

2 Ag 100198

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

УДК 548.0.539

**Луговская Ольга Михайловна**

**Характеристики параметрического рентгеновского излучения  
в условиях динамической дифракции  
и многократного рассеяния**

Специальность

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Минск – 2003 г.

Работа выполнена

в Научно-исследовательском учреждении  
Институт ядерных проблем  
Белгосуниверситета.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,  
профессор Барышевский В.Г.,  
директор Института ядерных проблем  
Белгосуниверситета

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор Феранчук И.Д.,  
кафедра теоретической физики  
Белгосуниверситета,

кандидат физико-математических наук  
Галынский М.В.,  
лаборатория сильных взаимодействий  
Института физики им. Б.И. Степанова  
НАН Беларуси,

Оппонирующая организация:

Национальный центр физики частиц  
и высоких энергий Белгосуниверситета

Защита состоится « 20 » января 2004 г. в 14 часов 00 минут на заседании  
Совета по защите диссертаций Д 01.05.02 при Институте физики  
им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси по адресу:  
220072, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 68, тел. 284-17-17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики  
им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси.

Автореферат разослан "10" декабря 2003 года

Ученый секретарь Совета  
по защите диссертаций  
кандидат физ.-мат. наук



В.С. Отчик

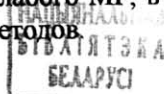
2 Аг 100198 1

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

Параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ) обладает рядом замечательных свойств: имеет узкую пространственную направленность, квазимонохроматический характер, оно поляризовано и обладает высокой спектральной интенсивностью, причем его направление и энергию можно легко изменять в широких пределах простым изменением ориентации кристалла. Мощный источник на основе ПРИ, обладающий монохроматичностью  $10^{-3}$ , направленностью  $10^{-6}$  срад и спектрально-угловой плотностью 0,11 фотон/(эВ·срад·частица), с плавно перестраиваемой частотой, может получить широкое применение в биологии, физике твердого тела, микроэлектронике, медицине и т.д.

За последнее десятилетие появилось несколько теоретических работ, посвященных ПРИ (см., например, [1 – 4]), выполнен целый ряд экспериментов (см., например [5 – 10]). Однако, несмотря на интенсивные исследования в этой области, остается нерешенным целый ряд проблем. В частности, недостаточно изучена область применимости динамической теории, а также ее согласование с уже имеющимися экспериментальными данными, да и сам вопрос необходимости применения динамического подхода вызывает споры. До сих пор все экспериментальные измерения ПРИ были проведены для максимумов, расположенных под большими углами относительно направления распространения заряженных частиц. ПРИ под малыми углами относительно вектора скорости заряженных частиц (пик излучения вперед) до сих пор экспериментально не обнаружено. Теоретическое описание пиков излучения вперед возможно только в рамках динамического подхода. Для подготовки экспериментов по их обнаружению необходимо тщательно проанализировать характеристики ПРИ с учетом поведения показателя преломления среды. Феранчуком и Ивашиным [11] в рамках кинематического подхода феноменологически было учтено влияние многократного рассеяния (МР) и поглощения на процессы излучения. Однако область применения такого подхода ограничена случаем слабого МР. Существующие большие расхождения результатов экспериментов [8, 9] с теорией [11] связаны с неправомерностью ее применения для случая сильного МР. Строгая теория влияния многократного рассеяния заряженных частиц на характеристики ПРИ была построена в работе [12], однако простые аналитические выражения для интенсивности ПРИ в различных геометриях эксперимента могут быть получены лишь в предположении слабого МР, в противном случае требуется использование численных методов.



Другой механизм дифракционного излучения – дифракционное излучение осциллятора (ДИО), несмотря на то, что был предсказан еще в 1976 году, до сих пор экспериментально не наблюдался. Для выработки рекомендаций по его экспериментальному обнаружению необходимо доскональное исследование «тонкой структуры», то есть спектрально-угловых, угловых и частотных распределений излучения на основе динамического подхода.

### **Цель и задачи исследования**

Цель диссертационной работы состоит в дальнейшей разработке и применении методов динамической теории исследования характеристик ПРИ и ДИО в различных геометриях и кристаллических мишенях и подразумевает решение следующего круга задач:

1. Применение динамической теории ПРИ для объяснения экспериментальных результатов, полученных в схеме дифракции по Брэггу.
2. Расчет спектрально-угловых и угловых характеристик ПРИ в максимуме под малыми углами относительно направления движения заряженных частиц. Выработка рекомендаций для экспериментального обнаружения ПРИ в этой геометрии.
3. Развитие теории ПРИ с учетом многократного рассеяния. Интерпретация экспериментальных данных по наблюдению ПРИ в толстых кристаллах.
4. Расчет характеристик ДИО. Выработка рекомендаций для экспериментального обнаружения ДИО.

### **Научная новизна**

1. Впервые рассчитаны с учетом динамических эффектов и вкладов различных механизмов генерации спектрально-угловые и угловые распределения ПРИ в максимуме под большим углом относительно направления движения заряженных частиц для схемы дифракции по Брэггу, что позволило впервые получить хорошее согласие теории с экспериментальными данными для геометрии обратного отражения.
2. Впервые получены спектрально-угловые и угловые распределения ПРИ в пике излучения под малыми углами относительно направления движения заряженных частиц, на основе которых были сформулированы условия экспериментального обнаружения ПРИ на фоне других типов излучения.
3. Впервые проведен строгий численный анализ влияния многократного рассеяния на спектрально-угловые, спектральные и угловые распределения ПРИ в толстых кристаллах. Выполнен расчет вкладов тормозного, переходного (ПИ) излучений и интерференции ПРИ и ПИ в формирование дифракционных максимумов. Разрабо-

тан алгоритм и на его основе создан пакет программ для расчета спектрально-угловых, угловых и частотных распределений, а также интегрального числа квантов ПРИ в случае сильного многократного рассеяния. Разработана программа, позволяющая в диалоговом режиме проводить анализ влияния многократного рассеяния на характеристики ПРИ и вклада различных механизмов излучения в формирование дифракционных максимумов в зависимости от различных параметров эксперимента.

4. Впервые получены выражения для спектрально-угловой и угловой интенсивности дифракционного излучения осциллятора, позволившие провести анализ характеристик ДИО и выработать предложения для его экспериментального обнаружения.

### **Значимость полученных результатов**

Проведенный анализ и интерпретация экспериментов по наблюдению ПРИ в геометрии обратного отражения свидетельствует о том, что адекватно описать механизм генерации ПРИ возможно только в рамках динамического подхода.

На основании проведенных расчетов характеристик ПРИ в пике вперед выработаны рекомендации для постановки эксперимента по его обнаружению. Наблюдение динамических максимумов под малыми углами относительно вектора скорости заряженных частиц позволит однозначно доказать квазичеренковскую природу ПРИ.

Созданный программный комплекс для расчета характеристик излучения в различных геометриях и мишенях может быть использован для выбора оптимальных (с точки зрения максимальной интенсивности) параметров эксперимента по наблюдению ПРИ и других типов излучения.

Полученные результаты для интенсивностей ПРИ в толстых кристаллах и зависимостей интенсивностей излучения от энергии заряженных частиц (случай сильного влияния многократного рассеяния) позволили описать многочисленные эксперименты, проведенные различными группами и до настоящего времени не получившие теоретической интерпретации. Это дает основания для утверждения, что реализованная в программном комплексе теория адекватно описывает влияние многократного рассеяния, а разработанная программа и в дальнейшем может быть использована для интерпретации экспериментов по наблюдению ПРИ в случае сильного многократного рассеяния.

Полученные аналитические выражения для углового распределения ДИО позволили выработать предложения для постановки эксперимента по обнаружению этого типа излучения. Кроме того, были сформулированы предложения по практическому применению ДИО.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Объяснение экспериментальных данных по наблюдению параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) в геометрии обратного отражения, данное на основе динамической теории ПРИ.
2. Предложения по возможности экспериментального обнаружения ПРИ под малыми углами относительно направления движения заряженных частиц, выработанные на основе расчетов интенсивности ПРИ в рамках динамической теории.
3. Интерпретация результатов экспериментов по исследованию влияния многократного рассеяния на характеристики ПРИ и энергетической зависимости выхода ПРИ в толстых кристаллах, проведенная на основе численного моделирования.
4. Выражения для спектрально-углового и углового распределений дифракционного излучения осциллятора (ДИО). Предложения по экспериментальному обнаружению ДИО.
5. Алгоритм определения оптимальных условий экспериментов по наблюдению ПРИ и ДИО, реализованный в виде пакета программ, включающего модули для расчета поляризуемостей кристалла, спектрально-угловых и интегральных характеристик ПРИ, ДИО, переходного, резонансного и тормозного излучения, позволяющих рассчитывать интенсивности излучения в различных геометриях, кристаллах и при различном влиянии и вкладе многократного рассеяния.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные результаты работы докладывались на XXXI Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами в Москве 28 – 30 мая 2001 г, на II Международной Конференции по динамическому рассеянию рентгеновских лучей в кристаллах с динамическими и статическими искажениями (Киев, 1990 г.), на межреспубликанской научно-практической конференции «Актуальные проблемы информатики: Математическое, программное и информационное обеспечение» (Минск, 1990 г.), на семинаре в Институте ядерной физики в г. Майнце (3 – 4 января 2000 г.), на научных семинарах НИИ ядерных проблем Белгосуниверситета.

### **Публикации**

Материалы, положенные в основу диссертации, опубликованы в 14 работах [14 – 27], в том числе 6 из них – в научных журналах. Общее число страниц опубликованных материалов – 83.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, трех приложений и списка литературы, включающего 161 наименование. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 7 таблиц и 54 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В **первой главе** дан обзор работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию ПРИ и ДИО, очерчивается круг вопросов и проблем, не получивших в этих работах исчерпывающего решения.

**Вторая глава** посвящена детальному количественному исследованию характеристик ПРИ, испускаемого под большим углом относительно направления движения заряженных частиц для схемы дифракции по Брэггу, в частности, в геометрии обратного отражения.

Для численного анализа интенсивности ПРИ требуется знание точных значений параметров рассеяния на кристаллах излучения с произвольной длиной волны (для определения показателей преломления в условиях динамической дифракции). С этой целью в работе предложены способы расчета поляризуемостей кристаллов для дифракции рентгеновского излучения непрерывного спектра в диапазоне длин волн  $0,1 - 10 \text{ \AA}$ .

Спектрально-угловое распределение ПРИ с вектором поляризации  $\vec{e}_{\tau s}$  (индекс  $s = 1$  соответствует  $\sigma$ -поляризации,  $s = 2$  –  $\pi$ -поляризации), генерируемого заряженной частицей при пролете кристаллической пластинки в направлении, определяемом волновым вектором  $\vec{k}_\tau$  (в максимум под углом  $2\theta_B$  относительно направления движения частицы,  $\theta_B$  – угол между вектором скорости частицы  $\vec{v}$  и кристаллографическими плоскостями, на которых дифрагирует испускаемое рентгеновское излучение) в двухволновом приближении для схемы дифракции по Брэггу, дается выражением [1]

$$\frac{d^2 N_s}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2 Q^2 \omega}{4\pi^2 \hbar c^3} (\vec{e}_{\tau s} \vec{v})^2 \left| \sum_{\mu=1,2} \gamma_{\mu s}^\tau \left[ \frac{1}{\omega - \vec{k}_\tau \vec{v}} - \frac{1}{\omega - \vec{k}_{\mu\tau s} \vec{v}} \right] \left[ e^{\frac{i(\omega - \vec{k}_{\mu\tau s} \vec{v})}{c} L_0} - 1 \right] \right|^2, \quad (1)$$

$$\gamma_{1(2)s}^\tau = \frac{-\beta_1 C_s \chi_\tau}{(2\varepsilon_{2(1)s} - \chi_0) - (2\varepsilon_{1(2)s} - \chi_0) \exp\left(i \frac{\omega}{c\gamma_0} (\varepsilon_{2(1)s} - \varepsilon_{1(2)s}) L\right)}, \quad (2)$$

где  $|d\vec{O}| = \sin \vartheta d\vartheta d\varphi$ ;  $\omega$ ,  $\vartheta$ ,  $\varphi$  – частота, полярный и азимутальный углы излучения;  $eQ$  – заряд частицы;  $\vec{k}_\tau = \vec{k} + \vec{\tau}$ ,  $\vec{k}$  – волновой вектор фотона, распространяющегося вдоль направления движения заряженных частиц,  $\vec{\tau}$  – вектор обратной решетки, определяющий семейство кристаллографических плоскостей, на которых осуществляется дифракция ( $|\vec{\tau}| = 2\pi/d$ ,  $d$  – межплоскостное расстояние),  $\vec{e}_{\tau 1} \parallel [\vec{k}_\tau \vec{\tau}]$ ,  $\vec{e}_{\tau 2} \parallel [\vec{k}_\tau \vec{e}_{\tau 1}]$ ,  $\vec{k}_{\mu\tau s} = \vec{k} + \vec{\tau} + \frac{\omega}{c\gamma_0} \varepsilon_{\mu s} \vec{N}$ ,  $\vec{N}$  – единичный вектор нормали к входной поверхности кристаллической пластинки, направленный внутрь кристалла,  $C_s = \vec{e}_s \vec{e}_{\tau s}$ ,

$$\varepsilon_{\mu s} = \frac{1}{4} \left\{ \alpha_B \beta_1 + \chi_0 (\beta_1 + 1) \pm \sqrt{[-\alpha_B \beta_1 + \chi_0 (\beta_1 - 1)]^2 + 4\beta_1 \chi_\tau^s \chi_{-\tau}^s} \right\},$$

$\chi_0$ ,  $\chi_\tau^s$ ,  $\chi_{-\tau}^s$  – фурье-компоненты комплексных поляризуемостей кристалла,  $\alpha_B = \frac{2\vec{k}\vec{\tau} + \tau^2}{k^2}$  – параметр, характеризующий отклонение от

точного выполнения условия Брэгга,  $\beta_1 = \gamma_0 / \gamma_1$ ,  $\gamma_0 = \vec{n}_\gamma \vec{N}$ ,  $\vec{n}_\gamma = \frac{\vec{k}}{k}$ ,

$\gamma_1 = \vec{n}_{\gamma\tau} \vec{N}$ ,  $\vec{n}_{\gamma\tau} = \frac{\vec{k} + \vec{\tau}}{|\vec{k} + \vec{\tau}|}$ ,  $L_0 = L / \gamma_1$  – толщина кристалла вдоль направления движения заряженной частицы.

Выражение (1) включает в себя члены, описывающие излучение, возникающее при пересечении заряженной частицей границы вакуум-кристалл (называемое во многих работах дифракционным переходным излучением (ДПИ)), излучение, генерируемое внутри кристаллической пластинки («объемное излучение»), а также их интерференцию.

В геометрии дифракции по Брэггу условие Вавилова-Черенкова  $1 - \beta n'(\omega, \vec{k}) \cos \vartheta = 0$  ( $\beta = v/c$ ,  $n'$  – реальная часть показателя преломления) может выполняться на обеих дисперсионных ветвях. Возможность эффекта полного отражения, обусловленного существованием неоднородной волны в кристалле, требует при расчете интенсивности излучения учета обоих центров распространения. В такой ситуации для получения углового распределения ПРИ необходимо проводить численное интегрирование выражения (1) вблизи брэгговской частоты

$$\omega_B = \frac{\pi c}{d \sin \theta_B}.$$



В спектрально-угловом распределении ПРИ наряду с пиком на углах и частотах, для которых коэффициент отражения рентгеновского излучения на кристаллографических плоскостях  $|\gamma_{1(2)s}^r|^2$  максимален, имеется квазичеренковский максимум – пик на углах и частотах, для которых выполняется условие Вавилова-Черенкова. На малых полярных углах  $\vartheta$  основной вклад в угловую интенсивность ПРИ вносит излучение, связанное с первым механизмом генерации. Вклад в интенсивность излучения квазичеренковского механизма с увеличением полярного угла возрастает, а на углах  $\vartheta > \vartheta_{ph} = \gamma^{-2} - \chi'_0$  ( $\gamma$  – лоренц-фактор заряженной частицы,  $\chi'_0$  – реальная часть поляризуемости) становится определяющим.

Частным случаем геометрии дифракции по Брэггу является геометрия «обратного отражения». Было проведено сравнение полученных на основании теории спектрально-угловых и угловых распределений ПРИ в геометрии обратного отражения и результатов экспериментов, поставленных на микротроне в Институте ядерной физики в Майнце [5], а также на ускорителе в Дармштадте [6]. Результаты численных расчетов угловых интенсивностей ПРИ хорошо совпали с экспериментальными данными, что подтвердило адекватность используемой теоретической модели, построенной на основе динамического подхода, а также с учетом вклада «вакуумного излучения» ДПИ и его интерференции с ПРИ.

В третьей главе проводится детальное количественное рассмотрение спектрально-угловых и угловых характеристик рентгеновского излучения, генерируемого в кристаллах под малыми углами относительно направления движения заряженных частиц. Обсуждаются возможности экспериментального обнаружения ПРИ в максимуме вперед, приводятся возможные схемы экспериментов и указываются необходимые параметры детектора. С целью определения экспериментальных условий обнаружения ПРИ проведено тщательное исследование характеристик излучения с учетом особенностей поведения показателя преломления.

Генерация ПРИ в кристалле в пик вперед всегда сопровождается рентгеновским переходным излучением (ПИ). ПИ генерируется почти в ту же область частот и углов, что и ПРИ.

Как показали расчеты, в спектрально-угловых распределениях излучения имеются ярко выраженные максимумы, соответствующие углам и частотам, на которых выполняется условие Вавилова-Черенкова.

В геометрии дифракции по Лауэ на углах излучения  $\theta_0 \sim \sqrt{|\chi'_0|/3}$  спектрально-угловая интенсивность ПРИ в максимуме превышает интенсивность переходного излучения более чем на два порядка, при этом ширина максимума составляет всего  $(10^{-6} \div 10^{-7}) \times \omega_B$ . Сравнивая угловые распределения излучения в кристалле в условиях дифракции и в аморфной пластинке (или в кристалле вдали от условий дифракции), полученные для узкого спектрального диапазона излучения  $\sim 10^{-4} \times \omega_B$ , было установлено, что на больших полярных углах  $\geq \theta_0$  интенсивность излучения в условиях дифракции начинает превышать интенсивность переходного излучения.

Для схемы дифракции по Брэггу возможно выбрать такую геометрию измерения, в которой угловое распределение излучения при выполнении условий дифракции существенным образом отличается от излучения вдали от условий дифракции. Однако такой результат, как и для геометрии по Лауэ, можно получить только для узкого спектрального диапазона, порядка  $10^{-4} \times \omega_B$ .

Таким образом, для обнаружения ПРИ на фоне сильного сигнала переходного излучения необходимы детекторы с очень высоким энергетическим разрешением. Все неудачные попытки наблюдения ПРИ под малыми углами относительно направления движения заряженных частиц (например, [10]) объясняются тем, что в экспериментах измерялся квантовый выход ПРИ, причем энергетическое разрешение детектора не превышало 1 %.

**Четвертая глава** посвящена детальному количественному рассмотрению спектрально-угловых, угловых, спектральных характеристик рентгеновского излучения, генерируемого в толстых кристаллах, с учетом многократного рассеяния, выполненному с использованием численного моделирования. Анализируется вклад различных механизмов излучения в формирование дифракционных максимумов при различных значениях параметров эксперимента. Проведены анализ результатов экспериментов по наблюдению ПРИ и сравнение их с результатами теоретических расчетов, выполненных со строгим учетом многократного рассеяния и вклада всех механизмов излучения. Показано, что теория хорошо объясняет данные экспериментов.

Характеристики ПРИ существенно зависят от соотношения между толщиной кристалла вдоль направления движения заряженной

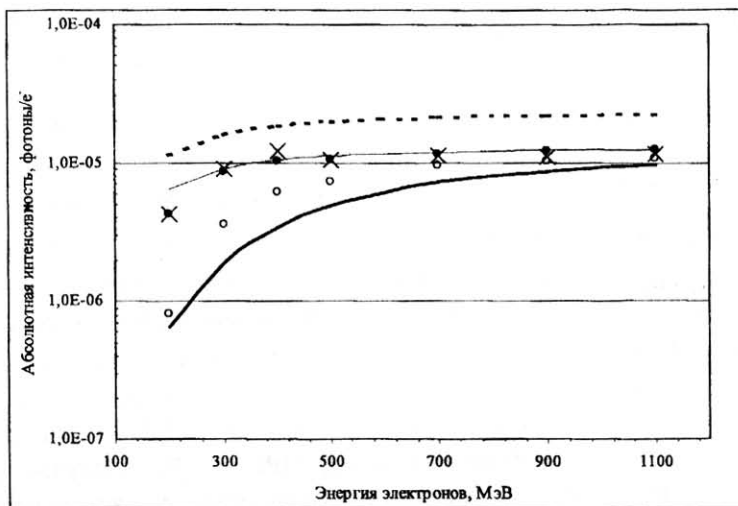
частицы  $L_0$  и когерентной длиной тормозного излучения  $L_{Br} \cong \sqrt{\frac{4c}{\omega\theta_s^2}}$

(здесь  $\overline{\theta_s^2}$  – средний квадрат угла многократного рассеяния заряженной частицы на единицу пути). Теория ПРИ с феноменологическим учетом влияния МР в области энергий частиц, превышающих пороговую энергию  $E_{tr} = mc^2\gamma_{tr}$  ( $\gamma_{tr} = |\chi'_0|^{-1/2}$ ), хорошо согласуется с результатами экспериментов только при толщине кристаллической пластинки  $L_0 \ll L_{Br}$ . В этом случае влияние многократного рассеяния сводится к появлению в интенсивности генерируемого рентгеновского излучения небольшой добавки, обусловленной тормозным механизмом излучения, а также учитывается влияние МР на фазу ПРИ и пренебрегается интерференция между ПРИ и ТИ. В случае, когда  $L_0 > L_{Br}$ , многократное рассеяние существенно меняет параметры самого ПРИ.

В большинстве проведенных экспериментов (см., например, [7, 8]) условие малости многократного рассеяния не выполнялось, поэтому возникла необходимость в последовательной интерпретации результатов экспериментов, условия проведения которых попадают в область  $E_p < E_{tr}$  и  $L_0 \geq L_{Br}$ . Такую интерпретацию возможно провести только на основании строгого учета многократного рассеяния и вклада различных механизмов генерации в суммарную интенсивность. Выражения для спектрально-углового распределения в случае интенсивного многократного рассеяния, полученные в [12], имеют сложный для анализа вид, они представляют собой двойные интегралы от быстроосциллирующих функций, поэтому был реализован численный расчет характеристик излучения с использованием ЭВМ.

По мере уменьшения энергии заряженных частиц или увеличения толщины пластинки относительный вклад тормозного излучения в дифракционный максимум возрастает, что приводит к постепенному изменению спектрально-углового и углового распределений излучения.

В экспериментальной работе [8] представлены результаты измерения зависимости квантового выхода рентгеновского излучения в монокристалле кремния толщиной  $L = 0,5$  мм от энергии электронного пучка в диапазоне энергий 200 – 1100 МэВ.



**Рис. 1.** Зависимость абсолютного выхода излучения от энергии электронного пучка. Сплошной жирной линией обозначены результаты расчетов с использованием модели Феранчука-Ивашина [11]; пунктирной кривой – идеальная модель (без учета МР и поглощения); тонкой сплошной кривой – интегрирование по частотам в диапазоне  $\Delta\omega/\omega_B = 10^{-3}$  и углам спектрально-углового распределения без учета МР.

Экспериментальные значения обозначены знаком "x", сплошными кружками – результаты численных расчетов со строгим учетом ТИ, а окружностями – только ПРИ (и ДПИ) без тормозного излучения.

На рис.1 приведены значения абсолютного выхода излучения, полученные на основании расчетов с использованием разных теоретических моделей и в эксперименте [8].

До настоящего времени при интерпретации экспериментальных данных использовались либо теория ПРИ с феноменологическим учетом МР [11], либо асимптотические формулы, полученные в приближении слабого многократного рассеяния [12]. Кроме этого, влияние МР учитывалось усреднением по углам многократного рассеяния выражения для углового распределения ПРИ [8], полученного в рамках кинематической теории дифракции. Все эти подходы не дают адекватного количественного описания интенсивности излучения в случае сильного многократного рассеяния. Проведенные сравнения результатов численных расчетов с результатами экспериментов [7, 8] позволяют утверждать, что для получения такого описания необходимо проводить расчеты на основании строгого учета влияния МР на механизм испускания ПРИ, а также вклада возникшего вследствие МР тормозного излучения.

В пятой главе проведен теоретический анализ дифракционного излучения осциллятора. Исследованы дисперсионные кривые ДИО для пика излучения под большими углами относительно направления распространения заряженных частиц. Получено явное выражение для углового распределения излучения, применимое при любых энергиях ультрарелятивистских частиц. Выполнен детальный анализ влияния параметров пучка на вид углового распределения ДИО и на условия его наблюдения в экспериментах по измерению угловых распределений излучения. Предложены схемы экспериментов для обнаружения ДИО.

Исследование ДИО проведено с помощью общего метода, описанного в [13], на основе двухволнового приближения теории динамической дифракции. Такой подход позволил получить удобные для анализа аналитические выражения для спектрально-углового и углового распределений ДИО.

Спектрально-угловое распределение числа фотонов с волновым вектором  $\vec{k}$  и поляризацией  $s$  ( $\sigma$ ,  $\pi$ ), испускаемых из кристалла в направлении бокового дифракционного максимума, заданного вектором  $\vec{k}_{B\tau} = \vec{k}_B + \vec{\tau}$  может быть записано в виде

$$\frac{d^2 N_{\vec{k}s}}{d\omega d\vec{\Omega}} = \frac{e^2 Q^2 \omega}{4\pi^2 \hbar c} R_{L(B)}^s \left| \sum_{\mu=1}^2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^\mu e^{-\frac{in\Omega L_0}{c} + i\vec{k}_{\mu\tau s} \vec{r}_{0\perp}} (\vec{e}_{\tau s} \vec{a}_{\mu n}) l_{\mu n} \left[ 1 - e^{-\frac{iL_0}{l_{\mu n}}} \right] \right|^2, \quad (3)$$

здесь  $\Omega$  – частота колебаний осциллятора в лабораторной системе координат,  $R_{L(B)}^s$  – коэффициент, характеризующий эффективность дифракции испускаемых фотонов в кристалле в случае геометрии дифракции по Лауэ (Брэггу), и который для геометрии Лауэ может быть

записан в виде  $R_L^s = C_s^2 \left| \frac{\chi_\tau}{2(\epsilon_{2s} - \epsilon_{1s})} \right|^2$ ,  $\vec{r}_{0\perp}(r_{01}, r_{02})$  – поперечный радиус-вектор частицы в момент ее влета в кристалл ( $\vec{r}_\perp(t=0) = \vec{r}_{0\perp}$ ),

$$\vec{\tilde{x}}_{\mu n} = \frac{\Omega}{2\pi c} \int_{-\pi/\Omega}^{\pi/\Omega} dt v(t) \exp \left( i\vec{k}_{\mu\tau s} \vec{e}_1 v \int_0^t dt' \theta_1(t') - in\Omega t + i\vec{k}_{\mu\tau s} \vec{e}_3 v / 2 \left[ \int_0^t dt' \theta^2(t') - \theta_A^2 t \right] \right),$$

– коэффициент разложения в ряд Фурье периодической по времени  $t$  функции с периодом  $2\pi/\Omega$ ,  $\vec{v} = v \cos(\theta(t)) \vec{e}_3 + v \vec{\theta}(t)$  – скорость частицы,  $\theta = |\vec{\theta}(\theta_1, \theta_2)| \ll 1$ ,  $\theta_1(t + 2\pi/\Omega) = \theta_1(t)$ ,  $\theta_1(0) = \theta_{01}$ ,  $\theta_2 = \theta_{02}$ ,  $\theta_0 = (\theta_{01}, \theta_{02})$  – угол влета частицы в кристалл относительно оси за-

данной вектором  $\vec{e}_3$  (предполагаем, что частица движется в кристалле по периодической траектории в плоскости, проходящей через векторы  $\vec{e}_1$  и  $(\theta_{02}\vec{e}_2 + \cos\theta_0\vec{e}_3)$ ;  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$  – базисные векторы декартовой системы координат с началом на облучаемой частицами поверхности кристалла,

$$I_{\mu n} = \frac{2c}{\omega} \left( \left( \gamma^{-2} + \vartheta^2 - 2\varepsilon_{\mu s} + \theta_A^2 - 2\frac{\theta_{02}c}{\omega} \vec{e}_2 \vec{k}_{\mu ts} \right) - \frac{2n\Omega}{\omega} \right)^{-1} - \text{комплексная}$$

$$\text{когерентная длина излучения, } \theta_A^2 = \frac{\Omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\Omega} dt \theta^2(t).$$

В случае дифракции по Лауэ ( $\beta_1 > 0$ ) при условии неперекрывания максимумов излучения на разных гармониках и полагая при интегрировании (3) по частотам частоту  $\omega$ , определяемую из условия  $I'_{\mu n} = \infty$ , приближенно равной  $\omega_B$ , было найдено угловое распределение ДИО ( $A_n = |\vec{e}_{ts} \vec{a}_n^\perp|^2$ ):

$$\frac{N_{\vec{O}}^s}{i\vec{O}} = \frac{e^2 Q^2 \omega_B |\chi_\tau|^2 C_s^2}{4\pi\hbar c} \sum_{\mu=1}^2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n L_{eff}^{\mu s} \left( \frac{\delta_{\mu 1} \Theta(D) + \delta_{\mu 2} (1 - \Theta(D))}{\sin^2 \theta_B (D^2 + \beta_1 r_s') + \frac{n\Omega}{2\omega_B} \left( D + \frac{\beta_1 r_s'}{D} \right)^2} \right), \quad (4)$$

все величины в правой части (4), зависящие от частоты, берутся для значения  $\omega = \omega_B$ ,  $D = \vartheta^2 + \gamma^{-2} + \gamma_{tr}^{-2} - \frac{2n\Omega}{\omega} \neq 0$ ,  $L_{eff}^{\mu s} = L_{abs}^{\mu s} (1 - \exp(-L_0 / L_{abs}^{\mu s}))$ ,

$$L_{abs}^{\mu s} = \frac{c}{\beta_1 \omega_B |\chi_0^n|} \frac{D^2 + \beta_1 r_s'}{(D + \delta_s)^2 + r_s' - \delta_s^2}, \quad \delta_s = \frac{r_s^n}{2\chi_0^n},$$

здесь  $r_s' + ir_s^n = \chi_\tau^s \chi_{-s}^s$ ,  $\chi_0' + i\chi_0^n = \chi_0$ .

В случае дифракции по Лауэ номер ветви, на которой испускается ДИО, определяется только знаком величины  $D$ .

Анализ выражения (4) дает возможность проследить за поведением плотности углового распределения ДИО по мере увеличения энергии излучающей частицы. При значениях Лоренц-фактора  $\gamma < \gamma_R = \sqrt{\frac{\omega_B}{2\Omega}}$  (что соответствует частоте  $\omega_B$ , большей

максимальной частоты излучения  $\omega_{\max} = 2\Omega\gamma^2$ ) величина  $D_0 = \gamma^{-2} + \gamma_{tr}^{-2} - 2\Omega/\omega_B > 0$ . В силу последнего обстоятельства из-

лучение происходит только на первой дисперсионной ветви с индексом  $\mu = 1$ , и угловое распределение представляет собой одиночный максимум, направленный строго вдоль вектора  $\vec{k}_{B\tau}$ . При стремлении  $\gamma$  к величине  $\gamma_R$  максимум углового распределения ДИО, расположенный на угле  $\vartheta = 0$ , быстро возрастает, а его угловая ширина резко падает. В этом смысле можно сказать, что угловое распределение ДИО описывается резонансной кривой. В области  $\gamma > \gamma_R$  ( $\omega_B < \omega_{\max}$ ) вид плотности углового распределения ДИО существенно меняется: одиночный максимум, сформировавшийся по мере приближения  $\gamma$  к величине  $\gamma_R$ , при дальнейшем увеличении  $\gamma$  расщепляется на два узких максимума (азимутальный угол излучения  $\phi$  считаем фиксированным), которые с ростом  $\gamma$  смещаются в область все больших значений  $\vartheta$ . Таким образом, дифракционный максимум ДИО представляет собой два узких кольца (учитывая все возможные значения азимутального угла  $\phi$ ), первое из которых соответствует  $\mu = 2$ , а второе  $\mu = 1$ .

Угловая ширина резонансов в спектрально-угловом распределении (3) и их высота зависят от угла влета заряженной частицы в кристалл и ее энергии. Это означает, что разброс пучка заряженных частиц по углам и энергиям существенно влияет на угловую интенсивность ДИО.

Зависимость плотности углового распределения от  $\frac{\Delta\gamma}{\gamma}$  весьма существенна, и при энергетическом разбросе порядка 5% интенсивность излучения почти на порядок ниже интенсивности излучения от идеального пучка.

Таким образом, ДИО обладает очень высокой спектральной и угловой плотностью, имея очень узкую спектральную ширину и угловую направленность. Причем ширина частотного и углового максимума ДИО значительно уже резонанса ПРИ, поэтому ДИО является очень чувствительным к параметрам пучка заряженных частиц. Для обнаружения ДИО на фоне других конкурирующих механизмов излучений (ПРИ и тормозного излучения) в экспериментах по измерению угловых распределений необходимо, чтобы детектор имел достаточно хорошее энергетическое и угловое разрешения.

**В заключении** диссертации сформулированы основные выводы и результаты диссертации.



## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

Основные результаты и выводы диссертации можно сформулировать следующим образом:

- Проведены расчеты параметрического рентгеновского излучения в боковом дифракционном максимуме для схемы дифракции по Брэггу в различных геометриях и для различных энергий испускаемого излучения; показано, что для описания механизма генерации ПРИ в геометрии дифракции по Брэггу (толстые кристаллы, схема обратного отражения и др.) необходимо применять динамический подход. Впервые дано теоретическое объяснение экспериментов, проведенных в геометрии обратного отражения. Сравнение результатов экспериментов по измерению угловых распределений ПРИ в этой геометрии с результатами численных расчетов позволяет говорить об адекватности предложенной теоретической модели.
- Проведенные исследования характеристик ПРИ, испускаемого под малыми углами относительно направления движения заряженных частиц, показывают, что адекватное описание процесса излучения может быть дано только в рамках динамического подхода. Дано объяснение, почему в проведенных ранее экспериментах обнаружить ПРИ в максимуме вперед было принципиально невозможно. Сформулированы условия постановки экспериментов с целью обнаружения ПРИ вперед. Определены параметры детектора, необходимого для решения этой задачи.
- Разработан метод расчета интенсивности ПРИ в случае сильного многократного рассеяния, проведены расчеты спектрально-угловых, угловых и частотных распределений ПРИ. Получены численные зависимости дифференциальной и интегральных характеристик, а также квантового выхода ПРИ от энергии заряженных частиц и толщины кристаллической пластинки. Исследован вклад в интенсивность излучения различных механизмов генерации, таких как переходное и тормозное излучение. Определены области параметров (энергии заряженных частиц, толщины кристаллической пластинок), при которых тот или иной механизм излучения становится преобладающим. Разработана программа "YANGR", позволяющая в режиме диалога оценить интенсивность излучения, испускаемого заряженными частицами в кристаллах в различных геометриях, при различных энергиях заряженных частиц и энергиях излучения, а также существенность влияния многократного рассеяния и необходимость



учета вклада различных механизмов излучения в суммарную интенсивность. При слабом МР расчеты осуществляются на основе простых аналитических выражений, полученных в работе [12]. Для расчетов интенсивности ПРИ в случае сильного многократного рассеяния создан пакет программ. Проведено сравнение результатов экспериментов, для которых реализуется случай сильного многократного рассеяния, с результатами численных расчетов. Результаты численных расчетов полностью попали в диапазон ошибок экспериментальных данных. Это подтверждает тот факт, что только строгий учет влияния многократного рассеяния и вклада тормозного излучения, возникшего вследствие многократного рассеяния, позволяет объяснить экспериментальные результаты.

- Разработана программа расчета комплексных поляризуемостей кристалла для дифракции рентгеновского излучения непрерывного спектра в диапазоне длин волн  $0,1 - 10 \text{ \AA}$ .
- Проведено теоретическое рассмотрение характеристик дифракционного излучения осциллятора. На основании простых аналитических выражений для спектрально-угловых и угловых распределений ДИО выработаны рекомендации по наблюдению этого излучения на фоне сопутствующих излучений. Предложены способы практического применения ДИО.

## ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Baryshevsky V.G. Parametric X-ray radiation at a small angle near the velocity direction of the relativistic particle // Nucl. Instr. and Meth. –1997.– В 122. – P. 13 – 18.
2. Nitta H. Theoretical notes on parametric X-ray radiation // Nucl. Instr and Meth.– 1996. – B115. – P. 401 – 404.
3. Caticha A. Quantum theory of the dynamical Cerenkov emission of x rays // Physical Review –1992. – B45.– P. 9541 – 9550.
4. Воронов В.П., Камышанченко Н.В., Насонов Н.Н., Насонова В.А. Об эффектах динамической дифракции в параметрическом излучении // Ядерная физика– 2000. – Т. 63, № 11. – С.2101 – 2104.
5. Mainz Microtron MAMI. Collaboration X1: Coherent production of soft X-rays. Exp.-Nr.: X1/1-96. Spokesperson: H. Backe, Institut für Kernphysic, Universität Mainz.
6. Parametric X Radiation and Approaches to Application. International Workshop on radiation Physics with relativistic electrons. 198. WE - Heraeus-Seminar, June 9-12, 1998 in Tabarz/Germany // J. Freudenberger e. a.
7. Afanasenko V.P., Baryshevsky V.G., Lobko A.S. e. a. Experimental study of the influence of multiple scattering on the parametric X-rays characteristics // Nucl. Instr. and Meth. –1993. – A334. – P. 631–637.
8. S. Asano, I. Endo, M. Harada, H. Nitta e. a. How intense is Parametric X Radiation? // Phys. Review Lett. –1993. – V.70, N 21. – P.3247–3250.
9. Shchagin A.V., Pristupa V.I. and Khizhnyak N.A. Absolute differential yield of parametric X-ray radiation // Proc. Of RREPS (International Symposium on radiation of relativistic electron in periodic structures) / Tomsk, Russia, 1993.– P.62–75.
10. Внуков И.Е., Калинин Б.Н., Науменко Г.А. и др. Экспериментальный поиск рентгеновского квазичеренковского излучения релятивистских электронов в совершенных кристаллах // XXIX конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами / Тез. докл. научн. конф. Москва, 28 – 30 мая 1999 г. – С. 54.
11. Feranchuk I.D., Ivashin A.V. Theoretical investigation of the parametric X-ray features // J. de Physique. I. –1985.– V. 46 – P.1981 – 1986.
12. Барышевский В.Г., Грубич А.О., Ле Тьен Хай. Влияние многократного рассеяния на параметрическое рентгеновское излучение // ЖЭТФ –1988.– Т.94, № 5.– С. 51 – 65.
13. Барышевский В.Г. Каналирование, излучение и реакции в кристаллах при высоких энергиях. – Минск: Изд-во Белгосуниверситета, 1982. – 256 с.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПЕЧАТНЫХ РАБОТАХ:

14. Луговская О.М., Вейник А.А. YANGR – программа моделирования взаимодействия излучения с веществом // Материалы межреспубликанской научно-практической конференции «Актуальные проблемы информатики: Математическое, программное и информационное обеспечение», Минск, 2 – 6 апреля 1990 г. – С. 32 –33.
15. Луговская О.М., Степанов С.А. Программа расчета поляризуемостей кристаллов для многоволновой дифракции синхротронного рентгеновского излучения // Вторая конференция по динамическому рассеянию рентгеновских лучей в кристаллах с динамическими и статическими искажениями. Тез. научн. докл. Киев, 1990. –С. 66.
16. Барышевский В.Г., Луговская О.М. К вопросу о параметрическом рентгеновском излучении // XXXI Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами / Тез. научн. докл. Москва 28 – 30 мая 2001 г. – С. 53.
17. Луговская О.М., Дубовская И.Я. Численный анализ интенсивности параметрического рентгеновского излучения в случае сильного многократного рассеяния // XXXI Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами / Тез. научн. докл. Москва 28 – 30 мая 2001 г. – С. 52.
18. Барышевский В.Г., Лобко А.С., Луговская О.М., Зуевский Р.Ф. Численный расчет дифференциальной и интегральной интенсивностей параметрического рентгеновского излучения // XXXII Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами / Тез. научн. докл. Москва 27 – 29 мая 2002 г. – С. 63.
19. Батраков К.Г., Луговская О.М. Расчет спектрально-угловых распределений параметрического рентгеновского излучения в геометрии дифракции по Брэггу // XXXII Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами / Тез. научн. докл. Москва 27 – 29 мая 2002 г. – С. 62.
20. Луговская О.М. Параметрическое рентгеновское излучение в кристаллах // Фундаментальные и прикладные физические исследования 1986 – 2001 г.г. Сб. трудов Института ядерных проблем Белорусского государственного университета. Под ред. В.Г.Барышевского – Минск: БГУ, 2001. – С. 260 – 277.
21. Дубовская И.Я., Луговская О.М. Дифракционное излучение релятивистского осциллятора // Фундаментальные и прикладные физические исследования 1986 – 2001 г.г. Сб. трудов Института ядерных проблем Белорусского государственного университета. Под ред. В.Г. Барышевского – Минск: БГУ, 2001. – С. 245 – 259.

22. Грубич А.О., Луговская О.М. Угловое распределение дифракционного излучения осциллятора // Весті АН БССР. Сер. фіз.-мат. навук. – 1991. – № 1. – С. 61 – 67.
23. Грубич А.О., Луговская О.М. Анализ условий наблюдения ДИО в экспериментах по измерению угловых распределений излучения // Весті АН БССР. Сер. фіз.-мат. навук.– 1991. – № 3.– С. 60 – 66.
24. Луговская О.М., Степанов С.А. Расчет поляризуемостей кристаллов для дифракции рентгеновского излучения непрерывного спектра в диапазоне длин волн 0,1 – 10 А // Кристаллография. – 1991. – Т. 36, вып.4. – С. 856 – 860.
25. Grubich A.O., Lugovskaya O.M. and Chercas S.L. Observation of diffraction radiation of oscillator on angular distribution measurements // Journal de Physique. –1993. – V.3, N 1. – P. 2139 – 2149.
26. Барышевский В.Г., Луговская О.М. К вопросу о параметрическом рентгеновском излучении // Ядерная физика. – 2003. – Т.66 – № 2. – С. 435 – 441. (Baryshevsky V.G., Lugovskaya O.M. On Parametric X-Ray Radiation // Physics of Atomic Nuclei. – 2003. – V.66 – N 2. – P.411 – 417.)
27. Луговская О.М., Дубовская И.Я. Численный анализ интенсивности параметрического рентгеновского излучения в случае сильного многократного рассеяния // Ядерная физика. – 2003. – Т.66 – № 2. – С. 429 – 434. (Dubovskaya I.Ya., Lugovskaya O.M. Numerical Analysis of the Intensity of Parametric X-Ray Radiation under the Conditions of Strong Multiple Scattering // Physics of Atomic Nuclei. – 2003. – V.66 – N 2. – P.404 – 410).



**РЕЗЮМЕ. Луговская Ольга Михайловна. Характеристики параметрического рентгеновского излучения в условиях динамической дифракции и многократного рассеяния**

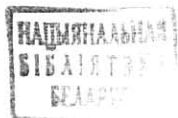
*Ключевые слова:* Параметрическое рентгеновское излучение, переходное излучение, тормозное излучение, многократное рассеяние заряженных частиц, дифракционное излучение осциллятора, дифракционный максимум, геометрия дифракции по Лауэ и Брэггу, спектрально-угловое, угловое распределения, интегральное число квантов.

В работе проведен анализ спектрально-угловых и угловых распределений ПРИ в геометрии обратного отражения, то есть в максимуме, направление на который составляет  $180^\circ$  с направлением скорости заряженных частиц. Проведенное сравнение результатов теоретических расчетов с результатами экспериментов показало хорошее их совпадение.

Исследуются спектрально-угловые и угловые распределения параметрического рентгеновского излучения (ПРИ), генерируемого в максимум под малыми углами относительно направления распространения заряженных частиц для схем дифракции по Лауэ и Брэггу. Указаны параметры детектора, при которых возможно обнаружить динамические максимумы ПРИ на фоне переходного излучения.

Проведено детальное исследование характеристик параметрического рентгеновского излучения, генерируемого в кристалле с учетом сильного многократного рассеяния, выполненное на основе численного моделирования. Изучен вклад в суммарную интенсивность излучения различных механизмов генерации. Проведено сравнение результатов экспериментов по измерению зависимости интегральной интенсивности ПРИ от энергии заряженных частиц с результатами численных расчетов. Показано, что имеется хорошее соответствие между теорией и экспериментальными результатами.

На основе двухволнового приближения теории динамической дифракции получены удобные для анализа выражения для спектрально-углового и углового распределений дифракционного излучения осциллятора в кристалле. Исследована зависимость плотности углового распределения ДИО от параметров пучка заряженных частиц. Проведен анализ возможности наблюдения ДИО на фоне других "конкурирующих" излучений. Предложены схемы экспериментов для возможности обнаружения ДИО.



2. А. 100198

**ABSTRACT.** Lugovskaya Olga Mihailovna. Characteristics of Parametric X-ray radiation in conditions of dynamical diffraction and multiple scattering.

*Key words:* Parametric X-ray radiation, transition radiation, bremsstrahlung radiation, multiple scattering of charged particles, diffraction radiation of oscillator, diffraction maximum, Laue and Bragg diffraction geometry, spectral-angular, angular distributions, quantum yield.

In this work the analysis of spectral-angular and angular PXR distributions in backward geometry, i.e. in maximum the direction to which consists  $180^\circ$  in respect to vector of charged particles velocity, was carried out. The realized comparison between theoretical data and experimental results has shown very good agreement.

The spectral-angular and angular distributions of parametric X-ray radiation (PXR) generated into diffraction maximum at a small angles in respect to direction of charged particles propagation for the Laue and Bragg geometries were investigated. The detector parameters were determined at which it is possible to observe PXR dynamical maximums on transition radiation background.

The detailed investigation of characteristics of parametric X-ray radiation generated in crystal taking into account multiple scattering was carried out on the base of numerical modeling. Yield of different mechanisms of generation in sum radiation intensity was studied. The results of experiments on measuring integral PXR intensity against charged particles energy were compared to the results of numerical calculation. It was shown good agreement between theory and experiment.

On the base of two-wave approximation of dynamical theory there were derived the convenient for analysis expressions for spectral-angular and angular distributions of diffraction radiation of oscillator (DRO) in crystal. The effect of the beam parameters on angular distribution density was studied. The analysis of the conditions of DRO observation on the background of other concurrent radiation mechanisms was made. Some experimental procedures for DRO detection were suggested.

**Рэзюмэ. Лугаўская Вольга Міхайлаўна. Характарыстыкі параметрычнага рэнтгенаўскага выпрамянення у умовах дынамічнай дыфракцыі і мнагакратнага рассеяння.**

*Ключавыя словы: Параметрычнае рэнтгенаўскае выпрамяненне, пераходнае выпрамяненне, тармазнае выпрамяненне, мнагакратнае рассеянне зараджаных часціц, дыфракцыйнае выпрамяненне асцылятара, дыфракцыйны максімум, геаметрыя дыфракцыі па Лауэ і Брэггу, спектральна-вуглавое, вуглавое размеркавання, інтэгральная колькасць квантаў.*

У працы праведзен аналіз спектральна-вуглавых і вуглавых размеркаванняў параметрычнага рэнтгенаўскага выпрамянення у геаметрыі адваротнага адлюстравання, то ёсць у максімуме, напрамак на які складае  $180^\circ$  з вектарам хуткасці зараджаных часціц. Праведзеныя параўнанні вынікаў тэарэтычных разлікаў з рэзультатамі эксперыментаў паказалі добрае супадзенне.

Даследаваны спектральна-вуглавая і вуглавая размеркавання параметрычнага рэнтгенаўскага выпрамянення, генерыруемага у максімум пад малымі вугламі адносна напрамка распаўсюджвання зараджаных часціц для схем дыфракцыі па Лауэ і Брэггу. Паказаны параметры дэтэктара, пры якіх магчыма выявіць дынамічныя максімуны параметрычнага рэнтгенаўскага выпрамянення на фоне пераходнага выпрамянення.

Праведзена дэталёвае даследаванне характарыстык параметрычнага рэнтгенаўскага выпрамянення, генерыруемага у крыштале з улікам моцнага мнагакратнага рассеяння, выкананае на аснове лікавага мадэліравання. Вывучаны уклад у сумарную інтэнсіўнасць выпрамянення розных механізмаў генерацыі. Праведзена параўнанне рэзультатаў эксперыментаў па вымярэнню залежнасці інтэгральнай інтэнсіўнасці параметрычнага рэнтгенаўскага выпрамянення ад энергіі зараджаных часціц з рэзультатамі лікавых разлікаў. Паказана наяўнасць добрай адпаведнасці тэорыі эксперыментальным рэзультатам.

На аснове двуххвалевага прыбліжэння тэорыі дынамічнай дыфракцыі атрыманы адпаведныя для аналізу выразы дзеля спектральна-вуглавых і вуглавых размеркаванняў дыфракцыйнага выпрамянення асцылятара у крыштале. Вывучана залежнасць шчыльнасці вуглавога размеркавання дыфракцыйнага выпрамянення асцылятара ад параметраў пучка зараджаных часціц. Праведзен аналіз магчымасці назірання дыфракцыйнага выпрамянення асцылятара на фоне іншых "канкуруючых" выпрамяненняў. Прапанаваны схемы эксперыментаў для магчымасці выяўлення дыфракцыйнага выпрамянення асцылятара.



1000



510000002 721740

**ЛУГОВСКАЯ**  
**Ольга Михайловна**

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДИФРАКЦИИ И  
МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ**

---

Подписано в печать 21.11.2003. Формат 60×90 1/16  
Бумага офисная. Печать офсетная. Печ. л. 1,5  
Усл. печ. л. 1,7. Тираж 100 экз. Заказ № 51.

---

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси  
220072, Минск, пр. Ф. Скорины, 68.  
Отпечатано на ризографе Института физики им. Б.И. Степанова  
НАН Беларуси  
Лицензия ЛП №20 от 27.05.2003 г.