

УДК 539.12.04

## ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ЧЕРЕНКОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ – ОТ ПРЕДСКАЗАНИЯ ДО ПРИМЕНЕНИЯ

*А.В. Шагин*

*ННЦ «Харьковский Физико-Технический Институт»  
61108, Харьков, ул. Академическая, 1, Украина;  
E-mail: shchagin@kipt.kharkov.ua*

Научная деятельность доктора физико-математических наук, профессора, сотрудника ХФТИ Николая Антоновича Хижняка в течение 1953-2001 годов была весьма разносторонней и многогранной. Здесь кратко описана его научная и организаторская работа только в одном из направлений его деятельности, связанном с параметрическим черенковским излучением. Работы Николая Антоновича в этом направлении начались в середине 50-х годов с теоретического предсказания существования параметрического черенковского излучения и продолжались вплоть до безвременной его кончины в 2001 году. Отмечена значимость его ранних работ и кратко перечислены основные исследования свойств этого излучения в рентгеновском диапазоне, выполнявшиеся в его отделении под его общим руководством, непосредственном участии и поддержке с середины 80-х годов. Кроме того, отмечены некоторые работы, выполняющиеся сейчас в институте учениками, сотрудниками и коллегами Николая Антоновича.

### НАЧАЛО РАБОТ В 50-х ГОДАХ

Ранее полагалось, что заряженная частица, движущаяся прямолинейно и равномерно, не должна излучать. Поэтому открытие в 30-х годах излучения заряженных частиц, движущихся прямолинейно и равномерно через однородную среду, было удостоено в 1958 году Нобелевской премии. Это когерентное излучение, обычно называемое излучением Вавилова-Черенкова или Черенкова [1], возможно только в случае, когда скорость частицы превышает фазовую скорость электромагнитной волны в среде. В 40-х годах будущие Нобелевские лауреаты В.Л. Гинзбург и И.М. Франк предсказали некогерентное переходное излучение, которое возникает, когда частица пересекает границу двух сред с различными диэлектрическими проницаемостями [2]. Однако излучение Черенкова и переходное излучение были не последними неожиданными эффектами излучения частицы, движущейся прямолинейно и равномерно. Следующий удивительный эффект излучения был предсказан теоретически Я.Б. Файнбергом и Н.А. Хижняком в работе [3]. Они обнаружили, что заряженная частица, движущаяся в среде, будет испускать когерентное излучение даже при скорости частицы меньше фазовой скорости электромагнитной волны в среде, если диэлектрическая проницаемость среды периодически изменяется в направлении движения частицы. В дальнейшем это дало возможность генерации этого излучения в рентгеновском диапазоне, где фазовая скорость обычно превышает скорость света и простое черенковское излучение в большинстве случаев невозможно.

В 50-х годах Николай Антонович был первым аспирантом тогда кандидата физико-математических наук, а ныне академика, Якова Борисовича Файнберга, который, в своё время, был первым аспирантом

академика Александра Ильича Ахиезера. В середине 50-х годов Николай Антонович с Яковом Борисовичем теоретически исследовали потери энергии заряженной частицы, движущейся через слоистый диэлектрик, и показали наличие нового типа излучения такой частицы. Они назвали это излучение «параметрическое черенковское излучение» и опубликовали работу в журнале ЖЭТФ [3]. В работе рассматривалось излучение в оптическом диапазоне. Позднее, это излучение из кристалла в рентгеновском диапазоне рассмотрел М.Л. Тер-Микаэлян в книге [4], где называл его «резонансное излучение» (во время подготовки этих заметок пришло скорбное сообщение о кончине Михаила Леоновича в январе 2004 года).

Параметрическое черенковское излучение является красивым эффектом. Поэтому в 70-х годах и позже оно было исследовано теоретически многими авторами с различных точек зрения (см., например, [5-21]) и в результате в литературе можно обнаружить около десятка различных наименований этого эффекта. В работе В.А. Буца, опубликованной в настоящем издании, отмечается, что формулы для излучения, полученные в [3], имеют общий характер и остаются пригодными для различных случаев и диапазонов.

Дальнейшие работы в этом направлении были сосредоточены, главным образом, в рентгеновском диапазоне. Ниже мы будем использовать, в основном, термин «параметрическое рентгеновское излучение» (ПРИ), который принят в настоящее время в большинстве публикаций, посвященных этому рентгеновскому излучению заряженных частиц, движущихся через кристалл. Обсуждения природы, названий и свойств параметрического черенковского излучения в рентгеновском диапазоне можно найти, например, в работах [22-25].

## НАЧАЛО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (1985-1991 г.г.)

Интерес к этому излучению резко возрос после экспериментального обнаружения в 1985 году ПРИ с энергией несколько килоэлектронвольт из кристалла в Томске на синхротроне «Сириус» [26,27]. Вскоре эксперименты по наблюдению жесткого ПРИ с энергией до сотен кэВ были выполнены в ХФТИ в отделении В.Ф. Болдышева [28] на ускорителе ЛУЭ-2000. В начале 1986 года Б.И. Шраменко предложил Н.А. Хижняку провести совместные экспериментальные исследования ПРИ на линейных ускорителях электронов в Харькове. Совместные эксперименты начались в 1986 году и проводились на ускорителях ЛУЭ-40 и ЛУЭ-2000. Они выполнялись в сотрудничестве силами группы В.Л. Морозовского из лаборатории Б.И. Шраменко отдела В.И. Курилко (а затем отдела Н.Ф. Шульги) и группы А.В. Щагина из лаборатории и отделения Н.А. Хижняка и продолжались до 1989 года. Н.А. Хижняк поддерживал и финансировал работу группы А.В. Щагина с участием В.И. Рыжкова, В.П. Лапко, В.И. Приступы и закупку измерительной аппаратуры для экспериментов на ускорителях из средств оборонных исследовательских программ бывшего Советского Союза. Некоторые результаты этих исследований опубликованы в работах [29-32], а также в работе [33]. В работе [29] измерена структура рефлекса ПРИ, в работе [30] исследовано свойство когерентности ПРИ, в работе [31] описан способ ориентирования кристалла с использованием ПРИ, в работе [32] описана экспериментальная установка, которая использовалась для исследований ПРИ на ускорителе ЛУЭ-40. Позднее были опубликованы работы [34-37], в которых была показана адекватность кинематической теории [4] для описания наблюдаемых спектрально-угловых свойств дифференциального выхода ПРИ.

В экспериментальных исследованиях, выполненных в конце 80х – начале 90-х годов на ускорителях в Томске [38-40], Харькове и Ереване [41], измерялись основные свойства рефлекса ПРИ, который испускался из кристалла вблизи угла Брэгга под действием электронов с энергией от 15 МэВ до 4,5 ГэВ. Они показали перспективность ПРИ как источника квазимонохроматического рентгеновского пучка с возможностью плавной перестройки энергии излучения от единиц до сотен килоэлектронвольт. Эти работы стимулировали постановку новых экспериментов несколькими группами исследователей в 90-х годах на ускорителях электронов в США [42-44], Японии [45], Канаде [44], Европе [46].

### РАБОТЫ 1992-2001 ГОДОВ

В середине 90-х годов на основе отделений Я.Б. Файнберга и Н.А. Хижняка был создан возглавляемый А.М. Егоровым Институт Плазменной Электроники и Новых Методов Ускорения (ИПЭНМУ), входящий в состав Национального научного центра

ХФТИ. В 90-х годах исследования ПРИ в отделении продолжались в рамках выполнения базовой "Программы работ по атомной науке и технике ННЦ ХФТИ на период 1992-2000 годы" по теме "Исследование свойств параметрического рентгеновского излучения и взаимодействия излучения с веществом". Руководителем этой темы был ученик Николая Антоновича, автор настоящих заметок. Однако скудность бюджетного финансирования стимулировала поиск альтернативных возможностей для поддержки научных работ. Одна из таких новых возможностей, появившихся после распада СССР, состояла в использовании грантов на научные исследования, предоставляемых различными организациями на конкурсной основе. Другая новая возможность состояла в развитии международного сотрудничества с коллегами из других стран. В начале 90-х годов Николай Антонович принял решение об участии в таких конкурсах и сотрудничестве, несмотря на жесткие условия конкуренции, непривычность для того времени) такого подхода и сопутствующие трудности.

В 1992 году под руководством Николая Антоновича выполнялись исследования свойств ПРИ по гранту Государственного Фонда Фундаментальных Исследований Украины «Исследование механизмов генерации мощных остронаправленных монохроматических рентгеновских пучков с возможностью плавной перестройки энергии квантов и эффектов взаимодействия таких пучков с веществом». Участники работ – А.В. Щагин, В.И. Приступа. Однако продолжить эксперименты на ускорителе в условиях стремительной денежной инфляции после распада СССР не удалось.

В 1993 году работы Николая Антоновича, как и других продолжавших активно работать ученых бывшего Советского Союза, были поддержаны индивидуальным единовременным грантом от Фонда Сороса.

В 1995-1996 годах исследования свойств ПРИ выполнялись при частичной поддержке Международного Научного Фонда Сороса по проекту K4Q100 "Investigations of differential spectral and angular properties of parametric X-ray radiation at high incident electron energies". Руководитель проекта – Н.А. Хижняк, участники работ – А.В. Щагин, В.И. Приступа.

В 1999-2002 годах в отделении Николая Антоновича при его непосредственном участии выполнялся проект STCU 1031 "A new source of polarized, monochromatic, tunable X-ray and soft gamma-ray beams for calibration of space telescopes and other optics and detectors". Проектом руководил автор этих заметок. Участниками работ были В.Г. Папкович, В.В. Сотников, В.Я. Мигаленя, В.М. Санин, В.И. Приступа, В.А. Воронко, Е.В. Гусев, Л.Н. Калашников, В.И. Нагайченко, Л.Ф. Прокопчук, А.М. Егоров, А.Г. Лымарь, А.М. Гор-бань. Работы выполнялись частично в сотрудничестве с коллегами из Европейского Союза и США.

Перечислим кратко некоторые научные результаты в ходе этих и близких по теме работ, полученные в отделении Николая Антоновича при его непосредственном участии и содействии.

В работе [34] была впервые показана адекватность кинематической теории для описания дифференциального выхода ПРИ в относительных единицах и впервые исследована ширина спектрального пика ПРИ. В работе [47] исследовалось сечение К-ионизации релятивистскими электронами и выбран способ его расчета. В работе [35] впервые исследован абсолютный дифференциальный выход рентгеновского излучения вблизи рефлекса, а в работе [36] – вдали от рефлекса ПРИ. Работы [44,48,49] были выполнены в соавторстве с коллегами из США. В работе [44] было впервые получено двумерное угловое распределение выхода излучения в рефлексе ПРИ. В работе [48] была впервые оценена импульсная мощность ПРИ. Первый обзор природы, свойств и экспериментальных исследований ПРИ, выполненных в мире к 1996 году, был опубликован в книге [49]. Линейная поляризация ПРИ в рамках кинематической теории [4] была рассмотрена в работе [50]. Основные свойства и возможные применения ПРИ были описаны в работах [37,51]. Результаты некоторых исследований свойств ПРИ приведены в работе [25]. Первые детальные расчеты структуры рефлекса ПРИ, перпендикулярного пучку частиц, представлены в работе [52]. Текущее состояние исследований свойств ПРИ на 2000 год описано в работе [53]. Продолжение обзора, начатого в книге [49], опубликовано в книге [54], где описаны основные эксперименты по ПРИ, выполненные в мире к 2001 году. В работе [55], выполненной в соавторстве с коллегами из США и Франции, впервые показана реальная возможность применения ПРИ для калибровки рентгеновских космических телескопов. Развитие этой работы описано в [56]. Полные отчеты по проекту STCU 1031, посвященному калибровке рентгеновских космических телескопов, опубликованы в трех томах [57]. В диссертации [58], выполненной под руководством Николая Антоновича, показана адекватность кинематической теории Тер-Микаэляна [4] для описания свойств ПРИ. В работах [59,60,62] показано существенное влияние поликристалличности мишени на спектры наблюдавшегося в эксперименте [61] излучения. Результаты перечисленных исследований были доложены и обсуждались на научных конференциях и семинарах в СССР, России, Украине, США, Италии, Дании, Чехии, Японии.

В заключение этого краткого перечисления отметим, что основные результаты работы по абсолютному дифференциальному выходу ПРИ [35] были позже подтверждены в независимом эксперименте [46] (см. комментарии в [37]). Исследования ширины спектрального пика ПРИ [34] продолжены и развиты в работах [64,65]. Результаты расчетов линейной поляризации ПРИ [50] качественно согласуются с экспериментальными данными [66]. Отметим также недавний фундаментальный обзор М.Л. Тер-Микаэляна [21], где представлены основные работы в этой области.

## ПОСЛЕ 2001 ГОДА

После смерти Николая Антоновича в 2001 году его отдел возглавил Анатолий Георгиевич Лымарь. В настоящее время в этом отделе при доброжелательной поддержке директора ИПЭНМУ А.М. Егорова, акад. НАНУ Я.Б. Файнберга, чл.-корр. НАНУ Н.Ф. Шульги продолжают и развиваются исследования в области ПРИ и близких направлениях, начатые Николаем Антоновичем. Отметим некоторые из этих работ.

В отделе продолжают работы по бюджетной теме "Исследование свойств параметрического рентгеновского излучения и взаимодействия излучения с веществом" в рамках "Программы фундаментальных исследований ННЦ ХФТИ по атомной науке и технике до 2005 года" (руководитель темы – автор этих заметок). После кончины Николая Антоновича были начаты работы по проектам STCU 1030 и STCU 1911, которые подготавливались и планировались с его непосредственным участием. Проект STCU 1030 "A monochromatic X-ray locator for control of nuclear materials nonproliferation" на 2001-2004 годы выполняется в сотрудничестве с коллегами из США. Основные участники работ – А.В. Щагин (руководитель), В.М. Санин, В.В. Сотников, В.А. Воронко, В.И. Нагайченко, В.Я. Мигаленя, А.М. Егоров, А.М. Горбань, В.Г. Папкович, А.П. Толстолужский, Л.Ф. Прокопчук. Отчеты по проекту за первый год опубликованы в отдельном томе [67]. Предварительные результаты опубликованы в работе [68]. В настоящее время (апрель 2004 года) проводится подготовка к началу выполнения проекта STCU 1911 «Rugoelectric generator of X-rays» в сотрудничестве с коллегами из США. Предварительные результаты первых за пределами США экспериментов с пироэлектрическим генератором рентгеновского излучения опубликованы в препринте [63].

В ноябре 2002 года автор этих заметок успешно защитил диссертацию [58] в Московском Государственном университете. Научный руководитель этой диссертации – проф. Н.А. Хижняк. Я очень сожалел, что не внял его настояниям подготовить диссертацию гораздо раньше и не закончил эту работу до его безвременной кончины в октябре 2001 года.

Исследования свойств ПРИ продолжают и другими группами ученых в США, Германии, Франции, Японии. Некоторые из них выполняются в сотрудничестве с нами. Например, сотрудничество с коллегами из Университета Хиросимы (Япония), было инициировано одобренной Николаем Антоновичем работой, опубликованной сначала в виде препринта [59] а затем в настоящем издании и обсуждавшейся в [60]. В 2003 году были проведены совместные экспериментальные исследования в этом направлении на ускорительной установке REFER в университете Хиросима. Первые результаты совместной работы опубликованы в виде письма в журнал NIM B [62].

Недавно в работе [69] была впервые предложена возможность фокусировки ПРИ, генерируемого ре-

лятивистскими протонами, каналирующими в длинном изогнутом кристалле.

Таким образом, работы Николая Антоновича продолжают приносить результаты и начатая им тематика успешно развивается благодаря бюджетным и другим источникам финансирования.

Отметим, что две [3,34] из трех [3,34,70] наиболее цитируемых в мировой литературе работ Николая Антоновича посвящены параметрическому черенковскому (рентгеновскому) излучению.

#### 49 ЛЕТ В ХФТИ

В настоящих заметках я старался кратко описать историю развития только одного из многих направлений деятельности Николая Антоновича Хижняка, связанного с параметрическим черенковским (рентгеновским) излучением (насколько она мне известна), потому что в течение 1976-2001 годов работал с ним в его отделении в этом и близких направлениях. В этих заметках не отражены работы Николая Антоновича по развитию ускорителей, интегральных уравнений макроскопической электродинамики [70], радиофизике, плазме, ядерной энергетике, истории Украины, по крупным проектам государственного значения в оборонных и космических областях и обеспечению финансирования отдела в СССР, значительный вклад в развитие ХФТИ и жилого комплекса поселка Пятихатки, строительство третьей площадки ХФТИ, преподавательская деятельность в университете и институтах г. Харькова, организация и руководство харьковскими семинарами «Физика и Медицина» и «Методы интегральных уравнений в макроскопической электродинамике», многолетнее увлечение филателией, работа в обществе «Знание» и многое другое, включая золотую медаль ВДНХ 1979 года, государственную премию СССР [71], государственные премии УССР [72] и Украины [73]. Надеюсь, что эти работы Николая Антоновича могут быть лучше описаны его коллегами и учениками, которые работали вместе с ним в соответствующих направлениях.

Я думаю, что Соросовский профессор Николай Антонович Хижняк был одним из основных носителей академических научных традиций в нашем институте. По-видимому, он каким-то образом передавал через поколения своим ученикам и сотрудникам менталитет и традиции, которые воспринял от старшего поколения ученых еще в 50-е годы, когда начинал работать в ХФТИ. Очень жаль, что я больше не смогу прийти или позвонить и услышать его доброжелательный голос, мгновенно располагающий к обсуждению любых проблем.

Полагаю, что именем Николая Антоновича Хижняка можно было бы назвать одну из улиц поселка Пятихатки в память о замечательном ученом и человеке, внесшем существенный вклад в развитие мировой науки и Харьковского Физико-Технического Института.

Автор выражает благодарность многим сотрудникам ХФТИ и особенно Я.Б. Файнбергу, А.М. Егорову, Н.Ф. Шульге за обсуждение деталей настоящих заметок. Они были подготовлены при частич-

ной поддержке по проекту 1030 from Science and Technology Center in Ukraine.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И.М. Франк. *Излучение Вавилова-Черенкова. Вопросы теории*. М.: «Наука», 1988.
2. В.Л. Гинзбург, И.М. Франк. Излучение равномерно движущегося электрона, возникающее при его переходе из одной среды в другую // *ЖЭТФ*. 1946, т.16, с.15-28.
3. Я.Б. Файнберг, Н.А. Хижняк. Потери энергии заряженной частицей при прохождении через слоистый диэлектрик // *ЖЭТФ*. 1957, т.32, с.883-895.
4. М.Л. Тер-Микаэлян. Влияние среды на электромагнитные процессы. Ереван: Издательство Академии наук Армянской ССР, 1969.
5. D. Dialetis. Generation of coherent x radiation by a relativistic charged particle traveling through a crystal // *Phys. Rev. A* 17, 1113-1122 (1978).
6. А.М. Афанасьев, М.А. Агинян. Излучение ультрарелятивистских частиц при прохождении через идеальные и мозаичные кристаллы // *ЖЭТФ*. 1978, 74, 570-579.
7. В.Г. Барышевский. *Каналирование, излучение и реакции в кристаллах при высоких энергиях*. Минск: БГУ, 1982.
8. Г.М. Гарибян, Ян Ши. *Рентгеновское переходное излучение*. Ереван: Академия наук Армянской ССР, 1983.
9. I.D. Feranchuk, A.V. Ivashin. Theoretical investigation of the parametric X-ray features. *J. Physique* 46, 1981-1986 (1985).
10. В.А. Базылев, Н.К. Жеваго. Излучение быстрых частиц в веществе и во внешних полях. М.: «Наука», 1987.
11. В.А. Беляков. *Дифракционная оптика периодических сред сложной структуры*. М.: «Наука», 1988.
12. A. Caticha. Transition-diffracted radiation and Cherenkov emission of X-rays // *Phys. Rev.* 1989, A 40, p.4322-4329.
13. A. Caticha. Quantum theory of the dynamical Cherenkov emission of X-rays // *Phys. Rev.* 1992, B 45, p.9541-9550.
14. В.П. Лапко, Н.Н. Насонов. О параметрическом механизме излучения быстрых заряженных частиц в кристалле // *ЖТФ*, 1990, 60, с.160-162.
15. H. Nitta. Kinematical theory of parametric X-ray radiation // *Phys. Lett.* 1991, A 158, p.270-274.
16. H. Nitta. Theory of coherent X-ray radiation by relativistic particle in a single crystal // *Phys. Rev.* 1992, B 45, p.7621-7626.
17. V.G. Baryshevsky. Parametric X-ray radiation at a small angle near the velocity direction of the relativistic particle // *NIM*. 1997, B 122, p.13-18.

18. P. Rullhusen, A. Artru, P. Dhez. Novel Radiation Sources Using Relativistic Electrons. World Scientific Publishers, Singapore, 1998.
19. N.N. Nasonov. Borrmann effect in parametric X-ray radiation // *Phys. Lett.* 1999, A 260, p.391-394.
20. X. Artru, P. Rullhusen. Parametric X-rays and diffracted transition radiation in perfect and mosaic crystals // *NIM.* 1998, B 145, p.1-7. Addendum in *NIM.* 2001, B 173, p.16-17.
21. М.Л. Тер-Микаэлян. Радиационные электромагнитные процессы при высоких энергиях в периодических средах // *УФН.* 2001, 171, с.597-624.
22. G.M. Garibian, C. Yang. Quasi-Cherenkov radiation in crystals // *NIM.* 1986, A 248, p.29-30.
23. В.А. Буц, Н.А. Хижняк. *Исследования параметрического черенковского излучения. Плазменная электроника* / Под ред. В.И. Курилко. Киев: "Наукова думка", 1989, с.78-89.
24. Я.Б. Файнберг, Н.А. Хижняк. Явление излучения электромагнитных волн заряженной частицей, равномерно и прямолинейно движущейся в пространственно-периодической среде (параметрический эффект Черенкова) // *Плазменная электроника* / Под ред. В.И. Курилко, Киев: "Наукова думка", 1989, с.278-291.
25. В.О. Буц, О.В. Щагин. Дослідження параметричного черенковського випромінювання // *УФЖ.* 1998, 43, N 9, с.1172-1174.
26. С.А. Воробьев, Б.Н. Калинин, С. Пак, А.П. Поты-лицын. Обнаружение монохроматического рентгеновского излучения при взаимодействии ультрарелятивистских электронов с кристаллом алмаза // *Письма в ЖЭТФ.* 1985, 41, с.3-6.
27. A.N. Didenko, B.N. Kalinin, S. Pak et al. Observation of monochromatic X-ray radiation from 900 MeV electrons transmitting through a diamond crystal // *Phys. Lett.* 1985, A 110, p.177-179.
28. Д.И. Адейшвили, С.В. Блажевич, В.Ф. Болдышев и др. Спектры жесткого рентгеновского излучения электронов высокой энергии в кристалле под углом Брэгга // *ДАН СССР.* 1988, 298, с.844-846.
29. С.В. Касьян, В.Л. Мороховский, В.И. Приступа, А.В. Щагин. Ориентационная зависимость выхода параметрического рентгеновского излучения // *Материалы XVIII Симпозиума по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами.* Москва, Май 1988 (МГУ, Москва, 1989), с.77-79.
30. В.Л. Мороховский, А.В. Щагин. Исследование свойства когерентности параметрического излучения // *ЖТФ.* 1990, 60, с.147-150.
31. В.Л. Мороховский, А.В. Щагин. Ориентирование монокристаллов в пучке электронов с энергией 10-1000 МэВ // *ПТЭ.* 1989, 3, с.36-38.
32. Д.И. Адейшвили, С.В. Блажевич, Г.Л. Бочек, В.И. Кулибаба, В.П. Лапко, В.Л. Мороховский, Г.Л. Фурсов, А.В. Щагин. Установка для исследования спектрально-угловых характеристик рентгеновского излучения релятивистских электронов средних энергий в монокристаллах // *ПТЭ.* 1989, 3, с.50-52. (Поправку см. *ПТЭ.* 1989, 6, с.4).
33. В.Л. Мороховский. Когерентное рентгеновское излучение релятивистских электронов в кристалле. Москва-ЦНИИ атоминформ. 1989, с.39.
34. A.V. Shchagin, V.I. Pristupa, N.A. Khizhnyak. A fine structure of parametric X-ray radiation from relativistic electrons in a crystal // *Phys. Lett.* 1990, A 148, p.485-488. Поправка опубликована в [54].
35. A.V. Shchagin, V.I. Pristupa, N.A. Khizhnyak. Absolute differential yield of parametric X-ray radiation // *Proc. of Intern. Symp. on Radiation of Relativistic Electrons in Periodical Structures.* Tomsk (Russia). September 6-10, 1993. Editors Yu.L. Pivovarov, A.P. Potylitsin. Nuclear Physics Institute, Tomsk Polytechnical Institute, 1993, p.62-75.
36. A.V. Shchagin, V.I. Pristupa, N.A. Khizhnyak. Parametric X-ray radiation from relativistic electrons in a crystal in the vicinity and at angular distance from a Bragg direction // *NIM.* 1995, B 99, p.277-280.
37. A.V. Shchagin, N.A. Khizhnyak. Differential properties of parametric X-ray radiation from a thin crystal // *NIM.* 1996, B 119, p.115-122.
38. Yu.N. Adishchev, A.N. Didenko, V.V. Mun et al. Measurement of parametric X-rays from relativistic electrons in silicon crystals / *NIM.* 1987, B 21, p.49-55.
39. Yu.N. Adishchev, V.A. Verzilov, A.P. Potylitsyn et al. Measurement of spectral and polarization characteristics of parametric X-rays in a Si crystal // *NIM.* 1989, B 44, p.130-136.
40. Ю.Н. Адищев, В.А. Верзилов, С.А. Воробьев и др. Экспериментальное обнаружение линейной поляризации параметрического рентгеновского излучения // *Письма в ЖЭТФ.* 1988, 48, с.311-314.
41. Р.О. Авакян, А.Э. Аветисян, Ю.Н. Адищев и др. Экспериментальное исследование квазичеренковского излучения электронов с энергией 4,5 ГэВ в алмазе // *Письма в ЖЭТФ.* 1987, 45, с.313-316.
42. R.B. Fiorito, D.W. Rule, X.K. Maruyama et al. Observation of high order parametric X-ray spectra in mosaic graphite and single silicon crystals // *Phys. Rev. Lett.* 1993, 71, p.704-707.
43. R.B. Fiorito, D.W. Rule, M.A. Piestrup et al. Parametric X-ray generation from moderate energy electron beams // *NIM.* 1993, B 79, p.758-761.
44. R.B. Fiorito, D.W. Rule, M.A. Piestrup, X.K. Maruyama, R.M. Silzer, D.M. Skopik, A.V. Shchagin. Polarized angular distributions of parametric x radiation

- and vacuum-ultraviolet transition radiation from relativistic electrons // *Phys. Rev.* 1995, E 51, p.2759-2762.
45. S. Asano, I. Endo, M. Harada, S. Ishii, T. Kobayashi, T. Nagata, M. Muto, K. Yoshida, H. Nitta. How intense is parametric X radiation? // *Phys. Rev. Lett.* 1993, 70, p.3247-3250.
  46. J. Freudenberger, V.B. Gavrikov, M. Galemann et al. Parametric X-ray radiation in diamond at low electron energies // *Phys. Rev. Lett.* 1995, 74, p.2487-2490.
  47. A.V. Shchagin, V.I. Pristupa, N.A. Khizhnyak. K-shell ionization cross section of Si atoms by relativistic electrons // *NIM.* 1994, B 84, p.9-13.
  48. Z. Parsa, A.V. Shchagin. Parametric X-ray Radiation as Source of Pulsed, Polarized, Monochromatic, Tunable X-ray Beam. In: *New Modes of Particle Acceleration – Techniques and Sources*, ed. Z. Parsa, AIP Conference Proceedings 396, AIP, New York, 1997, p.135-143.
  49. A.V. Shchagin, X.K. Maruyama. Parametric X-rays. In: "Accelerator-Based Atomic Physics Techniques and Applications", eds. S.M. Shafroth and J.C. Austin, AIP Press, New York, 1997, p.279-307. For correction about PXR polarization see work [50].
  50. A.V. Shchagin. Linear polarization of parametric X-rays // *Phys. Lett.* 1998, A 247, p.27-36.
  51. А.В. Щагин, В.И. Приступа, Л.Н. Калашников, Н.А. Хижняк. Параметрическое рентгеновское излучение // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования».* 1997, вып.4,5(31,32), с.184-186.
  52. A.V. Shchagin. Parametric X-rays at the right angle to the particle beam // *Phys. Lett.* 1999, A 262, p.383-388.
  53. A.V. Shchagin. Current status of parametric X-ray radiation research // *Radiation Physics and Chemistry.* 2001, 61, p.283-291.
  54. A.V. Shchagin. Investigations and properties of PXR. In: "Electron-Photon Interaction in Dense Media" ed. by H. Wiedemann, NATO Science Series, II. Mathematics, Physics and Chemistry – v.49, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London, 2002, p.133-151.
  55. A.V. Shchagin, N.A. Khizhnyak, R.B. Fiorito, D.W. Rule, X. Artru. Parametric X-ray radiation for calibration of X-ray space telescopes and generation of several X-ray beams// *NIM.* 2001, B 173, p.154-159.
  - 56.** A.V. Shchagin, V.M. Sanin, V.V. Sotnikov, V.A. Voronko. Calibration of X-ray space telescopes // *Вопросы атомной науки и техники.* 2004, вып.1(42), с.187-190.
  57. A new source of polarized, monochromatic, tunable X-ray and soft gamma-ray beams for calibration of space telescopes and other optics and detectors. Proceedings of the STCU Project 1031, volumes #1 (196 pages), #2 (144 pages), #3 (116 pages), edited by A.V. Shchagin. Kharkov, 2002.
  58. А.В. Щагин. Дифференциальные свойства параметрического рентгеновского излучения. Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н., 116 с., МГУ, Москва, 2002.
  59. A.V. Shchagin. Diffraction on a polycrystal for investigations and diagnostics of X-ray radiation of relativistic particles in a forward direction // *E-preprint* <http://arXiv.org/abs/physics/0105071> (2001).
  60. А.В. Щагин. Об идентификации спектральных пиков, наблюдавшихся в эксперименте в Хиросиме, и спектральных пиков ПРИ из поликристалла // *Научные ведомости. Белгородский Государственный Университет.* 2001, № 1(14), с.6-9.
  61. K. Chouffani, M.Yu. Andreyashkin, I. Endo et al. Parametric X-radiation and diffracted transition radiation at REFER electron ring // *NIM* 2001, B 173, p.241-252.
  62. I. Endo, D. Iseki, T. Ohnishi, C. Moriyoshi, A.V. Shchagin. On the origin of mysterious X-ray spectral peaks observed at the REFER electron ring // *NIM.* 2004, B 217, p.666-670.
  63. V.I. Nagaychenko, V.M. Sanin, A.M. Yegorov, A.V. Shchagin. *Spectra of pyroelectric X-ray generator: E-preprint* at <http://arxiv.org/ftp/physics/papers/0309/0309049.pdf> (2003).
  64. K.H. Brenzinger, B. Limburg, H. Backe et al. How narrow is the linewidth of parametric X-ray radiation // *Phys. Rev. Lett.* 1997, 79, p.2462-2465.
  65. H. Backe, G. Kube, W. Lauth. On the linewidth of backward emitted parametric X-radiation. In: "Electron-Photon Interaction in Dense Media" ed. by H. Wiedemann, NATO Science Series, II. Mathematics, Physics and Chemistry – v.49, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London, 2002, p.153-182.
  66. V.V. Morokhovskii, K.H. Schmodt, G. Buschhorn et al. Polarization of parametric X radiation // *Phys. Rev. Lett.* 1997, 79, p.4389-4392.
  67. A monochromatic X-ray locator for control of nuclear materials nonproliferation. Proceedings of the STCU Project 1030, volume 1 (160 pages), edited by A.V. Shchagin, Kharkov, 2003.
  68. A.V. Shchagin, V.M. Sanin, V.V. Sotnikov et al. Location of heavy elements by monochromatic X-ray beam // *Вопросы атомной науки и техники.* 2004, вып. 1(42), с.194-196.
  69. A.V. Shchagin. *Focusing of Parametric X-ray radiation from bent crystal. Oral paper and abstract at Workshop "Relativistic Channeling and related Coherent Phenomena", Frascati, Italy, March 23-26, 2004, INFL-Laboratori Nazionali di Frascati, 2004:* [E-preprint http://arxiv.org/abs/physics/0404137](http://arxiv.org/abs/physics/0404137)

70. Н.А. Хижняк. *Интегральные уравнения макроскопической электродинамики*. Киев: «Наукова Думка», 1986, 280 с.
71. Государственная премия СССР 1979 года «За разработку, создание и ввод в эксплуатацию линейных ускорителей электронов».
72. Премія Української РСР в галузі науки і техніки 1989 року за цикл робіт «Теорія резонансного
- розсіювання хвиль та її застосування у радіофізиці».
73. Премія України в галузі науки і техніки 1996 року за цикл праць «Змінно-фазова фокусировка, розроблення та створення прискорювачів протонів і іонів на її основі».

#### **PARAMETRIC CHERENKOV RADIATION – FROM PREDICTION TO APPLICATION**

*A.V. Shchagin*

Scientific activity of Doctor of Physical-Mathematical Sciences, Professor, employee of KIPT for 1953-2001, Nikolay Antonovich Khizhnyak was rather versatile and many-sided. He successfully worked in different fields of science and technology. In present notes only his scientific and organizing activity in only one of directions of his work, connected to parametric Cherenkov radiation, is shortly described. His works in this field began in the middle of 50ies from theoretical prediction of existing of parametric Cherenkov radiation and continued till untimely death of Nikolay Antonovich in 2001. Significance of his early works is noted and main investigations of this radiation in the X-ray band that were performed in his department under his general supervision, immediate participation and support from the middle of 80ies are described briefly. Besides, some scientific works that are performing at IPENMA KIPT by his learners and colleagues after his death and developing his works are noted.

#### **ПАРАМЕТРИЧНЕ ЧЕРЕНКОВСЬКЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ – ВІД ПРОРОКУВАННЯ ДО ЗАСТОСУВАННЯ**

*A.V. Щагін*

Наукова діяльність доктора фізико-математичних наук, професора, співробітника ХФТІ Миколи Антоновича Хижняка протягом 1953-2001 років, була досить різнобічною й багатогранною. Коротко описана його наукова й організаторська робота тільки в одному з напрямків його діяльності, пов'язаному з параметричним черенковським випромінюванням. Роботи Миколи Антоновича в цьому напрямку почалися в середині 50-х років з теоретичного проорокування існування параметричного черенковського випромінювання й тривали аж до передчасної його кончини в 2001 році. Відзначена значимість його ранніх робіт і коротко перераховані основні дослідження властивостей параметричного випромінювання в рентгенівському діапазоні, що виконувалися в його відділенні під його загальним керівництвом, особистій участі й підтримці із середини 80-х років. Крім того, відзначені деякі роботи, що виконуються зараз в інституті учнями, співробітниками й колегами Миколи Антоновича.