

На правах рукописи

БУЛГАКОВА Мария Владимировна

**ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ
ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧАСТИЦ В ВЕЩЕСТВЕ**

Специальность

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Автореферат

на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Ростов-на-Дону – 2023

Работа выполнена на кафедре общей физики физического факультета Южного федерального университета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, ст. науч. сотр.
Малышевский Вячеслав Сергеевич,
(Южный федеральный университет, физический факультет, кафедра общей физики, заведующий)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Калашников Николай Павлович
(Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», кафедра общей физики, заведующий)

доктор физико-математических наук, профессор
Хоконов Мурат Хазреталиевич
(Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х. М. Бербекова, кафедра теоретической и экспериментальной физики, заведующий)

Защита диссертации состоится **20 сентября 2023** года в **11.00** часов на заседании диссертационного совета **ЮФУ801.01.06** по физико-математическим наукам (специальности **1.3.8. Физика конденсированного состояния** и **1.3.20. Кристаллография, физика кристаллов**) при НИИ физики ЮФУ по адресу: Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194, НИИ физики ЮФУ, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени Ю.А. Жданова ЮФУ по адресу: Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж и на официальном сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1318381/>.

Автореферат разослан

____июля 2023 года

Отзывы на автореферат (укажите дату, свои фамилию, имя, отчество полностью, ученую степень со специальностью, звание, организацию, подразделение, должность, адрес, телефон, e-mail, свое согласие на обработку персональных данных и с нумерацией страниц) в 2 экземплярах, с заверенной подписью рецензента и печатью организации, просим направлять Гегузиной Г. А., ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ801.01.06 при НИИ физики ЮФУ по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194, НИИ физики ЮФУ, а также в формате .pdf - на e-mail geguzina@sfedu.ru.

Ученый секретарь диссертационного совета ЮФУ801.01.06
при НИИ физики ЮФУ

Гегузина Галина Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Электромагнитное излучение свободных заряженных частиц возникает в результате взаимодействия частицы с веществом и является фундаментальным физическим процессом. Электромагнитное излучение заряженных частиц, например, релятивистских электронов, в веществе, возникает в широком диапазоне частот и имеет важное значение для многочисленных применений как в области фундаментальных исследований [1], так и для развития новых технологий [2]. Из-за сложного характера взаимодействия ускоренных частиц с веществом излучение свободных заряженных частиц является предметом обширных исследований [3] в течение последних нескольких десятилетий и остается актуальной темой.

Новые технические возможности ставят новые задачи. Например, для эффективной работы ускорителей и коллайдеров необходима разработка методов получения информации о параметрах пучка – его положении, размере и угловой расходимости. Эмиттанс [4] пучков является важным параметром ускорителей, и определяет эффективность их использования.

Теоретические и экспериментальные исследования процессов электромагнитного излучения релятивистских заряженных частиц в различных средах стимулируются, прежде всего, перспективами создания источников интенсивного излучения [5] в самых разных диапазонах частот. Освоение экспериментальных методов получения интенсивных потоков фотонов различных энергий значительно расширило бы круг исследований в областях от физики конденсированного состояния до физики элементарных частиц. Известно, что в некоторых веществах действительная часть диэлектрической проницаемости в рентгеновском диапазоне частот вблизи краев линий поглощения может стать больше единицы. Тогда оказывается возможным выполнения порога для возникновения рентгеновского излучения Вавилова – Черенкова. Современные данные о частотной

зависимости комплексной диэлектрической проницаемости различных веществ позволяют расширить исследования как частотных диапазонов, так и веществ, в которых возможен такой эффект.

Появившиеся технические возможности ускорения многозарядных ионов расширили сферу применений этих эффектов, и поставили новые задачи [6]. Использование ускоренных релятивистских многозарядных ионов для этих целей может значительно увеличить выход излучения, так как мощность возникающего излучения пропорциональна квадрату заряда входящих в мишень частиц. В данной связи стоит отметить, что в настоящее время в России в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна) создается уникальный ускорительный комплекс NICA [7] для получения встречных пучков многозарядных ионов с энергией порядка 10 ГэВ/нуклон. Будущие исследования на этом ускорителе дадут не только ответы на многие фундаментальные вопросы в различных направлениях современной науки, но и будут способствовать созданию новых технологий в экспериментальной и прикладной физике.

Цель работы: установить поляризационные и спектральные особенности радиационных потерь энергии ускоренными заряженными частицами в конденсированных средах и на границах их раздела в рентгеновском, оптическом и терагерцовом спектральных диапазонах.

В соответствии с поставленной целью в диссертации решались следующие **задачи**:

1. Установить угловые и поляризационные особенности переходного и черенковского излучения релятивистских частиц в аморфных поглощающих мишенях в различных спектральных диапазонах при изменении толщины мишени и скорости частиц.

2. Определить угловые и поляризационные особенности переходного и черенковского излучения релятивистских частиц в тонких мишенях с

нарушенной азимутальной симметрией в различных спектральных диапазонах.

3. Установить влияние процессов изменения заряда релятивистских многозарядных ионов на угловое распределение переходного электромагнитного излучения в бесконечной среде, на границе раздела двух сред и в тонкой мишени.

Научная новизна основных результатов

1. Установлены спектрально-угловые характеристики поляризованного черенковского излучения релятивистских частиц в рентгеновском, ультрафиолетовом, оптическом и терагерцовом спектральных диапазонах при наклонном влете в мишень конечной толщины.

2. Установлено, что нарушение азимутальной симметрии при наклонном влете релятивистских частиц в тонкую мишень приводит к осцилляциям спектрально-угловой плотности излучения Вавилова – Черенкова по азимутальному углу.

3. Показано, что процессы ионизации многозарядных ионов в среде приводят к существенному изменению спектрально-угловых характеристик переходного излучения в направлении, противоположном движению иона, которые выражаются в появлении дополнительных максимумов излучения вдоль границы раздела вакуум-среда.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что они могут быть использованы при разработке новых источников и электромагнитного излучения в различных спектральных диапазонах, методов диагностики параметров и детектирования пучков ускоренных релятивистских частиц.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Торможение заряженной частицы в среде и поглощение излучения приводят к деструктивной интерференции полей электромагнитного излучения с различных участков траектории, что подавляет осцилляции в угловом распределении, а при ультрарелятивистских энергиях частиц выход переходного излучения из мишени конечной толщины превышает выход черенковского излучения.

2. При наклонном влете релятивистских частиц в мишень угловое распределение монохроматического рентгеновского черенковского излучения вблизи K - и L -краев поглощения становится несимметричным, интенсивность компоненты излучения с поляризацией в плоскости излучения становится преобладающей, а угловая ширина конуса излучения уменьшается.

3. Нарушение азимутальной симметрии при наклонном влете релятивистских частиц в тонкую мишень приводит к осцилляциям спектрально-угловой плотности черенковского излучения по азимутальному углу. Интерференционные максимумы имеют малую угловую ширину и при достаточной коллимации излучения могут быть разделены по монохроматическим линиям.

4. Процесс ионизации ультрарелятивистских многозарядных ионов на границе раздела двух сред изменяет спектрально-угловое распределение переходного рентгеновского излучения в направлении, противоположном движению иона, выражающиеся в появлении узких максимумов в направлении вдоль поверхности раздела.

Методы и объекты исследования. Теоретический анализ спектральных и поляризационных особенностей электромагнитного излучения релятивистских частиц в веществе проводился на основе уравнений и методов классической электродинамики сплошных сред. Численные расчёты спектрально-угловых распределений и исследование

поляризационных свойств переходного и черенковского излучения и сравнение с имеющимися экспериментальными данными проводилось для аморфных мишеней H_2O , Si, Al, V, Ti, SiO_2 , Be, Au.

Достоверность и обоснованность положений и выводов, содержащихся в диссертации, обусловлены использованием известных и апробированных методов классической электродинамики для описания когерентного излучения релятивистских частиц в веществе, хорошим согласием результатов работы с данными, приведенными в научной литературе по теме исследований.

Апробация основных результатов. Результаты работы неоднократно докладывались на международных конференциях и совещаниях: Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2020», г. Москва, 2020г.; 50-ой Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами «ФВЗЧК-50», г. Москва, 2021г.; 51-ой Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами «ФВЗЧК-51», г. Москва, 2022г.; 52-ой Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами «ФВЗЧК-52», г. Москва, 2023г.

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано **4** научных статьи из которых **3** - в журналах, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и/или Web of Science и **1** - в Перечень ВАК РФ, а также тезисы **3** докладов в трудах международных конференций. Основные публикации автора отмечены литерой А и помещены в конце автореферата.

Личный вклад автора состоит в том, что она выполнила все основные численные расчеты спектрально-угловых распределений переходного и черенковского излучения в различных мишенях. Определение темы,

постановка задач, анализ и формулирование полученных результатов и научных положений проводились совместно с научным руководителем и соавторами совместно опубликованных статей и докладов, в подготовке которых автор активно участвовал.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, библиографии из 63 наименований, изложенных на 92 страницах, включая 23 рисунка и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** подчеркивается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования. Указана новизна, научная и практическая значимость полученных результатов. Сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту и обоснована степень их достоверности. Указаны сведения об апробации результатов и публикациях по теме диссертации.

В **первом** разделе диссертации дана историческая ретроспектива и обзор работ по рассматриваемой проблеме физики конденсированного состояния, а именно: процессов электромагнитного излучения релятивистских заряженных частиц в различных средах, теоретические и экспериментальные исследования по которой стимулируются перспективами создания источников интенсивного излучения в разных диапазонах частот, чем и обоснована актуальность темы исследования. Поскольку излучение свободных частиц, например, релятивистских электронов способно создавать электромагнитное излучение в широком спектральном диапазоне, оно имеет важное значение для многочисленных применений, например, для детектирования частиц высокой энергии, диагностики пучков ускоренных частиц, создания лазеров на свободных электронах, мощных микроволновых и терагерцовых источников излучения, развития электронной микроскопии,

медицинской терапии, оптической связи и других применений. Поэтому экспериментальные и теоретические исследования в этом направлении актуальны и представляют большой интерес для различных приложений.

Второй раздел посвящен описанию результатов исследования черенковского и переходного излучения в поглощающей среде конечных размеров, которые неоднократно обсуждались в литературе в качестве различных предельных условий, в частности, при сверхвысоких энергиях частиц или в жесткой спектральной области. Во втором разделе диссертации рассматривается влияние этих процессов на спектрально-угловые характеристики возникающего электромагнитного излучения на основе уравнений макроскопической электродинамики без использования каких-либо асимптотических приближений. Такой подход позволяет, в частности, проследить за изменением углового распределения излучения при переходе порога излучения Вавилова – Черенкова, а также проанализировать возникающий при этом вклад переходного излучения.

Для решения соответствующих уравнений Максвелла и нахождения электромагнитных полей наличие границ «вакуум – среда» потребует сшивки нормальной и тангенциальной составляющих полей на ней. Таким образом, мы получаем систему уравнений для нормальной и тангенциальной составляющих электрических полей. Решения этой системы уравнений позволяют рассчитывать спектрально-угловые и поляризационные характеристики излучения в поглощающей среде конечных размеров как в направлении «вперед» (вдоль направления движения частицы) так и в направлении «назад». Причем, такой подход позволяет варьировать скорость частиц в вакууме и в среде, моделируя таким образом торможение частиц, а также изменять заряд частиц, моделируя процессы ионизации или подхвата электронов в среде ускоренными ионами.

Пусть скорость заряженной частицы направлена перпендикулярно границе раздела двух сред, а именно, вакуума и среды, и направим ось z

параллельно постоянной скорости частицы $\mathbf{v}$. Обозначим заряд частицы до влета в среду через $Z_1 e$. Если при записи уравнений Максвелла в среде полагать, что поля создаются током заряда $Z_1 e$, движущимся с такой же скоростью, как и в вакууме, то Фурье-компоненты напряженностей электрических полей в первой (слева, то есть в вакууме) и второй (справа) средах запишутся в следующем виде (полагаем, что магнитная проницаемость среды $\mu = 1$):

$$\mathbf{E}_1(\mathbf{k}, \omega) = \frac{iZ_1 e}{2\pi^2} \left[\frac{\omega \mathbf{v}}{c^2} - \mathbf{k} \right] \frac{\delta(\omega - \mathbf{k} \mathbf{v})}{\mathbf{k}^2 - \omega^2/c^2} + \mathbf{E}'_1(\mathbf{k}, \omega) \delta(\mathbf{k}^2 - \omega^2/c^2). \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_2(\mathbf{k}, \omega) = \frac{iZ_1 e}{2\pi^2} \left[\frac{\omega \mathbf{v}}{c^2} - \frac{\mathbf{k}}{\varepsilon} \right] \frac{\delta(\omega - \mathbf{k} \mathbf{v})}{\mathbf{k}^2 - \varepsilon \omega^2/c^2} + \mathbf{E}'_2(\mathbf{k}, \omega) \delta(\mathbf{k}^2 - \varepsilon \omega^2/c^2). \quad (2)$$

где $\mathbf{E}'_1(\mathbf{k}, \omega)$ и $\mathbf{E}'_2(\mathbf{k}, \omega)$ – Фурье-компоненты амплитуд свободных полей в вакууме перед средой $\mathbf{E}'_1(\mathbf{r}, t)$ и в среде $\mathbf{E}'_2(\mathbf{r}, t)$.

Оценку влияния торможения частицы на спектрально-угловые характеристики излучения можно провести, изменяя ее скорость на вылете из мишени. Рассматривая случай нормального падения пучка частиц на границу раздела, запишем напряжённость поля в области за пластинкой, полагая, что скорость частицы изменилась [А3]:

$$\mathbf{E}_3(\mathbf{k}, \omega) = \frac{iZ_1 e}{2\pi^2} \left[\frac{\omega \mathbf{v}'}{c^2} - \mathbf{k} \right] \frac{\delta(\omega - \mathbf{k} \mathbf{v}')}{\mathbf{k}^2 - \omega^2/c^2} + \mathbf{E}'_3(\mathbf{k}, \omega) \delta(\mathbf{k}^2 - \omega^2/c^2), \quad (3)$$

где $\mathbf{E}'_3(\mathbf{k}, \omega)$ – Фурье-компоненты амплитуд свободных полей в вакууме за второй границей среды $\mathbf{E}'_3(\mathbf{r}, t)$. Амплитуды свободных полей в уравнениях (1-3) находятся из условия непрерывности тангенциальной и нормальной компонент полей на границах раздела.

На рисунке 1 приведены результаты численных расчётов углового распределения широкополосного излучения в оптическом диапазоне в тонком слое прозрачного вещества, то есть $Im(\varepsilon) = 0$, толщиной $L = 100\lambda$, где λ – длина волны и, следовательно, в оптическом диапазоне $L \simeq 76 - 78$ мкм, и показателем преломления $n = \sqrt{\varepsilon} \simeq 1.33$ в направлении «вперёд» в относительных единицах $Z_1^2 e^2 / \pi^2 c$ при различных энергиях заряженной частицы. Порог возникновения излучения Вавилова – Черенкова в выбранных условиях возникает при $\beta > 1/\sqrt{\varepsilon} = 0.75$ или $\gamma = 1.55$, где так называемый Лоренц – фактор $\gamma = E/mc^2$. Если скорость частицы такова, что порог возникновения излучения Вавилова – Черенкова не выполнен (см. рисунок 1, а), то характер углового распределения носит осциллирующий характер. Такого рода осцилляции спектрально-угловой плотности излучения объясняются интерференцией между проходящей волной и отраженной от границ среды.

При выполнении условия возникновения излучения Вавилова – Черенкова в прозрачной среде (см. рисунок 1, б) угловое распределение начинает концентрироваться в угловом конусе вблизи черенковского угла $\cos \vartheta = 1/\beta\sqrt{\varepsilon}$, а спектрально-угловая плотность излучения «вперед» возрастает с увеличением энергии и достигает максимального значения (см. рисунки 1, в, г и д). Последнее обстоятельство объясняется тем, что в прозрачной среде поля излучения Вавилова – Черенкова когерентно суммируются со всех участков траектории на всей толщине пластинки и увеличение энергии излучения прекращается, когда длина когерентности становится равной толщине среды. Дальнейшее увеличение энергии приводит к закономерному увеличению черенковского угла и появлению центрального максимума (см. рисунок 1, е), сравнимого по величине с черенковским. Этот, увеличивающийся с ростом энергии частицы максимум, представляет собой выход переходного излучения, сконцентрированного в узком интервале углов $\Delta\vartheta \simeq 1/\gamma$.

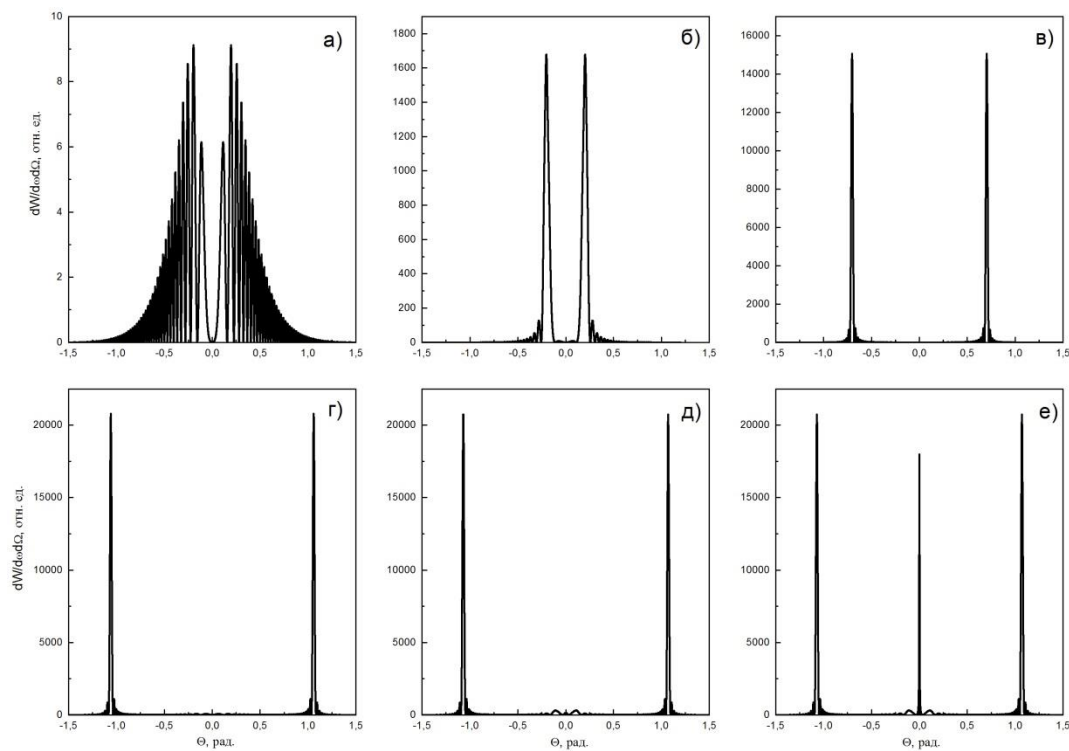


Рисунок 1 - Угловое распределение электромагнитного излучения «вперед» в оптическом диапазоне частот при прохождении тонкого слоя прозрачной среды при различных энергиях частиц (а - $\gamma = 1.5$, б - $\gamma = 1.55$, в - $\gamma = 2$, г - $\gamma = 10$, д - $\gamma = 10^2$, е - $\gamma = 10^3$).

В оптическом диапазоне частот в прозрачной среде поглощение излучения в тонких пластинках будет незначительным. Более важным фактором в этих условиях является торможение заряженных частиц в среде. Изменение скорости частицы приводит к деструктивной интерференции электромагнитного излучения с различных участков траектории, что в свою очередь ведет к исчезновению осцилляций в спектрально-угловой плотности излучения и уменьшению его интенсивности. На рисунке 2 иллюстрируется влияние уменьшения скорости на вылете из среды на угловые характеристики электромагнитного излучения в условиях, когда порог излучения Вавилова – Черенкова не выполнен.

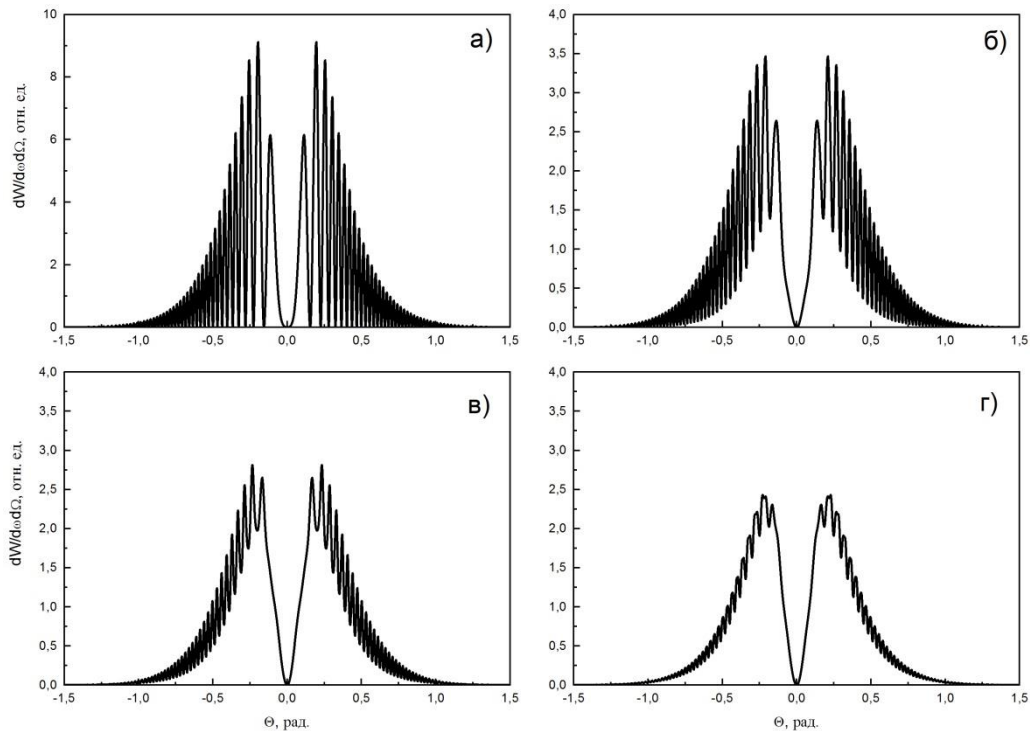


Рисунок 2 - Влияние уменьшения скорости частицы на угловые характеристики электромагнитного излучения в направлении «вперед» в оптическом диапазоне частот при прохождении тонкого слоя прозрачной среды ($L = 100\lambda$) для различных потерь скорости частицы: а – 0%, б – 5%, в – 10%, г – 15%. Порог возникновения излучения Вавилова – Черенкова не выполнен, $\gamma = 1.5$.

Для исследования угловых и спектральных характеристик переходного и черенковского излучения в рентгеновском диапазоне частот и в условиях поглощения излучения воспользуемся данными о частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости различных веществ [9], например, для бериллия. В частности, при энергии излучения 120 эВ действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости, соответственно, равны $Re(\epsilon) = 1,00696$ и $Im(\epsilon) = 8,57 \cdot 10^{-4}$. Выберем толщину пластинки $L = 100\lambda$ и $L = 1000\lambda$. При энергии квантов 120 эВ это составит примерно 1 мкм и 10 мкм. Как и следовало ожидать, наличие поглощения, которое описывается мнимой частью диэлектрической проницаемости, приводит к деструктивной интерференции и к уменьшению интенсивности переходного излучения (рисунок 3, а и в) и излучения Вавилова – Черенкова (см. рисунок 3, б, г) при увеличении толщины пластинки.

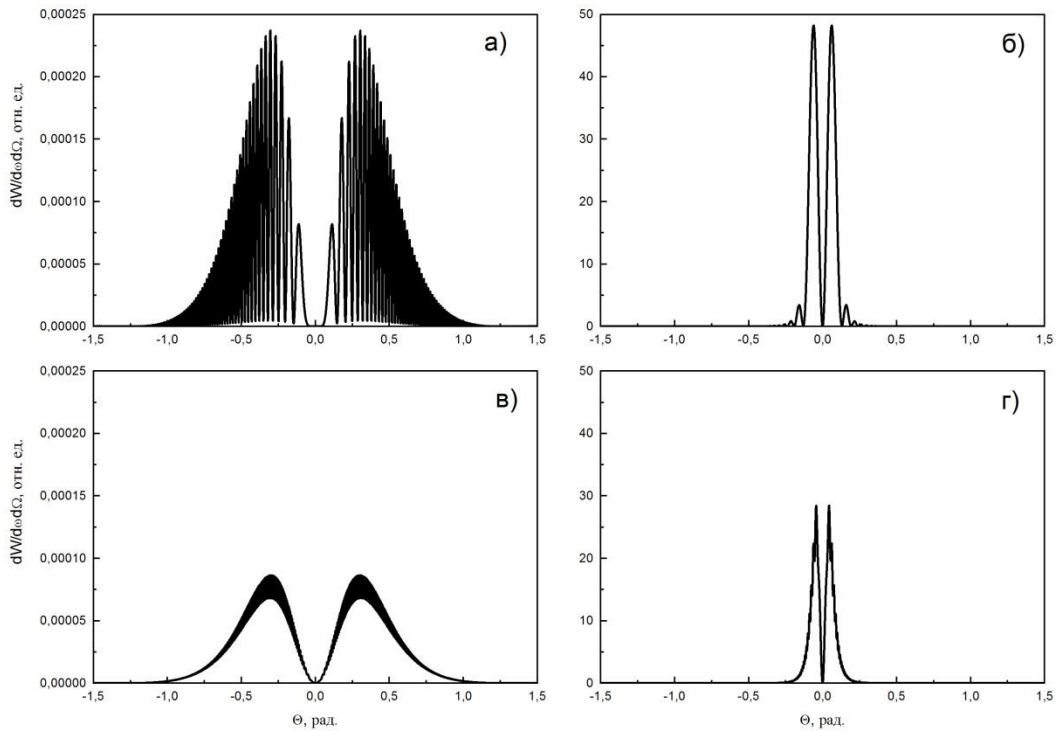


Рисунок 3 - Угловое распределение электромагнитного излучения в направлении «вперед» в рентгеновском диапазоне частот ($\hbar\omega = 120$ эВ) в бериллиевой пластинке при энергии частиц до порога возникновения излучения Вавилова – Черенкова при $\gamma = 2$ (а, в), и после порога при $\gamma = 10$ (б, г) при толщинах среды $L = 100\lambda$ (а, б) и $L = 1000\lambda$ (в, г).

На рисунке 4 показано спектральное распределение электромагнитного излучения в рентгеновском диапазоне частот, проинтегрированное по углам в передней полусфере вдоль направления движения частицы, в бериллиевой пластинке толщиной 1 мкм при $\gamma = 10$ (К-край поглощения 111.5 эВ). Дисперсия действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости в бериллии приведена на вставке рисунка 4. Максимальное значение действительной части диэлектрической проницаемости $Re(\epsilon) = 1,04718$ достигается при энергии квантов 112 эВ. Порог черенковского излучения возникает в этих условиях уже при энергии частиц, соответствующей Лоренц – фактору $\gamma > 3$. В отличие от оптической области, где влияние дисперсии диэлектрической проницаемости несущественно, и излучение Вавилова – Черенкова имеет широкополосный характер, в рентгеновской области спектральная плотность излучения имеет ярко выраженный максимум в области частот вблизи краев линий поглощения [A1].

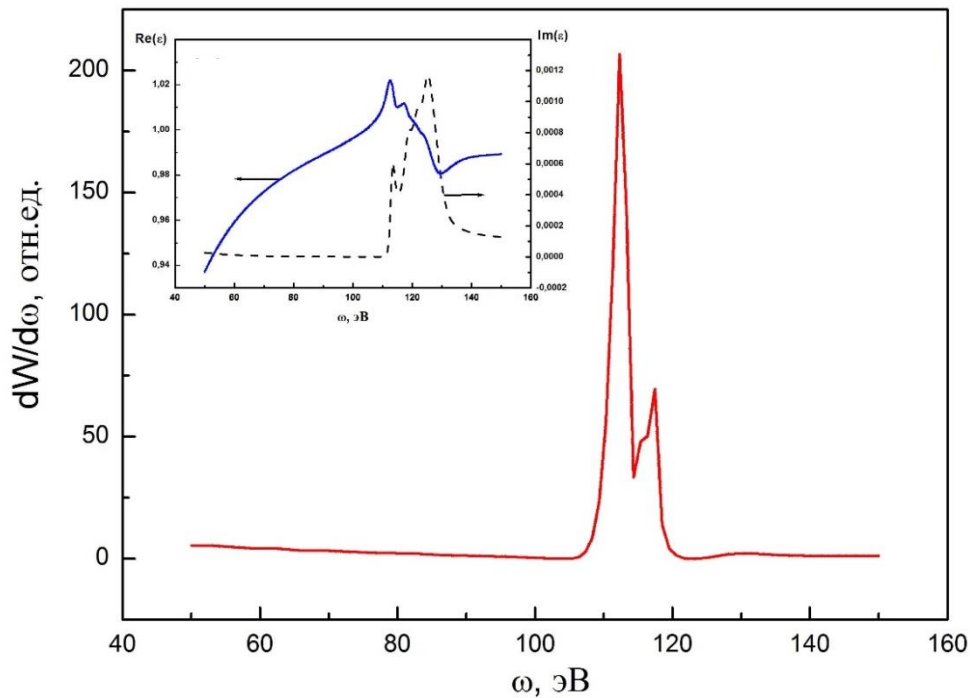


Рисунок 4 - Спектральное распределение электромагнитного излучения в направлении «вперед» в рентгеновском диапазоне частот в бериллиевой пластинке толщиной 1 мкм при выполнении порога возникновения излучения Вавилова – Черенкова при $\gamma = 10$.

На вставке: дисперсия действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости в бериллии.

В **третьем** разделе исследуются особенности рентгеновского поляризованного переходного и черенковского излучения при наклонном влете в мишень. Хорошо известно, что в случае нормального падения быстрой заряженной частицы на поверхность раздела возникающее электромагнитное излучение поляризовано в так называемой плоскости излучения, содержащей волновой вектор излучения и нормаль к поверхности. Обычно такую поляризацию называют продольной. При падении частиц на мишень под углом к поверхности раздела двух сред возникает дополнительная поляризация излучения в плоскости, ортогональной плоскости излучения. Будем называть это поперечной поляризацией. Следует ожидать, что угловое распределение электромагнитного излучения с различной поляризацией будет по-разному зависеть от угла вылета частиц из среды.

Результаты расчетов углового распределения переходного излучения для продольной и поперечной поляризации показывают, что интенсивность излучения в максимуме углового распределения излучения с продольной поляризацией практически не изменяется при увеличении угла вылета. Выход же переходного излучения в максимуме углового распределения с поперечной поляризацией существенно уменьшается.

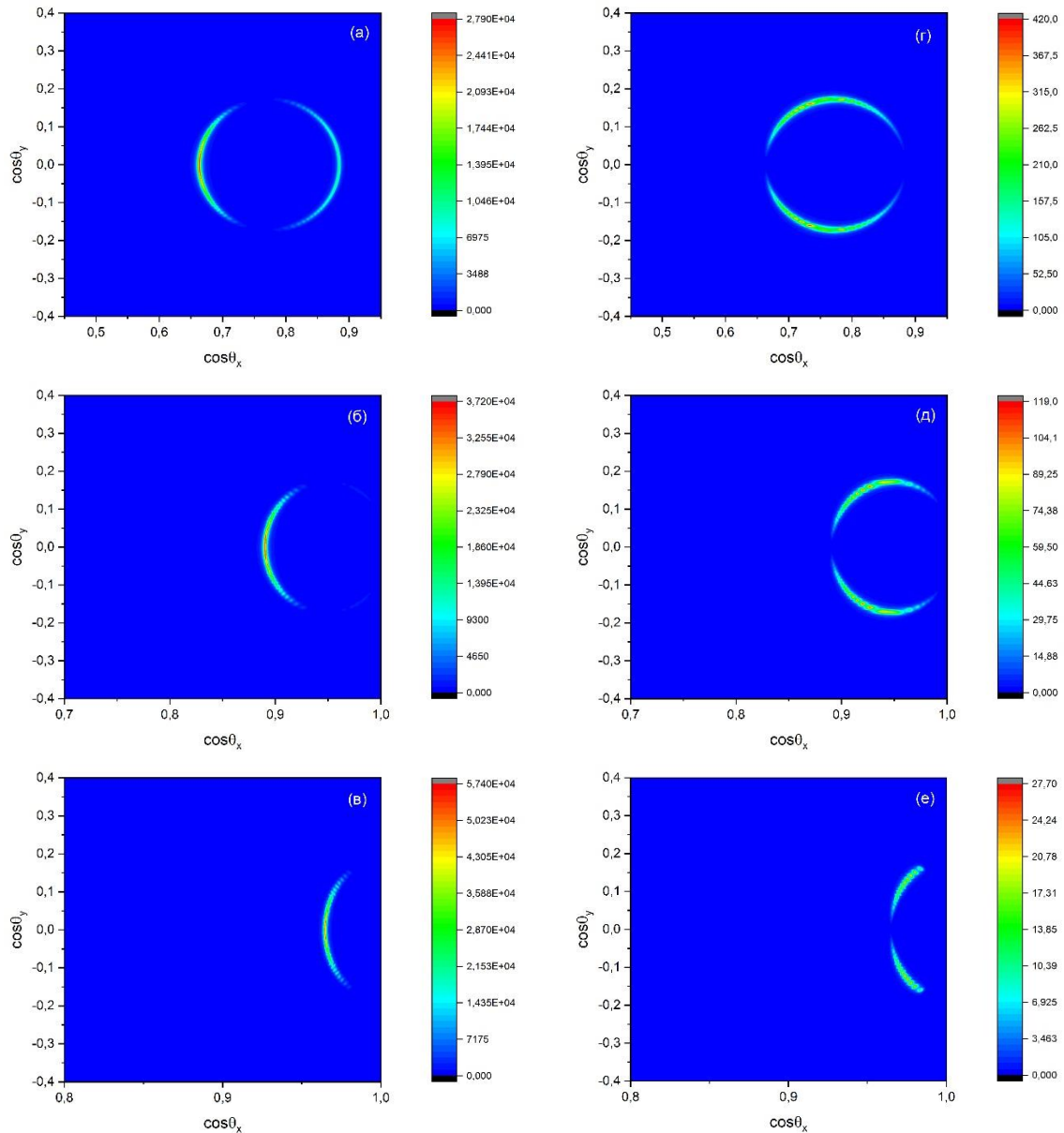


Рисунок 5 - Угловое распределение продольно поляризованной (а, б, в) и поперечно поляризованной (г, д, е) компонент черенковского излучения ($\beta = 0.99$) в рентгеновском диапазоне частот в бериллиевой мишени при различных углах вылета частиц из мишени: (а,г) - $\psi = 50^\circ$, (б,д) - $\psi = 70^\circ$ и (в,е) - $\psi = 80^\circ$.

На рисунке 5 показано угловое распределение черенковского излучения для продольной и поперечной поляризации ($\beta = 0.99$ и порог возникновения черенковского излучения выполнен). При увеличении угла вылета интенсивность продольно поляризованной компоненты излучения значительно возрастает, в то время как поперечно поляризованная практически исчезает [A2].

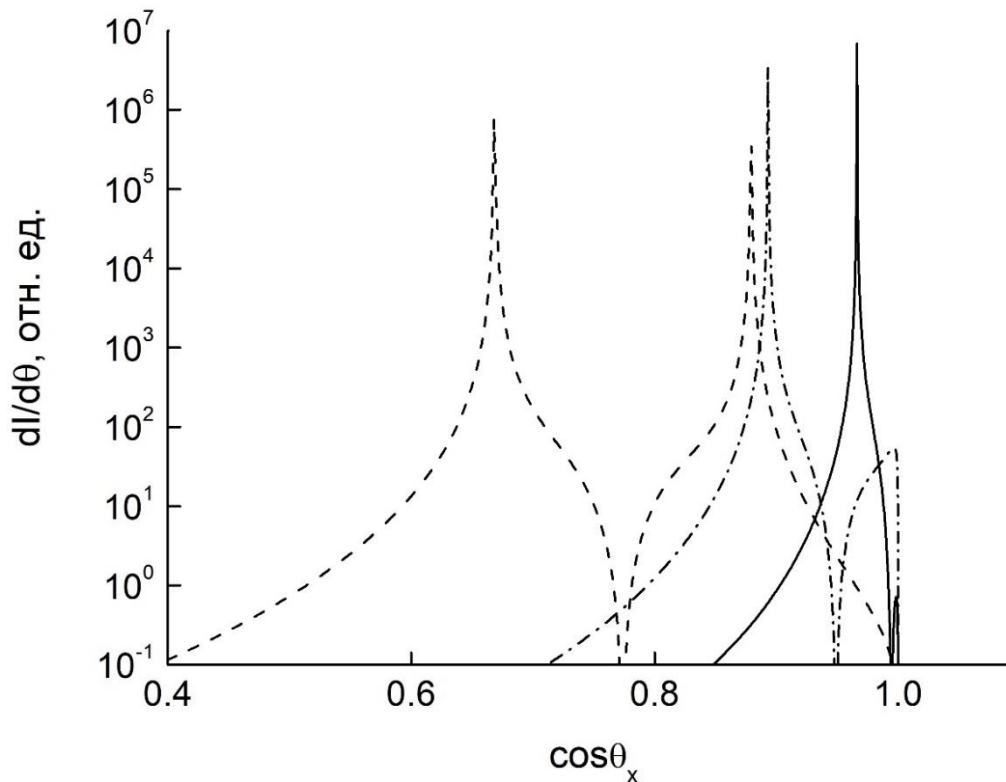


Рисунок 6 - Угловое распределение продольно поляризованной компоненты черенковского излучения в рентгеновском диапазоне частот вдоль направления оси x в бериллиевой мишени при различных углах вылета частиц из мишени: пунктирная линия $\psi = 50^\circ$, штрих-пунктирная линия $\psi = 70^\circ$, сплошная линия $\psi = 80^\circ$.

На рисунке 6 приведено угловое распределение продольно поляризованной компоненты излучения. Отчетливо прослеживается увеличение интенсивности и уменьшение угловой ширины распределения. Последнее обстоятельство объясняется увеличением эффективной когерентной длины излучения в мишени при увеличении угла вылета [A6].

Четвертый раздел диссертации посвящен описанию результатов исследования монохроматического черенковского излучения в ультрафиолетовом, оптическом и терагерцовом спектральных диапазонах при наклонном влете частиц в мишень. Среди материалов, рассматриваемых для генерации монохроматического черенковского излучения в различных диапазонах частот, наиболее изученным является кварцевое стекло. Угловое распределение излучения с продольной поляризацией в плоскости излучения в безразмерных единицах $Z^2 e^2 / \pi^2 c$ в ультрафиолетовой, оптической и терагерцовой областях спектра показаны на рисунке 7. Угловая ширина черенковских максимумов не превышает 10^{-2} rad, а сами максимумы излучения с различной длиной волны разделены, что позволяет сделать заключение о возможности выделения монохроматических линий в выбранном спектральном диапазоне.

В недавней работе [5] были приведены результаты экспериментального исследования спектральных свойств оптического излучения Вавилова–Черенкова. Авторам впервые удалось наблюдать квазимонохроматическое черенковское излучение электронов с энергией 855 МэВ и кварцевой мишени толщиной 0,2 мм. Расчеты спектральных максимумов излучения, поляризованного в плоскости излучения, в условиях эксперимента [5], приведенные в таблице 1, показывают удовлетворительное согласие с данными измерений.

При влете в мишень под некоторым углом эффективная толщина мишени увеличивается, что уменьшает угловую ширину черенковских колец. При этом, в отличие от нормального падения, эффективная толщина для разных направлений излучения в черенковском конусе зависит от азимутального угла. Последнее обстоятельство приводит к тому, что фазы отраженных от границ мишени волн теперь не постоянны, а также начинают зависеть от азимутального угла. Таким образом, нарушение азимутальной симметрии приведет к дополнительным интерференционным осцилляциям и

по азимутальному углу. Угловое распределение в этом случае приобретет довольно сложный вид и наиболее ярко проявится в тонких мишенях [A4].

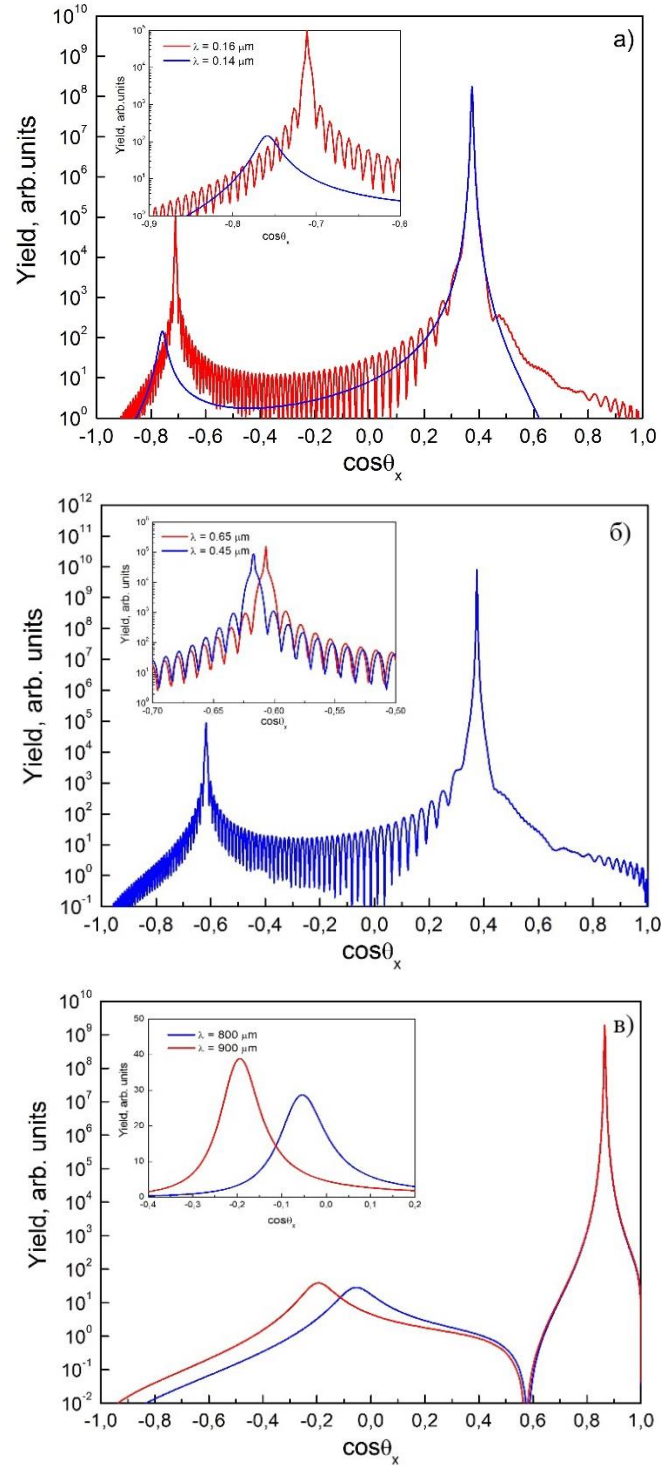


Рисунок 7 - Рассчитанное угловое распределение по полярному углу в плоскости черенковского излучения (азимутальный угол $\varphi = 0$) с продольной поляризацией релятивистских частиц ($\gamma = 250$) в различных частотных диапазонах в мишени из плавленого кварца в ближнем ультрафиолетовом диапазоне при $\psi = 22^\circ$, $L = 100\lambda$ (а); в оптическом диапазоне, при $\psi = 22^\circ$, $L = 100\lambda$ (б); в терагерцовом диапазоне при $\psi = 60^\circ$, $L = 10\lambda$ (в).

Таблица 1 - Результаты измерений и расчетов спектральных максимумов оптического черенковского излучения, проведенных в [5] на основе модели поляризационных токов, и результаты, полученные нами.

Ψ , град.	24	23.5	23	22.5	22
λ , нм (эксп. [5])	370.9 $\pm$ 0.7	404.6 $\pm$ 0.4	451.5 $\pm$ 0.6	521.0 $\pm$ 1.5	616.5 $\pm$ 7.1
λ , нм (теор. [5])	379.6	413.0	457.0	518.5	610.3
λ , нм (теор.)	379.6	413.0	451.2	501.8	632.0

Результаты расчетов углового распределения поляризованного излучения Вавилова – Черенкова вблизи порога в тонкой пластинке из плавленого кварца показаны на рисунке 8.

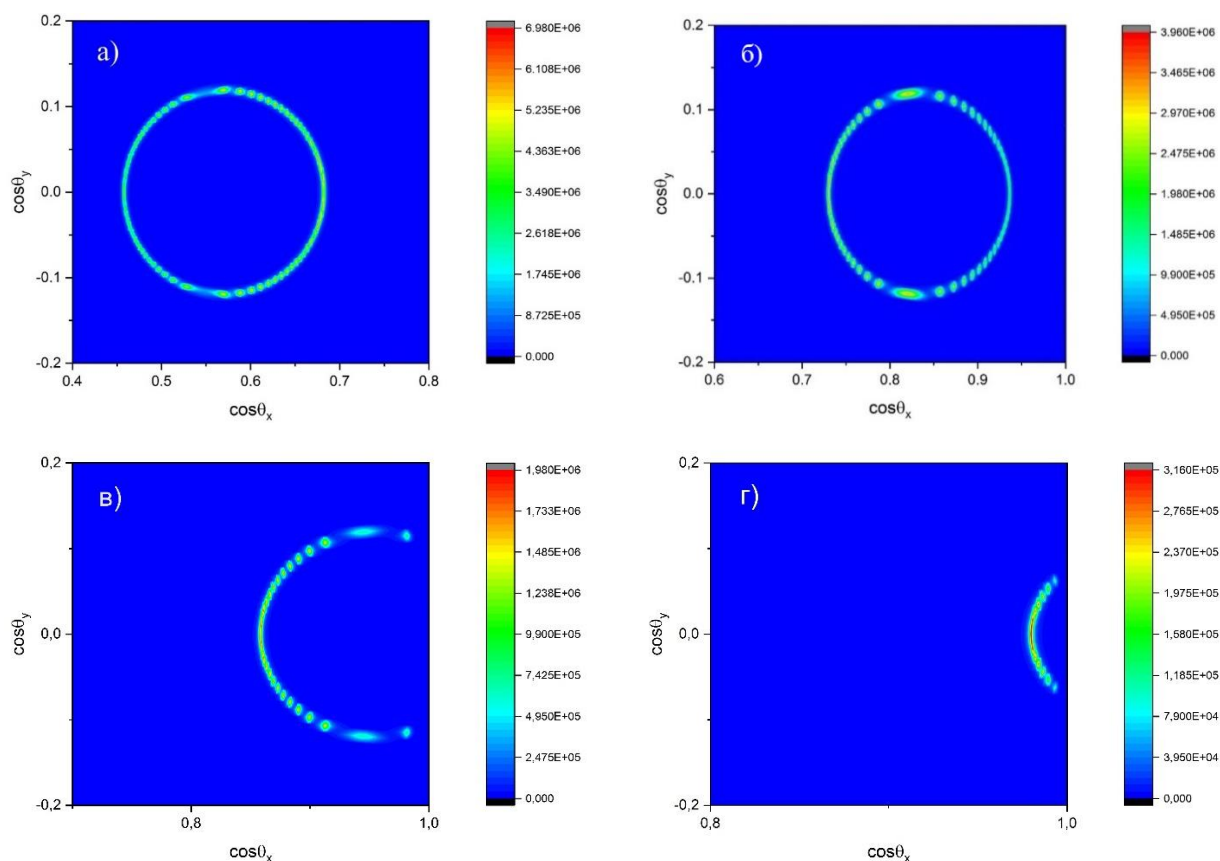


Рисунок 8 - Рассчитанное угловое распределение поляризованного излучения

Вавилова – Черенкова релятивистских электронов ($\beta = 0.6$) вблизи порога ($\beta_{th} = 0.59$) в ближнем ультрафиолетовом диапазоне длин волн ($\lambda = 0.16 \mu\text{m}$, $\epsilon' = 2.729$, $\epsilon'' = 2.7 \cdot 10^{-4}$) в тонкой мишени из плавленого кварца толщиной $1.6 \mu\text{m}$.

Угол между направлением движения частиц и нормалью к поверхности мишени:

$\psi = 20^\circ$ (а); $\psi = 30^\circ$ (б); $\psi = 35^\circ$ (в); $\psi = 40^\circ$ (г).

Такое перераспределение спектрально-угловой плотности излучения существенно увеличивает его выход в некоторых узких угловых интервалах и может иметь важные практические применения, в частности, для контроля угловой расходимости пучков ускоренных частиц.

Заключительный **пятый** раздел диссертации посвящен теоретическому исследованию особенностей спектрально-углового распределения электромагнитного излучения многозарядных ионов. Экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия тяжелых многозарядных ультрарелятивистских ионов с конденсированной средой посвящены изучению фундаментальных процессов атомных столкновений в твердых телах. Одним из таких процессов является переходное или черенковское электромагнитное излучение, сопровождаемое изменением зарядового состояния иона при переходе из одной среды в другую.

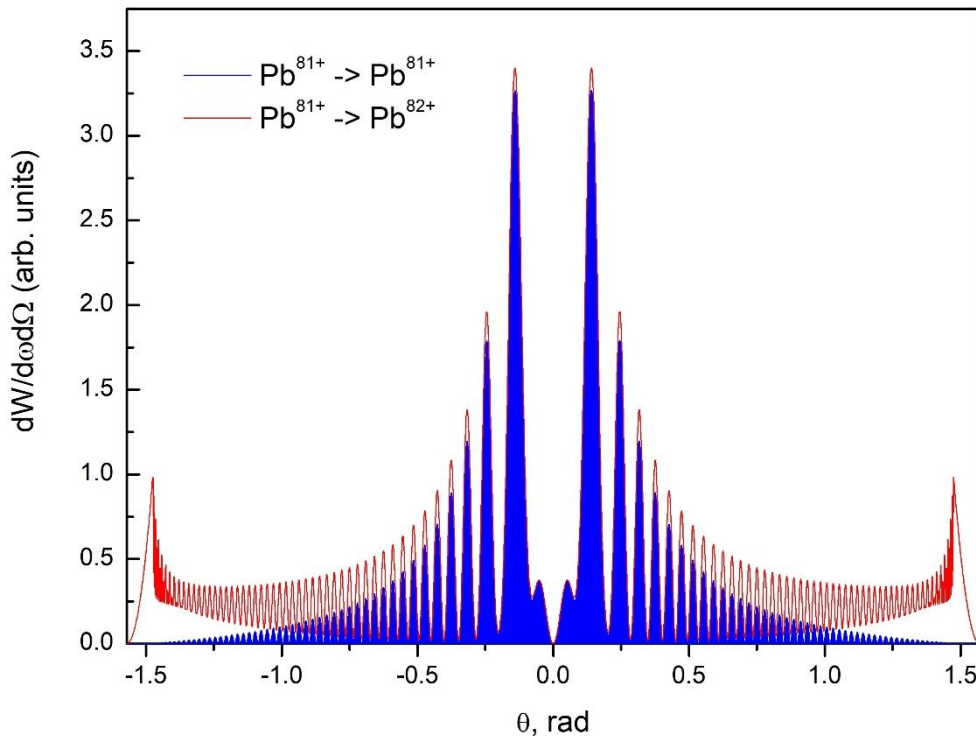


Рисунок 9 - Угловое распределение излучения в направлении «назад» релятивистских ионов свинца (Лоренц-фактор $\gamma = 10$), пересекающих тонкую золотую пластину, при различных значениях конечного заряда. Энергия испускаемого кванта $\hbar\omega = 500$ эВ, толщина пластины $L \approx 125$ nm (или пятьдесят длин волн).

Результаты наших численных расчетов [A7] углового распределения излучения ионов свинца, проходящих через тонкую золотую пластину, для значения конечного заряда $Z_2 = Z_1 + 1$ представлены на рисунке 9. Безразмерная энергия излучения дается, как и выше, в относительных единицах $e^2/\pi^2 c$. Энергия испускаемых квантов выбрана в диапазоне вакуумного ультрафиолета ($\hbar\omega = 500$ эВ), а толщина пластины L выбрана равной пятидесяти длинам волн, то есть $L \approx 125$ нм. Осцилляции в угловых распределениях связаны с интерференцией волн, распространяющихся внутри пластины в противоположных направлениях. Как показывают наши расчеты, выход излучения в направлении «вперед» в случае изменения заряда иона мало отличается от случая, где заряд иона постоянен.

Таким образом, если при переходе частицы из вакуума в среду частица изменяет заряд (в нашем случае частица теряет электрон), то можно предположить, что внезапно появилась «новая» частица с единичным зарядом, движущаяся с той же скоростью. В этом случае результирующее электромагнитное излучение будет представлять собой суперпозицию переходного излучения иона и излучения, вызванного упомянутым выше внезапно выпущенным (стартующим) зарядом. Очевидно, что спектрально-угловые характеристики такого излучения будут отличаться от характеристик обычного переходного излучения. Наиболее существенную особенность можно наблюдать в случае излучения «назад», то есть в направлении, противоположном движению иона. Как показано выше, в угловом распределении излучения в рентгеновском диапазоне частот появляются узкие максимумы в направлении углов, близких к $\pi/2$. Причиной появления таких максимумов возможно является эффект полного внешнего отражения виртуальных фотонов от поверхности мишени.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы:

- Если скорость частицы такова, что порог возникновения излучения Вавилова – Черенкова не выполнен, то характер углового распределения переходного излучения носит осциллирующий характер, обусловленный интерференцией между входящей волной и отраженной от второй границы среды.

- При выполнении условия возникновения излучения Вавилова – Черенкова в прозрачной среде спектрально-угловая плотность излучения «вперед» возрастает с увеличением энергии, достигая максимального значения на длине когерентности, равной толщине среды.

- Спектрально-угловая плотность излучения в направлении «назад» значительно слабее. Наличие слабого черенковского конуса в направлении излучения «назад» объясняется наличием отраженной волны от второй границы раздела.

- При высоких энергиях частиц ($\gamma > 10^3$) в угловом распределении излучения в среде конечных размеров появляется максимум переходного излучения, сконцентрированного в узком интервале углов $\Delta\vartheta \approx 1/\gamma$, сравнимый по величине с черенковским и увеличивающийся с ростом энергии частицы.

- Торможение заряженной частицы в среде и поглощение излучения приводят к деструктивной интерференции полей электромагнитного излучения с различных участков траектории, что в свою очередь приводит к исчезновению осцилляций в спектрально-угловой плотности излучения и уменьшению его интенсивности.

- При выполнении порогового условия в рентгеновской области спектральная плотность излучения Вавилова – Черенкова имеет ярко выраженный максимум в области частот вблизи краев линий поглощения.

- В отличие от оптической области, в которой влияние дисперсии диэлектрической проницаемости в основном несущественно и излучение

Вавилова – Черенкова носит широкополосный характер, в рентгеновской области спектральная плотность излучения имеет ярко выраженный максимум в области частот вблизи краев поглощения. Для бериллиевой мишени максимум мягкого рентгеновского излучения возможен в области энергии края K -линии поглощения 112 эВ.

- При «наклонном» вылете частиц из мишени излучение поляризовано как в плоскости излучения, так и в ортогональной к ней. При увеличении угла вылета относительно нормали к поверхности угловое распределение излучения становится несимметричным, интенсивность черенковского излучения компоненты с продольной поляризацией значительно возрастает, а угловая ширина уменьшается.

- Проведенный анализ спектрально-угловых характеристик черенковского излучения релятивистских частиц при наклонных падениях на тонкие кварцевые мишени показывает принципиальную возможность применения эффекта для создания монохроматических направленных источников поляризованного излучения в различных спектральных диапазонах, а малая угловая ширина излучения может быть полезна для диагностики угловых характеристик пучков ускоренных релятивистских частиц.

- Нарушение азимутальной симметрии при наклонном влете релятивистских частиц в тонкую мишень приводит к осцилляциям спектрально-угловой плотности черенковского излучения по азимутальному углу. Интерференционные максимумы имеют малую угловую ширину и при достаточной коллимации излучения могут быть разделены по монохроматическим линиям. Очевидно, что угловая расходимость пучка частиц будет влиять на ширину интерференционных максимумов. Поэтому эффект может найти применение для диагностики угловых характеристик пучков ускоренных релятивистских частиц.

- Спектрально-угловые характеристики излучения многозарядных ионов при изменении их заряда в среде отличаются от характеристик обычного

переходного излучения. Наиболее существенную особенность можно наблюдать в случае излучения «назад», то есть в направлении, противоположном движению иона. В угловом распределении излучения в рентгеновском диапазоне частот появляются узкие максимумы в направлении углов, близких к $\pi/2$.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малышевский В. С. Электродинамика быстрых заряженных частиц в веществе / В.С. Малышевский – Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону, 2020. – 178 с.
2. Wang, W. Free-electron lasing at 27 nanometers based on a laser wakefield accelerator / W. Wang, K. Feng, L. Ke, et al. // Nature. – 2021. – V. 595. – P. 516-520.
3. Vassholz, M. Observation of electron-induced characteristic X-ray and bremsstrahlung radiation from a waveguide cavity / M. Vassholz, T. Salditt // Science Advances. – 2021. – V. 7. – Iss. 4. – eabd5677.
4. Takabayashi, Y., New method for measuring beam profiles using a parametric X-ray pinhole camera/ Y. Takabayashi, K. Sumitani// Phys. Lett. A. – 2013. – V. 377. – Iss. 38. – P. 2577-2580.
5. Potylitsyn, A. First observation of quasi-monochromatic optical Cherenkov radiation in a dispersive medium (quartz) / A.Potylitsyn, G. Kube, A. Novokshonov, et al. // Phys. Lett. A. – 2021. – V. 417. – 127680.
6. Machida M., Chiba J., Nishimura D., et al. Development of ring-imaging Cherenkov counter for heavy ions // New Facilities and Instrumentation. The 26th International Nuclear Physics Conference (PoS INPC2016) (Adelaide, Australia, 11–16 September 2016). – Adelaide, 2017. – P. 084.
7. Мегaproект NICA (jinr.ru). <https://nica.jinr.ru/ru/?ysclid=lgrp1nhpup236843390>.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

Статьи, опубликованные в журналах, входящий в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и/или Web of Science:

- A1. **Bulgakova, M. V.** X-ray Cherenkov radiation in an absorbing medium with finite dimensions / **M. V. Bulgakova**, V. S. Malyshevsky, G. V.Fomin // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2020. – V. 14. – No. 2. – P. 264-266. – DOI: 10.1134/S1027451020020238. (*Русскоязычная версия: Булгакова, М. В. Рентгеновское черенковское излучение в поглощающей среде конечных размеров / М. В. Булгакова, В. С. Малышевский, Г. В. Фомин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – № 3. – С. 58-61. – DOI: 10.31857/S1028096020030061*).
- A2. Bulgakova, M. V. Angular Distribution of Polarized X-Ray Cherenkov Radiation at Grazing Incidence Angles / M. V. Bulgakova, V. S. Malyshevsky, G. V. Fomin // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2021. – Vol. 15, No. Suppl. 1. – P. S81-S84. – DOI 10.1134/S1027451022020070. (*Русскоязычная версия: Булгакова, М. В. Угловое распределение поляризованного рентгеновского черенковского излучения при скользких углах вылета / М. В. Булгакова, В. С. Малышевский, Г. В. Фомин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2022. – № 3. – С. 89-93. – DOI: 10.31857/S1028096022030074*).

A3. Malyshevsky, V. S. Peculiarities of Cherenkov and transition radiation in a finite-size absorbing medium / V. S. Malyshevsky, G. V. Fomin, **M. V. Bulgakova** // Russian Physics Journal. – 2019. – V. 62. – No. 3. – P. 416-424. – DOI 10.1007/s11182-019-01729-5. (Русскоязычная версия: Малышевский, В. С. Особенности черенковского и переходного излучения в поглощающей среде конечных размеров / В. С. Малышевский, Г. В. Фомин, **М. В. Булгакова** // Известия ВУЗов. Физика. – 2019. – Т. 62. – №3(735). – С. 31-38. – DOI: 10.17223/00213411/62/3/31)

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в перечень ВАК:

A4. **Булгакова, М. В.** Интерференционное усиление черенковского излучения релятивистских частиц в тонких мишенях при косом влете / **М. В. Булгакова**, В. С. Малышевский, Г. В. Фомин // Известия ВУЗов. Физика. – 2023. – Т. 66. – № 2(273). – С. 139-141.

Статьи, опубликованные в сборниках тезисов и трудах конференций:

A5. **Булгакова, М. В.** Рентгеновское черенковское излучение в поглощающей среде конечных размеров / М. В. Булгакова // Неделя науки 2019 : сборник тезисов : в двух частях. Ч. 1 / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет" ; редакционная коллегия: Я. А. Асланов [и др.]. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2019. – С. 156-159.

A6. **Булгакова, М. В.** Угловое распределение поляризованного рентгеновского черенковского излучения при скользящих углах вылета / М. В. Булгакова, В. С. Малышевский, Г. В. Фомин // Тезисы докладов 50-й международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, (Москва 25 мая – 27 мая 2021) / под общей редакцией проф. Н. Г. Чеченина – Москва : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2021. – С. 59. – Режим доступа: <http://tulinov.sinp.msu.ru/wp-content/uploads/2021/12/MTK50.pdf> (дата обращения 10.02.2023)

A7. **Булгакова, М. В.** Электромагнитное излучение при ионизации ультрарелятивистских ионов на границе раздела двух сред / М. В. Булгакова, В. С. Малышевский, Г. В. Фомин // Тезисы докладов 51-й международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, (Москва 24 мая – 26 мая 2022) / под общей редакцией проф. Н. Г. Чеченина – Москва : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2022. – С. 101. – Режим доступа: <http://tulinov.sinp.msu.ru/wp-content/uploads/2022/09/Сборник-тезисов-MTK51.pdf> (дата обращения 10.02.2023)