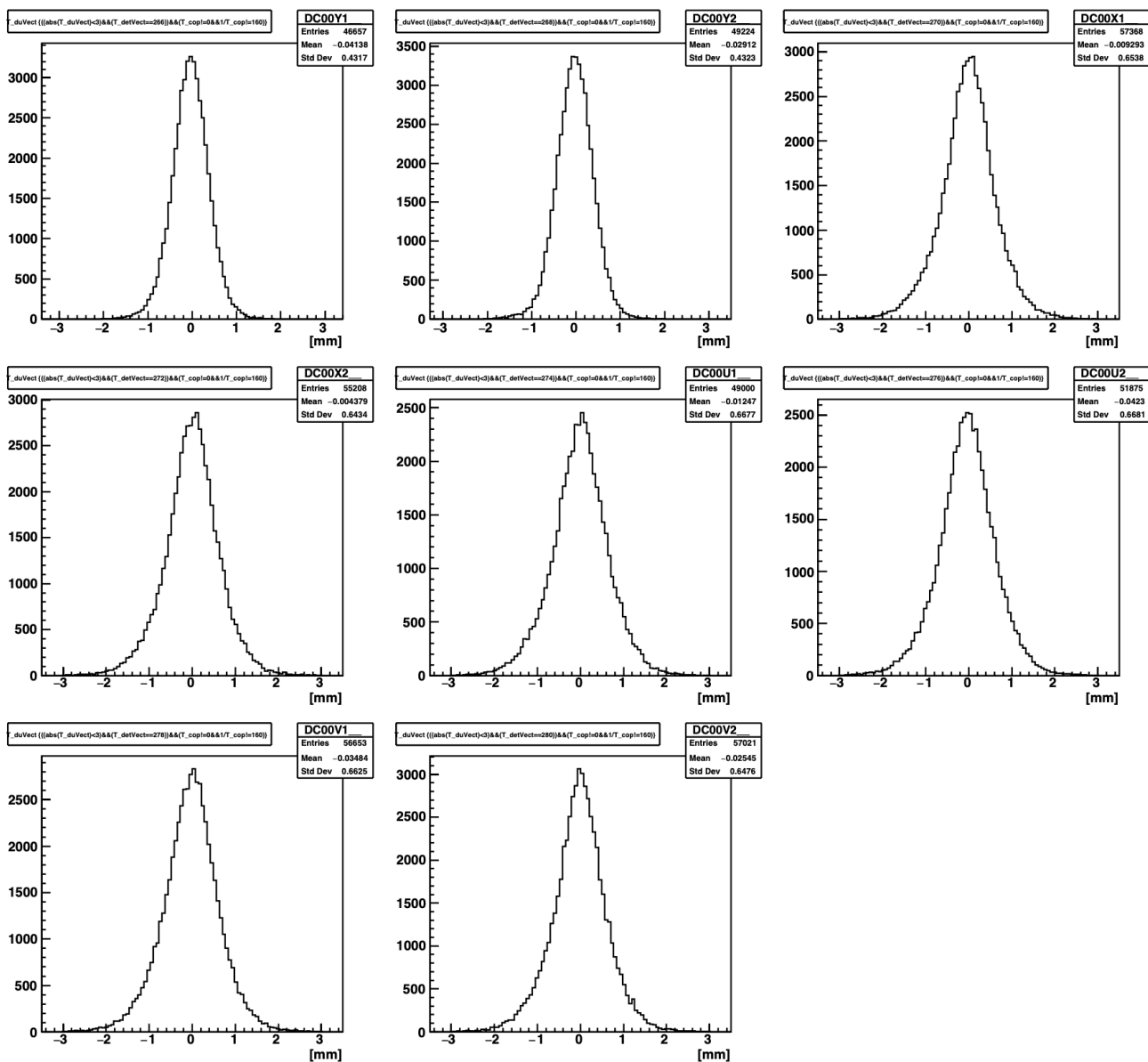
Диаграммы невязки координаты для детекторов GM02, GM03, GM04 после проведения процедуры геометрического выравнивания.



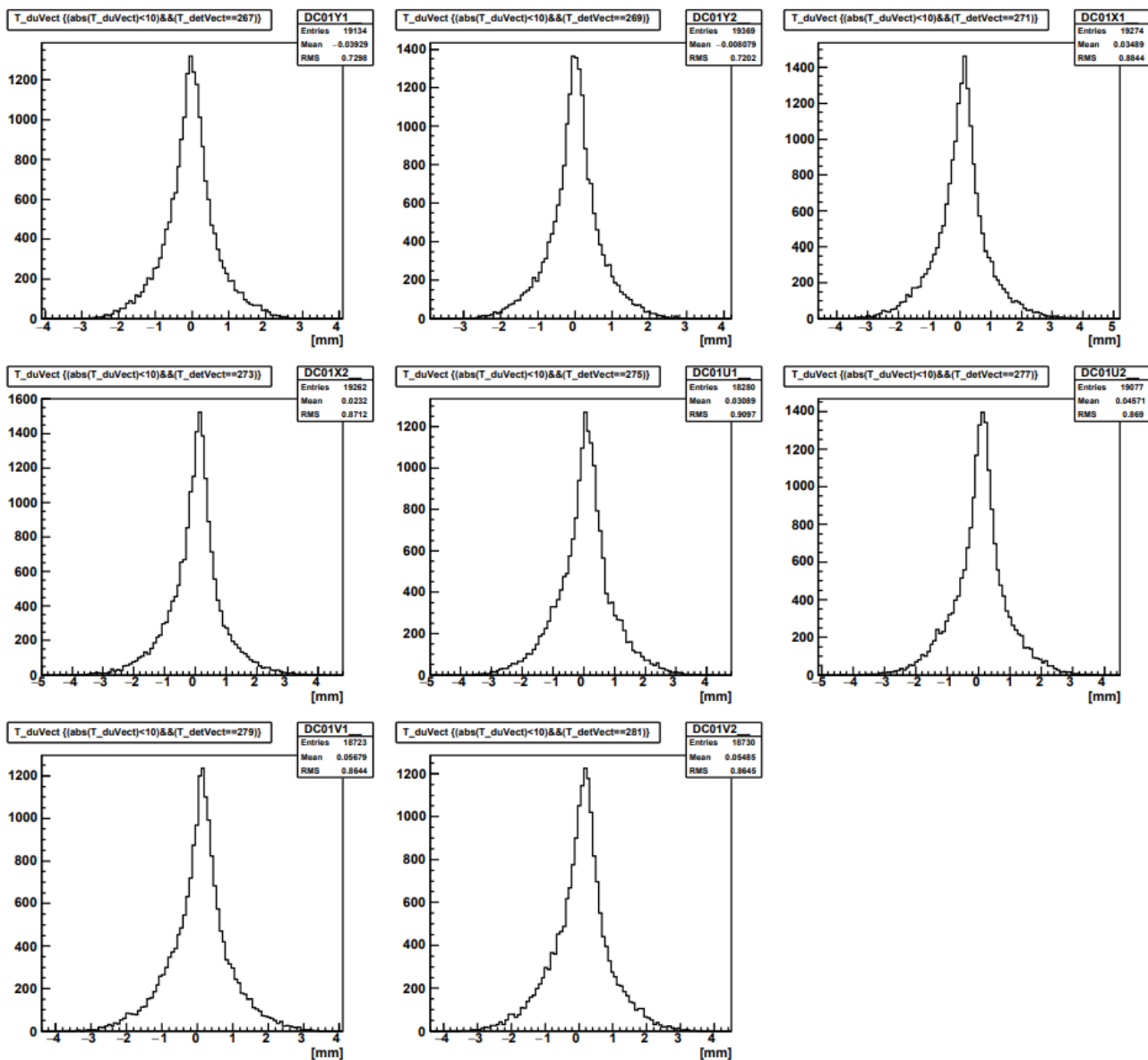
Диаграммы невязки координаты для детекторов DC00 до проведения процедуры геометрического выравнивания.



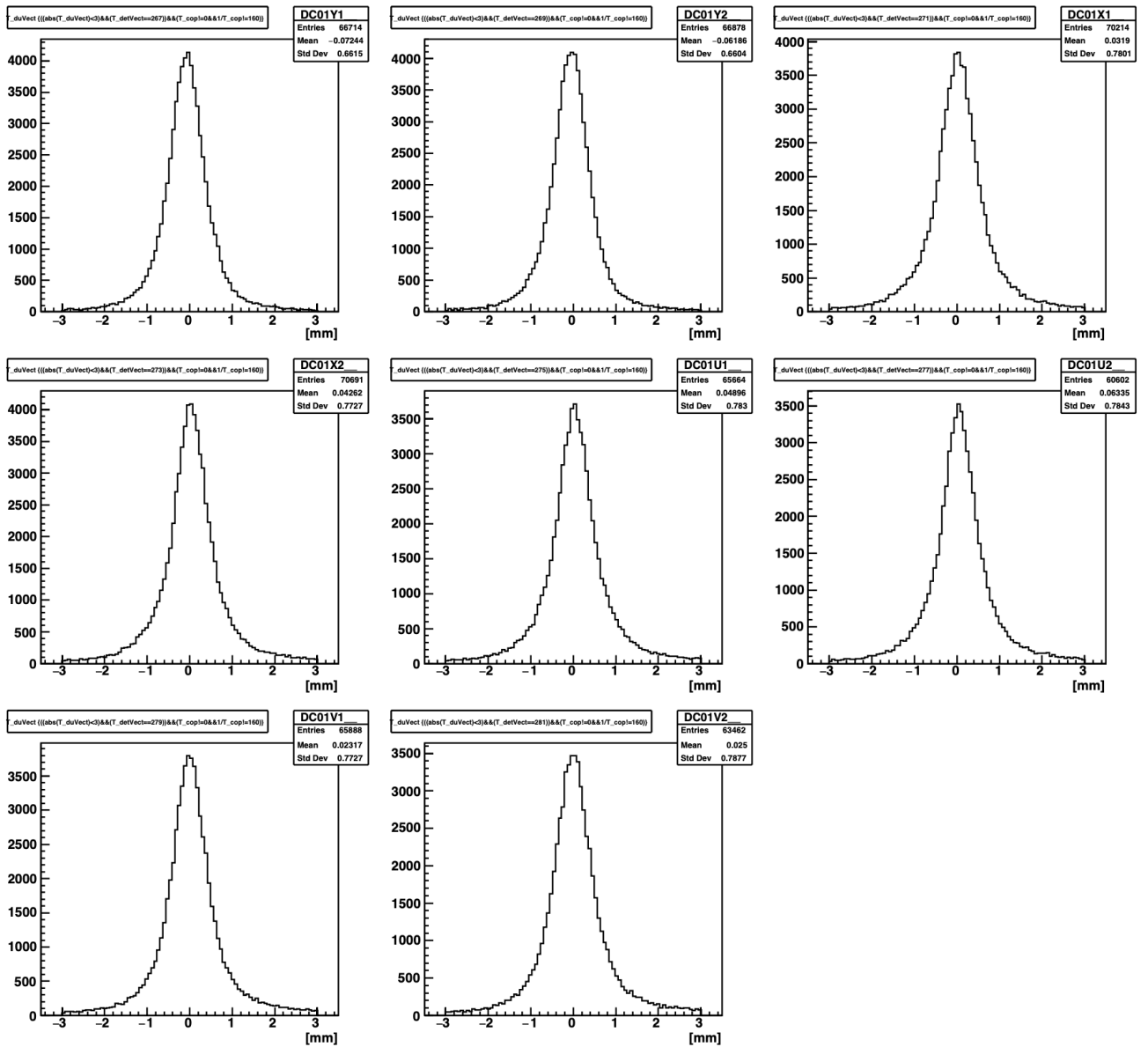
Диаграммы невязки координаты для детекторов DC00 после проведения процедуры геометрического выравнивания.



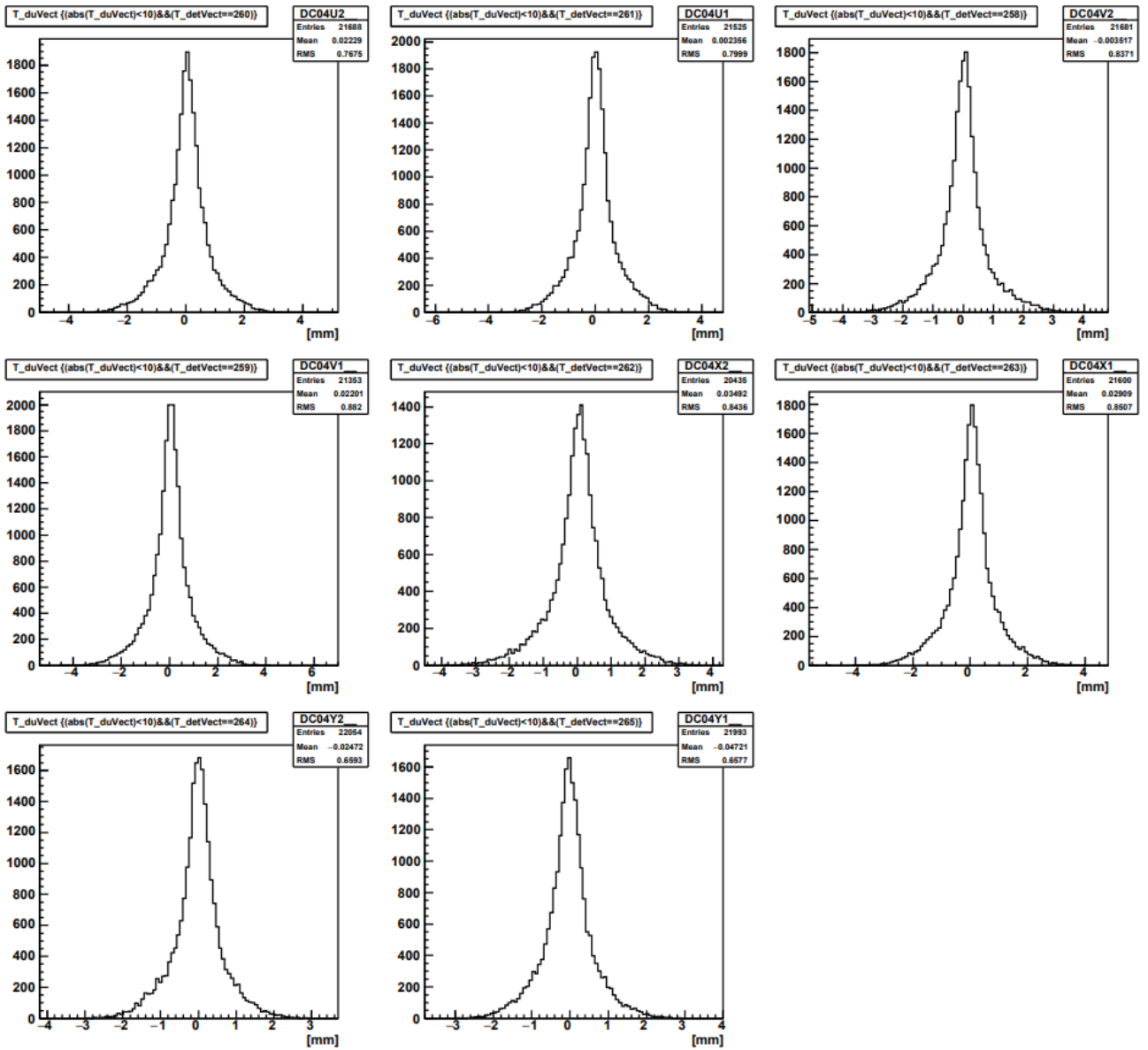
Диаграммы невязки координаты для детекторов DC01 до проведения процедуры геометрического выравнивания.



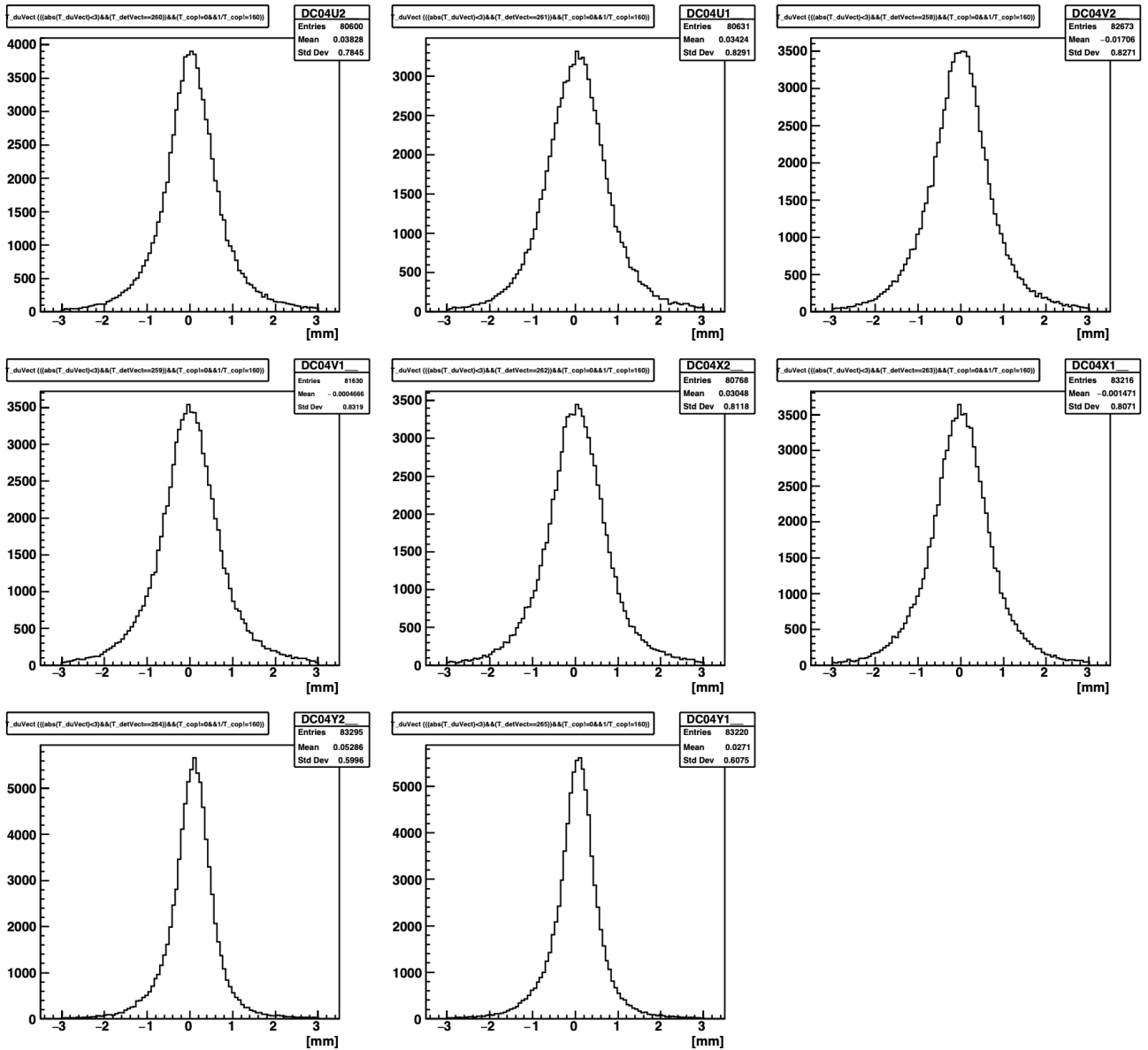
Диаграммы невязки координаты для детекторов DC01 после проведения процедуры геометрического выравнивания.



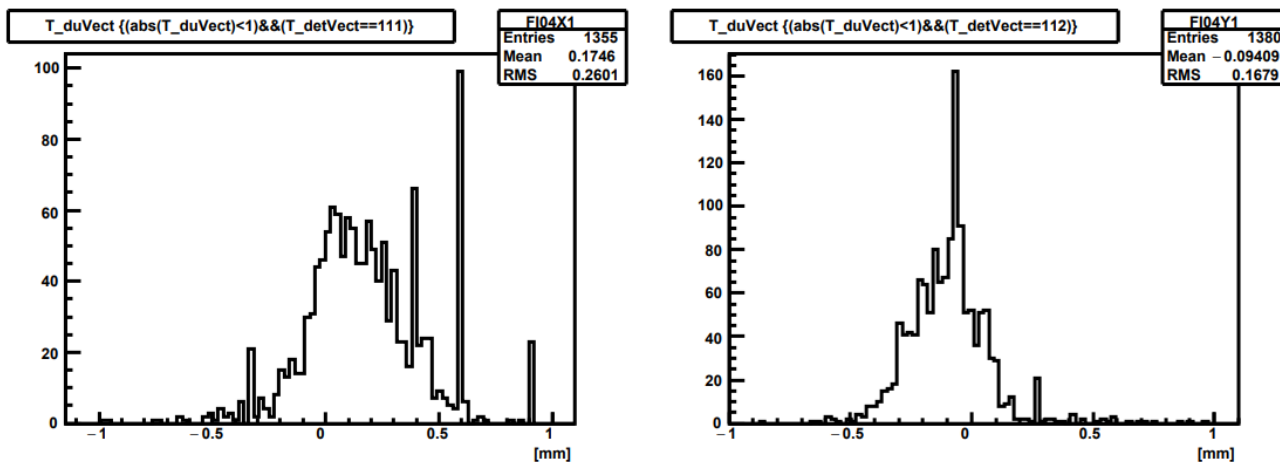
Диаграммы невязки координаты для детекторов DC04 до проведения процедуры геометрического выравнивания.



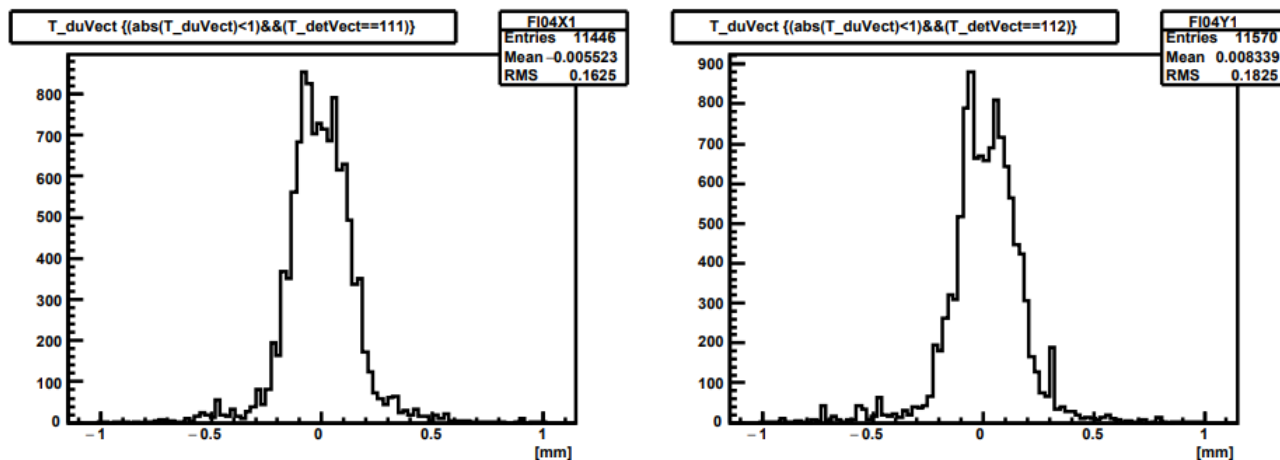
Диаграммы невязки координаты для детекторов DC04 после проведения процедуры геометрического выравнивания.



Диаграммы невязки координаты для детекторов F104 до проведения процедуры геометрического выравнивания.

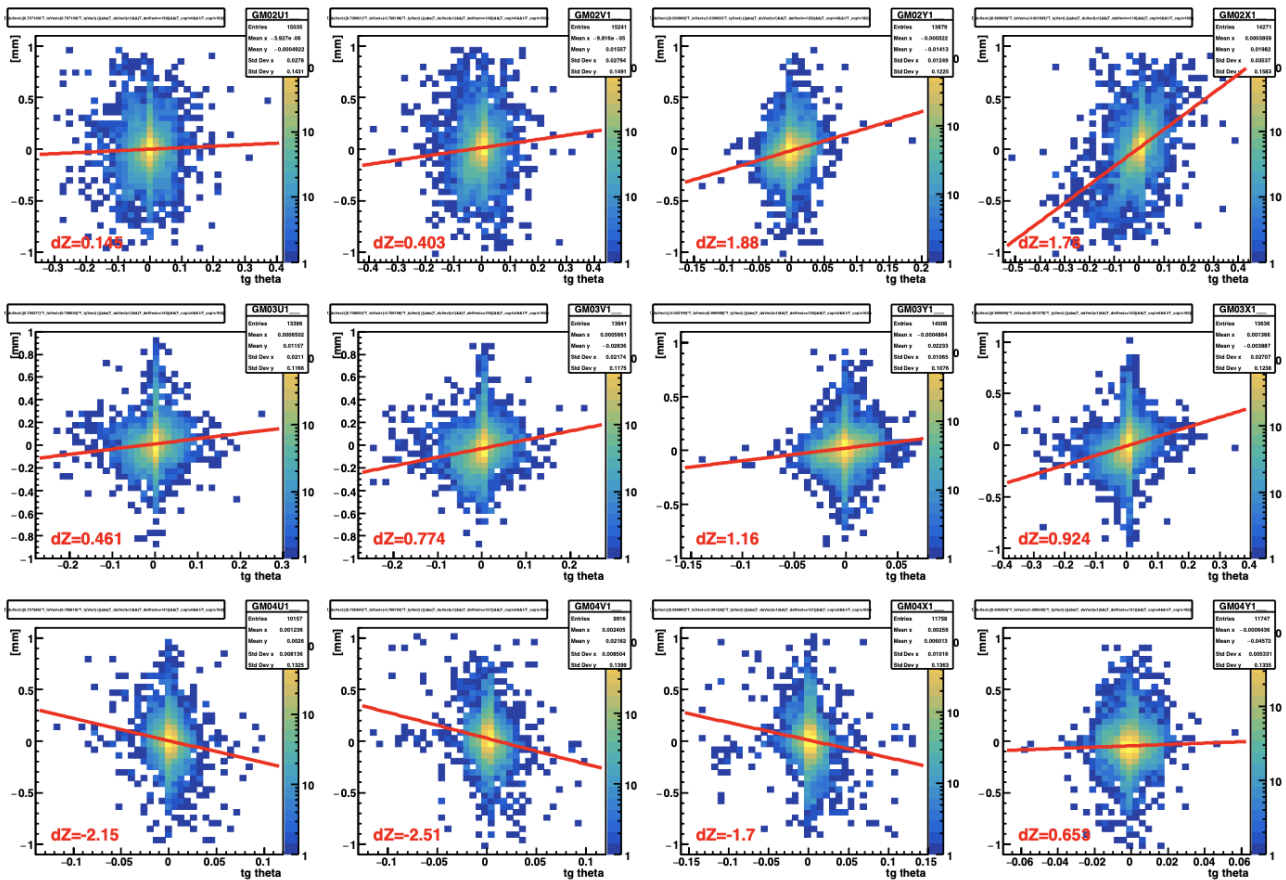


Диаграммы невязки координаты для детекторов F104 после проведения процедуры геометрического выравнивания.

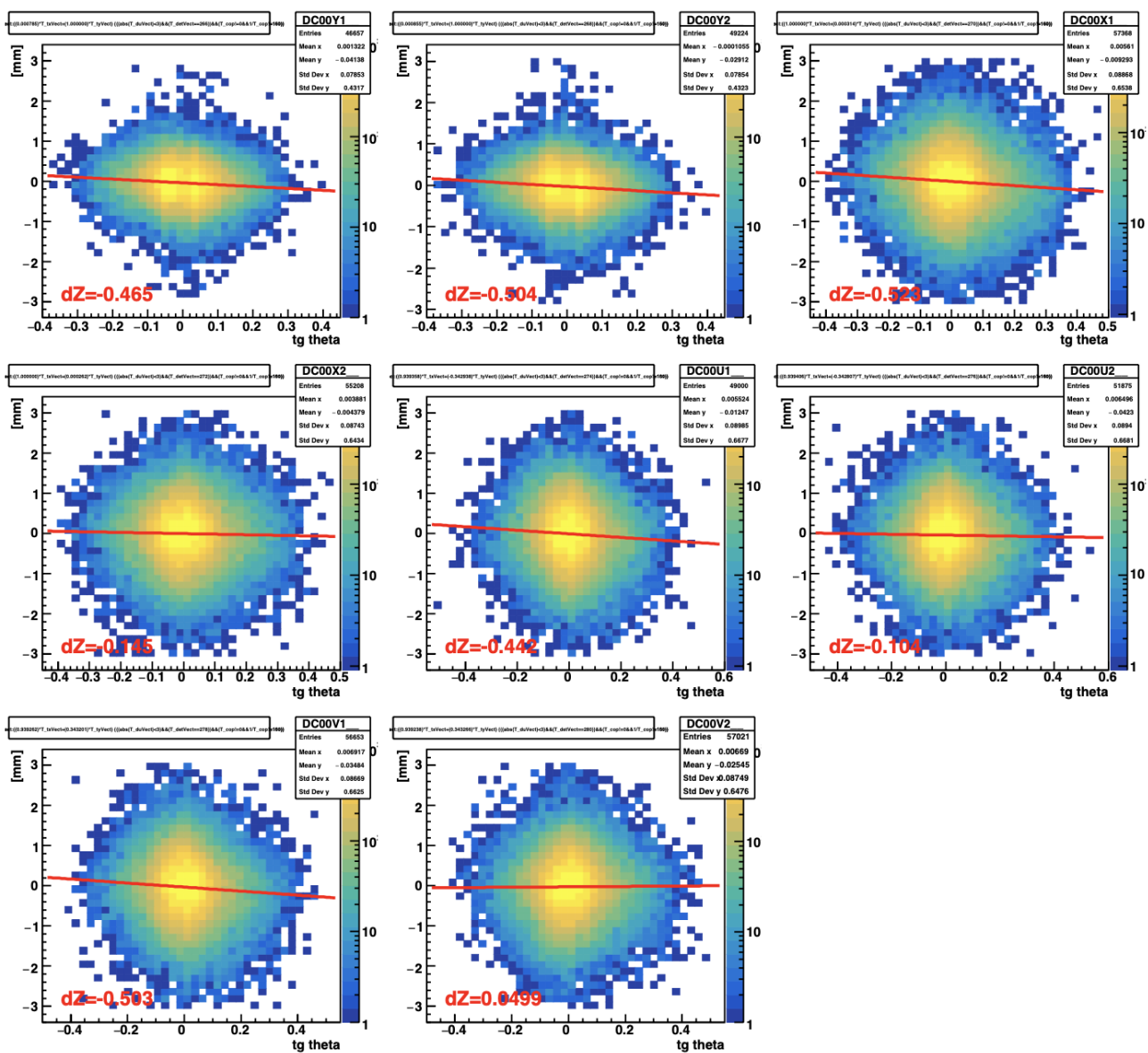


Приложение Б

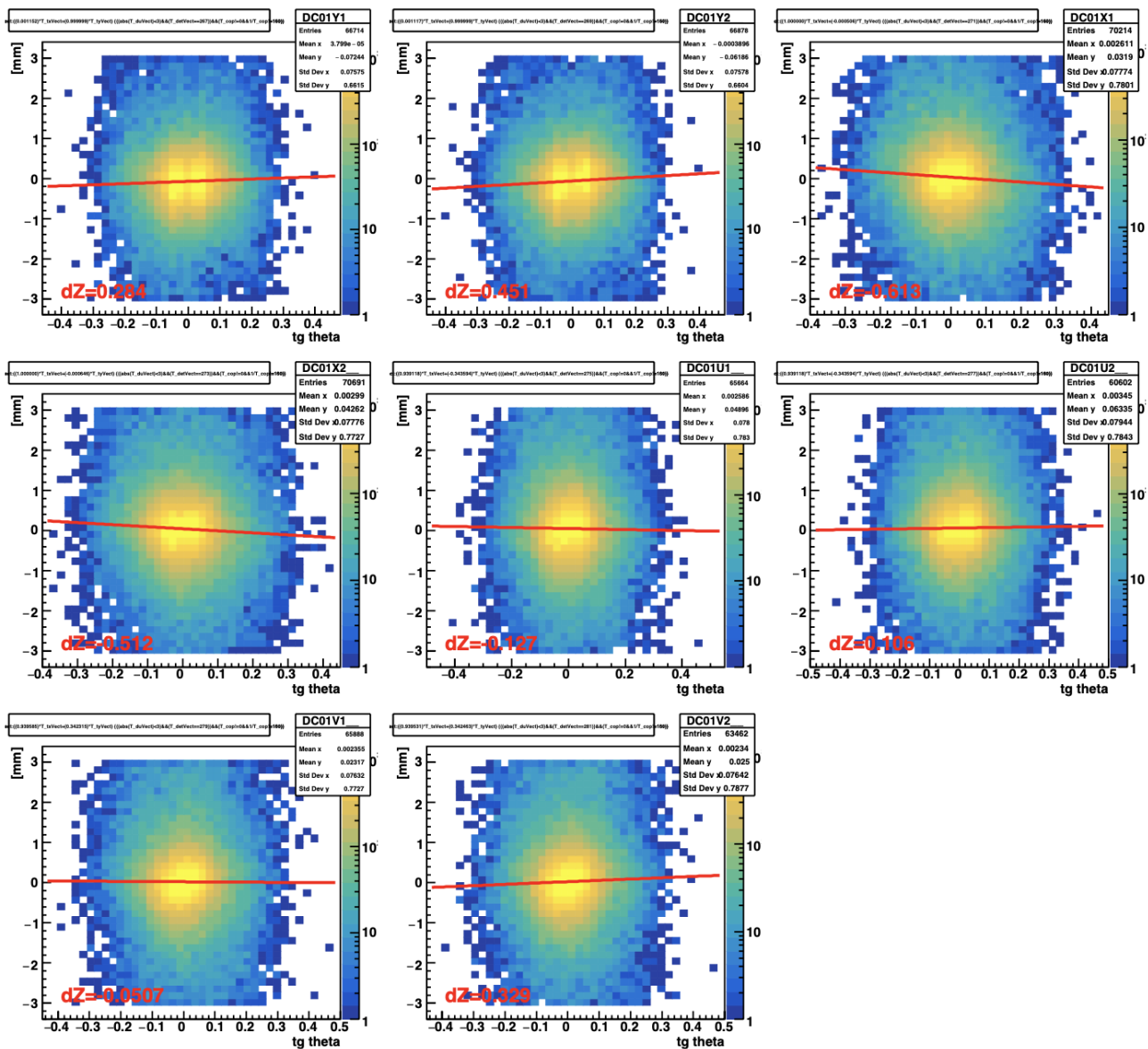
Графики зависимости невязки координаты от угла θ для детекторов GM02, GM03 и GM04 после проведения процедуры геометрического выравнивания.



Графики зависимости невязки координаты от угла θ для детекторов DC00 после проведения процедуры геометрического выравнивания.



Графики зависимости невязки координаты от угла θ для детекторов DC01 после проведения процедуры геометрического выравнивания.



Графики зависимости невязки координаты от угла θ для детекторов DC04 после проведения процедуры геометрического выравнивания.

