

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И.ЛЕНИНА

На правах рукописи

ИВАШИН АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ

УДК 539.12

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

(01.04.02 - теоретическая и математическая
физика)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Минск - 1987

Александр Васильевич ИВАШИН
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
Специальность 01.04.02 - теоре-
тическая и математическая физика

Автореферат диссертации на соис-
кание ученой степени кандидата
физико-математических наук

АТ № I6765

Подписано к печати 21.09.87

Бум. писч. № I. Объем I,0 п.л.

06 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз.

З. № 908

Формат 60x84 1/16

Бесплатно

220080, г. Минск

Отпечатано на ротационной машине
Белгосуниверситета им. В.И. Ленина, Бобруйская, 7

Работа выполнена в Белорусском ордена Трудового Красного Знамени государственном университете имени В.И.Ленина.

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор КУЗЬМИН Р.Н. (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова), доктор физико-математических наук, профессор ТОМИЛЬЧИК Л.М. (Институт физики АН БССР)

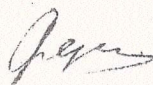
Ведущая организация: Московский инженерно-физический институт.

Защита состоится 30 октября 1987 года в 10 часов на заседании специализированного совета К 056.03.09 по присуждению ученой степени кандидата наук в Белгосуниверситете имени В.И.Ленина (220080, г.Минск, Ленинский просп., 4, главный корпус, ауд.206).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белгосуниверситета имени В.И.Ленина.

Автореферат составлен сентября 1987 года.

Ученый секретарь
специализированного совета,
профессор



ФЕРАНЧУК И.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Электромагнитные взаимодействия релятивистских заряженных частиц с периодически расположенными атомами и ядрами кристаллов приводят к возникновению ряда новых механизмов генерации электромагнитного излучения, которые не имеют места в однородной среде. Одним из таких видов излучения является параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ), существование которого было теоретически предсказано в начале 70-х годов. Отметим, что в частном случае тонкого кристалла некоторые свойства ПРИ описываются формулами, полученными Тер-Микаеляном в рамках теории возмущений при решении задачи об излучении релятивистской заряженной частицы в трехмерной периодической среде. Строгая теория ПРИ с учетом динамической теории дифракции рентгеновского излучения была построена в работах Барышевского и Феранчука, Гарибяна и Ян Ши, Афанасьева и Агниян. Анализ свойств ПРИ показал, что данный механизм излучения может быть использован как для создания источников квазимонохроматического рентгеновского излучения с плавно перестраиваемой частотой, так и для исследования структуры кристаллов.

В 1984-1985 годах в совместных экспериментах, проведенных на синхротроне "Сириус" сотрудниками Белгосуниверситета им. В.И.Ленина и НИИ ядерной физики Томского политехнического института, параметрическое рентгеновское излучение было впервые обнаружено. В дальнейшем несколькими экспериментальными группами был выполнен ряд исследований различных характеристик ПРИ. В связи с этим возникла необходимость детальной теоретической интерпретации экспериментов, а также изучения новых направлений в исследовании и применении обнаруженного механизма излучения.

Цель работы состоит в детальном описании результатов экспериментов на основе общей теории ПРИ, разработке достаточно простых и эффективных методов выбора оптимальных условий для практического использования ПРИ, дальнейшем развитии теории этого явления для некоторых не рассматривавшихся ранее

специальных случаев ориентации кристалла относительно направления скорости заряженных частиц.

Научная новизна и практическая ценность работы. В диссертации впервые получен ряд универсальных соотношений, которые описывают спектрально-угловое распределение ПРИ и его интегральную интенсивность в произвольных кристаллах. Это позволило существенно упростить обработку спектров ПРИ и предсказать новые особенности данного вида излучения, которые позднее были обнаружены экспериментально. Показано, что для количественного совпадения теоретических расчетов с экспериментом необходимо учитывать влияние параметров детекторов излучения на формирование спектров ПРИ. В диссертации также разработана теория метода определения фаз структурных амплитуд из анализа спектров ПРИ. Построена теория этого механизма излучения для вырожденного случая двухволновой дифракции и предложен новый метод ковариантного вычисления интенсивности ПРИ, позволяющий аналитически описать характеристики излучения в условиях многоволновой дифракции и в мессбауэровских кристаллах.

Основные положения, выносимые на защиту:

- универсальные соотношения для спектрально-углового распределения и интегральной интенсивности ПРИ, позволяющие находить характеристики этого излучения в произвольных кристаллах;
- предсказание тонкой структуры в угловом и спектральном распределении ПРИ и учет влияния многократного рассеяния заряженных частиц на интегральную интенсивность излучения;
- детальное теоретическое описание экспериментов по исследованию различных характеристик ПРИ;
- предсказание осцилляций интегральной интенсивности ПРИ в вырожденном случае двухволновой дифракции и теория метода определения фаз структурных амплитуд из анализа спектров ПРИ;
- метод ковариантного описания ПРИ в условиях многоволновой дифракции и вблизи частот, соответствующих резонансным

переходам ядер кристалла.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XV-XVII Всесоюзных совещаниях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (г.Москва, 1985-1987 г.г.), на научной сессии Отделения ядерной физики АН СССР (г.Москва, 1986 г.), на семинарах кафедры ядерной физики и кафедры теоретической физики Белгосуниверситета им.В.И.Ленина.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, содержит 134 страницы машинописного текста, 30 рисунков и 6 таблиц. Список цитируемой литературы включает 69 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы выбор темы исследования и актуальность рассматриваемых в диссертации вопросов. Дано краткое изложение основных результатов, выводов и положений, выносимых на защиту.

В первой главе диссертации дан обзор работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию ПРИ, рассмотрены классический и квантовый подходы для вычисления спектров излучения, проведен анализ пределов применимости различных приближений в теории этого явления.

Параметрическое рентгеновское излучение является одним из видов излучений, возникающих при взаимодействии ультррелятивистских заряженных частиц с кристаллом и обусловлено тем, что показатель преломления $n(\vec{k}, \omega)$ испускаемых в кристалле фотонов становится величиной, большей единицы, при выполнении условий дифракции Вульфа-Брегга

$$(\vec{k} + \vec{c})^2 = k^2, \quad (I)$$

где \vec{k} -- волновой вектор, ω -- частота испускаемого кванта, \vec{c} -- произвольный вектор обратной решетки кристалла ($\vec{h} = c = 1$)

В результате условие излучения Вавилова-Черенкова

$$1 - v n(\vec{k}, \omega) \cos \theta = 0 \quad (2)$$

в рентгеновском диапазоне частот может выполняться в кристалле, в отличие от однородной среды, в которой показатель преломления для рентгеновского излучения $n = 1 - \omega_p^2 / 2\omega^2$ (v — скорость заряженной частицы, ω_p — плазменная частота среды). Таким образом, излучение Вавилова-Черенкова при выполнении условий дифракции (I) и представляет собой параметрическое рентгеновское излучение.

Рассмотрим некоторые качественные особенности взаимодействия ультрарелятивистских заряженных частиц с кристаллом, которые позволяют описать кинематику ПРИ. Пусть частица (электрон) с энергией $E \gg m$ влетает в кристалл, произвольным образом ориентированный относительно скорости электрона \vec{v} . Хорошо известно, что собственное электромагнитное поле релятивистской заряженной частицы можно представить как совокупность псевдофотонов, свойства которых близки к свойствам реальных фотонов с волновым вектором $\vec{k} = \omega \vec{v}$, угловым разбросом $\Delta \theta \sim m/E$ относительно и непрерывным спектром частот

$$n(\omega) d\omega = \frac{e^2}{4\pi\omega} \ln \left(\gamma \frac{E}{\omega} \right) d\omega \quad (3)$$

где ω — частота псевдофотона, γ — величина порядка единицы, $e^2 = 1/137$. С этой точки зрения электромагнитное взаимодействие релятивистского электрона с кристаллом эквивалентно взаимодействию пучка фотонов с угловым разбросом $\Delta \theta$ и спектром (3) с этим же кристаллом. Поскольку частотный спектр электромагнитного поля частицы непрерывный, то для каждого вектора обратной решетки кристалла найдутся псевдофотоны, которые будут дифрагировать на соответствующей системе кристаллографических плоскостей. Это означает, что параметрическое излучение в кристалле образует дифракционную картину, полностью аналогичную той, которая возникает при дифракции на этом же кристалле полихроматического пучка рентгеновского из-

лучения. В частности, псевдофотоны с импульсом, удовлетворяющим условию дифракции Вульфа-Брэгга (I) с одним из векторов \vec{r} , будут отражаться от соответствующих плоскостей, образуя максимум рентгеновского излучения (рефлекс) под углом $2\theta_s^{(r)}$ к направлению влета электрона ($\theta_s^{(r)}$ — угол между \vec{v} и плоскостями, соответствующими вектору \vec{r}). Следует отметить, что углы $2\theta_s^{(r)}$ совпадают с теми углами, под которыми выходило бы дифрагированное кристаллом излучение, при условии, что падающая волна распространялась бы вдоль направления движения частицы (рис. I).

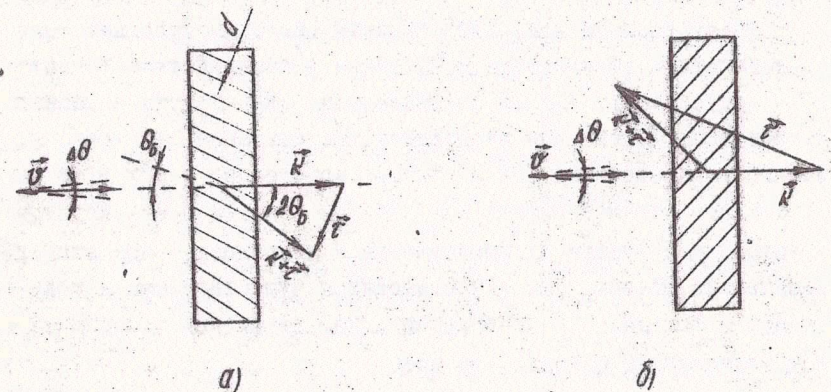


Рис. I. Кинематика параметрического рентгеновского излучения
а) случай Лауэ; б) случай Брэгга

Вследствие дифракции псевдофотонов ПРИ направлено не только вдоль скорости электронов \vec{v} , но и под большими углами относительно нее (например, возможно параметрическое излучение в направлении, противоположном скорости). Отметим, что для ультрарелятивистских частиц с $E \gg m$ углы вылета испускаемых фотонов практически не зависят от энергии E , а определяются структурой кристалла и ориентацией ^{скорости} частицы относительно кристаллографических плоскостей.

В каждом из дифракционных направлений, определяемых векторами $\vec{k}_s = \omega_s^{(l)} \vec{v} + \vec{k}$, испускаемые фотоны имеют угловую расходимость $\Delta\theta \sim m/E$. Частоты фотонов, попадающих в рефлекс, сосредоточены в узком интервале $\Delta\omega/\omega_s^{(l)} \sim m/E$ вблизи величин

$$\omega_s^{(l)} = \frac{v^2}{2|v_z|} = \frac{\pi l}{d \sin \theta_s^{(l)}}; \quad l = 1, 2, 3, \dots, \quad (4)$$

определяемых соответствующими векторами обратной решетки кристалла, где d — расстояние между кристаллографическими плоскостями.

Рассмотренный выше качественный анализ определяет только кинематику образования ПРИ, когда взаимодействие и частицы и испускаемого фотона с кристаллом можно учесть в рамках теории возмущений. Для детального исследования спектра и углового распределения ПРИ в толстых кристаллах необходимо рассмотреть взаимодействие испускаемых рентгеновских квантов с кристаллом с учетом их преломления и дифракции. При этом динамические эффекты для ПРИ становятся существенными в кристаллах с толщиной L , большей длины первичной экстинкции для испускаемых фотонов, то есть

$$nL |n-1| > 1; \quad L \geq 10^{-4} + 10^{-3} \text{ см}. \quad (5)$$

В соответствии с результатами, полученными в работах Барышевского и Феранчука, в общем случае число рентгеновских квантов с частотой ω и поляризацией \vec{e}_s , испускаемых в направлении $\vec{\Omega} = \vec{k}/k$ при прохождении одного электрона через кристалл толщиной L , определяется следующим выражением:

$$\frac{\partial^2 N_s}{\partial \vec{\Omega} \partial \omega} = \frac{e^2 \omega}{4\pi^2} \left| \int dt \vec{v} \vec{E}_{rs}^{(-)}(\vec{r}, \omega) e^{-i\omega t} \right|^2, \quad (6)$$

где $e^2 = 1/137$, $\vec{v}(t)$ — скорость заряженной частицы, $s=1,2$, $\vec{r} = \vec{r}(t)$ — радиус-вектор частицы, $\vec{E}_{rs}^{(-)}$ — поле излучения, являющееся точным решением однородных уравнений Максвелла, с

асимптотикой на больших расстояниях от кристалла, содержащей сходящиеся сферические волны. Используя общую формулу (6), можно рассчитать спектр ПРИ в различных частных случаях в зависимости от характера приближений, используемых для вычисления $\vec{E}_{rs}^{(-)}$.

В первой главе работы также рассмотрена теория ПРИ в случае предельно асимметричной дифракции, анализ которого оказывается необходимым для теоретической интерпретации некоторых экспериментов.

Вторая глава диссертации посвящена получению некоторых универсальных закономерностей, которым подчиняются спектрально-угловые распределения ПРИ и его интегральная интенсивность в произвольных кристаллах. Показано, что существует тесная аналогия между кинематической теорией дифракции рентгеновского излучения в реальных кристаллах и теорией ПРИ в мозаичных кристаллах с учетом мозаичности и многократного рассеяния заряженных частиц на атомах кристалла. В работе дано обоснование использованию кинематического приближения для расчета интенсивности ПРИ в толстых реальных кристаллах. В этом приближении интенсивность ПРИ можно вычислить с помощью простых формул, которые получаются при усреднении точных соотношений по углам многократного рассеяния частиц и по углам поворота блоков мозаичных кристаллов. Полученные таким образом формулы для произвольных кристаллов могут быть выражены через универсальные функции, для которых в диссертации построены подробные таблицы и графики.

В частности, интегральная интенсивность излучения, испускаемого в одном из дифракционных направлений и регистрируемого детектором с угловым радиусом θ_0 , определяется формулой

$$N_r = \sum_{l=1}^{\infty} N_l \left[\xi_1(E, \theta_0) + \xi_2(E, \theta_0) \right], \quad (7)$$

где величина N_l зависит от параметров кристалла и имеет следующий вид

$$N_f = \frac{p^2}{8} \frac{\omega_p^{(f)}}{\sin^2 \theta_p} \left| g_r(\omega_p^{(f)}) \right|^2 L_a (1 - e^{-L/L_a}) (1 + \cos^2 2\theta_p), \quad (8)$$

L_a — длина поглощения в кристалле для излучения с частотой $\omega_p^{(f)}$, g_o и g_r — Фурье-компоненты поляризуемости при разложении ее в ряд по векторам обратной решетки кристалла. В свою очередь, ξ_1 и ξ_2 — универсальные функции, которые определяют соответственно интенсивность ПРИ и дифракционного тормозного излучения (ДТИ), причем

$$\xi_1(E, \theta_p) = \ln \left(\frac{\theta_D^2 + \theta_p^2}{\theta_p^2} \right) - \frac{\theta_D^2}{\theta_D^2 + \theta_p^2} = -\theta_1 \left[\frac{\beta_D^2 + 1 + \frac{1}{x^2} \left(1 + \frac{E_S^2 L}{m^2 L_R} \right)}{1 + \frac{1}{x^2} \left(1 + \frac{E_S^2 L}{m^2 L_R} \right)} \right] - \frac{\beta_D^2}{\beta_D^2 + 1 + \frac{1}{x^2} \left(1 + \frac{E_S^2 L}{m^2 L_R} \right)}, \quad (9)$$

$$x = \frac{E}{m} \sqrt{|g_o'|} = \pi \sqrt{|g_o'|}; \quad \beta_D = \frac{\theta_D}{\sqrt{|g_o'|}}; \quad \theta_p^2 = \pi^{-2} + |g_o'| + \theta_s^2;$$

$$\xi_2(E, \theta_p) = \frac{\theta_s^2 \theta_p^2}{\theta_p^2 (\theta_D^2 + \theta_p^2)} = \frac{\beta_D^2 E_S^2 L}{x^2 m^2 L_R} \left[1 + \frac{1}{x^2} \left(1 + \frac{E_S^2 L}{m^2 L_R} \right) \right]^{-1}. \quad (10)$$

$$\cdot \left[\beta_D^2 + 1 + \frac{1}{x^2} \left(1 + \frac{E_S^2 L}{m^2 L_R} \right) \right]^{-1},$$

где $\theta_s^2 = \frac{E_S^2 L}{E^2 L_R}$, $E_S = 21 \text{ МэВ}$, L_R — радиационная длина.

Определяющее значение при выборе оптимальных условий для получения на основе ПРИ интенсивных пучков квазимонохроматического рентгеновского излучения имеет анализ численных значений величины N_f для различных типов кристаллов, реф-

лексов и углов наблюдения. В качестве примера на рис. 2 приведена зависимость от угла θ_p величины N_f для первой гармоники излучения в кристаллах с решеткой типа алмаза при отражении от плоскости (111).

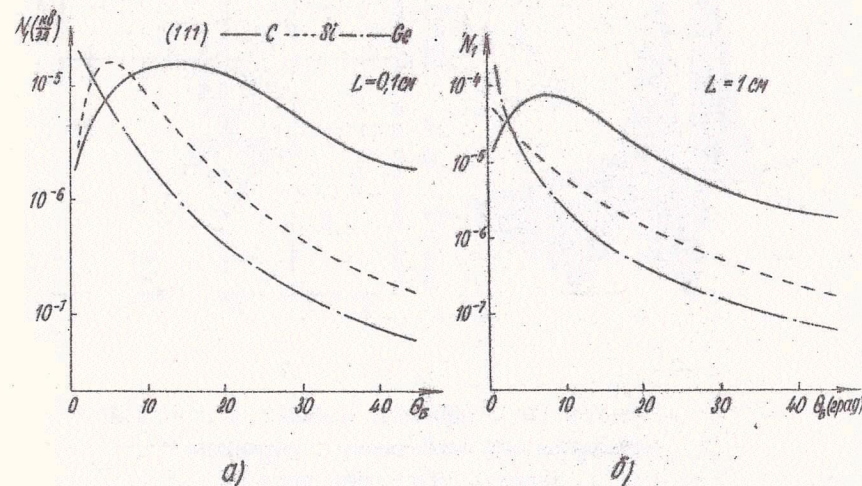


Рис. 2

Спектрально-угловое распределение ПРИ можно рассмотреть на двух уровнях: с одной стороны оно представляет собой некоторый распределенный в пространстве набор рефлексов (рентгенограмму), причем интегральное число фотонов, попадающих в каждый рефлекс, зависит от направления влета заряженной частицы в кристалл; от индексов Миллера отражающих плоскостей; параметров решетки и других факторов. В диссертации приведены рентгенограммы наиболее интенсивных рефлексов ПРИ для трех различных направлений влета электронов в кристалл с решеткой типа алмаза. С другой стороны, каждый из этих рефлексов обладает некоторой тонкой структурой как в частотном, так и угловом распределении испускаемых фотонов. Во второй главе работы показано, что угловое и спектральное распределения фотонов в рефлексе ПРИ описываются универсальными функциями, которые зависят только от величины брэгговского угла

и не связаны с параметрами элементарной ячейки конкретных кристаллов. Характерный вид этих функций изображен на рис.3.

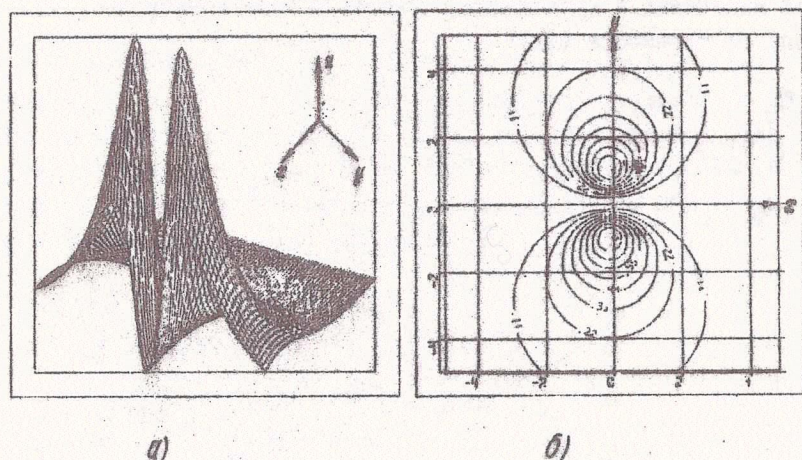


Рис. 3(а,б). Угловое распределение и линии постоянной интенсивности излучения в рефлексе ПРИ; ось x лежит в плоскости векторов \vec{v} и \vec{r} ; ось y перпендикулярна этой плоскости; ось z || \vec{k}_s ; $\theta_s = 45^\circ$.

Качественной особенностью углового спектра ПРИ, отличающей данный механизм излучения от других (например, тормозного), является обращение в нуль интенсивности излучения точно в направлении, совпадающем с вектором \vec{k}_s , что может быть использовано для однозначной идентификации этого вида излучения. Отметим также интересную динамику изменения углового распределения в рефлексе при увеличении угла дифракции от 0 до $\frac{\pi}{4}$. Форма углового распределения изменяется от симметричного "кратера" для $\theta_s \rightarrow 0$ до двух отдельных пиков в случае $\theta_s = \frac{\pi}{4}$ (рис.3). Все указанные особенности углового распределения ПРИ получили уже экспериментальное подтверждение.

Во второй главе также показано, что и в спектральном распределении ПРИ возникает расщепление, но только при углах

$\theta_s < \frac{\pi}{4}$ (рис.3). Однако наблюдение этого расщепления экспериментально возможно в случае малого многократного рассеяния заряженных частиц.

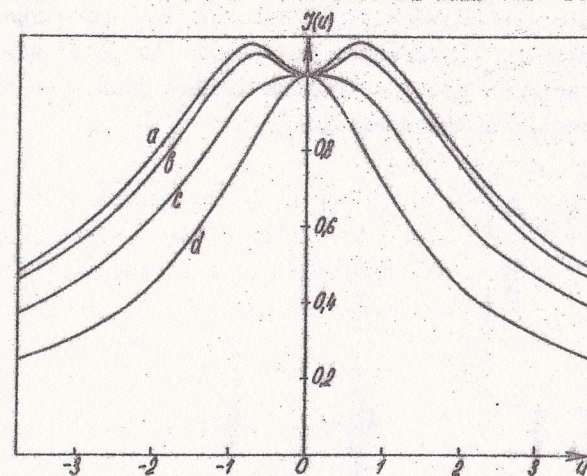


Рис. 3(в). Универсальные спектральные распределения в рефлексах ПРИ: а) $\theta_s = 5^\circ$; в) $\theta_s = 15^\circ$; с) $\theta_s = 30^\circ$; д) $\theta_s = 45^\circ$.

В третьей главе диссертации проведена детальная теоретическая интерпретация результатов экспериментов по исследованию характеристик ПРИ, выполненных несколькими экспериментальными группами и на различных кристаллах. Показано, что экспериментальные данные количественно согласуются с теоретическими предсказаниями о свойствах параметрического рентгеновского излучения.

В настоящее время можно выделить три группы экспериментов по исследованию ПРИ. Это, во-первых, эксперименты по измерению интегральной интенсивности излучения, во-вторых, изучение спектрально-углового распределения в отдельном рефлексе и, в-третьих, определение зависимости интенсивности ПРИ от энергии частицы. Проведенный в работе анализ экспериментов показывает, что их результаты однозначно свидетельствуют

об экспериментальном обнаружении нового механизма генерации фотонов релятивистскими заряженными частицами в кристаллах — параметрического рентгеновского излучения. Показано также, что результаты измерений характеристик ПРИ существенно зависят от параметров детекторов рентгеновского излучения. В качестве примера на рис. 4 приведены данные сравнения теоретических расчетов с экспериментом.

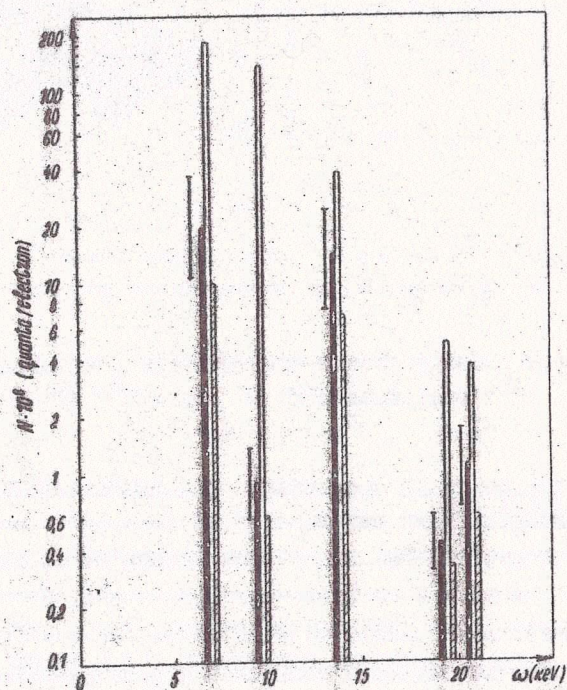


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и теоретических значений числа квантов ПРИ, испускаемых в различные спектральные пики (алмаз, $\theta_B = 45^\circ$):
 — число квантов, регистрируемых детектором
 — число квантов, генерируемых в кристалле
 — теоретическое значение с учетом условий эксперимента

В четвертой главе диссертации проведено исследование ряда задач, которые представляют большой интерес как с точки зрения практического использования ПРИ, так и для лучшего понимания процессов формирования рентгеновского излучения в кристаллах.

В работе дана теория метода определения фаз структурных амплитуд из анализа спектров ПРИ. Показано, что исследование углового распределения в отдельном рефлексе ПРИ с помощью детектора рентгеновского излучения с достаточно высоким спектрально-угловым разрешением позволяет измерять как модуль, так и фазу структурных амплитуд. Действительно, число фотонов ПРИ, регистрируемых в отдельном рефлексе детектором с угловыми координатами θ_{nx} , θ_{ny} и разрешением $\Delta\Omega$, определяется следующим выражением:

$$N_n^{(2)} = N_e \frac{e^2 \Delta\Omega_D A}{4\pi \sin^2 \theta_B g'_0(\omega_n)} \left\{ \frac{\overline{\theta_{nx}^2}}{u_n^2 + B u_n + C} + \frac{\overline{\theta_{ny}^2} \cos^2 2\theta_B}{u_n^2 + (B u_n + C) \cos^2 2\theta_B} \right\} \quad (II)$$

причем

$$u_n^2 = 1 + \frac{m^2/E^2 + \theta_{nx}^2 + \theta_{ny}^2}{|g'_0(\omega_n)|}; \quad \omega_n = \omega_B (1 + \theta_{nx} \operatorname{tg} \theta_B);$$

$$g_0 = g'_0 + i g''_0; \quad n = 1, 2, 3.$$

Здесь N_e — число электронов, прошедших через кристалл за время наблюдения t ; величины θ_{nx}^2 и θ_{ny}^2 зависят от геометрической формы детектора фотонов.

В формуле (II) информация о структурных амплитудах $F(\vec{r}) = F_R(\vec{r}) + i F_I(\vec{r})$ содержит параметры A , B и C , причем:

$$A = \frac{|\theta_x(\omega_n)|^2}{|g'_0(\omega_n)|^2} = \frac{e^{-2W}}{F_R^2(0)} \left\{ |F_R(\vec{r})|^2 + 2 |F_R(\vec{r})| |F_I(\vec{r})| \sin \alpha_r \right\} \quad (I2)$$

$$B = \frac{\text{Im} [g_r(\omega_n) g_{-r}(\omega_n)]}{|g_o'(\omega_n)| g_o''(\omega_n)} = 2 \frac{e^{-2W}}{F_r(0) F_r'(0)} |F_r(\vec{r})| |F_r'(\vec{r})| \cos \gamma_r; \quad (12)$$

$$C = \frac{\text{Re} [g_r(\omega_n) g_{-r}(\omega_n)]}{|g_o'(\omega_n)|^2} = e^{-2W} \frac{|F_r(\vec{r})|^2}{F_r^2(0)},$$

где $F_r(\vec{r}) = |F_r(\vec{r})| e^{i\varphi_r}$ определяется упругим, а $F_r'(\vec{r}) = |F_r'(\vec{r})| e^{i\varphi_r'}$ — неупругим рассеянием рентгеновского излучения на атомах кристалла, e^{-2W} — фактор Дебая-Воллера; $\gamma_r = \varphi_r - \varphi_r'$.

Число квантов ПРИ, попадающих в детектор, зависит от трех параметров $|F_r(\vec{r})|$, $|F_r'(\vec{r})|$ и γ_r , которые постоянны в пределах данного рефлекса. Поэтому для их однозначного определения по экспериментальным данным необходимо произвести измерения при трех различных положениях детектора. Тогда искомыми параметрами можно выразить через экспериментальные значения величин $N_r^{(2)}$ с помощью системы трех нелинейных уравнений.

В работе показано, что вследствие высокой спектральной интенсивности ПРИ измерения фаз структурных амплитуд могут быть выполнены с помощью стандартной аппаратуры для рентгеноструктурного анализа, однако предлагаемый метод позволяет значительно сократить время физического эксперимента.

Далее в четвертой главе вычислена интенсивность ПРИ для вырожденного случая двухволновой дифракции, когда совпадают показатели преломления собственных волн в кристалле. Рассмотрены условия, при которых реализуется такое вырождение и найдено число квантов, регистрируемых детектором с угловым разрешением θ_0 .

$$N_r^{(2)} = \frac{e^2}{16} \frac{\omega_0 L}{\sin^2 \theta_0} |\beta| |g_r^{(s)}|^2 \left(1 + \frac{1}{B^2}\right) \left[\ln \frac{(1+\beta_2)^2 + A^2}{1+A^2} - \frac{1}{A} \left(\text{arctg} \frac{1+\beta_2}{A} - \text{arctg} \frac{1}{A} \right) \right], \quad (13)$$

где

$$B = \text{tg} \omega_0 L \sqrt{-\beta \tau_2'}; \quad A = 2\sqrt{-\beta \tau_2'} / B \theta_0^2; \quad \beta_2 = \theta_0^2 / \theta_\phi^2; \\ \tau_2 = g_r^{(s)} g_{-r}^{(s)} = \tau_2' + i \tau_2''; \quad \beta = \gamma_0 / \gamma_1.$$

Здесь γ_0 — косинус угла между \vec{K} и нормалью \vec{n} к поверхности кристалла; $\gamma_1 = \cos(\vec{K}_r, \vec{n})$; $\vec{K}_r = \vec{K} + \vec{c}$.

Показано, что осцилляции интенсивности параметрического рентгеновского излучения в случае вырожденной дифракции можно наблюдать при небольшой разориентации кристалла относительно начального угла влета электронов.

И, наконец, в этой же главе сформулирован новый подход к задаче об излучении заряженных частиц в кристалле, позволяющий вычислить интенсивность ПРИ с помощью ковариантного описания электромагнитных волн в кристалле, в котором не используется разложение поля по собственным волнам. Такой метод позволяет провести аналитические расчеты дифференциальной и интегральной интенсивностей без вычисления в явном виде корней дисперсионного уравнения, что дает возможность теоретически исследовать некоторые качественные особенности спектров ПРИ в условиях многоволновой дифракции, а также найти интегральную интенсивность ПРИ вблизи краев поглощения рентгеновского излучения и в мессбауэровских кристаллах. Отметим, что последняя задача даже в рамках двухволнового приближения была ранее исследована только численно.

В заключении перечисляются основные результаты диссертации, состоящие в следующем:

— обоснована возможность использования кинематического приближения для описания параметрического рентгеновского излучения в мозаичных кристаллах с учетом многократного рассея-

ния заряженных частиц;

— получены универсальные соотношения для спектрально-углового распределения и интегральной интенсивности ПРИ, позволяющие находить характеристики этого излучения в произвольных кристаллах;

— предсказано наличие тонкой структуры в угловом и спектральном распределениях ПРИ и изменение зависимости интегральной интенсивности от энергии частицы при учете многократного рассеяния;

— проведено детальное теоретическое описание результатов экспериментов по исследованию различных характеристик ПРИ;

— теоретически предсказано наличие осцилляций в интегральной интенсивности ПРИ в вырожденном случае двухволновой дифракции;

— дана теория метода определения фаз структурных амплитуд из анализа спектров ПРИ;

— предложен новый метод ковариантного описания спектров ПРИ в условиях многоволновой дифракции и вблизи частот, соответствующих резонансным переходам ядер кристалла, позволивший, в частности, получить явные формулы для спектрального и углового распределений излучения в мессбауэровских кристаллах.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Feranchuk I.D., Ivashin A.V. Theoretical investigation of the parametric X-ray features. — J. Physique, 1985, v.45, p.1981-1986.

2. Baryshevsky V.G., Danilov V.A., Ermakovich O.L., Feranchuk I.D., Ivashin A.V., Kozus V.I. and Vinogradov S.G. Angular distribution of parametric X-rays. — Phys. Lett., 1985, v.110A, No 9, p.477-479.

3. Baryshevsky V.G., Feranchuk I.D., Grubich A.O. and Ivashin A.V. Theoretical interpretation of parametric X-ray spectra. — Nuclear Instruments and Methods in Physics

Research, 1986, v.A249, p.306-319.

4. Барышевский В.Г., Грубич А.О., Ивашин А.В., Феранчук И.Д. Пороговая зависимость интенсивности рентгеновского излучения от энергии частицы. — В кн.: Материалы XVI Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. — М.: Изд. МГУ, 1987, с. III-III3.

5. Ивашин А.В., Феранчук И.Д. Использование параметрического рентгеновского излучения для исследования структуры кристаллов. — В кн.: Тезисы докладов XVII Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. — М.: Изд. МГУ, 1987, с. IO2.

Ивашин