

На правах рукописи

КОНЬКОВ АНАТОЛИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И МАГНИТНЫХ
МОМЕНТОВ**

Специальность 01.04.16 — Физика атомного ядра и
элементарных частиц

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Томск — 2016

Работа выполнена на кафедре Прикладной физики Физико-технического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Потылицын Александр Петрович

Официальные оппоненты: **Катков Валерий Михайлович**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук,
главный научный сотрудник

Казинский Пётр Олегович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»,
доцент кафедры Квантовой теории поля

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится «5» апреля 2016 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.05 на базе ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, проспект Ленина, 2а, ауд. 326.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/912/worklist>.

Автореферат разослан «2» февраля 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.269.05, д.ф.-м.н., доцент

А.В. Кожевников

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Интерес к поляризационному излучению, т.е. излучению, возникающему при возбуждении электронных оболочек атома кулоновским полем движущегося заряда, заметно возрос в последние годы. Это объясняется несколькими причинами. Во-первых, уникальные свойства поляризационного излучения и относительно простая реализация условий для его возникновения открывают широкие возможности для создания источников электромагнитного излучения в различных спектральных диапазонах. Последние особенно необходимы для биологии и медицины при разработке новых систем диагностики и лечения, для детального изучения структуры и свойств различных веществ и материалов в химии, материаловедении и т.д. Во-вторых, по мере развития ускорительной техники различные типы поляризационного излучения находят своё применение в схемах диагностики параметров пучков ускоренных частиц. Отличительной особенностью данных схем является их практический невозмущающее воздействие на характеристики диагностируемого пучка и возможность проведения диагностики в режиме реального времени. В-третьих, развитие моделей для описания поляризационного излучения позволяет рассчитывать характеристики излучений от мишеней произвольной формы (а не только азимутально-симметричных структур) с произвольным значением диэлектрической проницаемости.

Существующие на сегодняшний день теоретические модели для описания свойств поляризационного излучения хорошо себя зарекомендовали применительно к конкретному виду излучения в выделенном диапазоне частот и энергии заряженной частицы, однако они не позволяют учесть вклад других типов излучений в исследуемых условиях. Другим не менее важным недостатком используемых моделей является большое число приближений, которые, с одной стороны, упрощают теоретический анализ процессов излучения, а с другой – приводят к существенному усложнению вычислений при учёте конкретных экспериментальных условий, что зачастую не позволяет провести корректное моделирование экспериментальной ситуации. Таким образом, существует острая необходимость в создании более простых и универсальных моделей, позволяющих учитывать влияние различных экспериментальных условий.

Целью данной работы является теоретическое исследование влияния различных аспектов, таких как: внешнее электромагнитное поле, диэлектрические и макроскопические свойства мишени, наличие магнитного момента (спина) у частицы, на характеристики поляризационного излучения заряженных частиц в рамках классической электродинамики.

В соответствии с общей целью работы в диссертации рассматриваются следующие основные задачи:

1. Провести полную систематизацию и обобщение метода поляризационных токов для выявления фундаментальных ограничений разрабатываемых на её основе теоретических моделей и выполнения исследований по влиянию рассматриваемых факторов на характеристики поляризационного излучения.
2. На примере классической задачи Гинзбурга-Франка рассмотреть влияние внешнего электромагнитного поля на характеристики поляризационного излучения.
3. Провести исследования особенностей поляризационного излучения, возникающего при наклонном пролёте заряженной частицы вблизи диэлектрической призмы.
4. На примере простой геометрии диэлектрической пластинки проанализировать влияние макроскопических и диэлектрических параметров мишени на характеристики поляризационного излучения в рентгеновском диапазоне частот.
5. На основе теоретического подхода В.Е. Пафомова рассмотреть влияние магнитного момента частицы на характеристики создаваемого ею поляризационного излучения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Наличие внешних электромагнитных полей приводит к перераспределению интенсивностей поляризационного излучения между направлениями его распространения, возникновению нормального и аномального эффекта Доплера, а также к изменениям в спектре наблюдаемого излучения.
2. Поляризационный ток, являющийся источником излучения, возникает под воздействием кулоновского поля заряженной частицы в приповерхностных слоях диэлектрических мишеней при пролёте частицы вблизи мишени, а также в слоях вещества, расположенных в непосредственной близости к траектории частицы при её движении сквозь вещество. Например, при нормальном пролёте заряженной частицы вблизи диэлектрического экрана размеры поляризационного слоя вдоль направления движения частицы для дифракционного и черенковского излучения определяются, соответственно, длиной формирования излучения $d_{DR} = 0.5\beta\lambda / \left| 1 - \beta \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon(\omega)} \right|$ и длиной его поглощения $d_{ChR} = \beta\lambda \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon(\omega)} / \left(4\pi \operatorname{Im} \sqrt{\varepsilon(\omega)} \right)$, где β – относительная скорость

частицы в единицах скорости света, λ – длина волны наблюдаемого излучения, $\varepsilon(\omega)$ – диэлектрическая проницаемость материала мишени. Поперечные размеры поляризационного слоя дифракционного излучения ограничиваются эффективным радиусом затухания кулоновского поля частицы $a_{DR} = \gamma\beta\lambda/(4\pi)$, в то время как для черенковского излучения – глубиной когерентности излучения $a_{ChR} = 0.5\beta\lambda / \left(\beta \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon(\omega)} \sin \Theta_{Ch} \cos \phi + \gamma^{-1} \operatorname{Im} \sqrt{1 + (\gamma\beta \sin \Theta_{Ch} \sin \phi)^2 \varepsilon(\omega)} \right)$, где γ – Лоренц-фактор частицы, Θ_{Ch} и ϕ – соответственно, полярный и азимутальный углы распространения черенковского излучения в среде.

3. Классическое условие распространения излучения Вавилова-Черенкова в общем случае наклонного пролёта заряженной частицы вблизи диэлектрических мишеней будет зависеть как от ориентации излучающего слоя относительно траектории частицы, так и от геометрических характеристик мишени. Например, в случае пролёта заряженной частицы под углом α вблизи диэлектрического экрана направление распространения черенковского излучения в вакууме (характеризуется полярным углом излучения θ) будет определяться из условия $\left| \cos \alpha - \beta \sqrt{\varepsilon(\omega) - \sin^2 \theta} + i\gamma^{-1} \sqrt{1 + (\gamma\beta \sin \theta \sin \phi)^2 \varepsilon(\omega)} \sin \alpha \right| \rightarrow 0$, которое в случае нормального пролёта частицы ($\alpha = 0$) переходит в известное условие Вавилова-Черенкова, записанное в вакуумных переменных.
4. Излучение Вавилова-Черенкова в рентгеновском диапазоне частот может возникать и за пределами края поглощения вещества, что приводит к наличию спектральной дисперсии излучения. Основным условием возникновения черенковского излучения в рассматриваемой области спектра является выполнение критерия П.А. Черенкова.
5. Наличие у заряженных частиц собственного магнитного момента μ приводит, в зависимости от ориентации последнего, к возникновению гибридного излучения ($e\mu$ -излучение) при взаимодействии частицы с поглощающими средами, а также приводит к изменению поляризационных характеристик возникающего излучения.

Научная новизна представленных в диссертации результатов:

1. Разработана модель генерации поляризационного излучения, позволяющая вычислять характеристики излучения в присутствии внешних электромагнитных полей.
2. Впервые получены аналитические модели для расчёта спектрально-угловых характеристик поляризационного излучения, генерируемого заряженными частицами при их наклонном пролёте вблизи диэлектриче-

ских мишеней призматической формы, которые учитывают влияние конечных размеров мишени и диэлектрических свойств вещества (дисперсионные и поглощающие) на характеристики возникающего излучения.

3. В рамках макроскопического и микроскопического подходов теоретически показано, что за генерацию поляризационного излучения ответственны токи, возникающие в приповерхностных слоях диэлектрических мишеней (если частица пролетает вблизи мишени), а также в слоях вещества, близко расположенных к траектории заряженной частицы (при движении частицы в веществе). Размеры области поляризации вещества мишени определяются длиной d_{DR} и глубиной a_{ChR} когерентности, а также длиной поглощения d_{ChR} и эффективным радиусом затухания кулоновского поля частицы a_{DR} .
4. Детальный анализ свойств поляризационного излучения, возникающего в рентгеновском диапазоне частот, позволил установить, что излучение Вавилова-Черенкова может возникать за пределами краёв фотопоглощения вещества, и как следствие, будет обладать спектральной дисперсией.
5. Впервые определены поляризационные характеристики черенковского излучения, возникающего при наклонном пролёте заряженной частицы вблизи диэлектрического экрана конечных размеров.
6. На основании обобщённого метода изображений в формализме В.Е. Пафомова установлено, что наличие собственного магнитного момента у заряженной частицы приводит к возникновению гибридного $e\mu$ -излучения в случае взаимодействия последней с непрозрачной средой при условии поперечной относительно импульса частицы ориентации магнитного момента.
7. Впервые показано, что при наклонном пролёте заряженных частиц, обладающих орбитальным угловым моментом, через идеально проводящую мишень возникает циркулярно поляризованная компонента переходного излучения.

Научная и практическая значимость диссертационной работы определяется несколькими аспектами. Во-первых, полное систематическое изложение метода поляризационных токов, а также детальное исследование свойств поляризационного излучения от мишеней различной конфигурации, могут быть использованы при рассмотрении задач, связанных с генерацией излучения заряженными частицами в веществе, его дальнейшим распространением и выходом из материала мишени в вакуум. Во-вторых, представленные в работе результаты описывают новые закономерности генерации поляризационного излучения и позволяют обобщить результаты суще-

ствующих теорий. Изложенный в первой главе метод, может быть использован для описания свойств поляризационного излучения, возникающего в средах с пространственной и частотной дисперсией, таких как метаматериалы и фотонные кристаллы, а также для описания свойств параметрического рентгеновского и поляризационно-тормозного излучений. Результаты исследования воздействия внешних полей на характеристики поляризационного излучения позволят в полной мере понять природу эффектов внешней стимуляции излучения. В-третьих, выявленные особенности поляризационного излучения наиболее актуальны в сферах разработки и создания невозмущающих методов диагностики пучков современных ускорителей и новых источников электромагнитного излучения. Представленная во второй главе модель генерации поляризационного излучения во внешнем электромагнитном поле позволяет учитывать эффекты, возникающие за счёт наводки и накопления электрического заряда в диэлектрических мишенях, используемых для диагностики характеристик пучков ускорителей. Полученные в третьей главе результаты могут быть использованы для создания источников когерентного терагерцового излучения. Выявленные особенности черенковского излучения, возникающего при наклонном пролёте заряженной частицы вблизи диэлектрической призмы, позволяют регулировать направление распространения излучения Вавилова-Черенкова в вакууме без использования дополнительных оптических систем, что, в совокупности с бесконтактной (невозмущающей) природой данного эффекта, делает его весьма привлекательным для использования в диагностике параметров пучков современных ускорителей. Представленные в четвёртой главе результаты позволяют моделировать характеристики излучения в мягком рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах частот. Полученные результаты демонстрируют возможности увеличения выхода рентгеновского черенковского излучения и регулировки контраста между одновременно возникающими различными видами поляризационного излучения. Разработанные в данной главе модели позволяют определять все возможные характеристики поляризационного излучения, в том числе, и в других спектральных диапазонах. Разработанные в пятой главе модели генерации поляризационного излучения частицами, обладающими собственным магнитным моментом, могут быть использованы для создания поляриметров пучков электронов и позитронов, которые основаны на регистрации обратного переходного излучения, а также для разработки схем диагностики пучков закрученных частиц. Представленные в данной работе теоретические модели также позволяют определять по уже известным характеристикам излучения диэлектрические свойства веществ и материалов.

Достоверность изложенных в работе результатов обеспечивается, прежде всего, их аналитической формой, что позволило совершить предельные переходы к результатам, полученным авторами известных и авторитетных работ. Следующим, не менее важным, критерием достоверности полученных в диссертации результатов является разумное согласие большинства представленных выводов и положений работы с результатами экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: международной конференции с элементами научной школы для молодёжи «Электромагнитное излучение в науке, промышленности, медицине» (Звенигород, 2009 год), XVI международной научно-практической конференции студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии» (Томск, 2010 год), VII и X международных конференциях студентов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2010 и 2013 года), IX, X и XI International Symposium of «Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures» (UK, Egham, 2011 год; Armeniya, Yerevan, 2013 год; Russian Federation, Saint Petersburg, 2015 год), XLV школе ПИЯФ «Физика Конденсированного Состояния – 2011» (Рощино, 2011 год), круглом столе с элементами научной школы по итогам «Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области физических наук в рамках Всероссийского фестиваля науки» (Томск, 2011 год), V и VI International Conference «Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena» (Italy, Alghero, 2012 год и Italy, Capri, 2014 год), 2^d «International Beam Instrumentation Conference» (UK, Oxford, 2013 год), III Mini-workshop for Advanced Generation of THz and Compton X-ray beams «AGTaX» using compact electron accelerator (Russian Federation, Moscow, 2014 год), семинарах Инновационной международной научно-образовательной лаборатории «Фотон» кафедры прикладной физики ТПУ (Томск, 2011 – 2015 года), рабочем совещании в ЦЕРНе (CERN, Швейцария, Женева, 2013 год) и семинарах LUCX-группы японской Национальной лаборатории физики высоких энергий (High Energy Accelerator Research Organization, KEK, Japan, Tsukuba, 2014 год).

Диссертационная работа была выполнена при поддержке гранта № 3.709.2014/К программы «Наука» Министерства Образования и Науки РФ, а также проекта № 14-02-31642 мол_а Российского Фонда Фундаментальных Исследований.

Личный вклад. Автор принимал активное участие во всех этапах работы – создание математических моделей, проведение аналитических расчётов и компьютерного моделирования, анализ полученных результатов. Все

представленные в работе аналитические модели процессов генерации поляризованного излучения были получены лично соискателем, включая их компьютерную реализацию. Автор внёс основной вклад в систематизацию и обобщение метода поляризационных токов, в частности, были получены пределы применимости развиваемой в работе теории и развит подход для расчёта поляризационных характеристик излучения.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 6 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 134 страницы, включая 33 рисунка, 3 таблицы и список литературы, содержащий 184 наименования.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится краткий обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава диссертации посвящена систематическому изложению метода поляризационных токов. В разделе 1.1 кратко обсуждаются два ключевых вопроса: что из себя представляет пространственная дисперсия и при каких условиях её необходимо учитывать. Наличие пространственной дисперсии приводит к появлению нелокальности связи между векторами индукции $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ и напряженности поля $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$. Физический это объясняется тем, что реакция среды на внешнее поле $\mathbf{E}$ в точке $\mathbf{r}$ в момент времени t может зависеть от значения поля в другие моменты времени и не только в данной точке, что приводит к появлению ряда новых эффектов, в частности, к возникновению продольных волн. Существенно заметить, что наличие пространственной дисперсии обусловлено не только магнитными, но и диэлектрическими свойствами среды, которые и определяют отклик вещества на воздействие внешнего поля. Оба указанных отклика одинаково влияют на пространственную дисперсию поперечных волн, в то время как дисперсия продольных волн зависит только от электрического отклика вещества.

В ряде задач, связанных с исследованием излучения в неоднородных проводящих средах (кристаллы, растворы электролитов, плазма), требуется учёт эффектов пространственной дисперсии. По этой причине, в разделе 1.2

представлено обобщение метода поляризационных токов для сред, обладающих как частотной, так и пространственной дисперсией. Для определения напряжённости электрического $\mathbf{E}^{pol}(\mathbf{k}, \omega)$ и магнитного $\mathbf{H}^{pol}(\mathbf{k}, \omega)$ полей поляризационного излучения, соответственно поперечных и продольных волн, были получены следующие выражения:

$$\Delta \mathbf{H}^{pol}(\mathbf{r}, \omega) + \frac{\omega^2}{c^2} \int \varepsilon_t(\mathbf{k}, \omega) \mathbf{H}^{pol}(\mathbf{k}, \omega) e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} d^3k = -\frac{4\pi}{c} \text{rot } \mathbf{j}^0(\mathbf{r}, \omega).$$

$$\int \varepsilon_l(\mathbf{k}, \omega) \mathbf{E}^{pol}(\mathbf{k}, \omega) e^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} d^3k = \frac{4\pi}{i\omega} \mathbf{j}^0(\mathbf{r}, \omega),$$

где $\mathbf{k}$ – волновой вектор, ω – частота излучения, c – скорость света, $\varepsilon_l(\mathbf{k}, \omega)$ и $\varepsilon_t(\mathbf{k}, \omega)$ – продольная и поперечная составляющие тензора диэлектрической проницаемости, $\mathbf{j}^0(\mathbf{r}, \omega)$ – плотность тока заряженной частицы, определяемая согласно закону Ома.

Раздел 1.3 посвящён разрешению проблемы определения поляризационных характеристик излучения, возникающей в следствии применения в методе поляризационных токов принципа взаимности Х.А. Лоренца. Для этой цели в данном разделе описаны подходы к определению поляризационных характеристик излучения, основанные на базовых оптических принципах и теориях Р. Джонса и Дж.Г. Стокса [1].

В разделе 1.4 представлены основные ограничения рассматриваемого метода. Метод поляризационных токов должен удовлетворять пределам применимости макроскопического подхода классической электродинамики и закона Ома. Кроме того, для корректного использования метода необходимо, чтобы мишень обладала резкими границами. Поскольку на практике реальные поверхности мишени всегда оказываются размытыми на некоторую величину, поэтому для применения метода токов к таким мишеням необходимо, чтобы толщина границы поверхности мишени была значительно меньше длины волны рассматриваемого излучения.

В завершающей части главы (раздел 1.5) обсуждаются полученные результаты.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию влияния внешних электромагнитных полей на характеристики поляризационного излучения. В разделе 2.1 на основании линейного по скорости приближения А.А. Рибуда [2] представлено решение задачи Гинзбурга-Франка во внешнем электромагнитном поле $\mathbf{E}_{ex}$ (см. рисунок 1). Для описания спектрально-угловых характеристик поляризационного излучения в данном разделе было получено

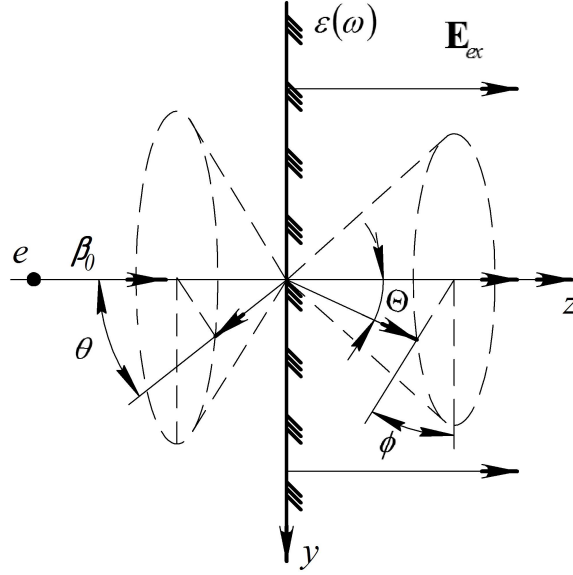


Рис. 1 – Схема генерации поляризационного излучения во внешнем поле.

следующее выражение:

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{\pi^2 c} |\varepsilon(\omega) - 1|^2 \frac{\beta_0^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{\left| \varepsilon(\omega) \cos \theta + \sqrt{\varepsilon(\omega) - \sin^2 \theta} \right|^2} \times$$

$$\times \left| \mathcal{F}_{l=0} + \sum_{l=1}^{+\infty} \left[\left(\pm \frac{\alpha}{2\gamma^2 f} \right)^l \frac{1}{l!} \left((lf+1)^{l-1} \mathcal{F}_l - (lf-1)^{l-1} \mathcal{F}_{-l} \right) \right] \right|^2,$$

где для компактности записи введено обозначение:

$$\mathcal{F}_l = \frac{1}{lf+1 \pm \beta_0 \sqrt{\varepsilon(\omega) - \sin^2 \theta}} \frac{(lf+1)^2 - \beta_0^2 \pm \beta_0 (lf+1) \sqrt{\varepsilon(\omega) - \sin^2 \theta}}{(lf+1)^2 - \beta_0^2 \cos^2 \theta}.$$

Здесь e – заряд частицы, β_0 – относительная скорость частицы до взаимодействия с полем, $f = \omega_0/\omega$ – соотношение частот внешнего поля и поля излучения, $\alpha = e\mathcal{E}_0\hbar c / (\gamma m_0 c^2 f \hbar \omega \beta_0) \ll 1$ – относительное изменение скорости частицы, $\mathcal{E}_0$ – амплитудное значение напряжённости внешнего поля, $\hbar c$ – конверсионная константа, $m_0 c^2$ – энергия покоя частицы, $\hbar \omega$ – энергия испущенного излучения, l – номер гармоники. Второе слагаемое под знаком суммы $\mathcal{F}_{-l}$ следует понимать как операцию инверсии знака у всех членов, содержащих множитель l . Представленные выражения описывают поляризационное излучение как в отрицательном направлении оси z (соответствует верхний знак), так и в положительном (нижний знак).

Наличие внешнего поля приводит к тому, что условие Вавилова-Черенкова для высших гармоник $l \neq 0$ будет видоизменяться вследствие эффекта Доплера (см. первый знаменатель в формуле для $\mathcal{F}_l$), в резуль-

тате которого возникает, так называемое, «доплеровское излучение». В таком случае, положительные значения индекса суммирования ($l > 0$) соответствуют аномальному излучению Допплера, испускаемому внутри конуса черенковского излучения, а отрицательные ($l < 0$) – нормальному излучению Допплера, которое распространяется снаружи конуса Вавилова-Черенкова.

В разделе 2.2, исходя из полученных результатов, показано, что присутствие внешнего электромагнитного поля приводит к перераспределению интенсивности поляризационного излучения, испущенного в направлениях $z > 0$ и $z < 0$, в зависимости от фазы приложенного поля. Представленные результаты находятся в полном согласии с выводами работы А.А. Рибуда [2]. Наличие аналогичной закономерности в спектре поляризационного излучения, а также появление зависимости спектра от частоты приложенного поля, представлено в разделе 2.3.

Оценка степени влияния поля на характеристики поляризационного излучения обсуждается в предпоследней части главы (раздел 2.4). Согласно полученным оценкам, поправка на эффекты внешнего поля в широком диапазоне частот в пределах применимости классической электродинамики является малой величиной.

В завершающем разделе 2.5 приведены основные выводы по главе.

Третья глава диссертации посвящена исследованию особенностей генерации излучения Вавилова-Черенкова, возникающего при пролёте заряженной частицы вблизи диэлектрической призмы (см. рисунок 2а). В частности, в разделе 3.1 из решения системы уравнений Максвелла для поляризационного тока, возникающего в результате динамической поляризации среды кулоновским полем заряженной частицы, показано, что направление распространения черенковского излучения в вакууме будет определяться из условия:

$$\left| \cos \alpha - \beta \sqrt{\varepsilon(\omega) - \sin^2 \theta} + i\gamma^{-1} \sqrt{1 + (\gamma\beta \sin \theta \sin \phi)^2 \varepsilon(\omega)} \sin \alpha \right| \rightarrow 0,$$

которое в случае нормального пролёта частицы ($\alpha = 0$) переходит в известное условие Вавилова-Черенкова, записанное в вакуумных переменных.

В разделе 3.2 представлены основные ограничения разработанной в данной главе модели, которые определяются профилем мишени и условием непересечения траектории частицы с мишенью.

На черенковское условие оказывает существенное влияние геометрическая форма мишени и её ориентация относительно траектории заряженной частицы. Обсуждению отмеченных эффектов посвящён раздел 3.3, в котором проведён детальный анализ влияния объёма призматической мишени и угла её поворота ψ относительно траектории частицы (см. рисунок 2б) на

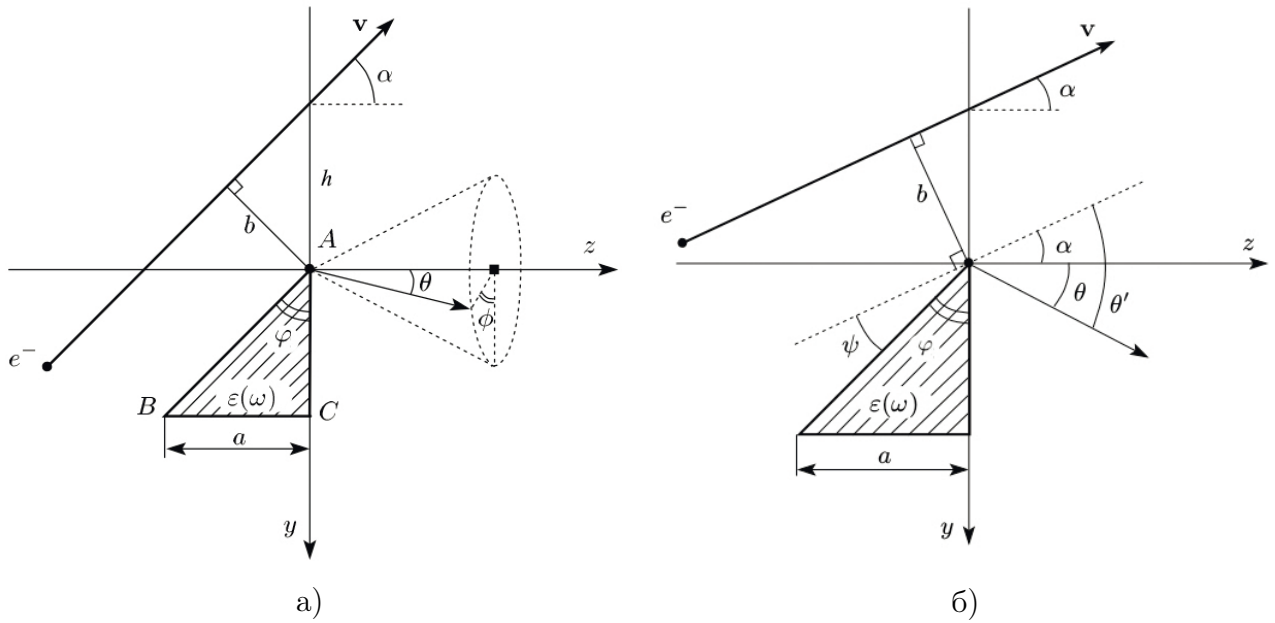


Рис. 2 – Схема генерации поляризационного излучения, возникающего при пролёте электронного пучка вблизи диэлектрического клина: а) кинематические переменные; б) связь угла поворота призмы ψ с углами пролёта частицы α и вылета фотонов θ и θ' .

характеристики поляризационного излучения. При исследовании призматических мишеней различного объёма с фиксированным размером грани AB , обращённой к траектории частицы, установлено, что основной вклад в процесс генерации излучения Вавилова-Черенкова вносят токи, возникающие на близлежащей грани к траектории частицы (грань AB , см. рисунок 2а). Следует отметить, что в этом случае оставшиеся грани мишени (грани BC и AC) будут отвечать за генерацию дифракционного излучения, также возникающего из-за динамической поляризации атомов среды. Представленные результаты полностью согласуются с выводами, полученными на основе принципа Х. Гюйгенса, и нашли экспериментальное подтверждение в работах [3, 4] (см. рисунок 3). На рисунке 3а представлены угловые распределения когерентного поляризационного излучения, измеренного на микротроне ФТИ ТПУ (представлено кривой с точками) и вычисленного в рамках метода поляризационных токов с учётом когерентных эффектов (отображено сплошной кривой). Как следует из рисунка 3а теоретическая кривая хорошо описывает результаты экспериментального измерения угловых зависимостей черенковского излучения ($\theta_{Ch} \approx 45^\circ$). В области углов $\theta' \approx 0$ генерируется дифракционное излучение, для которого наблюдается отличие теоретических значений интенсивности с экспериментом, что связано со значительным вкладом электронов пучка в детектируемое дифракционное излучение. В области малых углов наблюдения направление распространения дифракционного излучения

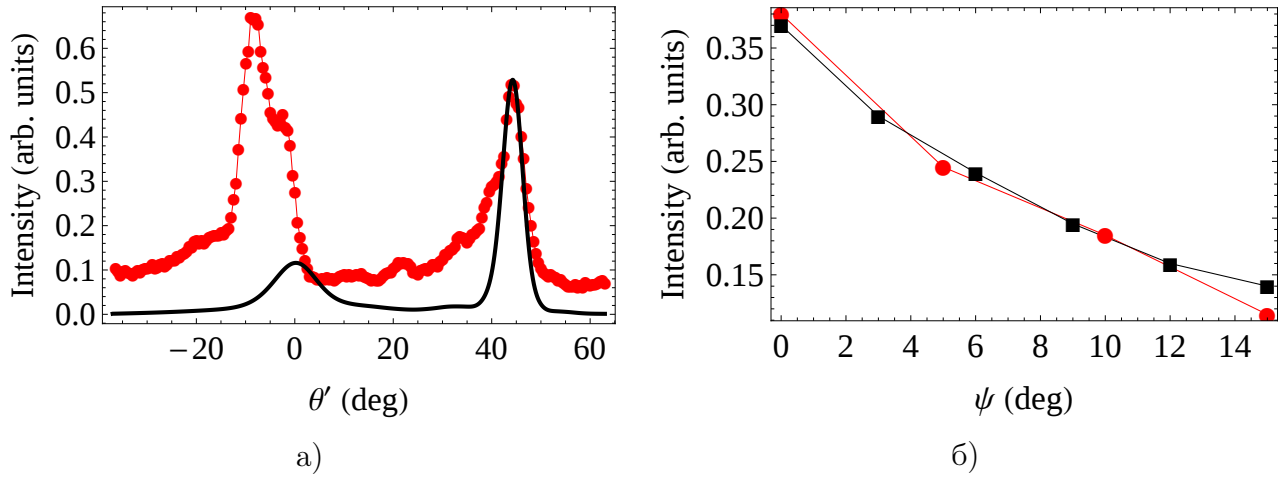


Рис. 3 – Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных зависимостей поляризационного излучения, возникающего при пролёте электронного пучка вблизи тефлонового клина ($\sqrt{\varepsilon(\omega)} = 1.41$): а) угловое распределение поляризационного излучения при $\alpha = 45^\circ$; б) максимальный выход черенковского излучения в зависимости от угла поворота клина.

совпадает с направлением пучка, что в конечном итоге приводит к их совместной регистрации [3, 4].

На рисунке 3б представлен сравнительный анализ зависимостей интенсивности излучения Вавилова-Черенкова, измеренного в экспериментальной работе [4] (кружки) и рассчитанного по модели поляризационных токов (квадраты) для максимального значения выхода излучения (соответствует углу θ_{Ch}), от угла поворота тефлоновой призмы ψ . Как следует из рисунка, с увеличением угла поворота мишени ψ интенсивность черенковского излучения убывает, поскольку эффективный прицельный параметр увеличивается, а область поляризации уменьшается.

В разделе 3.4 проводится обсуждение полученных результатов.

В четвертой главе диссертации проведено исследование свойств рентгеновского поляризационного излучения, возникающего в области аномальной дисперсии вещества. Для этих целей в разделе 4.1 на основе модели диэлектрической проницаемости вещества Хенке [5], а также законов Фарадея и Ампера-Максвелла, представлен теоретический подход к корректному описанию диэлектрических свойств пассивных и активных сред.

В разделе 4.2 получены основные выражения для описания характеристик поляризационного излучения, возникающего при наклонном пролёте заряженной частицы через диэлектрическую пластинку и вблизи неё (см. рисунок 4). Из анализа, проведённого в указанном разделе, можно заключить, что представленные теоретические модели поляризационного излучения являются более общим случаем результатов, полученных в работах [6–8], хоро-

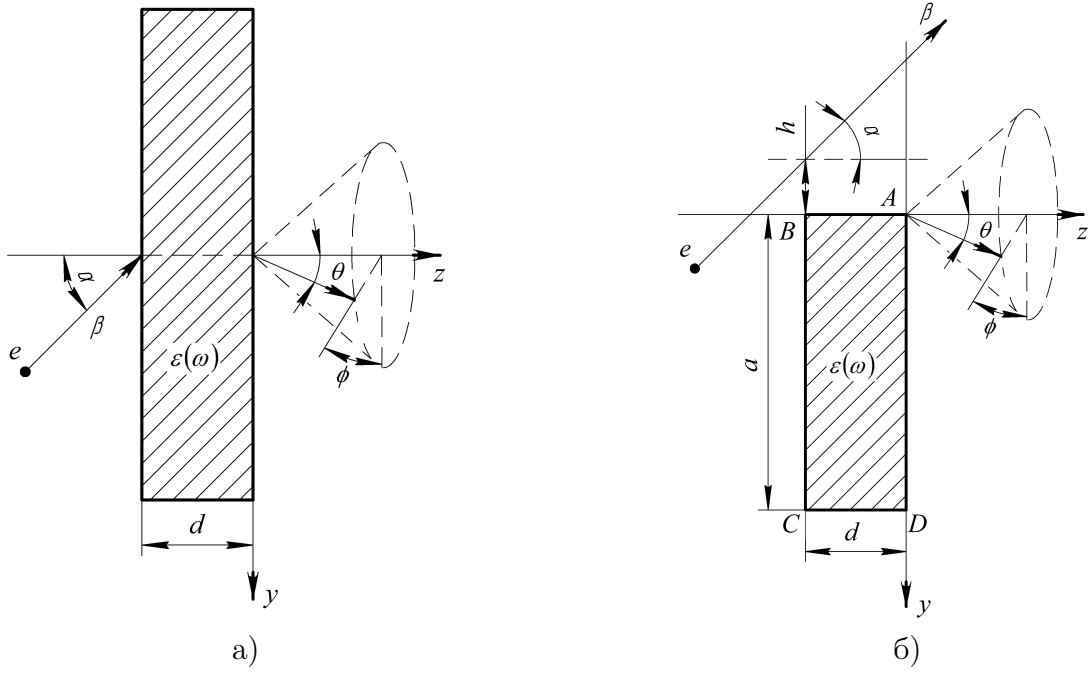


Рис. 4 – Схема генерации поляризационного излучения при наклонном пролёте заряженной частицы: а) сквозь безграничную диэлектрическую пластинку толщины d , б) вблизи экрана с размерами $\infty \times a \times d$.

по согласуются с результатами экспериментальных работ [9, 10] и позволяют описывать свойства излучения в любом диапазоне энергий частиц и частот излучения. Кроме того, разработанная модель генерации переходного излучения в условиях излучения Вавилова-Черенкова полностью согласуется с таковой, полученной в рамках метода изображений В.Е. Пафомова [11].

В разделе 4.3 приводится детальный анализ характеристик поляризационного излучения в рентгеновской области спектра. Исследование угловых распределений в совокупности со спектральными зависимостями поляризационного излучения позволило выявить наличие спектральной дисперсии рентгеновского черенковского излучения.

На основании анализа зависимостей интенсивности поляризационного излучения от продольного и поперечного размеров экрана на примере алюминиевой фольги в области L -края поглощения (см. рисунок 5) выявлено, что размеры поляризационного слоя вдоль направления движения частицы для дифракционного (DR) и черенковского (ChR) излучении определяются, соответственно, длиной формирования излучения:

$$d_{DR} = l_{coh} = \beta \lambda \left/ 2 \right| 1 - \beta \text{Re} \sqrt{\varepsilon(\omega)} \left|$$

и длиной его поглощения:

$$d_{ChR} = l_{abs} = \beta \lambda \text{Re} \sqrt{\varepsilon(\omega)} \left/ \left(4\pi \text{Im} \sqrt{\varepsilon(\omega)} \right) \right.$$

Поперечные размеры поляризационного слоя дифракционного излучения

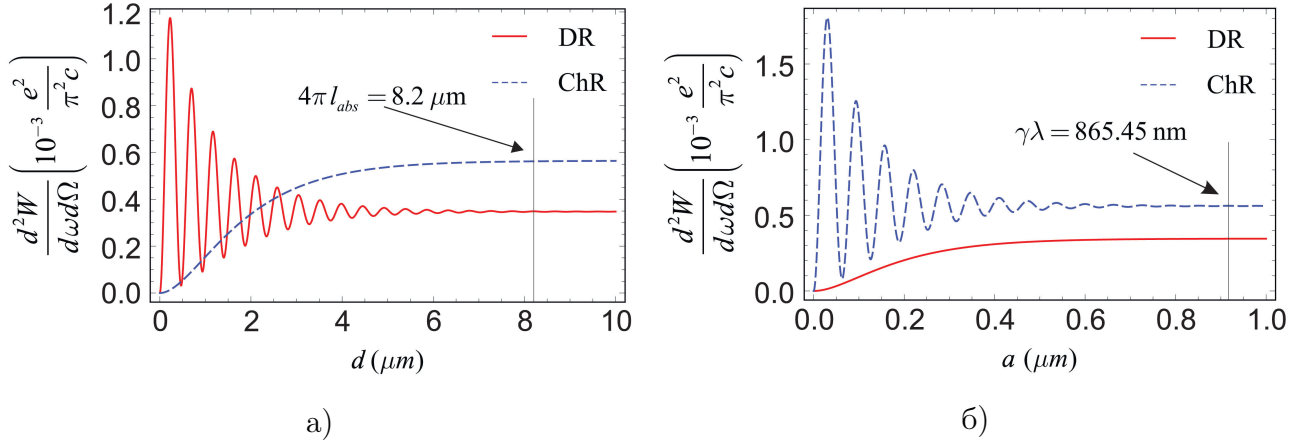


Рис. 5 – Зависимость интенсивности поляризационного излучения от: а) толщины пластинки, б) высоты пластинки.

ограничиваются эффективным радиусом затухания кулоновского поля частицы:

$$a_{DR} = \gamma\beta\lambda / (4\pi) ,$$

в то время как для черенковского излучения – глубиной когерентности излучения:

$$a_{ChR} = \frac{\beta\lambda}{2 \left(\beta \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon(\omega)} \sin \Theta_{Ch} \cos \phi + \gamma^{-1} \operatorname{Im} \sqrt{1 + (\gamma\beta \sin \Theta_{Ch} \sin \phi)^2 \varepsilon(\omega)} \right)}.$$

Полученные оценки для размеров поляризационного слоя полностью согласуются с предсказаниями микроскопической теории [8].

Применение метода Дж.Г. Стокса для определения поляризационных характеристик излучения в случае простейшей геометрии прямоугольной пластинки не только позволило получить уже известные в теории переходного [11] и дифракционного [8] излучений результаты, но и установить, что в самом общем случае наклонного пролёта заряженной частицы вблизи пластинки возникающее дифракционное и черенковское излучения будут иметь эллиптическую поляризацию.

В заключительном разделе 4.4 представлено обсуждение основных результатов главы.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию влияния собственного магнитного момента частицы на характеристики создаваемого ею поляризационного излучения. В частности, в разделе 5.1 на примере классической задачи переходного излучения, которое возникает при наклонном пролёте заряженной частицы через границу раздела двух сред (см. рисунок 6),

получено обобщение формализма В.Е. Пафомова [11], учитывающее наличие у частицы произвольно ориентированного собственного магнитного момента μ . Разработанная в данном разделе теоретическая модель полностью согласуется с результатами В.Л. Гинзбурга и В.Н. Цытовича [6] в частном случае перпендикулярного пролёта ($\psi = 0$) нейтральной частицы, обладающей продольно ориентированным магнитным моментом ($\mu = \mu_z$).

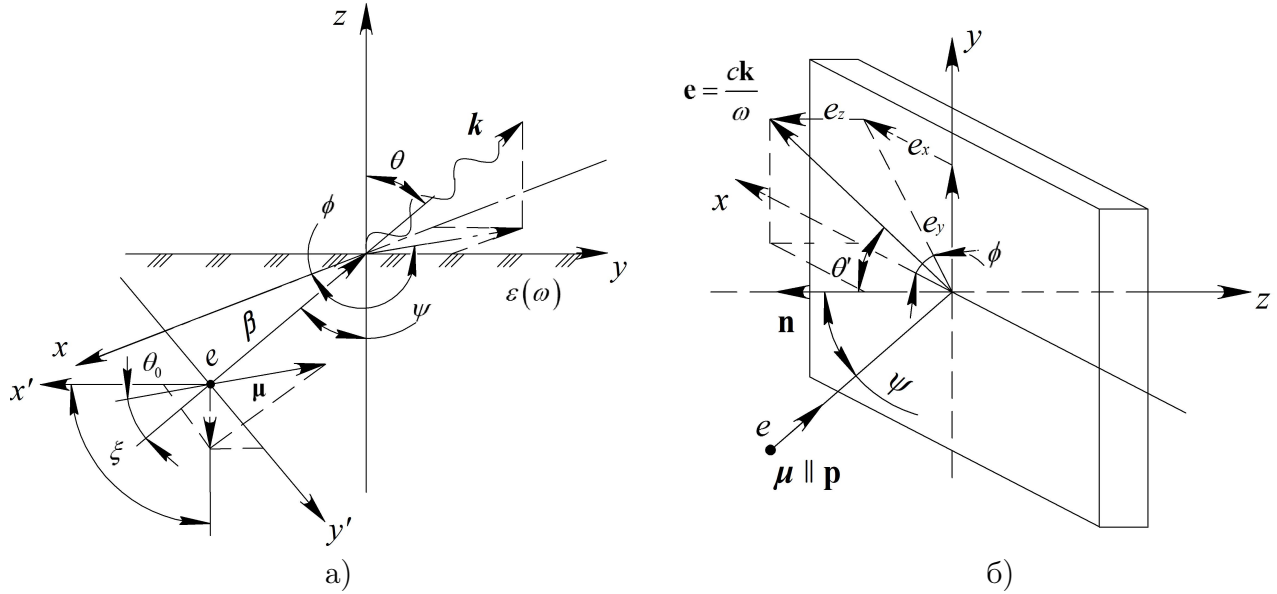


Рис. 6 – Схема генерации переходного излучения при наклонном падении электрона на мишень для: а) произвольно ориентированного вектора магнитного момента μ , б) продольно ориентированного магнитного момента.

Полученные в данном разделе результаты позволяют проанализировать влияние ориентации вектора магнитного момента на характеристики поляризационного излучения. В частности, показано, что при взаимодействии заряженной частицы, обладающей поперечно ориентированным относительно вектора скорости магнитным моментом ($\mu = \mu_x$), возникает интерференция полей излучения заряда и магнитного момента (гибридное излучение), также известное как $e\mu$ -излучение [12]. В отличие от переходного излучения собственного магнитного момента, интенсивность которого пропорциональна μ^2 , интенсивность гибридного излучения будет пропорциональна величине μ . По этой причине, наличие $e\mu$ -излучения приводит к асимметрии в угловом распределении переходного излучения (см. рисунок 7а), зависящей от соотношения энергии излучения и энергии покоя частицы $\mu_x F_x \propto \hbar\omega/m_e c^2$. Данный эффект позволяет использовать обратное переходное излучение для диагностики спиновых состояний пучков электронов (позитронов) умеренных энергий.

В разделе 5.2 приводится обобщение полученной ранее теоретической модели на случай наличия у заряженных частиц орбитального углового мо-

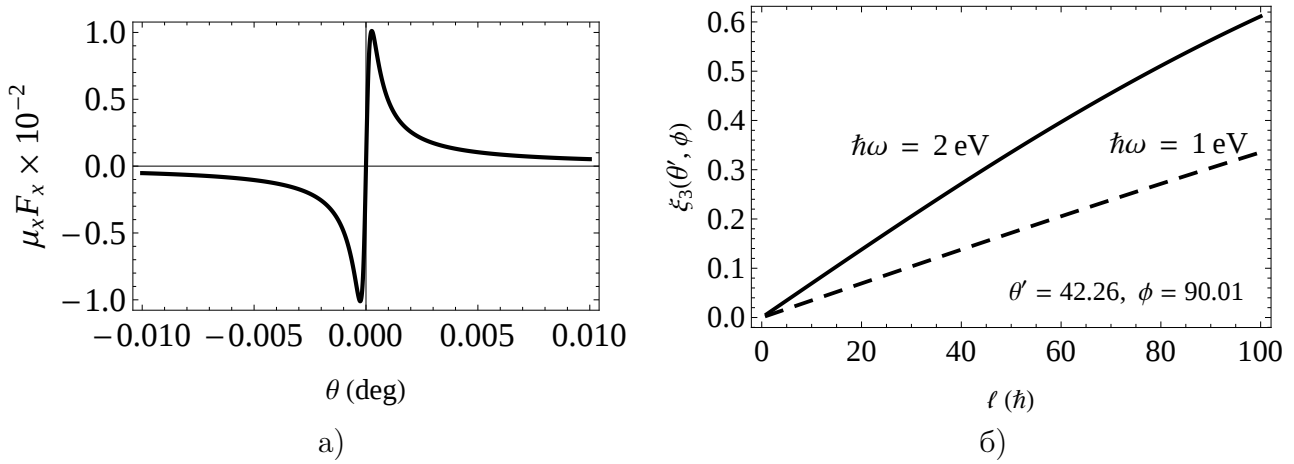


Рис. 7 – а) Угловая зависимость относительного вклада гибридного излучения в распределение переходного излучения системы «заряд + магнитный момент». б) Зависимость степени циркулярной поляризации (параметра Стокса ξ_3) от величины орбитального углового момента ℓ .

мента («закрученные» частицы [13]). Момент импульса таких частиц становится пропорциональным величине орбитального углового момента $\ell = \ell \mathbf{e}_p$ (где $\mathbf{e}_p$ – единичный вектор вдоль направления момента), что приводит к соответствующему возрастанию собственного магнитного момента частицы $\boldsymbol{\mu} = g\mu_B \boldsymbol{\ell}$ (где g – гиромагнитное отношение, μ_B – магнетон Бора). В этом случае переходное излучение «закрученных» электронов может рассматриваться в рамках классической электродинамики как излучение системы «заряд + магнитный момент», а вклад в излучение орбитального углового момента электрона – аналогично излучению ориентированного продольного магнитного момента (см. рисунок 6б). На основании представленного подхода установлено, что в области углов, соответствующих минимуму интенсивности переходного излучения, которое генерируется при наклонном пролёте нерелятивистских электронов через идеально проводящую мишень, за счёт наличия у последних орбитального углового момента возникает циркулярно поляризованная компонента излучения. Степень циркулярной поляризации (параметр Стокса ξ_3) переходного излучения нелинейно зависит от ℓ и в оптической области спектра достигает величины $\sim 70\%$ (см. рисунок 7б), что позволяет использовать рассмотренный эффект для независимого измерения величины орбитального углового момента «закрученных» электронов.

В заключительном разделе 5.3 проводится обсуждение полученных результатов.

В **приложении А** представлены основные следствия теории Р. Джонса и подхода Дж.Г. Стокса, необходимые для определения поляризационных характеристик излучения.

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Впервые проведено обобщение известных результатов исследований, посвящённых развитию метода поляризационных токов, что позволило выявить его фундаментальные ограничения и разработать новые подходы, которые позволили получить уже известные в теории переходного и дифракционного излучения результаты и описать поляризационные характеристики излучения для более сложных условий задачи. Для исследования характеристик поляризационного излучения во внешних полях разработан метод, который позволил получить точное решение задачи о генерации переходного излучения под воздействием внешнего электромагнитного поля в геометрии Гинзбурга-Франка и подтвердить основные результаты теории А.А. Рисбуда.
2. Полученные в работе аналитические модели для расчёта спектрально-угловых характеристик поляризационного излучения заряженных частиц при их взаимодействии с диэлектрическими мишенями различной конфигурации, учитывают влияние размеров мишени и диэлектрических свойств вещества на характеристики возникающего излучения. Созданные модели применимы в широком диапазоне длин волн (от рентгеновского до миллиметрового) и описывают процессы одновременной генерации нескольких типов поляризационного излучения, например, черенковского и дифракционного. Проведённые аналитические и численные расчёты по разработанным моделям в сравнении с результатами, полученными существующими методами, демонстрируют хорошее согласие. Выводы, полученные на основании представленных моделей, подтверждены экспериментально как для рентгеновского, так и для миллиметрового диапазонов длин волн.
3. В рамках развиваемого подхода теоретически установлено, что за генерацию поляризационного излучения ответственны токи, возникающие в приповерхностных слоях диэлектрических мишеней (если частица пролетает вблизи мишени), а также в слоях вещества, наиболее близко расположенных к траектории заряженной частицы (при движении частицы в веществе). Размеры эффективной области поляризации вещества мишени определяются 4 параметрами, характеризующими зону формирования излучения внутри мишени (длина и глубина когерентности) и область его затухания (длина поглощения и эффективный радиус затухания кулоновского поля). Выражения для указанных параметров, по-

лученные на основании метода поляризационных токов, полностью согласуются с результатами микроскопической теории.

4. Из решения системы уравнений Максвелла для поляризационного тока, возникающего в результате динамической поляризации среды полем заряженной частицы, установлено, что характеристики излучения Вавилова-Черенкова существенно зависят как от геометрии мишени, так и от условий пролёта заряженной частицы. В частности, направление распространения черенковского излучения в общем случае наклонного пролёта заряженной частицы вблизи диэлектрической мишени не подчиняется известному условию Вавилова-Черенкова, а определяется, главным образом, ориентацией излучающей грани относительно траектории частицы и зависит от её длины.
5. Применение разработанных моделей в мягком рентгеновском и ультрафиолетовом диапазоне частот позволили обобщить существующие теории рентгеновского черенковского излучения и установить новые закономерности во влиянии условий пролёта заряженных частиц и геометрических параметров мишени на характеристики поляризационного излучения. Детальный анализ свойств поляризационного излучения, возникающего в рентгеновском диапазоне частот, позволил установить, что излучение Вавилова-Черенкова может возникать за пределами краёв фотопоглощения вещества, и как следствие, будет обладать спектральной дисперсией.
6. Определены поляризационные характеристики черенковского излучения, возникающего при наклонном пролёте заряженной частицы вблизи диэлектрического экрана конечных размеров. Установлено, что излучение, возникающее в такой геометрии будет в самом общем случае обладать эллиптической поляризацией.
7. На основании обобщённого метода изображений в формализме В.Е. Пафомова установлено, что наличие собственного магнитного момента у заряженной частицы приводит к возникновению гибридного $e\mu$ -излучения в случае взаимодействия последней с непрозрачной средой при условии поперечной относительно импульса частицы ориентации магнитного момента. Смешанная компонента излучения, в свою очередь, является причиной появления асимметрии в угловом распределении переходного излучения, что может быть использовано для анализа спиновых состояний пучков заряженных частиц.
8. Впервые показано, что наличие орбитального углового момента у заряженных частиц приводит к изменению поляризационных свойств пере-

ходного излучения. В частности, при наклонном пролёте заряженных частиц, обладающих орбитальным угловым моментом, через идеально проводящую мишень возникает циркулярно поляризованная компонента переходного излучения, отсутствующая в переходном излучении заряда. Последняя может быть использована для определения величины орбитального углового момента пучков закрученных частиц.

Публикации автора по теме диссертации

- a. *Коньков, А.С.* Интерференция полей переходного излучения электрического заряда и магнитного момента / А.С. Коньков, А.П. Потылицын, В.А. Сердюцкий // *Изв. ВУЗов. Физика.* – 2011. – Т. 54, № 11. – С. 68 – 73.
- b. *Konkov, A.S.* X-ray Cherenkov Radiation as a Source for Relativistic Charged Particle Beam Diagnostics / A.S. Konkov, A.S. Gogolev, A.P. Potylitsyn, P.V. Karataev // *Proc. of IBIC 13.* – Oxford, UK: 2013. – Pp. 910 – 913.
- c. *Шевелёв, М.В.* Особенности генерации излучения Вавилова-Черенкова при пролёте заряженной частицы вблизи диэлектрической мишени / М.В. Шевелёв, А.С. Коньков // *ЖЭТФ.* – 2014. – Т. 145, № 4. – С. 579 – 590.
- d. *Konkov, A.S.* X-Ray Cherenkov Radiation as a Source for Transverse Size Diagnostics of Ultra-relativistic Electron Beams / A.S. Konkov, P.V. Karataev, A.P. Potylitsyn, A.S. Gogolev // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2014. – V. 517. – P. 012003.
- e. *Konkov, A.S.* Transition radiation of electrons with a nonzero orbital angular momentum / A.S. Konkov, A.P. Potylitsyn, M.S. Polonskaya // *JETP Lett.* – 2014. – V. 100, no. 7. – Pp. 421 – 425.
- f. *Bleko, V.V.* Coherent diffraction and Cherenkov radiation of relativistic electrons from a dielectric target in the millimeter wavelength range / V.V. Bleko, A.S. Konkov, V.V. Soboleva // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* – 2015. – V. 355. – Pp. 129 – 131.
- g. *Shevelev, M.* Soft-x-ray Cherenkov radiation generated by a charged particle moving near a finite-size screen / M. Shevelev, A. Konkov, A. Aryshev // *Phys. Rev. A.* – 2015. – V. 92. – P. 053851.

Список литературы

1. *Шерклифф, У.А.* Поляризованный свет. Получение и использование. – Москва: Изд. Мир, 1965.
2. *Risbud, A.A.* Effect of an alternating electric field on transition radiation // *J. Phys. A: Math. Gen.* – 1982. – Vol. 15, no. 2. – Pp. 701 – 707.
3. *Shevelev, M.* Experimental Research of the Diffraction and Vavilov-Cherenkov Radiation Generation in a Teflon Target / M. Shevelev, G. Naumenko, A. Potylitsyn, Yu. Popov // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2012. – Vol. 357. – P. 012020.
4. *Naumenko, G.* Polarization Radiation in a Teflon Target / G. Naumenko, A. Potylitsyn, M. Shevelev et al. // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2014. – Vol. 517. – P. 012004.
5. *Henke, B.L.* X-ray interaction: photoabsorption, scattering, transmission and reflection at $E = 50 - 30,000$ eV, $Z = 1 - 92$ / B.L. Henke, E.M. Gullikson, J.C. Davis // *At. Data Nucl. Tables* – 1993. – Vol. 54. – Pp. 181 – 342.
6. *Гинзбург, В.Л.* Переходное излучение и переходное рассеяние / В.Л. Гинзбург, В.Н. Цытович. – Москва: Изд. Наука, 1984.
7. *Базылев, В.А.* Генерация интенсивного электромагнитного излучения релятивистскими частицами / В.А. Базылев, Н.К. Жеваго // *УФН.* – 1982. – Т. 137, №. 8. – С. 605 – 662.
8. *Потылицын, А.П.* Дифракционное излучение релятивистских частиц / А.П. Потылицын, М.И. Рязанов, М.Н. Стриханов, А.А. Тищенко. – Томск: Изд. Томского политехнического университета, 2008.
9. *Knulst, W.* High-brightness, narrowband, and compact soft X-ray Cherenkov sources in the water window / W. Knulst, M.J. van der Wiel, O.J. Luiten, J. Verhoeven // *Appl. Phys. Lett.* – 2003. – Vol. 83, no. 19. – Pp. 4050 – 4052.
10. *Bleko, V.V.* Coherent diffraction and Cherenkov radiation of relativistic electrons from a dielectric target in the millimeter wavelength range / V.V. Bleko, A.S. Konkov, V.V. Soboleva // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* – 2015. – V. 355. – Pp. 129 – 131.
11. *Пафомов, В.Е.* Излучение заряженной частицы при наличии границ раздела // *Труды ФИАН.* – 1969. – Т. XLIV. – С. 28 – 167.
12. *Багров, В.Г.* Теория излучения релятивистских частиц / В.Г. Багров, Г.С. Бисноватый-Коган, В.А. Бордовицын и др.; Под ред. В.А. Бордовицын. – Москва: Изд. Физматлит, 2002.
13. *Bliokh, K.Yu.* Semiclassical Dynamics of Electron Wave Packet States with Phase Vortices / K.Yu. Bliokh, Yu.P. Bliokh, S. Savel'ev, F. Nori // *Phys. Rev. Lett.* – 2007. – Vol. 99. – P. 190404.