

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Б.И. СТЕПАНОВА  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

На правах рукописи  
УДК 537.87, 535.34, 537.5

**АНИЩЕНКО**  
Сергей Владимирович

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ФЛУКТУАЦИИ  
КООПЕРАТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ,  
ГЕНЕРИРУЕМОГО РЕЛЯТИВИСТСКИМИ  
СИЛЬНОТОЧНЫМИ ПУЧКАМИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Минск 2019

Работа выполнена в НИУ “Институт ядерных проблем” Белорусского государственного университета

Научный руководитель: **Барышевский Владимир Григорьевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник лаборатории сильно-  
точной электроники НИУ “Институт ядерных про-  
блем” Белорусского государственного университе-  
та

Официальные оппоненты: **Феранчук Илья Давыдович**,  
доктор физико-математических наук, профес-  
сор, профессор кафедры теоретической физики  
и астрофизики физического факультета Белорус-  
ского государственного университета

**Усаченок Максим Сергеевич**,  
кандидат физико-математических наук, научный  
сотрудник Института физики им. Б. И. Степанова  
НАН Беларуси

Оппонирующая организация: ГНУ “Объединенный институт энергетических  
и ядерных исследований — Сосны” НАН Бела-  
руси

Защита состоится 7 октября 2019 г. в 16:00 часов на заседании совета по  
защите диссертаций Д 01.05.02 при Институте физики им. Б. И. Степано-  
ва НАН Беларуси по адресу: 220072, Минск, пр. Независимости, 68-2, тел.  
+375 17 2841559, e-mail: vyblyi@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке  
имени Я. Колоса Национальной академии наук Беларуси

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций, кандидат  
физико-математических наук

Вывблы Ю.П.

## ВВЕДЕНИЕ

Обусловленное потребностями ядерной физики и физики высоких плотностей энергии развитие методов ускорения заряженных частиц позволило приступить в 70-х годах XX века к разработке теории и проведению экспериментов по генерации мощных импульсов когерентного электромагнитного излучения с помощью сильноточных электронных пучков. Исследования, начатые с создания микроволновых черенковских генераторов и инфракрасных лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), привели к созданию первых работающих в рентгеновском диапазоне ЛСЭ и комптоновских источников гамма-излучения. Поскольку наиболее быстро развивающимся направлением физики высоких плотностей энергии является изучение нелинейных быстропротекающих явлений, лежащих в фемтосекундном и аттосекундном диапазонах, основной упор при создании ЛСЭ делается на укорочение длительности импульсов, увеличение интенсивности излучения, уменьшение статистических флуктуаций в фотонных пучках.

Увеличение интенсивности излучения позволяет изучать поведение вещества в экстремальных условиях. При этом наиболее актуальным в настоящее время является повышение интенсивности в рентгеновском и терагерцовом диапазонах, поскольку для них отсутствуют мощные лазерные системы, основанные на связанно-связанных переходах в активной среде генератора. Основная надежда в указанной области возлагается на ЛСЭ. Обратим внимание, что хотя с их помощью уже получены фемтосекундные импульсы когерентного рентгеновского излучения гигаваттной мощности, для исследования многих нелинейных явлений эту величину следует повысить еще на два порядка.

Укорочение длительности импульсов является важнейшим требованием, улучшающим временное разрешение детектирующих систем. Совсем недавно благодаря развитию техники генерации ультракоротких импульсов в опытах, посвященных изучению корреляций в фотоэмиссии электронов атомами гелия, была достигнута субаттосекундная точность измерений. Следует отметить, что временное разрешение зависит не только от длительности электромагнитного импульса. Оно определяется также статистическими флуктуациями времени прихода импульса и отношением сигнала к шуму. Таким образом, можно подытожить: наиболее востребованным направлением исследования в области получения электромагнитных импульсов с помощью релятивистских электронных пучков является разработка мощных терагерцовых и рентгеновских ЛСЭ с высокой частотой следования импульсов и низким уровнем флуктуаций.

Наряду с генерацией ультракоротких импульсов электромагнитного из-

лучения важнейшей задачей является разработка методов управления фотонными пучками с помощью естественных и искусственных сред, примерами которых являются естественные и искусственные кристаллы. Хорошо известно, что вследствие дифракции электромагнитных волн волновой пакет, отраженный от кристаллографических плоскостей, имеет сложную временную структуру. Более того, как показали исследования последних лет, похожие по своим временным характеристикам импульсы могут быть получены с помощью спонтанного параметрического (квазичеренковского) излучения, генерируемого заряженными частицами в кристаллах, причем временными параметрами импульсов можно управлять поворотом кристалла. Таким образом, генерация излучения и управление им могут происходить синхронно в одном и том же объеме, что существенно упрощает находящиеся все большее применение схемы экспериментов с двумя импульсами, разделенными контролируемым временным интервалом.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с крупными научными программами, темами**

Исследования, результаты которых вошли в диссертацию, проводились в Научно-исследовательском учреждении “Институт ядерных проблем” Белорусского Государственного Университета в рамках следующих программ:

- ГПНИ “Конвергенция”, подпрограмма “Физика фундаментальных взаимодействий и плазма”, задание 2.3.02, № гос. рег. 20111382, 2011–2013 гг.
- ГПНИ “Конвергенция”, подпрограмма “Физика фундаментальных взаимодействий и плазма”, задание 2.3.05, № гос. рег. 20140532, 2014–2015 гг.
- ГПНИ “Конвергенция 2020”, подпрограмма “Физика фундаментальных взаимодействий и плазма”, задание 2.3.03, № гос. рег. 20162275, 2016–2020 гг.

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований, в частности, пункту 12.2 “Физика фундаментальных взаимодействий, высоких энергий и экстремальных состояний вещества, плазма и ее применение, плазменно-пучковые технологии” перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных

научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы, утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь 19.04.2010 № 585, а также пункту 12 (“Междисциплинарные исследования”) перечня приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190. Диссертация соответствует пункту 8 “Прохождение частиц и ядер через вещество. Ядерная оптика” паспорта специальности 01.04.2016 “Физика атомного ядра и элементарных частиц”.

## Цели и задачи исследования

*Цель диссертационной работы:* Целью диссертационной работы является исследование влияния статистических флуктуаций на электромагнитное излучение, генерируемое релятивистскими электронными пучками.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие *основные задачи*:

1. Исследовать динамику релятивистского электронного пучка в сильноточном диоде.
2. Построить теорию переходного излучения, образуемого сильноточными электронными пучками, состоящими из отдельных порций электронов – эктонов.
3. Исследовать статистические флуктуации кооперативного излучения, генерируемого ансамблем неизохронных электронов-осцилляторов, взаимодействующих друг с другом посредством поля излучения.
4. Исследовать применимость кинематического приближения для описания импульсов параметрического рентгеновского излучения в кристаллах.

*Объектом* исследования является кооперативное излучение, генерируемое релятивистскими электронными пучками.

*Предметом* исследования являются статистические флуктуации в электромагнитном излучении и сильноточных электронных потоках.

## Научная новизна

Все основные научные результаты, представленные в диссертации, получены впервые. В диссертации на основе разработанной теории статистических флуктуаций кооперативного излучения впервые найдена функция распределения времени развития неустойчивости в квазичеренковских генераторах и

ансамбле неизохронных электронов-осцилляторов, взаимодействующих друг с другом посредством поля излучения. В работе впервые проведены расчеты статистического разброса времени автофазировки при типичных параметрах современных ускорителей электронов. В диссертации впервые описано явление электростатической кумуляции сильноточных электронных пучков, получившее экспериментальное подтверждение. Представленные результаты исследования актуальны в связи с исследованиями по разработке мощных источников излучения в различных частотных диапазонах.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Эффект электростатической кумуляции в сильноточном диоде, обусловленный электростатическим расталкиванием электронов, испущенных с внутренней кромки катода.
2. Теория переходного излучения сильноточных электронных пучков, состоящих из эктонов.
3. Функция распределения для времени автофазировки ансамбля неизохронных электронов-осцилляторов, определяемая числом частиц и уровнем предварительной модуляции частиц по положениям и скоростям.
4. Теория эволюции параметрического рентгеновского излучения, основанная на динамической теории дифракции, описывает процессы, которые не могут быть описаны в рамках оцееупотребительного кинематического приближения.

## **Личный вклад соискателя**

Все основные результаты диссертационной работы, получены автором самостоятельно. Определение темы и целей диссертационной работы, выбор методов исследования, анализ и обобщение полученных результатов проведены совместно с научным руководителем, доктором физ.-мат. наук, профессором Барышевским В. Г. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками излагаемых в диссертационной работе результатов.

Идея о существовании эффекта электростатической кумуляции была сформулирована в совместных дискуссиях с А. А. Гуринович. Приведенные в диссертационной работе экспериментальные данные, подтверждающие эффект электростатической кумуляции, были получены в Институте ядерных

проблем. В составлении задания на эксперимент и анализе экспериментальных данных автор диссертационной работы принимал непосредственное участие.

## Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертации представлялись на международных конференциях:

1. “Современные проблемы физики”, Минск, Беларусь, 9–11 июня 2010.
2. “Fundamental and Applied Nanoelectromagnetics” (FANEM’12), Минск, Беларусь, 22–25 мая 2012.
3. “4th Euro-Asian Pulsed Power Conference” (EAPPC 2012), Карлсруе, Германия, 30 сентября – 4 октября 2012.
4. “5th International Conference Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena” (Channeling 2012), Альгеро, Италия, 23–28 сентября 2012.
5. “7th International conference on Plasma Physics and Plasma Technology” (PPPT’7), Минск, Беларусь, 17–21 сентября 2012.
6. “Mathematical Modeling in Physical Sciences” (IC-MSQUARE 2013), Прага, Чехия, 1–5 сентября 2013.
7. “5th Euro-Asian Pulsed Power Conference” (EAPPC 2014), Кумамото, Япония, 8–12 сентября 2014.
8. “6th International Conference Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena” (Channeling 2014), Капри, Италия, 5–10 октября 2014.
9. “Nonlinear Phenomena in Complex Systems” (NPCS’15), Минск, Беларусь, 19–22 мая 2015.
10. “Nonlinear Phenomena in Complex Systems” (NPCS’16), Минск, Беларусь, 24–27 мая 2016.
11. “7th International Conference Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena” (Channeling 2016), Сирмионе-Дезенцано дель Града, Италия, 25–30 сентября 2016.
12. “6th Euro-Asian Pulsed Power Conference” (EAPPC 2016), Кашкайш, Португалия, 18–22 сентября 2016.
13. “9th International Conference on Plasma Physics and Plasma Technology” (PPPT’9), Минск, Беларусь, 17–21 сентября 2018.

## Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 20 научных работах, из которых 11 – статьи в научных изданиях, соответствующих п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 6,8 авторских листа), 5 – статьи в сборниках материалов конференций, 1 – статьи в сборниках, 3 – тезисы докладов конференций.

## Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложения. Полный объем диссертации составляет 108 страниц; работа содержит 27 рисунков на 20 страницах. Библиографический список состоит из 220 наименования, включая публикации автора.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В **первой главе** приводится обзор литературы по теме диссертации и дается краткое описание исследуемых явлений и используемых методов. Обосновывается актуальность выбранного направления исследований, связанного с генерацией кооперативного излучения сгустками релятивистских заряженных частиц и с возможностью создания мощных источников электромагнитного излучения на базе указанного явления.

Во **второй главе** речь идет о явлении электростатической кумуляции, представляющем собой новый способ получения плотных электронных пучков. Электростатическая кумуляция имеет место в релятивистских вакуумных диодах с катодом, обладающим отверстием по центру. Материалы, представленные в данной главе, основаны на результатах работ [1,2,3].

Работа релятивистского вакуумного диода начинается со взрывной электронной эмиссии. Наиболее интенсивно взрывная электронная эмиссия идет из выпуклых участков катода, в частности, с его внутренней кромки (рисунок 1). Из-за кулоновского отталкивания заряженные частицы устремляются в область, не занятую пучком. В результате на ускоренное в направлении анода движение электронов накладывается перемещение в радиальном направлении к оси симметрии системы. Как следствие, на оси релятивистского



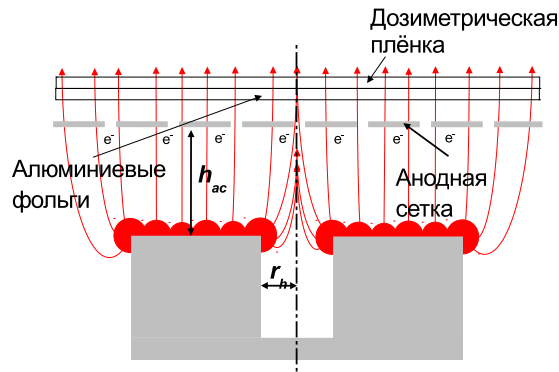


Рисунок 1. – Электростатическая кумуляция

вакуумного диода плотность сильноточного пучка возрастает во много раз по сравнению со средней плотностью тока в межэлектродном зазоре.

На рисунке 2 представлен отпечаток электронного пучка на аноде, полученный в ходе численного моделирования с помощью разработанной программы. При численном расчете радиус катода был положен равным 3,0 см, катод-анодный зазор – 2,0 см, радиус внутреннего отверстия – 1,0 см. Максимальное значение импульса ускоряющего напряжения было положено равным 360 кВ. Моделирование показало, что плотность тока в области центрального пятна на аноде в момент, соответствующий максимуму ускоряющего напряжения, достигает значения  $1,0 \text{ кА/см}^2$ , что приблизительно в 5 раз превышает среднюю плотность тока в сильноточном диоде. Таким образом, на оси сильноточного диода с обладающим отверстием по центру катодом происходит кумуляция электронного пучка.

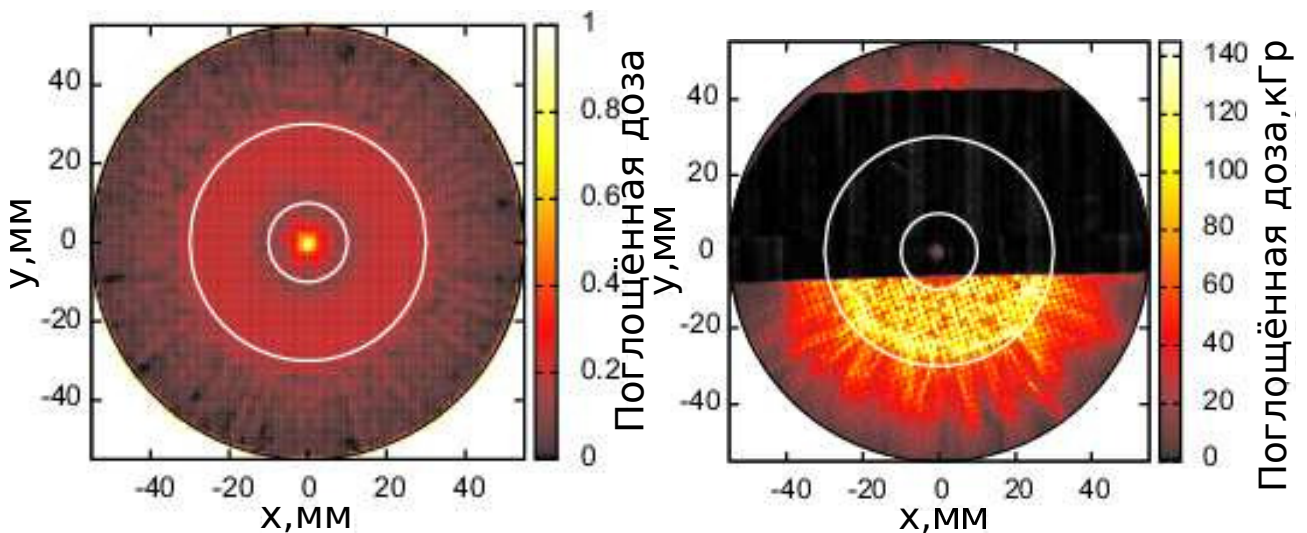


Рисунок 2. – Отпечаток электронного пучка (слева изображены результаты моделирования, справа – эксперимента)

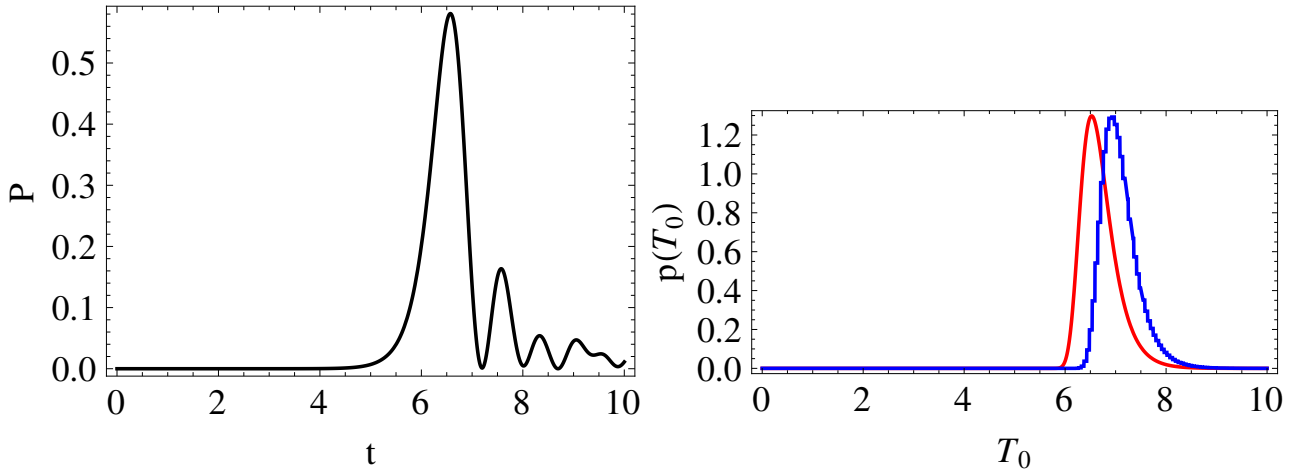
Достоинством описанного механизма кумуляции по сравнению с традиционным, основанным на сжатии сильноточного пучка собственным магнитным полем, является крайне низкий разброс частиц по энергиям в области максимальной плотности тока. В условиях стационарного течения разброс частиц по энергиям определяется температурой взрывоэмиссионной плазмы, составляющей по порядку величины несколько электрон-вольт, деленных на постоянную Больцмана. Обратим внимание, что в условиях самосжатия пучка собственным магнитным полем течение потока становится существенно турбулентным и заряженные частицы приобретают значительный разброс по энергии.

Методика получения отпечатков пучка такова. После облучения (экспонирования) дозиметрической пленки электронным пучком она сканировалась (на просвет) с предварительно наложенным светофильтром сканером EPSON Perfection V100 Photo. По отсканированным отпечаткам и результатам калибровки однозначно восстанавливалось распределение поглощенной дозы по сечению электронного пучка.

Первые эксперименты [2] показали, что поток заряженных частиц на оси настолько интенсивный, что он прожигает пленку насквозь. Чтобы уменьшить радиационную нагрузку на дозиметрическую пленку, перед ней были помещены алюминиевые фольги толщиной 70 мкм каждая. Помимо снижения энергии частиц указанная процедура позволяет полностью отсечь как поток слаборелятивистских электронов, образующихся на спаде импульса напряжения, так и поток катодной плазмы. Эксперименты, проведенные с одной, двумя и тремя фольгами, показали, что резкое увеличение поглощенной дозы по центру сохраняется. Значит, поток частиц образован высокоэнергетичными электронами. В эксперименте с тремя фольгами, отсекающими все электроны с энергией меньше 250 кэВ, поглощенная доза в центре приблизительно в четыре раза превысила среднюю дозу по сечению пучка, что находится в качественном согласии с результатами численного моделирования. Обратим внимание, что согласно моделированию в области максимальной интенсивности пучка, ток электронов, проходящий через площадь менее  $0,01 \text{ см}^2$ , равен  $\sim 10 \text{ А}$ .

**Третья глава** посвящена излучению электромагнитных волн сильноточным электронным пучком [4]. Электронные пучки в сильноточных вакуумных диодах генерируются в процессе взрывной электронной эмиссии, открытой Г.А. Месяцем. В процессе взрывной электронной эмиссии электроны покидают поверхность катода отдельными порциями – эктонами. Характерное время существования эктона составляет  $\sim 1 \text{ нс}$ .

В третьей главе построена теория переходного излучения сильноточных



**Рисунок 3. – Кооперативное излучение неизохронных электронов-осцилляторов (слева изображен импульс кооперативного излучения, справа – функция распределения времени автофазировки, красная кривая соответствует формуле (1), синяя – численным расчетам,  $\tau = 1$ )**

электронных пучков с учетом многократного рассеяния и ионизационных потерь энергии. Продемонстрировано, что продольная неоднородность сильно-точного пучка, обусловленная его эктонной структурой, приводит к существенной модификации спектра спонтанного излучения. Показано, что многократное рассеяние и ионизационные потери энергии приводят к обрезанию спектра переходного излучения в области высоких частот.

В рамках построенной модели рассчитана мощность переходного излучения, генерируемого эктонами при пересечении ими анодной сетки релятивистского вакуумного диода. При этом оказалось, что средняя мощность излучения, состоящего из отдельных когерентных импульсов, в диапазоне от 100 до 200 МГц составляет 75 кВт для 1 кА пучка электронов, ускоренных в потенциале 0,5 МВ. Кроме того, произведена оценка мощности когерентного излучения всего пучка длительностью 80 нс в частотном диапазоне 1–10 МГц. По порядку величины мощность оказалась равной 50 кВт.

**Четвертая глава** посвящена исследованию влияния дробового шума, обусловленного разбросом заряженных частиц по положениям и скоростям, на генерацию кооперативного излучения в условиях предварительной модуляции электронного пучка. При этом рассмотрение проводится на примере двух систем: ансамбля неизохронных электронов-осцилляторов, взаимодействующих друг с другом посредством собственного поля излучения [5,6,7], и релятивистского электронного пучка, распространение которого в периодической структуре приводит к генерации квазичеренковского (параметрического рентгеновского) сверхизлучения [8]. Кроме того, в главе рассмотрен вопрос о влиянии тепловых флуктуаций электромагнитного поля на начальную ста-

дию процесса генерации кооперативного излучения [9].

Для системы неизохронных электронов-осцилляторов была получена функция распределения для времени автофазировки  $T_0$ , за которое мощность кооперативного излучения достигает максимального значения:

$$g(T_0) = \frac{N_e}{\tau} I_0(2N_e \sqrt{\alpha e^{-T_0/\tau}}) \exp(-N_e e^{-T_0/\tau} - N_e \alpha) e^{-T_0/\tau}. \quad (1)$$

Здесь  $N_e$  – число частиц в ансамбле,  $1/2\tau$  – инкремент кооперативной неустойчивости,  $\alpha = J_1^2(\delta_\phi) \approx \delta_\phi^2/4$ , а  $I_0$  – модифицированная функция Бесселя,  $\delta_\phi$  – параметр предмодуляции. На рисунке 3 представлен график функций распределения  $g(T_0)$  при  $\delta_\phi = 0$ .

С помощью функции распределения  $g(T_0)$  может быть найдено относительное среднеквадратичное отклонение  $\delta_T$ :

$$\delta_T = \frac{\sqrt{\pi^2/6 - e^{-2N_e\alpha} L_{(1,0)}^2(-1, N_e\alpha) + e^{-N_e\alpha} L_{(2,0)}(-1, N_e\alpha)}}{e^{N_e\alpha}(\gamma_e + \ln N_e) + L_{(1,0)}(-1, N_e\alpha)}. \quad (2)$$

Здесь  $\gamma_e = 0,577$  – константа Эйлера.

При превышении числом частиц определенного значения, зависящего, вообще говоря, от степени предварительной модуляции, логарифмическая зависимость относительного среднеквадратичного отклонения времени автофазировки  $\delta_T$  от  $N_e$ :  $\delta_T \approx \frac{\pi}{\sqrt{6(\gamma_e + \ln N_e)}}$ , сменяется корневой:  $\delta_T \approx \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{N_e \alpha \ln(1/\alpha)}}$ . Как следует из (2), значение величины  $\delta_T \sqrt{N_e} \approx 7,67$  при  $\delta_\phi = 0,05$  хорошо согласуется с результатами численного моделирования кооперативной неустойчивости [5,6,7]. В отсутствие предварительной модуляции величина  $\delta_T \ln N_e \approx 1,2$  при  $N_e = 10^4$ – $10^6$ , найденная по формуле (2), менее чем на 10% отличается от полученной в ходе численных расчетов.

Обратим внимание на одно важное обстоятельство. Длительность импульса кооперативного излучения неизохронных электронов-осцилляторов составляет величину  $\sim \tau$ , которая приблизительно в  $\ln N_e$  раз меньше времени развития неустойчивости  $T$ . Поэтому характерное среднеквадратичное отклонение времени развития неустойчивости в отсутствие предварительной модуляции по порядку величины совпадает с длительностью импульса излучения. Таким образом, предварительная модуляция частиц по фазам приводит к значительному снижению разброса времени автофазировки.

Значения  $\delta_T$ , полученные как при наличии, так и в отсутствие предварительной модуляции, с высокой степенью точности совпадают с аналогичными величинами, рассчитанными для черенковского сверхизлучения [8]. Рассчитанная с помощью (2) величина  $\delta_T \sqrt{N_e}$  оказалась равной 7,67 при  $\delta_\phi = 0,05$ ,

что коррелирует со значением  $\delta_T \sqrt{N_e} \approx 7,5$ , полученным в результате моделирования черенковского сверхизлучения. Данное обстоятельство указывает на общую физическую природу процесса развития неустойчивости, несмотря на существенную разницу между рассматриваемыми системами.

Экстраполируя полученную зависимость  $\delta_T(N_e)$  в область больших значений числа частиц  $N_e = 10^9 - 10^{12}$  (характерное число электронов в короткоимпульсных генераторах), получим в качестве оценки:  $\delta_T \approx 1.4 / \ln(N_e) = 0,05 - 0,07$ . Из этого можно сделать вывод, что дробовой шум приводит к 5–7% флуктуациям времени развития неустойчивости при незначительных флуктуациях пиковой мощности излучения. Обратим внимание, что предмодуляция пучка  $\delta_\phi \gg 1/\sqrt{N_e}$ , практически не сказывающаяся на  $\delta_P$ , приводит к существенному снижению флуктуаций времени развития неустойчивости.

Как было отмечено, сужение функции распределения имеет важное значение при когерентном сложении колебаний от нескольких источников. Сложение в фазе возможно, лишь если произведение частоты генерации  $\Omega$  на среднеквадратичное отклонение  $\Delta T$ , уменьшающееся с ростом числа частиц, оказывается много меньше  $\pi$ .

До сих пор остается невыясненным вопрос о влиянии тепловых флуктуаций электромагнитного поля на процесс генерации кооперативного излучения ансамблем частиц. Хорошо известно, что тепловые флуктуации становятся существенными, если  $kT \geq \hbar\omega$ . Фактически, при  $kT \gg \hbar\omega$  генерация начинается не со спонтанного излучения, а с излучения, индуцированного тепловыми квантами.

В работе [9] в нулевом порядке экспоненциальной теории возмущений Магнуса было найдено выражение для среднего числа фотонов  $N$ , испущенных системой двухуровневых атомов в присутствии тепловых флуктуаций электромагнитного поля на начальной стадии генерации:

$$N = \frac{1}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1} \cosh^2(\sqrt{2\kappa^* \kappa r t}) + \sinh^2(\sqrt{2\kappa^* \kappa r t}), \quad (3)$$

где  $r$  – половина числа атомов,  $\kappa$  – коэффициент связи между атомной подсистемой и полем излучения.

Из формулы (3) следует, что тепловые флуктуации электромагнитного поля оказывают существенное влияние на начальную стадию генерации сверхизлучения Дике. Если  $kT \gg \hbar\omega$ , то генерация начинается не со спонтанного излучения, а с излучения, индуцированного тепловыми квантами. Если  $kT \ll \hbar\omega$ , то (3) переходит в формулу, полученную в работе [Bonifacio, R. Coherent spontaneous emission / R. Bonifacio, G. Preparata // Phys. Rev. A. –1970. –Vol. 2. –P. 336–347].

Построенная в [9] теория тепловых флуктуаций носит достаточно общий характер. Поэтому она может быть использована не только для расчета излучения, испускаемого двухуровневыми атомами, но и для расчета излучения, испускаемого свободными заряженными частицами в черенковских генераторах и лазерах на свободных электронах.

Установки, позволяющие генерировать два последовательных импульса, являются наиболее востребованными при изучении быстропротекающих явлений. Важнейшей задачей в этом типе экспериментов является контроль времени задержки между двумя импульсами. Достоинством рассмотренной в **пятой главе** двухимпульсной генерации, основанной на спонтанном параметрическом излучении, служит полный контроль времени задержки, определяемого только временем пролета заряженных частиц через кристалл [10,11].

В качестве примера рассмотрим параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ) в кристалле LiF толщиной 1 мм, облучаемого электронами с энергией 10 ГэВ, типичной для современных линейных резонансных ускорителей (рисунок 4). Можно заметить, что длительность ПРИ, излучаемого под большими углами к направлению движения частицы, совпадает с длительностью излучения отраженного волнового пакета (рисунок 5), впервые рассмотренного в [Baryshevsky, V.G. Chirped pulse distortion in a volume reflection grating / V.G. Baryshevsky, S.A. Maksimenko // Opt. Commun. – 1994. – Vol. 110. – P. 401–409]. Следует отметить, что временной интервал между двумя пиками, который определяется геометрией системы, приблизительно вдвое больше времени пролета электронов через кристалл. Полная длительность рентгеновского импульса не превышает 10 пикосекунд.

Интенсивность ПРИ, рассчитанную для обратной геометрии ( $\beta_1 = -1$ ,  $|\gamma_0| = 1$ ) с помощью кинематического приближения можно записать следующим образом:

$$\frac{I}{\hbar\omega_B} = \frac{\omega_B e^2}{2\pi \hbar c} |\chi_\tau|^2 \frac{\theta^2}{(\theta^2 + 1/\gamma^2)^2} (\Theta(t) - \Theta(t - 2t_x)), \quad (4)$$

где  $\chi_\tau$  – диэлектрическая восприимчивость,  $\Theta$  – функция Хевисайда,  $\gamma$  – лоренц-фактор,  $\omega_B$  – брэгговская частота,  $t_x$  – время пролета заряженной частицы через кристалл.

Согласно (4), импульсы излучения должны были бы иметь прямоугольную форму, что существенно отличается от полученной в рамках теории динамической дифракции (см. рисунок 5). Указанное отличие прежде всего связано с дисперсионными свойствами кристалла, которые могут быть воспроизведены лишь в рамках теории, учитывающую динамическую дифракцию.

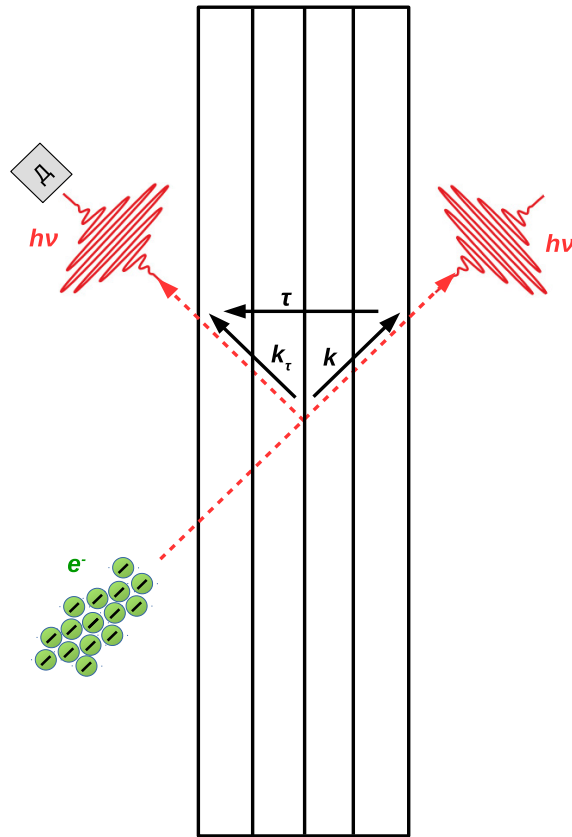


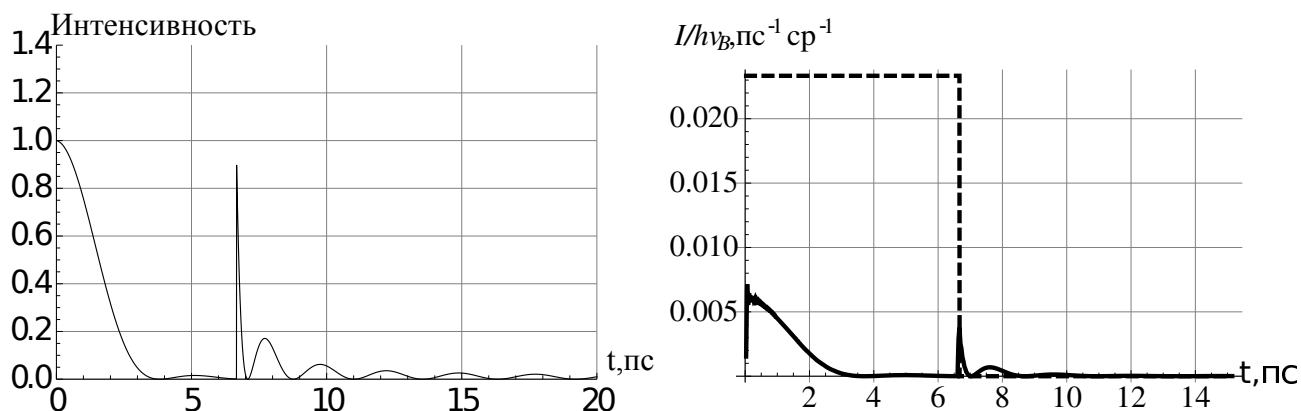
Рисунок 4. – Параметрическое рентгеновское излучение (геометрия Брэгга)

Именно в рамках теории дифракции можно получить правильную добавку к показателю преломления фотонов. Эффект этот непертурбативный и в рамках кинематического приближения не может быть получен. Несмотря на то, что поправки, вносимые динамической дифракцией, малы, они коренным образом меняют интерференционную картину электромагнитных полей при толщине кристалла, превышающей длину экстинкции.

Для качественного понимания формы импульса параметрического излучения представим приближенно электромагнитное поле электрона, падающего на кристалл, в виде совокупности псевдофотонов, свойства которых напоминают свойства настоящих квантов электромагнитного поля. С рассматриваемой точки зрения взаимодействие заряженной частицы с кристаллом эквивалентно дифракции пучка псевдофотонов на кристалле.

Поскольку при дифракции пучка квантов на кристалле они распространяются как вдоль своего движения, так и в направлениях, определяемых векторами обратной решетки  $\vec{\tau}$ , дифракция псевдофотонов должна сопровождаться излучением как под малыми, так и под большими углами к скорости электрона. Данное угловое распределение является одной из отличительных черт параметрического излучения, которая позволяет его отделить от излу-

чения других типов, испускаемого под малыми углами ( $\sim 1/\gamma$ ) к скорости частицы  $\vec{v}$ .



**Рисунок 5.** – Рентгеновское излучение в направлении дифракционного максимума. Слева изображен отраженный от кристалла волновой пакет, справа – импульс параметрического излучения в том же направлении (сплошная линия соответствует динамической теории дифракции, пунктирная – кинематической теории дифракции)

Отражение волнового пакета в геометрии Брэгга осуществляется в узком спектральном интервале  $\Delta\omega/\omega_B \sim \chi_T$ . В соответствии с рисунком 5, на котором изображена эволюция во времени отраженного от кристалла волнового пакета в геометрии Брэгга, параметрическое рентгеновское излучение, испускаемое под большими углами к скорости частицы, должно состоять из двух импульсов, разделенных между собой удвоенным временем пролета частицы через кристалл.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Теоретически предсказано новое физическое явление – электростатическая кумуляция сильноточного электронного пучка. В численном моделировании при напряжении 360 кВ зафиксирована плотность тока 1 кА/см<sup>2</sup> и интенсивность пучка 0,36 ГВт/см<sup>2</sup>, что находится в качественном согласии с результатами экспериментов [1,2,3].

Достоинством описанного выше механизма кумуляции по сравнению с традиционным, основанным на сжатии сильноточного пучка собственным магнитным полем, является низкий разброс частиц по энергиям в области максимальной плотности тока, что обусловлено стационарным характером течения потока заряженных частиц.



2. Показано, что продольная неоднородность сильноточного релятивистского электронного пучка, состоящего из эктонов, к существенной модификации спектра спонтанного излучения, генерируемого пучком заряженных частиц. Найдено выражение, описывающее переходное излучение сильноточного релятивистского электронного пучка с учетом многократного рассеяния и ионизационных потерь энергии. Показано, что многократное рассеяние и ионизационные потери приводят к обрезанию спектра переходного излучения в области высоких частот [4].

Рассчитана мощность переходного излучения, генерируемого сильноточными релятивистскими электронными пучками при пересечении ими анодной сетки релятивистского вакуумного диода. Средняя мощность излучения, состоящего из отдельных когерентных импульсов, в диапазоне от 100 до 200 МГц составляет 75 кВт для 1 кА пучка электронов, ускоренных разностью потенциалов 0,5 МВ.

3. На примере излучения, генерируемого ансамблем неизохронных электронов-осцилляторов, и черенковского сверхизлучения исследованы статистические свойства кооперативного излучения. Продемонстрировано, что при типичном для современных ускорителей числе электронов  $N_e \sim 10^9 - 10^{12}$  относительное среднеквадратичное отклонение времени автофазировки от его среднего значения составляет величину  $\delta_T \sim 0,03 - 0,05$ . Флуктуации пиковой мощности при этом оказываются пренебрежимо малыми  $\delta_P < 10^{-4}$ . В отсутствие разброса по энергиям найдена функция распределения времени автофазировки, зависящая от числа частиц  $N_e$  и степени предварительной модуляции пучка. Показано, что при превышении числом частиц определенного значения, зависящего от степени предварительной модуляции пучка, логарифмическая зависимость относительного среднеквадратичного отклонения времени автофазировки от числа электронов-осцилляторов ( $\delta_T \sim 1/\ln N_e$ ) сменяется корневой ( $\delta_T \sim 1/\sqrt{N_e}$ ). Установлено, что даже незначительный разброс по энергиям ( $\sim 4\%$ ) приводит к резкому снижению максимально достижимой мощности кооперативного излучения неизохронных электронов-осцилляторов [5,6,7].

В соответствии с проведенным анализом, разброс электронов по скоростям накладывают серьезные ограничения на выходные характеристики короткоимпульсных источников, а также на возможность когерентного сложения импульсов кооперативного излучения от нескольких источников.

4. Установлено, что среднеквадратичные разбросы времен развития неустойчивости в квазичеренковских генераторах и ансамбле неизо-

хронных электронов-осцилляторов совпадают [8].

5. В рамках теории возмущений Магнуса получена зависимость среднего числа квантов от времени на начальной стадии генерации сверхизлучения Дике в присутствии тепловых флуктуаций электромагнитного поля [9].
6. Продемонстрирована неприменимость для описания временной эволюции спонтанного параметрического излучения кинематического приближения, игнорирующего динамическую дифракцию [10,11].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Результаты, представленные в диссертации, могут быть использованы при решении ряда важных научных и прикладных задач.

Описанный во второй главе эффект электростатической кумуляции представляет собой новый способ получения плотных электронных пучков с низким энергетическим разбросом. Эти пучки могут быть использованы как для исследования экстремальных состояний вещества, так и для генерации электромагнитного излучения. Увеличение напряжения до 4 МВ позволит в результате электростатической кумуляции достичь плотности тока  $\sim 1$  кА/мм<sup>2</sup> и интенсивности пучка 1 ТВт/мм<sup>2</sup>. Плотный электронный пучок может быть использован для генерации терагерцового черенковского излучения. Оценки показывают, что при типичном для черенковских генераторов КПД 1–10% мощность излучения составит 40–400 МВт.

Результаты третьей главы, посвященные переходному излучению сильноточных электронных пучков, позволяют по измерению спонтанного излучения эктонов определить уровень дробового шума в электронных потоках, образованных вследствие взрывной электронной эмиссии. Это важно при синхронизации мощных генераторов электромагнитного излучения.

Полученная в четвертой главе функция распределения времени развития неустойчивости дает возможность определить минимальный уровень предварительной модуляции пучка заряженных частиц, требуемый для синхронизации короткоимпульсных процессов в физическом эксперименте. Кроме того, знание необходимого уровня предварительной модуляции помогает осуществить когерентное сложение колебаний от нескольких короткоимпульсных источников для получения мощных импульсов электромагнитного излучения.

Установленная в пятой главе двухимпульсная временная структура параметрического (квазичеренковского) излучения позволяет его использовать для изучения быстротекающих процессов в веществе.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в научных журналах

1. Anishchenko, S.V. Modeling of high-current devices with explosive electron emission / S.V. Anishchenko, A.A. Gurinovich // CSD. – 2014. – Vol. 7. – P. 015007.
2. Anishchenko, S. Cumulation of high-current electron beams: theory and experiment / S. Anishchenko, V. Baryshevsky, N. Belous, A. Gurinovich, E. Gurinovich, E. Gurnevich, P. Molchanov // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2017. – Vol. 45 №10. – P. 2739–2743.
3. Anishchenko, S.V. Electrostatic cumulation of high-current electron beams for terahertz sources / S.V. Anishchenko, V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // Phys. Rev. Accel. Beams. – 2019. – Vol. 22. – P. 043403.
4. Анищенко, С.В. Переходное излучение релятивистских электронных сгустков / С.В. Анищенко, В.Г. Барышевский // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2011. №2. – С. 13–19.
5. Анищенко, С.В. Статистические свойства кооперативного излучения ансамбля неизохронных электронов-осцилляторов / С.В. Анищенко, В.Г. Барышевский // ЖТФ. – 2016. – Т. 61, №6. – С. 137–140.
6. Анищенко, С.В. Статистические свойства кооперативного излучения неизохронных электронов-осцилляторов / С.В. Анищенко, В.Г. Барышевский // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2016. №1. – С. 56–61.
7. Anishchenko, S.V. Statistical fluctuations in cooperative cyclotron radiation / S.V. Anishchenko, V.G. Baryshevsky // Nucl. Instrum. Methods A. – 2018. – Vol. 879. – P. 77–83.
8. Anishchenko, S.V. Statistical fluctuations of radiation in quasi-Cherenkov generators / S.V. Anishchenko, V.G. Baryshevsky // Nucl. Instrum. Methods B. – 2017. – Vol. 402. – P. 190–193.
9. Анищенко, С.В. Влияние тепловых флуктуаций электромагнитного поля на начальную стадию генерации сверхизлучения Дике / С.В. Анищенко, В.Г. Барышевский // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2016. №1. – С. 62–67.
10. Anishchenko, S.V. Time dependence of the intensity of parametric x-ray radiation produced by relativistic particles passing through crystals / S.V. Anishchenko, V.G. Baryshevsky, A.A. Gurinovich // Nucl. Instrum. Methods B. – 2012. – Vol. 293. P. 35–41.
11. Anishchenko, S.V. Time dependence of the intensity of parametric quasi-Cherenkov radiation produced by relativistic particles passing through electromagnetic (photonic) crystals / S.V. Anishchenko, V.G. Baryshevsky,

A.A. Gurinovich // J. Nanophotonics. – 2012. – Vol. 6. – P. 061714.

### **Статьи в материалах конференций**

12. Анищенко, С.В. Излучение электронных сгустков, образованных в релятивистском вакуумном диоде / С.В. Анищенко, В.Г. Барышевский // Сборник научных трудов международной школы-конференции молодых ученых и специалистов “Современные проблемы физики“, Минск, 9–11 июня 2010 / Под ред. В.В. Машко, В.З. Зубелевича, А.В. Бутеня. – 2010. – С. 276–279.

13. Anishchenko, S.V. Modeling of explosive electron emission and electron beam dynamics in high-current devices / S.V. Anishchenko, A.A. Gurinovich // J. Phys.: Conf. Ser. – 2014. – Vol. 490. – P. 012116.

14. Anishchenko, S. Electrostatic cumulation of high-current electron beams for terahertz applications / S. Anishchenko, V. Baryshevsky, A. Gurinovich // Proc. of PPPT'2018 Conference, 17–21 September 2018, Minsk, Belarus. – 2018. – P. 4–7.

15. Anishchenko, S.V. Statistical properties of cooperative radiation produced by nonisochronous electrons-oscillators / S.V. Anishchenko, V.G. Baryshevsky // Nonlinear Dynamics and Applications. – 2016. – Vol. 22. – P. 19–31.

16. Anishchenko, S.V. Cumulation of high-current electron beams / S.V. Anishchenko, V.G. Baryshevsky, N.A. Belous, A.A. Gurinovich, E.A. Gurnevich, P.V. Molchanov // Nonlinear Dynamics and Applications. – 2015. – Vol. 21. – P. 14–23.

### **Статьи в сборниках**

17. Анищенко, С.В. Электростатическая кумуляция сильноточных электронных пучков / С.В. Анищенко, В.Г. Барышевский, Н.А. Белоус, А.А. Гуринovich, Е.А. Гурневич, П.В. Молчанов // Фундаментальные и прикладные физические исследования. 2010–2016 гг. : сб. ст. / Изд. центр БГУ; редкол.: С.А. Максименко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 45–59.

### **Тезисы докладов**

18. Study of electron beam dynamics in a planar diode with explosive emission cathode / S. Anishchenko [et al.] // 2015 IEEE International Conference on Plasma Sciences (ICOPS), 24–28 May 2015, Antalya, Turkey. – 2015. DOI: 10.1109/PLASMA.2015.7179865.

19. Anishchenko, S.V. Cooperative parametric (quasi-Cherenkov) radiation produced by electron bunches in natural or photonic crystals / S.V. Anishchenko, V.G. Baryshevsky // Channeling 2014 – Book of Abstracts of 6th International Conference Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena, 5–10 October 2014, Capri, Italy. – 2014. – P. 53.

20. Anishchenko, S.V. Statistical fluctuations of radiation in quasi-cherenkov generators / S.V. Anishchenko, V.G. Baryshevsky // Channeling 2016 – Book

of Abstracts of 6th International Conference Charged & Neutral Particles  
Channeling Phenomena, 25–30 September 2016, Capri, Italy. – 2016. – P. 117.

## РЕЗЮМЕ

Анищенко Сергей Владимирович

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ФЛУКТУАЦИИ КООПЕРАТИВНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО РЕЛЯТИВИСТСКИМИ  
СИЛЬНОТОЧНЫМИ ПУЧКАМИ**

**Ключевые слова:** электростатическая кумуляция, кооперативное излучение, эктоны, параметрическое рентгеновское излучение.

Целью диссертационной работы является исследование влияния статистических флуктуаций на электромагнитное излучение, генерируемое релятивистскими электронными пучками.

Теоретически предсказано новое физическое явление – эффект электростатической кумуляции. Несомненным достоинством электростатической кумуляции по сравнению с традиционным, основанным на сжатии сильноточного пучка собственным магнитным полем, является крайне низкий разброс частиц по энергиям в области максимальной плотности тока.

Показано, что продольная неоднородность сильноточного релятивистского электронного пучка, состоящего из эктонов, приводит к существенной модификации спектра спонтанного излучения, генерируемого пучком заряженных частиц. В диссертационной работе найдено выражение, описывающее переходное излучение, генерируемое сильноточным релятивистским электронным пучком. Показано, что многократное рассеяние и ионизационные потери приводят к подавлению излучения в области высоких частот.

Найдена функция распределения времени автофазировки ансамбля неизохронных электронов-осцилляторов, определяемая числом частиц и уровнем предварительной модуляции частиц по положениям и скоростям. С помощью найденной функции распределения показано, что при превышении числом частиц определенного значения, зависящего от степени предварительной модуляции пучка, логарифмическая зависимость относительного среднеквадратичного отклонения времени автофазировки от числа электронов-осцилляторов сменяется корневой зависимостью.

Продемонстрировано, что временная эволюция параметрического рентгеновского излучения может быть получена в рамках динамической теории дифракции, но не с помощью общеупотребительного кинематического приближения.

Полученные результаты имеют большое значение для решения актуальной задачи создания мощных источников электромагнитного излучения в различных спектральных диапазонах.

## РЭЗІЮМЭ

Анішчанка Сяргей Уладзіміравіч

**Статыстычныя флуктуацыі кааператыўнага выпраменьвання,  
што генеруецца рэлятывісцкімі моцнатокавымі пучкамі**

**Ключавыя словы:** электрастатычная кумуляцыя, кааператыўнае выпраменьванне, эктоны, параметрычнае рэнтгенаўскае выпраменьванне.

Мэтай дысертацыйнай працы з'яўляецца даследаванне ўплыву статыстычных флуктуацый на электрамагнітнае выпраменьванне, якое генеруецца рэлятывісцкімі электроннымі пучкамі.

Тэарэтычна прадказана новае фізічная з'ява – эффект электрастатычнай кумуляцыі. Несумнеўным вартасцю электрастатычнай кумуляцыі ў параўнанні з традыцыйным, заснаваным на сціску сильноточнага пучка уласным магнітным полем, з'яўляецца вельмі нізкі роскід часціц па энергіі ў месцы максімальнай шчыльнасці току.

Паказана, што падоўжная неаднастайнасць моцнатокавых рэлятывісцкіх электронных пучкоў, якія складаюцца з эктонаў, прыводзіць да істотнай мадыфікацыі спектру спантанага выпраменьвання, генераванага пучком зараджаных часціц. У дысертацыйнай працы знойдзены выраз, які апісвае пераходнае выпраменьванне моцнатокавых рэлятывісцкіх электронных пучкоў з улікам шматразовага рассеявання і іянізацыйных страт энергіі. Паказана, што шматразовае рассеяванне і іянізацыйных страты прыводзяць да абразання спектру пераходнага выпраменьвання ў вобласці высокіх частот.

Знойдзеная функцыя размеркавання часу аўтафазіроўкі ансамбля неізыхронных электронаў-асцылятараў вызначаецца лікам часціц і ўзроўнем прадмадуляцыі часціц па палажэннях і хуткасцях. З дапамогай знойдзенай функцыі размеркавання паказана, што пры перавышэнні лікам часціц пэўнага значэння, якое залежыць ад ступені папярэдняй прадмадуляцыі пучка, лагарыфмічная залежнасць адноснага сярэднеквадратавага адхілення часу аўтафазіроўкі ад колькасці электронаў-асцылятара змяняецца караневай.

Прадэманстравана, што часовая эвалюцыя параметрычнага рэнтгенаўскага выпраменьвання можа быць атрымана ў рамках дынамічнай тэорыі дыфракцыі, але не з дапамогай агульнаўжывальнага кінематычнага набліжэння.

Атрыманыя вынікі маюць вялікае значэнне для вырашэння актуальнай задачы стварэння магутных генератараў электрамагнітнага выпраменьвання ў розных спектральных дыяпазонах.

## SUMMARY

Anishchenko Sergei Vladimirovich

**STATISTICAL FLUCTUATIONS OF COOPERATIVE RADIATION  
GENERATED BY RELATIVISTIC HIGH-CURRENT BEAMS**

**Key words:** electrostatic cumulation, cooperative radiation, ectons, parametric x-rays.

The aim of the thesis is to study the effect of statistical fluctuations on the electromagnetic radiation generated by relativistic electron beams.

A new physical phenomenon, the effect of electrostatic cumulation, is theoretically predicted. The undoubted advantage of electrostatic cumulation as compared with the traditional self-magnetic field based on the compression of a high-current beam is the extremely low energy dispersion of particles in the region of maximum current density.

It has been shown that the longitudinal inhomogeneity of high-current electron beam consisting of ectons leads to a substantial modification of the spectrum of spontaneous radiation generated by a beam of charged particles. In the thesis, an expression describing the transition radiation of high-current electron beams was found. It is shown that multiple scattering and ionization losses lead to suppression of the transition radiation spectrum in the high-frequency domain.

The distribution function of the autophasing time of an ensemble of nonisochronous electron oscillators is determined by the number of particles and the level of pre-modulation of particles' positions and velocities. Using the distribution function, it was shown that when the number of particles exceeds a certain value depending on the degree of preliminary modulation of the beam, the logarithmic dependence of the relative mean square the deviations of the autophasing time from the number of oscillator electrons are replaced by the root one.

It is demonstrated that the temporal evolution of parametric X-ray radiation can be obtained within the framework of the dynamical diffraction theory, but not with the help of the commonly used kinematic approximation.

The results obtained are of great importance for solving the urgent problem of creating powerful sources of electromagnetic radiation in different spectral ranges.



Анищенко Сергей Владимирович

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ФЛУКТУАЦИИ  
КООПЕРАТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ,  
ГЕНЕРИРУЕМОГО РЕЛЯТИВИСТСКИМИ  
СИЛЬНОТОЧНЫМИ ПУЧКАМИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Подписано в печать “ ” 2019 г. Формат 60 × 90 1/16.

Бумага офисная. Печать офсетная. Усл. печ. л.

Учетн. изд. л. Тираж 60 экз. Заказ № .

ГНУ "Институт физики им. Б.И. Степанова

Национальной академии наук Беларуси"

220072, Минск, пр. Независимости, 68.

Отпечатано на ризографе ГНУ "Институт физики

им. Б.И. Степанова НАН Беларуси"