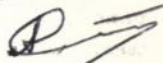


**ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**На правах рукописи**



**САФРОНОВ Андрей Григорьевич**

**ПОЛЯРИЗАЦИОННОЕ ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ  
БЫСТРЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ**

**01.04.16 - физика ядра и элементарных частиц**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Научный руководитель  
кандидат физико-математических  
наук Насонов Н.Н.**

**Харьков 1994**

Диссертация является рукописью

АВ 30,855

Работа выполнена в Харьковском физико-техническом институте

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
Насонов Николай Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Бережной Юрий Анатольевич  
(ХГУ, г. Харьков)

доктор физико-математических наук  
Болотин Юрий Львович  
(ННЦ ХФТИ, г. Харьков)

Зедущая организация: Киевский Государственный Университет  
им. Т.Г. Шевченко

Защита состоится "4" нояб. 1994 г. в 17 часов на  
заседании Специализированного Совета Д053.06.01 при Харьковском  
государственном университете.

(310108, г. Харьков-108, пр. Курчатова, 31, ауд. 301)

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной  
библиотеке ХГУ.

Автореферат разослан 10- сент 1994 г.

ЛНБ ім. В. Стефани:  
АН України

Ученый секретарь совета  
доктор физико-математических наук

Н.А. Азаренков

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00777624 (X)

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Одним из важных направлений современной физики, получивших широкое распространение в последнее время, являются исследования в области взаимодействия быстрых заряженных частиц с веществом, в частности, излучения релятивистских частиц в конденсированных средах. Были предсказаны теоретически и обнаружены экспериментально различные типы такого излучения, из которых наиболее известными являются: излучение Вавилова-Черенкова, переходное излучение, резонансное излучение, параметрическое рентгеновское и другие виды излучений. В большинстве случаев теоретическое описание излучения релятивистского заряда в веществе осуществлялось на основе макроскопической электродинамики, т.е. путем решения макроскопического уравнения Максвелла с заданным для данной среды видом диэлектрической проницаемости, т.е. среда рассматривалась как бесструктурная электронная жидкость, плотность распределения которой в пространстве задается некоторой функцией распределения.

Такой подход позволяет достаточно успешно описать различные виды когерентного излучения частиц в средах, однако совершенно не учитывает особенностей излучения, которые могут возникнуть вследствие атомарной структуры вещества, в частности, возможности существования некогерентного излучения атомов среды под действием поля пролетающей частицы.

С другой стороны, в последние годы появился целый ряд работ, исследующих излучение, возникающее вследствие рассеяния виртуальных фотонов кулоновского поля заряженной частицы свободными электронами плазмы или связанными атомными электронами. Поскольку данный вид излучения связан с колебаниями поляризации среды, он получил название "поляризационного тормозного излучения" или ПТИ. Существенно, что данный механизм излучения отличается от обычного тормозного механизма, причем вклад поляризационного тормозного механизма в суммарное излучение частицы в некоторых случаях даже больше, чем тормозного излучения. Например, излучение тяжелой частицы в среде в области частот, в которой не выполняется условие излучения Вавилова-Черенкова, обусловлено, в основном, поляризационным тормозным механизмом формирования излучения, поскольку обычное тормозное излучение в этом случае мало вследствие большой массы пролетающей частицы.

В большинстве выпущенных к настоящему времени работ исследуется ПТИ, возникающее при взаимодействии частицы с отдельным атомом. В некоторых работах были предприняты попытки

перейти от излучения отдельного атома к ПТИ, возникающему в конденсированных средах, однако использованные при этом методы обладали рядом недостатков и не давали замкнутой картины рассматриваемого явления. Поскольку существование связи между излучениями, связанными с макроскопическими свойствами среды и ПТИ атомов данной среды, является физически очевидным, возникает вопрос о возможности точного выявления этой связи, т.е. описания различных видов излучения в веществе как проявлений поляризационного тормозного излучения частицы в веществе. Ответ на этот вопрос опять-таки связан с вычислением ПТИ в среде.

Целью настоящей работы является построение последовательной микроскопической теории поляризационного тормозного излучения в конденсированных средах, выявление связи между ПТИ и уже известными видами излучений и исследование их свойств на основе построенной микроскопической теории.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Детально разработан микроскопический подход к проблеме описания процессов излучения быстрых заряженных частиц в конденсированных средах, позволяющий с единых позиций описать все возможные механизмы такого излучения и интерференцию между этими механизмами.
2. Предсказан и исследован теоретически эффект подавления поляризационного тормозного излучения быстрой заряженной частицы в конденсированной среде, обусловленный атомарной структурой вещества.
3. Предсказан и исследован теоретически эффект увеличения интенсивности когерентной составляющей поляризационного тормозного излучения релятивистской заряженной частицы, движущейся в периодической среде в условиях сильной дисперсии диэлектрической проницаемости среды.
4. Предсказан и исследован теоретически эффект интерференции параметрического и когерентного тормозного механизмов излучения релятивистских заряженных частиц в кристаллах.
5. Исследован вопрос о соотношении между кинематическим и динамическим режимами параметрического рентгеновского излучения. Дано физическое объяснение причины высокой эффективности кинематического приближения в теории параметрического рентгеновского излучения.
6. Предсказан и исследован теоретически эффект подавления поляризационного тормозного излучения электронно-позитронных пар

в веществе. Показана аналогия этого эффекта известному эффекту Чудакова в теории ионизационных потерь электронно-позитронных пар в веществе.

Научная новизна. Все результаты, перечисленные в "Положениях выносимых на защиту" получены впервые, что и определяет новизну работы.

Практическая ценность работы обусловлена возможностью использования излучения частиц в веществе в качестве источника рентгеновского излучения. Использование предсказанных в диссертации эффектов в процессе разработок подобного источника дает возможность резко увеличить суммарный выход генерируемого излучения.

Достоверность. Практически все результаты диссертации получены аналитически на основе апробированных теоретических методов. Полученные аналитические решения допускают предельные переходы к известным результатам. Поставленный в ХФТИ эксперимент по исследованию когерентного рентгеновского излучения электронов с энергией 15 МэВ и 25 МэВ в кристалле кремния подтвердил существование эффекта интерференции ПРИ и КТИ в предсказанных условиях. Изложенное подтверждает достоверность результатов диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обосновывается актуальность исследования поляризационного тормозного излучения; формулируется цель и задачи работы.

Первая глава посвящена исследованию поляризационного тормозного излучения частицы в аморфных средах. В начале главы произведен анализ уже существующих методов исследования поляризационного тормозного излучения в конденсированных средах. Показано, что их общим недостатком является феноменологическое введение диэлектрической проницаемости среды, которое лишает теорию логической последовательности, а также не дает возможности исследовать эффекты, связанные с дискретностью атомарной структуры вещества. Далее в работе описан метод вычисления ПТИ, основанный на решении микроскопических уравнений Максвелла в среде, через

которую пролетает заряженная частица. Таким образом, было получено интегральное уравнение для микроскопического поля в среде, которое является исходным для решения различных задач о поляризационном тормозном излучении, поставленных в работе.

В последующих параграфах первой главы полученное уравнение использовано для решения задачи о поляризационном тормозном излучении заряда в аморфной среде в различных областях частот. Решение уравнения производилось в рамках теории возмущений, причем в силу хаотичности расположения атомов малым считалось слабое, отвечающее процессам рассеяния. Таким путем были получены общие выражения для спектрально-углового распределения поляризационного тормозного излучения, на основании которых были предсказаны основные свойства ПТИ: размытый по частоте спектр и почти изотропная диаграмма направленности (рис.1). Полученные формулы позволили дать физическое объяснение указанным свойствам, основанное на анализе возможной величины передаваемого виртуальным фотоном импульса. Данная величина является не фиксированной, что приводит к размытию спектра, но наиболее вероятные значения передаваемого данным фотоном импульса близки по модулю к собственному импульсу фотона. Это обстоятельство, с учетом случайности направления вектора переданного импульса, объясняет изотропность углового распределения поляризационного тормозного излучения.

В третьем параграфе первой главы проанализирован вопрос о влиянии локальности микроскопического поля в среде на выход ПТИ. Было показано, что вклад эффектов, связанных с указанной локальностью, приводит лишь к незначительному изменению интенсивности черенковского излучения, что дало основание пренебречь этими эффектами в других рассмотренных в работе задачах.

В п.4 гл.1 исследован вопрос о влиянии дискретности вещества на величину поляризационного тормозного излучения. В качестве модели среды принята модель твердых шаров, предполагающая, что каждый атом среды может занять любое место с равной вероятностью, если это место не занято другим атомом, т.е. расстояния между центрами двух атомов не могут быть меньше диаметра атома. В рамках этой модели предсказано резкое подавление некогерентной составляющей ПТИ в плотных средах и исследованы спектральные и угловые характеристики такого подавления (рис.2,3).

В последнем параграфе главы рассмотрено поляризационное тормозное излучение, которое возникает при прохождении электронно-позитронной пары через аморфное вещество. Показано, что такое

излучение при малых временах разлета существенно меньше ПТИ отдельной частицы, т.е. ПТИ ведет себя подобно ионизационным и черенковским потерям, которые также подавляются при малых временах разлета пар (рис.4).

Во второй главе рассмотрено поляризационное тормозное излучение в кристаллах при различных режимах дифракции рентгеновского излучения. Показано, что как в кинематическом, так и в динамическом режимах когерентная составляющая ПТИ в кристалле совпадает с параметрическим рентгеновским излучением (ПРИ) в этих условиях. На основе полученных выражений, описывающих спектрально-угловые характеристики ПРИ, были даны физические интерпретации этого вида излучения. Показано, что в динамическом режиме дифракции параметрическое излучение вперед можно интерпретировать как черенковское излучение в среде с неким эффективным показателем преломления, тогда как ПРИ в направлении Брэгговского рефлекса (боковое пятно) связано с передачей импульса виртуальных фотонов кулоновского поля частицы в результате их когерентного рассеяния на кристаллографических плоскостях, то есть имеет природу, отличную от природы черенковского излучения.

В этой главе рассмотрена также некогерентная составляющая ПТИ в кристалле и ее свойства. Предсказан эффект подавления некогерентной составляющей ПТИ, обусловленный периодическим расположением атомов и дана физическая интерпретация этого эффекта.

Далее во второй главе исследован важный вопрос теории ПРИ о соотношении кинематического и динамического режимов формирования ПРИ в кристалле. Доказано, что вопреки общепринятому мнению, кинематический режим может реализоваться не только в тонких, но и в толстых кристаллах. Показано также, что возможен предельный переход от динамического случая к кинематическому и найден параметр такого предельного перехода. Проанализировано отличие граничных условий задачи о ПРИ частицы в кристалле от аналогичных условий задачи о дифракции рентгеновских лучей, падающих на поверхность кристалла, которое позволяет реализоваться кинематическому режиму формирования ПРИ в толстом кристалле.

Во второй главе рассмотрен также вопрос о причинах высокой эффективности кинематических формул при описании параметрического излучения. Получено условие, необходимое для того, чтобы вклад динамических эффектов существенно изменял структуру излучения, и доказана невыполнимость этого условия. На основании численных вычислений показано, что результаты, которые дают

вычисления по динамическим и кинематическим формулам практически совпадают (рис.5)

В конце второй главы проведен анализ особого случая ПРИ - параметрического излучения, возникающего при малых углах падения частицы на рассеивающую систему плоскостей. Получены формулы, описывающие спектрально-угловые характеристики этого вида излучения. Показано, что хотя свойства ПРИ в этом случае внешне отличаются от свойств обычного ПРИ, они также четко описываются в рамках предложенных в работе объяснений.

Третья глава диссертации посвящена исследованию свойств поляризованного тормозного излучения в различных типах сред в областях частот, близких к резонансным частотам атомов среды или их ядер, то есть решению задачи о влиянии дисперсии среды на ПТИ. При решении поставленной задачи для аморфной среды особый интерес представляет вычисление ПТИ в условиях существования излучения Вавилова-Черенкова. Показано, что в этом случае в непоглощающей среде возникает расходимость некогерентной составляющей ПТИ, аналогичная известной расходимости интенсивности излучения частицы в случайно-неоднородных средах. Физическая интерпретация расходимости базируется на том факте, что в условиях существования черенковского излучения ПТИ образуется в результате рассеяния как виртуальных фотонов кулоновского поля частицы, так и уже сформированных черенковских фотонов. Поскольку в непоглощающей среде объем черенковского конуса и длина формирования излучения равны бесконечности, бесконечен и суммарный вклад всех черенковских фотонов в рассеянное поле. В поглощающей же среде оба параметра конечны, поэтому расходимости не возникает.

Для устранения полученной расходимости в работе сделано принципиально важное уточнение предложенного микроскопического подхода, основанное на использовании так называемого "метода реакции среднего поля". Основная идея этого метода построена на возможности решения задач о взаимодействии электромагнитного поля со случайно-неоднородной средой путем их сведения к задачам о взаимодействии излучения с однородной поглощающей средой, причем поглощение излучения в такой среде связано не со столкновительными свойствами вещества, а с передачей энергии из среднего поля в случайное при рассеянии первого на случайных неоднородностях. В работе показано, что применение метода реакции среднего поля к задаче о ПТИ частицы в условиях существования излучения Вавилова-Черенкова полностью снимает проблему расходимости ПТИ и

позволяет получить выражения для спектрально-угловых распределений ПТИ в этих условиях с любой требуемой точностью.

Следующие параграфы третьей главы посвящены вопросу влияния дисперсии среды на интенсивность когерентной составляющей ПТИ в кристалле (ПРИ). В существующих работах, посвященных этому вопросу, влияние дисперсии на интенсивность излучения объясняется изменением показателя преломления и усилением поглощения, которые приводят к незначительному изменению интенсивности ПРИ. В диссертации показано, что, помимо указанных, существует и другой механизм влияния дисперсии, связанный с увеличением числа корней дисперсионного соотношения, определяющего кинематику процесса излучения, которое приводит к увеличению интенсивности излучения кратному числу корней указанного дисперсионного уравнения. Интерес к такого рода эффектам обусловлен тем, что они являются чисто динамическими, т.е. не могут быть описаны в рамках кинематической теории излучения частиц в кристаллах.

В диссертационной работе рассмотрено излучение, возникающее в двух различных областях частот, обеспечивающих существование сильной дисперсии: ПРИ в области частот, близкой к К-линии атомов вещества, и излучения на частотах, близких к частоте мессбауэровского перехода. В результате анализа первого случая показано, что обнаружение описанного механизма влияния дисперсии возможно в периодических средах с периодом осцилляции плотности порядка 100А. Такими средами могут являться, в частности, стопка пластин соответствующих размеров или сверхрешетка вакуумных пор в кристалле. В мессбауэровской области частот данные эффекты могут быть обнаружены в обычном кристалле.

Существование нескольких решений дисперсионного соотношения может привести к интересному эффекту интерференции излучений, соответствующих данным решениям. В частности, при излучении вперед может возникнуть эффект интерференции черенковского и параметрического механизмов излучения. Подобная интерференция приводит к дополнительному увеличению интенсивности излучения (в определенных условиях), а также возникновению осцилляционной зависимости регистрируемой интенсивности излучения от размеров кристалла и расстояния до точки наблюдения.

В четвертой главе исследовано взаимодействие поляризационного тормозного и тормозного механизмов излучения частиц в веществах. На примере излучения в кристалле показано, что между когерентными составляющими этих видов излучения (ПРИ и КТИ) существует интерференция, которая заметно изменяет структуру излучения.

Физические причины существования данного эффекта обусловлены тем, что оба механизма формирования излучения связаны с перестройкой одного и того же кулоновского поля пролетающей частицы, причем кинематические законы одинаковы для обоих процессов. Поскольку углы падения частицы и виртуального фотона на рассеивающую систему плоскостей примерно одинаковы, разность фаз между параметрическим и тормозным фотонами, возникающими на каждой из кристаллографических плоскостей, постоянна, что и приводит к появлению интерференции.

Проведенное исследование свойств описываемого эффекта показало, что наиболее ярко он проявляется при малых углах падения частицы на плоскость для составляющей излучения, поляризованной в плоскости реакции (рис.6). Важным является также факт зависимости знака интерференционной составляющей излучения от знака пролетающей частицы. Такая зависимость возникает вследствие того, что знак амплитуды поля тормозного фотона пропорционален первой степени заряда частицы, а параметрического - второй. Эта особенность не играет никакой роли при подсчете интенсивности ПРИ и КТИ, однако обнаруживается при вычислении суммарной интенсивности. Описанный эффект знаковой зависимости является проявлением более общего эффекта знаковой зависимости слагаемого, являющегося результатом интерференции поляризационного тормозного и параметрического излучений.

В заключении перечислены основные результаты работы, которые в основном совпадают с положениями, выносимыми на защиту.

Апробация работы и публикации. Материалы диссертации докладывались на Всесоюзных и международных совещаниях по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами, Москва 1990, 1993, 1994, международных симпозиумах International symposium on radiation of relativistic electrons in periodical structures, Tomsk, 1993 и Conference "Physics in Ukraine", Киев, 1993.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Лапко В.П., Насонов Н.Н., Сафронов А.Г. Соотношение между кинематическим и динамическим режимами параметрического рентгеновского излучения заряженных частиц в кристаллах. //Тезисы докладов XX Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М. Издательство МГУ, 1990, с.67.

2. Nasonov N.N., Safronov A.G. Interference of Cherenrov and parametric Radiation Mechanisms of a Fast Charged Particle. *Phys.Stat.Sol. (b)*, 168,1991 p.617 .
3. Насонов Н.Н., Сафронов А.Г. О поляризацонном тормозном излучении релятивистского заряда в конденсированном веществе. *ЖТФ*, т.62, в.10, 1992, с.1-15.
4. Насонов Н.Н., Сафронов А.Г. О роли эффектов динамической дифракции в параметрическом рентгеновском излучении.//Тезисы докладов XXIII межнационального совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва, МГУ,1993, с.62.
5. Nasonov N.N., Safronov A.G. Koherent X-Ray Radiation Mechanisms for Fast Charged Particles in Cristals. Kiev, Bogolyubov institute for Theoretical Physics, Materials of Conference Physics in Ukraine, 1993.
6. Nasonov N.N., Safronov A.G. Polarization Bremsstrahlung of Fast Charged Particles in Cristals.// International simposium on radiation of relativistic electrons in periodical stuctures, Tomsk, 1993, p.134-141.
7. Kleiner V.L., Nasonov N.N., Safronov A.G. Interference between Parametric Mechanisms of a Fast Charged Particle in a Cristal. *Phys. Stat. Sol. (b)* 181,1994, p.223.
8. Блажевич С.В., Бочек Л.Г., Гавриков В.Д., Кулибаба В.И., Маслов Н.И., Насонов Н.Н., Пирогов В.Н., Сафронов А.Г., Торговкин А.В. Обнаружение эффекта интерференции когерентного тормозного и параметрического механизмов излучения релятивистских электронов в кристалле. Письма В *ЖЭТФ*, т.59, в.8, 1994, с.498-500.
9. Блажевич С.В., Бочек Л.Г., Гавриков В.Д., Кулибаба В.И.,Маслов Н.И., Насонов Н.Н., Пирогов В.Н., Сафронов А.Г., Торговкин А.В. Обнаружение эффекта интерференции когерентного тормозного и параметрического механизмов излучения релятивистских электронов в кристалле.// Тезисы докладов XXIV межнационального совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва, 30 мая - 1 июня 1994 г., МГУ, с.40.
10. Насонов Н.Н., Сафронов А.Г. Интерференционныe эффекты в излучении электронно-позитронных пар высокой энергии в веществе.// Тезисы докладов XXIV межнационального совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва, 30 мая - 1 июня 1994 г., МГУ, с.41.

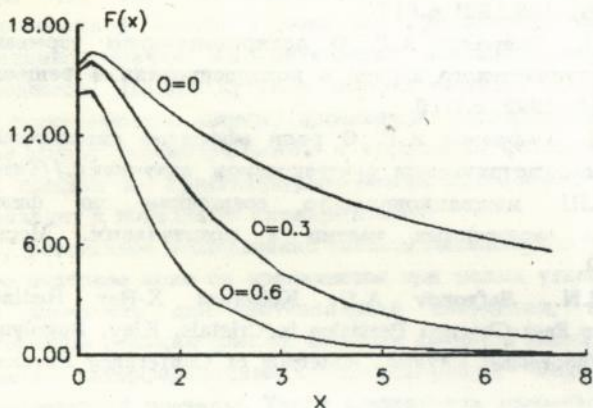


Рис.1 Спектрально-угловые распределения ПТИ при различных углах наблюдения  $O$ .

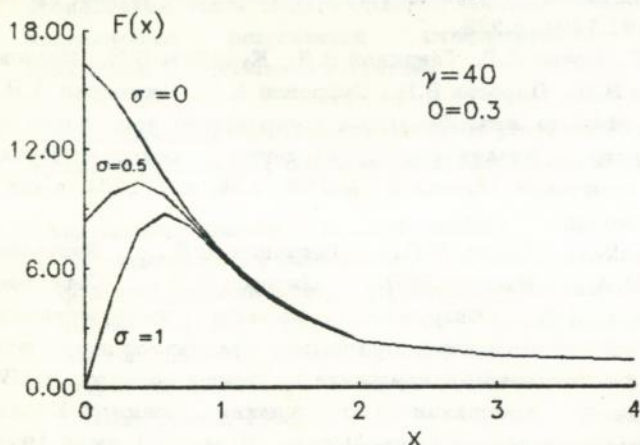


Рис.2 Спектрально-угловые распределения ПТИ при различных коэффициентах  $\sigma$ , характеризующего плотность среды.

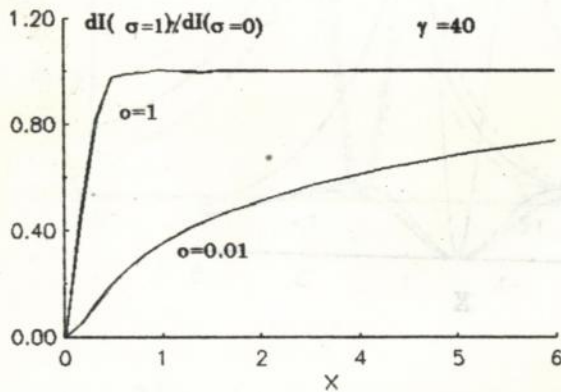


Рис.3 Спектрально-угловые характеристики эффекта подавления ПТИ.

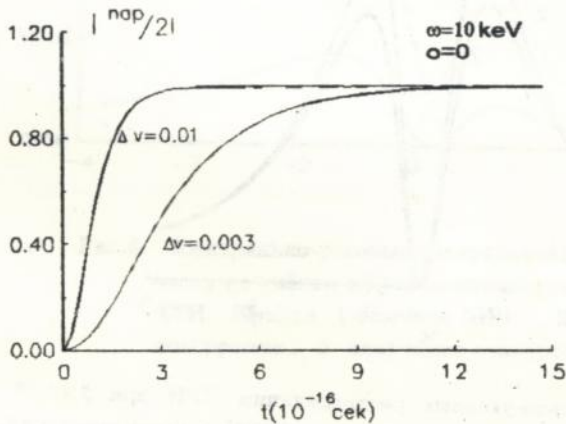


Рис.4 Относительные интенсивности ПТИ  $e^{\pm}$  пар при различных углах разлета.

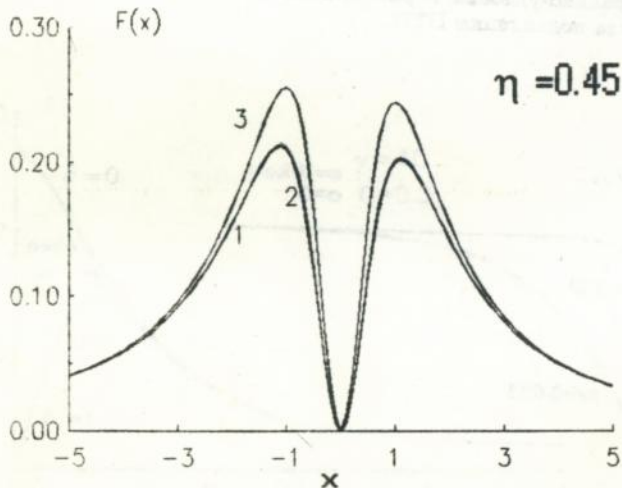
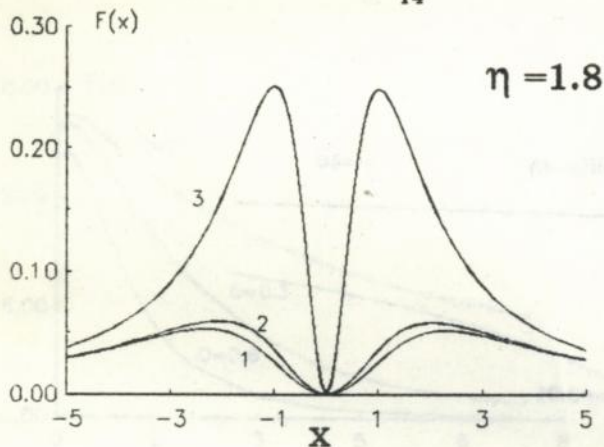


Рис. 5 Спектрально-угловые распределения ПРИ при  $\beta = 10^{-2}$ ,  
 Кривая 1- динамический режим ПРИ, 2-кинематический,  
 3- кинематический режим без учёта преломления фотонов.

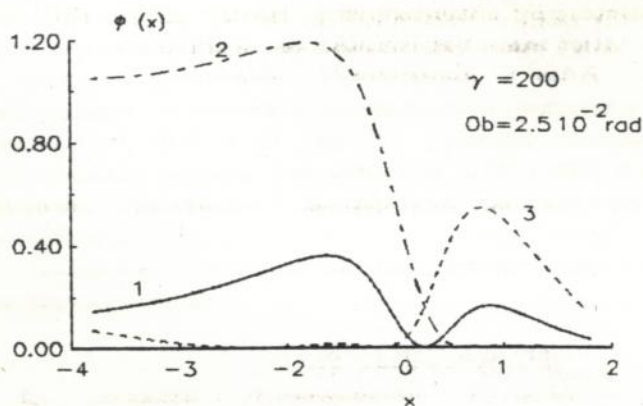
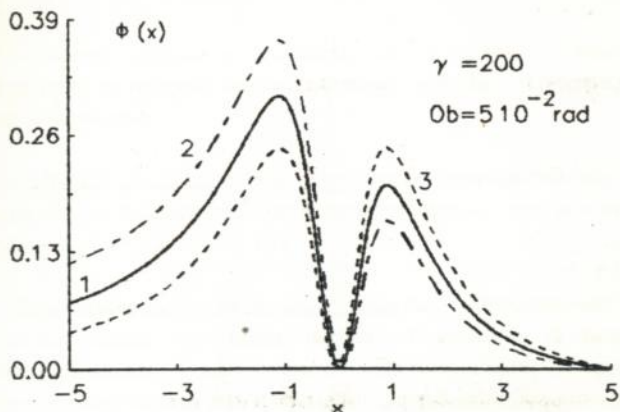


Рис.6 Спектрально-угловые распределения излучения частиц с учётом эффекта интерференции ПРИ и КТИ. Кривая 1-обычное ПРИ, 2- излучение позитронов, 3- излучение электронов.

Подписано в печать 27.06.94. Формат 60x84/16. Офсетная печать.  
 Усл.п.л. 1,0. Уч.-изд. 1,0. Тираж 100. Заказ №171.

Харьков-310108, ротاپронт ННЦ ХФТИ.

1422159

AB 30.855

**AB 30.855**