

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки Физика конденсированного состояния вещества

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
Ди-мюонное фоторождение в эксперименте NA64
УДК 537.86:539.12:536.62.001.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ61	Бедрицкий Константин Михайлович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ	Трифонов Андрей Юрьевич	Доктор физико- математических наук		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Верховская Марина Витальевна	Кандидат экономических наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Юрий Митрофанович	Доктор технических наук		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Отделение экспериментальной физики	Лидер Андрей Маркович	Доктор технических наук		

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**Запланированные результаты обучения по программе  
03.04.02 «Физика»**

Планируемые результаты обучения

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения (Выпускник должен быть готов)</b>	<b>Требования ФГОС ВО, критериев и/или заинтересованных сторон</b>
<i>Общекультурные (универсальные) компетенции</i>		
P1	Понимает необходимость самостоятельного обучения и повышения квалификации в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС ВО (ОК-3), критерий 5 АИОР
P2	Проявляет способность эффективно работать самостоятельно в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, быть лидером в команде, консультировать по вопросам проектирования научных исследований, а также быть готовым к педагогической деятельности.	Требования ФГОС ВО (ОПК-2, ПК-6), критерий 5 АИОР
P3	Умеет находить зарубежных и отечественных партнеров, владеет иностранным языком, позволяющим работать с зарубежными партнерами с учетом культурных, языковых и социально-экономических условий.	Требования ФГОС ВО (ОПК-1, ОПК-3, ОК-1), критерий 5 АИОР
P4	Проявляет понимание используемых методов, области их применения, вопросов безопасности и здравоохранения, юридических аспектов, ответственности за профессиональную деятельность и ее влияния на окружающую среду.	Требования ФГОС ВО (ОК-2), критерий 5 АИОР
P5	Следует кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научно-исследовательской деятельности	Требования ФГОС ВО (ОК-2), критерий 5 АИОР
<b>Профессиональные компетенции</b>		

Р6	Проявляет глубокие естественнонаучные, математические профессиональные знания в проведении научных исследований в перспективных областях профессиональной деятельности.	Требования ФГОС ВО (ОК-1, ПК-2), критерий 5 АИОР
Р7	Принимает участие в фундаментальных исследованиях и проектах в области физики металлов и материаловедения, а также в модернизации современных и создании новых методов изучения механических, электрических, магнитных, тепловых свойств твердых тел.	Требования ФГОС ВО (ПК-2, ПК-3), критерий 5 АИОР
Р8	Способен обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности	Требования ФГОС ВО (ПК-4, ПК-5), критерий 5 АИОР
Р9	Способен применять полученные знания для решения нечетко определенных задач, в нестандартных ситуациях, использует творческий подход для разработки новых оригинальных идей и методов исследования в области физики металлов, материаловедения и термообработки.	Требования ФГОС ВО (ОК-2, ПК-2, ПК-5), критерий 5 АИОР
Р10	Способен планировать проведение аналитических имитационных исследований по профессиональной деятельности с применением современных достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области научных исследований, умеет критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делает выводы, знает правовые основы в области интеллектуальной собственности	Требования ФГОС ВО (ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-7), критерий 5 АИОР
Р11	Умеет интегрировать знания в различных и смежных областях научных исследований и решает задачи, требующие абстрактного и креативного мышления и оригинальности в разработке концептуальных аспектов проектов научных исследований.	Требования ФГОС ВО (ПК-1, ПК-2), критерий 5 АИОР

Взаимное соответствие целей ООП и результатов обучения и кредитная стоимость результатов обучения представлены в следующих таблицах

Взаимное соответствие целей ООП и результатов обучения

Результаты обучения	Цели ООП					
	Ц1	Ц2	Ц3	Ц4	Ц5	Ц6
P1	+	+	+	+	+	
P2	+	+	+		+	
P3	+			+	+	
P4	+	+	+	+		
P5	+			+		
P6	+		+		+	+
P7	+	+	+			+
P8	+			+		+
P9		+	+			
P10		+	+	+		+
P11	+				+	

Кредитная стоимость результатов обучения

Профессиональные компетенции магистра – 80 кредитов							Универсальные компетенции – 40 кредитов				
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Кредиты	25	10	15	10	15	5	8	8	8	8	8

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки (специальность) Физика конденсированного состояния вещества

Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ61	Бедрицкому Константину Михайловичу

Тема работы:

Ди-мюонное фоторождение в эксперименте NA64

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b> <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>	Объект исследования — процесс ди-мюонного фоторождения в эксперименте NA64. Режим работы периодический.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> <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>	Цель и назначение эксперимента NA64, роль процесса ди-мюонного фоторождения в эксперименте, аналитический обзор литературы целью выяснения основных источников мюоннов в данном эксперименте, изучение основных методов моделирования случайной величины с заданным законом распределения, построение программной модели процесса ди-мюонного фоторождения, финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение, социальная ответственность, заключение
<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Верховская Марина Витальевна (Доцент отделение социально-гуманитарных наук, кандидат экономических наук)
Социальная ответственность	Федорчук Юрий Митрофанович (Профессор отделения общетехнических дисциплин, доктор технических наук)
Раздел на иностранном языке	Кабрышева Оксана Павловна (Старший преподаватель отделения иностранных языков)
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Эксперимент НА64	
Процесс ди-мюонного фоторождения	

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ	Трифонов Андрей Юрьевич	Доктор физико-математических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ61	Бедрицкий Константин Михайлович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ61	Бедрицкий Константин Михайлович

Институт	Физико-технический	Кафедра	ФЭУ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	03.04.02 физика конденсированного состояния вещества

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

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

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<p>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</p>	<p>Оценочная карта конкурентных технических решений</p>
<p>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</p>	<p>SWOT-анализ Календарный план-график реализации проекта</p>
<p>3. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности научного исследования</p>	<p>Определение ресурсоэффективности проекта</p>

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)**

<p>1. Оценочная карта конкурентных технических решений 2. Матрица SWOT 3. Календарный план проекта 4. Бюджет проекта</p>
--

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Верховская М.В.	к.ЭКОН.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ61	Бедрицкий Константин Михайлович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОБМ61	Бедрицкий Константин Михайлович

<b>Подразделение</b>	<b>ИШЯТ</b>	<b>Отделение</b>	<b>ЭФ</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистр	<b>Направление/специальность</b>	03.04.02 физика конденсированного состояния вещества

**Тема диссертации: Ди-мюонное фоторождение в эксперименте НА64**

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</li> <li>- опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</li> <li>- негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</li> <li>- чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</li> </ul>	<p>Работа проводилась в лаборатории второго этажа в одиннадцатом корпусе Национального исследовательского Томского политехнического университета. Объектом исследования является процесс ди-мюонного фоторождения. В процессе исследования возможны следующие вредные и опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- микроклимат;</li> <li>- шум;</li> <li>- электромагнитные излучения;</li> <li>- нехватка искусственного освещения рабочей зоны;</li> <li>- зрительное напряжение;</li> <li>- поражение электрическим током.</li> </ul>
<p>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>ГОСТ и СанПиН</p>

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- действие фактора на организм человека;</li> <li>- приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>- предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).</li> </ul>	<p>В связи с работой ПЭВМ в лаборатории возникает высокий уровень электромагнитного излучения, которое является вредным фактором, величины параметров которого определяются СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Временными допустимыми уровнями напряженности электрического поля считаются 25 В/м и 2,5 В/м для диапазонов частот 5 Гц — 2 кГц и 2 — 400 кГц, соответственно. Для плотности магнитного потока 250 нТл и 25 нТл соответственно.</p>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>- термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>- электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> <li>- пожароопасность</li> </ul>	<p>Действие электрического тока на живую ткань носит разносторонний и своеобразный характер. Прохождение тока может вызывать у человека раздражение и повреждение различных органов. Пороговый неотпускающий ток составляет 50 Гц (6–16мА). Основные коллективные способы и средства электрозащиты: изоляция токопроводящих частей (проводов) и ее непрерывный контроль; установка оградительных устройств. Индивидуальные основные изолирующие электрозащитные средства способны длительно выдерживать рабочее напряжение электроустановок.</p>

<p>3. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- защита селитебной зоны</li> <li>- анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>- анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>- анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>- разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды</li> </ul>	<p>Влияние процесса исследования на окружающую среду:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Утилизация компьютерной техники;</li> <li>- Электромагнитное и тепловое излучение</li> </ul> <p>Возможные способы защиты:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- увеличение расстояния от источника. Для избегания последствий экран монитора должен находиться на расстоянии не менее 50 см;</li> <li>- применение экранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.</li> </ul>
<p>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- перечень возможных ЧС на объекте;</li> <li>- выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>- разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>- разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;</li> <li>- разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	<p>Разработать профилактические меры по устойчивой работе производства. Чтобы избежать опасности, необходимы следующие мероприятия:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) создание запасов средств индивидуальной защиты и поддержание их в готовности;</li> <li>2) наличие и поддержание в постоянной готовности системы общего оперативного и локального оповещения и информации о пожаре и взрыве;</li> <li>3) проектирование, размещение, строительство и эксплуатация объектов инфраструктуры, в том числе и потенциально опасных.</li> </ol> <p>А также рассмотреть возможные ЧС в Сибири:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. сильные морозы</li> <li>2. несанкционированное проникновение.</li> </ol>
<p>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>- организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Организационные мероприятия обеспечения безопасности;</li> <li>2. Провести расчет освещенности рабочего места;</li> <li>2. Особенности законодательного регулирования проектных решений;</li> <li>3. Привести перечень ГОСТ СНиПов использованных в работе.</li> </ol>
<b>Перечень графического материала:</b>	
<p>1. При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров):</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. План размещения светильников</li> <li>2. План Эвакуации</li> </ol>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Федорчук Юрий Митрофанович	Доктор технических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ61	Бедрицкий Константин Михайлович		

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная Школа Ядерных Технологий  
Направление подготовки (специальность) — Физика конденсированного состояния  
Уровень образования – Магистр  
Отделение школы (НОЦ) – Экспериментальная физика  
Период выполнения – (осенний / весенний семестр 2017/2018 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация (бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)
--

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
26.02.18	1. Эксперимент NA64	20
18.03.18	2. Процесс ди-мюонного фоторождения	20
25.03.18	3. Моделирование процесса ди-мюонного фоторождения	20
16.04.18	4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
29.04.18	5. Социальная ответственность	15
15.05.18	6. Раздел, выполненный на иностранном языке	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ	Трифонов А. Ю.	д.ф.-м.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭФ ИЯТШ	Лидер А. М.	д.т.н.		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа включает в себя: 98 страниц, 20 рисунков, 23 таблицы, 51 источник, 1 приложение.

Ключевые слова: мюон, фоторождение, квантовая электродинамика, калориметр, моделирование.

Объектом исследования является процесс ди-мюонного фоторождения.

Цель работы – разработка программной модели процесса ди-мюонного фоторождения для последующего применения для калибровки экспериментальной установки.

В процессе исследования: рассмотрены цели и задачи эксперимента NA64, изучены возможные источники мюонов в данном эксперименте, проведен анализ методов моделирования случайных величин с заданным законом распределения.

В результате исследования были выявлены основные процессы, приводящие к образованию мюонов в эксперименте NA64, разработана программная модель процесса ди-мюонного фоторождения.

Область применения: физика высоких энергий.

Экономическая эффективность/значимость работы: результаты данной работы позволяют уменьшить вычислительные нагрузки для ЭВМ, тем самым сокращает затраты на электроэнергию.

В будущем на основании результатов моделирования планируется определение чувствительности экспериментальной установки NA64, а также уточнение форм фактора ядра, используемого при построении моделей темной материи.

## Содержание

Введение . . . . .	13
1 Эксперимент NA64 . . . . .	14
1.1 Цель эксперимента . . . . .	14
1.2 Экспериментальная установка NA64 . . . . .	15
1.3 Электромагнитный калориметр ECAL . . . . .	17
1.4 Адронный калориметр HCAL . . . . .	20
2 Процесс ди-мюонного фоторождения . . . . .	22
2.1 Роль процесса ди-мюонного фоторождения в эксперименте NA64 . . . . .	22
2.2 Процессы образования мюонов . . . . .	23
2.3 Процесс ди-мюонного фоторождения . . . . .	25
3 Моделирование процесса ди-мюонного фоторождения . . . . .	28
3.1 Методы моделирования случайной величины с заданной плотностью вероятности . . . . .	28
3.2 Генератор подпроцесса $\gamma Z \rightarrow Z\mu^+\mu^-$ . . . . .	31
3.3 Учет начального состояния электрона . . . . .	36
3.4 Результаты моделирования . . . . .	37
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение . . . . .	42
4.1 Предпроектный анализ . . . . .	42
4.2 Инициация проекта . . . . .	45
4.3 Планирование управления научно-техническим проектом . .	48
4.4 Оценка сравнительной эффективности исследования . . . .	56
5 Социальная ответственность . . . . .	60
5.1 Производственная безопасность . . . . .	60
5.2 Экологическая безопасность . . . . .	76
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях . . . . .	77
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности . . . . .	78
Заключение . . . . .	80
Список использованных источников . . . . .	81
Приложение А . . . . .	85

## Введение

В течение нескольких последних десятилетий проводятся эксперименты, направленные на поиск темной материи, которая составляет около четверти всего вещества в нашей Вселенной. Одним из таких экспериментов является NA64 [1], проводимый в ЦЕРНе.

Помимо процессов, на детектирование которых направлен тот или иной эксперимент, происходят различные виды фоновых реакций. Часть из этих фоновых процессов может оказаться полезной для выявления дополнительных характеристик физических систем, прямо или косвенно, участвующих в сигнальных модах.

Так, например, в статистике эксперимента NA64, доступной в настоящий момент, наблюдается выраженный след процесса ди-мюонного фоторождения, который может быть использован для уточнения форм-фактора ядра при построении моделей темной материи, используемых в эксперименте NA64, а также для определения чувствительности экспериментальной установки.

Целью данной работы является изучение процессов, приводящих к образованию мюонных пар, а также создание Монте-Карло генератора процесса ди-мюонного фоторождения.

# 1 Эксперимент NA64

## 1.1 Цель эксперимента

Эксперимент NA64 (на этапе планирования известен как P348) является экспериментом с фиксированной мишенью, который проводится на ускорителе SPS (Super-Proton Synchrotron, протонный суперсинхротрон) в ЦЕРНе (см. рисунок 1.1), объединяющий технику активного сброса пучка и метод недостающей энергии для поиска редких событий [1]. Этот эксперимент использует полностью герметичный детектор, расположенный на линии Н4. Основной целью эксперимента является поиск легких темных бозонов из темного сектора, которые могут взаимодействовать с обычными фотонами, например темные фотоны ( $A'$ ), или  $Z'$  с массой меньше 1 ГэВ, взаимодействующие только с кварками. В некоторых моделях  $Z'$  бозоны взаимодействуют только с  $\mu$ - или  $\tau$ -лептонами, тогда эти частицы называют темные лептонные калибровочные бозоны. В рамках данного эксперимента также возможен поиск невидимого распада  $K_L$  мезона, который является дополнением к распаду  $K^+ \rightarrow \pi + \nu + \nu$ , а также невидимых распадов  $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $\eta'$ ,  $K_S$  мезонов [1].

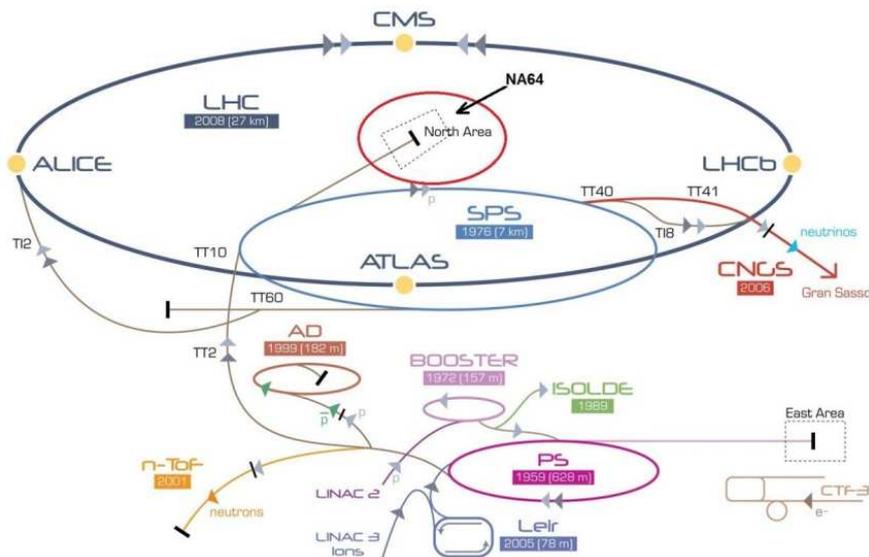


Рисунок 1.1 — Ускорительный комплекс в ЦЕРНе

Некоторые модели темной материи предполагают существование темных секторов, состоящих из  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_\gamma$  синглетных полей. Частицы из этих секторов не взаимодействуют с обычным

веществом непосредственно, но могут участвовать в гравитационных взаимодействиях. В дополнение к гравитационному, может быть еще очень слабое взаимодействие между обычной и темной материей [2], посредством  $U'$  (1) калибровочных бозонов  $A'$  (так называемых темных фотонов) [3], которые могут смешиваться с обыкновенными фотонами [4, 5]. В ряде моделей [2, 6, 7] соответствующие темные калибровочные бозоны должны быть легким и иметь силу  $\gamma$ - $A'$  взаимодействия, лежащую в экспериментально доступной и теоретически интересной области. Если такие  $A'$  посредники существуют, их распады в электрон-позитронные пары ( $A' \rightarrow e^+ e^-$ ) можно было бы искать в эксперименте. Помимо этого, предполагается, что темный фотон способен аннигилировать по “невидимому” каналу на пару частиц темной материи ( $A' \rightarrow \chi\chi$ , т. е.  $A' \rightarrow invisible$ ) [8]. NA64 направлен на изучение еще неисследованной области константы смешивания  $10^{-5} \leq \epsilon \leq 10^{-3}$  и массы темных фотонов  $M_{A'} \leq 100$  МэВ, при помощи пучков электронов с энергией 10-300 ГэВ [1].

## 1.2 Экспериментальная установка NA64

Экспериментальная установка, разрабатываемая специально для поиска канала реакции  $A' \rightarrow invisible$ , схематично изображена на рисунке 1.2. Постановка такого эксперимента требует очень чистого электронного пучка. Примесь других заряженных частиц в пучке должна быть меньше, чем  $10^{-2}$  [9]. Установка включает в себя 4 трековых детектора, два из которых размещены до двух магнитов и два – после (в рассматриваемой установке используется несколько видов трековых детекторов: Micromega’s, GEM’s, Straw-tubes и годоскопы), вакуумную трубу диаметром 159 мм, помещённую в магнитное поле, создаваемое двумя магнитами с напряжённостью магнитного поля  $\approx 1,46$  Т, высокоэффективные вето счётчики 1 и 2, три сцинтилляционных счётчика (пропорциональные камеры), комбинацию электромагнитного калориметра типа “шашлык” и адронного калориметра высокой степени герметичности, для детектирования всех финальных состояний продуктов реакции  $e^- Z \rightarrow e^- Z A'$ . Магниты также служат для фильтрации низкоэнергетических компонент пучка [10]

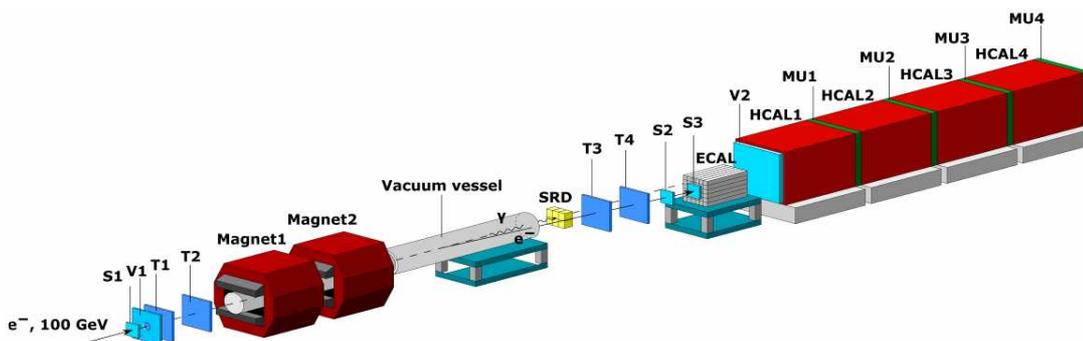


Рисунок 1.2 — Экспериментальная установка

Вторая вакуумная труба протяженностью 15 м, расположенная между магнитами и ЭМ-калориметром, установлена для предотвращения поглощения фотонов синхротронного излучения, которые регистрирует детектор синхротронного излучения (в ходе проведения эксперимента в качестве такого детектора использовались кристаллы BGO, кристаллы LYSO, SRD детектор, представляющий из себя компактный калориметр) [1].

В эксперименте используется пучок электронов с энергией 100 ГэВ с линии Н4. Максимальная интенсивность пучка составляет  $10^5 - 10^7$  электронов, производимых пучком интенсивностью порядка  $10^{12}$  протонов, при столкновении с мишенью.

Методика поиска искомой реакции состоит в следующем. Тёмные фотоны  $A'$  образуются в результате смешивания с квази-реальными фотонами электромагнитных взаимодействий, которые, в свою очередь, образуются в результате рассеяния первичных электронов на ядрах в ЭМ-калориметре:

$$eZ \rightarrow eZA', A' \rightarrow invisible$$

Такая реакция, как правило, происходит в пределах одной радиационной длины ( $X_0$ ) ЭМ-калориметра. Образовавшийся  $A'$  далее проходит всю установку без взаимодействия и распадается на  $e^-e^+$  вне детектора, или может распасться на две гипотетических частицы, которые тоже пройдут всё вещество детекторного комплекса без взаимодействий. В случае, если в процессе развития ЭМ-ливня  $A'$  не образуется, ЭМ-калориметр служит поглотителем ( $\approx 30X_0$ ) для всей энергии первичного

электрона, и утечки в вето счётчик 1 незначительны. В случае, если в результате развития ЭМ-ливня образуется  $A'$ , в ЭМ-калориметре остаётся  $E_1 = f E_0$ . Оставшаяся часть энергии  $E_2 = (1 - f) E_0$  первичного электрона уносится (через всю оставшуюся часть установки – без взаимодействия) тёмным фотоном ( $A'$ ) или продуктами реакции  $A' \rightarrow invisible$ .

Кандидат на роль сигнала искомого события должен проявлять следующую сигнатуру [8]:

$$S_{A'} = T(1 - 4) \times ECAL (E_{ECAL} < E_0) \times \sqrt{V2} \times HCAL,$$

другими словами, наличие сигнала от трековых детекторов, сигнала от ЭМ-калориметра (меньшего чем энергия первичного пучка) и, в тоже время, отсутствие сигналов от вето-счётчика 2 и адронного калориметра. Также, такая реакция должна проявляться в следующем [8].

1) Начальная точка развития ЭМ-ливня в ЭМ-калориметре должна быть локализована в нескольких начальных радиационных длинах.

2) Продольная и поперечная формы ливня должны соответствовать обычному ЭМ-ливню.

3) Отношение энергии, выделенной в ЭМ-калориметре, к энергии первоначального электрона  $f \approx 0,5$ .

4) Отсутствует энерговыделение в вето-счётчике 2 и адронном калориметре.

### 1.3 Электромагнитный калориметр ECAL

Ввиду того, что  $A'$  предположительно имеет массу порядка 10 МэВ - 1 ГэВ [10–12], сигнатура сигнального события должна включать, помимо зарегистрированного отсутствия части выделившийся в калориметре энергии, заметную поперечную асимметрию электромагнитного ливня. Аномалию пространственного развития электромагнитного ливня для диапазона энергий  $A'$  возможно зарегистрировать располагая энергетическим разрешением порядка МэВ, что составляет  $10^{-4}$  от энергии иницирующего пучка SPS.

Поскольку сигнальное событие в основном происходит на глубине первой радиационной длины  $X_0$ , для выделения пространственного профиля

электромагнитного ливня с разрешением  $50 \text{ МэВ}/^\circ$  необходимо выполнение следующих условий [1]:

— обеспечение компактности прибора, — необходимо использовать вещество с малым мольеровским радиусом и, соответственно, малой радиационной длиной;

— энергетическое разрешение прибора должно соответствовать  $\delta E/E \approx \sqrt{15\%}/E$ ;

—  $e/\pi$ -разделение должно быть  $\approx 10^{-3}$ ;

— радиационная стойкость активной части прибора должна превышать 1000 Гр.

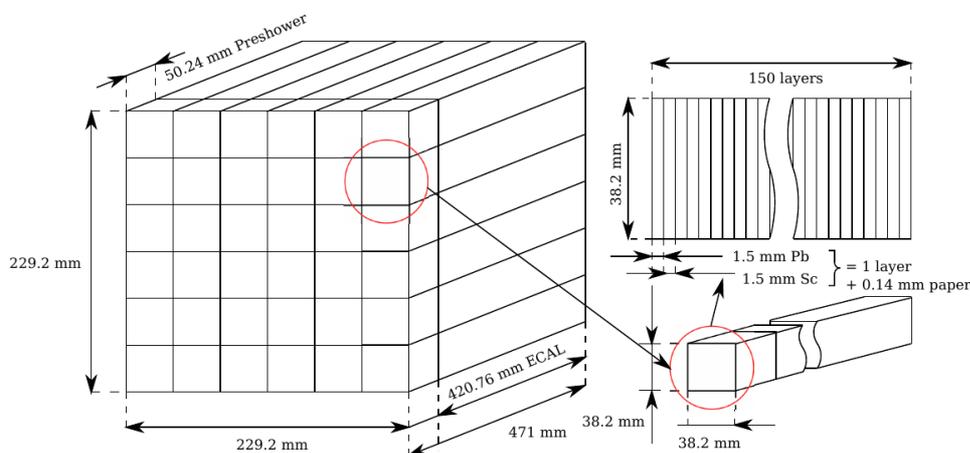


Рисунок 1.3 — Электромагнитный сегментированный компактный калориментр ECAL

Выбранный коллаборацией электромагнитный калориментр представляет собой детектор типа «шашлык» [2, 13, 14] в сегментированной компоновке  $6 \times 6$ , изображённой на рисунке 1.3, в продольном направлении разделённый на две части («ECAL0» и «ECAL1»). Он же играет роль активной мишени, на которой происходит развитие электромагнитного ливня с образованием примеси  $A'$  с вероятностью  $10^{-12}$  [2].

Увеличение числа поперечных сегментов позволяет при обработке увеличить коэффициент  $e/\pi$ -разделения, поскольку поперечные размеры слоёв-ячеек в 25 мм сопоставимы с мольеровским радиусом [15], и

позволяют достаточно надёжно идентифицировать тип частиц по профилю электромагнитного ливня.

Поперечная сегментация необходима для определения пространственных характеристик электромагнитного ливня. Продольная сегментация позволяет ввести дополнительные валидирующие критерии при исполнении триггерных схем на реальном эксперименте: уменьшить влияние pile-up-событий и эффектов связанных с обратным рассеянием за счёт дополнительной информации в preshower-части (первой по пучку) калориметра.

Сигнал с фотоумножителя калориметра является функцией довольно большого числа параметров, обусловленных особенностями вещества сцинтиллятора, его геометрии, условий светосбора. Влияние оказывают также индивидуальные параметры фотокатода, диодной системы, формирователей сигнала.

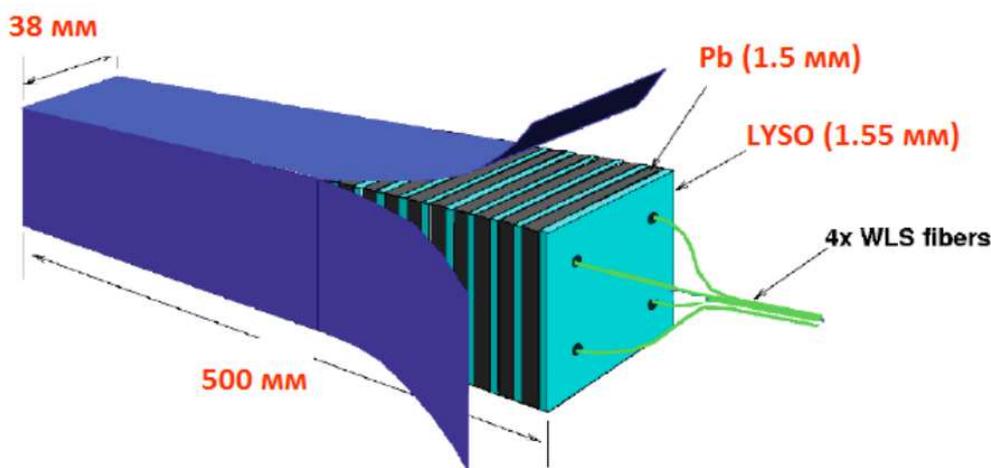


Рисунок 1.4 — Адронный калориметр

Светосбор производится с помощью волокон Vicon WLS-fibers VCF91a [1] с диаметром 1 мм, проходящих через круглые канавки в пластинах сцинтиллятора. Волокна от каждого сегмента собраны вместе в один оптический коннектор, расположенный на продольной стороне модуля (рисунок 1.4). Свет, собираемый каждым из этих девяти коннекторов, считывается одним фотоумножителем. Девять таких фотоумножителей с каждого модуля помещаются на продольной стороне соответствующего модуля вместе с сопутствующей электроникой.

## 1.4 Адронный калориметр HСAL

Адронный калориметр (HСAL) предназначен для повышения продольной герметичности экспериментальной установки в экспериментах по поиску видимой моды  $A' \rightarrow \chi\chi$ .

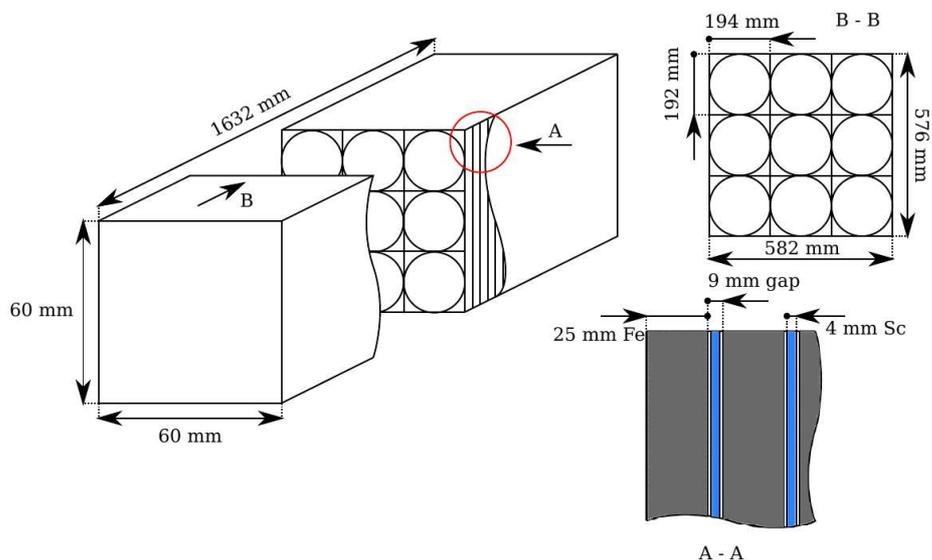


Рисунок 1.5 — Адронный калориметр

Адронный калориметр состоит из четырёх модулей (один модуль показан на рисунке 1.5). Каждый модуль представляет собой матрицу сегментов  $3 \times 3$ . Каждый сегмент в свою очередь представлен «сэндвичем» из чередующихся слоёв железа и сцинтиллятора с толщинами 25 мм и 4 мм, соответственно, и поперечными размерами  $194 \times 192 \text{ мм}^2$ . Расстояние между пластинами Fe двух соседних слоёв составляет 7 мм. Таким образом, суммарная длина одного слоя равняется 32 мм. Каждый сегмент состоит из 48 таких слоёв, что примерно соответствует  $7 \lambda_{int}$ . Такая поперечная сегментация на девять ячеек обеспечивает хорошую однородность сбора света по всему модулю и позволяет получать информацию о типе и характеристиках регистрируемой частицы из анализа профиля развивающегося ливня. Кроме того, локализация ливня по сегменту повышает энергетическое разрешение детектора, а также облегчает измерение пространственных характеристик ливней и разделения близко лежащих ливней [16].

Основные параметры адронного калориметра, применяемого в эксперименте NA64 представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 — Основные характеристики адронного калориметра

Число модулей	4
Геометрические размеры	$\sim 600 \times 600 \times 1536 \text{ мм}^3$
Вес	$\sim 3500 \text{ кг}$
Диапазон энергий	0,5 - 120 ГэВ
Энергетическое разрешение	$\delta E/E \approx 0,62/\sqrt{E}$
$\pi$ -герметичность	$\approx 10^{-9}$
Ядерная длина	$\approx 7\lambda$
Число слоев	48
Толщина слоев	34 мм
Число сегментов в модуле	9
Размеры сегмента	$192 \times 194 \text{ мм}^2$
Фотоумножители	ФЭУ-84-3
Максимальная частота регистрируемых событий	До $10^7 \text{ e}^-$ за спил

## 2 Процесс ди-мюонного фоторождения

### 2.1 Роль процесса ди-мюонного фоторождения в эксперименте NA64

На рисунке 2.1 представлено распределение событий в результате рассеяния электрона на ядре в плоскости ( $E_{ECAL}$ ;  $E_{HCAL}$ ). Здесь,  $E_{HCAL}$  суммарная энергия, зарегистрированная первыми двумя адронными калориметрами. События в области I на рисунке 2.1 происходят в результате редкого электрослабого рождения мюонных пар [1, 16].

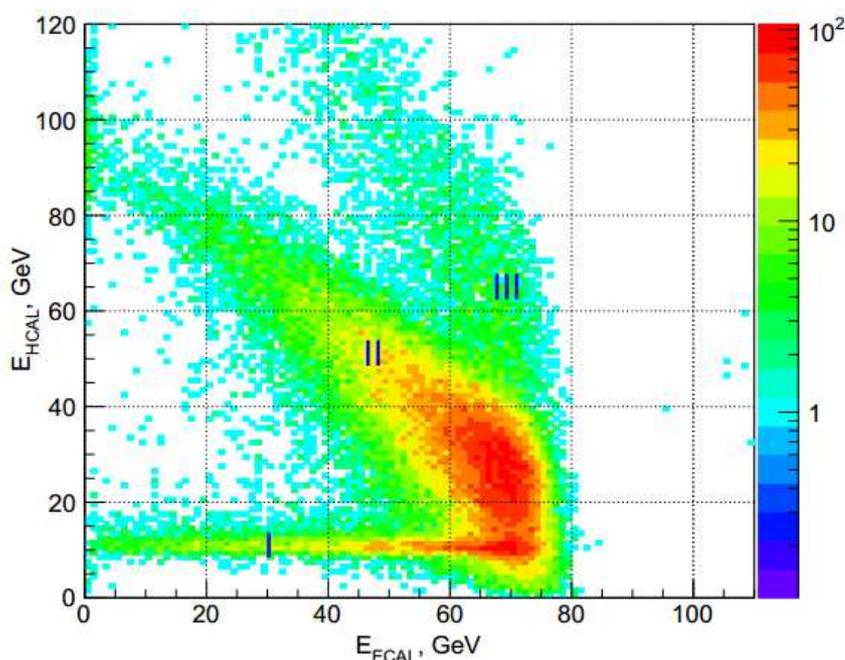


Рисунок 2.1 — Распределение событий в ( $E_{ECAL}$ ;  $E_{HCAL}$ ) плоскости

Этот процесс может быть использован в качестве ориентира, позволяющего проверить надежность моделирования методом Монте-Карло и оценить систематические неопределенности в эффективности восстановления сигнала в диапазоне энергий, предсказанным моделированием. В область II попадают события, возникающие в результате электрон-адронного взаимодействия в рамках стандартной модели, которые удовлетворяют закону сохранения энергии  $E_{ECAL} + E_{HCAL} = 100$  ГэВ, в пределах энергетического разрешения детекторов. Ошибки при детектировании этих событий вследствие конечности разрешающей

способности детекторов составляют  $10^{-16}$  [10]. События из региона Ш, доля которых составляет порядка 1 %, возникают в основном в результате так называемого pile-up эффекта [8].

## 2.2 Процессы образования мюонов

Многомюонные события, появляющиеся в конечном состоянии при рассеянии электрона на протоне (или ядре), почти полностью состоят из мюонных пар [17, 18]. Мюонные пары могут рождаться как в упругих (2.1), так и в неупругих (2.2) процессах рассеяний [17]:

$$eZ \rightarrow e'Z'\mu^+\mu^-, \quad (2.1)$$

$$eZ \rightarrow e'X\mu^+\mu^-, \quad (2.2)$$

Вычисление сечения этих процессов является сложной задачей, даже самый простой распад  $2 \rightarrow 4$  не является тривиальным вследствие осложняющих факторов, таких как: наличие у ядра внутренней структуры, необходимость вычисления радиационных поправок, учет взаимодействия в конечном состоянии и т. д. Упрощение вычислений может быть достигнуто сведением многочастичного процесса к рассеянию  $2 \rightarrow 2$ . При больших массах ди-мюонов электрослабые процессы составляют единственный заметный источник мюонных пар (в особенности квази-реальное двухфотонное взаимодействие). Двухфотонная физика позволяет сформулировать сечение в хорошем приближении как произведение потоков фотонов и сечения центрального  $2 \rightarrow 2$  процесса:  $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$  [17]. Распады тяжелых частиц приводят к рождению мюонов в меньших ди-мюонных массовых масштабах или к рождению изолированных одиночных мюонов.

В таблице 2.1 представлен обзор процессов, приводящих к образованию одиночных мюонов или их пар. Первая группа содержит электрослабые процессы рождения мюонных пар. Взаимодействия двух нейтральных калибровочных бозонов, в частности фотон-фотонное взаимодействие, являются наиболее важными источниками мюонных пар. Кроме того происходят тормозные процессы с последующим преобразованием фотонов в мюон-антимюонные пары. Также могут наблюдаться электрослабые эффекты, в частности тормозное рождение

$Z^0$  бозона, с последующим преобразованием в мюонную пару. Последним (в рамках стандартной модели) источником мюонных пар являются распады векторных мезонных резонансов [19].

Одиночные лептоны могут рождаться в результате распадов тяжелых кварков, также источником мюонов является распад  $\tau$ -лептона.

Таблица 2.1 — Процессы, приводящие к образованию мюонов

Электрослабое рождение мюонных пар		
Двухбозонные процессы	$eZ \rightarrow eZ\gamma\gamma$	$\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$
	$eZ \rightarrow eZ\gamma Z^0$	$\gamma Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$
	$eZ \rightarrow eZ Z^0 Z^0$	$Z^0 Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$
Томозное излучение	$eZ \rightarrow eZ\gamma$	$\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$
Образование $Z^0$ -бозона	$eZ \rightarrow eZ Z^0$	$Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$
Распад векторных резонансных мезонов		
Распад $J/\Psi$	$J/\Psi \rightarrow \mu^+\mu^-$	
Распад $\Upsilon$	$\Upsilon \rightarrow \mu^+\mu^-$	
Рождение одиночных мюонов		
Распад тяжелого кварка	$Q \rightarrow q\mu\nu_\mu$	
Распад $\tau$ -лептона	$\tau \rightarrow \mu\nu_\mu\nu_\tau$	
Распад $W$ -бозона	$W \rightarrow \mu\nu_\mu$	

Выражение для сечения, определяющего многочастинные реакции, такие как (2.1) и (2.2) может быть упрощено путем выявления подходящих реакций  $2 \rightarrow 2$ , которые позволяют редуцировать кинематическую сложность этих реакций. Наиболее популярным способом упрощения выражения для сечения сложных процессов рассеяния является приближение Вайцеккера-Вильямса [20–22]. Диаграмма Фейнмана для электрослабого рождения мюонной пары представлена на рисунке 2.2. Электрон испускает фотон, который взаимодействует с фотоном, излученным протоном, и в результате рождается лептонная пара. Это двухфотонное столкновение может являться подходящим  $2 \rightarrow 2$  процессом. Полное сечение получается путем умножения сечения двухфотонного взаимодействия на соответствующие потоки фотонов. Для полного вычисления электрослабых

двухбозонных процессов, в дополнение должны быть также рассмотрены  $\gamma Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  и  $Z^0 Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  рассеяния. Вследствие большой массы  $Z^0$  бозонов ( $\sim 91,19$  ГэВ) последние процессы не вносят существенного вклада в итоговое сечение [17].

### 2.3 Процесс ди-мюонного фоторождения

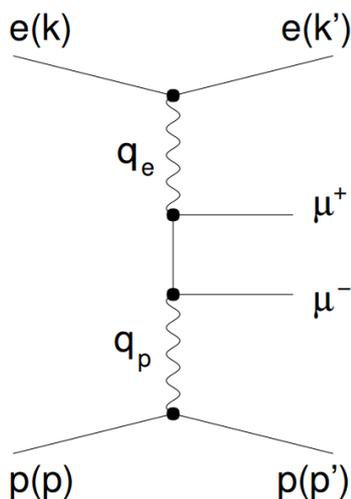


Рисунок 2.2 — Диаграмма двухфотонного процесса

Кинематика двухфотонного процесса, представленного на рисунке 2.2, определяется виртуальностями этих фотонов  $Q_e^2$  и  $Q_p^2$  и энергией в системе центра масс, которая является инвариантной массой рожденной мюонной пары. Эти кинематические переменные могут быть определены при помощи 4-импульсов налетающих и вылетающих электронов и протонов [23]:

- $p$  — импульс налетающего протона;
- $k$  — импульс налетающего электрона;
- $p'$  — импульс вылетающего протона;
- $k'$  — импульс вылетающего электрона.

Виртуальность соответствующего фотона определяется как квадрат переданного 4-импульса со знаком минус:

$$Q_e^2 = -q_e^2 = -(k - k')^2 \quad (2.3)$$

$$Q_p^2 = -q_p^2 = -(p - p')^2 \quad (2.4)$$

Энергия центра масс  $\sqrt{s}$  определяется из выражения

$$\hat{s} = (p + k)^2 \quad (2.5)$$

Энергия центра масс  $\sqrt{\hat{s}}$  в двухфотонной системе может быть вычислена из 4-импульсов этих фотонов или из 4-импульсов рожденных лептонов  $p_{\mu 1}$  и  $p_{\mu 2}$ :

$$\hat{s} = (q_e + q_p)^2 = (p_{\mu 1} + p_{\mu 2})^2 \quad (2.6)$$

Индекс  $p$  обозначает «со стороны протона», и применяется также в случае неупругих столкновений для фотонов, излученных кварком. Для описания центрального подпроцесса  $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$  применяются так называемые переменные Мандельштама  $\hat{s}$ ,  $t$  и  $u$  [17].

В удобном виде сечение можно представить как произведение сечения центрального двухфотонного процесса и фотонных потоков:

- $\Gamma_e(Q_e^2, z_e)$  поток фотонов со стороны электрона;
- $d\sigma(Q_e^2, Q_p^2, \hat{s}, t)$  сечение  $\gamma\gamma$  подпроцесса;
- $\Gamma_p(Q_p^2, z_p)$  поток фотонов со стороны протона;

Переменная  $z_e$  определяет относительные энергетические потери электрона, и определяет, таким образом, энергию фотона  $E_\gamma = z_e E$ ,  $z_p$  соответствующая переменная для протона. Обменные фотоны являются виртуальными частицами и могут быть продольно и поперечно поляризованными. В пределе фоторождения, т. е. когда  $Q_e, Q_p \rightarrow 0$ , вклад в сечение продольно поляризованных фотонов стремится к нулю, тогда [24]:

$$\frac{d\sigma(ep \rightarrow ep\mu^+\mu^-)}{dQ_e^2 dQ_p^2 dz_e dz_p dt} = \Gamma_e^t \Gamma_p^t \frac{d\sigma(\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-)}{dt} \quad (2.7)$$

Фактор потока  $\Gamma_e^t$  определяет вероятность того, что поперечно поляризованный фотон будет излучен электроном. Выражение для фактора потока будет приведено далее.

Если центральный подпроцесс рассматривается как столкновение двух реальных фотонов, то сечение данного процесса зависит только от энергии центра масс системы двух фотонов и угла между конечными состояниями лептонов [25]:

$$\frac{d\sigma(Q_e^2, Q_p^2, \hat{s}, t)}{dt} = \frac{d\sigma(\hat{s}, t)}{dt} \quad (2.8)$$

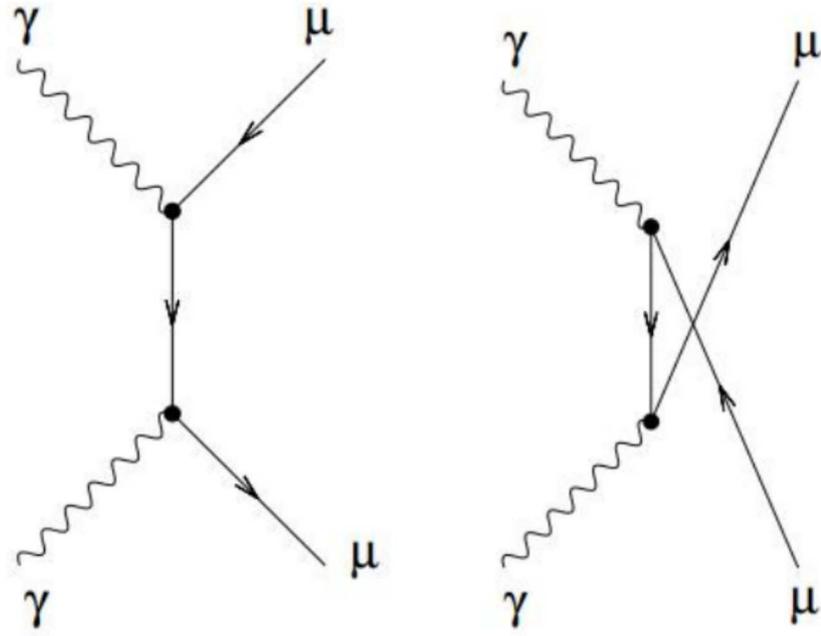


Рисунок 2.3 — Двухфотонный процесс

На рисунке 2.3 показаны диаграммы Фейнмана низшего порядка для центрального подпроцесса  $2 \rightarrow 2$ . Эти две диаграммы представляют  $t$ - и  $u$ -каналы распада. Пренебрегая массами лептонов, сечение центрального подпроцесса может быть получено из сечения комптоновского рассеяния, путем замены  $s \leftrightarrow t$  в амплитудах и учета дополнительного фактора (-1) для обмена фермионов [26]:

$$\frac{d\sigma(\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-)}{dt} = \frac{2\pi\alpha^2}{\hat{s}} \left( \frac{u}{t} + \frac{t}{u} \right). \quad (2.9)$$

В системе центра масс этой реакции переменные Манделъштама  $u$  и  $t$  связаны с поперечным импульсом  $P_T$ :

$$t = -\frac{\hat{s}}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{4P_T^2}{\hat{s}}} \right), \quad (2.10)$$

$$u = -\frac{\hat{s}}{2} \left( 1 + \sqrt{\frac{4P_T^2}{\hat{s}}} \right), \quad (2.11)$$

Энергия центра масс  $\hat{s}$  этой реакции есть инвариантная масса моющей пары.

### 3 Моделирование процесса ди-мюонного фоторождения

#### 3.1 Методы моделирования случайной величины с заданной плотностью вероятности

Основой для генерации случайных величин с различными законами распределения при помощи ЭВМ служат случайные числа, равномерно распределенные в интервале (0, 1), которые формируются на ЭВМ при помощи программного или физического генератора случайных чисел.

При моделировании для преобразования случайных чисел имеющих равномерный закон распределением в случайные числа с заданным законом распределения применяются различные приемы [27–29]. Ниже приведен обзор общих приемов генерации случайных чисел с заданным законом распределения из равномерно распределенных случайных чисел.

##### 3.1.1 Метод обратной функции

Пусть  $\omega(y)$  - функция плотности вероятности. Тогда

$$W(y) = \int_{-\infty}^y \omega(z) dz \quad (3.1)$$

есть функция распределения вероятностей случайной величины  $y$ , а  $W^{-1}(x)$  – функция, обратная к  $W(y)$ . Тогда случайная величина

$$y = W^{-1}(x) \quad (3.2)$$

имеет заданный закон распределения  $\omega(y)$ , если случайная величина  $x$  равномерно распределена в интервале (0, 1) [30].

В качестве примера применения метода обратной функции рассмотрим случайную величину заданную релеевским законом распределения. Для этой величины функция плотности, функция распределения и дисперсия имеют соответственно вид

$$\omega(y) = \frac{y}{\sigma^2} e^{-y^2/2\sigma^2}, y \geq 0, \quad (3.3)$$

$$W(y) = 1 - e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}}, y \geq 0, \quad (3.4)$$

$$\sigma_y^2 = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \sigma^2 \quad (3.5)$$

где  $\sigma$  – параметр распределения, который можно получить путем следующего преобразования равномерно распределенной в интервале  $(0, 1)$  случайной величины  $x$ :

$$y = \sigma \sqrt{-2 \ln(1-x)} = \sigma \sqrt{-2 \ln x} \quad (3.6)$$

Переход от  $\ln(1-x)$  к  $\ln x$  в последней формуле обоснован тем, что случайные величины  $x$  и  $1-x$  имеют здесь одинаковые законы распределения.

Однако не всегда существуют элементарные преобразования, с помощью которых можно получить случайные величины с заданным законом распределения из равномерно распределенных случайных чисел. Например, у случайных величин с распределением по Гауссу функция, обратная функции распределения, не выражается в замкнутом виде через элементарные функции. В таких случаях для моделирования случайных величин с заданным распределением применяются различные приближения функции  $W^{-1}(x)$  [31].

### 3.1.2 Метод Неймана

Достаточно универсальным методом, применяемым для моделирования случайных величин, возможные значения которых находятся в пределах некоторого ограниченного интервала  $(a, b)$ , а также случайных величин, законы распределения которых можно аппроксимировать усеченными, является метод Неймана [32], который состоит в следующем.

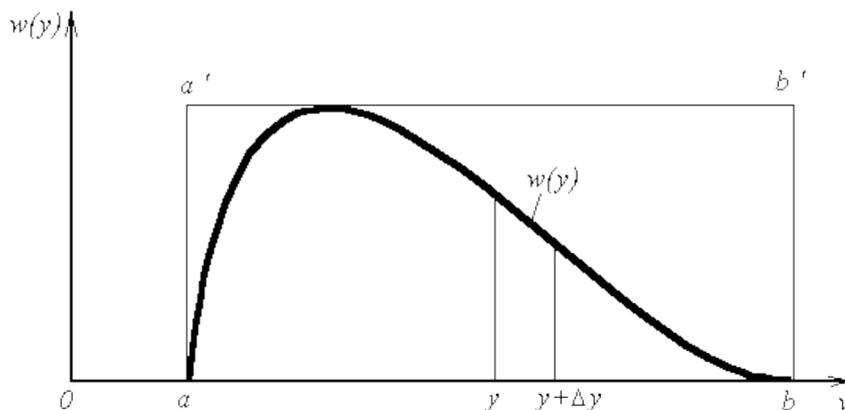


Рисунок 3.1 — Усеченная кривая плотности вероятности

При помощи генератора случайных чисел независимо выбираются пары чисел  $x_1, x_2$ , значения которых равномерно распределены в интервале  $(0, 1)$ . Из полученных чисел формируются следующие преобразованные пары

$$x_1^* = a + (b - a)x_1, \quad (3.7)$$

$$x_2^* = \omega_{max}x_2 \quad (3.8)$$

где  $(a, b)$  – интервал возможных значений случайной величины  $y$  с заданной функцией плотности  $\omega(y)$ ;

$\omega_{max}$  – максимальное значение функции  $\omega(y)$ .

В качестве реализации случайной величины принимается число  $x_2$  из тех пар  $x_1^*, x_2^*$  для которых справедливо неравенство [31]

$$x_2^* \leq \omega(x_1^*). \quad (3.9)$$

Пары, которые не удовлетворяют неравенству (3.9), отбрасываются.

Можно рассматривать пары случайных чисел  $x_1^*, x_2^*$  как координаты случайных точек плоскости, равномерно распределенных вдоль осей  $y$  и  $\omega(y)$  внутри прямоугольника  $aa'b'b$  (см. рисунок 3.1). Пары  $x_1^*, x_2^*$ , которые удовлетворяют условию (3.9), есть координаты случайных точек плоскости, равномерно распределенных вдоль осей  $y$  и  $\omega(y)$  внутри части прямоугольника  $aa'b'b$ , расположенной под кривой  $\omega(y)$  [33].

Недостатком метода является то, что те точки, которые оказались выше кривой распределения плотности вероятности, отбрасываются как ненужные, и время, затраченное на их вычисление, оказывается напрасным. Метод применим только для аналитических функций плотности вероятности.

### 3.1.3 Метод кусочной аппроксимации

Достаточно удобными и универсальными можно считать приближенные приемы преобразования случайных чисел, основанные на кусочной аппроксимации функции плотности [33].

Пусть требуется получить последовательность случайных чисел с функцией плотности  $\omega(y)$ . Если область определения случайной величины

$\xi$ , задаваемой функцией плотности  $\omega(y)$ , неограничена, переходим к соответствующему усеченному распределению в интервале  $(c, d)$ . Далее разбиваем  $(c, d)$  на  $n$  интервалов. Тогда случайная величина  $\xi$  может быть представлена в виде суммы

$$\xi = a_k + \eta_k, \quad (3.10)$$

где  $a_k$  – абсцисса левой границы  $k$ -го интервала;  $\eta_k$  – случайная величина, возможные значения которой располагаются внутри этого интервала.

Можно показать, что функция плотности случайной величины  $\eta_k$  имеет вид [32]

$$f_k(y) = \frac{f_\xi(x)}{P(i=k)} \quad (3.11)$$

Функции  $f_k(y)$  в общем случае для каждого интервала различны.

Алгоритм рассматриваемого вида преобразования случайных чисел сводится к следующему [32]:

- 1) случайная выборка интервала из  $n$  возможных интервалов (определение значения  $a_k$ );
- 2) случайная выборка чисел  $y_{ki}$ , распределенных в интервале с номером  $k$ ;
- 3) формирование случайного числа  $\xi_i$  в соответствии с соотношением (3.11).

Наиболее удобным из этого класса приемов является случай, когда вероятности выхода для всех интервалов принимаются одинаковыми [31].

### 3.2 Генератор подпроцесса $\gamma Z \rightarrow Z\mu^+\mu^-$

В качестве основы для моделирования этого подпроцесса был выбран встроенный в Geant4 генератор фоторождения мюонных пар [34]. Данный генератор предназначен для моделирования процесса образования мюонных пар в кулоновском поле ядра. Диаграмма этого процесса представлена на рисунке 3.2.

Процесс фоторождения мюонной пары на атомных электронах  $\gamma e \rightarrow e\mu^+\mu^-$  имеет порог равный

$$\frac{2m_\mu(m_\mu + m_e)}{m_e} \approx 43,9 \text{ ГэВ}$$

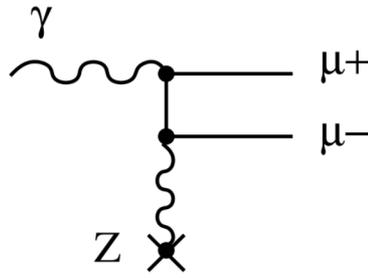


Рисунок 3.2 — Диаграмма процесса  $\gamma Z \rightarrow Z\mu^+\mu^-$

и намного меньшее сечение, чем процесс на ядре, вплоть до энергий в несколько сотен ГэВ. При больших энергиях, сечение этого процесса вносит поправку порядка  $1/Z$  в общее сечение [34]. Вследствие этого, в условиях эксперимента NA64, влиянием фоторождения на атомных электронах можно пренебречь.

В приближении упругого соударения, которое используется в мюонном генераторе в Geant4, не учитывается изменение энергии ядра. Энергия фотона полностью распределена между мюонами, т. е.

$$E_\gamma = E_\mu^+ + E_\mu^-. \quad (3.12)$$

Или, если записать через доли энергии,

$$x_+ = \frac{E_\mu^+}{E_\gamma}, \quad x_- = \frac{E_\mu^-}{E_\gamma}, \quad x_+ + x_- = 1. \quad (3.13)$$

Дифференциальное сечение электромагнитного фоторождения мюонной пары можно записать в следующем виде [34]:

$$\frac{d\sigma}{dx_+} = 4\alpha Z^2 r_c^2 \left(1 - \frac{4}{3}x_+x_-\right) \ln(W), \quad (3.14)$$

где  $Z$  - заряд ядра;

$r_c$  - классический радиус мюона и

$$W = W_\infty \frac{1 + (D_n\sqrt{e} - 2)\delta/m_\mu}{1 + BZ^{-1/3}\sqrt{e}\delta/m_e} \quad (3.15)$$

где

$$W_\infty = \frac{BZ^{-1/3}m_\mu}{D_n m_e},$$

$$\delta = \frac{m_\mu^2}{2E_\gamma x_+ x_-}$$

$$\sqrt{e} = 1,6487 \dots$$

и

$$B = 202,4 \quad D_n = 1,49 \text{ для этого водорода}$$

$$B = 183 \quad D_n = 1,54A^{0,27} \text{ в остальных случаях}$$

Эти формулы учитывают экранирование ядра атомными электронами на основе модели Томаса-Ферми, а также конечный размер ядра. Формула (3.14) дает хорошие результаты при  $E_\gamma \gg m_\mu$  [34]. В данном случае сечение положительно при  $E_\gamma \geq m_\mu$  и  $x_{min} \leq x \leq x_{max}$

где

$$x_{min} = \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{m_\mu}{E_\gamma}} \quad (3.16)$$

$$x_{max} = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{m_\mu}{E_\gamma}} \quad (3.17)$$

за исключением очень асимметричного рождения пары, вблизи порога. Везде где  $\sigma < 0$ , следует положить  $\sigma = 0$  [34].

Полное сечение может быть получено, путем интегрирования выражения (3.14):

$$\sigma_{tot}(E_\gamma) = \int_{x_{min}}^{x_{max}} \frac{d\sigma}{dx_+} dx_+ = 4\alpha Z^2 r_c^2 \int_{x_{min}}^{x_{max}} \left(1 - \frac{4}{3}x_+x_-\right) \log(W) dx_+ \quad (3.18)$$

Полное сечение может быть параметризовано следующим образом:

$$\sigma_{par} = \frac{28\alpha Z^2 r_c^2}{9} \log(1 + W_M C_f E_g). \quad (3.19)$$

Параметр  $W_M$  определяется следующим выражением

$$W_M = \frac{1}{4D_n \sqrt{e} m_\mu} \quad (3.20)$$

Поведение сечения вблизи порога аппроксимируется степенью  $t = 1,479 + 0,00799D_n$  и параметром насыщения со степенью  $s = -0,88$ , которые

включены в выражение для  $E_g$ :

$$E_g = \left(1 - \frac{4m_\mu}{E_\gamma}\right)^t (W_{sat}^s + E_\gamma^s)^{1/s} \quad (3.21)$$

где

$$W_{sat} = \frac{W_\infty}{W_M} = BZ^{-1/3} \frac{4\sqrt{e}m_\mu^2}{m_e} \quad (3.22)$$

Согласование при более низких энергиях улучшается с использованием эмпирического поправочного коэффициента

$$C_f = 1 + 0,04 \log \left(1 + \frac{E_c}{E_\gamma}\right) \quad (3.23)$$

где

$$E_c = \left[-18 + \frac{4347}{BZ^{-1/3}}\right] \text{ ГэВ.} \quad (3.24)$$

Расхождение между параметризованным полным сечением проинтегрированным численно, не превышает 2% (см. рисунок 3.3) [35].

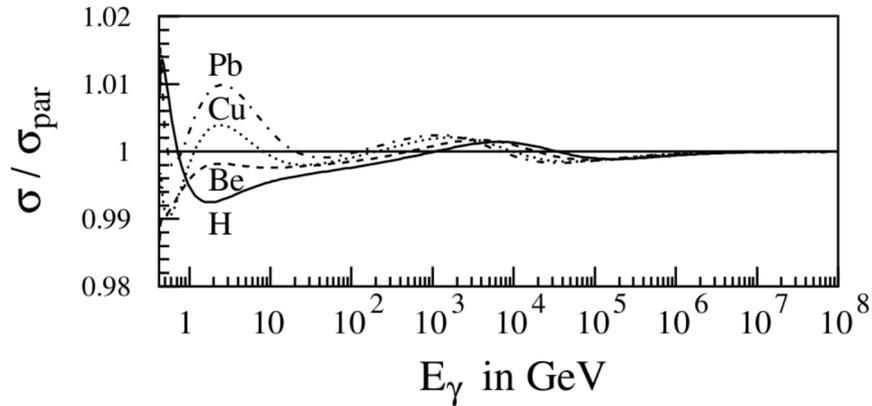


Рисунок 3.3 — Отношение численно проинтегрированного полного сечения к параметризованному, для различных элементов

Генерация событий происходит следующим образом. Задаются энергия фотона  $E_\gamma$ ,  $Z$  и  $A$  материала, в котором происходит фоторождение. Вероятность образования мюонной пары задается параметризованным полным сечением (3.19). Следующим шагом является определение распределения энергии фотона между  $\mu^+$  и  $m\mu^-$ , с помощью генерирования  $x_+$  в соответствии с выражением (3.14). Направления движения фотонов

затем генерируются с помощью вспомогательных переменных  $t$ ,  $\rho$ ,  $\psi$  (они определяются при помощи дифференциального сечения представленного в [34]).

Переменная  $t$  генерируется с плотностью, заданной следующим выражением

$$f_1(t) dt = \frac{1 - 2x_+x_- + 4x_+x_-t(1-t)}{1 + C_1/t^2} dt, \quad 0 < t \leq 1. \quad (3.25)$$

где

$$C_1 = \frac{(0,35A^{0,27})^2}{x_+x_-E_\gamma/m_\mu} \quad (3.26)$$

В рассматриваемом интервале значения функции  $f_1(t)$  лежат ниже

$$\max [f_1(t)] = \frac{1 - x_+x_-}{1 + C_1}. \quad (3.27)$$

Для генерации  $\psi$  используется значение  $t$ , полученное ранее. Плотность вероятности для  $\psi$  задается следующим выражением

$$f_2(\psi) = [1 - 2x_+x_- + 4x_+x_-t(1-t)(1 + \cos(2\psi))], \quad 0 \leq \psi \leq 2\pi. \quad (3.28)$$

Максимальное значение  $f_2(\psi)$  есть

$$\max [f_2(\psi)] = 1 - 2x_+x_- [1 - 4t(1-t)]. \quad (3.29)$$

Распределение для  $\rho$  имеет вид

$$f_3(\rho) d\rho = \frac{\rho^3 d\rho}{\rho^4 + C_2}, \quad 0 \leq \rho \leq \rho_{max}, \quad (3.30)$$

где

$$\rho_{max}^2 = \frac{1,9}{A^{0,27}} \left( \frac{1}{t} - 1 \right), \quad (3.31)$$

и

$$C_2 = \frac{4}{\sqrt{x_+x_-}} \left[ \left( \frac{m_\mu}{2E_\gamma x_+x_-t} \right)^2 + \left( \frac{m_e}{183Z^{-1/3}m_\mu} \right)^2 \right]^2 \quad (3.32)$$

Далее при помощи сгенерированных значений для  $t$ ,  $\rho$  и  $\psi$  вычисляются значения углов вылета образованных мюонов

$$\theta_+ = \frac{1}{\gamma_+} \left( u + \frac{\rho}{2} \cos \psi \right), \quad (3.33)$$

$$\theta_- = \frac{1}{\gamma_-} \left( u - \frac{\rho}{2} \cos \psi \right), \quad (3.34)$$

$$\phi = \frac{\rho}{u} \sin \psi \quad (3.35)$$

где

$$\gamma_{\pm} = \frac{E_{\mu}^{\pm}}{m_{\mu}}$$

и

$$u = \sqrt{\frac{1}{t} - 1}$$

### 3.3 Учет начального состояния электрона

Фактор потока  $\Gamma_e^t$  определяет вероятность того, что поперечно поляризованный фотон будет излучен электроном, т. е. количество фотонов  $dN$  с энергией в промежутке между  $z_e$  и  $z_e + dz_e$  и виртуальностью  $dQ_e^2$  [36]:

$$\Gamma_e^t = \frac{dN}{dQ_e^2 dz_e} = \frac{\alpha}{2\pi z_e Q_e^2} \left( \left( 1 + (1 - z_e)^2 \right) - \frac{2m^2 z_e^2}{Q_e^2} \right) \quad (3.36)$$

Таким образом, электроны излучают преимущественно низкоэнергетические фотоны, коллинеарные к направлению движения. Суммарное количество излученных фотонов в интервале  $Q^2 > Q_{min}^2$  вычисляется интегрированием  $\Gamma_e$ :

$$f_{\gamma/e}(z_e) = \int \Gamma_e^t dQ_e^2 = \frac{\alpha}{2\pi z_e} \left[ \left( 1 + (1 - z_e)^2 \right) \ln \frac{Q_{max}^2}{Q_{min}^2} - 2(1 - z_e) \right] \quad (3.37)$$

Минимальный и максимальный возможные переданные импульсы определяются следующими выражениями [36]:

$$Q_{min}^2 = \frac{m^2 z_e^2}{1 - z_e}, \quad (3.38)$$

$$Q_{max}^2 = \frac{4m^2}{1 - z_e}. \quad (3.39)$$

Выражение (3.37) может быть использовано для моделирования энергии фотона, значение которой далее может быть применено для генерирования событий фоторождения мюонной пары в поле ядра по алгоритму, описанному в пункте 3.2.

Генерация энергии фотона осуществляется при помощи метода фон Неймана [37]. Для применения метода Неймана необходимо найти

максимальное значение функции  $f_{\gamma/e}(z_e)$ . Ввиду того, что в знаменателе находится  $z_e$ , то при стремлении энергии излученного фотона к нулю, значение функции  $f_{\gamma/e}(z_e)$  стремится к бесконечности. Другими словами, вероятность излучение очень мягкого фотона стремится к бесконечности. Эта проблема носит название инфракрасной расходимости в КЭД [38].

Данную проблему можно обойти, искусственно установив минимальную энергию излучаемого фотона. Так как порог образования мюонной пары  $E_\gamma = 4m_\mu$ , то при моделировании можно не разыгрывать значения энергии фотона меньше, чем  $4m_\mu$ .

В целом, алгоритм генерации событий состоит в следующем:

- 1) Генерация энергии фотона, излученного электроном, с плотностью вероятности заданной выражением (3.37);
- 2) Проверка на основе сечения (3.14), если розыгрыш неудачен, то алгоритм начинается заново;
- 3) Моделирование характеристик мюонов, на основе алгоритма генератора, реализованного в Geant4.

### 3.4 Результаты моделирования

При помощи приведенного в 3.2 алгоритма были сгенерированы события фотообразования мюонных пар на ядрах H и Pb для энергий 10 и 100 ГэВ для процесса  $\gamma Z \rightarrow Z\mu^+\mu^-$ . Энергетические спектры, полученные в результате моделирования на ядрах H, представлены на рисунках 3.4 и 3.5. Для каждого распределения смоделировано  $10^7$  событий.

Спектр мюонов при реакции  $\gamma Z \rightarrow Z\mu^+\mu^-$  на ядрах Pb представлен на рисунке 3.6.

Полученные распределения хорошо согласуются с результатами моделирования, представленными в работе [34], а также данных из работы [39].

На рисунке 3.7 продемонстрированы результаты моделирования спектра энергии фотонов излученных электроном с энергией 100 ГэВ в поле ядра. Как и ожидалось электрон излучает преимущественно низкоэнергетические фотоны [38, 40].

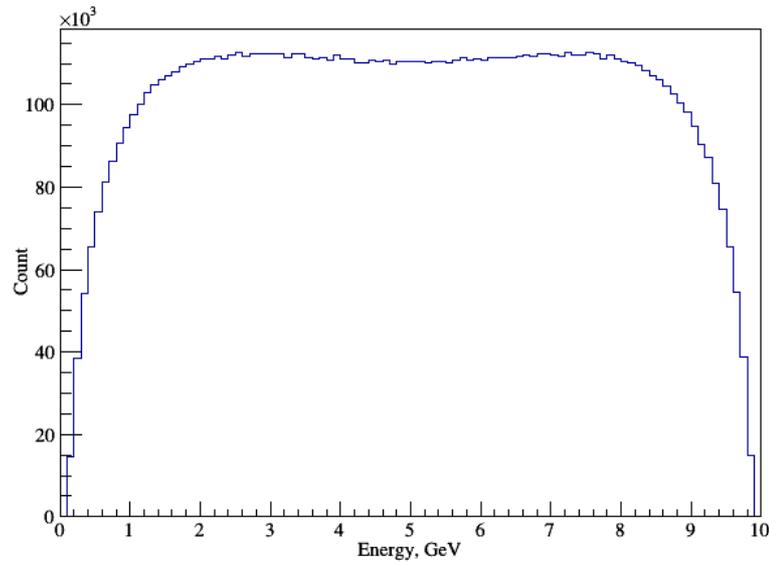


Рисунок 3.4 — Энергетический спектр мюонов при энергии фотонов 10 ГэВ  
на ядрах Н

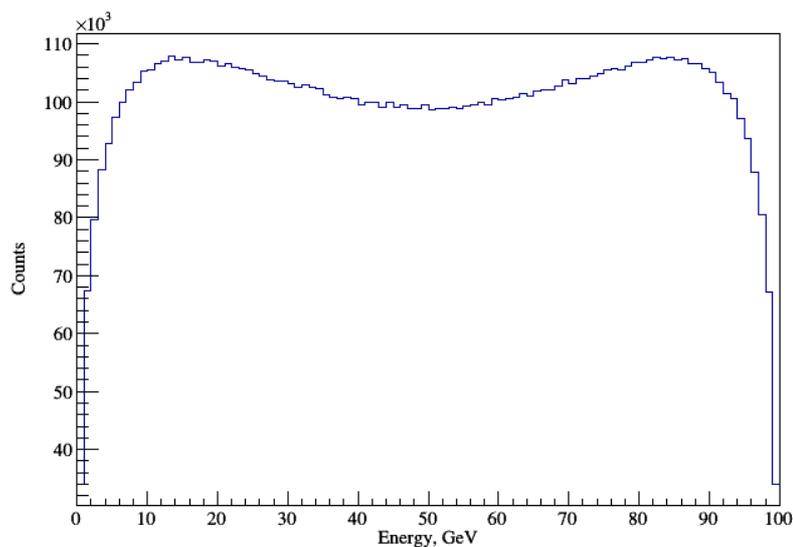


Рисунок 3.5 — Энергетический спектр мюонов при энергии фотонов 100 ГэВ  
на ядрах Н

В качестве проверки результатов моделирования процесса  $e^-Z \rightarrow e^-Z\mu^+\mu^-$  проведено сравнение с результатами работы программы CompuNER [41]. Моделирование производилось для  $10^7$  событий для каждого генератора. Ввиду того, что программа CompuNER позволяет рассчитывать процессы только с участием элементарных частиц и не

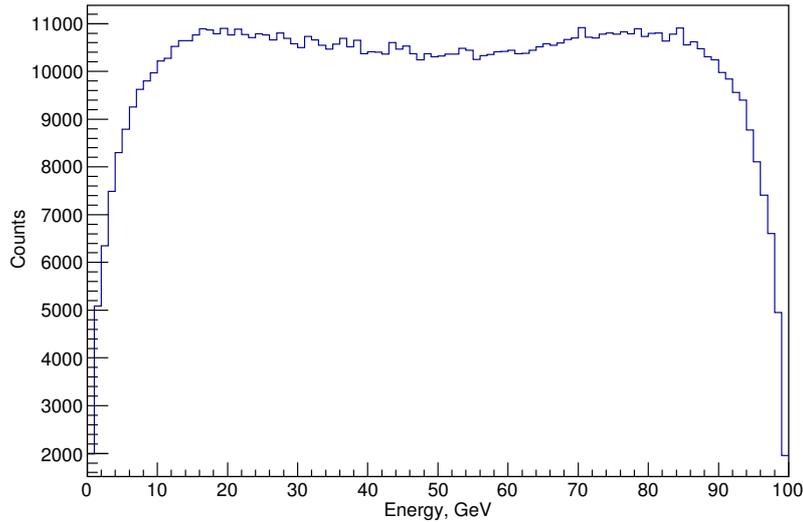


Рисунок 3.6 — Энергетический спектр мюонов при энергии фотонов 100 ГэВ на ядрах Pb

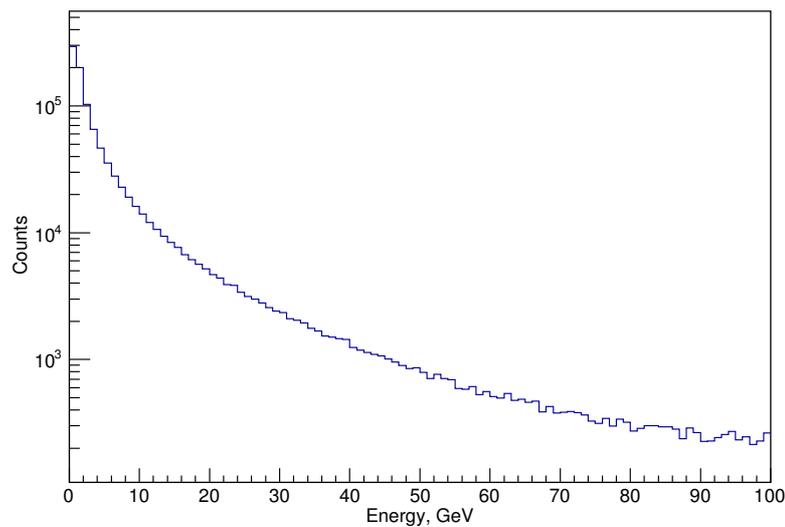


Рисунок 3.7 — Спектр фотонов излученных электроном

обладает функционалом для расчета реакций на атомах, сравнение производилось для реакции на атомах водорода. Вследствие высокого порога реакции на атомных электронах (см. 3.2) влиянием атомного электрона в атоме водорода можно пренебречь, и считать, что реакция происходит на ядре атома водорода, т.е. на протоне. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.8

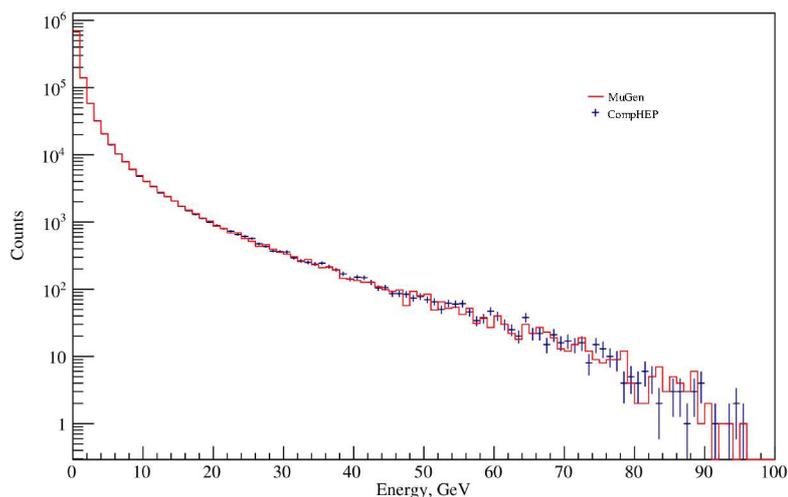


Рисунок 3.8 — Результаты сравнения работы программ MuGen и ComrHEP

Было также промоделировано угловое распределение рождаемых в процессе реакции  $e^-Z \rightarrow e^-Z\mu^+\mu^-$  мюонов (рисунок 3.9). Видно, что абсолютное большинство мюонов коллинеарны движению электрона, что согласуется с работами [38, 40].

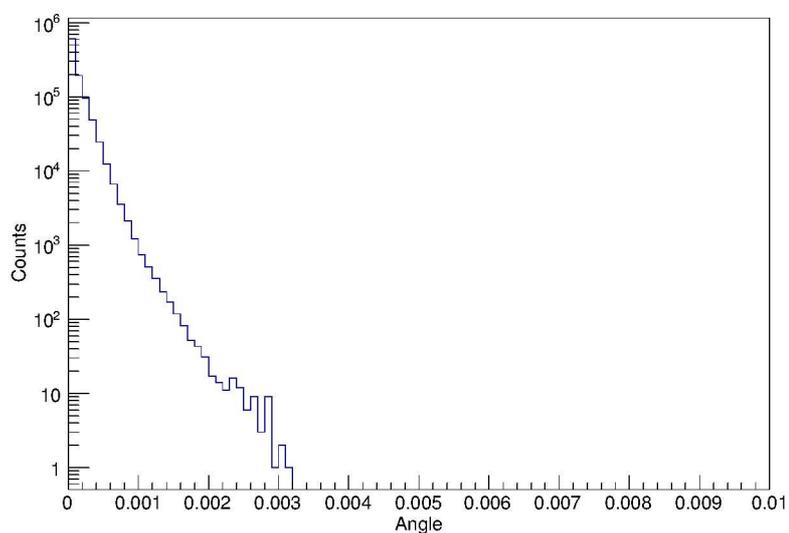


Рисунок 3.9 — Угловое распределение мюонов

Результаты моделирования процесса  $e^-Z \rightarrow e^-Z\mu^+\mu^-$  на ядрах Рв представлены на рисунке 3.10.

В связи с тем, что релятивистский электрон излучает преимущественно низкоэнергетические фотоны, то максимум

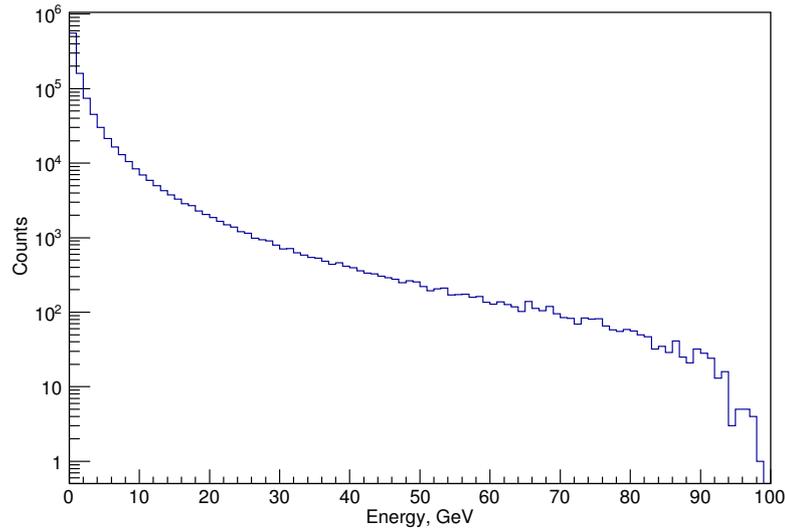


Рисунок 3.10 — Энергетический спектр мюонов при реакции  $eZ \rightarrow eZ\mu^+\mu^+$

энергетического спектра образованных мюонов также лежит в области малых энергий. Видно также, что в спектре отсутствуют мюоны с энергией  $\sim 100$  ГэВ, так как, ввиду того, что мюон имеет массу 105,7 МэВ, часть энергии начального электрона преобразуется в массу мюона. Это полностью соответствует теоретических ожиданиям. В спектре не наблюдаются мюоны с энергией больше 99,78 ГэВ.

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Целью данного раздела является проектирование и создание конкурентоспособных разработок и технологий, отвечающих предъявляемым требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Целью данной дипломной работы является разработка программной модели процесса ди-мюонного фоторождения. Сферой применения разработки является физика высоких энергий. Одним из наиболее важных приложений является калибровка детекторов экспериментальной установки NA64.

### **4.1 Предпроектный анализ**

#### **4.1.1 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

В качестве основных конкурентов разрабатываемому программному обеспечению можно выделить Geant4 и CompNep. Первый продукт представляет собой набор программных средств, позволяющий производить моделирование процессов с участием элементарных частиц в широком спектре взаимодействий. Второй продукт предлагает принципиально новый подход к моделированию взаимодействия элементарных частиц, но ограничен в вариантах реакций.

Оценочная карта анализа представлена в таблице 4.1. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i$$

где  $K$  - конкурентоспособность научной разработки или конкурента;  $B_i$  - вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  - балл  $i$ -го показателя.

Таблица 4.1 — Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к1</sub>
1. Удобство эксплуатации	0,2	4	4	3	0,8	0,8	0,6
2. Надежность	0,2	4	5	4	0,8	1	0,8
3. Возможность модификации	0,1	4	4	3	0,4	0,4	0,3
4. Потребность в ресурсах памяти	0,1	5	2	4	0,5	0,2	0,4
5. Функциональная мощность	0,1	2	5	4	0,2	0,5	0,4
6. Простота эксплуатации	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
7. Качество интеллектуального интерфейса	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
8. Необходимость использования дополнительных программ	0,1	4	4	5	0,4	0,4	0,5
Итого	1				4	4	3,7

Для оценочного сравнения были выбраны следующие характеристики: удобство эксплуатации программы (т.е. на сколько удобно пользоваться программной моделью), надежность (отсутствие ошибок и сбоев при работе программы), возможность модификации (насколько легко возможно производить изменения существующих моделей или вносить новые при

необходимости), потребность в ресурсах памяти (объем расчетных данных в Мб), функциональная мощность (количество реализованных функций), простота эксплуатации, качество интеллектуального интерфейса (удобство предлагаемого способа взаимодействия с программой) и необходимость использования дополнительных программ для обработки результатов (так, например для предоставления данных в графическом виде Geant4 требует наличия пакета Cern ROOT, а программа CompNep обладает встроенными средствами визуализации).

На основании представленного анализа можно сделать вывод, что разрабатываемое программное обеспечение является наиболее пригодным для эксплуатации при исследовании процесса ди-мюонного фоторождения. Конкурентные продукты являются сложными программными комплексами и более пригодны для изучения сложных многофакторных процессов.

#### 4.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды

Таблица 4.2 — Интерактивная матрица проекта

Возможности проекта	Сильные стороны				
	C1	C2	C3	C4	C5
B1	+	+	+	+	+
B2	+	+	-	+	+
B3	+	+	+	+	+
B4	+	+	+	+	+

проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

В таблице 4.2 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение.

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 4.3.

Таким образом, выполнив SWOT-анализ можно сделать вывод, что на данный момент преимущества разрабатываемого программного обеспечения преобладают над его недостатками. Все имеющиеся несовершенства можно легко устранить, воспользовавшись перечисленными выше возможностями.

## 4.2 Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные

Таблица 4.3 — SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>С1. Актуальности выбранной темы</p> <p>С2. Экономичность продукта</p> <p>С3. Энергоэффективность продукта</p> <p>С4. Расширяемость продукта</p> <p>С5. Удобство интерфейса</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>Сл1. Ограниченность применения</p> <p>Сл2. Зависимость от сторонних разработок</p> <p>Сл3. Малое количество моделируемых процессов</p> <p>Сл4. Для работы программы требуется ОС Linux</p>
<p>В1. Появление дополнительного спроса</p> <p>В2. Повышение скорости работы персонала</p> <p>В3. Представление результатов в графическом виде</p> <p>В4. Возможность одновременного расчета нескольких параметров</p>	<p>1. Появление дополнительного спроса и финансирования со стороны других научных групп, обеспеченных актуальностью тематики.</p> <p>2. Программа легка в освоении, что способствует эффективности ее использования</p>	<p>1. Продукт обладает потенциалом к увеличению функционала, что может расширить область применения.</p> <p>2. Разработка собственных аналогов функционала сторонних продуктов.</p>
<p>У1. Возможен низкий спрос на результаты исследования</p> <p>У2. Наличие аналогичных разработок</p> <p>У3. Сбой алгоритма программы (модели)</p> <p>У4. Задержки финансирования исследования</p>	<p>1. Увеличение спроса возможно за счет расширения функционала.</p> <p>2. Аналоги уступают в удобстве и простоте эксплуатации</p> <p>3. Поиск других источников финансирования</p>	<p>1. Добавление функционала, отсутствующего у конкурентов.</p> <p>2. Предлагаемая программа, требует меньше вычислительных ресурсов</p> <p>3. Расширение списка моделей процессов</p>

цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать, и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Уставе проекта.

Устав проекта документирует бизнес-потребности, текущее понимание потребностей заказчика проекта, а также новый продукт, услугу или результат, который планируется создать.

#### 4.2.1 Цели и результат проекта

Информация о заинтересованных сторонах проекта представлена в таблице 4.4.

В таблице 4.5 представлены цели и результат проекта.

Таблица 4.4 — Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Лаборатория ФЭЧ НИ ТПУ	Разработка программной модели процесса ди-мюонного фоторождения

Таблица 4.5 — Цели и результат проекта

Цель проекта:	Разработка программно модели процесса ди-мюонного фоторождения, для определения чувствительности экспериментальной установки NA64
Ожидаемые результаты проекта:	Программное обеспечение для анализа процесса ди-мюонного фоторождения
Критерии приемки результата проекта:	Адекватность результатов
Требования к результату проекта:	Простота и удобство эксплуатации

#### 4.2.2 Организационная структура проекта

Организационная структура проекта представлена в таблице 4.6.

Таблица 4.6 — Рабочая группа проекта

№	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1	Трифонов А. Ю. д-р физ.-мат. наук Рук. отд. ИШФВЭП	Руководитель проекта	Осуществляет детальное планирование проекта; информацию для создания и актуализации планов работ; контролирует сроки выполнения	120
2	Бедрицкий К. М. инженер	Исполнитель	Выполняет отдельные работы по проекту	480
Итого				600

#### 4.2.3 Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же

«границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта.

Таблица 4.7 — Ограничения проекта

Фактор	Ограничение / допущение
Бюджет проекта	Отсутствует
Финансирование проекта	Отсутствует
Сроки проекта	1.10.2016 г. – 31.05.2018 г.
Дата утверждения плана управления проектом	1.10.2016 г.
Дата завершения проекта	31.05.2018 г

### 4.3 Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

Таблица 4.8 — Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Литературный обзор по теме проекта	Октябрь, 2016 – Январь, 2017 г.	Литературный обзор в ВКР
2	Календарное планирование работ	Февраль 2017 – Март 2017 г.	План работ
2	Постановка цели и задач	Март 2017 – Апрель 2017 г	Раздел цели и задачи в ВКР
3	Анализ существующих решений	Апрель 2017 – Июнь 2017 г.	Раздел в ВКР о существующих решениях
4	Разработка программного обеспечения	Июль 2017 - Март 2018 г.	Результаты работы программы в ВКР
5	Обсуждение результатов	Апрель, 2018 г.	
6	Оформление ВКР	Май – Июнь 2018 г.	

### 4.3.1 Контрольные события проекта

В рамках данного раздела необходимо определить ключевые события проекта, определить их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты. Эту информация сведена в таблицу 4.8.

### 4.3.2 План проекта

В рамках планирования научного проекта построен календарный и линейный график проекта.

Линейный график представлен в таблице 4.9.

Таблица 4.9 — Календарный план проекта

Код работы (из ИСР)	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных)
1	Составление технического задания	14	03.10.16	16.10.16	Трифонов А. Ю., Бедрицкий К. М.
2	Литературный обзор	105	17.10.16	29.01.17	Бедрицкий К. М.
3	Теоретический анализ	21	30.01.17	19.02.17	Бедрицкий К. М.
4	Постановка задачи исследования	14	20.02.17	5.03.17	Трифонов А. Ю., Бедрицкий К. М.
5	Разработка программной модели	210	6.03.17	5.02.18	Бедрицкий К. М.
6	Обсуждение результатов	20	6.02.18	25.02.18	Трифонов А. Ю., Бедрицкий К. М.
7	Составление пояснительной записки	64	26.02.18	30.04.18	Бедрицкий К. М.
8	Оформление ВКР	31	1.05.18	31.05.18	Бедрицкий К. М.
	Итого	479			



Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. График представлен в таблице 4.10.

#### 4.3.3 Бюджет научного исследования

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

- материальные затраты;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

#### 4.3.4 Расчёт материальных затрат

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$C_M = (1 + k_T) \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх}i}$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{расх}i}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, принимаются в пределах 15-25 % от стоимости материалов.

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на электроэнергию и приобретение канцелярских товаров. Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в таблице 4.11.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$Z_M = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 5,8 \cdot 0,5 \cdot 960 = 2784,$$

где  $C_{эл}$  – тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб. за 1 кВт·ч);

$P$  – мощность электрооборудования, кВт;

$F_{об}$  – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 2784 рубля.

Таблица 4.11 — Материальные затраты

Наименование	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Электроэнергия	480 кВт·ч	5,8	2784
Бумага	130	0,9	117
Печать на листе А4	130	1,8	234
Ручка	2	50	100
Доступ в интернет	6 месяцев	350	2100
Персональный компьютер			35000
Транспортно-заготовительные расходы			0
Итого по статье $Z_M$			40335

#### 4.3.5 Основная заработная плата исполнителей темы

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

$$C_{ЗП} = Z_{осн} + Z_{доп}$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}$$

где  $T_{раб}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн.

$Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле

$$Z_{дн} = (Z_m \cdot M) / F_D$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

$F_D$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 4.12).

Таблица 4.12 — Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
– выходные дни;	52	104
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени:		
– отпуск;	48	24
– невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	223

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_B \cdot k_P$$

где  $Z_B$  – базовый оклад, руб.;

$k_P$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Месячный должностной оклад руководителя:

$$Z_m = 38800 \cdot 1,3 = 50440 \text{ руб.}$$

Месячный должностной оклад инженера:

$$З_M = 9489 \cdot 1,3 = 12335,7 \text{ руб.}$$

Среднедневная заработная плата руководителя:

$$З_{дн} = \frac{50440 \cdot 10,4}{251} = 2089,94 \text{ руб/день}$$

Среднедневная заработная плата инженера:

$$З_{дн} = \frac{12335,7 \cdot 10,4}{223} = 575,3 \text{ руб/день}$$

Основная заработная плата руководителя:

$$З_{осн} = 2089,94 \cdot 8 = 16719,52 \text{ руб.}$$

Основная заработная плата инженера:

$$З_{осн} = 575,3 \cdot 179 = 102978,7 \text{ руб.}$$

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.13

Таблица 4.13 — Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$З_б$	$k_p$	$З_M$ , руб.	$З_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$З_{осн}$ , руб.
Руководитель	38800	1,3	50440	2089,94	8	16719,52
Инженер	9889	1,3	12335,7	575,3	179	102978,7

#### 4.3.6 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10 – 15 % от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн}$$

где  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{доп}$  – коэффициент дополнительной зарплаты.

В таблице 4.14 приведена форма расчета основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 4.14 — Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата	16719,52	102978,7
Дополнительная зарплата	2006,34	12357,44
Итого по статье Сзп	18725,86	115336,14

#### 4.3.7 Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп})$$

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

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30 %. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1 %.

Отчисления руководителя на социальные нужды (27,1 %):

$$C_{внеб} = 0,271 \cdot 18725,86 = 5074,71$$

Отчисления инженера на социальные нужды (27,1 %):

$$C_{внеб} = 0,271 \cdot 115336,14 = 31256,09$$

#### 4.3.8 Накладные расходы

В данную статью входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных (общеуниверситетских) служб, которые в равной степени относятся ко всем выполняемым НИР. По этой статье учитываются

оплата труда административно-управленческого персонала, содержание зданий, оргтехники и хозинвентаря, амортизация имущества, расходы по охране труда и подготовке кадров.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{НАКЛ}} = k_{\text{НАКЛ}} \cdot (Z_{\text{ОСН}} + Z_{\text{ДОП}})$$

где  $k_{\text{ВНЕБ}}$  – коэффициент накладных расходов.

Коэффициент накладных расходов, берем 20 %.

$$C_{\text{ВНЕБ}} = 0,2 \cdot (16719,52 + 2006,34) + 0,2 \cdot (102978,7 + 12357,44) = 26812,4 \text{ руб.}$$

#### 4.3.9 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой 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 по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.15

Таблица 4.15 — Расчёт бюджета затрат исследовательского проект

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты исследования	40335
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	119698,22
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	14363,78
4. Отчисления во внебюджетные фонды	36330,8
5. Накладные расходы	26812,4
Бюджет затрат исследования	237540,2

#### 4.4 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин:

финансовой эффективности и ресурсоэффективности. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения. Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}$$

где  $I_{\Phi}^p$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Таким образом:

$$I_{\Phi}^p = \frac{237540,2}{389821,54} = 0,61$$

$$I_{a1}^p = \frac{389821,54}{389821,54} = 1$$

$$I_{a2}^p = \frac{325895,66}{389821,54} = 0,84$$

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

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p$$

где  $I_m$  – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра;

$b_i^a$  – бальная оценка  $i$ -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проведем в форме таблицы, которая приведена ниже (см. таблицу 4.16).

$$I_m^{TP} = 0,1 * 5 + 0,2 * 4 + 0,2 * 4 + 0,2 * 5 + 0,1 * 5 + 0,2 * 4 = 4,4$$

$$I_m^{a1} = 0,1 * 4 + 0,2 * 5 + 0,2 * 4 + 0,2 * 5 + 0,1 * 3 + 0,2 * 4 = 4,3$$

Таблица 4.16 — Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерий оценки	Вес критерия	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Удобство эксплуатации	0,1	5	4	4
2. Надежность	0,2	4	5	4
3. Возможность модификации	0,2	4	4	4
4. Функциональная мощность	0,2	5	5	4
5. Простота эксплуатации	0,1	5	3	2
6. Необходимость использования дополнительных программ	0,2	4	4	5
Итого	1	4,4	4,3	4

$$I_m^{a2} = 0,1 * 4 + 0,2 * 4 + 0,2 * 4 + 0,2 * 4 + 0,1 * 2 + 0,2 * 5 = 4$$

Сравнительная характеристика проводилась по следующим характеристикам: удобство эксплуатации программы (т.е. на сколько удобно пользоваться программной моделью), надежность (отсутствие ошибок и сбоев при работе программы), возможность модификации (насколько легко возможно производить изменения существующих моделей или вносить новые при необходимости), функциональная мощность (количество реализованных функций), простота эксплуатации, качество интеллектуального интерфейса (удобство предлагаемого способа взаимодействия с программой) и необходимость использования дополнительных программ для обработки результатов (например для предоставления данных в графическом виде и т.д.).

Интегральный показатель эффективности разработки ( $I_{финр}^p$ ) и аналога ( $I_{финр}^a$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_{ф}^p}, \quad I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_{ф}^a}$$

Тогда получаем

$$I_{\text{финр}}^p = \frac{4,4}{0,61} = 7,21, \quad I_{\text{финр}}^{a1} = \frac{4,3}{1} = 4,3, \quad I_{\text{финр}}^{a2} = \frac{4}{0,84} = 4,76$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^a}$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ср}}$  – сравнительная эффективность проекта;

$I_{\text{финр}}^p$  – интегральный показатель разработки;

$I_{\text{финр}}^a$  – интегральный технико-экономический показатель аналога.

В результате:

$$\mathcal{E}_{\text{ср1}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^{a1}} = \frac{7,21}{4,3} = 1,68$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср2}} = \frac{I_{\text{финр}}^p}{I_{\text{финр}}^{a2}} = \frac{7,21}{4,76} = 1,51$$

Таблица 4.17 — Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	0,84	0,61
2	Интегральный показатель ресурсо-эффективности разработки	4,3	4	4,4
3	Интегральный показатель эффективности	4,3	4,76	7,21
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,68	1,51	1

Сравнение значений интегральных показателей позволяет судить о хоршей эффективности существующего варианта решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Итоговая плановая себестоимость составила 237540,2 рублей.

## **5 Социальная ответственность**

Разработанный в рамках магистерской диссертации проект является математическим и программным обеспечением, предназначенным для анализа процесса ди-мюонного фоторождения. Разработка программной модели велась исключительно при помощи компьютера. Сферой применения разработки является физика высоких энергий. Одним из наиболее важных приложений является калибровка детекторов экспериментальной установки NA64. Независимо от конкретного применения, взаимодействие пользователя с разработанной программой в любом случае производится с помощью программных и аппаратных средств ПЭВМ, а также с помощью периферийных устройств, подключенных к ПЭВМ.

Данный раздел посвящен анализу вредных и опасных факторов производственной среды для операторов ПЭВМ и, в частности, для физиков-экспериментаторов, которые будут использовать продукт в наиболее перспективном направлении его применения; разработке программ по минимизации воздействия вредоносного и опасного влияния выявленных факторов, а также программ по снижению вредных воздействий на окружающую среду, экономии невозполнимых ресурсов и защите в чрезвычайных ситуациях.

### **5.1 Производственная безопасность**

Для обеспечения производственной безопасности необходимо проанализировать воздействия на человека вредных и опасных производственных факторов, которые могут возникать при разработке или эксплуатации проекта.

Производственный фактор считается вредным, если воздействие этого фактора на работника может привести к его заболеванию. Производственный фактор считается опасным, если его воздействие на работника может привести к его травме [42].

Все производственные факторы классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические и психофизические. Для

данной работы целесообразно рассмотреть физические и психофизические вредные и опасные факторы производства, характерные как для рабочей зоны программиста, как разработчика рассматриваемой в данной работе системы, так и для рабочей зоны пользователя готового продукта – физика, занимающегося моделированием. Выявленные факторы представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 — Вредные и опасные производственные факторы при выполнении работ за ПЭВМ [42]

Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
Вредные	Опасные	
1) Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны; 2) Повышенный уровень электромагнитных излучений; 3) Недостаточная освещенность рабочей зоны; 4) Монотонный режим работы.	1) Опасность поражения электрическим током; 2) Опасность возникновения пожара.	1) СанПиН 2.2.4.548-96; 2) СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03; 3) СП 52.13330.2011; 4) ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ; 5) СНиП 21-01-97.

## 5.1.1 Вредные производственные факторы

### 5.1.1.1 Микроклимат

Микроклимат производственных помещений определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха. Отклонения данных параметров от нормы оказывает вредное влияние на человека, при этом обычно возникают ухудшение самочувствия работника, снижение эффективности работы и различные заболевания. Неблагоприятные условия могут вызывать перенапряжение механизма терморегуляции, что ведет к перегреву или переохлаждению организма. Высокая температура приводит к быстрой утомляемости работника, может привести к перегреву организма, тепловому удару. А низкая температура может вызвать местное или общее охлаждение организма, и привести к простудному заболеванию либо обморожению. Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное

и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление.

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

В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Для удобства работы в помещении необходимо нормирование параметров микроклимата и применение защитных мероприятий защиты от вредного влияния отклонения параметров микроклимата. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления.

Санитарные нормы устанавливают оптимальные и допустимые значения величин показателей микроклимата рабочих мест для различных категорий работ в теплый и холодный периоды года. Для программиста или оператора ПЭВМ категория работ является лёгкой (1а), т.к. работа проводится сидя, без систематических физических нагрузок. Оптимальные параметры микроклимата в офисных помещениях приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 — Оптимальные параметры микроклимата офисных помещений оператора ПЭВМ

Время года	Температура воздуха	Относительная влажность	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22-24	60-40	0,1
Теплый	23-25	60-40	0,1

Холодный период года – среднесуточная температура воздуха 10 °С и ниже, теплый период года – среднесуточная температура воздуха выше 10 °С.

### 5.1.1.2 Повышенный уровень электромагнитных излучений

Уровень электромагнитных излучений на рабочем месте оператора ПЭВМ является вредным фактором производственной среды, величины параметров которого определяются СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Основными источниками электромагнитных излучений в помещениях для работы операторов ПЭВМ являются дисплеи компьютеров и мобильных устройств, сеть электропроводки, системный блок, устройства бесперебойного питания, блоки питания.

Излучения, применительно к дисплеям современных ПЭВМ, можно разделить на следующие классы:

- переменные электрические поля (5 Гц – 400 кГц);
- переменные магнитные поля (5 Гц – 400 кГц).

Воздействие данных излучений на организм человека носит необратимый характер и зависит от напряженности полей, потока энергии, частоты колебаний, размера облучаемого тела. При воздействии полей, имеющих напряженность выше предельно допустимого уровня, развиваются нарушения нервной системы, кровеносной сердечно-сосудистой системы, органов пищеварения и половой системы [43].

В таблице 5.3 приведены допустимые уровни параметров электромагнитных полей.

Таблица 5.3 — Временные допустимые уровни электромагнитных полей, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах [44]

Наименование параметров		Допустимые значения
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
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

### 5.1.1.3 Шум

Длительное воздействие шума может привести к ухудшению слуха, а в отдельных случаях – к глухоте. Шумовое загрязнение среды на рабочем месте неблагоприятно воздействует на работающих: снижается внимание, увеличивается расход энергии при одинаковой физической нагрузке, замедляется скорость психических реакций и т.п. В результате снижается производительность труда и качество выполняемой работы.

Нормирование шума призвано предотвратить нарушение слуха и снижение работоспособности и производительности труда работающих. Для разных видов шумов применяются различные способы нормирования.

Для постоянных шумов нормируются уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц. Для непостоянных шумов нормируется так же эквивалентный уровень звука. Допустимые уровни звукового давления для рабочих мест служебных помещений и для жилых и общественных зданий и их территорий различны.

Согласно ГОСТ 12.1.003-83 при разработке технологических процессов проектировании, изготовлении и эксплуатации машин, производственных зданий и сооружений, а также при организации рабочих мест следует принимать все необходимые меры по снижению шума, воздействующего на человека, до значений, не превышающих допустимые.

Методы и средства коллективной защиты в зависимости от способа реализации подразделяются на строительно-акустические, архитектурнопланировочные и организационно-технические и включают в себя:

- изменение направленности излучения шума;
- рациональную планировку предприятий и производственных помещений;
- акустическую обработку помещений;
- применение звукоизоляции.

Согласно ГОСТ 23499-2009 звукоизоляционный материал: материал, характеризующийся вязкоупругими свойствами и обладающий динамической

жесткостью не более 250 МПа/м. Звукопоглощающий материал: материал, имеющий сквозную пористость и характеризуемый относительно высоким коэффициентом звукопоглощения ( $\alpha < 0,2$ ).

Звукоизоляционные прокладочные материалы и изделия изготавливают следующих видов:

— мягкие, полужесткие и жесткие изделия полной заводской готовности в виде матов, плит (прошивные маты, древесно-волоконистые плиты, изделия из пенопластов, пенорезины, полиуретана);

— засыпки (прокаленный песок, керамзитовый гравий, щебень из пористого металлургического шлака, щебень и песок из вспученного перлита и другие пористые заполнители);

— рулонные и плиточные покрытия полов (основный и безосновный поливинилхлоридный линолеум, поливинилхлоридные плитки, ворсовые синтетические ковры).

Звукопоглощающие материалы и изделия изготавливают следующих видов:

— жесткие и твердые изделия полной заводской готовности (плиты на крахмальном или синтетическом связующем с отделочным фактурным слоем, плиты из ячеистого бетона, гипсовые литые плиты);

— полужесткие и мягкие изделия полной заводской готовности (плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем с декоративным покрытием, изделия из пенопластов);

— материалы и изделия, применяемые в качестве составных элементов звукопоглощающих конструкций (изделия из минеральной ваты в защитных оболочках, защитные перфорированные покрытия из металла, гипса, защитные оболочки из натуральной и стеклянной тканей, холстов, синтетических пленок).

Наиболее эффективны средства индивидуальной защиты, как правило, в области высоких частот. Средства индивидуальной защиты включают в себя противошумные вкладыши (беруши), наушники, шлемы и каски, специальные костюмы.

#### 5.1.1.4 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Недостаточная освещенность рабочей зоны является вредным производственным фактором, возникающим при работе с ПЭВМ, уровни которого регламентируются СП 52.13330.2011.

Причиной недостаточной освещенности являются недостаток естественного и искусственного освещения, пониженная контрастность.

Работа с компьютером подразумевает постоянный зрительный контакт с дисплеем ПЭВМ и занимает от 80 % рабочего времени. Недостаточность освещения снижает производительность труда, увеличивает утомляемость и количество допускаемых ошибок, а также может привести к появлению профессиональных болезней зрения.

Разряд зрительных работ программиста и оператора ПЭВМ относится к разряду III и подразряду г (работы высокой точности).

Произведем расчет количества источников освещения.

Длина помещения  $a=6000$ мм, ширина  $b=4800$ мм.

Выбираем лампу дневного света ЛХБ, световой поток которой равен ФЛД = 3100 Лм при мощности 40 Вт.

Выбираем светильники с люминесцентными лампами типа ОД-2-40. Этот светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна 1230 мм, ширина - 266 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda$ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1 – 1,3. Принимаем  $\lambda = 1,2$ . Высота помещения:  $H = 3600$  мм.

Расстояние светильников от перекрытия:  $h_c = 400$  мм. Высота светильника над полом, высота подвеса:

$$h_{\text{п}} = H - h_c = 3600 - 400 = 3200 \text{ мм.}$$

Высота рабочей поверхности над полом:  $h_{\text{рп}} = 800$  мм. Расчетная высота, высота светильника над рабочей поверхностью:

$$h = h_{\text{п}} - h_{\text{рп}} = 3200 - 800 = 2400 \text{ мм.}$$

Для двухламповых светильников ОД при одиночной установке или при непрерывных рядах из одиночных светильников в соответствии с требованиями наименьшая допустимая высота подвеса над полом составляет 3,5 м. Рассчитанная величина  $h = 2400$  мм не соответствует требованиям.

Оптимальное расстояние между светильниками  $L$  должно составлять:

$$L = \lambda * h = 1,2 * 2400 \text{ мм} = 2880 \text{ мм} \quad (5.1)$$

Оптимальное расстояние от крайних светильников до стены является равно  $L/3 = 2880/3 = 960$  мм.

Расчет общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} \quad (5.2)$$

где нормируемая минимальная освещенность (по СНиП 23-05-95):  
 $E_H = 300$  Лк (разряд зрительной работы III г: высокой точности);

Площадь освещаемого помещения:  $S = 28,8$  м<sup>2</sup>.

Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, наличие в атмосфере дыма, пыли:  $z = 1,2$ .

Коэффициент неравномерности освещения:  $Z = 1,1$  (для люминесцентных ламп).

Коэффициент использования светового потока:  $\eta = 0,49$ . Тогда число ламп в помещении:

$$N = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{\Phi \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 1,2 \cdot 28,8 \cdot 1,1}{3100 \cdot 0,49} = 7,5$$

Расчет искусственного освещения показал, что нужно 8 ламп для освещения, т.е. 4 светильников ОД-2-40.

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 28,8 \cdot 1,2 \cdot 1,1}{8 \cdot 0,49} = 2909,39$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10 \% \leq \frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \leq 20 \%$$

$$\frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100 \% = \frac{3100 - 2909,39}{3100} = 6,15 \%$$

Таким образом:  $-10 \% \leq 6,15 \% \leq 20 \%$ , необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

Для планирования расположения светильников нужно рассчитать расстояние между светильниками и расстояние от светильника до края помещения. Расстояние между светильниками по длине помещения  $L_a$  определяется по формуле:

$$L_a + 2 \cdot 266 + 2 \cdot L_a/3 = 6000 \text{ мм.}$$

Получаем  $L_a = 3280,8$  мм и  $L_a/3 = 1093,6$  мм. Видно, что значение  $L_a$  больше оптимального расстояния между светильниками  $L$ . Аналогично расстояние между светильниками по ширине:  $L_b = 1296$  мм и  $L_b/3 = 432$  мм.

Результат планирования расположения светильников показан на рисунке 5.1.

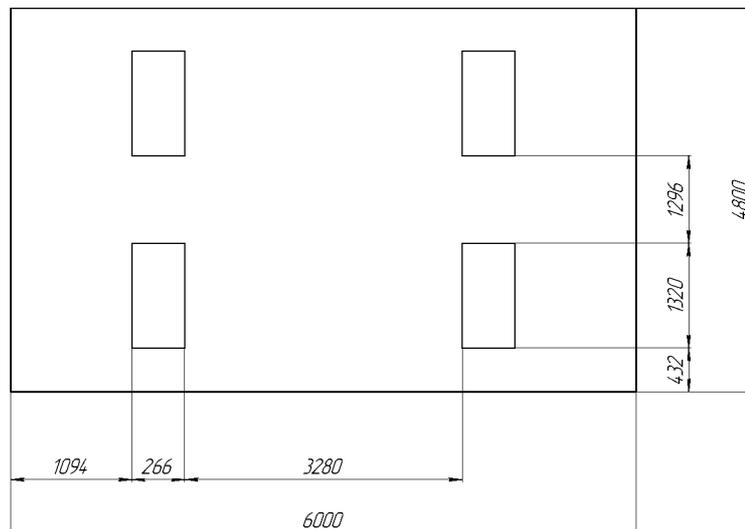


Рисунок 5.1 — Схема размещения источников освещения

### 5.1.1.5 Монотонный режим работы

При работе с ПЭВМ основным фактором, влияющим на нервную систему программиста или пользователя является огромное количество информации, которое он должен воспринимать. Это является сложной задачей, которая очень сильно влияет на сознание и психофизическое состояние из-за монотонности работы. Поэтому меры, позволяющие снизить воздействие этого вредного производственного фактора, которые регулируются СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, являются важными в работе оператора ПЭВМ. Они позволяют увеличить производительность труда и предотвратить появление профессиональных болезней.

Организация работы с ПЭВМ осуществляется в зависимости от вида и категории трудовой деятельности. Виды трудовой деятельности разделяются на 3 группы: группа А – работа по считыванию информации с экрана с предварительным запросом; группа Б – работа по вводу информации; группа В – творческая работа в режиме диалога с ПЭВМ. Работа программиста-разработчика рассматриваемой в данной работе системы относится к группам А и Б, в то время, как деятельность врача-специалиста, который будет использовать систему в профессиональной деятельности, относится к группе В. Категории трудовой деятельности различаются по степени тяжести выполняемых работ. Для снижения воздействия рассматриваемого вредного фактора предусмотрены регламентированные перерывы для каждой группы работ – таблица 5.4.

## 5.1.2 Опасные производственные факторы

### 5.1.2.1 Электробезопасность

Основными причинами воздействия тока на человека являются:

- случайное прикосновение или приближение на опасное расстояние к токоведущим частям;
- появление напряжения на металлических частях оборудования в результате повреждения изоляции или ошибочных действий персонала;
- шаговое напряжение на поверхности земли в результате замыкания провода на землю;

Таблица 5.4 — Суммарное время регламентированных перерывов в зависимости от продолжительности работы, вида категории трудовой деятельности с ПЭВМ [44]

Категория работы с ПЭВМ	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работ с ПЭВМ			Суммарное время регламентированных перерывов, мин.	
	группа А, количество знаков	группа Б, количество знаков	группа В, ч	при 8-часовой смене	при 12-часовой смене
І	до 20 000	до 15 000	до 2	50	80
ІІ	до 40 000	до 30 000	до 4	70	110
ІІІ	до 60 000	до 40 000	до 6	90	140

- появление напряжения на отключенных токоведущих частях, на которых работают люди, вследствие ошибочного включения установки;
- освобождение другого человека, находящегося под напряжением;
- воздействие атмосферного электричества, грозových разрядов.

Неисправность проводки установки может стать причиной поражения электрическим током. Прохождение тока может вызывать у человека раздражение и повреждение различных органов. Пороговый не отпускающий ток составляет 50 Гц (6-16мА). Защита от воздействия электрического тока осуществляется путем проведения организационных, инженерно-технических и лечебно-профилактических мероприятий.

Согласно ГОСТ 12.1.019. ССБТ, электробезопасность должна обеспечиваться конструкцией электроустановок, техническими способами и средствами защиты. Электроустановки и их части выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным и вредным воздействиям электрического тока и электромагнитных полей, и соответствовать требованиям электробезопасности.

Согласно ПУЭ 7.4 «Правила устройства электроустановок» помещение, в котором находится установка, предназначенная для нанесения оксидов и оксинитридов титана на стальные подложки, относится к помещениям без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия,

создающие повышенную или особую опасность. К таким условиям относятся: сырость (влажность более 75%), токопроводящей пыли, токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.); высокие температуры (выше 35°C); возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей технологическим аппаратам, механизмам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой. В лаборатории находятся электрические установки с классами напряжения до 1кВ, в которых, согласно ГОСТ12.1.038-82 ССБТ, предельно допустимые безопасные значения тока, напряжения и сопротивления не должны превышать значений 0,1 мА, 36В и 4 Ом соответственно. Для предотвращения поражения электрическим током следует проводить следующие мероприятия:

- содержать оборудование в работоспособном состоянии и эксплуатировать его в соответствии с нормативно-техническими документами;

- своевременно проводить техническое обслуживание;

- соблюдать технику безопасности при работе с оборудованием;

- проводить инструктаж для работников.

В качестве мероприятий по обеспечению безопасности работы с электрооборудованием могут быть использованы:

- изоляция токоведущих частей;

- малое напряжение в электрических цепях;

- защитное заземление, зануление, защитное отключение;

- применение разделяющих трансформаторов;

- использование оболочек и блокировок для предотвращения возможности случайного прикосновения к токоведущим частям и ошибочных действий или операций;

- средства индивидуальной защиты и предохранительные приспособления: диэлектрические перчатки, галоши, изолирующие штанги, изолирующие и электроизмерительные клещи, диэлектрические резиновые ковры, указатели напряжения.

### 5.1.2.2 Опасность возникновения пожара

Возникновение пожара является опасным производственным фактором, т.к. пожар на предприятии наносит большой материальный ущерб, а также часто сопровождается травмами и несчастными случаями. Регулирование пожаробезопасности производится СНиП 21-01-97.

Согласно НПБ 105-03 используемое помещение относится к категории пожароопасной В4, т.е. в которых находятся горючие и трудно горючие жидкости, вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), но удельная пожарная нагрузка на участке находится в интервале  $1-180 \text{МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ .

Данное производство, согласно СНиП II-М.2-62 относится к категории пожароопасности В, т.е. характеризуются наличием жидкости с температурой вспышки паров выше  $61 \text{ }^\circ\text{C}$ ; горючей пыли или волокон, нижний предел взрываемости которых более  $65 \text{ г/м}^3$  к объему воздуха; веществ, способных только гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом; твердых сгораемых веществ и материалов.

В помещениях с ПЭВМ повышен риск возникновения пожара из-за присутствия множества факторов: наличие большого количества электронных схем, устройств электропитания, устройств кондиционирования воздуха; возможные неисправности электрооборудования, освещения, или неправильная их эксплуатация может послужить причиной пожара.

Возможные виды источников воспламенения:

- искра при разряде статического электричества;
- искры от электрооборудования;
- искры от удара и трения;
- открытое пламя [45].

### 5.1.3 Мероприятия по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

Для поддержания нормальных значений параметров микроклимата на рабочих местах рекомендуется оснащать их системами отопления,

вентиляции и кондиционирования воздуха. Также, в некоторых случаях, целесообразно обеспечить питьевое водоснабжение. В помещениях для работы с ПЭВМ должна производиться ежедневная влажная уборка, а также систематическое проветривание после каждого часа работы [46].

Для защиты операторов ПЭВМ от негативного воздействия электромагнитных полей в первую очередь необходимо, чтобы используемая техника удовлетворяла нормам и правилам сертификации. При работе с ПЭВМ установлены регламентированные перерывы, а также иногда предусмотрено использование экранов и фильтров в целях защиты оператора [44].

Для создания и поддержания благоприятных условий освещения для операторов ПЭВМ, их рабочие места должны соответствовать санитарно-эпидемиологическим правилам СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Рабочее помещение должно иметь естественное и искусственное освещение, соответствующее показателям, представленным в таблице 6. Для рассеивания естественного освещения следует использовать жалюзи на окнах рабочих помещений. В качестве источников искусственного освещения должны быть использованы люминесцентные лампы, лампы накаливания – для местного освещения [47].

Для предупреждения преждевременной утомляемости пользователей ПЭВМ рекомендуется организовывать рабочую смену путем чередования работ с использованием ПЭВМ и без него. В случаях, когда характер работы требует постоянного взаимодействия с компьютером (работа программиста-разработчика) с напряжением внимания и сосредоточенности, при исключении возможности периодического переключения на другие виды трудовой деятельности, не связанные с ПЭВМ, рекомендуется организация перерывов на 10–15 мин. через каждые 45–60 мин. работы. При высоком уровне напряженности работы рекомендуется психологическая разгрузка в специально оборудованных помещениях [44].

К мероприятиям по предотвращению возможности поражения электрическим током относятся:

— при производстве монтажных работ необходимо использовать только исправный инструмент, аттестованный службой КИПиА;

- с целью защиты от поражения электрическим током, возникающим между корпусом приборов и инструментом при пробое сетевого напряжения на корпус, корпуса приборов и инструментов должны быть заземлены;
- при включенном сетевом напряжении работы на задней панели должны быть запрещены;
- все работы по устранению неисправностей должен производить квалифицированный персонал;
- необходимо постоянно следить за исправностью электропроводки [44, 48].

Для профилактики организации действий при пожаре должен проводиться следующий комплекс организационных мер: должны обеспечиваться регулярные проверки пожарной сигнализации, первичных средств пожаротушения; должен проводиться инструктаж и тренировки по действиям в случае пожара; не должны загромождаться или блокироваться пожарные выходы; должны выполняться правила техники безопасности и технической эксплуатации электроустановок; во всех служебных помещениях должны быть установлены «Планы эвакуации людей при пожаре и других ЧС», регламентирующие действия персонала при возникновении пожара.

Для предотвращения пожара помещение с ПЭВМ должно быть оборудовано первичными средствами пожаротушения: углекислотными огнетушителями типа ОУ-2 или ОУ-5; пожарной сигнализацией, а также, в некоторых случаях, автоматической установкой объемного газового пожаротушения [49].

Согласно ППБ 01-03 в здании, где ведутся работы, предусмотрены инженерно-технические решения, которые обеспечивают в случае пожара эвакуацию людей (аварийные выходы), подачу средств пожаротушения к очагу, есть сигнализация и работает оповещение о пожаре. Пожарные краны, огнетушители и другая пожарная техника для защиты объектов соответствует (ГОСТ 12.1.004-91 с измен. 21.10.1993 г). На рисунке 5.2 представлен план эвакуации 248 аудитории 11 корпуса, где проводилась работа.

На плане видны основные эвакуационные выходы и огнетушители. Из огнетушителей разных видов наиболее широко используются углекислотные, порошковые и воздушно-пенные. Огнетушители водопенные используются при тушении пожаров классов А и В (дерево, краски и ГСМ) не допускается применять для тушения электроустановок под напряжением, а также щелочных металлов; эксплуатируются при температуре от +5 до +50°С. Порошковые огнетушители используются в качестве первичного средства тушения пожаров класса А (твердых веществ), В (жидких веществ), С (газообразных веществ) и электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В; огнетушители не пригодны для тушения загораний щелочных и щелочноземельных металлов и других материалов, горение которых может происходить без доступа воздуха.



Рисунок 5.2 — План эвакуации из рабочего помещения

Огнетушители углекислотные предназначены для тушения загораний различных веществ, горение которых не может происходить без доступа воздуха, загораний на электрифицированном железнодорожном транспорте, электроустановок, находящихся под напряжением не более 10кВ.

Преимуществом углекислотных огнетушителей является отсутствие следов тушения. Огнетушители не предназначены для тушения загорания веществ, горение которых может происходить без доступа воздуха (алюминий, магний и их сплавы, натрий, калий). В лабораториях расположены огнетушители порошковые ОП-4(з)-АВСЕ02 (предназначен для тушения твердых, жидких и газообразных веществ и электроустановок до 1000В).

## **5.2 Экологическая безопасность**

В данном разделе рассматривается воздействие на окружающую среду деятельности по разработке проекта, а также самого продукта в результате его реализации на производстве.

Разработка программного обеспечения и работа за ПЭВМ не являются экологически опасными работами, потому объект, на котором производилась разработка продукта, а также объекты, на которых будет производиться его использование операторами ПЭВМ относятся к предприятиям пятого класса, размер санитарной зоны для которых равен 50 м [50].

Непосредственно программный продукт, разработанный в ходе выполнения магистерской диссертации, не наносит вреда окружающей среде ни на стадиях его разработки, ни на стадиях эксплуатации. Однако, средства, необходимые для его разработки и эксплуатации могут наносить вред окружающей среде.

Современные ПЭВМ производят практически без использования вредных веществ, опасных для человека и окружающей среды. Исключением являются аккумуляторные батареи компьютеров и мобильных устройств. В аккумуляторах содержатся тяжелые металлы, кислоты и щелочи, которые могут наносить ущерб окружающей среде, попадая в гидросферу и литосферу, если они были неправильно утилизированы. Для утилизации аккумуляторов необходимо обращаться в специальные организации, специализировано занимающиеся приемом, утилизацией и переработкой аккумуляторных батарей [50].

Люминесцентные лампы, применяющиеся для искусственного освещения рабочих мест, также требуют особой утилизации, т.к. в них присутствует от 10 до 70 мг ртути, которая относится к

чрезвычайно-опасным химическим веществам и может стать причиной отравления живых существ, а также загрязнения атмосферы, гидросферы и литосферы. Сроки службы таких ламп составляют около 5-ти лет, после чего их необходимо сдавать на переработку в специальных пунктах приема. Юридические лица обязаны сдавать лампы на переработку и вести паспорт для данного вида отходов [50].

### **5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Чрезвычайная ситуация – 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.

Рассмотрим две наиболее типичных чрезвычайных ситуации, которые могут произойти на предприятии.

Первый случай: остановка производства в результате сильных морозов.

Меры по предупреждению ЧС:

— повышение устойчивости системы электроснабжения. В первую очередь целесообразно заменить воздушные линии электропередач на кабельные (подземные) сети, использовать резервные сети для потребителей, предусмотреть автономные резервные источники электропитания объекта (передвижные электрогенераторы);

— обеспечение устойчивости теплоснабжения за счет запасных автономных источников теплоснабжения, кольцевания системы, заглубления теплотрасс;

— обеспечение устойчивости систем водоснабжения (устройство дублирования вод питания, кольцевание системы, заглубление водопроводов, обустройство резервных емкостей и водохранилищ, очистка воды от вредных веществ и т.п.);

— обеспечение устойчивости системы водоотведения. Повышение устойчивости системы канализации достигается созданием резервной сети труб, по которым может отводиться загрязненная вода при аварии основной сети. Должна быть разработана схема аварийного выпуска сточных вод непосредственно в водоемы. Насосы, используемые для перекачки загрязненной воды, комплектуются надежными источниками электропитания.

Второй случай: диверсия.

Для обеспечения безопасности работника, предотвращения хищений и проникновении посторонних лиц на предприятие следует использовать ряд мер безопасности:

- организовать контрольно-пропускной пункт.
- установить системы видеонаблюдения в производственных цехах, а также на всех входах и выходах из здания.
- установить оповещающие системы безопасности при несанкционированном проникновении на предприятие в нерабочее время.

#### **5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Регулирование отношений между работником и работодателем, касающихся оплаты труда, трудового распорядка, особенности регулирования труда женщин, детей, людей с ограниченными способностями и проч., осуществляется законодательством РФ, а именно трудовым кодексом РФ.

Продолжительность рабочего дня не должна быть меньше указанного времени в договоре, но не больше 40 часов в неделю. Для работников до 16 лет – не более 24 часов в неделю, от 16 до 18 лет и инвалидов I и II группы – не более 35 часов.

Возможно установление неполного рабочего дня для беременной женщины; одного из родителей (опекуна, попечителя), имеющего ребенка в возрасте до четырнадцати лет (ребенка-инвалида в возрасте до восемнадцати лет). Оплата труда при этом производится пропорционально отработанному

времени, без ограничений оплачиваемого отпуска, исчисления трудового стажа и других прав.

При работе в ночное время продолжительность рабочей смены сокращается на один час. К работе в ночную смену не допускаются беременные женщины; работники, не достигшие возраста 18 лет; женщины, имеющие детей в возрасте до трех лет, инвалиды, работники, имеющие детей-инвалидов, а также работники, осуществляющие уход за больными членами их семей в соответствии с медицинским заключением, матери и отцы-одиночки детей до пяти лет.

Организация обязана предоставлять ежегодный отпуск продолжительностью 28 календарных дней. Дополнительные отпуска предоставляются работникам, занятым на работах с вредными или опасными условиями труда, работникам имеющими особый характер работы, работникам

с ненормированным рабочим днем и работающим в условиях Крайнего Севера и приравненных к нему местностях.

В течение рабочего дня работнику должен быть предоставлен перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более двух часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается. Всем работникам предоставляются выходные дни, работа в выходные дни осуществляется только с письменного согласия работника.

Организация-работодатель выплачивает заработную плату работникам. Возможно удержание заработной платы только в случаях установленных ТК РФ ст. 137. В случае задержки заработной платы более чем на 15 дней, работник имеет право приостановить работу, письменно уведомив работодателя.

Законодательством РФ запрещена дискриминация по любым признакам и принудительный труд [51].

## Заключение

В рамках работы рассмотрены процессы, приводящие к формированию мюонного вклада в статистике физических процессов эксперимента NA64. Можно сделать вывод, что основным источником рождения мюонных пар в эксперименте NA64 являются процесс  $eZ \rightarrow eZ\mu^+\mu^-$  (посредством подпроцесса  $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ ). После анализа литературы получены оценки сечений данных реакций в приближении Вайцеккера-Вильямса.

Рассмотрен встроенный в Geant4 генератор димоюнного фоторождения в поле ядра. Код генератора был далее использован при написании собственной программы. Получены энергетические и угловые распределения образованных мюонов, при энергии фотона 100 ГэВ на ядрах свинца. При высоких энергиях преимущественно рождаются мюоны коллинеарные к направлению начального фотона. С уменьшением энергии фотона максимум углового распределения смещается в сторону больших углов. Результаты моделирования соответствуют результатам, полученным в работе [34]

Предложен вариант учета начального состояния фотона для процесса  $eZ \rightarrow eZ\mu^+\mu^-$ . Разработана программа MuGen, позволяющая моделировать энергетическое и угловое распределение мюонов, образующихся при рассеянии электрона на различных ядрах. Программа позволяет задавать энергию начального электрона в широких пределах. Для определения качества работы программы, было проведено сравнение результатов моделирования MuGen с программой ComHER.

Результаты моделирования позволяют предположить, что в экспериментальной статистике следует ожидать мюоны, обладающие преимущественно низкой энергией, так как энергетический максимум образованных мюонов находится в области низких энергий. Это напрямую следует из того факта, что электроны в поле ядра излучают преимущественно низкоэнергетические фотоны, коллинеарные к направлению начального электрона.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Proposal for an Experiment to Search for Light Dark Matter at the SPS / S Andreas, SV Donskov, P Crivelli [и др.] // arXiv preprint arXiv:1312.3309. 2013.
2. New fixed-target experiments to search for dark gauge forces / James D Bjorken, Rouven Essig, Philip Schuster [и др.] // Physical Review D. 2009. Т. 80, № 7. с. 20.
3. Missing energy signature from invisible decays of dark photons at the CERN SPS / SN Gninenko, NV Krasnikov, MM Kirsanov [и др.] // Physical Review D. 2016. Т. 94, № 9. с. 16.
4. Mijakowski Piotr. The search of dark matter with ArDM detector // Acta Phys. Polon. 2006. Т. 37. С. 2179–2185.
5. Non-abelian dark sectors and their collider signatures / Matthew Baumgart, Clifford Cheung, Joshua T Ruderman [и др.] // Journal of High Energy Physics. 2009. Т. 2009, № 04. с. 014.
6. A theory of dark matter / Nima Arkani-Hamed, Douglas P Finkbeiner, Tracy R Slatyer [и др.] // Physical Review D. 2009. Т. 79, № 1. с. 22.
7. Рябов В. А., Царев В. А., Цховребов А. М. Поиски частиц темной материи // Успехи физических наук. 2008. Т. 178, № 11. С. 1129–1164.
8. Gninenko SN. Search for MeV dark photons in a light-shining-through-walls experiment at CERN // Physical Review D. 2014. Т. 89, № 7. с. 075008.
9. High purity 100 GeV electron identification with synchrotron radiation / E Depero, D Banerjee, V Burtsev [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2017. Т. 866. С. 196–201.
10. Search for vector mediator of Dark Matter production in invisible decay mode / D Banerjee, VE Burtsev, AG Chumakov [и др.] // arXiv preprint arXiv:1710.00971. 2017.
11. Beranek Tobias. Theoretical analysis of hidden photon searches in high-precision experiments. Ph.D. thesis: Universitätsbibliothek Mainz. 2014.
12. Beranek T, Vanderhaeghen M. Study of the discovery potential for hidden photon emission at future electron scattering fixed-target experiments //

Physical Review D. 2014. Т. 89, № 5. с. 055006.

13. An improved Shashlyk calorimeter / GS Atoian, GI Britvich, SK Chernichenko [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2008. Т. 584, № 2-3. С. 291–303.

14. Test beam study of the PANDA shashlyk calorimeter prototype / DA Morozov, SK Chernichenko, AA Derevschikov [и др.] // Journal of Physics: Conference Series / IOP Publishing. Т. 160. 2009. с. 012021.

15. Группен К. Детекторы элементарных частиц. Сиб. хронограф Новосибирск, 1999.

16. Search for invisible decays of sub-GeV dark photons in missing-energy events at the CERN SPS / Dipanwita Banerjee, V Burtsev, D Cooke [и др.] // Physical review letters. 2017. Т. 118, № 1.

17. Leissner B. Muon pair production in electron proton collisions : дис. - DESY. 2002.

18. Muon pair production in ep collisions at HERA / Adil Aktas, V Andreev, T Anthonis [и др.] // Physics Letters B. 2004. Т. 583, № 1. С. 28–40.

19. Leissner B [и др.]. Multi-lepton production in ep collisions at HERA // Nuclear Physics B-Proceedings Supplements. 2004. Т. 126. С. 152–157.

20. Norbury John W. Nucleon emission via electromagnetic excitation in relativistic nucleus-nucleus collisions: Reanalysis of the Weizsäcker-Williams method // Physical Review C. 1989. Т. 40, № 6. с. 2621.

21. Lieu R, Quenby JJ, Axford WI. Synchrotron radiation treated by the Weizsaecker-Williams method of virtual quanta // Astronomy and Astrophysics. 1989. Т. 208. С. 351–356.

22. Improving the Weizsäcker-Williams approximation in electron-proton collisions / Stefano Frixione, Michelangelo L Mangano, Paolo Nason [и др.] // Physics Letters B. 1993. Т. 319, № 1-3. С. 339–345.

23. Балдин А. М., Гольданский В. И., Розенталь И. Л. Кинематика ядерных реакций. 1974. с. 233.

24. Перкинс Д. Введение в физику высоких энергий, Энергоатомиздат. 1991.

25. Kim Kwang Je, Tsai Yung-Su. An improved Weizsacker Williams method and photoproduction of lepton pairs // *Physics Letters B*. 1972. Т. 40, № 6. С. 665–670.
26. Tsai Yung-Su. Pair production and bremsstrahlung of charged leptons // *Reviews of Modern Physics*. 1974. Т. 46, № 4. с. 815.
27. Monte Carlo simulation in statistical physics / K. Binder, D. Heermann, L. Roelofs [и др.] // *Computers in Physics*. 1993. Т. 7, № 2. С. 156–157.
28. Mahadevan S. Monte carlo simulation // *Mechanical engineering*. 1997. С. 123–146.
29. Earl David J, Deem Michael W. Monte Carlo simulations // *Molecular modeling of proteins*. Springer, 2008. С. 25–36.
30. Пригарин С. М., Михайлов Г. А. Методы численного моделирования случайных процессов и полей. ИВМиМГ СО РАН, 2005.
31. Прохоров СА. Математическое описание и моделирование случайных процессов // Самар. гос. аэрокосм. ун-т. 2001. Т. 209.
32. Metropolis N. Monte Carlo method // *From Cardinals to Chaos: Reflection on the Life and Legacy of Stanislaw Ulam*. 1989. с. 125.
33. Robert Christian P. Monte carlo methods. Wiley Online Library, 2004.
34. Burkhardt H, Kelner SR, Kokoulin RP. Monte Carlo generator for muon pair production. 2002.
35. Kelner SR, Kokoulin RP, Petrukhin AA. About cross section for high-energy muon bremsstrahlung: Tech. Rep.: : 1995.
36. Wellisch JP, Kossov M, Degtyarenko P. Electro and gamma nuclear physics in Geant4 // arXiv preprint nucl-th/0306012. 2003.
37. Von Neumann John. Various Techniques Used in Connection With Random Digits // *Appl. Math Ser*. 1951. Т. 12. С. 36–38.
38. Пескин М, Шредер Д. Введение в квантовую теорию поля. Ижевск: НИЦ. 2001.
39. Jaffe Robert L. Photoproduction of Massive Muon Pairs at High Energies // *Physical Review D*. 1971. Т. 4, № 5. с. 1507.
40. Берестецкий ВБ, Лифшиц ЕМ, Питаевский ЛП. Релятивистская квантовая механика. 1968.

41. CompHEP-a package for evaluation of Feynman diagrams and integration over multi-particle phase space. User's manual for version 33 / A Pukhov, E Boos, M Dubinin [и др.] // arXiv preprint hep-ph/9908288. 1999.
42. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
43. Белов С. В. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (техносферная безопасность). М.: Юрайт, 2012.
44. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормы. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
45. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений.
46. СанПиН 2.2.4.548-96. Санитарные правила и нормы. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
47. СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.
48. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
49. СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений.
50. СанПиН 2.1.7.1322-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления. 2.1.7. Почва, очистка населённых мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почвы.
51. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 30.12.2015).

## Приложение А

### The NA64 experiment

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ61	Бедрицкий Константин Михайлович		

Руководитель ВКР: Трифонов Андрей Юрьевич

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯШТ	Трифонов Андрей Юрьевич	Доктор физико-математических наук		

Консультант-лингвист Отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кабрышева Оксана Павловна			

## **Introduction**

Over the past few decades, experiments have been conducted to find dark matter, which is about a quarter of the total matter in our universe. One of such experiment is NA64 [1], conducted at CERN (The European Organization for Nuclear Research).

In addition to the processes for which a particular experiment is targeted, various types of background reactions occur [2]. Some of these background processes can be useful for identifying additional characteristics of physical systems directly or indirectly involved in signaling modes. For example, in the statistics of the NA64 experiment available at the present time, a pronounced trace of the process of di-muon photoproduction is observed, which can be used to refine the nuclear form factor in constructing dark matter models used in the NA64 experiment, and to determine the sensitivity of the experimental installation [3].

# 1 Experiment NA64

## 1.1 Purpose of the experiment

The NA64 experiment (known at the planning stage as P348) is a fixed-target experiment that is performed at the SPS accelerator (Super-Proton Synchrotron) at CERN (see Figure 1.1), which combines the technique of active beam dump and the missing energy method for searching rare events [1]. This experiment uses a fully sealed detector located on the H4 line. The main purpose of the experiment is to search for light dark bosons from the dark sector that can interact with ordinary photons, for example, dark photons ( $A'$ ), or  $Z'$  with mass less than 1 GeV, interacting only with quarks. In some models  $Z'$  bosons interact only with  $\mu$ - or  $\tau$ -leptons, then these particles are called dark lepton gauge bosons. In the framework of this experiment, it is also possible to search for the invisible decay of the  $K_L$  meson, which is additional to the decay of  $K^+ \rightarrow \pi + \nu + \nu$ , as well as invisible decays of  $\pi^0$ ,  $\eta$ ,  $\eta'$ ,  $K_S$  mesons [1].

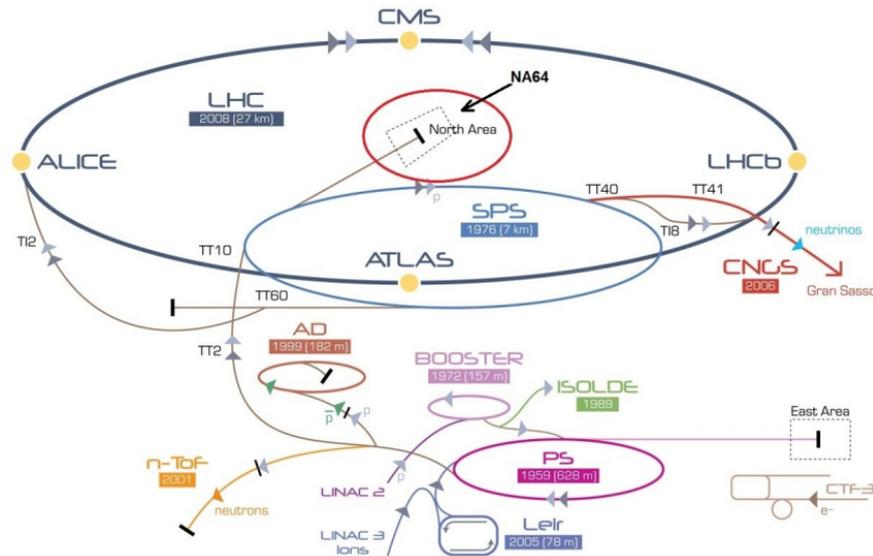


Figure 1.1 — Accelerating complex in CERN

Some models of dark matter suggest the existence of dark sectors consisting of  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_\gamma$  singlet fields. The particles from these sectors do not interact directly with ordinary matter, but they can participate in gravitational interactions. In addition to the gravitation, there may still be a very weak interaction between the ordinary and dark matter [4], by means of  $U'(1)$  gauge bosons  $A'$  (so-called dark photons) [5], which can be mixed with ordinary

photons [1]. In a number of models [2], the corresponding dark gauge bosons should be light and have the strength of the  $\gamma$ - $A'$  interaction, which lies in an experimentally accessible and theoretically interesting field. If such  $A'$  mediators exist, their decays into electron-positron pairs ( $A' \rightarrow e^+ e^-$ ) could be searched for in the experiment. In addition, it is assumed that the dark photon is able to be annihilated by “invisible” channel on a pair of dark matter particles ( $A' \rightarrow \chi\chi$  ( $A' \rightarrow invisible$ )) [6]. NA64 aims to study still unexplored area constant mixing  $10^{-5} \leq \epsilon \leq 10^{-3}$ , and mass dark photons  $M_{A'} \leq 100$  MeV, using electron beams with an energy of 10-300 GeV [1].

## 1.2 Experimental setup NA64

The experimental setup, developed specifically for the search for the reaction channel  $A' \rightarrow invisible$ , is schematically depicted in the Figure 1.2. The design of such an experiment requires a very clean electron beam. The impurity of other charged particles in the beam must be less than  $10^{-2}$  [1]. The installation includes 4 track detectors, two of which are placed in front of two magnets and two behind (several types of track detectors are used in the installation: Micromega’s, GEM’s, Straw-tubes and hodoscopes), a 159 mm diameter vacuum tube placed in a magnetic field, created by two magnets with a magnetic field strength  $\approx 1.46$  T, high-efficiency veto counters 1 and 2, three scintillation counters (proportional chambers), a combination of an electromagnetic calorimeter of the “shashlyk” type and a hadron calorimeter high degree of tightness to detect all the final states of the products of  $e^- Z \rightarrow e^- Z A'$  reaction. The purpose of the magnets is to filter low-energy beam components [7].

The second vacuum tube, 15 m long, located between the magnets and the e-m calorimeter, was installed to prevent the absorption of synchrotron radiation photons, which the synchrotron radiation detector detects (BGO crystals, LYSO crystals, SRD detectors, compact calorimeter) [1].

The experiment uses an electron beam with an energy of 100 GeV from the H4 line. The maximum intensity of the beam is  $10^5 - 10^7$  electrons produced by a beam intensity of the order of  $10^{12}$  protons when colliding with a target.

The method of searching for the desired reaction is as follows. Dark photons  $A'$  are produced through mixing with the quasireal photons of

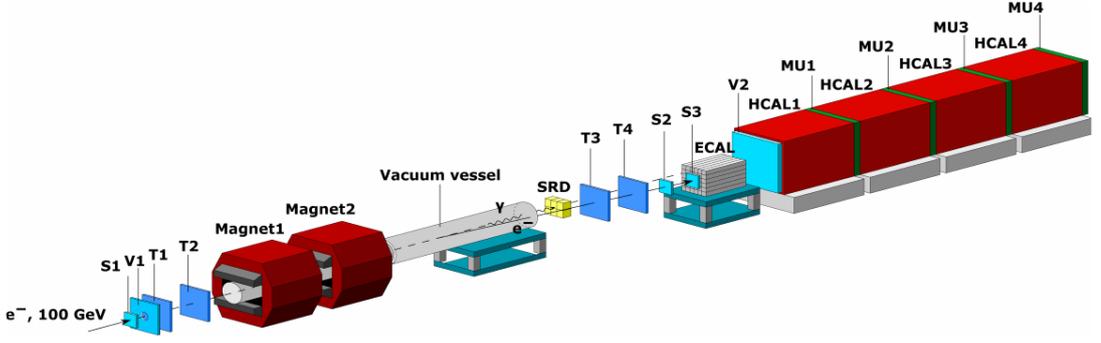


Figure 1.2 — Experimental setup

electromagnetic interactions, which, in turn, are formed as a result of the scattering of primary electrons by nuclei in the EM calorimeter:

$$eZ \rightarrow eZA', A' \rightarrow invisible$$

This reaction occurs within one radiation length ( $X_0$ ) of the e-m calorimeter. The resulting  $A'$  then passes through the whole setup without interaction and splits into  $e^-e^+$  outside the detector, or can decay into two hypothetical particles that will also pass through the entire substance of the detector complex without interactions. In case  $A'$  is not formed during the development of the EM shower, the EM calorimeter serves as an absorber ( $\approx 30X_0$ ) for the entire energy of the primary electron, and the leakage into the veto counter 1 is negligible. In case  $A'$  is formed during the development of the EM shower, the energy  $E_1 = fE_0$  remains in the calorimeter. The remaining part of the energy  $E_2 = (1 - f)E_0$  of the primary electron is carried away (through the setup without interaction) by a dark photon ( $A'$ ) or reaction products  $A' \rightarrow invisible$ .

The signal candidate events have the signature [6]:

$$S_{A'} = T(1 - 4) \times ECAL(E_{ECAL} < E_0) \times \overline{V2} \times HCAL,$$

in other words, the presence of a signal from track detectors, a signal from the EM calorimeter (less than the energy of the primary beam) and, at the same time, the absence of signals from the veto counter 2 and the hadronic calorimeter. Also, such a reaction should be manifested in the following. [6].

1) The initial point of the EM shower in the e-m calorimeter should be localized in several initial radiation lengths.

2) The longitudinal and transverse forms of the shower should correspond to the ordinary e-m shower.

3) The ratio of the energy released in the e-m calorimeter to the energy of the original electron  $f \approx 0,5$ .

4) Absence of energy release in the veto counter 2 and the hadronic calorimeter.

### 1.3 Electromagnetic calorimeter ECAL

Due to the fact that  $A'$  presumably has a mass of the order of 10 MeV - 1 GeV [6], the signature of the signal event should include, the appreciable transverse asymmetry of the electromagnetic shower, in addition to the recorded absence of a part of energy in the calorimeter. The anomaly of the spatial development of the electromagnetic shower for the energy range  $A'$  can be detected by having an energy resolution of the order of 1 MeV, which is  $10^{-4}$  of the energy of the initiating SPS beam.

Since the signal event mainly occurs at the depth of the first radiation length  $X_0$ , in order to determinate the spatial profile of the electromagnetic shower with a resolution of 50 MeV /°, the following conditions must be fulfilled [1]:

- the device must be compact;
- it is necessary to use a substance with a small Moliere radius and a small radiation length;
- the energy resolution of the device must be  $\delta E/E \approx \sqrt{15\%}/E$ ;
- $e/\pi$  separation should be  $\approx 10^{-3}$ ;
- the radiation resistance of the active part of the device should exceed 1000 Gy.

The electromagnetic calorimeter selected by the collaboration is a “shashlik” type detector [6, 1] in a segmented arrangement of  $6 \times 6$ , represented in the Figure 1.3, divided in lengthwise into two parts (“ECAL0” and “ECAL1”). It is also an active target on which the development of an electromagnetic shower with the formation of an admixture  $A'$  occurs with a probability of  $10^{-12}$  [4].

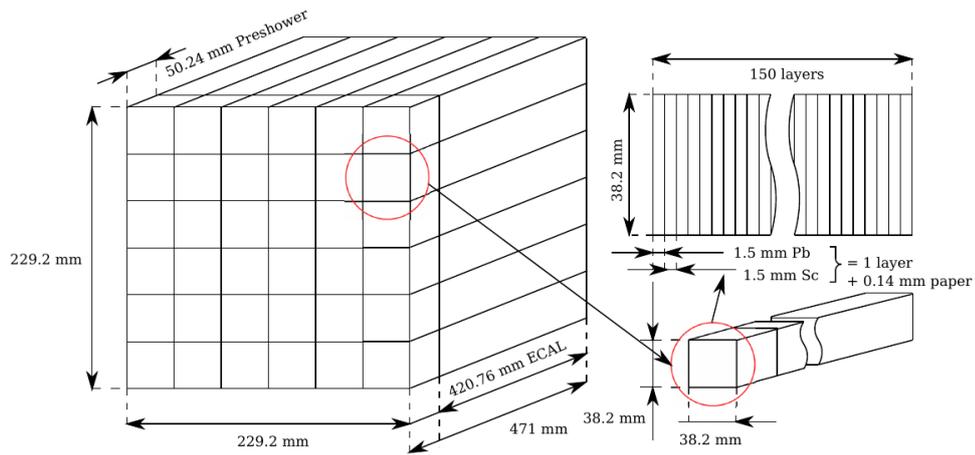


Figure 1.3 — Electromagnetic Segmented Compact Calorimeter ECAL

The increase in the number of transverse segments makes it possible to increase the  $e/\pi$  separation factor during processing, since the transverse dimensions of the cell layers of 25 mm are comparable to the Moliere radius [4], and they allow reliable identification of the type of particles along the profile of the electromagnetic shower.

Transverse segmentation is necessary to determine the spatial characteristics of an electromagnetic shower. Longitudinal segmentation allows the introduction of additional validating criteria for the execution of trigger circuits in a real experiment: reduce the effect of pile-up events and effects associated with backscattering due to additional information in the preshower part of the calorimeter.

The signal from the photomultiplier of the calorimeter is a function of a rather large number of parameters due to the features of the scintillator material, its geometry, and the light-gathering conditions. The individual parameters of the photocathode, the dynode system, and the signal formers also influence the effect.

The light collection is made using Bicron WLS-fibers BCF91a fibers with a diameter of 1 mm [1], passing through the circular grooves in the scintillator plates. The fibers from each segment are assembled together into one optical connector located on the longitudinal side of the module (Figure 1.4). The light collected by each of these nine connectors is read by one photomultiplier. Nine such photomultipliers from each module are placed on the longitudinal side of the corresponding module together with the accompanying electronics.

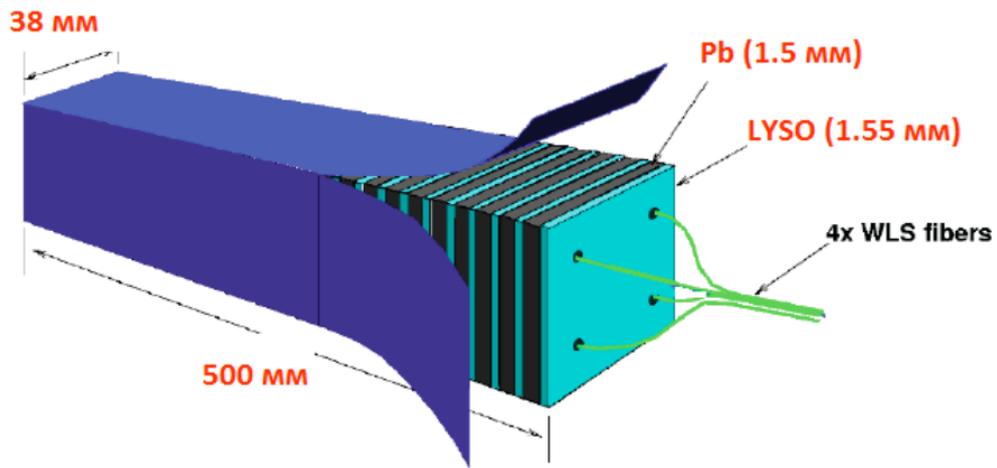


Figure 1.4 — ECAL cell

#### 1.4 Hadronic calorimeter HCAL

Hadronic calorimeter (HCAL) is designed to increase the longitudinal tightness of the experimental setup in experiments to search for the invisible mode  $A' \rightarrow \chi\chi$ .

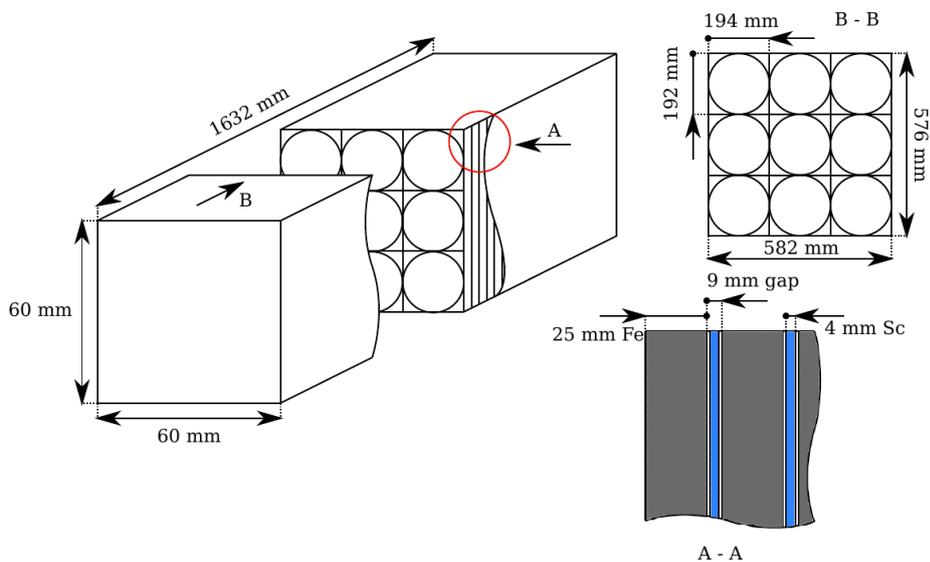


Figure 1.5 — Hadron calorimeter

The hadronic calorimeter consists of four modules (one module is shown in the Figure 1.5). Each module is a matrix of  $3 \times 3$  segments. Each segment in turn is represented by a “sandwich” made of alternating layers of iron and a scintillator with thicknesses of 25 mm and 4 mm, respectively, and transverse dimensions of

$194 \times 192 \text{ mm}^2$ . The distance between the Fe plates of two adjacent layers is 7 mm. Thus, the total length of one layer is 32 mm. Each segment consists of 48 such layers, which roughly corresponds to  $7 \lambda_{int}$ . This transverse segmentation into nine cells ensures good uniformity of light collection throughout the module and allows obtaining information on the type and characteristics of the detected particle from analysis of the profile of the developing shower. In addition, the localization of the shower over the segment increases the energy resolution of the detector, and also facilitates the measurement of the spatial characteristics of showers and the separation of close-lying showers [1].

The main parameters of the hadronic calorimeter used in the NA64 experiment are presented in Table 1.1.

Table 1.1 — The main parameters of the hadronic calorimeter

Number of modules	4
Geometric dimensions	$\sim 600 \times 600 \times 1536 \text{ mm}^3$
Weight	$\sim 3500 \text{ kg}$
Energy range	0,5 - 120 GeV
Energy resolution	$\delta E/E \approx 0,62/\sqrt{E}$
$\pi$ -tightness	$\approx 10^{-9}$
Nuclear length	$\approx 7\lambda$
Number of layers	48
Thickness of layers	34 mm
Segment dimensions	$192 \times 194 \text{ mm}^2$
Photomultipliers	FEU-84-3
Maximum event recording frequency	Up to $10^7 \text{ e}^-$ for spil

## 1.5 Role of the process of di-muon photoproduction in the experiment NA64

Figure 1.6 shows the distribution of events as a result of scattering of an electron on a nucleus in  $(E_{ECAL}; E_{HCAL})$  plane. Here,  $E_{HCAL}$  is the total energy

recorded by the first two hadronic calorimeters. Events in region I in Figure 1.6 occur as a result of the rare electroweak birth of muon pairs [7].

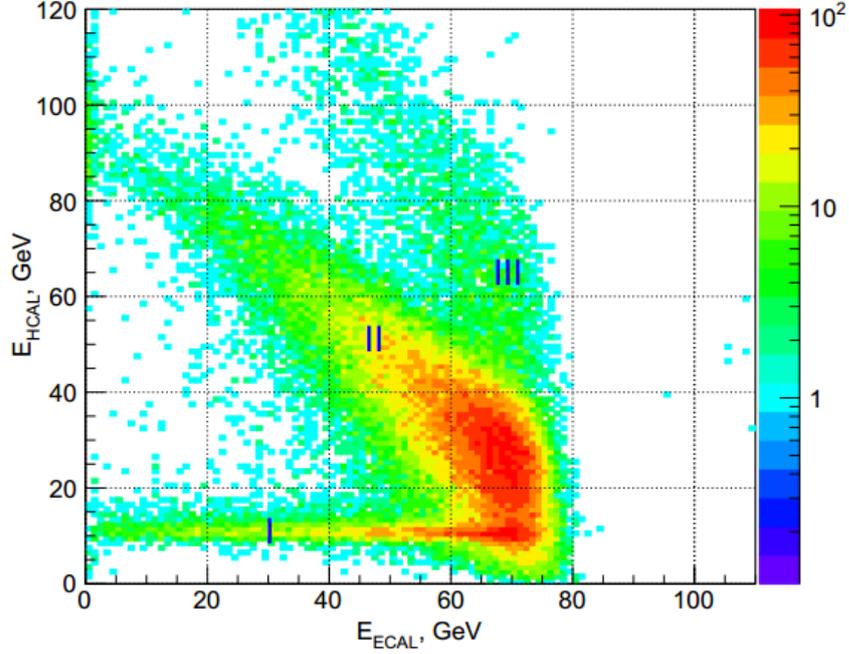


Figure 1.6 — The distribution of events in  $(E_{ECAL}; E_{HCAL})$  plane

This process can be used as a benchmark to verify the reliability of the Monte Carlo simulation and to assess the systematic uncertainties in the efficiency of signal reconstruction in the energy range predicted by the simulation. In region II, the events arising as a result of electron-hadron interaction within the framework of the standard model that satisfy the energy conservation law  $E_{ECAL} + E_{HCAL} = 100$  GeV fall within region II within the energy resolution of the detectors. The errors in the detection of these events due to the finite resolution of the detectors are  $10^{-16}$  [1]. The events from region III, whose proportion is about 1%, arise mainly as a result of the so-called pile-up effect [3].

## 1.6 The processes of muon production

Multi muon events appearing in the final state of electron (e) - nucleus (Z) scattering stem are almost completely from muon pair production [8]. The muon pairs are produced in elastic (1.1) and inelastic (1.2) scattering processes:

$$eZ \rightarrow e'Z'\mu^+\mu^-, \quad (1.1)$$

$$eZ \rightarrow e'X\mu^+\mu^-, \quad (1.2)$$

The cross section calculation of these processes is complicated, even the one of the simple  $2 \rightarrow 4$  process is not trivial due to complicating factors such as the presence of an internal structure in the nucleus, the need to calculate the radiative corrections, allowance for the interaction in the final state, etc. A simplification of the calculation may be achieved by reducing the multi-particle processes to  $2 \rightarrow 2$  scattering reactions. At high di-muon masses electroweak processes form the only notable source of muon pair production (especially quasi-real two photon collisions). Two-photon physics allows to formulate the cross section in a good approximation as product of photon fluxes and the central  $2 \rightarrow 2$  process:  $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$  [8]. The decay of heavy particles produces muons at lower di-muon mass scales and non isolated single muons.

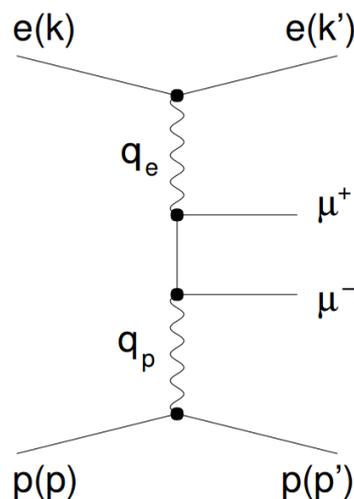


Figure 1.7 — Muon pair photoproduction diagram

An overview of single and di-muon production processes is given in Table 1.2. The first group contains the electroweak muon pair production processes. Interactions of two neutral gauge bosons and in particular photon-photon collisions are the most relevant source of muon pairs. In addition Bremsstrahlungs processes with subsequent photon conversion into muon pairs occur. Also electroweak effects, especially the  $Z^0$ -production, which is Bremsstrahlung of the boson with a subsequent conversion into a muon pair, may be observed. The decay of the vector meson resonances completes the description of lepton pair production within the standard model [8].

Single leptons result mainly from semileptonic heavy quark decays in boson-gluon fusion. Another source of single muon production is given by the decay of a  $\tau$  lepton.

Table 1.2 — Sources of muon production

Electroweak Muon Pair Production		
Two-boson	$eZ \rightarrow eZ\gamma\gamma$	$\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$
	$eZ \rightarrow eZ\gamma Z^0$	$\gamma Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$
	$eZ \rightarrow eZZ^0Z^0$	$Z^0Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$
Bremsstrahlung	$eZ \rightarrow eZ\gamma$	$\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$
$Z^0$ -production	$eZ \rightarrow eZZ^0$	$Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$
Decay of Vector Meson Resonances		
$J/\Psi$ decay	$J/\Psi \rightarrow \mu^+\mu^-$	
$\Upsilon$ decay	$\Upsilon \rightarrow \mu^+\mu^-$	
Single Muon Production		
Heavy quark decay	$Q \rightarrow q\mu\nu_\mu$	
$\tau$ decay	$\tau \rightarrow \mu\nu_\mu\nu_\tau$	
$W$ decay	$W \rightarrow \mu\nu_\mu$	

The cross section determination of the multi-particle reactions (1.1) and (1.2) may be simplified by identifying suitable  $2 \rightarrow 2$  reactions which allow reduction of these complex reactions. The most popular way to simplify the expression for cross sections of complex scattering processes is the Weizsacker-Williams approximation [8]. Electroweak muon pair production of the type which is depicted in the Feynman diagram in Figure 1.7 dominates the electroweak production mechanisms. A photon emitted from the electron line interacts with a photon emitted from the proton side and produces a lepton pair. The two-photon collision can be identified as a suitable  $2 \rightarrow 2$  subprocess. The full cross section is derived by folding the two-photon cross section with the corresponding photon flux. For the complete electroweak calculation the two-boson processes  $\gamma Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  and  $Z^0 Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  have to be considered. Due to the large mass of the  $Z^0$ -boson the processes are strongly suppressed [8, 9].

## **Conclusion**

The main objectives of the NA64 experiment are considered. The description of the experimental setup, used to search for dark matter, is given. This setup is designed to search for particles of dark matter using the missing energy method.

The processes of muon formation play an important role in this experiment. It is shown that the main source of muons in this case is the process of di-muon photoproduction. This process can be used to refine the parameters of the dark matter model, as well as to determine the sensitivity of the experimental setup.

## Bibliography

1. Proposal for an Experiment to Search for Light Dark Matter at the SPS / S Andreas, SV Donskov, P Crivelli [и др.] // arXiv preprint arXiv:1312.3309. 2013.
2. New fixed-target experiments to search for dark gauge forces / James D Bjorken, Rouven Essig, Philip Schuster [и др.] // Physical Review D. 2009. Т. 80, № 7. с. 075018.
3. Gninenko SN, Krasnikov NV, Matveev VA. Muon  $g-2$  and searches for a new leptophobic sub-GeV dark boson in a missing-energy experiment at CERN // Physical Review D. 2015. Т. 91, № 9. с. 095015.
4. Missing energy signature from invisible decays of dark photons at the CERN SPS / SN Gninenko, NV Krasnikov, MM Kirsanov [и др.] // Physical Review D. 2016. Т. 94, № 9. с. 095025.
5. A theory of dark matter / Nima Arkani-Hamed, Douglas P Finkbeiner, Tracy R Slatyer [и др.] // Physical Review D. 2009. Т. 79, № 1. с. 015014.
6. Gninenko SN. Search for MeV dark photons in a light-shining-through-walls experiment at CERN // Physical Review D. 2014. Т. 89, № 7. с. 075008.
7. Search for vector mediator of Dark Matter production in invisible decay mode / D Banerjee, VE Burtsev, AG Chumakov [и др.] // arXiv preprint arXiv:1710.00971. 2017.
8. Leissner B. Muon pair production in electron proton collisions : - DESY. 2002.
9. Krass Allan S. Photoproduction of Muon Pairs // Physical Review. 1965. Т. 138, № 5B. с. B1268.