

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

Институт Физико-технический
Направление подготовки Ядерная физика и технологии
Кафедра Прикладная физика

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Моделирование когерентного дифракционного излучения протонного пучка

УДК 539.125.418:621.384.6.001.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3Б	Северин Александр Викторович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник кафедры ПФ	Шкитов Дмитрий Андреевич	к. ф.-м. н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Меньшикова Екатерина Валентиновна	к. ф. н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ	Гоголева Татьяна Сергеевна	к. ф.-м. н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПФ ФТИ	Вагнер Александр Рудольфович	к. ф.- м. н.		

Томск – 2017 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Общекультурные компетенции	
Р1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
Р2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
Р3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
Р4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
Р5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
Р6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
Р7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
Р8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
Р9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
Р10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физико-технический
Направление подготовки Ядерные физика и технологии
Кафедра Прикладная физика

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой ПФ ФТИ
_____ А.Р. Вагнер
(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А3Б	Северин Александр Викторович

Тема работы:

Моделирование когерентного дифракционного излучения протонного пучка

Утверждена приказом директора ФТИ

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Дифракционное излучение, угловое распределение, протонные сгустки, интенсивность излучения, линейный ускоритель ESS, невозмущающая диагностика пучков.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Анализ и обзор литературы; изучение методик диагностики пучков; моделирование распределений; анализ полученных результатов; социальная ответственность; экономическая часть бакалаврской работы.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент, к.ф.н. Меньшикова Е.В.
Социальная ответственность	Ассистент каф. ПФ, к. ф.-м. н.

	Гоголева Т.С.
--	---------------

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Младший научный сотрудник кафедры ПФ	Шкитов Дмитрий Андреевич	к. ф.-м. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3Б	Северин Александр Викторович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А3Б	Северин Александр Викторович

Институт	ФТ	Кафедра	ПФ
Уровень образова- ния	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физи- ка и технологии/ Физи- ка атомного ядра и ча- стиц

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<i>1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет воз- никновения:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – вредных факторов производственной среды: шум, микроклимат, ионизирующее излучение от ПВЭМ, повышенный уровень электромагнитных полей; – опасных факторов производственной среды: вероятность возникновения пожара, вероятность поражения электрическим током.
<i>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	– электробезопасность, пожаробезопасность, требования по охране труда при работе на ПВЭМ.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективная защита и индивидуальные защитные средства)
<i>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</i>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	10.04.2017
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Татьяна Сергеевна	к.ф.-м.н.		10.04.2017

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3Б	Северин Александр Викторович		10.04.2017

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕ-
РЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А3Б	Северин Александр Викторович

Институт		Кафедра	ПФ
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Физика атомного ядра и частиц

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

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

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	1. Структура работ в рамках научного исследования 2. Определение трудоемкости выполнения работ 3. Разработка графика проведения научного исследования 4. Бюджет научно – технического исследования (НТИ) 4.1. Расчет материальных затрат НТИ 4.2. Расчет затрат на специальное 5. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i> 2. <i>Матрица SWOT</i> 3. <i>Альтернативы проведения НИ</i> 4. <i>График проведения и бюджет НИ</i> 5. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i>
--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менеджмент	Меньшикова Екатерина Валентиновна	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А3Б	Северин Александр Викторович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 104 с., 31 рис., 28 табл., 44 источника.

Ключевые слова: Моделирование, дифракционное излучение, угловое распределение, протонные сгустки, интенсивность излучения, невозмущающие методы диагностики, линейный ускоритель ESS, циклический ускоритель LHC.

Цель работы – Исследование характеристик дифракционного излучения от протонов при различных моделируемых параметрах пучка протонов и определение возможности применения дифракционного излучения от щелевой мишени при определённых моделируемых параметрах пучка для диагностики.

В процессе исследования проводились:

Обзор литературы по современным методам диагностики пучка заряженных частиц, свойствам дифракционного излучения, а также параметрам современных ускорителей. Моделирование угловых и спектральных распределений некогерентного и когерентного дифракционного излучения от протонов.

Область применения: Диагностика пучков заряженных частиц.

Значимость работы: Усовершенствование методов диагностики заряженных пучков.

Выпускная квалификационная работа выполнена на кафедре «Прикладной физики» ФТИ ТПУ.

Работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2016 все графические и расчетные материалы выполнены в пакете Wolfram Mathematica.

Оглавление

Введение.....	13
1. Свойства дифракционного излучения	15
2. Параметры пучков современных протонных ускорителей	21
2.1 Большой адронный коллайдер.....	22
2.1.1 Инжекторная система протонов на БАК	25
2.1.2 Ионные пучки	26
2.2 Теватрон	27
2.3 J-PARC.....	29
2.4 European Spallation Source	32
2.5 У-70 в ИФВЭ.....	33
2.6 Ускоритель PSI	36
2.7 Методы диагностики пучков заряженных частиц на ускорителях.....	37
2.8 Краткая характеристика протонных ускорителей	38
3 Моделирование дифракционного излучения	40
3.1 Моделирование некогерентного ДИ при пролете протона через щель в идеально проводящем экране.....	41
3.2 Моделирование когерентного ДИ при пролете протона через щель в идеально проводящем экране для ускорителя ESS.	54
3.3 Моделирование некогерентного ДИ при пролете протона через щель в идеально проводящем экране для ускорителя LHC.	62
4. Социальная ответственность.....	70
4.1 Анализ опасных и вредных факторов.....	71
4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	72

4.2.1 Технические мероприятия.....	72
4.2.3 Условия безопасной работы.....	72
4.3 Электробезопасность.....	74
4.4 Пожарная и взрывная безопасность.....	78
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	81
5.1 Потенциальные потребители результатов исследования	81
5.1.1 Анализ конкурентных технических решений	82
5.1.2 SWOT-анализ.....	83
5.2 Планирование научно-исследовательской работы.....	85
5.2.1 Определение трудоемкости выполнения НИОКР	86
5.2.2 Разработка графика проведения научного исследования	88
5.2.3 Календарный план-график в виде диаграммы Ганта	89
5.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	90
5.3.1 Расчет материальных затрат НТИ	91
5.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы.....	92
5.3.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	94
5.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	95
5.3.5 Накладные расходы.....	95
5.3.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	96
5.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	96
Заключение	100
Список литературы	101

Введение

Современные требования к параметрам ускоряемого пучка предполагают создание нового поколения ускорителей заряженных частиц имеющих увеличенную стабильность, большую эффективность ускорения, миллиметровые и субмиллиметровые размеры пучка. Для таких ускорителей необходимо разработать новые методы диагностики, позволяющие определить параметры пучка. Одним из таких методов диагностики может служить дифракционное излучение, являющееся частным случаем поляризационного излучения, которое возникает при динамической поляризации среды полем движущейся заряженной частицы, в том числе не обязательно движущейся ускоренно [1].

Вследствие того, что при генерации дифракционного излучения частицы непосредственно не взаимодействует с веществом мишени, дифракционное излучение применяется в так называемой невозмущающей диагностике различных параметров пучков заряженных частиц. Это может быть продольный размер сгустка, поперечный размер сгустка, угловая расходимость пучка и т.д. Данное свойство создает очевидное преимущество дифракционного излучения (в дальнейшем, ДИ) по сравнению остальными методами диагностики, в частности, часто использующегося оптического переходного излучения (ОПИ).

Так, например, в работе [2] было проведено исследование, в котором в качестве метода диагностики протонного пучка высокой интенсивности $6,5 \cdot 10^{13}$ и с энергией протонов 120 ГэВ использовалось ОПИ. В данном исследовании была выявлена проблема эксплуатации мишеней, заключающаяся в том, что в них наблюдался эффект «старения» – изменения характеристик мишени с течением времени (ниже подробнее говорится о данной проблеме), соответственно влияя на «чистоту» эксперимента. Для нивелирования выявленного негативно-го эффекта, возможно использовать ДИ, которое в свою очередь обладает очевидным преимуществом перед ОПИ, т. к. данный метод диагностики является пренебрежимо мало воздействующим на мишень и практически не влияет на ее характеристики.

Целью настоящей работы является исследование характеристик ДИ от протонов при различных параметрах пучка протонов, и в зависимости от характеристик решается вопрос о возможности применения ДИ от щелевой мишени для конкретных параметров. В соответствии с этой целью были поставлены следующие задачи:

- Собрать и проанализировать параметры современных протонных ускорителей и характеристики ускоряемых в них пучков.
- Провести расчет ширины щелевой мишени для протонного пучка на ускорителе European Spallation Source.
- Провести моделирование угловых и спектральных распределений некогерентного и когерентного дифракционного излучения протона проходящего через щелевую мишень, для ускорителя European Spallation Source.
- Оценить возможности применения когерентного дифракционного излучения, как метода невозмущающей диагностики для протонного ускорителя European Spallation Source.
- Подобрать оптимальное значение ширины щелевой мишени для протонного пучка на ускорителе Large Hadron Collider.
- Провести моделирование угловых и спектральных распределений некогерентного дифракционного излучения протона, проходящего через щелевую мишень, для ускорителя Large Hadron Collider.

1. Свойства дифракционного излучения

1) Дифракционное излучение (в дальнейшем ДИ) является частным случаем поляризационного излучения, которое возникает при динамической поляризации атомных оболочек среды полем равномерно и прямолинейно движущейся заряженной частицы [3]. Также другими примерами поляризационного излучения являются:

2) Переходное излучение (ПИ) – излучение, возникающее при пересечении заряженной частицей границы между двумя средами с разными электромагнитными константами. Эффект был предсказан в 1945 году В. Л. Гинзбургом и И. М. Франком. Стоит отметить, что данное излучение наблюдается по обе стороны от границы раздела [4, 5];

3) Излучение Вавилова–Черенкова (ИВЧ) – это свечение, вызываемое в прозрачной среде заряженной частицей, которая движется со скоростью, превышающей фазовую скорость распространения света в этой среде. Было обнаружено в 1934 году Павлом Черенковым, во время выполнения исследований люминесценции жидкостей под воздействием гамма-излучения в лаборатории С. И. Вавилова. Позже было установлено, что данное свечение вызывается электронами, выбиваемыми из атомов среды гамма-излучением и движущимися со скоростями, превышающими фазовую скорость света в среде [6, 7];

4) Излучение Смита–Парселла (ИСП) – квазимонохроматическое излучение, возникающее при прямолинейном и равномерном движении заряда в вакууме вблизи периодической мишени. Впервые данный эффект наблюдали С. Смит (S.J. Smith) и Э. Парселл (E.M. Purcell) в 1953 году. В теории ИСП могут применяться методы из теории дифракционного излучения, поскольку первое можно представить как процесс резонансного дифракционного излучения [3];

5) Параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ) относится к классу поляризационного излучения, характеристики которого определяются только её энергией и зарядом заряженной частицы. В рамках кинематической моде-

ли механизм ПРИ можно рассматривать как дифракцию поля виртуальных фотонов движущегося заряда на кристаллографических плоскостях [3].

Дифракционным излучением принято называть излучение, которое возникает при пролете заряженной частицы вблизи некоторой «оптической» неоднородности (экраны различной геометрии). Соответственно электромагнитное поле заряженной частицы взаимодействует с мишенью, в результате чего происходит динамическая поляризация атомов вещества мишени и на ее поверхности возникает ток, который и является источником ДИ [3]. Данное излучение также генерируется при пролёте вблизи поверхности проводящей мишени. Щелевая мишень, часто используется в диагностике и представляет собой две металлические пластины, расположенные, как правило, параллельно друг другу, через щель между которыми проходит пучок заряженных частиц [8].

Обычно в экспериментах мишень располагают под углом 45 градусов к траектории электронного пучка. В этом случае дифракционное излучение распространяется под углом 90 градусов к пучку (под углом зеркального отражения), что упрощает его регистрацию в эксперименте. Исходя из геометрии и по аналогии с ПИ, принято выделять, так называемые, ДИ «вперед», которое распространяется вдоль траектории движения частицы и ДИ «назад», которое распространяется по направлению зеркального отражения от мишени относительно траектории движения заряженной частицы [8].

Вследствие того, что при геометрии дифракционного излучения частица непосредственно не взаимодействует с веществом мишени, ДИ применяется в так называемой невозмущающей диагностике различных параметров пучков заряженных частиц (например, для измерений продольного размера сгустка, поперечного размера сгустка, угловой расходимости пучка и т.д.). Это делает ДИ более привлекательным кандидатом для методики диагностики пучков по сравнению с другими поляризационными излучениями, в частности ПИ.

Для подтверждения выше сказанного, рассмотрим работу [2]. В ней было проведено исследование, в котором в качестве метода диагностики протон-

ного пучка высокой интенсивности $6,5 \cdot 10^{13}$ и с энергией протонов 120 ГэВ использовалось оптическое переходное излучение (ОПИ). В данном исследовании была выявлена проблема эксплуатации мишеней, заключающаяся в том, что в них наблюдался эффект «старения» пленки – изменения ее характеристик с течением времени. Ниже на рисунках 1 и 2 представлены результаты данного негативного эффекта.

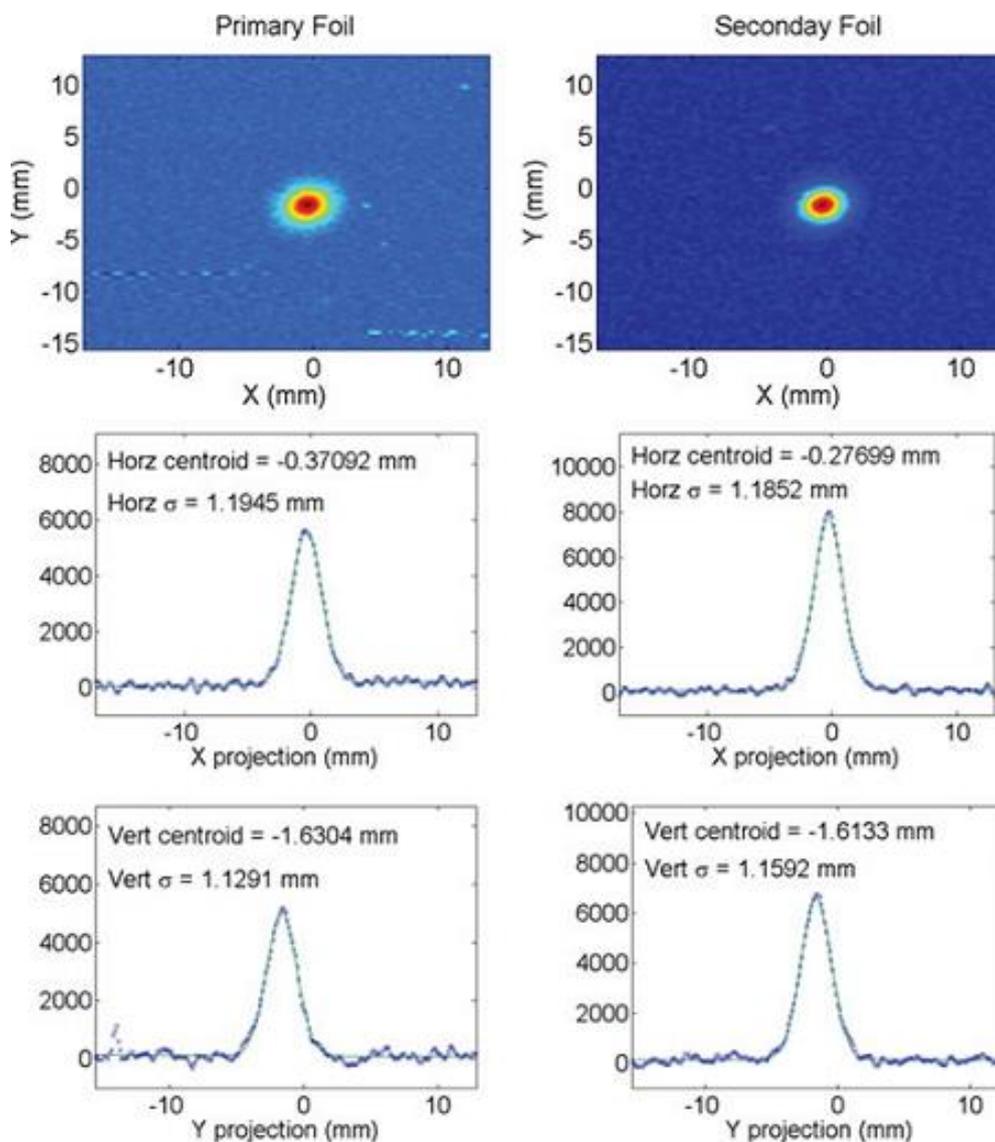


Рисунок 1. - Сравнение изображений пучка, полученных при помощи оптического переходного излучения, снятых с первичной пленки и пленки через 70 дней при одинаковых условиях

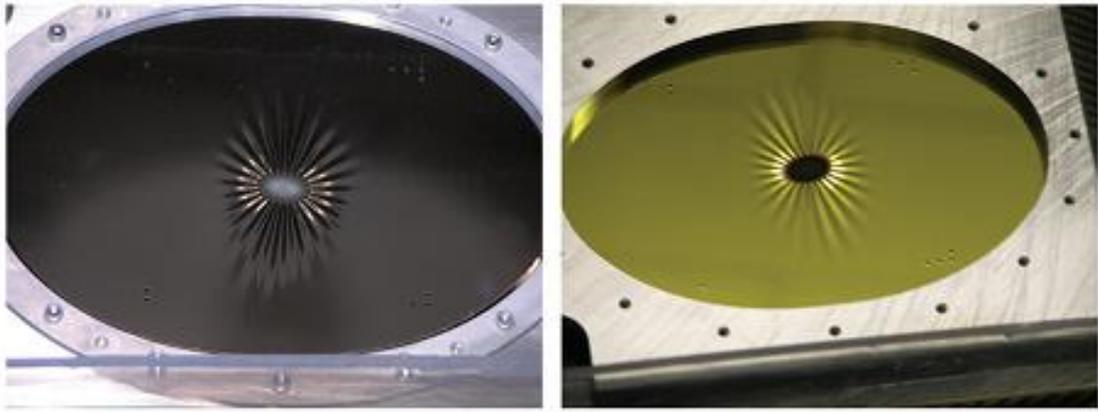


Рисунок 2. – Передняя сторона (алюминиевая, изображение слева) и задняя сторона пленки (каптоновая, изображение справа) через 70 дней после воздействия протонного пучка с интенсивностью $6,5 \cdot 10^{13}$ и энергией 120 ГэВ

Для нивелирования выявленного негативного эффекта, возможно использовать ДИ, которое в свою очередь обладает очевидным преимуществом перед ОПИ, т. к. метод диагностики, основанные на ДИ, является пренебрежимо мало воздействующим на мишень и не влияет на ее характеристики.

Как было отмечено ранее ПИ и ДИ имеют единый формализм, который обусловлен одинаковой природой – кильватерным полем. Соответственно, многие выводы для ПИ являются показательными и для ДИ. [4].

Дифракционное излучение, как и другие виды излучений, может быть когерентным и некогерентным. Излучение называют некогерентным, когда интенсивность излучения пропорционально числу частиц в сгустке, и когерентным, когда интенсивность излучения пропорциональна квадрату числа частиц. Свойство когерентности излучения проявляется, когда длина сгустка частиц меньше длины регистрируемого излучения. В противном случае излучение будет некогерентным [3]. Для дифракционного излучения, как и для любого типа излучения, генерируемого движущимися зарядами, существует понятие дальней (волновой) зоны и ближней зоны. Критерием определения, проводится ли измерение в дальней зоне или нет, является выполнение соотношения $\frac{L}{\gamma^2 \lambda} > 1$, L – расстояние до точки наблюдения (детектора), γ – Лоренц-фактор частицы, λ

— длина волны излучения. Другими словами, в случае если размерами источника излучения можно пренебречь, по сравнению с расстоянием до детектора, то говорят о дальней зоне. В случае же если размерами источника пренебречь нельзя $\frac{L}{\gamma^2 \lambda} \ll 1$, то говорят о ближней зоне. Следует отметить, что излучение в ближней и дальней зонах имеет отличающиеся спектральные и угловые характеристики, которые необходимо учитывать при моделировании процесса излучения для заданных параметров эксперимента. В отличие от оптики, где, как правило, используется разделение на ближнюю и дальнюю зон, в теории поляризованного излучения (в частности в теории ДИ) вводится понятие предволновой зоны (критерий $\frac{L}{\gamma^2 \lambda} \sim 1$) [9].

Процесс дифракционного излучения, кроме лоренц-фактора частицы γ и длины волны излучения λ , характеризуется еще несколькими характерными длинами. К ним относятся: расстояние от частицы до поверхности среды h , радиус затухания собственного поля частицы $\lambda \beta \gamma$, характерный размер неоднородностей поверхности a (не меньший, чем межмолекулярное расстояние $n_0^{-1/3}$) и длина формирования излучения l_c . В различных конкретных случаях между этими параметрами могут существовать различные неравенства, позволяющие выбрать определенный метод приближенного решения задачи. Различные соотношения между характерными параметрами приводят к различным подходам к описанию дифракционного излучения со своими особенностями [8].

Первый эксперимент по исследованию характеристик ДИ, генерируемого релятивистскими электронами, был проведен в 1995 году группой японских ученых [10]. Они измерили угловые распределения когерентного дифракционного излучения (КДИ) «вперед» в суб-мм и мм диапазоне от мишеней с круглыми отверстиями при пролете через них ультрарелятивистских электронных сгустков с энергией 150 МэВ. Результаты измерений хорошо описывались теорией, развитой Днестровским и Костомаровым [11]. Кроме того в этом эксперименте был измерен спектр излучения, из которого был получен продольный

профиль сгустка электронов и, соответственно, определен продольный размер сгустка [8].

2. Параметры пучков современных протонных ускорителей

Ускоритель частиц – установка, в которой с помощью электрических и магнитных полей получают направленные пучки электронов, протонов, ионов и других заряженных частиц с энергией, значительно превышающей тепловую энергию. Чаще всего классификация ускорителей идет по типу ускоряемых частиц, принципу ускорения, виду траектории и механизмам фокусировки [12]. По типу частиц различают ускорители электронов, протонов и ионов (в накопительных кольцах накапливают античастицы: позитроны и антипротоны – с целью увеличения тока частиц; в накопителях может происходить незначительное компенсационное ускорение).

По виду траекторий частиц различают линейные ускорители, в которых форма траектории близка к прямой линии, и циклические ускорители, в которых траектории частиц близки к окружности или спирали. В современных ускорительных комплексах часто используют элементы, состоящие из кольцевых и линейных ускорителей. В этом случае о виде траектории можно судить лишь на отдельных участках ускорения.

По физическим принципам, используемым для ускорения частиц, ускорители делят на высоковольтные, в которых ускоряющее поле обусловлено непосредственно приложенной разностью потенциалов; индукционные, в которых электрическое ускоряющее поле создается за счет изменения магнитного поля (ЭДС индукции); резонансные, в которых ускорение производится переменным высокочастотным (ВЧ) электромагнитным полем. Первые два типа ускорителей относятся к нерезонансным, поскольку в них направление электрического поля за время ускорения не изменяется.

Ускорители могут классифицироваться также по механизму, обеспечивающему фокусировку - устойчивость движения частиц в перпендикулярных к орбите направлениях. Различают ускорители с однородной (слабой) фокусировкой, в которых фокусирующая сила постоянна вдоль траектории (по крайней мере по знаку), и ускорители со знакопеременной (сильной) фокусировкой,

в которых фокусирующая сила меняет знак вдоль траектории, т.е. чередуются участки фокусировки и дефокусировки [12].

Ниже описываются основные характеристики различных современных протонных ускорителей, а также параметры ускоряемых пучков.

2.1 Большой адронный коллайдер

На сегодняшний день главенствующее положение среди экспериментальных устройств физики элементарных частиц занимают циклические ускорители, а именно кольцевые коллайдеры. Это, прежде всего, связано с такой способностью последних, как использование процесса аккумуляции сгустков в накопительных кольцах. При каждом новом столкновении используется лишь малая доля частиц ускоряемых пучков. Но на данных ускорителях частицы, запасенные в накопительных кольцах, можно сталкивать многократно с большой частотой столкновений и на выходе получать высокую светимость [13]. В связи с этим, первым к рассмотрению приведем самый крупный и наиболее известный в мире Большой адронный коллайдер (от англ. Large Hadron Collider, LHC), являющийся циклическим ускорителем заряженных частиц на встречных пучках, предназначенный для разгона протонов и тяжелых ионов свинца и изучения продуктов их соударений. На сегодняшний день LHC крупнейшая экспериментальная установка в мире физики элементарных частиц [13-15]. Ниже представлены основные характеристики выходного кольца LHC в Табл.1, и его схема – на Рис.3.

Таблица № 1. Основные характеристики выходного кольца LHC [16]

Наименование характеристики	Величина
Номинальная энергия протонов (в одном пучке)	7 ТэВ
Номинальная энергия ионов/нуклон (в одном пучке)	2,76 ТэВ/нуклон
Напряженность импульсного магнитного поля диполя	8,33 Т
Минимальное расстояние между сгустками	~ 7 м

Расчетная светимость	$10^{34} \text{ см.}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Угол пересечения сталкивающихся пучков	300 мкрад
Радиус пучка	16 мкм
Время заполнения основного кольца	7,5 мин
Число сгустков в протонном пучке	2808
Число протонов в сгустке	$1,1 \times 10^{11}$
Среднеквадратичная длина сгустка	7,55 см
Продольный эмиттанс (2σ) при экстракции пучка	0,5 эВ·с
Нормализованный поперечный эмиттанс (1σ) пучка при его экстракции	3,50 мкм-мрад
Число оборотов в секунду	11245
Число столкновений в секунду	$(4-6) \times 10^8$
Диаметр окружности кольца	26,659 км
Рабочая температура магнитных диполей	1,9 К (- 271,3°С)
Число магнитов	9300
Число диполей	1232
Число квадруполей	386
Число ВЧ резонаторов	8 на пучок

Коллайдер планируется вывести к проектным характеристикам (представлены в табл. 1) в несколько этапов. На каждом из которых пучки протонов или ионов свинца будут иметь свои определенные параметры [16].

Основное кольцо ЛНС состоит из участков двух труб, расположенных по окружности кольца. В трубах в противоположных направлениях двигаются пучки протонов или ионов свинца. Трубы пересекаются в точках столкновения пучков, в районе последних располагаются детекторы, фиксирующие частицы после процесса соударения пучков. Частицы инжектируются из комплекса ускорителей ЦЕРН с помощью септум и киккер магнитов в одну из двух вакуумных труб. Для протонов начальная кинетическая энергия равна 0,45 ТэВ а

для тяжелых ионов свинца – 177 ГэВ/нуклон. Далее впрыснутые частицы ускоряются резонаторами, охлажденными жидким гелием до 4,5°К, большого кольца до проектных энергий: до 7 ТэВ (протоны) и 2,76 ТэВ/нуклон (тяжелые ионы свинца). Удержание ускоряемых частиц на приблизительно круговой траектории движения проводят с помощью 1232-х дипольных магнитов, а фокусировку осуществляют при помощи 386-ти квадрупольных магнитов и тысячи малых корректирующих магнитов [17].

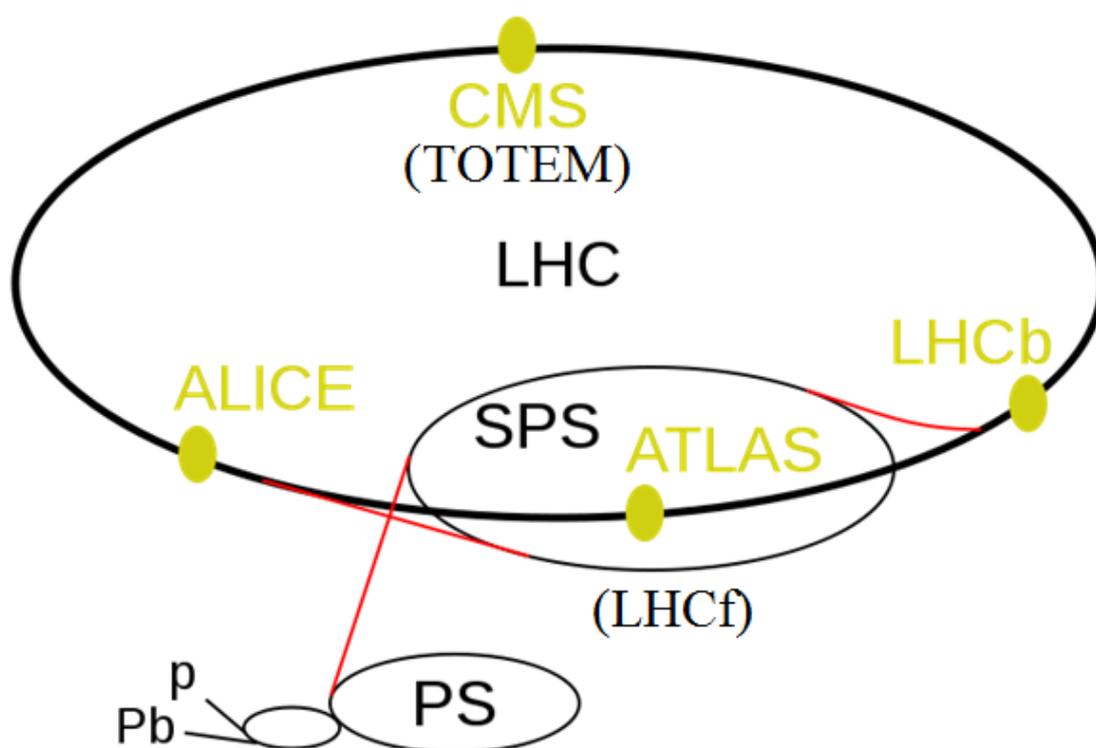


Рисунок 3. – Детекторы и предускорители БАК

Из рис. 3 видна траектория протонов p (ионов свинца Pb), начинающаяся в линейных ускорителях (точки p и Pb, соответственно). Далее ускоряемые частицы попадают в бустер протонного синхротрона (PS), после — в протонный суперсинхротрон (SPS) и, наконец, в тоннель LHC [14].

В основном кольце LHC задействованы 8 сверхпроводящих резонаторов на один пучок, увеличивая энергию ускоряемого пучка 8*2МэВ, при напряжен-

ности ускоряющего поля 5 МВ/м. ВЧ резонаторы работают на частоте ~ 400 МГц. ВЧ мощность генерируется 16-тью 300 кВт клистродами, работающим в квази-непрерывном режиме. Частицы проходят зазор резонатора в нарастающем электрическом поле, что обеспечивает автофазировку частиц. Трубы основного кольца коллайдера заполняются пакетами сгустков протонов. Каждый пакет содержит 72 сгустка. Полное число пакетов сгустков равно 39. Таким образом, полное число сгустков, инжектируемое в каждую трубу, составляет 2808. Каждый сгусток содержит приблизительно $1,1 \times 10^{11}$ протонов. Длительность сгустка (среднеквадратичная, 4σ) составляет 1,71 нс (513 мм). Интервал между сгустками составляет 24,95 нс, что соответствует 10 периодам колебаний ускоряющих резонаторов [16].

2.1.1 Инжекторная система протонов на БАК

Как уже отмечалось выше, сгустки ускоренных протонов и ионов свинца формируются и поступают на вход основного кольца БАК из инжекторного комплекса ускорителей ЦЕРН. Состав комплекса приведен в Табл. 2.

Таблица № 2. Перечень основных ускорителей — инжекторов, формирующих протонный пучок коллайдера БАК

Наименование устройства	Выходные параметры
Источник протонов - дуоплазмотрон	300 мА, до 92 кэВ
ВЧ квадруполь (ВЧК, RFQ)	до 750 кэВ
Линейный ускоритель протонов (ЛУП – 2, linac-2)	до 50 МэВ
Бустерный протонный синхротрон (БПС, PSB)	1,4 ТэВ
Протонный синхротрон (ПС, PS)	28 ТэВ
Супер-протонный синхротрон (СПС, SPS)	450 ТэВ
Большой адронный коллайдер – основное кольцо (БАК, LHC)	7 ТэВ при токе 180 мА

Первой ступенью создания протонного пучка является комплекс линейного ускорителя ЛУП-2. Из комплексов линейных ускорителей протонов и ионов свинца пучки будут поступать в три синхротрона (для протонов) и в два синхротрона — для ионов свинца (смотри Рис. 3). Основные параметры этих синхротронов приведены в Табл. 3 [14, 16, 17].

Таблица № 3. Основные параметры синхротронов инжектора БАК

Параметры синхротронов	Linac	PS	SPS
Кинетическая энергия (ГэВ)	1,4	25	450
Длительность циклов магнитного поля (сек)	1,2	3,6	16,8
Число циклов магнитного поля для заполнения последующего синхротрона и кольца БАК	2	3	2×12
Число пакетов сгустков	1/оборот	8 (16) 84	243
Номинальное число протонов/сгусток, (10^{10})	46	92	267
Номинальное число протонов/импульс, (10^{11})	11,5	11,5/1,1	1,1
Эмиттанс поперечный среднеквадратичный (мкм)	2,5	3,0	3,5
Эмиттанс продольный, полный (эВс)	-	-	1,0
Длина импульса, полная, 4σ (нс)	-	-	1,7
Энергетический разброс, полный, 4σ (10^{-3})	-	-	1,9

2.1.2 Ионные пучки

Как отмечалось выше, БАК предназначен не только для проведения столкновений протонных пучков, но также столкновений пучков ионов свинца [18,21]. Основные характеристики ионных пучков коллайдера приведены в Табл.4.

Таблица № 4. Основные характеристики БАК при работе с пучками тяжелых ионов свинца

Параметры пучка	Величина
Энергия ион/нуклон (в точке столкновения), ТэВ/нуклон	2,76

Число ионов/сгусток (в одном пучке)	$7,0 \times 10^7$
Число сгустков (в одном пучке)	592
Поперечный нормализованный эмиттанс, мкм	1,5
Импульсное ВЧ напряжение (система 400 МГц), МВ	16
Продольный эмиттанс среднеквадратичный (4σ), эВ/заряд	23
Длина сгустка (среднеквадратичная, σ), см	7,94
Импульсная яркость в точке столкновения, $\text{см}^{-1} \text{с}^{-2}$	$1,1 \times 10^{27}$

Основным методом диагностики протонного пучка на БАК является использование синхротронного излучения, которое испускается ускоряющимися заряженными частицами. Также активно применяются ОПИ-детекторы, разработанные в Фермилаб для диагностики протонных пучков с высокой интенсивностью на Теватроне, но затем были распространены и на ЛНС. В разделе 2.7 «Методы диагностики пучков заряженных частиц на ускорителях» более подробно рассмотрено, что представляют данные методы диагностики.

2.2 Теватрон

Рассмотрим второй циклический коллайдер, который до 2009 г был самым крупным в мире, но ныне выведен из эксплуатации — Теватрон [19]. Данный коллайдер находится в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми, Батавия, США, ныне проходит модернизацию в электрон-позитронный ускоритель. Теватрон был способен ускорять пучки протонов/антипротонов до энергии 0,98 ТэВ.

Основные характеристики Теватрона и ускоряемых пучков приведены в таблице 5 [20, 21].

Таблица №5. Основные характеристики Теватрона и ускоряемых пучков [20, 21]

Параметры	Величина
Число протонов в сгустке	2.8×10^{11}
Число антипротонов в сгустке	0.8×10^{11}
Среднеквадратичный эмиттанс для протонов	20π мм-мрад
Среднеквадратичный эмиттанс для антипротонов	15π мм-мрад
Протяженность сгустка протонов (среднеквадратичная, σ)	38 см
Протяженность сгустка антипротонов (среднеквадратичная, σ)	38 см
Число сгустков в пучке	36
Длительность интервала между сгустками	396 нс
Светимость	$4.3 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Длина кольца	6280 м
Разброс по импульсам для протонов	1.4×10^{-4}
Разброс по импульсам для антипротонов	1.2×10^{-4}
Энергия протонов/антипротонов	0.98 ТэВ
Энергия протонов/антипротонов в центре масс	1.96 ТэВ
Слип фактор η	0.0028
Высокочастотное напряжение	1 МВ
Номер гармоники	1113
Частота	53.1 МГц
Синхротронная частота	35 Гц

В ускорительный комплекс входят несколько ускорителей, первым является ускоритель Кокрофта – Уолтона, в котором ускоряются инжектированные ионы водорода. Далее отрицательно заряженные ионы попадают в линейный резонансный ускоритель длиной 150 м, где на выходе ускоряемые частицы имеют кинетическую энергию 400 МэВ и при этом при прохождении через углеродную фольгу ионы водорода обдираются, превращаясь в протоны. Затем последние ускоряются в бустерном кольце до энергии 8 ГэВ, и после попадают в главный инжектор — синхротрон, на выходе из которого ускоряемые частицы

принимают значение энергии 150 ГэВ. В главном инжекторе также рождаются антипротоны, посредством бомбардировки частью протонов никелевой мишени и ускоряются до энергии 150 ГэВ. Далее протонные и антипротонные пучки инжектируются в одноканальное основное кольцо коллайдера. В основном кольце частицы ускоряются до проектной энергии 0,98 ТэВ. Из-за движения пучков в противоположных направлениях, они пересекаются в двух точках основного кольца, где установлены различные детекторы для регистрации продуктов столкновения пучков [20 - 22].

Диагностика ускоряемых пучков проводилась следующими методами: синхротронное излучение и переходное излучение, что ныне используются на большом адронном коллайдере в CERN (см. выше).

2.3 J-PARC

Рассмотрим японский проект J-PARC (от сокр. Japan Proton Accelerator Research Complex). Это протонный ускорительный комплекс, созданный для исследований в областях: нейтринной, адронной физике, материаловедения [23]. Данный комплекс состоит из 3 ускорителей: Линак, RCS (Rapid Cycling Synchrotron), Main Ring (сокр. MR), каждый из них обслуживает целый ряд экспериментальных установок.

Линак является источником первичных пучков отрицательно заряженных ионов водорода с энергией 400 МэВ и имеет возможность доускорять пучки до 600 МэВ в сверхпроводящем линаке [23].

RCS является быстроциклирующим протонным синхротроном и способен ускорять протонный пучок до энергии 3 ГэВ. 90 % времени RCS сбрасывает 3 ГэВ пучок на мишень установки MLF (Materials and Life Science Experimental Facility), остальные 10 % времени протоны перепускаются в большой синхротрон Main Ring. Основные параметры данного синхротрона приведены в табл.6.

Таблица №6. Основные характеристики RCS и ускоряемых протонных пучков [24]

Параметры	Величина
Длина кольца	348,33 м
Средний радиус кольца	55,44 м
Энергия пучка при его инжекции	0,181/0,4 ГэВ
Энергия пучка при его экстракции	3 ГэВ
Число частиц в импульсе	$8,3 \times 10^{13}$
Период обращения:	
при инжекции	1,629 мсек
при экстракции	1,196 мсек
Частота повторения импульсов	25 Гц
Средний ток	333 мА
Поперечный эмиттанс для инжектируемого пучка:	
Вертикальная составляющая	4π мм-мрад
Горизонтальная составляющая	4π мм-мрад
Поперечный эмиттанс пучка при его экстракции	81π мм-мрад
Продольный эмиттанс пучка при его инжекции	3,5 эВ·с
Продольный эмиттанс пучка при его экстракции	5 эВ·с

Основное кольцо, протонный синхротрон MR на энергию 50 ГэВ, периметр 1567.5 м. Имеет две системы выпуска: медленная, и быстрая. Система медленного выпуска направляет пучок протонов на станцию адронной физики, где протонный пучок рождает каоны. Быстрый выпуск используется для создания пучка нейтрино, который исследуется в детекторе Super-Kamiokande. Основные параметры данного синхротрона приведены в табл.7.

Таблица №7. Основные характеристики выходного кольца MR(50 ГэВ) и ускоряемых протонных пучков [24]

Параметры	Величина
Длина кольца	1568 м
Средний радиус кольца	249,5 м
Энергия пучка при его инжекции	3 ГэВ
Энергия пучка при его экстракции	30 ГэВ (50 ГэВ)
Лоренц фактор при энергии пучка в 3 ГэВ (30 ГэВ)	4,22 (33,21)
Номер гармоники	9
Интенсивность	$1,3 \times 10^{14}$
Число сгустков в пучке	8
Поперечный эмиттанс пучка при его инжекции	54π мм-мрад
Период обращения:	
при инжекции	5,384 мсек
при экстракции	5,231 мсек
Частота при инжекции	1,67 МГц
Частота при экстракции	1,72 МГц
Высокочастотное напряжение	200 кВ / 240 кВ
Протяженность сгустка (время)	70-200 нсек
Протяженность сгустка (положение)	20-60 м
Количество осцилляций для быстрой экстракции пучка (бетатронные колебания)	22,40 (горизонт) 20,76 (вертикал)
Количество осцилляций для медленной экстракции пучка (бетатронные колебания)	22,30 (горизонт) 20,78 (вертикал)
Время цикла для быстрой инжекции	3,2 сек / 2,6 сек
Время цикла для медленной инжекции	6,0 сек

На сегодняшний день бустер Main Ring на 50 ГэВ лишь строится и не введен в эксплуатацию.

2.4 European Spallation Source

ESS – линейный ускорительный источник нейтронов, находящийся в шведском городе Лунд. ESS состоит из нескольких линейных ускорителей. Схема данного комплекса приведена ниже.

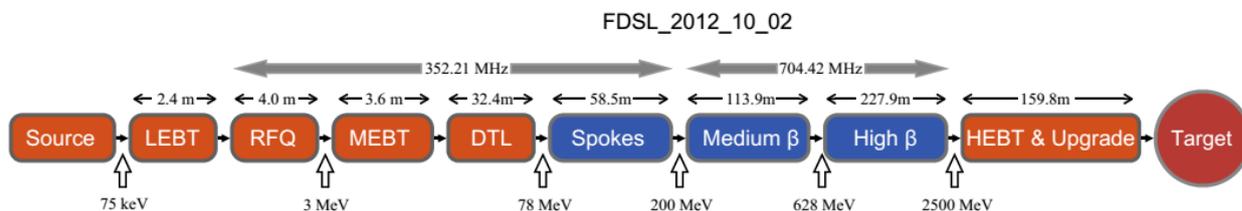


Рисунок 4. – Схема линейного ускорительного комплекса ESS

Линейный акселератор ESS работает в импульсном режиме, ускоряя сгусток протонов 14 раз в секунду. Энергия протонов на выходе — 2.5 ГэВ, а мощность ускорителя в момент прохода сгустка может достигать 125МВт [25]

Основные параметры ускорителя и протонного пучка приведены в табл.8

Таблица №8. Основные характеристики ускорителя European Spallation Source и ускоряемых пучков [26]

Параметры	Величина
Средняя мощность пучка на мишени	5.0 МВт
Пиковая мощность	125 МВт
Энергия протонного пучка:	
при инжекции	75 кэВ
при экстракции	2.5 ГэВ
Средний ток	50 мА
Протяженность макроимпульса	2,86 мсек
Частота повторения импульсов	14 Гц
Среднеквадратичный эмиттанс на выходе из RFQ:	
поперечный	0.20π мм-мрад
продольный	0.34π мм-мрад
Число протонов в сгустке	1.83 · 10 ⁸

Число сгустков в пакете (макроимпульсе)	$1.63 \cdot 10^6$
Среднеквадратичные размеры сгустка:	
при кинетической энергии 200 МэВ	$\sigma_x = \sigma_y = 2.7$ мм; $\sigma_z = 2.0$ мм
при кинетической энергии 628 МэВ	$\sigma_x = \sigma_y = 2.4$ мм; $\sigma_z = 1,3$ мм
при кинетической энергии 2500 МэВ	$\sigma_x = \sigma_y = 2.1$ мм; $\sigma_z = 0,7$ мм

В таблице 8 – $\sigma_y, \sigma_x, \sigma_z$ – размеры пучка по осям x, y, z.

ESS представляет собой вакуумную трубу длиной 602 метра, на которую надеты ускоряющие, фокусирующие и контролирующие элементы. Фокусирующая структура The Medium Energy Beam Transport (MEBT) длиной 3,9 метра производит согласование в ускорительную секцию выполненную по классической технологии трубок дрейфа The Drift Tube Linac (DTL). Здесь энергия протонов возрастает с 3,6 до 80 МэВ, а длина этой части составляет 32 метра. Ускорение так же происходит электромагнитным полем.

После набора достаточной энергии в первой части ускорителя, протоны переходят в систему сверхпроводящих ниобиевых резонаторов разбитых на несколько групп с возрастающей частотой. Именно в сверхпроводящих модулях происходит основное ускорение — с 80 до 2500 МэВ. После прохода ускорителя каждый сгусток протонов имеет энергию близкую к 2500 МэВ, длительность в районе 1 миллисекунды, импульсный ток в 62 мА и частоту повторения 14 Гц [25].

2.5 У-70 в ИФВЭ

Все предыдущие описанные ускорители являются зарубежными представителями установок в исследованиях физики высоких энергий. В России из работающих ускорителей можно выделить протонный синхротрон в ИФВЭ.

Год запуска 1967. Вообще говоря, данный комплекс состоит из инжектора - линейный ускоритель протонов с высокочастотной квадрупольной фокусировкой УРАЛ 30 и непосредственно самого синхротрона У-70. Ниже приведены основные характеристики инжектора в Табл.9 и в Табл.10 – синхротрона [27].

Таблица №9. Основные параметры линейного ускорителя УРАЛ 30 в ИФВЭ, Протвино

Параметры	Величина
Режим работы	Пакетно-импульсный
Энергия инжектируемых протонов	30 МэВ
Максимальная энергия ускоренных протонов	1,5 ГэВ
Диапазон энергий выводимого пучка	0,2-1,32 ГэВ
Рабочее значение магнитного поля	1,39-12,0 кГс
Длина равновесной орбиты	99,16 м
Количество периодов магнитной структуры	12
Импульсный разброс при инжекции	±0,3%
Коэффициент расширения орбит	0,07235
Бетатронные частоты: горизонтальная / вертикальная	3,85 / 3,80
Магнитная структура	М–ФДФ–М
Эмиттанс выведенного пучка при 1,32 ГэВ:	
горизонтальный (95% пучка)	20π мм·мрад
вертикальный (95% пучка)	10π мм·мрад
Продольный эмиттанс	0,45 эВ·сек
Кратность ускорения	1
Частота ускоряющего напряжения	0,75–2,79 МГц
Суммарное ускоряющее напряжение (9 станций)	0,6–60 кВ

Таблица №10. Основные параметры ускорителя У-70 в ИФВЭ, Протвино.

Параметры	Величина
Максимальная энергия	76 ГэВ
Энергия инжекции	1.32 ГэВ
Интенсивность пучка протонов в импульсе	$1.7 \cdot 10^{13}$
Частота повторения импульсов	0.11 Гц
Периметр орбиты	1483.63 м
Радиус кривизны орбиты в магнитном блоке	194.12 м
Число магнитных блоков	120
Число суперпериода магнитной структуры	12
Прирост энергии за оборот	170 кэВ
Частота ускоряющего напряжения	5.5-6.1 МГц
Длительность цикла	~9 сек
Индукция магнитного поля	0.355 кГс
Длительность плато	2 сек
Порядок фокусировки	FODO
Бетатронная частота	9.75-9.85
Кратность ускорения	30

В 1988 г. начались работы по проекту, в котором синхротрон У-70 должен был стать инжектором в первую ступень ускорительно-накопительного комплекса (УНК-1), но проект был приостановлен. В настоящее время производится модернизация вакуумной камеры ускорителя для увеличения интенсивности протонного пучка [28].

2.6. Ускоритель PSI

В Институте им. Пауля Шеррера (PSI) имеется несколько ускорителей, нас же, в первую очередь, интересует протонный ускоритель, который обладает возможностью ускорения поляризованных протонов [29].

Основные параметры машины можно найти, например, в справочнике [30]; некоторые из них даны в Табл.11.

Таблица 11. Важнейшие параметры ускорителя PSI.

Параметр	Значение
Энергия инжекции	72 МэВ
Макс, энергия выведенного пучка	595 МэВ
Степень монохроматичности выведенного пучка	2%
Макс, ток выведенного пучка (квазипостоянный)	1.5 мА
Макс, интенсивность выведенного пучка	$9.4 \cdot 10^{15} \text{ сек}^{-1}$
Длительность сгустка	$\sim 1 \text{ нсек} / \sim 300 \text{ мм}$
Длительность интервала между сгустками	19.75 нсек
Частота в ускоряющих электродах	50.63 МГц

Высокая интенсивность протонного пучка (большой ток) позволяет получать достаточно интенсивные нейтронные и пионные пучки (поэтому его относят также к "мезонным фабрикам").

На сегодняшний день работы на этой установке ориентированы на прикладные исследования [29].

2.7 Методы диагностики пучков заряженных частиц на ускорителях

Основным методом диагностики протонного пучка на современных кольцевых коллайдерах (LHC, Теватрон, J-PARC и др.) является использование синхротронного излучения, которое испускается ускоряющимися заряженными частицами.

Также, помимо синхротронного излучения активно применяется оптическое переходное излучение, испускаемое релятивистскими заряженными частицами при пересечении последними границы раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью. Данное излучение лежит в области видимого спектра, что позволяет применять относительно простые технические методы визуализации для восстановления размера и положения пучков. Изначально ОПИ-детекторы, разработанные в Фермилаб для диагностики протонных пучков с высокой интенсивностью применялись на Теватроне, но затем были распространены и в другие исследовательские лаборатории, такие как CERN [16], J-PARC[24]. Данные детекторы могут использоваться для измерения таких параметров пучка, как поперечный профиль, поперечное положение, дивергенция, эмиттанс и интенсивность и др. характеристики ускоряемого пучка [31, 32].

Детектор оптического переходного излучения состоит из двух частей: слоистого радиатора, представляющего собой регулярную стопку, содержащую несколько сотен тонких (5-100 мкм) полипропиленовых плёнок, (расстояние между последними не более 2 мм) или пористого радиатора (в качестве которых применяют полипропиленовое или углеродное волокно); непосредственно самого детектора, способного регистрировать фотоны, испускаемые частицей в радиаторе.

В роли детектора, регистрирующего фотоны, испускаемые релятивистской частицей в радиаторе, могут использоваться фотоэлектронные умножители.

ли (ФЭУ), пропорциональная камера, фотодиод SiPM (англ. Silicon photomultiplier) [33].

Стоит отметить, что данные методы диагностики применяются практически на всех современных ускорителях, где протонный пучок обладает высокой интенсивностью.

2.8 Краткая характеристика протонных ускорителей

Подводя итог к данной главе можно составить таблицу с параметрами пучков для современных протонных ускорительных комплексов, важных для нашего дальнейшего моделирования.

Таблица 12. Важнейшие параметры протонных ускорителей.

Название ускорителя	Тип ускорителя	Кинетическая энергия (γ – фактор)	Продольный размер сгустка	Поперечный размер сгустка	Населенность сгустка
LHC	Кольцевой	7 ТэВ ($\gamma = 7460$)	7,55 см	~ 0,4 мм	$1,1 \cdot 10^{11}$
SPS	Кольцевой	450 ГэВ ($\gamma = 480$)	7,55 см	1,19 мм	$1,1 \cdot 10^{11}$
Теватрон	Кольцевой	0.98 ТэВ ($\gamma = 1045$)	38 см	1,5 мм	$2.8 \cdot 10^{11}$
Linac	Линейный	600 МэВ ($\gamma = 1,64$)	–	–	$8,3 \cdot 10^{13}$
MR-50	Кольцевой	50 ГэВ ($\gamma = 54.3$)	20-60 м	–	$1,3 \cdot 10^{14}$
ESS	Линейный	2,5 ГэВ ($\gamma = 3,11$)	2,1 мм	0,7 мм	$1.83 \cdot 10^8$

У-70	Кольцевой	76 ГэВ ($\gamma = 82$)	~ 25 м	–	$1.7 \cdot 10^{13}$
PSI	Кольцевой	600 МэВ ($\gamma = 1.64$)	–	–	–

Как видно, на современном этапе развития физики высоких энергий для исследований свойств материи или использования в прикладных целях было создано множество ускоряющих установок со всевозможными параметрами. Важной частью нормальной эксплуатации ускорителей является непрерывный мониторинг состояния ускоряемого пучка, а, так как имеется широкий спектр самых различных установок со своими уникальными параметрами, необходима разработка самых разнообразных методов диагностики пучков, в том числе для вновь разрабатываемых ускорителей.

3 Моделирование дифракционного излучения

Для моделирования угловых распределений воспользуемся следующей формулой для интенсивности дифракционного излучения (одночастичное приближение) [34, 35].

$$\frac{d^2 W_{DR}}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{\pi^2 c} \cdot \frac{|U + U^*|^2}{4(1 - \beta^2(e_y^2 - e_z^2))} \cdot \exp\left\{-\frac{2\pi a}{\lambda\beta\gamma} \cdot \cos\alpha \cdot \sqrt{1 + (\beta\gamma e_x)^2}\right\} \quad (1)$$

где e – элементарный заряд, c – скорость света, λ – длина волны ДИ, γ – Лоренц-фактор, $\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}$, a – ширина щели, α – угол падения частицы на мишень,

$$U = \left\{ \beta\gamma e_x e_z, e_z(\gamma^{-1} \sin\alpha - i \cos\alpha \sqrt{1 - (\beta\gamma e_x)^2}), -\beta\gamma e_x^2 - e_y(\gamma^{-1} \sin\alpha - i \cos\alpha \sqrt{1 - (\beta\gamma e_x)^2}) \right\} \cdot \frac{\exp\left\{-i\frac{a}{2\lambda}(\beta^{-1} - \sin\alpha - e_y)\right\}}{\cos\alpha \sqrt{1 - (\beta\gamma e_x)^2} + i\gamma(\sin\alpha - \beta e_y)} \quad (2)$$

$$e_{x,y,z} = \left\{ \sin\theta_x, \quad \cos\theta_x \cdot \sin(\alpha + \theta_y), \quad \sin\theta_x \cdot \sin(\alpha + \theta_y) \right\} \quad (3)$$

Формула (1) применима для решения известной задачи дифракционного излучения – излучение при наклонном пролете частицы через прямоугольную щель в бесконечном экране (при переходе к нулевому значению ширины щели, формула описывает переходное излучение для любых энергий частицы и ее угла падения на экран). Далее на последующих рисунках все значения для выражения (1) приводятся в относительных единицах измерения. Иначе, данное обстоятельство будет обговорено.

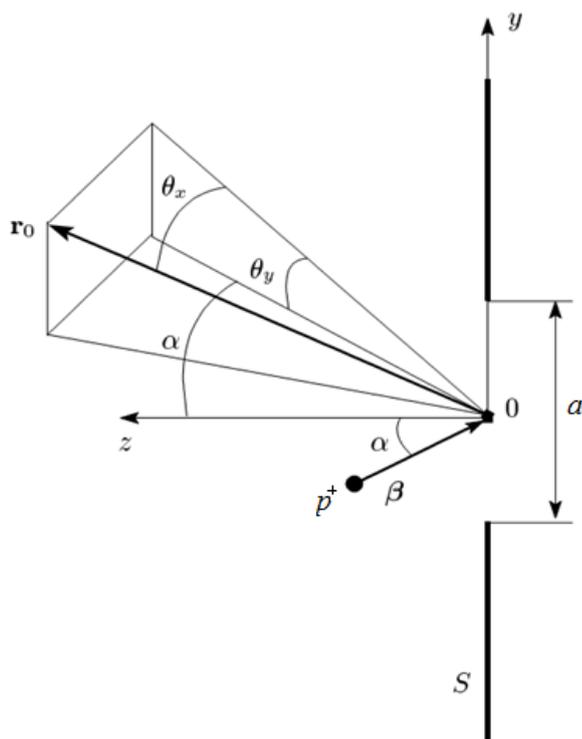


Рисунок 5 – Схема генерации дифракционного излучения «назад» при наклонном пролете протона через прямоугольную щель в бесконечном экране

Формула (3) описывает так называемые «проекционные» углы, отсчитываемые от направления зеркального отражения (см. рис. 5)

3.1 Моделирование некогерентного дифракционного излучения при пролете заряженной частицы через щель в идеально проводящем экране

Рассмотрим интенсивность ДИ от протона для геометрии, представленной на рисунке 5 в зависимости от проекционных углов наблюдения: θ_x, θ_y , в диапазоне от -1 до +1 радиана для мм-ого диапазона длин волн (рис. 6-8).

Выберем угол падения частицы на экран равным $\alpha = \frac{\pi}{4}$.

Подберем значение кинетической энергии протона, близкое к значению энергии протонного пучка на ускорителе ESS (см. табл. 8). Очень часто для

удобства расчетов используют значение Лоренц фактора, а не кинетической энергии частицы. Последние две величины связаны следующим соотношением:

$$\gamma = \frac{E_k + E_0}{E_0} = \frac{E}{E_0} \quad (4)$$

Где $E_0 = 938,4$ МэВ – энергия покоя частицы (в нашем случае, протона), E_k – кинетическая энергия частицы (МэВ), E – полная энергия частицы (МэВ) и как уже упоминалось выше γ – Лоренц-фактор (безразмерная величина).

Тогда, Лоренц-фактор протона с кинетической энергией 2500 МэВ принимает следующее значение $\gamma = \frac{E}{E_0} = 3,11$.

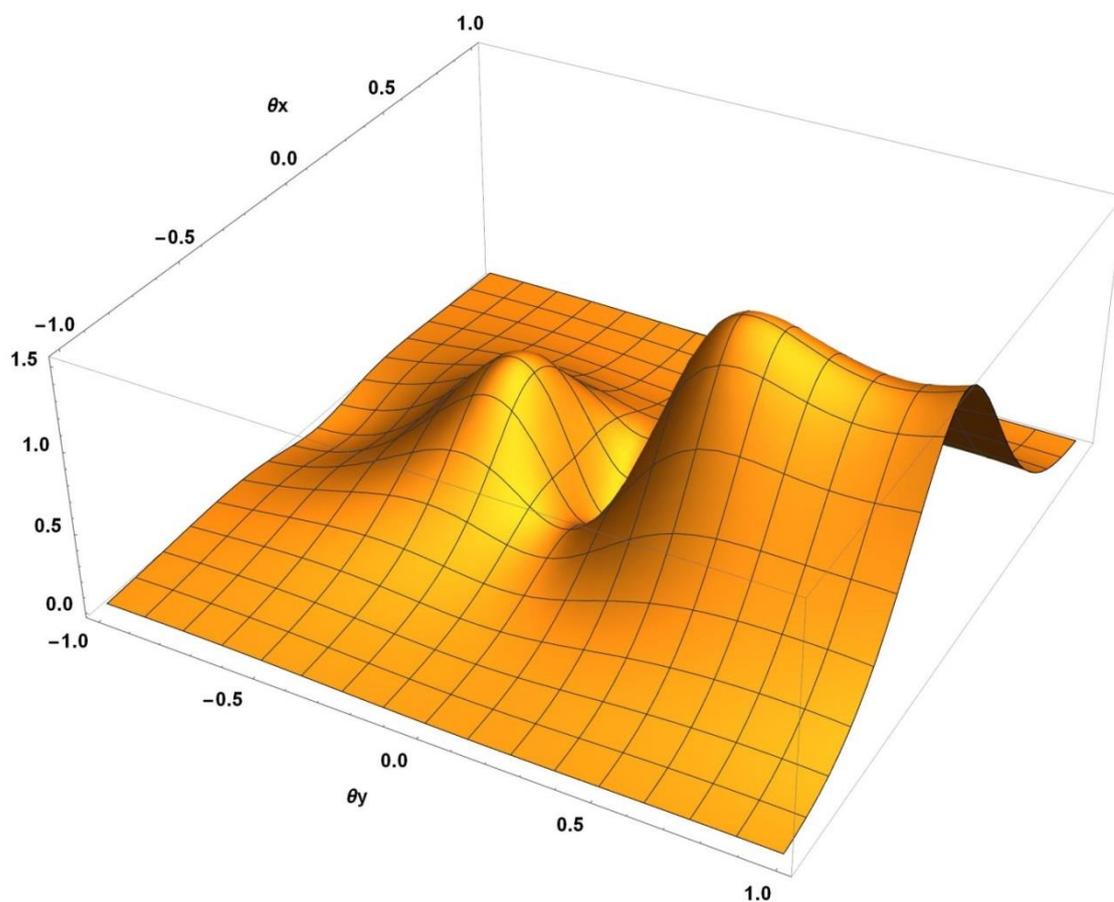


Рисунок 6 – Угловое распределение некогерентного ДИ $\frac{d^2W_{DR}}{d\omega d\Omega}$ (приведено в относительных единицах) при фиксированных параметрах: $\lambda = 15$ мм, $a = 11$ мм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Значение длины волны ДИ было выбрано равным: $\lambda = 15$ мм, из этого значения была подобрана ширина щели из соотношения $a = 2 \cdot \gamma \cdot 0,08 \cdot \lambda \approx 11$ мм, где $\gamma\lambda$ – эффективный радиус поля [8]. Безразмерный множитель 0.08 вводится для получения значения ширины щели, соизмеримой с поперечным размером протонного сгустка на ускорителе ESS. Соотношение помогает определить оптимальное значение ширины щелевой мишени, при котором возможно наблюдать интенсивное ДИ, в случае малого значения ширины щелевой мишени, в сравнении с размером сгустка частиц, будет наблюдаться уже ПИ.

На рис. 6 дано общее представление о виде углового распределения некогерентного ДИ в пространстве. Легко видеть, что данное угловое распределение является несимметричным относительно проекционного угла θ_y . Построим угловое распределение ДИ в плоскостях θ_y и θ_x (см. рис. 7 – 8) для более детального анализа.

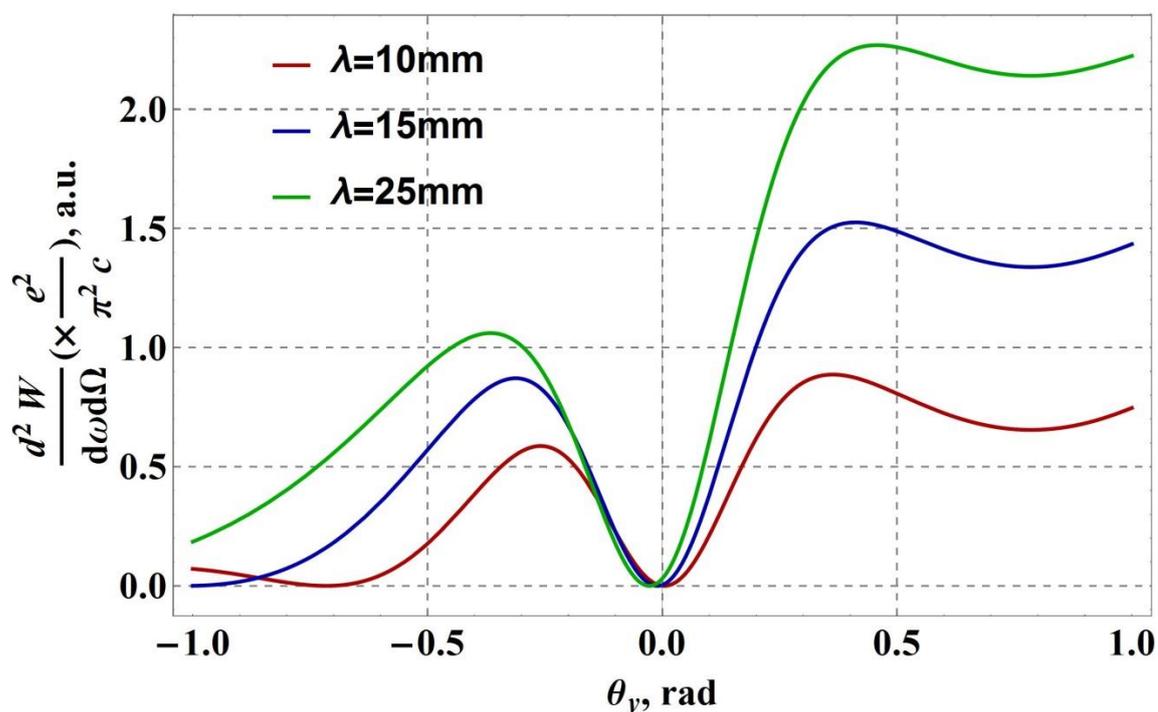


Рисунок 7 – Угловое распределение некогерентного ДИ (приведено в относительных единицах) в зависимости от проекционного угла θ_y . Ширина

щели $a = 11$ мм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Как уже говорилось выше, в плоскости θ_y наблюдается широкий правый пик, который объясняется малым значением энергии протона (не релятивистский случай). А также можно наблюдать не попадание минимума в ноль для значения длины волны ДИ $\lambda = 25$ мм.

Рассчитаем значения максимумов функции углового распределения дифракционного излучения для дальнейшего построения спектра (см. рис. 9). Выбирая среднее значение длины волны $\lambda = 15$ мм, были получены: $\theta_{yMax1} = 0.42 \text{ rad}$, $\theta_{yMax2} = -0.32 \text{ rad}$. Здесь и в дальнейшем, θ_{yMax} и θ_{xMax} — значения проекционных углов, на которые приходится максимум.

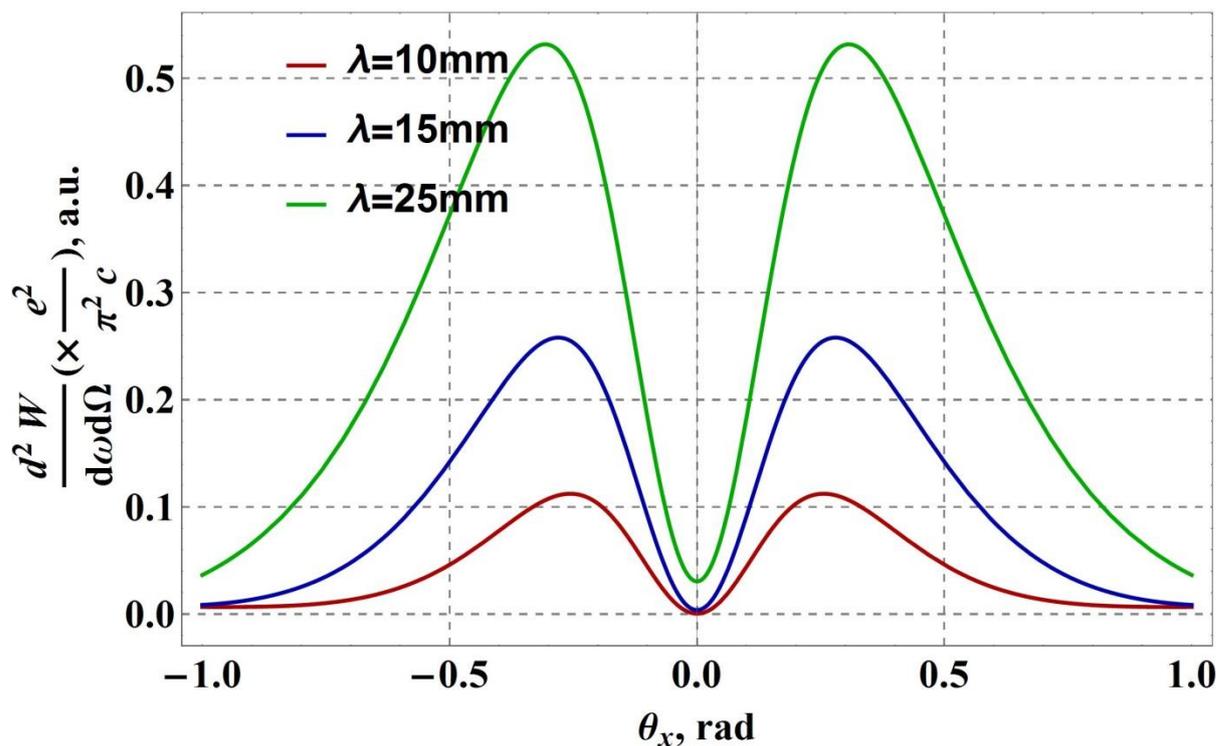


Рисунок 8 – Угловое распределение некогерентного ДИ (приведено в относительных единицах) в зависимости от проекционного угла θ_x . Ширина щели $a = 11$ мм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Распределение симметрично. Примечательным моментом в поведении углового распределения можно выделить, что последнее по амплитуде для длины 25 мм имеет центр не ноль, а по положению центр в нуле.

Из рисунков 6 - 8 видим, что значение $\theta_{xMax} = 0$.

На основании полученных максимумов проекционных углов построим спектр некогерентного ДИ для длины волны $\lambda = 15$ мм.

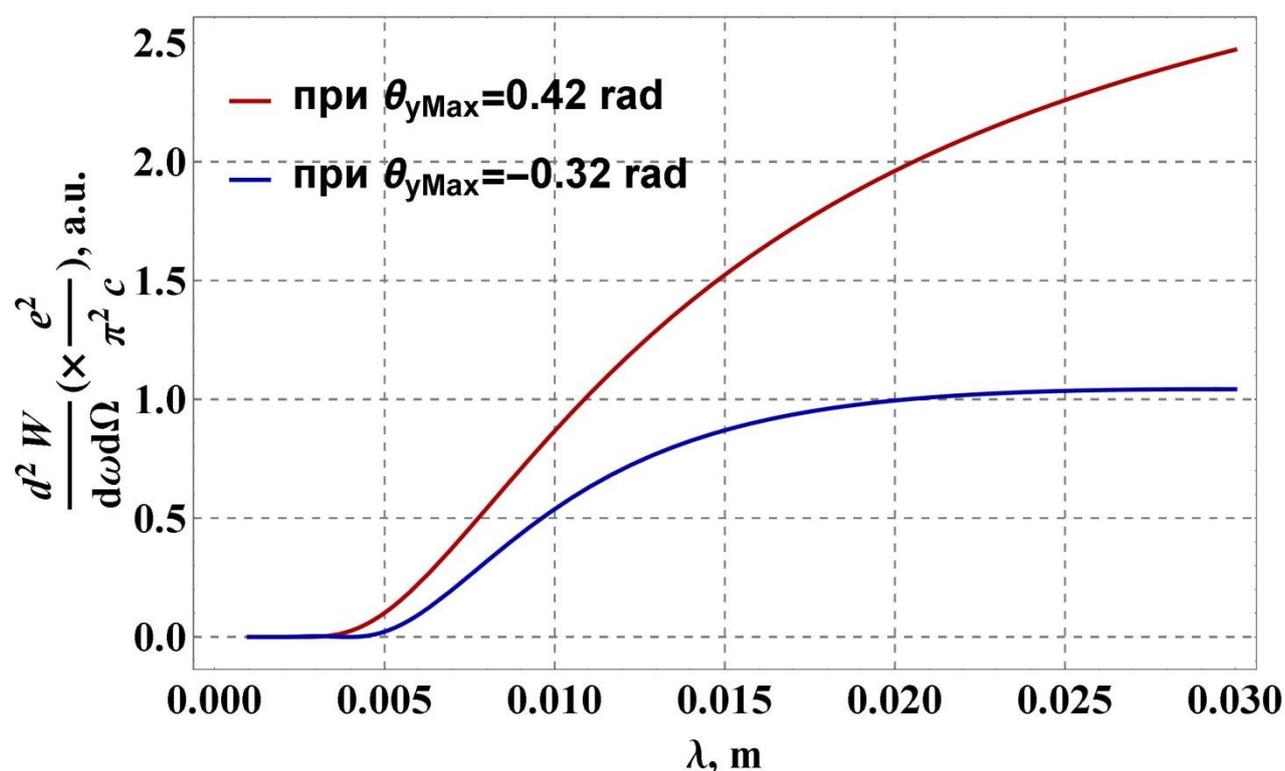


Рисунок 9 – Спектральное распределение некогерентного ДИ (приведено в относительных единицах) при $\theta_{yMax1} = 0.42 \text{ rad}$, $\theta_{yMax2} = -0.32 \text{ rad}$. Ширина щели $a = 11$ мм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2c}$.

Как видно из рисунка 9, наблюдаемый спектр обрезается в области коротких длин волн, что объясняется наличием щели.

Рассмотрим интенсивность ДИ от протона в зависимости от проекционных углов наблюдения: θ_x, θ_y , в диапазоне от -1 до +1 радиана для терагерцево-

го (субмиллиметрового) диапазона длин волн (рис. 10 - 12). Геометрия не изменена.

Выберем угол падения частицы на экран равным $\alpha = \frac{\pi}{4}$.

Подберем значение кинетической энергии протона, близкое к значению энергии протонного пучка на ускорителе ESS (см. табл. 8). Получим аналогичное значение Лоренц-фактора, что и выше: $\gamma = \frac{E}{E_0} = 3,11$.

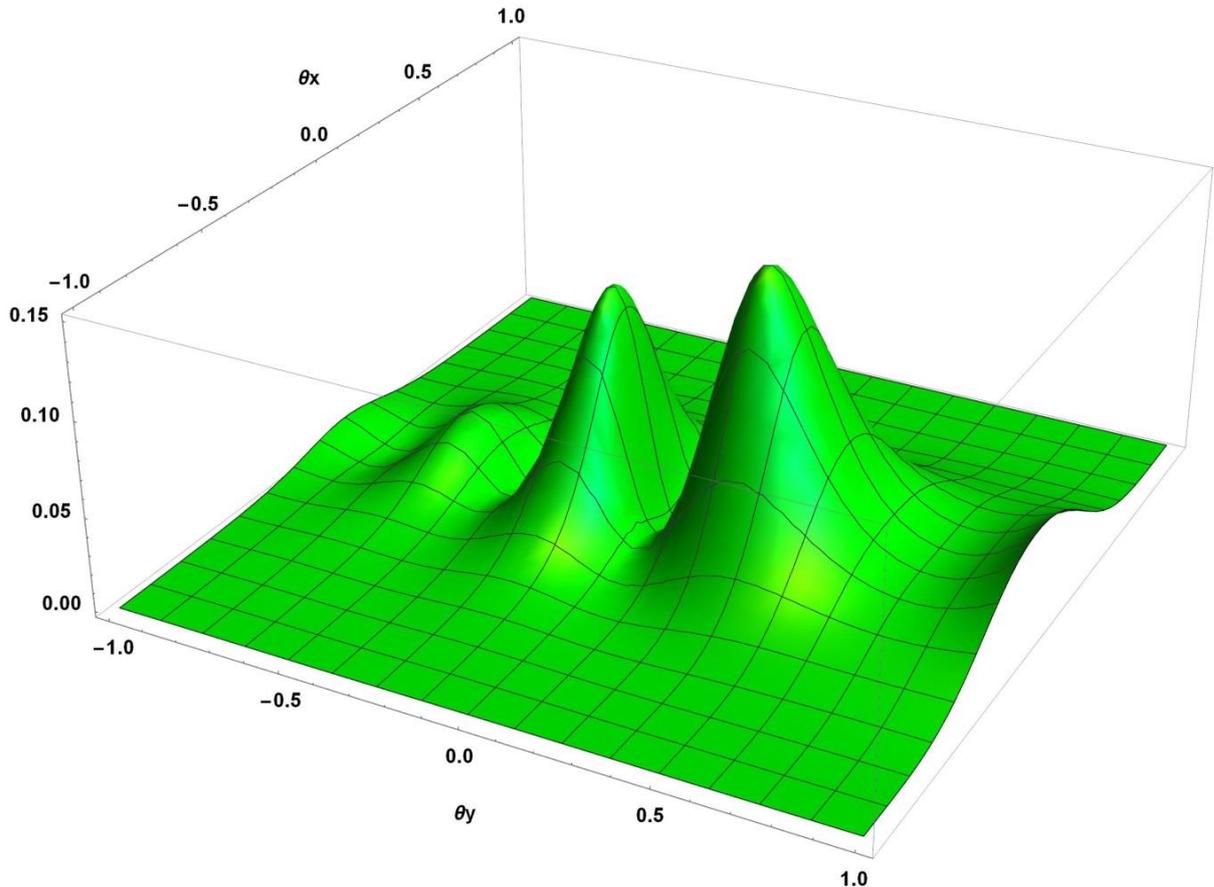


Рисунок 10 – Угловое распределение некогерентного ДИ $\frac{d^2W_{DR}}{d\omega d\Omega}$ (приведено в относительных единицах) при фиксированных параметрах: $\lambda = 100$ мкм, $a = 215$ мкм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Значение длины волны ДИ было выбрано равным: $\lambda = 100$ мкм, из этого значения была подобрана ширина щели аналогичным способом, что был рассмотрен выше. Значение ширины щелевой мишени $a = 2 \cdot \gamma \cdot 0,08 \cdot \lambda \approx 215$ мкм.

На рис. 10 дано общее представление о виде углового распределения некогерентного ДИ в пространстве. Легко видеть, что данное угловое распределение является несимметричным относительно проекционного угла θ_y . Также можно заметить наличия трех максимумов, в отличие от углового распределения ДИ, представленного на рисунке 6. Построим угловое распределение ДИ в плоскостях θ_y и θ_x (см. рис. 11 – 12) для более детального анализа.

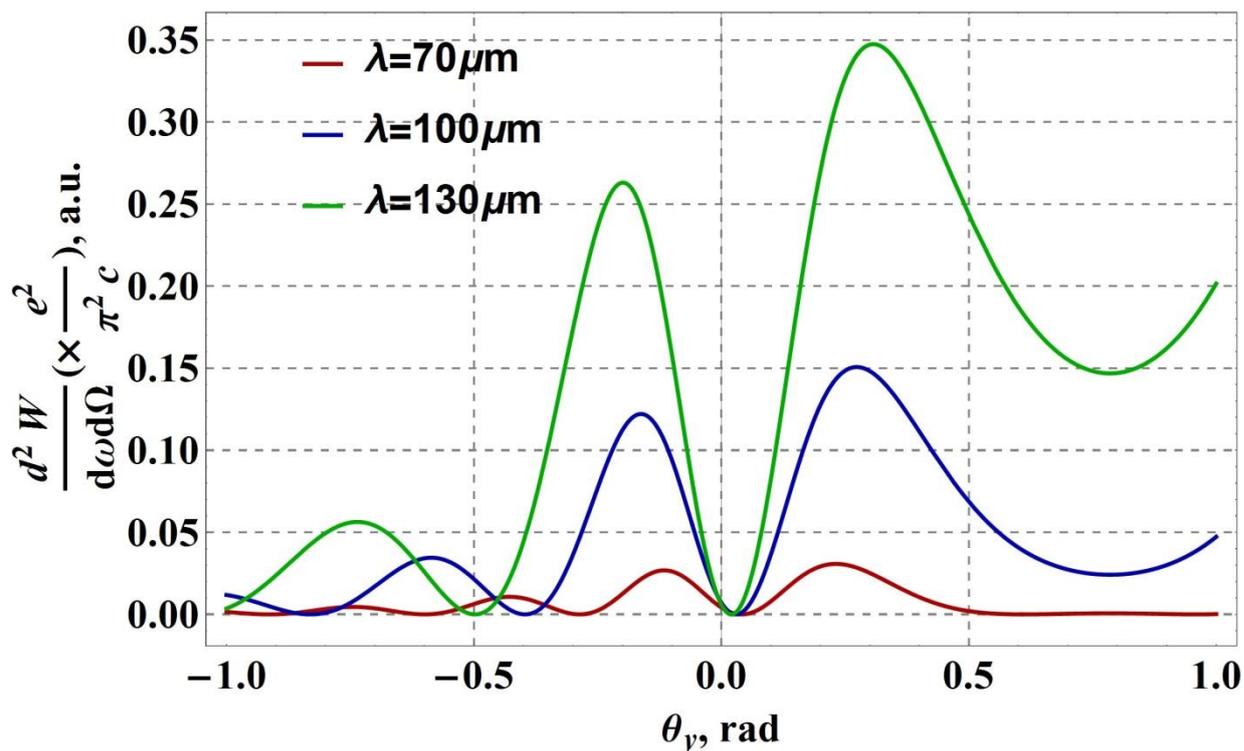


Рисунок 11 – Угловое распределение некогерентного ДИ (приведено в относительных единицах) в зависимости от проекционного угла θ_y . Ширина щели $a = 215$ мкм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Рассчитаем значения максимумов функции углового распределения дифракционного излучения для дальнейшего построения спектра (см. рис. 13). Выбирая среднее значение длины волны $\lambda = 100$ мкм, были получены $\theta_{yMax1} = 0.29 \text{ rad}$, $\theta_{yMax2} = -0.16 \text{ rad}$, $\theta_{yMax3} = -0.58 \text{ rad}$.

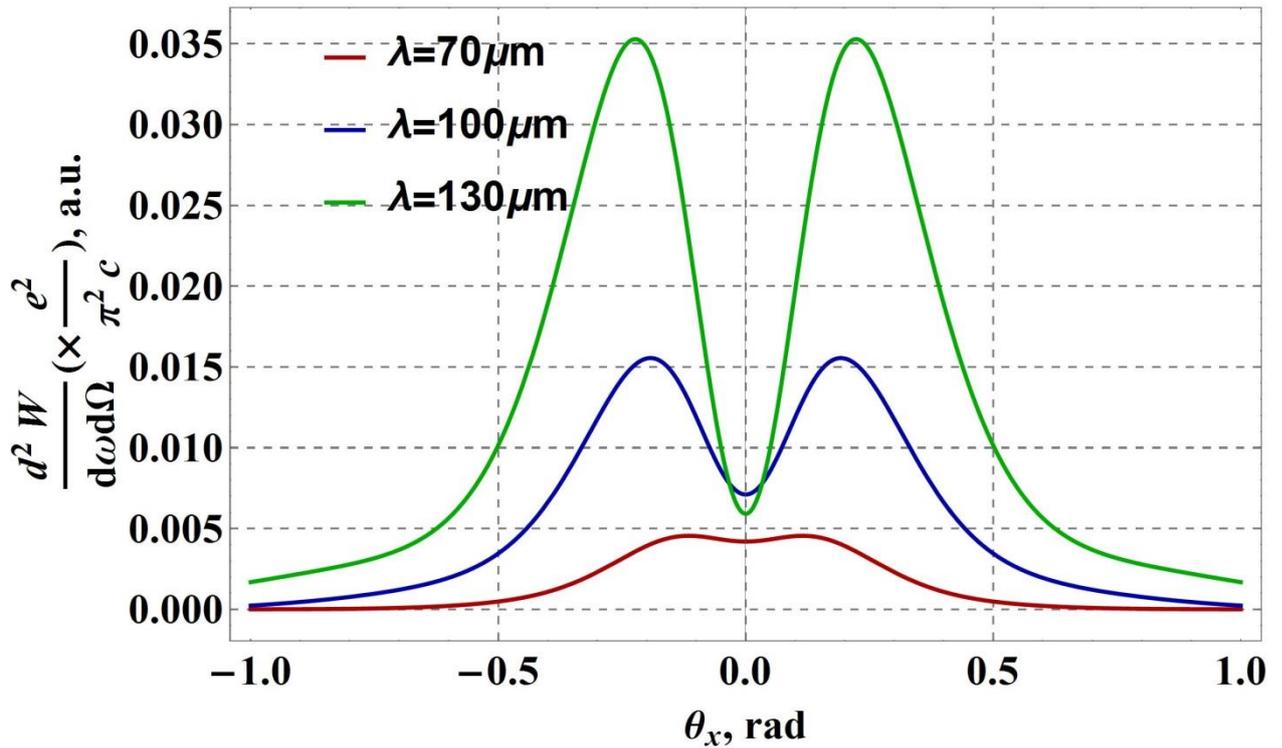


Рисунок 12 – Угловое распределение некогерентного ДИ (приведено в относительных единицах) в зависимости от проекционного угла θ_x . Ширина щели $a = 0,215$ мм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Рассчитаем значение максимума функции углового распределения дифракционного излучения для дальнейшего построения спектра (см. рис. 13). Из рисунков 10 – 12 было получено значение $\theta_{xMax} = 0$.

На основании полученных максимумов проекционных углов построим спектр некогерентного ДИ.

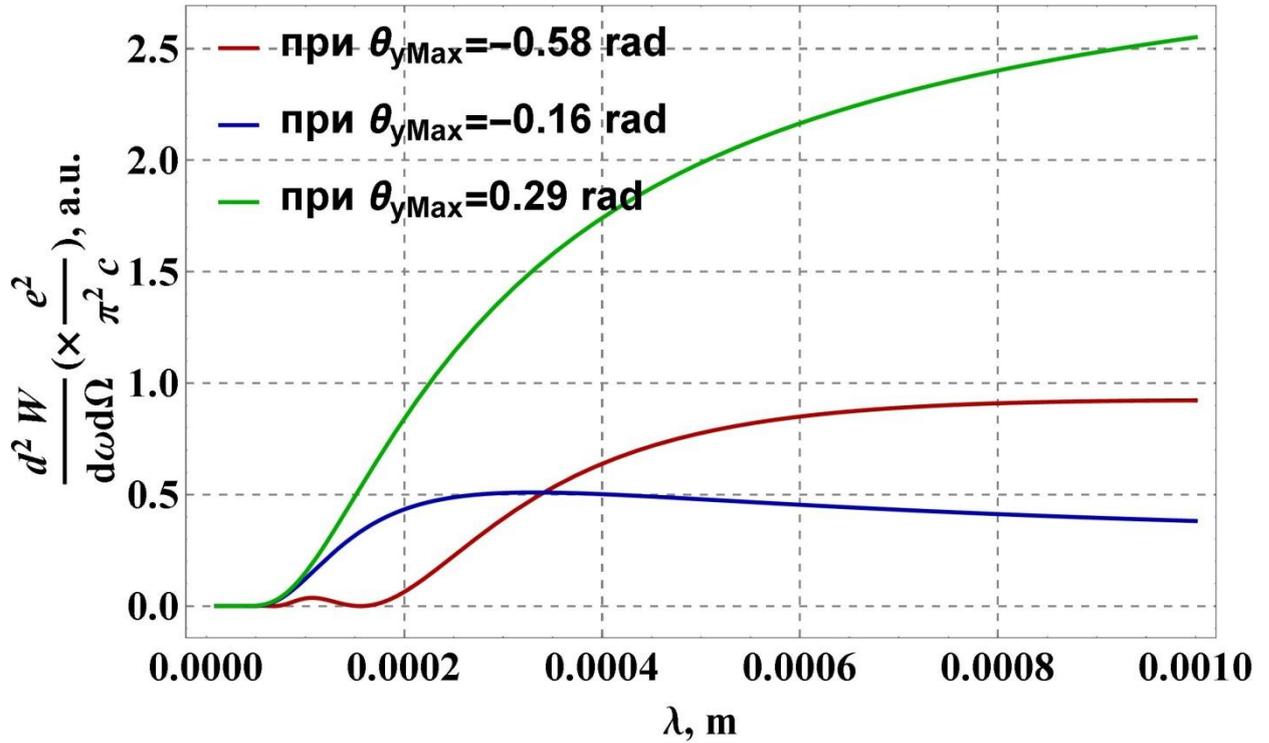


Рисунок 13 – Спектральное распределение некогерентного ДИ (приведено в относительных единицах) при $\theta_{yMax1} = 0.29 \text{ rad}$, $\theta_{yMax2} = -0.16 \text{ rad}$, $\theta_{yMax3} = -0.58 \text{ rad}$. Ширина щели $a = 0,215 \text{ мм}$. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Как видно из рисунка 13, наблюдаемый спектр ДИ обрезается в области коротких длин волн, что объясняется наличием самой щели.

Также рассмотрим зависимость интенсивности ДИ от протонного пучка от проекционных углов наблюдения: θ_x, θ_y , в диапазоне от -1 до +1 радиана для мм-ого диапазона длин волн при изменении ширины щели (рис. 14-15). Геометрия не изменена.

Выберем угол падения частицы на экран равным $\alpha = \frac{\pi}{4}$.

Значение Лоренц-фактора также оставалось неизменным $\gamma = 3,11$.

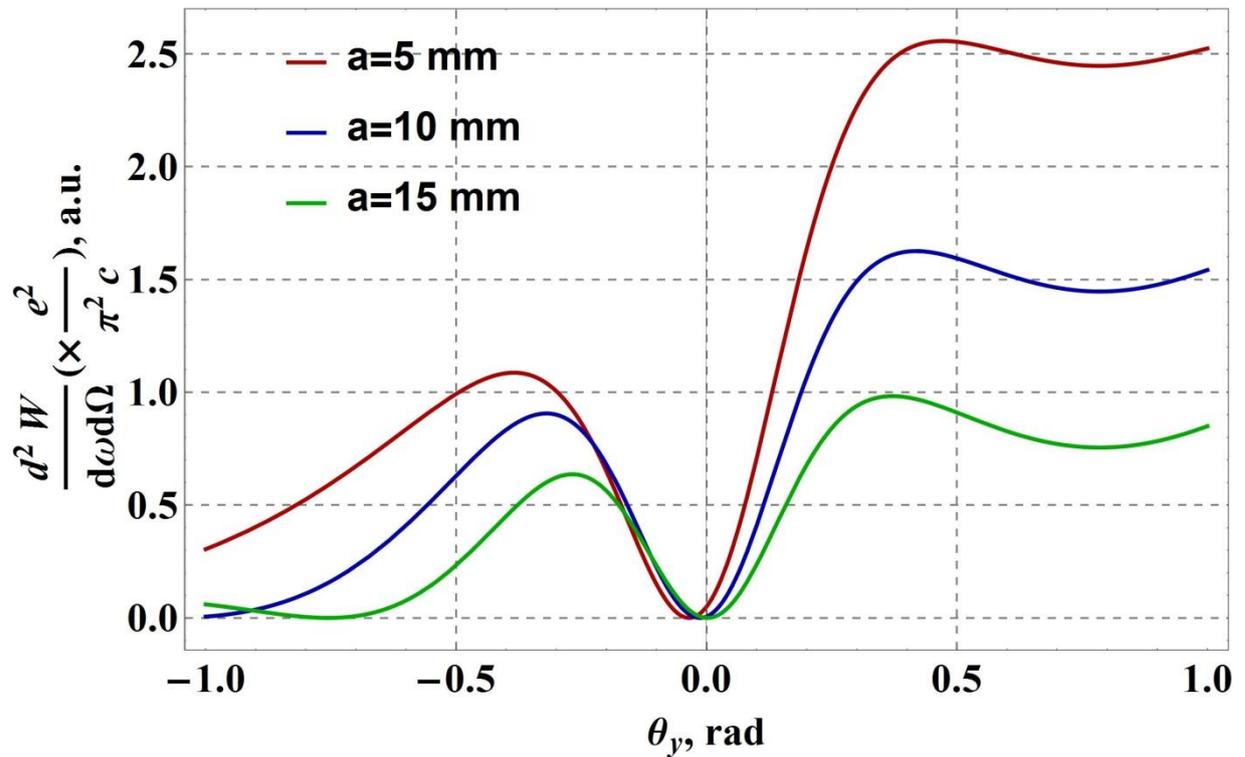


Рисунок 14 – Угловое распределение некогерентного ДИ (приведено в относительных единицах) в зависимости от проекционного угла θ_y , для разной ширины щели и фиксированной длине волны $\lambda = 15$ мм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Обратим внимание, что угловое распределение некогерентного ДИ в зависимости от проекционного угла θ_y , для ширины щелевой мишени $a = 5$ мм имеет центр не в нуле.

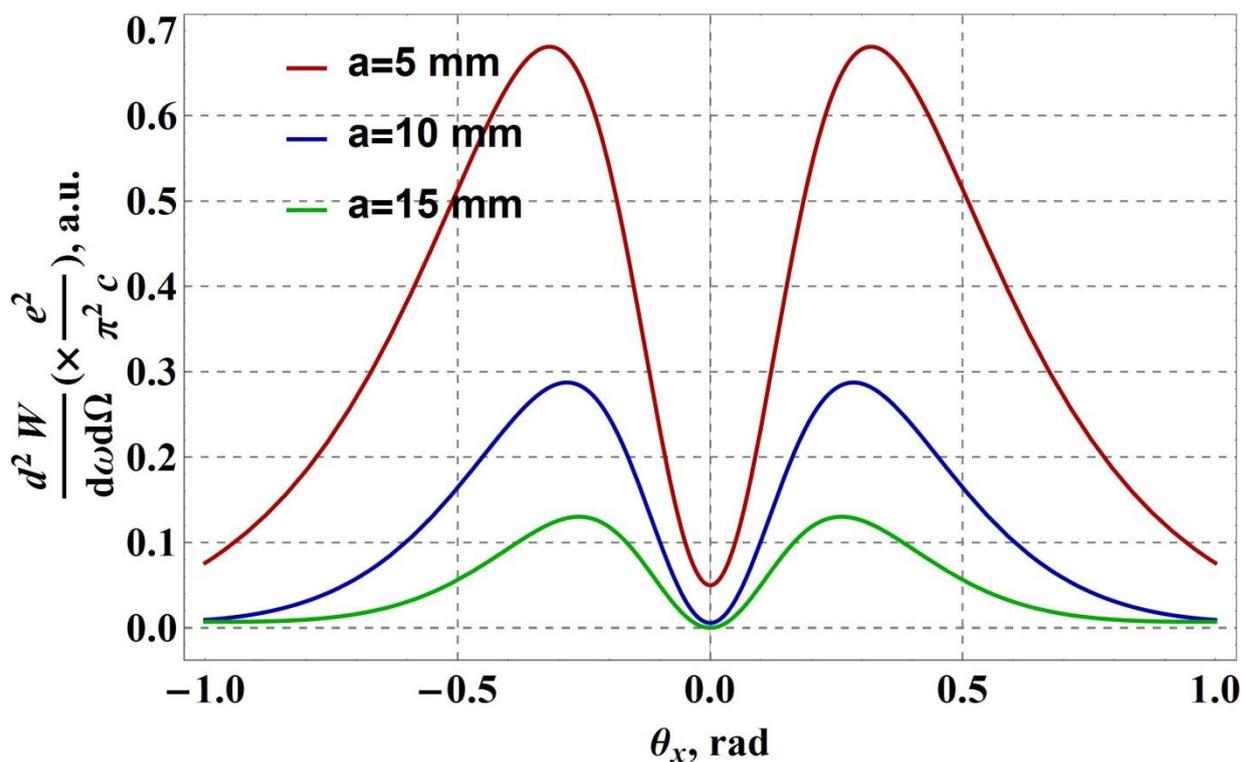


Рисунок 15 – Угловое распределение некогерентного ДИ (приведено в относительных единицах) в зависимости от проекционного угла θ_x , для разной ширины щели и фиксированной длине волны $\lambda = 15$ мм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Обратим внимание, что функция углового распределения некогерентного ДИ в зависимости от проекционного угла θ_x схожа по виду и значениям интенсивности с угловым распределением углового ДИ, представленного на рисунке 8 при ширине щели $a = 11$ мм. Это говорит нам, о том что вид углового распределения зависит как от ширины щели мишени, так и от длины волны ДИ. Так при соблюдении неизменности остальных условий (энергия, угол падения заряженной частицы) можно получать одинаковые угловые распределения, варьируя одну из двух величин, в зависимости от необходимости или невозможности использования другой в эксперименте (например, размеры ускорительного тракта ограничивают нас в выборе величины ширины щели мишени, соответственно, мы используем фильтр на определенную длину волны, чтобы в итоге получить нужное нам значение интенсивности ДИ).

Также рассмотрим зависимость интенсивности ДИ от протонного пучка от проекционных углов наблюдения: θ_x, θ_y , в диапазоне от -1 до +1 радиана для терагерцевого (субмиллиметрового) диапазона длин волн при изменении ширины щели (рис. 16-17). Геометрия не изменена.

Выберем угол падения частицы на экран равным $\alpha = \frac{\pi}{4}$.

Значение Лоренц-фактора также оставалось неизменным $\gamma = 3,11$.

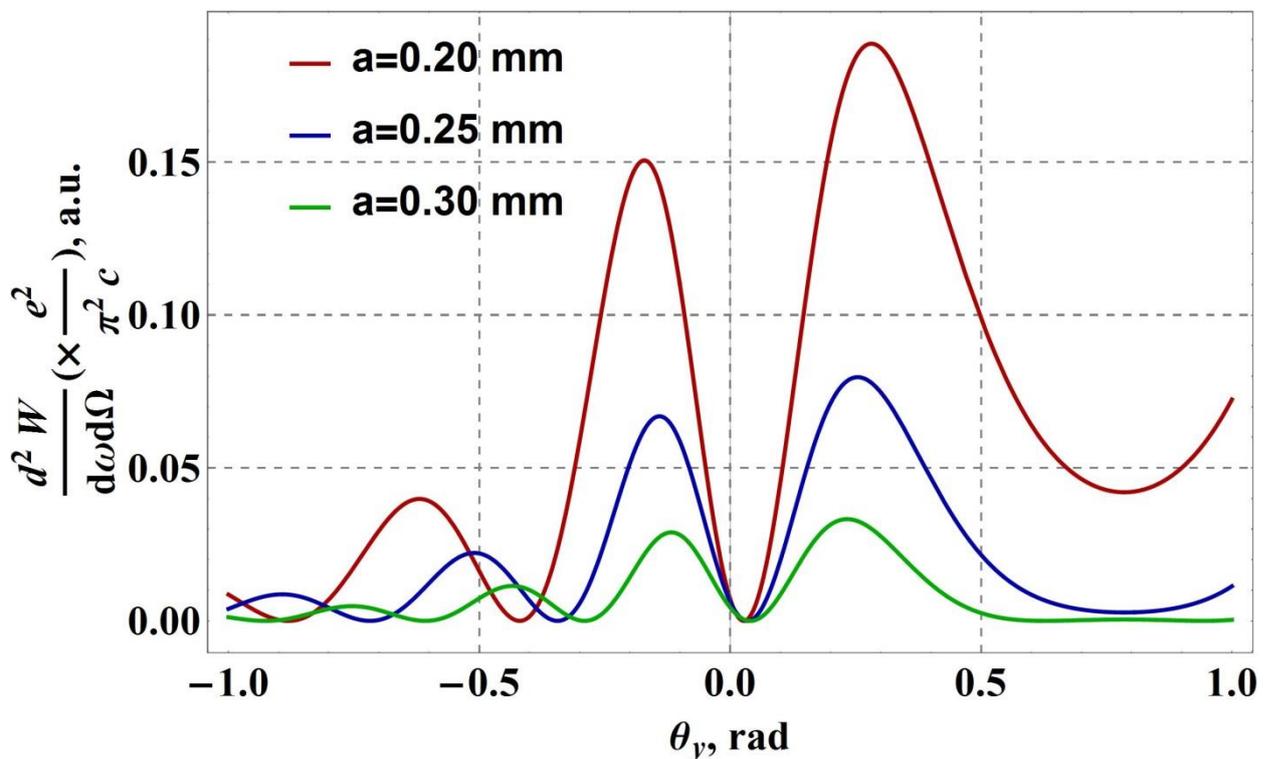


Рисунок 16 – Угловое распределение некогерентного ДИ (приведено в относительных единицах) в зависимости от проекционного угла θ_y , для разной ширины щели и фиксированной длине волны $\lambda = 100$ мкм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Стоит отметить, что функция углового распределения некогерентного ДИ в зависимости от проекционного угла θ_y схожа по виду и значениям интенсивности с угловым распределением углового ДИ, представленного на рисунке

11. при ширине щели $a = 11$ мм. Это говорит нам, о том что вид углового распределения зависит как от ширины щели мишени, так и от длины волны ДИ. И при соблюдении неизменности остальных условий (энергия, угол падения заряженной частицы) можно получать одинаковые угловые распределения, варьируя одну из двух величин, в зависимости от необходимости или невозможности использования другой в эксперимента

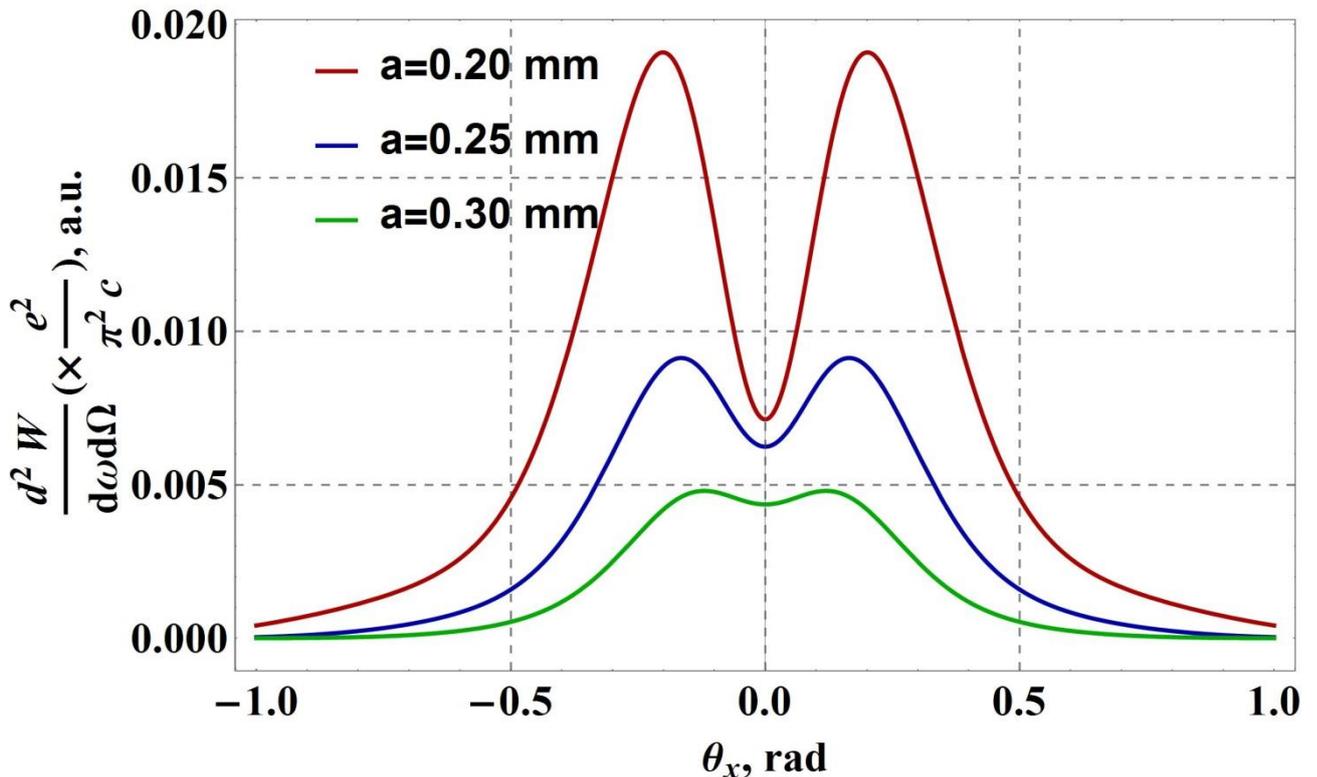


Рисунок 17 – Угловое распределение некогерентного ДИ (приведено в относительных единицах) в зависимости от проекционного угла θ_x , для разной ширины щели и фиксированной длине волны $\lambda = 100$ мкм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Из рисунка 17 также наблюдаются более явно выраженные отличия в значениях интенсивности углового распределения некогерентного ДИ по сравнению с угловым распределением углового ДИ, представленного на рисунке 12.

Данное обстоятельство уже было объяснено выше.

3.2 Моделирование когерентного дифракционного излучения при пролете частицы через щель в идеально проводящем экране для ускорителя ESS

Спектрально-угловое распределение КДИ задается соотношением: $\frac{d^2W_{DR,coh}}{d\omega d\Omega} = \{N_p + N_p(N_p - 1) \cdot F\} \cdot \frac{d^2W_{DR}}{d\omega d\Omega}$, где N_p – число протонов в сгустке ($N_p = 1.83 \cdot 10^8$ для протонного сгустка на ESS), F – форм-фактор, который определяет связь характеристик излучения с распределением протонов в сгустке, $\frac{d^2W_{DR}}{d\omega d\Omega}$ – спектрально-угловое распределение интенсивности дифракционного излучения от одного протона [36, 37].

В приближении нормального распределения протонов в сгустке и $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$, форм-фактор задается следующей формулой: $F(\lambda, \theta_x, \theta_y, \sigma, \sigma_z) = \text{Exp}[-(\frac{2\pi}{\lambda})^2 \cdot (\sigma^2 \cdot \theta_x^2 + \sigma^2 \cdot \theta_y^2 + \sigma_z^2)]$, где λ – длина волны излучения $\sigma_y, \sigma_x, \sigma_z$ – размеры пучка по осям x, y, z , θ_x, θ_y – проекционные углы наблюдения.

Ширина щели мишени [a], мм высчитывается с условием, что пучок касается пластин 1/100 своей части, что соответствует значению $2.6 \cdot \sigma$. Тогда получим, $a = 2 \cdot 2.6 \cdot \sigma \approx 14$ мм. Отсюда мы заключаем, что ДИ будет наблюдаться в мм-вом диапазоне длин волн, соответственно, для проведения эксперимента по диагностики протонного пучка на ESS, необходимо использовать фильтры для детектора для данных областей длин волн.

При дальнейшем моделировании, были использованы значения параметров сгустка аналогичные, значениям параметров (продольный и поперечные размеры, энергия заряженной частицы) для протонного сгустка на ускорительном комплексе ESS. А именно, в 3 различных точках, в которых протонный пучок переходит из одного линейного ускорителя в другой. (см. табл. 8 и рис. 4).

Далее строятся угловые распределения когерентного ДИ при различных значениях кинетической энергии пучка, в зависимости лишь от проекционного угла наблюдения θ_y . Ведь при построении угловых распределений в плоскости

θ_x мы всегда получали значения $\theta_{xMax} = 0$. Соответственно из угловых распределений будут найдены θ_{yMax} для дальнейшего построения спектрального распределения когерентного дифракционного излучения в этом направлении.

Построим угловое распределение когерентного ДИ при $E_k=200$ МэВ.

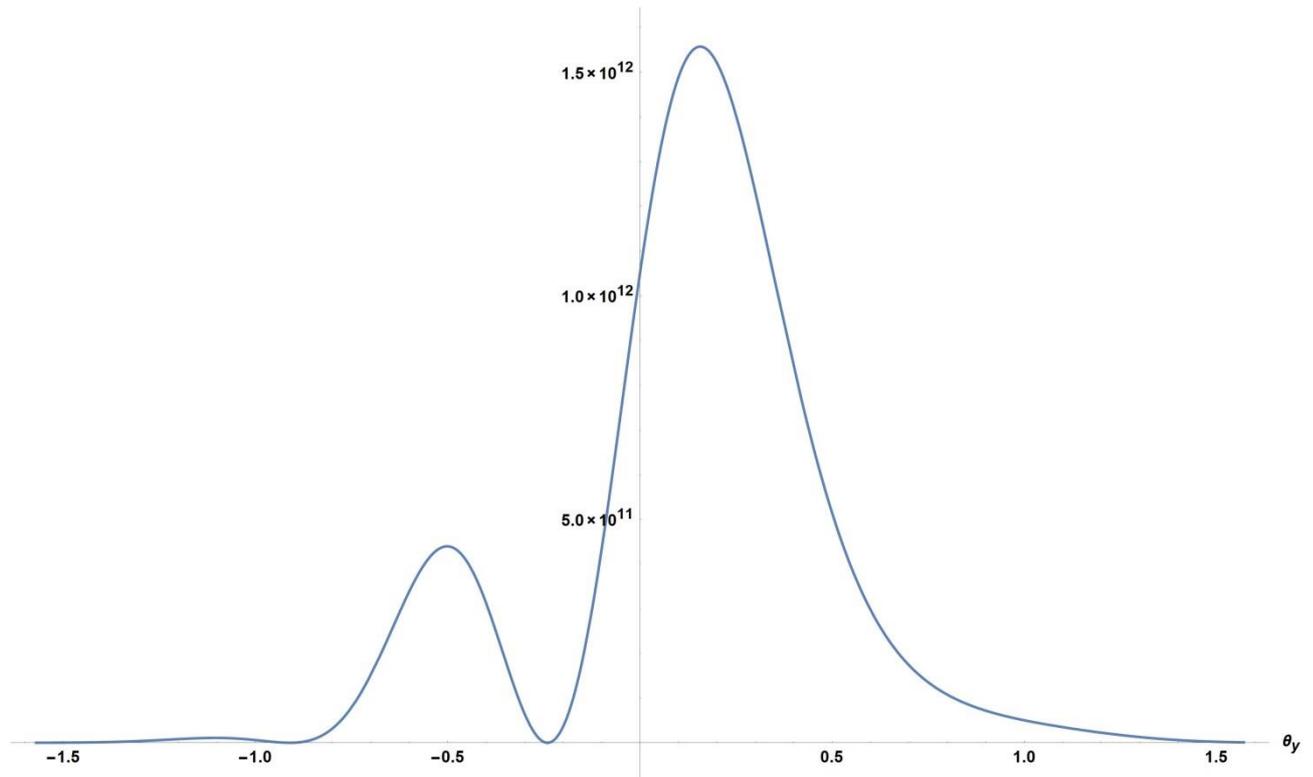


Рисунок 18 – Угловое распределение когерентного ДИ (приведено в относительных единицах) в зависимости от проекционного угла θ_y в диапазоне от -1.5 до 1.5 радиан. Ширина щели $a = 14$ мм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Определим значения максимумов функции углового распределения дифракционного излучения в зависимости от проекционного угла θ_y для дальнейшего построения спектра (см. рис. 19). Были получены: $\theta_{yMax} = 0.15 \text{ rad}$, $\theta_{yMax} = -0.5 \text{ rad}$ при фиксированных $\lambda = 10$ мм, $a = 14$ мм, $\alpha = 45^\circ$, $\sigma_z = 2$ мм, $\sigma = 2.7$ мм.

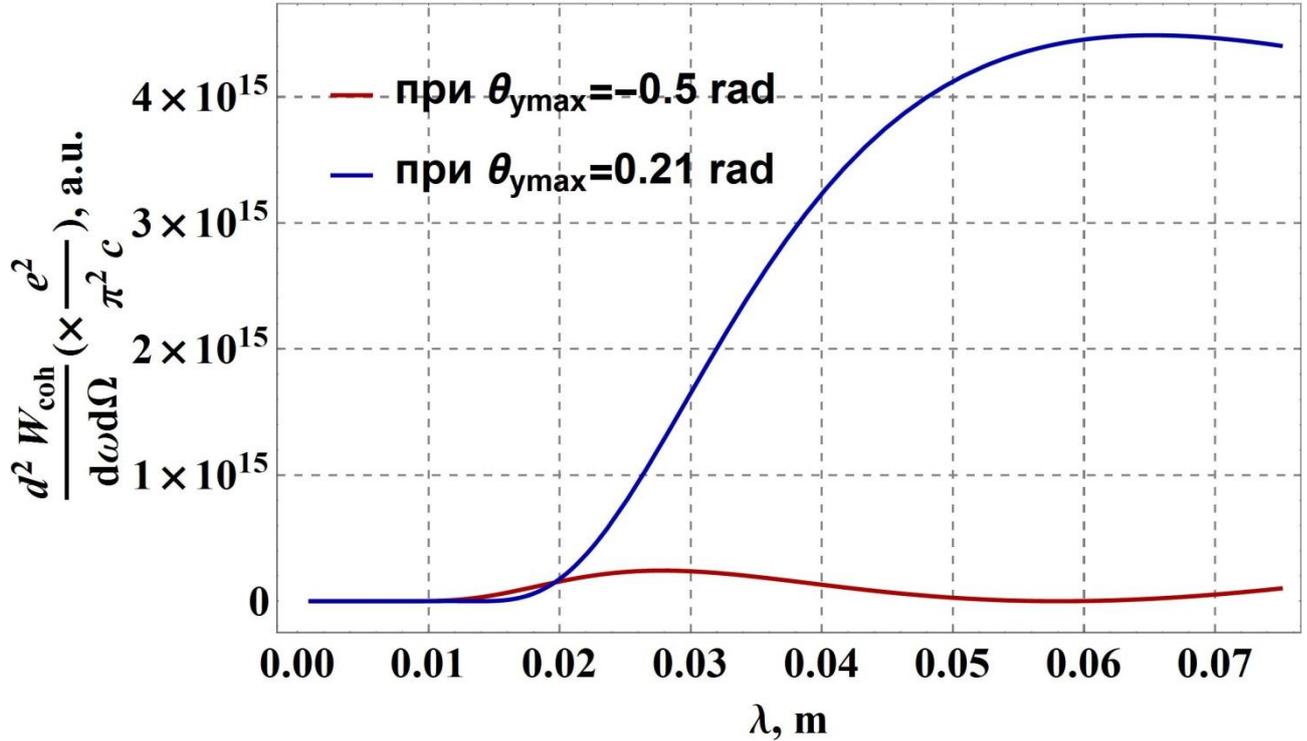


Рисунок 19 – Спектральное распределение когерентного ДИ (приведено в относительных единицах) при $\theta_{yMax1} = 0.21 \text{ rad}$, $\theta_{yMax2} = -0.5 \text{ rad}$, $\alpha = 45^\circ$, $\sigma_z = 2 \text{ мм}$, $\sigma = 2.7 \text{ мм}$. Ширина щели $a = 14 \text{ мм}$. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Из рисунка 19, а также данное обстоятельство характерно и для спектральных распределений когерентного ДИ, представленных на рисунка 19 и 21, мы имеем широкополосное распределение, которое повторяет вид фактора. В последнем же, в неявной зависимости находится значение о продольном размере сгустка, соответственно с помощью интерферометра мы можем восстановить это значение. Данное обстоятельство и определяет суть метода диагностики протонного пучка с помощью когерентного ДИ.

Также отметим, что исходя из полученных спектров можно сделать вывод, что с целью диагностики на основе щелевой мишени детектор нужно ставить в правый максимум углового распределения.

Построим угловое распределение когерентного ДИ при $E_k = 628$ МэВ.

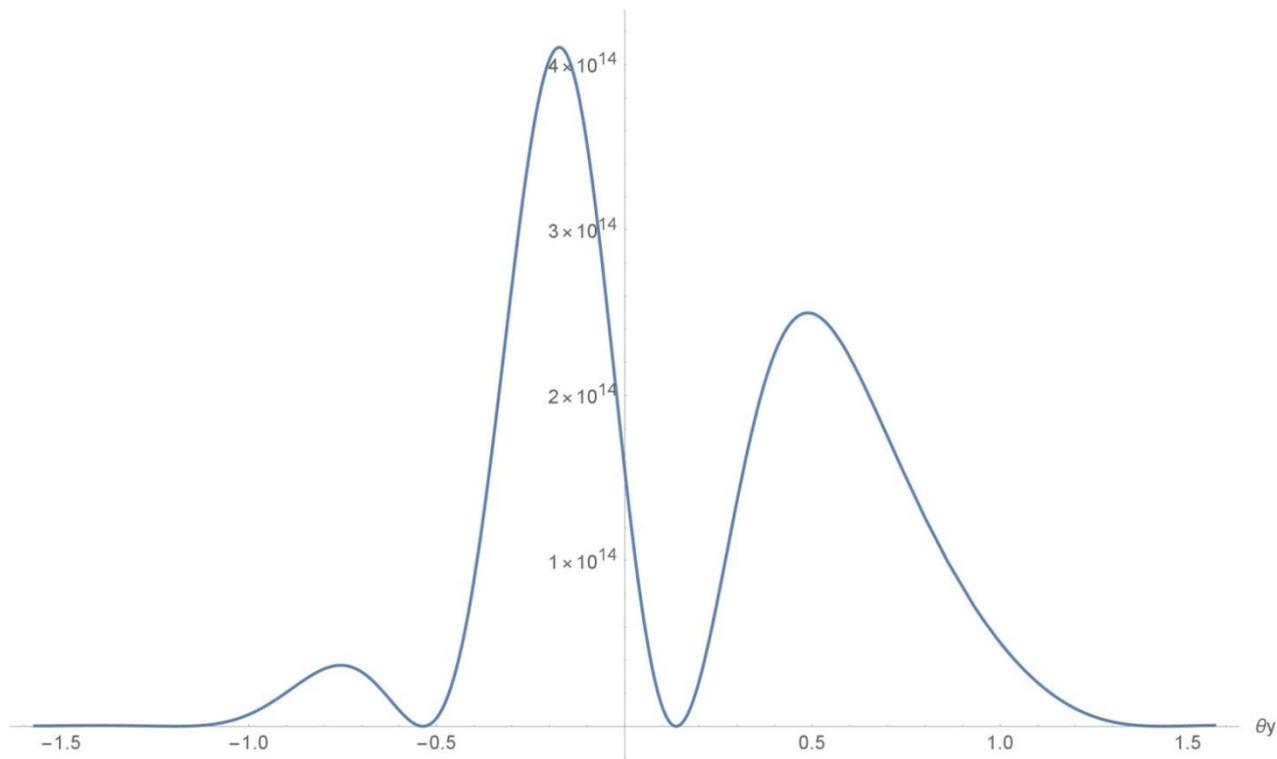


Рисунок 20 – Угловое распределение когерентного ДИ (приведено в относительных единицах) в зависимости от проекционного угла θ_y в диапазоне от -1.5 до 1.5 радиан. Ширина щели $a = 14$ мм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Определим значения максимумов функции углового распределения дифракционного излучения в зависимости от проекционного угла θ_y для дальнейшего построения спектра (см. рис. 21). Были получены: $\theta_{yMax1} = 0.52 \text{ rad}$, $\theta_{yMax2} = -0.18 \text{ rad}$, $\theta_{yMax3} = -0.76 \text{ rad}$ при фиксированных $\lambda = 10$ мм, $a = 14$ мм, $\alpha = 45^\circ$, $\sigma_z = 1.3$ мм, $\sigma = 2.4$ мм.

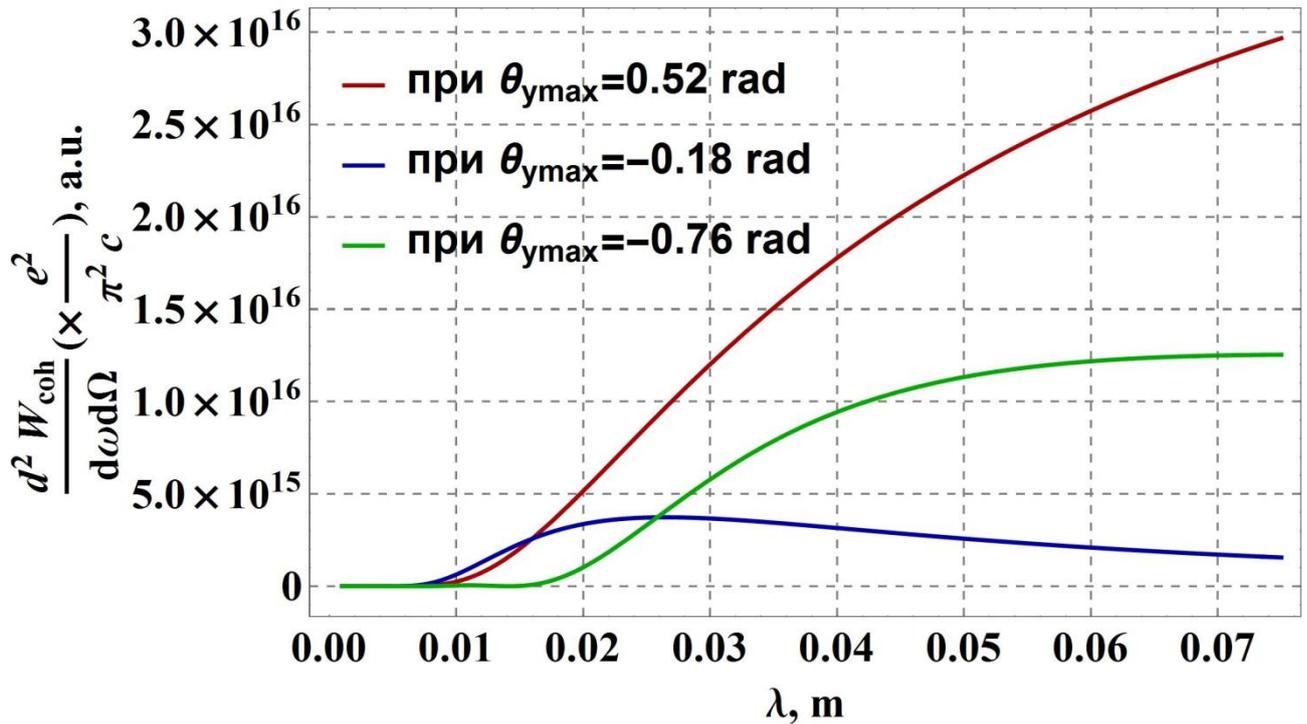


Рисунок 21 – Спектральное распределение когерентного ДИ (приведено в относительных единицах) при $\theta_{yMax1} = 0.52 \text{ rad}$, $\theta_{yMax2} = -0.18 \text{ rad}$, $\theta_{yMax3} = -0.76 \text{ rad}$, $\alpha = 45^\circ$, $\sigma_z = 1.3 \text{ мм}$, $\sigma = 2.4 \text{ мм}$. Ширина щели $a = 14 \text{ мм}$. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Отметим, что исходя из рисунка 21, наиболее качественное значение восстановленного продольного размера сгустка с помощью интерферометра, получается постановкой детектора на значении проекционного угла $\theta_{yMax} = 0.52 \text{ rad}$, т.е. в правый максимум углового распределения.

Также мы можем наблюдать рост значений функции спектрального распределения когерентного ДИ в зависимости от увеличения Лоренц-фактора.

Построим угловое распределение когерентного ДИ при $E_k = 2500 \text{ МэВ}$.

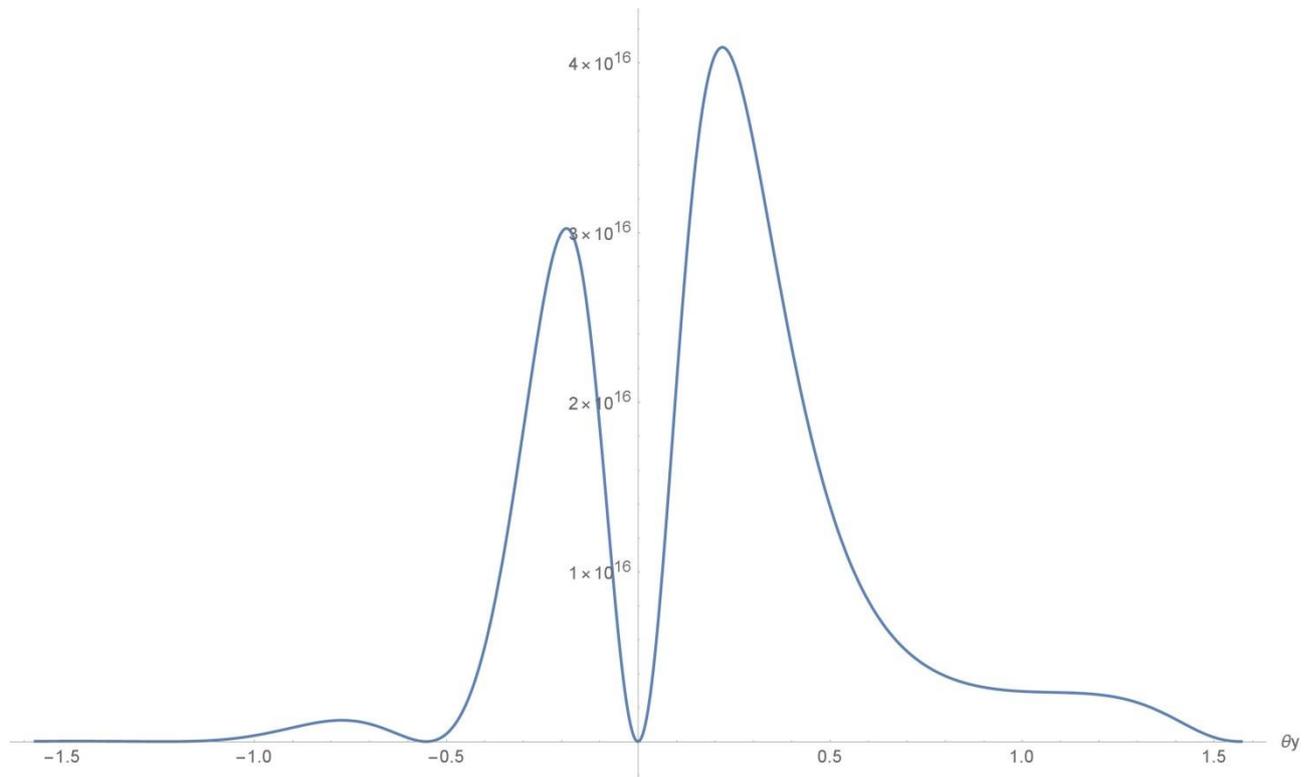


Рисунок 22 – Угловое распределение когерентного ДИ (приведено в относительных единицах) в зависимости от проекционного угла θ_y в диапазоне от -1.5 до 1.5 радиан. Ширина щели $a = 14$ мм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Определим значения максимумов функции углового распределения дифракционного излучения в зависимости от проекционного угла θ_y для дальнейшего построения спектра (см. рис. 23). Были получены: $\theta_{yMax1} = 0.22$, $\theta_{yMax2} = -0.19 \text{ rad}$, $\theta_{yMax3} = -0.78 \text{ rad}$ при фиксированных $\lambda = 10$ мм, $a = 14$ мм, $\alpha = 45^\circ$, $\sigma_z = 0.7$ мм, $\sigma = 2.1$ мм.

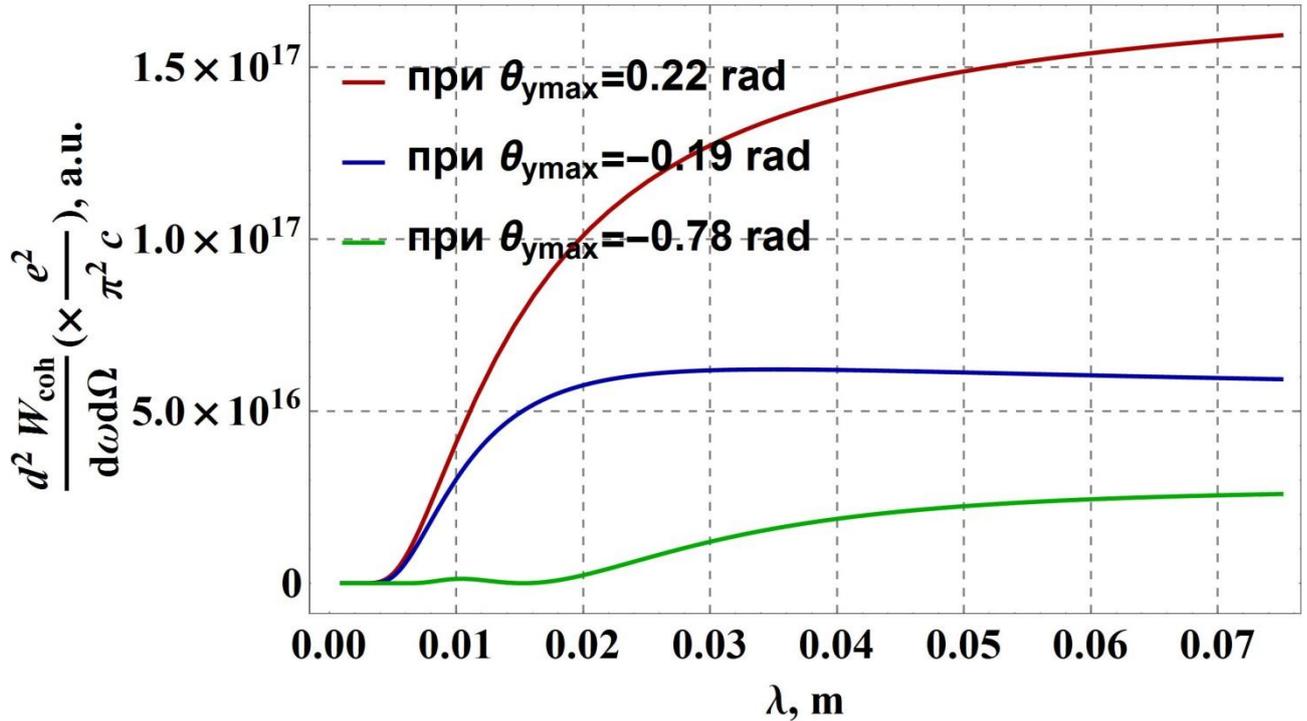


Рисунок 23 – Спектральное распределение когерентного ДИ (приведено в относительных единицах) при $\theta_{yMax1} = 0.22$, $\theta_{yMax2} = -0.19$, $\theta_{yMax3} = -0.78$, $a = 14$ мм, $\alpha = 45^\circ$, $\sigma_z = 0.7$ мм, $\sigma = 2.1$ мм. Ширина щели $a = 14$ мм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Отметим, что исходя из рисунка 23, наиболее качественное значение восстановленного продольного размера сгустка с помощью интерферограммы, получается постановкой детектора на значении проекционного угла $\theta_{yMax} = 0.22$ rad, т.е. в правый максимум углового распределения.

Как и ожидалось, интенсивность когерентного ДИ на несколько порядков выше, в сравнении с интенсивностью некогерентного ДИ, что позволяет детектору его зафиксировать и при помощи интерферометра [8] восстановить данные о продольном размере пучка.

Выход энергии для детектора вычисляется с помощью следующей формулы [38]:

$$P = N_b \cdot N_p^2 \cdot f \cdot \iiint \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^2} \cdot \frac{d^2 W_{DR,coh}}{d\omega d\Omega} d\theta_y d\lambda d\theta_x \quad (5)$$

где P – мощность, а параметры и их значения $N_b = 6.13 \cdot 10^6$, $N_p = 1.83 \cdot 10^8$, $f = 14 \text{ с}^{-1}$ приведены в таблице 1.

$\frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^2}$ – множитель, возникающий при переходе от $d\omega$ к $d\lambda$

Проведем расчет выхода энергии для детектора при трех различных значениях кинетической энергии протонного пучка: $E_{k1} = 200 \text{ МэВ}$, $E_{k2} = 628 \text{ МэВ}$, $E_{k3} = 2500 \text{ МэВ}$.

Исходя из полученных спектров когерентного дифракционного излучения, определим промежутки интегрирования для формулы (5), выбирая при этом значения $\Delta\theta_y, \Delta\lambda, \Delta\theta_x$ вблизи максимума для каждого из трех спектров. А также учитывая что, что детектор имеет поверхность формы квадрата с площадью $S = 25 \text{ см}^2$ (длина стороны квадрата равна $b = 5 \text{ см}$) и расположен на расстоянии $r = 100 \text{ см}$ от мишени, вычислим изменение проекционного угла $\Delta\theta \sim \frac{b}{2r} = 0.025 \text{ rad}$.

Тогда значения $\Delta\theta_y = \theta_{yMax} \pm \Delta\theta$ и $\Delta\theta_x = \theta_{xMax} \pm \Delta\theta$ для каждого из трех спектральных распределений запишутся

$\Delta\theta_{y1} = (0.21 \pm 0.025) \text{ rad}$ и $\Delta\theta_x = (0 \pm 0.025) \text{ rad}$ – для спектра с $E_{k1} = 200 \text{ МэВ}$.

$\Delta\theta_{y2} = (0.52 \pm 0.025) \text{ rad}$ и $\Delta\theta_x = (0 \pm 0.025) \text{ rad}$ – для спектра с $E_{k2} = 628 \text{ МэВ}$.

$\Delta\theta_{y3} = (0.22 \pm 0.025) \text{ rad}$ и $\Delta\theta_x = (0 \pm 0.025) \text{ rad}$ – для спектра с $E_{k3} = 2500 \text{ МэВ}$.

$\Delta\lambda$ – было выбрано одинаково для всех спектров от 0.5 см до 2.5 см

В итоге получим следующие значения мощности:

$$W(E_{k1} = 200 \text{ МэВ}) = 6.57 \cdot 10^{-11} \text{ Вт};$$

$$W(E_{k1} = 628 \text{ МэВ}) = 6.164 \cdot 10^{-10} \text{ Вт};$$

$$W(E_{k1} = 2500 \text{ МэВ}) = 5.411 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}.$$

Также рассчитаем среднее число фотонов по следующей формуле:

$$N_{\gamma} = \frac{\varepsilon}{E_{\gamma}} = \frac{P \cdot \lambda}{h \cdot c \cdot f} \quad (6)$$

Где $\varepsilon = \frac{P}{f}$ – полная энергия излучения $E_{\gamma} = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ – энергия фотона со средней длиной волны ДИ $\lambda = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – средняя длина волны ДИ, $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$, – постоянная Планка, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – скорость света в вакууме.

Тогда получим следующие значения среднего числа фотонов:

$$N_{\gamma 1}(E_{k1} = 200 \text{ МэВ}) = 3.54 \cdot 10^{17};$$

$$N_{\gamma 2}(E_{k1} = 628 \text{ МэВ}) = 3.32 \cdot 10^{18};$$

$$N_{\gamma 3}(E_{k1} = 2500 \text{ МэВ}) = 2.91 \cdot 10^{19}.$$

Для регистрации ДИ с субмиллиметровыми значениями длин волн возможно использовать полупроводниковый иммерсионный болометр, состоящий из двух плёночных (толщиной до 10 мкм) термисторов [39].

3.3 Моделирование некогерентного дифракционного излучения при пролете заряженной частицы через щель в идеально проводящем экране для ЛНС

Рассмотрим интенсивность ДИ от протона для геометрии, представленной на рисунке 5 в зависимости от проекционных углов наблюдения: θ_x, θ_y , в

диапазоне от -0.001 до $+0.001$ радиана для оптического диапазона длин волн (рис. 22 - 24) для ускорителя ЛНС с кинетической энергией протонного пучка $E_k = 7$ ТэВ.

Для моделирования угловых распределений была использована формула (1) для интенсивности некогерентного ДИ.

Выберем угол падения частицы на экран равным $\alpha = \frac{\pi}{4}$.

Подберем значение кинетической энергии протона, равное значению энергии протонного пучка на ускорителе ЛНС (см. табл. 1). Соответственно, Лоренц-фактор принимает значение $\gamma = \frac{E}{E_0} = 7460,5$.

Значение длины волны ДИ было выбрано равным: $\lambda = 550$ нм (оптический диапазон длин волн). Так как диаметр ускоряющего тракта на ЛНС равняется 56 мм, а продольный размер сгустка протонного пучка $\sigma = 0,4$ мм, была выбрана ширина щели $a = 5$ мм, с учетом разброса импульсов протонов в сгустке на ускорителе ЛНС. Нижняя же граница $a_{\text{ниж}} = 2 \cdot 2,6 \cdot \sigma = 2 \cdot 2,6 \cdot 0,4 \approx 2,09$ мм, была выбрана аналогично методу, что применялся для подбора ширины щели для ускорителя ESS (см. раздел 3.2).

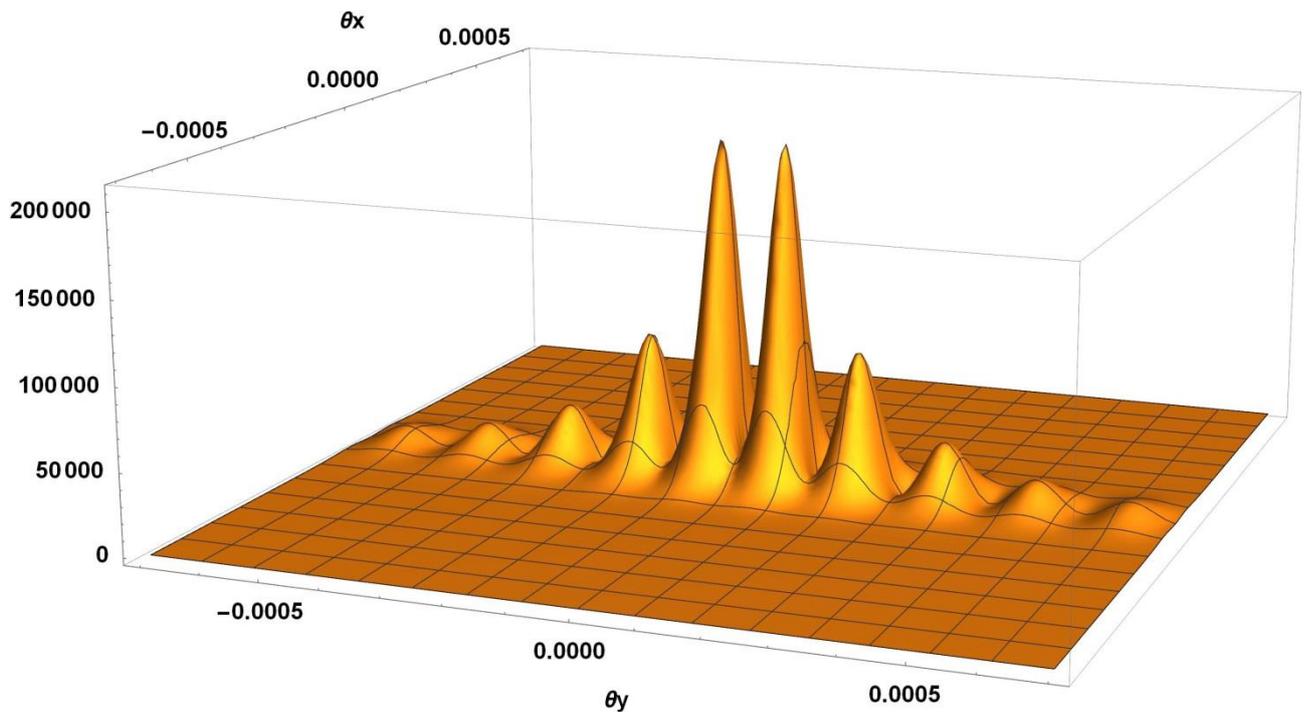


Рисунок 24 – Угловое распределение некогерентного ДИ $\frac{d^2 W_{DR}}{d\omega d\Omega}$ (приведено в относительных единицах) при фиксированных параметрах: $\lambda = 550$ нм, $a = 5$ мм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

На рис. 24 дано общее представление о виде углового распределения некогерентного ДИ в пространстве. Легко заметить, что данное угловое распределение является симметричным относительно проекционного угла θ_y и θ_x . Данное обстоятельство обусловлено высоким значением Лоренц-фактора $\gamma = 7460,5$, из-за чего собственное электромагнитное поле протона сжимается вдоль траектории движения частицы, и при пересечении последней «узкой» щели, электромагнитное поле интерферирует с собой в узком направлении, из-за чего и не наблюдается асимметрия, как в случае движения протона с низким показателем Лоренц-фактора.

Построим угловое распределение ДИ в плоскостях θ_y и θ_x (см. рис. 25 – 26) для более детального анализа.

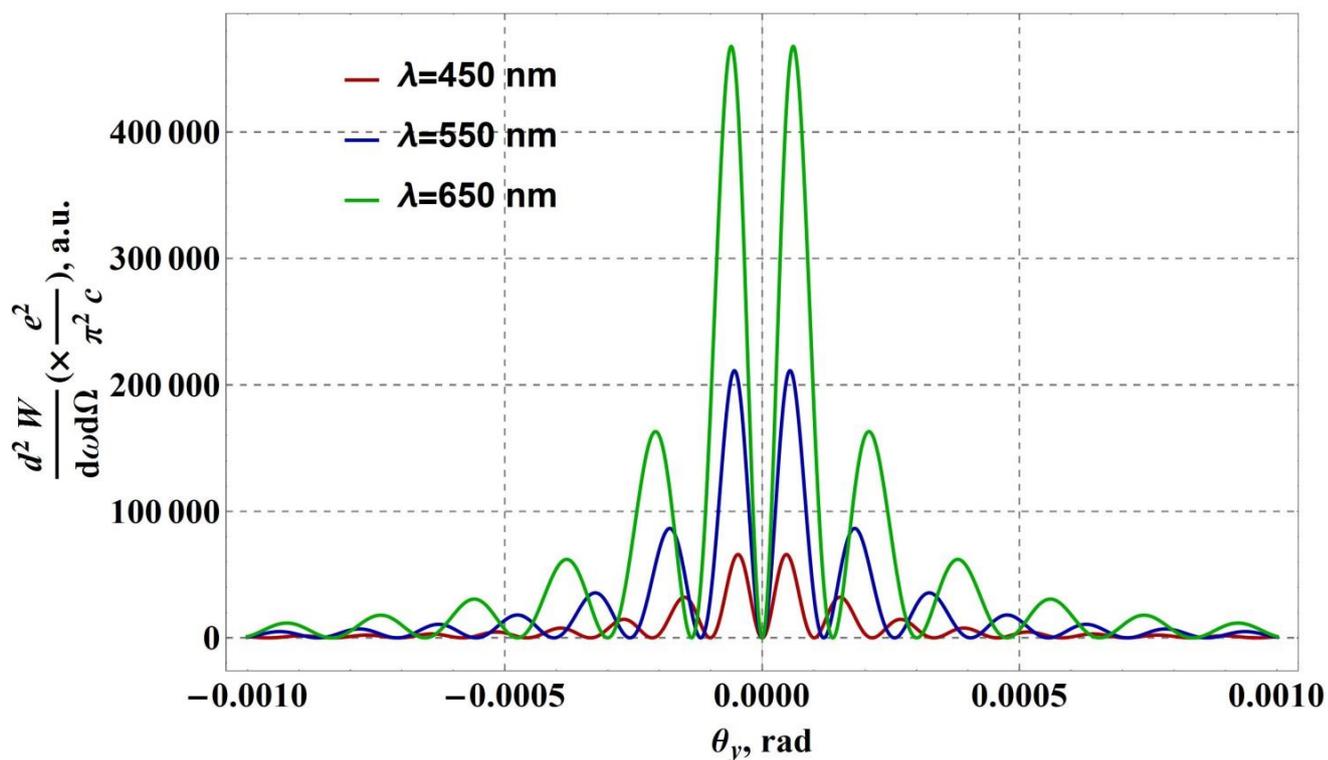


Рисунок 25 – Угловое распределение некогерентного ДИ (приведено в относительных единицах) в зависимости от проекционного угла θ_y . Ширина щели $a = 5$ мм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Следует отметить, что данное угловое распределение некогерентного ДИ для ЛНС имеет высокое значение интенсивности по сравнению с ранее рассмотренными угловыми распределениями некогерентного ДИ. Это в свою очередь позволяет напрямую регистрировать данное излучение детекторами. Также можно наблюдать множество дополнительных гармоник ДИ

Рассчитаем значения максимумов функции углового распределения некогерентного дифракционного излучения для дальнейшего построения спектра (см. рис. 27). Выбирая среднее значение длины волны $\lambda = 550$ нм, были получены: $\theta_{yMax} = 54 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$, $\theta_{yMax} = -54 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$.

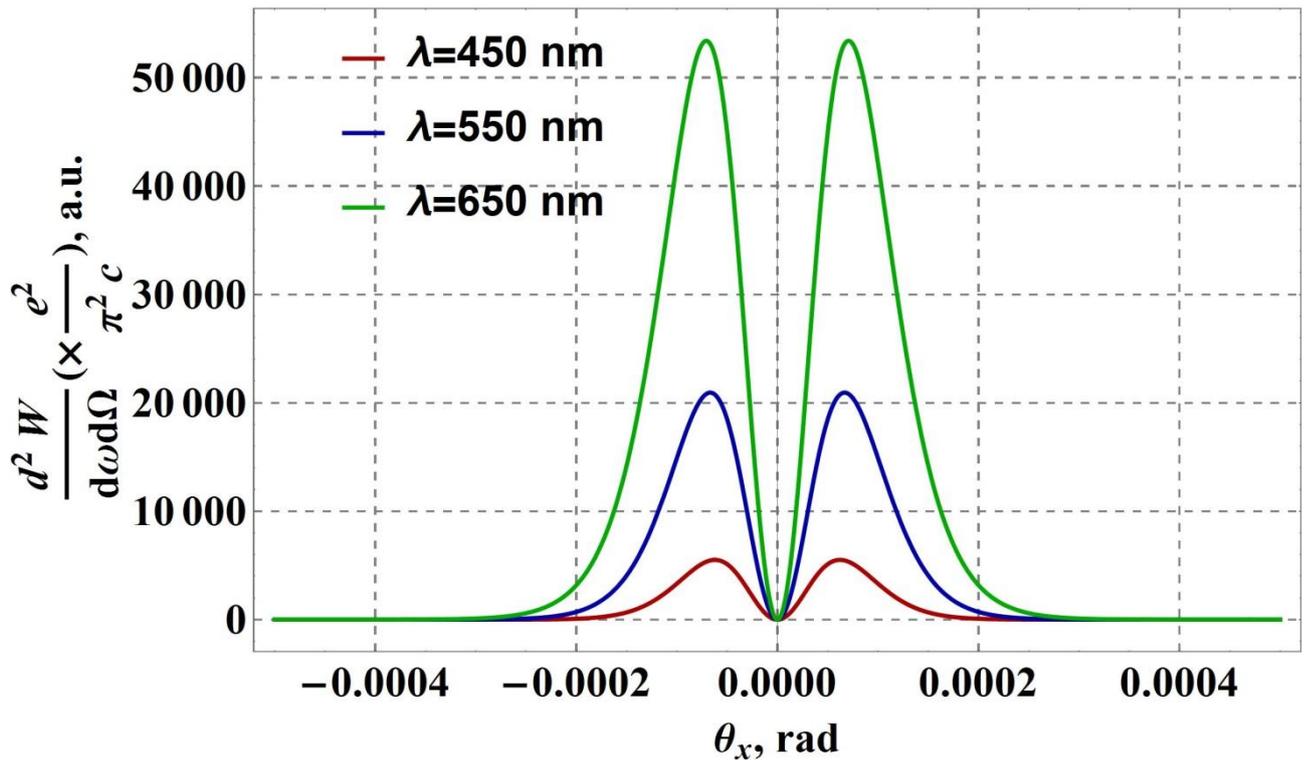


Рисунок 26 – Угловое распределение некогерентного ДИ (приведено в относительных единицах) в зависимости от проекционного угла θ_x , приведено в относительных единицах. Ширина щели $a = 5$ мм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Рассчитаем значение максимума функции углового распределения дифракционного излучения для дальнейшего построения спектра (см. рис. 27). Из рисунков 24 – 26 было получено значение $\theta_{xMax} = 0$.

На основании полученных максимумов проекционных углов построим спектр некогерентного ДИ для ширины щели $a = 5$ мм

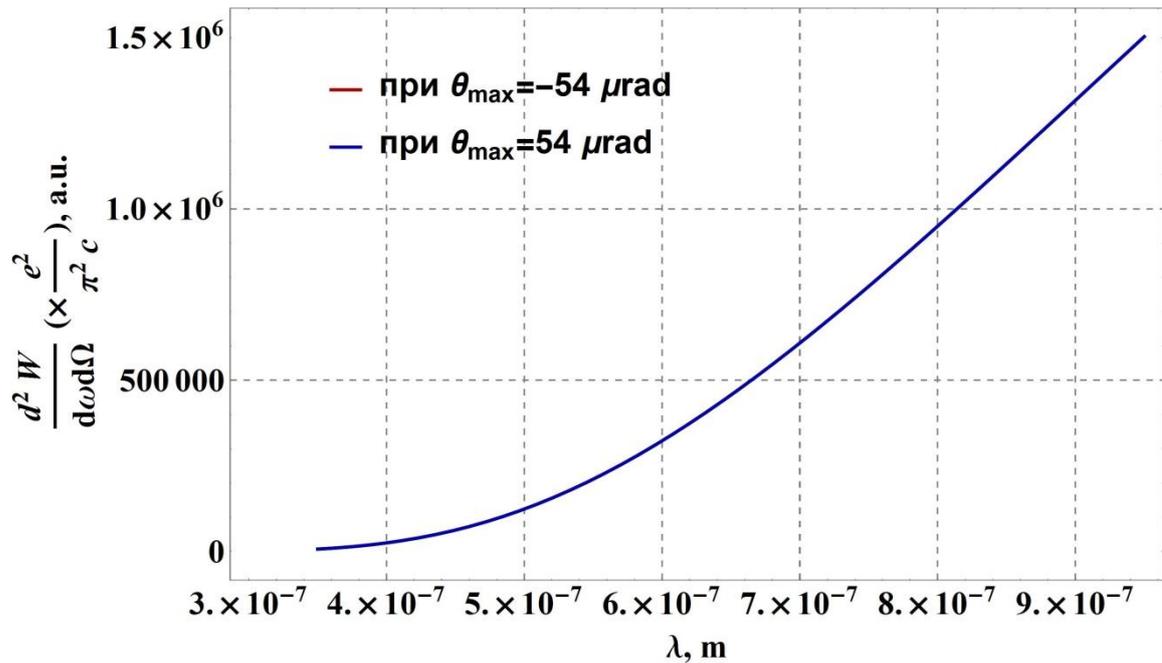


Рисунок 27 – Спектральное распределение некогерентного ДИ (приведено в относительных единицах) при $\theta_{yMax} = 54 \cdot 10^{-6} rad$, $\theta_{yMax} = -54 \cdot 10^{-6} rad$. Ширина щели $a = 5$ мм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Из рисунка 27 мы видим, что функции спектральных распределений для различных максимумов проекционных углов $\theta_{yMax} = 54 \cdot 10^{-6} rad$ и $\theta_{yMax} = -54 \cdot 10^{-6} rad$ совпали, что обусловлено симметрией задачи о прохождении целевой мишени ультрарелятивистской частицы.

Следует также отметить, что спектральное распределение некогерентного ДИ для ЛНС имеет намного более высокое значение интенсивности по сравнению с ранее рассмотренными спектральными распределениями некогерентного ДИ в различных диапазонах длин волн (мм-вый и терагерцовый).

Также рассмотрим зависимость интенсивности некогерентного ДИ от протона в зависимости от проекционных углов наблюдения: θ_x, θ_y , в диапазоне

от $-0,001$ до $+0,001$ радиана для оптического диапазона длин волн при изменении ширины щели (рис. 26-27). Геометрия не изменена (см. рис. 5).

Выберем угол падения частицы на экран равным $\alpha = \frac{\pi}{4}$.

Значение Лоренц-фактора также оставалось неизменным $\gamma = 7460,5$.

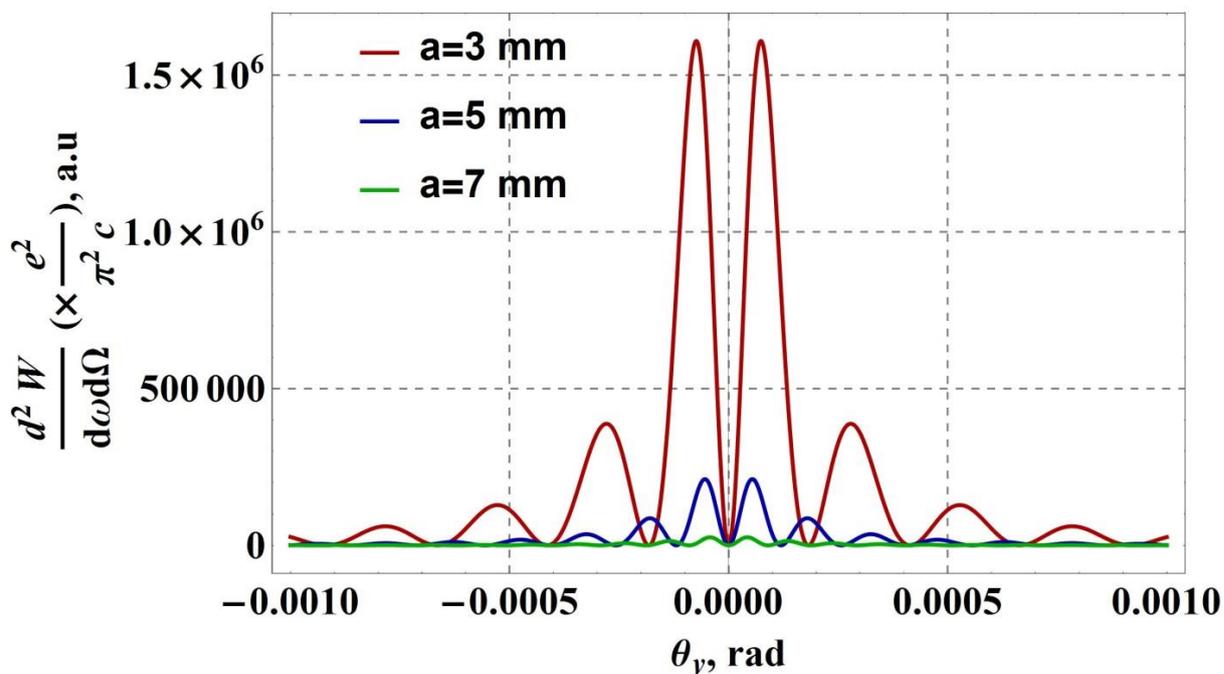


Рисунок 28 – Угловое распределение некогерентного ДИ (приведено в относительных единицах) в зависимости от проекционного угла θ_y , для разной ширины щели и фиксированной длине волны $\lambda = 550$ нм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

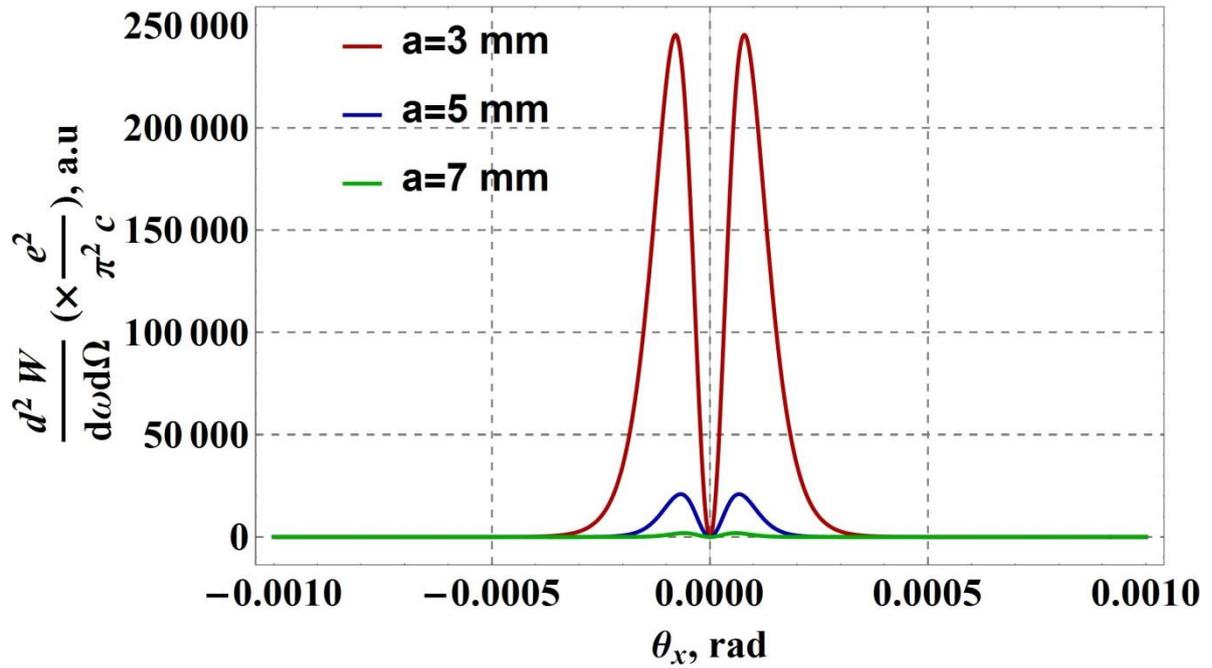


Рисунок 29 – Угловое распределение некогерентного ДИ (приведено в относительных единицах) в зависимости от проекционного угла θ_x , для разной ширины щели и фиксированной длине волны $\lambda = 550$ нм. Интенсивность приведена без учёта постоянного коэффициента $\frac{e^2}{\pi^2 c}$.

Из рисунков 28 и 29 можно увидеть насколько сильно падает интенсивность некогерентного ДИ по мере роста значения ширины щелевой мишени, соответственно с данным наблюдением, оптимально использовать мишень с шириной щели от 2,09 мм до 5 мм. Нижний предел границы ширины щелевой мишени установлен в соответствии с условием, что пучок касается пластин 1/100 своей части, что соответствует значению $2.6 \cdot \sigma$. Отсюда получим, $a_{\text{ниж}} = 2 \cdot 2,6 \cdot 0,4 \approx 2,09$ мм.

4 Социальная ответственность

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Профилактическая работа основывается на непрерывном и эффективном контроле и оценке действий по улучшению, совершенствованию и развитию системы управления охраной труда.

Охрана труда — это система законодательных актов, социально-экономических, организационных, технических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека во время труда.

Полностью безопасных и безвредных производств не существует. Задача охраны труда — свести к минимуму вероятность поражения или заболевания работающего с одновременным обеспечением комфорта при максимальной производительности труда. Реальные производственные условия характеризуются, как правило, наличием некоторых опасных и вредных производственных факторов.

Опасным производственным фактором согласно [40] называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводит к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

4.1 Анализ опасных и вредных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов (таблица 13), которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

Таблица 13 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ	Нормативные документы
	ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ	
Работа с компьютером	Опасные	
	Пожарная опасность	ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.
	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность

Дипломная работа была выполнена на кафедре ПФ ФТИ. Работа выполнялась с использованием современной вычислительной техники, что позволило достичь высокой эффективности процесса и уменьшения временных затрат на его проведение.

На инженера, который работает на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой частоты; освещённость; наличие излучения;
- психофизиологические опасные и вредные производственные факторы делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ

4.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа непосредственно на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед устройством на работу.

4.2.2 Технические мероприятия

Основным местом работы является рабочий стол с ПЭВМ, для того чтобы максимизировать эффективность работы и минимизировать вредные и опасные факторы воздействия следует учитывать особенности вида труда, такие как планировка рабочего места труда.

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще, должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости изображены на рисунке 30.

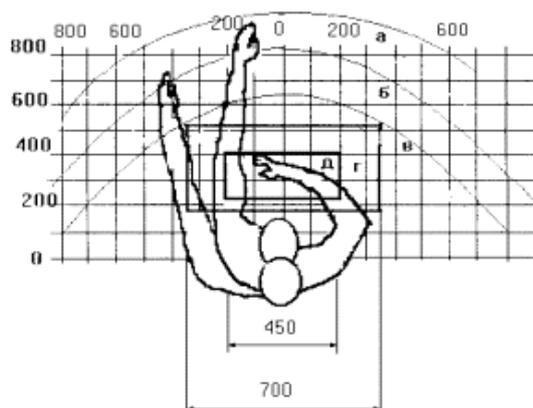


Рисунок 30 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования:

- высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм;
- высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм;
- рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм;
- должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Организация рабочего места показана на рис. 31.

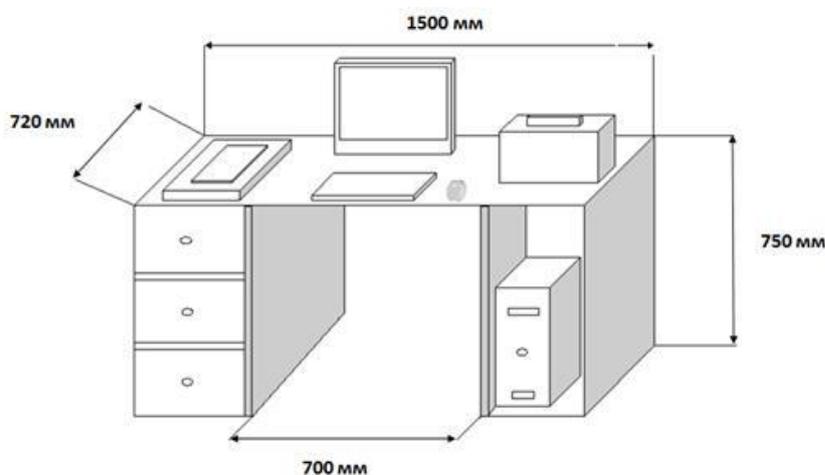


Рисунок 31 – Схема организации рабочего места

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30° . Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15° . Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

4.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда, – это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Микроклимат – комплекс физических факторов внутренней среды помещений, оказывающий влияние на тепловой обмен организма и здоровье человека.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата и приведены в таблицах 14 и 15.

Таблица 14 – Оптимальные параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22-24	40-60	0,1
Тёплый	23-25	40-60	0,1

Таблица 15 – Допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С		Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с	
	Диапазон ниже допустимого	Диапазон выше допустимого		Для диапазона ниже допустим	Для диапазона выше допустим
Холодный	20,0-21,9	24,1-25,0	15-75	0,1	0,1
Тёплый	21,0-22,9	25,1-28,0	15-75	0,1	0,2

Температура – степень нагретости воздуха в рабочем помещении. По закону при восьмичасовом рабочем дне температура воздуха в офисном помещении должна составлять 23-25°С в теплое время года и 22-24 °С в холодное (при относительной влажности 40-60%). Отклонение от нормы разрешено лишь на 1-2 °С. Допустимое колебание температуры во время рабочего дня – не больше 3-4 °С [41].

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. При объеме помещения до 20 м³ в него должно подаваться, не менее 30 м³/ч наружного воздуха на одного человека. В случае объема помещения более 40 м³ на одного человека допускается естественная циркуляции, но с учетом отсутствия выделения вредных веществ.

В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основным недостатком такой вентиляции в том, что подача приточного воздуха идет в помещения без предварительной очистки и подогрева.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

В работе [41] приведены следующие значения уровня шума в помещениях офисов, проектных и научно-исследовательских организаций:

- допустимый уровень – 45 дБ;
- максимальный уровень – 60 дБ;
- оптимальный уровень – 50 дБ.

При выполнении работы на ЭВМ уровень шума в рабочем помещении не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно [41] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц – 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

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

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Мощность дозы облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. По нормам [41] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

В производственном помещении применяется общее равномерное освещение с помощью люминесцентных ламп.

Согласно требованиям [42] освещенность рабочих поверхностей должна быть не менее 200 лк.

4.3 Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С) [43], наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного

прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей).

4.3 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [44], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Помещение по степени пожаро-взрывоопасности относится к категории В, так как содержит твердые сгорающие вещества.

Возможные причины загорания:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);

- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

В помещении с электрооборудованием, во избежание поражения электрическим током, целесообразно использовать углекислотные или порошковые огнетушители. Данные огнетушители предназначены для тушения загораний различных веществ и материалов, электроустановок под напряжением до 1000 В, горючих жидкостей. Химические и пенные огнетушители не допустимы.

Огнетушители следует располагать на защищаемом объекте в соответствии с требованиями [45] таким образом, чтобы они были защищены от воздействия прямых солнечных лучей, тепловых потоков, механических воздействий и других неблагоприятных факторов (вибрация, агрессивная среда, повышенная влажность и т. д.). Они должны быть хорошо видны и легкодоступны в случае пожара. Предпочтительно размещать огнетушители вблизи мест наиболее вероятного возникновения пожара, вдоль путей прохода, а также около выхода из помещения. Огнетушители не должны препятствовать эвакуации людей во время пожара.

Согласно требованиям пожарной безопасности, на этаже находится 2 огнетушителя ОП-3 – огнетушители переносные порошковые, лестничные пролеты оборудованы гидрантами, имеется кнопка пожарной сигнализации.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);

- позвонить в аварийную службу или МЧС;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности (потенциала) разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Целью данной главы является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

5.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования являются полученные данные о свойствах пучка, таких как ориентация пучка относительно направления движения, размеры пучка, расчет геометрии эксперимента, а также характеристик мишени и детектора. Было установлено, что использование когерентного ДИ приемлемо для исследований параметров протонного пучка для ускорителя ESS, к тому же ДИ является невозмущающим методом диагностики, что выделяет его на фоне часто используемого ПИ.

Сегментировать рынок услуг можно по следующим критериям: мониторинг пучков, научно-исследовательская работа. Целевым рынком данного исследования будут исследовательские центры и новые строящиеся ускорительные установки.

5.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Был проведен детальный анализ конкурентных разработок, применяемых и существующих на данный момент. Детальный анализ необходимо проводить систематические из-за динамического характера рынка. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы обладать большей конкурентоспособностью. Так же необходимо оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Для этой цели может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;
- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 16. В этой таблице сравнивается техническая ресурсоэффективность и экономическая эффективность разработки метода диагностики протонных пучков с помощью когерентного дифракционного излучения с другими конкурентными методами:

Бф – Диагностика пучка с помощью когерентного ДИ;

Бк1 – Диагностика пучка с помощью проволочного сканера;

Бк2 – Диагностика пучка с помощью регистрации рентгеновского излучения;

Таблица 16 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы (маx 5)			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Информативность применяемой методики	0,15	5	4	5	0,75	0,6	0,75
2. Точность полученных данных о профиле пучка	0,20	4	3	5	0,8	0,6	1
3. Влияние измерения на пучок	0,15	3	4	4	0,45	0,6	0,6
4. Требования к регистрирующим устройствам	0,15	5	5	4	0,75	0,75	0,6
5. Возможность непрерывной обработки данных	0,10	3	4	4	0,3	0,4	0,4
6. Длительность измерений	0,10	4	1	4	0,4	0,1	0,4
7. Стоимость внедрения	0,15	4	5	1	0,6	0,75	0,15
Итого:	1	28	26	27	4,05	3,8	3,9

Из таблицы видно, что метод регистрации рентгеновского излучения близок к методу регистрации когерентного ДИ, но для получения рентгеновского излучения необходимо использование ондуляторов или поворотных магнитов, установка которых часто невозможна по техническим причинам. Так же часто используется проволочный сканер, но этот метод не применим для малых размеров пучков, так как даже если изготовить достаточно тонкую проволоку, то воздействие пучка на проволоку приведет к ее перегоранию.

6.1.2 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 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 качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту.

SWOT-анализ данного научно-исследовательского проекта представлен в таблице 17.

Таблица 17 — SWOT-анализ

	Сильные стороны: С1: Дешевая экспериментальная реализация по данному методу диагностики	Слабые стороны: СЛ1: Невысокий уровень интенсивности излучения протонного пучка
--	--	--

	С2: Простота вычислений С3: Невозмущающая диагностика пучка	СЛ2: Использование когерентного ДИ (сложность учета форм-фактора)
Возможности: В1: Расширение границ использования данного метода, в том числе и на других ускорителях	Перспектива использования когерентного ДИ для новых строящихся и уже построенных ускорителей.	Экспериментальное нахождение форм-фактора для исследуемого пучка.
Угрозы: У1: Появление новых методов диагностики У2: Отсутствие финансирования	Написание и публикация статей о полученных результатах. Усовершенствования данного метода.	Апробирование данного метода невозмущающей диагностики для ESS, для привлечения финансирования. Получение финансирования от заинтересованных сторон.

6.2 Планирование научно-исследовательской работы

Научно-исследовательские работы и опытно-конструкторские разработки разбиваются на этапы в соответствии с ГОСТ 15.101-98, (для НИР) ГОСТ Р 15.201-2000 (для ОКР). В зависимости от характера и сложности НИОКР ГОСТ допускает разделение этапов на отдельные виды работ.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться от 3 до 15 человек. В рамках данной работы была сформирована рабочая группа, в состав которой вошли:

- руководитель;
- студент.

В данном разделе составлен перечень этапов и работ по выполнению НИР, проведено распределение исполнителей по видам работ. Порядок этапов и работ при выполнении ВКР приведен в таблице 18.

Таблица 18 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ Работ	Содержание работы	Исполнитель
Разработка технического задания на НИР	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
	3	Выбор направления исследования	Руководитель
	4	Разработка общей методики проведения исследований	Руководитель
	5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические исследования	6	Изучение документации, поиск литературы	Студент
	7	Поиск статей в журналах по выбранной тематике	Студент
Проведение расчетов	8	Получение необходимых данных	Студент
	9	Создание графических зависимостей	Студент
	10	Анализ и описание результатов	Студент
Оформление отчета по НИР	11	Проверка полученных результатов	Руководитель
	12	Составление пояснительной записки	Студент

6.2.2 Определение трудоемкости выполнения НИОКР

Следующим этапом является определение трудоемкости выполнения НИОКР. Трудоемкость выполнения НИОКР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества

трудно учитываемых факторов. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости работ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

где $t_{ожі}$ - ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, (чел.-дн.); $t_{\min i}$ - минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), (чел.-дн.); $t_{\max i}$ - максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), (чел.-дн.). Вычисление трудоемкости проводится следующим образом с использованием вышеприведенной формулы:

$$t_{ожі} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 3}{5} = 1.8.$$

Дальнейшие расчеты трудоемкости проводятся подобным образом с использованием данных из таблицы 8.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

где T_{pi} - продолжительность одной работы, (раб. дн.); $t_{ожі}$ - ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, (чел.-дн.); $Ч_i$ - численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, (чел.). В ходе данной работы количество человек, выполнявших каждую из работ на каждом из этапов, равняется одному.

Вычисление продолжительности каждой работы проводится следующим образом с использованием вышеприведенной формулы:

$$T_{pi} = \frac{1,8}{1}.$$

Дальнейшие расчеты продолжительности каждой работы проводятся подобным образом с использованием данных из таблицы 8.

6.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Был разработан календарный план работ. В ходе данной работы был построен ленточный графика проведения НИР в форме диаграмм Ганта. Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k,$$

где T_{ki} - продолжительность выполнения одной работы, (кален. дн.); T_{pi} - продолжительность одной работы, (раб. дн.); k - коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Расчёт коэффициента календарности производится по следующей формуле:

$$k = \frac{T_{кг}}{T_{кг} - T_{вд} - T_{пд}} = 1.22,$$

где, $T_{кг}$ - количество календарных дней в году ($T_{кг} = 365$ дн.); $T_{вд}$ - количество выходных дней в году ($T_{вд} = 52$); $T_{пд}$ – количество праздничных дней в году, ($T_{пд} = 14$).

Расчетные данные сведены в таблице 19, на основании которой был построен календарный план-график.

Таблица 19 – Временные показатели проведения научного исследования

№	Вид работ	Исполнитель	$t_{min i}$	$t_{max i}$	$t_{ож i}$	$Ч_i$	T_{pi} , раб.дн	T_k , кал.дн
---	-----------	-------------	-------------	-------------	------------	-------	----------------------	-------------------

№	Вид работ	Исполнитель	$t_{min i}$	$t_{max i}$	$t_{ож i}$	Ψ_i	$T_{p i}$, раб.дн	T_k , кал.дн
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1	3	1.8	1	1.8	2.2
2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент	5	7	5.8	1	5.8	7.1
3	Выбор направления исследований	Руководитель	1	3	1.8	1	1.8	2.2
4	Разработка общей методики проведения исследований	Руководитель	2	4	2.8	1	2.8	3.4
5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	1	2	1.4	1	1.4	2
6	Изучение документации, поиск литературы	Студент	2	6	3.6	1	3.6	4.4
7	Поиск статей в журналах по выбранной тематике	Студент	5	7	5.8	1	5.8	7.1
8	Получение необходимых данных	Студент	5	12	7.8	1	7.8	9.5
9	Создание графических зависимостей	Студент	5	7	5.8	1	5.8	7.1
10	Анализ и описание результатов	Студент	5	8	6.2	1	6.2	7.6
11	Проверка полученных результатов	Руководитель	1	3	1.8	1	1.8	2.2
12	Составление пояснительной записки	Студент	1	3	1.8	1	1.8	2.2
Итого:			34	65	46,4	2	46,4	57

6.2.3 Календарный план-график в виде диаграммы Ганта

На основании полученных данных был построен план-график в виде диаграммы Ганта. График строится с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или

иную работу. Календарный план-график выполнения данной дипломной работы представлен ниже.

Таблица 20 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№	Вид работ	Исполнители	T _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ									
				Май				Июнь					
				1	2	3	4	1	2	3	4		
1	Составление и утверждение технического задания	Р	2.2	■									
2	Подбор и изучение материалов по теме	С	7.1	▨									
3	Выбор направления исследований	Р	2.2		■								
4	Разработка общей методики проведения исследований	Р	3.4		■								
5	Календарное планирование работ по теме	Р	2		■								
6	Изучение документации, поиск литературы	С	4.4			▨							
7	Поиск статей в журналах по выбранной тематике	С	7.1			▨							
8	Получение необходимых данных	С	9.5				▨						
9	Создание графических зависимостей	С	7.1					▨					
10	Анализ и описание результатов	С	7.6						▨				
11	Проверка полученных результатов	Р	2.2							■			
12	Составление пояснительной записки	С	2.2								▨		

▨ - студент; ■ - руководитель.

6.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В

процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

6.3.1 Расчет материальных затрат НТИ

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями-изготовителями (либо организациями-поставщиками).

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 21.

Отсутствие в таблице разделения на источники финансирования говорит о том, что источник один.

Стоимость ноутбука составляет:

$$C = 35000 \text{ руб.}$$

Амортизационные отчисления за период выполнения дипломной работы составили:

$$A = \frac{45 \cdot 35000}{1825} = 863 \text{ руб,}$$

где 1825 – срок службы ноутбука, дней (5 лет).

Таблица 21 — Затраты на амортизацию

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на амортизацию

Амортизация	руб	45	35000	863
Итого				863

6.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы размере 20–30 % от тарифа или оклада.

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

$$Z_{зп} = Z_{осн},$$

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

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя (лаборанта, студента) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

где T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.; $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d},$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 рабочих дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, рабочих дней (таблица 22).

Таблица 22 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
• выходные дни	52	52
• праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
• отпуск	48	48
• невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный доклад работника с учетом районного коэффициента для Томска $k_p = 1,3$, вычисляется:

$$Z_M = Z_{TC} \cdot 1,3.$$

Данные и результаты расчета основной заработной платы приведены в таблице 13, например, для руководителя расчет основной заработной платы, зная, что его оклад 17547 руб./месяц, проводится следующим образом:

- находим месячный должностной оклад:

$$Z_M = 17547 \cdot 1,3 = 22811 \text{ руб./месяц};$$

- рассчитываем среднедневную заработную плату:

$$Z_{дн} = \frac{22811 \cdot 10,4}{251} = 945 \text{ руб./день};$$

- рассчитываем основную заработную плату:

$$Z_{осн} = 945 \cdot 12 = 11342 \text{ руб.}$$

Подобный расчет проводится для вычисления основной заработной платы студента.

Таблица 23 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Z_{TC} , руб.	k_p	Z_M , руб./месяц	$Z_{дн}$, руб./день	$T_{p,раб. дн.}$	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	17547	1,3	22811	945	12	11342
Студент	9893	1,3	12860	533	37	19721

Итого $Z_{осн}$	31063
-----------------	-------

6.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot Z_{осн},$$

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

На 2015 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%.

$$k_{внеб} = k_{пф} + k_c + k_{пн},$$

где $k_{пф}$ - коэф. отчисления в пенсионный фонд; k_c - коэф. отчисления страховых взносов; $k_{пн}$ - коэф. отчисления в подоходный налог.

$$k_{внеб} = 0,271.$$

Таким образом отчисления во внебюджетные фонды от затраты на оплату труда руководителя вычисляются следующим образом:

$$Z_{внеб} = 0,271 \cdot 11342 = 3443 \text{ руб.}$$

Таблица 25 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель
Основная заработная плата, руб.	11342
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271
Сумма отчислений руководителя	3443
Сумма отчислений студента	6499
Итого	9942

6.3.4 Накладные расходы

Суда входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных служб. Мощность рабочей станции: 0,48 кВт.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{\text{эл}} \cdot P \cdot F_{\text{об}} = 5,8 \cdot 0,48 \cdot (37 \cdot 6) = 618 \text{ руб.}$$

где $C_{\text{эл}}$ — тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб. за 1 кВт·ч); P — мощность оборудования, кВт; $F_{\text{об}}$ — время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 618 рубль.

6.3.5 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) 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 26.

Таблица 26 – Расчет бюджета затрат НИТ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НИР	863
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	31063
3. Отчисления во внебюджетные фонды	9942
4. Затраты на научные и производственные командировки	-
5. Контрагентные расходы	-
6. Накладные расходы	618
Бюджет затрат НИТ	42486

6.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической 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.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. 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:

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

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

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

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

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (табл. 27).

Исп.1 – Диагностика пучка с помощью когерентного ДИ;

Исп.2 – Диагностика пучка с помощью регистрации рентгеновского излучения;

Таблица 27 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2
2. Удобство в эксплуатации	0,20	5	4
3. Сложность установки в существующие устройства	0,35	5	2
4. Стоимость внедрения	0,30	4	3
5. Время проведения измерений	0,15	3	4
ИТОГО	1	21	18

$$I_{p-исп1} = 5*0,2 + 5*0,35 + 4*0,30 + 3*0,15 = 4,4;$$

$$I_{p-исп2} = 4*0,2 + 2*0,35 + 3*0,30 + 4*0,15 = 3;$$

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

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр.1}}, \quad I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр.2}} \text{ и т.д.}$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта

(см.табл.28) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных.

Сравнительная эффективность проекта (Эср):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}}$$

Таблица 28 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,4	3
3	Интегральный показатель эффективности	4,4	3
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,46	0,68

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в бакалаврской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Заключение

В ходе выполнения дипломной работы было проделано следующее:

- Собраны и проанализированы параметры современных протонных ускорителей и характеристики, ускоряемых на них пучков, а также рассмотрены методы диагностики протонных пучков на данных ускорителях.
- Проведено моделирование некогерентного ДИ от протона и получены зависимости углового распределения от ширины щели (5 мм, 10 мм, 15 мм) и длины волны ДИ (10 мм, 15 мм, 25 мм) и в максимумах угловых распределений были построены спектральные распределения в миллиметровом диапазоне длин от 0,1 мм до 1 мм.
- Проведено моделирование некогерентного ДИ от протона и получены зависимости углового распределения от ширины щели (70 мкм, 100 мкм, 130 мкм) и длины волны ДИ (0,2 мм, 0,25 мм, 0,3 мм) и в максимумах угловых распределений были построены спектральные распределения в сантиметровом диапазоне длин волн от 0,1 см до 3 см.
- Проведен расчет ширины щелевой мишени для протонного пучка на ускорителе ESS.
- Проведено моделирование угловых и спектральных распределений когерентного дифракционного излучения протонного пучка, проходящего через щелевую мишень для ускорителя ESS при значениях кинетической энергии 200 МэВ, 628 МэВ, 2500 МэВ.
- Было установлено, что когерентное дифракционное излучение, возможно применять, как метод невозмущающей диагностики для протонного ускорителя ESS.
- Проведено моделирование некогерентного ДИ от протона для ускорителя LHC. Были получены зависимости углового распределения от ширины щели (3 мм, 5 мм, 7 мм) и длины волны ДИ (450 нм, 550 нм, 650 нм) и в максимумах угловых распределений были построены спектральные распределения в оптическом диапазоне длин волн от 300 нм до 900 нм.

Список использованных источников

1. Шарафутдинов А.Ф., Диагностика электронных пучков низких энергий по оптическому переходному излучению / А.Ф. Шарафутдинов – Томск – 2004 г. – 87с.
2. V.E. Scarpine, «Transverse Beam Shape Measurements of Intense Proton Beams Using Optical Transition Radiation», in Pro TIPP 2011, Batavia, USA, - 2123-2128 (2012).
3. А.П. Потылицын, М.И. Рязанов, М.Н. Стриханов, А.А. Тищенко. Дифракционное излучение релятивистских частиц. – Томск: изд. ТПУ, 2008
4. А.С. Коньков. Характеристики поляризационного излучения заряженных частиц и магнитных моментов: Диссертация / Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет. Томск, 2015.
5. Б. М. Болотовский, Труды Физического института АН СССР (1982), Т. 140, с. 95.
6. «Черенкова – Вавилова излучение». *Франк И. М.* // Физическая энциклопедия. Гл. ред. Прохоров А. М. — М.: «Большая Российская энциклопедия», 1998. — Т. 5. — С. 448–450. — 760 с. — ISBN 5-85270-101-7.
7. М.В. Шевелёв, А.С. Коньков. Особенности генерации излучения Вавилова-Черенкова при пролёте заряженной частицы вблизи диэлектрической мишени // ЖЭТФ.— 2014.— Т. 145, № 4.— 579–590 с.
8. Д.А. Шкитов. Диагностика электронных пучков по дифракционному излучению от щелевой мишени: Диссертация / Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет. Томск, 2014.
9. V.A. Verzilov, Transition radiation in the pre-wave zone // Physics Letters A 273, 1-2, 135-140 (2000).
10. Y. Shibata, S. Hasebe, K. Ishi et al., Observation of coherent diffraction radiation from bunched electrons passing through a circular aperture in the millimeter- and submillimeter-wavelength regions // Physical Review E 52, 6787 (1995)

11. Ю.Н. Днестровский, Д.П. Костомаров, Излучение модулированного пучка заряженных частиц при пролете через круглое отверстие в плоском экране // Доклады Академии Наук СССР 124 (1959)
12. Черняев А. П. Ускорители в современном мире / А. П. Черняев. – Москва: Изд-во Московского университета, 2012. – 368 с.
13. «Коллайдер» // Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Э.И. Кэбин / <http://nuclphys.sirp.msu.ru/experiment/accelerators/collider.htm>
14. «Large Hadron Collider» [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://en.wikipedia.org/wiki/LHC>
15. «LHC Machine» //L. Evans and P.Bryan (editors)/ Published by Institute of Physics Publishing and SISSA, 2008 JINST 3 SO8001
16. Официальный сайт Европейского Центра Ядерных Исследований [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://home.web.cern.ch>
17. «Устройство ЛHC» //И. Иванов, Устройство и задачи ЛHC. [электронный ресурс]. – Режим доступа /<http://elementy.ru/LHC>.
18. «PBL (Problem-Based Learning) scenario for Accelerator Physics»/ M. Lindroos and E. Metral, URL:[http://www.hep.lu.se/staff/akesson/kurser/ 6.2.1.5 EXP-5.pdf](http://www.hep.lu.se/staff/akesson/kurser/6.2.1.5_EXP-5.pdf)
19. For Tevatron operation status, V. Lebedev, Proceedings of the 2006 European Particle Accelerator Conference, Edinburgh, 2006, p. 900; D. McGinnis, Proceedings of the 2005 IEEE Particle Accelerator Conference, Knoxville, 2005, p. 484; V. Shiltsev, Proceedings of the European Particle Accelerator Conference, Lucerne, 2004 (EPSAG, Lucerne, 2004), p. 239.
20. See e.g. A. Wrulich, CERN Accelerator School, 5th General Accelerator Physics Course, CERN Report No. 94-001, 1994.
21. See, e.g., D. Edwards and M. Syphers, in Introduction to the Physics of High Energy Accelerators (John Wiley & Sons, New York, 1993).
22. V. Shiltsev, et al., “Beam-Beam Effects in the Tevatron,” PRSTAB, 8, 101001 (2005).

23. «J-PARC» [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://en.wikipedia.org/wiki/J-PARC>
24. Официальный сайт «Japan Proton Accelerator Research Complex» [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://j-parc.jp/index-e.html>
25. European Spallation Source ERIC (20 August 2015). «European Commission Establishes ESS as a European Research Infrastructure Consortium». European Spallation Source. ESS. Retrieved 22 January 2016.
26. Официальный сайт «European Spallation Source» [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://europeanspallationsource/se:80/accelerator-documents>
27. Официальный сайт «Отделение ускорительного комплекса, ГИЦ ИФВЭ ОУК» [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.oku.ihep.su/index.php?option=com_content&view=article&id=16&Itemid=42&lang=ru
28. «У-70» [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/У-70>.
29. «Инструментальная база физики частиц и ядер» [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/kinematics/ch14.htm>.
30. Ускоритель PSI. Users Guide, Accelerator Facilities, Paul Sherrer Institut, 1994.
31. Хлестков Ю.А., Шестак В.П., Воронцов В.А. О возможности получения профиля пучка ЛНС методом ионного зондирования. // Современные проблемы науки и образования, 2012, № 1, с. 12-16
32. Суханова Л.А., Воронцов В.А., Шестак В.П. Восстановление поперечного профиля пучка SPS, измеренного методом ионно-лучевого зондирования. Там же, с. 22-24.
33. Физическая энциклопедия/ «Детектор переходного излучения» [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.femto.com.ua/articles/part_2/2815.html
34. Д.В. Карловец, А.П. Потылицин. «К теории дифракционного излучения» // Письма в ЖЭТФ.— 2008.— Т. 90, № 5.— 368–373 с.

35. Г.А. Науменко, А.П. Потылицын, М.В. Шевелев и др., О роли поверхностных токов в проводящих мишенях в формировании дифракционного и переходного излучения релятивистских электронов // Письма в ЖЭТФ. – 2013. – Том 98, № 10, – С.665 – 669.
36. И.Е. Внуков, Б.Н. Калинин, Г.А. Науменко и др., Экспериментальное обнаружение оптического дифракционного излучения // Письма в ЖЭТФ. – 1998. – Т. 67, № 10. – С. 760 – 764.
37. Потылицын А.П. Излучение электронов в периодических структурах. / Томск: Изд-во НТЛ, 2009. – 280 с.
38. J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, 3rd ed., J. Willey&Sons, New-York (1998).
39. «Болометр» [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80>
40. ГОСТ 12.0.002-80. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения.
41. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ Опасные и вредные факторы. Классификация. – М.: ИПК: Изд-во стандартов, 1997 г.
42. Строительные нормы и правила СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение" (утв. постановлением Минстроя РФ от 2 августа 1995 г. N 18-78)
43. ГОСТ 12.1.030-81, Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
44. НПБ 105-95. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. 31 окт. 1995 г.
45. ГОСТ 12.4.009-83, Система стандартов безопасности труда. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание.