

✓ Ба 253551

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

На правах рукописи

ЛОБКО АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ В КРИСТАЛЛАХ

(Специальность 01.04.16 - физика ядра  
и элементарных частиц)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

МИНСК - 1992

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте ядерных проблем при Белорусском государственном университете.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор В. Г. БАРЫШЕВСКИЙ

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор И. Д. ФЕРАНЧУК

кандидат технических наук  
А. Л. ХОЛМЕЦКИЙ

Ведущая организация: Институт ядерной физики  
(г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится 4 декабря 1992 года в 10 часов на заседании специализированного Совета КР 056.03.99 по присуждению ученой степени кандидата наук при Белгосунiversитете по адресу: 220080, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 4, гл. корпус, к. 206.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БГУ.

Автореферат разослан 28 10 1992 года.

Ученый секретарь специализированного  
Совета, кандидат физико-математических  
наук

*Тихомир*

В. В. Тихомиров

022010

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Изучение закономерностей излучения ультррелятивистских заряженных частиц в кристаллах имеет значение не только для фундаментальной науки, но и для решения широкого круга задач современной техники. Интерес к такого рода процессам обусловлен возможностью их использования в ядерной физике, физике высоких энергий, физике твердого тела, кристаллографии и т. д. Одним из относительно новых видов излучения релятивистских заряженных частиц в кристаллах является параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ), теоретически предсказанное в начале семидесятых годов. Некоторые свойства ПРИ для частного случая тонкого кристалла описываются формулами, полученными М. И. Тер-Микаэляном в рамках теории возмущений при решении задачи об излучении релятивистской заряженной частицы в трехмерной периодической среде. Строгая теория ПРИ с учетом динамической дифракции рентгеновского излучения была построена В. Г. Барышевским и И. Д. Феранчуком, Г. М. Гарибяном и Ян Ши. В работах Барышевского и Феранчука было показано, что возникновение ПРИ обусловлено тем, что в условиях динамической дифракции генерируемого излучения эффективный показатель преломления кристалла становится больше единицы даже для рентгеновского диапазона длин волн. Анализ свойств ПРИ показал, что данный механизм излучения может быть использован для измерения энергии заряженных частиц, исследования структуры кристаллов, создания источников квазимонохроматического рентгеновского излучения с плавно перестраиваемой частотой и т. п.

В 1984-1985 г. г. ПРИ впервые было экспериментально обнаружено в совместных экспериментах, выполненных на электронном синхротроне "СИРИУС" сотрудниками Белгосуниверситета и НИИ ядерной физики при

Томском политехническом институте. В дальнейшем это излучение также было обнаружено в экспериментах исследовательских групп Харьковского физико-технического и Ереванского физического институтов.

К настоящему времени выполнен целый ряд экспериментов по исследованию спектральных, угловых и энергетических характеристик ПРИ. Опыт исследований показал, что многократное рассеяние частиц и связанное с ним дифрагированное тормозное излучение в некоторых условиях вносит существенный вклад в суммарное излучение в рефлекс. Для определения возможностей практического применения ПРИ необходимо детально экспериментально изучить процесс генерации ПРИ в зависимости от типа кристалла, его ориентации и толщины, а также энергии заряженных частиц. Кроме того, все известные до сих пор экспериментальные результаты были получены с использованием электронных пучков, поэтому исследования ПРИ на пучках других заряженных частиц имеют несомненный интерес. Всестороннее исследование характеристик ПРИ, развитие технической базы экспериментов и модификация методики измерения позволит сделать конкретные шаги к реализации практического применения ПРИ. Указанные вопросы определяли направление исследований, выбор темы и актуальность диссертационной работы.

Цель настоящей диссертации состоит в экспериментальном исследовании основных характеристик параметрического рентгеновского излучения релятивистских заряженных частиц с разными массами в различных кристаллах, разработке аппаратуры и развитии методики регистрации ПРИ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые экспериментально обнаружено параметрическое рентгеновское излучение протонов с энергией 70 ГэВ в кристалле кремния, измерены его квантовый выход и угловое распределение;

- предложена и разработана методика регистрации параметрического рентгеновского излучения на выведенных пучках тяжелых заряженных частиц, основанная на временной селекции рентгеновских фотонов с использованием рентгеновского детектора на базе нового быстродействующего кристаллического сцинтиллятора  $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$ ;
- предложены и реализованы технические решения отдельных узлов экспериментальной установки для комплексного исследования характеристик параметрического рентгеновского излучения;
- подробно экспериментально исследованы спектральные и угловые характеристики параметрического рентгеновского излучения электронов с энергией 300-900 МэВ в кристаллах алмаза и кремния различной толщины и ориентации, изучено влияние многократного рассеяния частиц на характеристики излучения в рефлекс.

Практическая значимость работы. Полученные результаты могут быть использованы при создании источников квазиоднохроматического поляризованного рентгеновского излучения с плавно перестраиваемой частотой, исследовании структуры кристаллов и для измерения параметров пучков частиц сверхвысоких энергий. Оригинальные технические решения отдельных узлов установки могут использоваться в экспериментах по исследованию взаимодействия излучений с веществом.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Экспериментальное обнаружение параметрического рентгеновского излучения протонов с энергией 70 ГэВ в кристалле кремния и результаты исследования его основных характеристик;
2. Результаты экспериментального исследования параметрического рентгеновского излучения электронов с энергиями в диапазоне 300-900 МэВ в кристаллах алмаза и кремния;
3. Комплекс аппаратуры и методика измерения спектральных и угловых характеристик параметрического рентгеновского излучения на

выведенном пучке тяжелых заряженных частиц.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 8 работах, перечень которых приведен в конце автореферата.

Апробация. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на IV-ом (Рига, 1988) и V-ом (Симферополь, 1990) Всесоюзных совещаниях по когерентному взаимодействию излучения с веществом, 41-ом Совещании по ядерной спектроскопии и структуре ядра (Минск, 1991), XVIII-ом (Москва, 1988) и XIX-ом (Москва, 1989) Всесоюзных совещаниях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, научных семинарах НИИ ядерных проблем Белгосуниверситета.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы, включающего 89 наименований. Работа изложена на 136 страницах машинописного текста, содержит 4 таблицы и 36 рисунков.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы выбор темы и актуальность исследований, формулируются положения, выносимые на защиту, указывается научная новизна и практическая ценность работы, рассматривается структура диссертации.

В первой главе дан обзор работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию ПРИ, приводятся рабочие формулы, необходимые для планирования экспериментов и первоначальной интерпретации их результатов.

Во второй главе описаны экспериментальные методики и аппаратура для исследований ПРИ. Особое внимание уделено элементам установки для исследования ПРИ на выведенных пучках тяжелых заряженных частиц: гониометру, детектору ПРИ на базе быстродействующего кристаллического сцинтиллятора  $\text{YAlO}_3:\text{Ce}$  и

системе регистрации физической информации и управления установкой.

В п. 2.1 рассмотрена функциональная схема измерительного комплекса для исследования ПРИ, указаны основные требования к электронным, детектирующим и механическим узлам установки.

В п. 2.2 описана схема эксперимента с использованием электронного пучка синхротрона "СИРИУС" (НИИ ЯФ, г. Томск). Подробно рассмотрена методика истирки кристаллической мишени и приведены параметры применяемых детекторов ПРИ.

В п. 2.3 приводятся характеристики прецизионного автоматизированного гониометра, который был разработан на основе взаимно-сопрягаемых унифицированных модулей. Такой подход позволил получить гониометр имеющий точность, диапазоны углов поворота и кружность, определяемые конкретными условиями эксперимента.

Было разработано, изготовлено и испытано два типа модулей, обеспечивающих вращение вокруг вертикальной оси: модуль высокой точности и прецизионный модуль. Модуль высокой точности позволяет осуществлять поворот в диапазоне  $0^\circ \dots 360^\circ$  с шагом  $18''$  ( $0.085$  мрад) при использовании привода (шагового двигателя ДШИ 200-2) в стандартном режиме 200 шагов/об. Прецизионный модуль дает возможность получить угловой шаг  $2.5''$  ( $0.025$  мрад) в диапазоне  $\pm 6^\circ$  при использовании шагового двигателя и точность  $\pm 0.25''$  ( $0.00125$  мрад) при использовании двигателя ДПМ с редуктором (повышенная точность). В последнем случае для контроля используется оптический измеритель углов поворота, основанный на схеме интерферометра Майкельсона.

В п. 2.4 описан детектор ПРИ на основе быстродействующего кристаллического сцинтиллятора ( $\text{AlO}_3$ :Ce) имеющий, наряду с высокой эффективностью регистрации и хорошим разрешением в мягком рентгеновском диапазоне, временные характеристики, сравнимые с характеристиками детекторов, основанных на пластических

сцинтилляторах.

Необходимость в разработке такого детектора диктовалась существенным отличием методики регистрации ПРИ на выведенных пучках тяжелых заряженных частиц по сравнению с методикой, применяемой на внутреннем электронном пучке синхротрона "СИРИУС". Проблема детектирования ПРИ в этих условиях заключается в регистрации мягкого (10-100 кэВ) рентгеновского излучения малой интенсивности при наличии интенсивного высокоэнергетического (десятки ГэВ) фона гамма-излучения и заряженных частиц. Она была решена применением метода временной селекции полезных событий по совпадению временных отметок регистрируемых квантов ПРИ с импульсами сцинтилляционного телескопа канала, соответствующими факту прохождения заряженной частицы вдоль всей оси канала и через мишень.

Импульс сцинтилляции кристалла  $YAlO_3:Ce$  имеет одноэкспоненциальный характер с постоянной времени высвечивания  $\tau=30$  нс, что дает возможность получать высокие скорости счета, а малая длительность фронта световой вспышки  $\tau_f, 0.5$  нс позволяет осуществлять надежную временную привязку. Несмотря на относительно небольшое значение эффективного атомного номера  $Z_{eff}=36$ , эти кристаллы имеют в мягком рентгеновском диапазоне высокую эффективность регистрации. Световой выход кристаллов  $YAlO_3:Ce$  достигает 40% относительно  $NaI(Tl)$ . Детектор на базе  $YAlO_3:Ce$  и ФЭУ-85 позволил получить разрешение 28 % по  $\gamma$ -линии коллимированного источника  $^{241}Am$  с энергией  $E_\gamma=59.5$  кэВ.

В п. 2.5 рассмотрен управляющий вычислительный комплекс, предназначенный для сбора физической информации, управления механическими устройствами и первичной обработки результатов.

Измерительные, нормировочный и управляющий каналы формируются из электронных блоков в стандартах ВЕКТОР и КАМАК. Управление

экспериментом осуществляется микро-ЭВМ ДВК-3М с помощью специализированного программного обеспечения.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию спектральных и угловых характеристик ПРИ электронов с энергией 300–900 МэВ в кристаллах алмаза и кремния различной толщины и ориентации.

В п. 3.1 рассматриваются особенности спектров ПРИ, методика их обработки и нормировки. Частотные спектры ПРИ состоят из набора линий, положения которых определяются условием Брэгга:

$$\omega_B^{(n)} = \frac{\pi n}{d \sin \theta_B}; \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

где  $d$  – расстояние между кристаллографическими плоскостями. Измеренные пропорциональным газовым детектором ширины спектральных максимумов совпадают с разрешением системы регистрации. Перед обработкой спектры сглаживались методом скользящего среднего и производилось вычитание фоновой подложки. Далее спектры интегрировались и определялись экспериментальные выходы излучения в каждый рефлекс. Количество электронов, прошедших через мишень (нормировка), определялось с помощью квантометра по полному выходу энергии тормозного излучения в направлении вперед в конус с углом раствора  $\theta = \pi c^2 / E$ .

В этом же параграфе приведен результат измерения спектрального распределения рефлекса ПРИ с помощью кристалл-дифракционного спектрометра.

В п. 3.2 приводятся результаты измерения квантового выхода излучения электронов с энергией 900 МэВ в кристаллах кремния с толщинами  $L=150$  и  $400$  мкм. Угол наолюдения составлял  $2\theta_B=90^\circ$ , при этом реализовывались схемы дифракции Брэгга, Лауэ и предельно-асимметричной дифракции (ПАД),  $L_0=L/\cos\theta_B$ .

В Таблице 1 сведены результаты измерений и теоретических

расчетов частот и квантовых выходов ПРИ. Как можно видеть, расчетные значения квантовых выходов оказываются примерно в 2-3 раза большими, чем наблюдаемые величины, хотя качественное соответствие между теорией и экспериментом имеется. Этот факт может быть объяснен тем, что в большинстве рассматриваемых экспериментов не выполняется условие слабого многократного

ТАБЛИЦА 1.

Геом.	Рефл.	$L_0$ , мкм	$\omega_B^{\text{exp}}$ , кэВ	$\omega_B^L$ , кэВ	$N^L \cdot 10^8$ л.в./e <sup>-</sup>	$N^{\text{exp}} \cdot 10^8$ кв./e <sup>-</sup>	$\frac{N^L}{N^{\text{exp}}}$
ПАД	(440)	150	9.0±0.6	9.14	5.2	2.9±0.6	1.8
ПАД	(440)	400	9.1±0.6	9.14	13.63	10±2	1.4
ПАД	(660)	150	13.5±0.8	13.71	1.49	0.84±0.17	1.8
ПАД	(660)	400	13.5±0.8	13.71	3.93	1.9±0.4	2.1
Брэгг	(400)	212	6.9±0.6	6.46	32.6	19±6	1.7
Брэгг	(400)	566	6.8±0.6	6.46	32.6	23±4	1.4
Брэгг	(800)	212	13.1±0.7	12.92	7.9	2.0±0.7	3.9
Брэгг	(800)	566	13.0±0.7	12.92	12.8	4.2±0.9	3.0
Лауэ	(400)	212	6.3±0.6	6.46	32.8	6±2	5.4

рассеяния электронов в кристаллической мишени.

Энергетическая зависимость квантового выхода излучения в рефлекс (220) кристалла кремния толщиной  $L=1.3$  мм была измерена в геометрии Лауэ под углом  $2\theta_B=19^\circ$ . Энергия электронов варьировалась в диапазоне 300-900 МэВ. Наблюдалось существенное увеличение выхода излучения в районе 400-600 МэВ, обусловленное сильным многократным рассеянием.

В п.3.3 рассматриваются характерные особенности формы углового распределения ПРИ и методика его экспериментального измерения.

Основной особенностью углового распределения является обращение в нуль интенсивности излучения точно в направлении  $k_B$ . Кроме того, угловое распределение рефлекса ПРИ существенно асимметрично. Согласно теории, форма распределения изменяется при

варьировании угла дифракции от симметричной воронки при  $\theta_B \rightarrow 0$  до двух отдельных пиков в случае  $\theta_B \sim \pi/4$ , когда излучение становится полностью поляризованным вдоль оси  $Y$ , перпендикулярной плоскости дифракции.

В п. 3.4 приведены результаты измерений угловых распределений ПРИ электронов в кристаллах алмаза и кремния.

Были измерены вертикальные и горизонтальные одномерные распределения рефлекса (400) алмаза толщиной 350 мкм в геометрии ПАД при энергиях электронов 370, 500, 900 МэВ. При сканировании щели в вертикальном направлении в угловых распределениях ПРИ наблюдаются два пика, разделенных плоскостью  $(\vec{k}, \vec{\tau})$ , где  $\vec{\tau}$  - вектор обратной решетки плоскостей (400), и отстоящих друг от друга на угол  $\Delta\theta_y$ . При сканировании в горизонтальном направлении наблюдается один пик, полуширина которого равна  $\Delta\theta_x = 9 \pm 1.2$  мрад, практически не зависит от энергии электронов и хорошо согласуется с теоретическим значением. Вертикальные же распределения шире теоретических и величина расщепления  $\Delta\theta_y$  с уменьшением энергии электронов также уменьшается, что является несколько неожиданным в рамках теории, использованной для интерпретации. Для энергии электронов 900 МэВ  $\Delta\theta_y$  составляет величину  $20 \pm 2.6$  мрад, для 500 и 370 МэВ -  $17 \pm 2.6$  мрад и  $14 \pm 1.3$  мрад соответственно. Зависимость углового распределения от энергии электронов по-видимому связана с перераспределением вкладов ПРИ и дифрагированного тормозного излучения (ДТИ) в интенсивность излучения в рефлекс вблизи порогового значения этой энергии, равной в этом случае 369 МэВ.

Условия, в которых интенсивность ДТИ сравнима, а в некоторых случаях и значительно превышает интенсивность ПРИ, были реализованы в экспериментах по измерению угловых распределений рефлекса (220) кристаллов кремния толщиной 375 и 1300 мкм под углом  $2\theta_B = 19^\circ$  при энергиях электронов 275-900 МэВ. В таблице 2

приведены значения полуширин угловых распределений  $\Delta\theta_{x,y}$ . В этих случаях экспериментальные полуширины на 30-40 % меньше теоретических. Это расхождение превышает ошибки измерений и указывает на доминирование ДТИ в этих условиях.

ТАБЛИЦА 2.

Толщина, мкм	375			1300		
	275	300	400	350	400	500
$\Delta\theta_x^{\text{exp}}$ , мрад	9.1±1.0	-	-	12.1±1.1	11.8±1.2	9.1±1.0
$\Delta\theta_x^t$ , мрад	12.7	-	-	17.1	15.2	13.3
$\Delta\theta_y^{\text{exp}}$ , мрад	9.5±1.0	9.1±1.0	8.8±0.9	12.7±1.3	12.8±1.4	11.9±1.2
$\Delta\theta_y^t$ , мрад	13.8	13.2	12.0	18.1	16.5	14.3
$\frac{(\text{теор})}{(\text{эксп})}_x$	1.40	-	-	1.41	1.30	1.46
$\frac{(\text{теор})}{(\text{эксп})}_y$	1.45	1.45	1.36	1.43	1.30	1.20

Угловое распределение ПРИ определяется наложением угловых распределений фотонов с  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризациями. Поляризацию ПРИ можно изучать, измеряя зависимость интенсивности излучения от азимутального угла  $\phi$ . При угле излучения  $2\theta_p = 90^\circ$  ПРИ полностью  $\sigma$ -поляризовано и азимутальное распределение интенсивности пропорционально квадрату косинуса азимутального угла. Экспериментальное азимутальное распределение было измерено в рефлексе (400) алмаза толщиной 350 мкм под углом  $90^\circ$  в геометрии ПАД. Полученное распределение хорошо согласуется с расчетной кривой, что подтверждает теоретические выводы о высокой степени поляризации ПРИ.

В п. 3.5 обсуждается влияние многократного рассеяния частиц на характеристики ПРИ.

Влияние многократного рассеяния (МР) на ПРИ существенно различается при слабом и сильном МР. Количественно степень МР выражается через соотношение между толщиной кристалла  $L$  и когерентной длиной тормозного излучения (ТИ)  $L_{\text{ТИ}} = \left[ \omega \cdot (\theta'_s)^2 / 4 \right]^{-1/2}$ , где  $(\theta'_s)^2$  - среднеквадратичный угол МР заряженной частицы на единице пути в веществе. В случае  $L \ll L_{\text{ТИ}}$  влияние МР на ПРИ сводится к появлению в интенсивности генерируемого излучения аддитивной добавки, обусловленной тормозным механизмом излучения. В противоположном случае, когда  $L > L_{\text{ТИ}}$ , МР, кроме того, существенно изменяет параметры самого ПРИ.

Анализ экспериментальных результатов показывает, что теория ПРИ с феноменологическим учетом влияния МР в области энергий частиц, превышающих пороговую энергию  $E_0$ , находятся в хорошем согласии с экспериментом не только для  $L \ll L_{\text{ТИ}}$ , но и для  $L \approx L_{\text{ТИ}}$ .

В четвертой главе представлены экспериментальные результаты, подтверждающие обнаружение ПРИ протонов с энергией 70 ГэВ в кристалле кремния.

В п. 4.1 рассмотрены характеристики ПРИ, позволяющие прогнозировать его возможное использование в качестве физического эффекта, пригодного для измерения энергии заряженных частиц в области сверхвысоких энергий, а также для получения информации о качественном составе интенсивных пучков.

В п. 4.2 приводятся результаты расчетов значений квантовых выходов ПРИ в кристаллах кремния и германия для основных рефлексов на системах плоскостей (111) и (220) для пучков 14-го канала ускорителя ИФВЭ (г. Протвино): электронов с энергией 26 ГэВ (интенсивность  $\sim 10^4$   $e^-/\text{сброс}$ ),  $\pi^-$ -мезонов с энергией 40 ГэВ ( $\sim 10^6$   $\pi^-/\text{сброс}$ ) и протонов с энергией 70 ГэВ ( $\sim 1-5 \cdot 10^6$   $p^+/\text{сброс}$ ). На

основании этих расчетов и результатов методического сеанса по измерению фоновых условий на пучке  $\pi^-$ -мезонов определена оптимальная схема эксперимента.

В п. 4.3 приводится схема опыта по наблюдения ПРИ тяжелых заряженных частиц, рассмотрены параметры мишени и методика ее юстировки.

В п. 4.4 изложены результаты экспериментального наблюдения ПРИ протонов с энергией 70 ГэВ в кристалле кремния. Спектры были получены при генерации ПРИ на плоскостях (220) для двух углов Брэгга  $2\theta_{B_1} = 5.7^\circ$  и  $2\theta_{B_2} = 4.7^\circ$ , при этом  $E_1 \approx 32$  кэВ и  $E_2 \approx 39$  кэВ. Зарегистрированные значения энергий ПРИ хорошо совпадают с результатами теоретических расчетов ( $E_1^t = 32.5$  кэВ,  $E_2^t = 39.7$  кэВ).

По спектрам были определены квантовые выходы ПРИ, которые составили  $N_1 = (7.87 \pm 1.57) \cdot 10^{-9}$  квантов/ $p^+$  и  $N_2 = (1.77 \pm 0.35) \cdot 10^{-9}$  квантов/ $p^+$ . Теоретический расчет дает соответствующие значения  $N_1^t = 8.42 \cdot 10^{-9}$  квантов/ $p^+$  и  $N_2^t = 1.10 \cdot 10^{-9}$  квантов/ $p^+$ . Угловое распределение измерялось под углом  $2\theta_B = 4.6^\circ$  относительно направления скорости протонов. Экспериментальное значение ширины углового распределения на полувысоте  $\Delta\theta_{exp} = 50 \pm 7$  мрад, теоретическая величина  $\Delta\theta_t = 73$  мрад.

Приведенные результаты показывают, что в рассматриваемых экспериментах действительно наблюдалось ПРИ протонов, при этом значения частот излучения, квантовых выходов и полуширины углового распределения удовлетворительно согласуются с предсказаниями теории.

В п. 4.5 указаны направления модификации экспериментальной установки и методики измерений, которые дадут возможность более детально исследовать ПРИ тяжелых заряженных частиц, что позволит в дальнейшем шире использовать его в современной физике высоких энергий.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертации, состоящие в следующем:

- на основе расчета оптимальной геометрии генерации и экспериментальной оценки фоновых условий проведено обоснование возможности постановки экспериментов по обнаружению ПРИ тяжелых заряженных частиц на пучках 14-го канала ускорителя ИФВЭ,

- предложена и реализована методика регистрации ПРИ на выведенном пучке тяжелых заряженных частиц методом временной селекции с использованием детектора мягкого рентгеновского излучения на основе быстродействующего сцинтилляционного кристалла  $YAlO_3:Ce$ ;

- разработана и создана автоматизированная экспериментальная установка для комплексного исследования спектральных и угловых характеристик ПРИ;

- впервые экспериментально обнаружено ПРИ протонов с энергией 70 ГэВ, генерируемое на плоскостях (220) в кристалле кремния, определены его частоты и квантовые выходы для двух углов наблюдения и измерено угловое распределение, на основе сравнения экспериментальных величин с теоретически рассчитанными сделан вывод о достоверности обнаружения ПРИ протонов в кристалле кремния;

- рассмотрены возможности применения ПРИ для измерения параметров пучков частиц сверхвысоких энергий и необходимые направления модификации установки и методики измерений, показана перспективность использования ПРИ для определения качественного состава интенсивных пучков релятивистских заряженных частиц;

- экспериментально исследованы спектральные и угловые характеристики ПРИ электронов с энергией 300-900 МэВ в кристаллах алмаза и кремния различной толщины в разных геометриях дифракции, установлено существенное влияние многократного рассеяния электронов на параметры излучения в рефлекс при энергиях частиц близких к пороговым значениям;

- экспериментально измерено спектральное распределение рефлекса ПРИ с помощью кристалл-дифракционного спектрометра, использование этого метода регистрации позволит исследовать ПРИ на импульсных электронных ускорителях с коротким ( $\sim 1$  нс) временем сброса пучка на мишень;
- впервые экспериментально получена азимутальная зависимость интенсивности ПРИ, подтверждающая высокую степень его линейной поляризации;
- выполнены расчеты теоретических значений измеряемых величин, проведено сравнение эксперимента и теории ПРИ с феноменологическим учетом многократного рассеяния заряженных частиц в кристаллах, на основе систематизации экспериментальных данных сделан вывод об условиях количественного и качественного совпадения эксперимента и использованной теории, указаны результаты, не поддающиеся интерпретации в рамках применяемой теории.

Проведенный цикл исследований подтверждает возможность применения ПРИ для разработки источника квазимонохроматического рентгеновского излучения с плавно перестраиваемой частотой и высокими значениями спектрально-угловой плотности и степени поляризации. Использование ПРИ для измерения параметров интенсивных пучков заряженных частиц позволит расширить набор методов идентификации элементарных частиц в физике высоких энергий.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Адищев Ю. Н., Апанасевич А. П., Афанасенко В. П., . . . ., Лобко А. С. и др. Угловые распределения параметрического рентгеновского излучения монокристалла алмаза. - Тезисы докл. IV Всес. совещ. по когерентному взаимод. излучения с веществом, М., Изд-в

ВНИИТРИ, 1988, с. 338.

2. Адищев Ю. Н., Апанасевич А. П., Афанасенко В. П. ...., Лобко А. С. и др. Экспериментальное исследование параметрического рентгеновского излучения кристаллов кремния, кварца и алмаза. - Материалы XVIII Всес. совещ. по физике взаимодей. заряж. частиц с кристаллами, М., Изд-во МГУ, 1989, с. 99-101.
3. Адищев Ю. Н., Апанасевич А. П., Афанасенко В. П. ...., Лобко А. С. и др. Угловые распределения параметрического рентгеновского излучения монокристалла алмаза. - Изв. ВУЗ. Физика, 1989, №8, с. 112-114.
4. Афанасенко В. П., Барышевский В. Г., Зуевский Р. Ф. ...., Лобко А. С. и др. Изучение влияния многократного рассеяния на характеристики параметрического рентгеновского излучения. - Тезисы докл. XIX Всес. совещ. по физике взаимодей. заряж. частиц с кристаллами, М., Изд-во МГУ, 1989, с. 80.
5. Барышевский В. Г., Давыденко А. Г., Коржик М. В. ...., Лобко А. С. и др. Быстродействующие сцинтилляционные кристаллы для детекторов ядерных излучений. - Письма в ЖЭФ, 1990, т. 16, в. 22, с. 75-78.
6. Барышевский В. Г., Коржик М. В., Ливниц М. Г., Лобко А. С. и др. Быстродействующий сцинтилляционный детектор рентгеновского и гамма-излучения. - Тезисы докл. V Всес. совещ. по когерентному взаимодей. изл. с веществом, М., Изд-во ВНИИТРИ, 1990, с. 153-154.
7. Барышевский В. Г., Коржик М. В., Ливниц М. Г., Лобко А. С. и др. Эффективные сцинтилляционные монокристаллические материалы для быстродействующих детекторов ядерных излучений. - Тезисы докл. 41-го Совещ. по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Л., Наука, 1991, с. 444.
8. Афанасенко В. П., Барышевский В. Г., Зуевский Р. Ф., Лобко А. С. и

др. Обнаружение параметрического рентгеновского излучения протонов. - Письма в ЖЭТФ, 1991, т. 54, в. 9, с. 493-495.

253551



Подписано к печати .10.1992 г. Заказ 644 . Тираж 100.  
Формат 60x84/16. Объем 1.0 п. л.  
Отпечатано на ротапринте ИВЦ Минфина РБ. Минск, ул. Опанского, 17.



Бел. эдизея  
Дугамаг.



80000004 16 17 18