

РГБ 0А

199 1033  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ИМЕНИ Б.И. СТЕПАНОВА АН БЕЛАРУСИ

На правах рукописи

ТИХОМИРОВ Виктор Васильевич

ПРОЦЕССЫ ИЗЛУЧЕНИЯ, ОБРАЗОВАНИЯ ПАР И  
ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ  
ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

01.04.02 – теоретическая физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Минск – 1993

Работа выполнена в Институте ядерных проблем при Белорусском государственном университете

### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ

доктор физико-математических наук, профессор КАЛАШНИКОВ Н.П.  
(Московский автомобилестроительный институт)

доктор физико-математических наук, профессор ФЕРАНЧУК И.Д.  
(Белорусский государственный университет, г.Минск)

доктор физико-математических наук ШУЛЬГА Н.Ф.  
(Харьковский физико-технический институт)

### ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ

Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Защита состоится " 6 " апреля 1993 года в 16 часов на заседании специализированного совета Д.006.01.02 при Институте физики имени Б.И.Степанова АН Беларуси (220602, Минск, пр.Скорины, 70) в конференц-зале института.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики имени Б.И.Степанова АН Беларуси.

Автореферат разослан " 2 " марта 1993 года

Ученый секретарь специализированного совета  
кандидат физико-математических наук

Ю.А.Курочкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена исследованию процессов излучения и образования электрон-позитронных пар (ОП), проявляющихся при прохождении через ориентированные кристаллы электронов ( $e^-$ ), позитронов ( $e^+$ ) и фотонов ( $\gamma$ ) с энергиями в десятки ГэВ и выше, а также поляризационным и ориентационным явлениям, сопровождающим эти процессы и открывающим широкие возможности получения и анализа поляризованных  $e^\pm$  и  $\gamma$ -пучков наиболее высоких энергий, которые могут быть использованы в экспериментальных исследованиях спиновых свойств фундаментальных взаимодействий.

Актуальность темы. Изучение влияния вещества на процессы получения и ОП уже сорок лет является интенсивно развивающейся областью исследований, лежащей на стыке квантовой электродинамики и физики твердого тела. Весьма существенным для ее развития оказалось осознание того, что коллективные явления в процессах излучения и ОП в веществе могут проявляться при сколь угодно высоких энергиях, когда длины волн частиц пренебрежимо малы по сравнению с межатомными расстояниями. Когерентные и интерференционные эффекты в процессах излучения и ОП в кристаллах были подробно исследованы Ферретти, М.Л.Тер-Микаэляном и Юбераллом в рамках основанной на борновском приближении теории когерентного тормозного излучения и образования пар. Л.Д.Ландау и И.Я.Померанчук предсказали подавление процессов излучения и ОП, возникающее при высоких энергиях благодаря многократному рассеянию электронов и позитронов в аморфном веществе. Теория этого явления, названного эффектом Ландау-Померанчука, была развита А.Б.Мигдалом.

В середине семидесятых годов рядом авторов при решающем вкладе В.Г.Барышевского и И.Я.Дубовской, а так же М.А.Кумахова было предсказано явление излучения при каналировании электронов и позитронов в кристаллах. На первом этапе оно исследовалось при достаточно низких энергиях в условиях действия дипольного механизма излучения. Однако в 1980 году Н.Ф.Шульгой было указано на то, что с ростом энергии  $e^\pm$  их излучение в кристаллах приобретает черты магнитотормозного излучения. Вскоре было выяснено, что большая напряженность усредненных полей кристаллических осей позволяет изучать квантовый режим магнитотормозного излучения уже при доступных энергиях  $e^\pm$  в несколько десятков ГэВ. Экспериментальное исследование магнитотормозного

получения  $e^{\pm}$  в кристаллах было начато в ЦЕРН в 1984 году. Помимо успешного наблюдения проявлений его квантового режима, там в 1986 году был неожиданно обнаружен пик в жесткой части спектра энергетических потерь  $e^{-}$  в достаточно тонком кристалле германия.

Задача теоретической интерпретации этого пика в то время являлась наиболее актуальной задачей в области исследования взаимодействия частиц высоких энергий с веществом. Ее решение было дано в наших работах, где было показано, что объяснить природу пика можно, лишь приняв во внимание связь потери энергии электронов при излучении с динамикой их поперечного движения. Хотя на существование подобной связи указывалось в работах В.Г.Барышевского и И.Я.Дубовской еще в 1977 году, количественное описание взаимного влияния движения  $e^{\pm}$  в поперечной плоскости и процесса излучения в условиях действия его магнитотормозного механизма требовало значительных дополнительных усилий.

Следует отметить, что, как в рамках когерентной тормозной теории и теории эффекта Ландау-Померанчука, так и в теории процессов на ядре и в однородном поле, процесс излучения всегда рассматривался вместе с процессом ОП. Выражения, описывающие эти процессы, оказывались в этих теориях связанным простым преобразованием, отражающим свойство перекрестной симметрии амплитуд квантовой электродинамики. В связи с этим стал актуален вопрос о существовании процесса ОП, связанного соотношением перекрестной инвариантности с процессом излучения при каналировании. В соответствии с предсказанием В.Г.Барышевского этот процесс должен был сопровождаться такими поляризационными явлениями, как дихроизм и двулучепреломление кристаллов в жестком диапазоне, что дополнительно усилило интерес к исследованию процесса ОП при малых углах падения фотонов на кристаллические оси и плоскости.

Из-за того, что при высоких энергиях излучение при каналировании приобретает черты процесса излучения в однородном поле, следовало ожидать, что при достаточно малых углах падения фотонов на кристаллические плоскости и оси аналогичной особенностью должен обладать и процесс ОП. Проявление магнитотормозного механизма ОП было обосновано в наших работах на основе развитой в них общей теории процесса ОП в кристаллах. Позже этот механизм был также предсказан в работах группы Кимбалла и Кью из университета в Олбани, США. Вскоре его проявление было обнаружено в ЦЕРН, что дополни-

тельно повысило актуальность соответствующих теоретических исследований.

Экспериментальные исследования магнитотормозных процессов велись на вторичных пучках протонного ускорителя ЦЕРН, максимальные энергии которых 150-287 ГэВ позволили подробно изучить эти процессы в осевом случае, но были недостаточны для их всестороннего исследования в плоскостном. Тесная связь процессов получения и ОП в кристаллах с аналогичными процессами в интенсивном однородном поле позволила предсказать ряд ярких поляризационных явлений, сопровождающих движение  $e^\pm$  и  $\gamma$  под малыми углами к кристаллическим плоскостям и сильно подавленных в полях кристаллических осей. Наиболее ярко эти поляризационные явления будут проявляться в томном диапазоне энергий, который станет доступен для экспериментальных исследований в ближайшее десятилетие после ввода в строй таких протонных ускорителей, как Сверхпроводящий суперколлайдер (SSC) и Большой адронный коллайдер (LHC). Существуют также некоторые возможности исследования этих явлений и на крупнейших действующих ускорителях.

К числу таких поляризационных явлений относятся линейная поляризация получения  $e^\pm$  и уже упоминавшиеся эффекты дихроизма и двулучепреломления. Как было впервые указано В.Г.Барышевским, применение изогнутых кристаллов позволяет наблюдать такие спиновые явления, как радиационная самополяризация  $e^\pm$  и образование поперечно поляризованных  $e^+e^-$ -пар, а также явление прецессии спина частиц, канализированных в изогнутых кристаллах. Последнее открывает перспективы измерения магнитных моментов короткоживущих частиц, которая уже была продемонстрирована в эксперименте с сигма плюс гиперонами во ФНАЛ и в будущем позволит измерять магнитные моменты очарованных гиперонов. Помимо этого в наших работах было предложено использовать изогнутые кристаллы для получения и анализа поляризации протонов высоких энергий. Кроме того, было показано, что такие поляризационные явления, как линейная поляризация получения и дихроизм, проявляются при прохождении  $e^\pm$  и  $\gamma$  через кристаллы или другие вещества и в условиях некоррелированного рассеяния  $e^\pm$  атомными цепочками, начало изучению которого было положено А.И.Ахиезером, Н.Ф.Шульгой и соавторами. Помимо физического интереса, актуальность исследования всех этих эффектов определяется в первую очередь тем, что они открывают широкие возможности получения и анализа поляризованных электрон-фотонных и протонных пучков того же диапазона, которые мо-

гут быть использованы в активно ведущихся исследованиях спиновой структуры фундаментальных взаимодействий. Обоснованию этих возможностей посвящена основная часть диссертации.

Значительное место уделено в ней исследованию ориентационной зависимости процессов излучения, ОП и поляризационных явлений, а также сопровождающих их некогерентных процессов, без учета которых невозможно количественное описание прохождения частиц через кристаллы.

#### Основные цели работы:

- построение теории процесса ОП, не опирающейся на первое борновское и дипольное приближения, и исследование процесса магнитотормозного ОП, проявляющегося при малых углах падения фотонов на кристаллические плоскости и оси;

- разработка теории прохождения через кристаллы  $e^{\pm}$  в условиях интенсивного магнитотормозного излучения, приводящего к существенному взаимному влиянию процесса потери энергии  $e^{\pm}$  на излучение и динамики их поперечного движения;

- исследование ориентационной зависимости процессов излучения и ОП в кристаллах при высоких энергиях;

- построение теории некогерентных процессов, проявляющихся в условиях действия магнитотормозного механизма излучения и ОП в кристаллах;

- построение теории и количественное исследование поляризационных явлений, сопровождающих квантовое магнитотормозное излучение и ОП в кристаллах, а также процессы излучения и ОП в условиях некоррелированного рассеяния  $e^{\pm}$  атомными цепочками.

#### Научная новизна и значимость работы

Предсказано существование процесса магнитотормозного ОП в кристаллах и впервые корректно определена область энергий и углов падения частиц на кристаллические плоскости и оси, в которой проявляются квантовое магнитотормозное излучение и ОП. Рассчитана ориентационная зависимость вероятности процесса ОП в области малых углов падения фотонов на кристаллические оси. В области очень малых углов обнаружен новый ориентационный эффект, связанный с неоднородностью потока фотонов, возникающей по-за их интен-

сивного локального поглощения. На основе использования алгоритма быстрого преобразования Фурье впервые проведен расчет вероятностей процессов излучения, ОП и их поляризационных характеристик при произвольных углах падения частиц на кристаллические плоскости.

Впервые дана интерпретация экспериментально измеренных спектров энергетических потерь электронов высоких энергий в достаточно тонких кристаллах и показано, что появление пика в жесткой части этих спектров связано с эффектом радиационного охлаждения.

Развита теория, описывающая влияние некоррелированного рассеяния произвольной интенсивности на магнитотормозное излучение и рождение фотонами пар ультрарелятивистских электронов и позитронов. Доказано, что при наличии внешнего поля влияние некогерентного рассеяния на процессы излучения и ОП убывает с ростом энергии частиц, не давая проявиться эффекту Ландау-Померанчука. Построена теория некогерентных процессов, проявляющихся в условиях действия магнитотормозного механизма процессов излучения и ОП в кристаллах. Показано, что вероятности этих процессов убывают с ростом энергии начальных частиц.

Обосновано существование поляризационных явлений, сопровождающих излучение и ОП в условиях некоррелированного рассеяния  $e^{\pm}$  атомными цепочками и построена теория этих явлений.

Предсказан и подробно количественно исследован ряд возможных применений кристаллов для получения и анализа поляризованных пучков высоких энергий. В частности для существенного сокращения базы при измерении поляризации протонов высоких энергий предложено использовать кристаллы для детектирования частиц, рассеянных на млерорадиантные углы. Обоснована возможность эффективного использования поляризационных явлений в кристаллах для получения достаточно интенсивных и высоко поляризованных вторичных пучков на протонных ускорителях тэвного диапазона. В частности построена теория эффектов дихроизма и двулучепреломления, проявляющихся в кристаллах в условиях действия магнитотормозного механизма процесса ОП. Впервые количественно проанализирован процесс радиационной самополяризации электронов и позитронов в изогнутых кристаллах и доказана возможность повышения эффективности процесса радиационной самополяризации электронов путем введения переменной кривизны изгиба кристалла. Предсказан эффект образова-

ния фотонами поперечно поляризованных  $e^+e^-$ -пар и построена его теория.

### Практическая ценность

Рассмотренные поляризационные явления во взаимодействии  $e^\pm$ ,  $\gamma$  с кристаллами открывают широкие возможности получения и анализа вторичных поляризованных  $e^\pm$ ,  $\gamma$ -пучков на протонных ускорителях тевного диапазона. Они могут быть применены также для измерения поляризации вторичных фотонных пучков линейных ускорителей электронов и позитронов, что позволит измерять и продольную поляризацию  $e^-$  и  $e^+$ .

Показано, что кристаллы могут быть использованы для получения и измерения поляризации пучков протонных ускорителей очень высоких энергий.

Исследованные в диссертации ориентационные эффекты во взаимодействии  $e^\pm$  и  $\gamma$  высоких энергий с кристаллами могут быть применены для формирования электрон-фотонных пучков высоких энергий и определения с большой точностью их ориентации относительно кристаллических осей и плоскостей.

### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Начиная с энергий в десятки и сотни ГэВ процесс образования фотонами электрон-позитронных пар в ориентированных кристаллах приобретает магнитотормозной характер, а процесс излучения фотонов электронами и позитронами становится аналогичным процессу квантового магнитотормозного излучения. Для описания этих процессов при достаточно малых углах падения частиц на кристаллические оси и плоскости вполне применима квантовая электродинамика явлений в однородном интенсивном поле. Процесс магнитотормозного ОП имеет псевдопороговый характер, в соответствии с чем его интенсивность начинает быстро нарастать при энергиях, близких к энергии псевдопорога, измеряемой десятками ГэВ в случае кристаллических осей и сотнями - в случае плоскостей. Наиболее ярко магнитотормозные процессы проявляются при наименьших углах падения частиц на кристаллические оси и плоскости. При этом в области микрорадиальных углов имеет место специфическая ориентационная зависимость вероятности ОП. Верхняя граница углов падения, при которых сохраняются качественные особенности магнитотормозных процессов, заметно превышает характерный угол каналирования.

2. Наиболее существенной чертой динамики движения и излучения электро-

нов и позитронов в условиях действия магнитотормозного механизма последнего является наличие взаимного влияния изменений полной энергии излучающих частиц и энергии их поперечного движения. Учет этого влияния позволяет, в частности, объяснить наблюдаемое экспериментально значительное увеличение энергетических потерь определенной доли электронов.

3. Характеристики некогерентных процессов, сопровождающих когерентные магнитотормозные процессы излучения и ОП, выражаются через сечения аналогичных процессов на отдельном ядре, находящемся в однородном внешнем поле. Важной чертой этих процессов является их ослабление с ростом энергии начальных частиц. Некогерентные процессы излучения и ОП в полях кристаллических плоскостей обладают поляризационной зависимостью, которая может иметь различную природу.

4. Процессы квантового магнитотормозного излучения и ОП в полях кристаллических плоскостей связаны с такими поляризационными явлениями, как дихроизм и двулучепреломление, рождение фотонами поперечно поляризованных каналированных электронов и позитронов и самополяризация последних в изогнутых кристаллах. Эти поляризационные явления открывают широкие перспективы получения и анализа поляризованных вторичных электрон-фотонных пучков высоких энергий. В той же области существуют также ориентационные явления, позволяющие использовать кристаллы для получения и анализа поляризации протонных пучков

5. Процессы излучения и ОП в условиях некоррелированного рассеяния электронов и позитронов атомными цепочками также сопровождаются поляризационными эффектами, которые отличаются широкой областью проявления.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на XI–XX и XXII Всесоюзных совещаниях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 1981–1990, 1992), Зимней школе ЛИЯФ (Гатчина, 1986), VII и VIII Международных симпозиумах по спиновым явлениям в физике высоких энергий (Протвино, 1986, Миланеполис, 1988), сессиях АН СССР (Москва 1982, 1986), Семинарах ХФТИ (Харьков 1983, 1986), Совещании по физике взаимодействия адронов в резонансной области энергий (Харьков, 1986), семинаре кафедры теоретической физики МГУ (Москва, 1987), Совещаниях по программе поляризационных экспериментов на УНК (Протвино, 1988–1991), Семинаре по

исследованию эффектов квантовой электродинамики при прохождении частиц через кристаллы (Троицк, ФИАН, 1988, 1989), семинарах физического факультета университета Васеда (Токио, 1990–1991), XIII Конференции им. Вернера Брандта (г.Нара, Япония, 1990), семинаре физического факультета Токийского университета (1991), семинаре Университета г.Окаяма (Япония, 1991), в Институте физики высоких энергий (Япония, г.Цукуба, 1991), на Сессии Физического общества Японии (Токио, 1991), семинарах Института ядерных проблем при БГУ и заседаниях кафедр теоретической и ядерной физики БГУ.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах, список которых приведен в конце реферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 195 наименований на 23 страницах. Оналожена на 345 страницах и содержит 44 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертации посвящена процессу ОП, проявляющемуся при достаточно высоких энергиях и малых углах падения фотонов на кристаллические плоскости и осей. В §1 изложена теория ОП, не опирающаяся на борновское и дипольное приближения и позволяющая описать его при произвольных углах падения фотонов на кристаллические оси и плоскости. Подобная теория, основанная на описании движения заряженных частиц в  $U$ -периодном поле кристаллических плоскостей (осей) при помощи решений Зоммерфельда–Мауэ, была разработана В.Г.Барышевским и И.Я.Дубовской для случая излучения. Этот же подход лежит в основе теории ОП, излагаемой в §1.

Важнейшую роль в понимании природы процессов излучения и ОП в кристаллах при высоких энергиях играет магнитотормозное приближение, становящееся применимым при энергиях (используется система единиц  $\hbar = c = 1$ )

$$\epsilon \gg m^2/2V_0, \quad (1)$$

где  $V_0$  – амплитуда изменения усредненного потенциала кристаллических плоскостей ( $V_0 \sim 10$ – $100$  эВ) либо осей ( $V_0 \sim 100$ – $1000$  эВ). При энергиях (1), превышающих 1–10 ГэВ для плоскостей и 0,1–1 ГэВ для осей, процессы излучения и ОП формируются на малой доле периода поперечного движения  $e^\pm$ , в преде-

лах которой усредненное поле плоскостей (осей) можно считать однородным. Это и позволяет использовать результаты квантовой электродинамики явлений в однородном поле для описания процессов излучения и ОП в кристаллах при высоких энергиях и малых углах падения частиц на кристаллические оси и плоскости, которые получили название магнитотормозных процессов.

В §2 показано, как в случае нулевого угла падения фотонов на кристаллические плоскости полученное в §1 общее выражение для вероятности ОП переходит в усредненную по поперечнику кристалла вероятность ОП в однородном поле, роль которого играет усредненное поле кристаллических плоскостей. Связь процесса ОП в кристаллах с процессом в однородном поле позволила предсказать псевдopоговой характер поведения вероятности этого процесса (см. рис. 1). Напомним, что при  $\kappa \lesssim 1$  зависимость вероятности ОП от энергии фотонов выражается множителем  $\exp(-8/3\kappa)$ , где  $\kappa$  - инвариантный параметр, в случае поперечного электрического поля равный

$$\kappa = \omega \mathcal{E} / m \mathcal{E}_0, \quad (2)$$

где

$$\mathcal{E}_0 = 1,32 \cdot 10^{16} \text{ В/см} \quad (3)$$

- масштаб напряженности электрического поля, спонтанно рождающего электрон-позитронные пары из вакуума. При максимальной напряженности усредненного поля кристаллических осей или плоскостей параметр  $\kappa$  достигает единицы при характерной (псевдopоговой) энергии процесса магнитотормозного ОП в кристаллах

$$\omega_{\kappa=1} = \epsilon_{\chi=1} = m \mathcal{E}_0 / \mathcal{E}_{\text{max}}, \quad (4)$$

равной характерной энергии квантового магнитотормозного излучения  $\epsilon_{\chi=1}$ , роль которой будет обсуждаться ниже. Энергетическая зависимость выраженной в единицах вероятности Бете-Гайтлера вероятности ОП в поле оси  $\langle 110 \rangle$  Ge при  $T = 100 \text{ К}$  ( $\omega_{\kappa=1} = 47 \text{ ГэВ}$ ) представлена вместе с данными эксперимента *Bak J.F. et al. Phys. Lett. B. 202(1988)615* на рис. 1.

Важной чертой магнитотормозного ОП является его большая интенсивность при малых углах, отличающая его от процесса когерентного тормозного ОП. В приближении прямолинейных траекторий для угла отклонения  $e^\pm$  в поле одной атомной оси (плоскости) можно получить оценку  $\Delta\psi = |e f \vec{\mathcal{E}}(\vec{r}) dl / c| \sim V_0 / c \psi$ ,

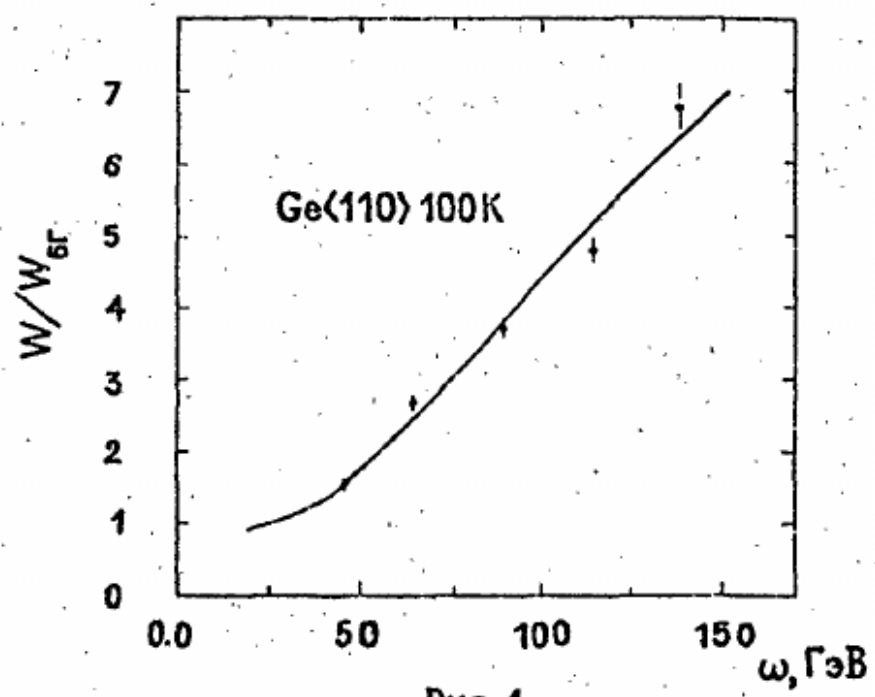


Рис.1

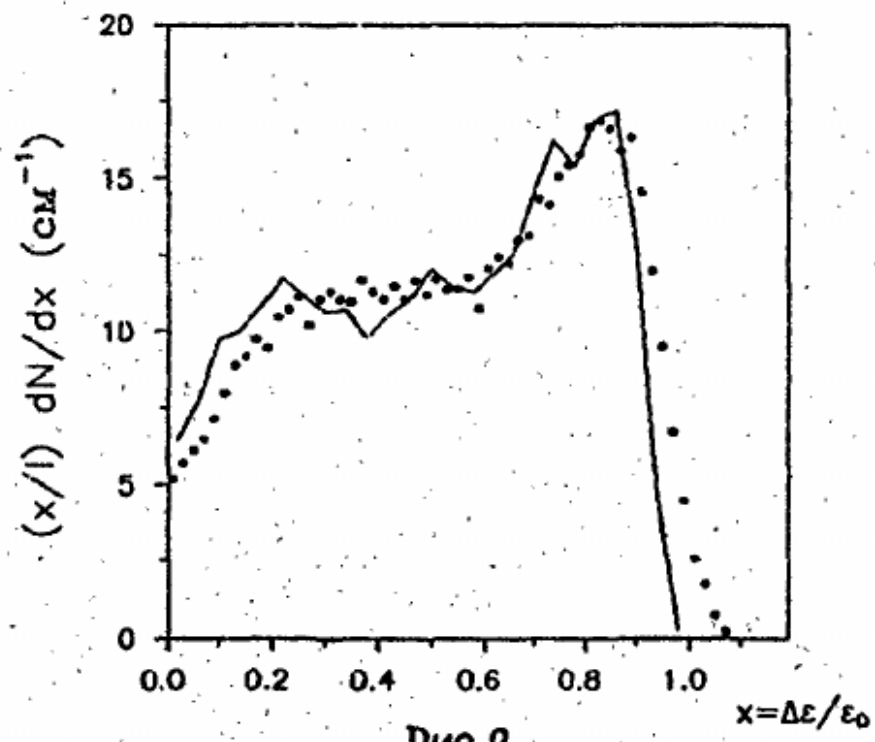


Рис.2

сравнение которой с углом  $m/\epsilon$  показывает, что локальный характер процесса ОП сохраняется при

$$\psi \ll V_0/m. \quad (5)$$

При энергиях псевдопорога (4) отношение  $V_0/m$  значительно превосходит угол каналирования. Однако в первом эксперименте по наблюдению магнитотормозного ОП была обнаружена очень резкая ориентационная зависимость, характеризующаяся углом близким к углу каналирования, примерно на порядок меньшим  $V_0/m$ . Этот результат, казалось бы, указывал на связь магнитотормозного процесса ОП с эффектом каналирования рождающихся  $e^\pm$ . В §3 полагается метод расчета вероятности ОП, позволяющий количественно обосновать существование достаточно плавной ориентационной зависимости вероятности ОП, характеризуемой углом  $V_0/m$ . В основе данного метода лежит расчет поправки, учитывающей связь неоднородности поля и ориентационной зависимости вероятности ОП. В качестве исходного берется квазиклассическая формула В.Н.Байера и В.М.Каткова, а в качестве нулевого приближения – вероятность, полученная в магнитотормозном пределе. Используя этот метод, действительно удалось обосновать существенно более плавную ориентационную зависимость вероятности ОП, чем наблюдался на эксперименте. Помимо этого, было продемонстрировано сохранение симметрии спектра рождающихся  $e^+$  и  $e^-$  при  $\psi \ll V_0/m$  и показано, что увеличение вероятности ОП с ростом  $\psi$  сменяется на убывание при достаточно высокой энергии фотонов (в поле оси  $\langle 110 \rangle$  Ge 100 K это происходит при  $\omega \simeq 200$  ГэВ). Последующие эксперименты и теоретические работы других авторов подтвердили наши предсказания, касающиеся как ориентационной зависимости, так и величины вероятности ОП.

Вторая глава посвящена процессу излучения, который также сильно модифицируется при энергиях (1) и углах падения  $e^+$  и  $e^-$  на плоскости и оси (5). Наиболее важные черты процесса магнитотормозного излучения  $e^\pm$  в кристаллах можно предсказать, исходя из известных положений теории магнитотормозного излучения. Весьма удобным при этом оказывается параметр

$$\chi = \gamma\mathcal{E}/\mathcal{E}_0, \quad (6)$$

в случае поперечного усредненного электрического поля кристаллических осей и плоскостей равный отношению напряженности поля  $\mathcal{E}' = \gamma\mathcal{E}$  в системе покоя

$e^{\pm}$ , имеющих энергию  $\epsilon$  и лоренц-фактор  $\gamma = \epsilon/m$ , к характерной напряженности поля (3). Параметр  $\chi$  достигает единицы при  $\epsilon = \epsilon_{\chi=1}$  (см. (4)). При этом верхняя граница спектра получаемых фотонов  $\hbar\omega \sim \chi\epsilon/(1+\chi)$  становится сравнимой с энергией самих  $e^{\pm}$  и начинают заметно проявляться спиновые эффекты в излучении, делающие возможной самополяризацию  $e^{\pm}$  в полях кристаллов, подробно рассматриваемую в §14.

Наиболее принципиальным результатом, полученным в исследованиях процесса излучения в кристаллах в 80-е годы, оказалось обнаружение влияния эффекта радиационного охлаждения  $e^-$  на спектр их энергетических потерь. Магнитотормозное приближение сильно упрощает описание процесса радиационного охлаждения. Действительно, вследствие того, что магнитотормозное излучение является локальным и практически не изменяет направления движения, испускание фотона приводит лишь к замене в выражении для энергии поперечного движения

$$\epsilon_{\perp} = \epsilon \cdot v^2(\vec{\rho})/2 + V(\vec{\rho}) \quad (7)$$

начальной энергии  $e^{\pm}$  на конечную  $\epsilon' = \epsilon - \omega$  и, таким образом, изменение  $\epsilon_{\perp}$  составляет  $-\omega v^2(\vec{\rho})/2$ . Поскольку в достаточно общем случае кинетическая энергия поперечного движения  $\epsilon v^2(\vec{\rho})/2$  сравнима с  $\epsilon_{\perp}$ , потеря большей части полной энергии частицы на излучение может вызвать сопоставимое по относительной величине уменьшение  $\epsilon_{\perp}$ .

Важно, однако, что существует еще один фактор, связывающий изменение полной и поперечной энергии  $e^{\pm}$ . Действительно, интенсивность излучения  $e^{\pm}$  в магнитотормозном приближении определяется напряженностью усредненного поля осей (плоскостей) в месте нахождения  $e^{\pm}$  и сильно зависит от ее величины:  $I(\vec{\rho}) \sim \chi^2(\vec{\rho})$  при  $\chi \ll 1$  и  $I(\vec{\rho}) \sim \chi(\vec{\rho})$  при  $\chi \sim 1$ . Убывание же  $\epsilon_{\perp}$ , особенно если ее величина не превышает энергии потенциального барьера  $e^{\pm}$ , может заметно изменять характер поперечного движения  $e^{\pm}$  в периоды их нахождения в областях значительной интенсивности поля. Так, при уменьшении  $\epsilon_{\perp}$  эти области перестают быть достигаемы для каналированных  $e^+$ , в то же время при не слишком малых значениях  $\epsilon_{\perp}$  ее уменьшение приводит к смещению  $e^-$  в области наиболее сильного поля. В случае  $e^-$  это вызывает наблюдавшееся экспериментально увеличение интенсивности излучения, ведущее в свою очередь к дальнейшему уменьшению  $\epsilon_{\perp}$ .

Основное внимание во второй главе диссертации уделено теоретическому

описанию эффекта радиационного охлаждения. В §4 изложена упрощенная теория эффекта, основанная на описании радиационных потерь  $e^-$  как непрерывного процесса, впервые позволившая констатировать наблюдение эффекта радиационного охлаждения. Дискретность испускания фотонов была учтена в рассматриваемой в §5 более реалистичной модели, давшей возможность исследовать роль различных факторов, влияющих на ход процесса радиационных потерь  $e^-$ . Там же показано, что приближение статистического равновесия не позволяет количественно описать процесс магнитотормозного излучения. В §6 изложен простой метод моделирования процесса излучения с учетом радиационного охлаждения, не опирающийся на приближение статистического равновесия. Полученный в условиях эксперимента *Belkacet A. et al. Phys. Lett. B177(1986)211* спектр энергетических потерь  $e^-$  в поле оси  $\langle 110 \rangle$  Ge при  $T = 100$  К представлен на рис. 2 наряду с экспериментальными данными. Процесс радиационного охлаждения также учитывался при моделировании радиационной самополяризации  $e^\pm$ , рассматриваемой в §14. Важность учета этого процесса в данном случае связана с тем, что возникающее благодаря ему подавление декаплирования  $e^-$  значительно улучшает возможности получения поляризованных  $e^-$  путем их самополяризации в изогнутых кристаллах.

Третья глава диссертации посвящена изложению теории некогерентных процессов в условиях действия магнитотормозного механизма излучения и ОП. Напомним, что магнитотормозные процессы излучения и ОП являются когерентными процессами, описываемыми в рамках модели усредненного потенциала. Помимо них в кристалле всегда имеют место некогерентные процессы, связанные с отличием истинного внутрикристаллического потенциала от усредненного. Наиболее существенными из них при высоких энергиях  $e^\pm$  и  $\gamma$  являются процессы излучения и ОП, связанные с некогерентными процессами рассеяния  $e^\pm$  ядрами. Исследования, проведенные в рамках теории когерентного тормозного излучения и ОП еще в пятидесятые годы, показали, что в области ее применимости вероятности некогерентных процессов излучения и ОП мало (на 10-20%) отличаются от вероятностей аналогичных процессов в поле ядра (то есть от вероятностей излучения и ОП, полученных Бете и Гайтлером) и не зависят от энергии исходных частиц. Между тем, в области действия приближения однородного поля следует ожидать более фундаментальных изменений природы некогерентных процессов.

Действительно, поскольку усредненная вдоль оси концентрация ядер в сотни раз превышает среднюю концентрацию атомов в единице объема конденсированного вещества, при движении в областях локализации ядер атомов, образующих кристаллические оси,  $e^{\pm}$  будут подвергаться значительно более интенсивному многократному рассеянию, чем в аморфном веществе. Еще Л.Д.Ландау и И.Я.Померанчуком было указано на то, что, когда среднеквадратичный угол многократного рассеяния

$$\vartheta_s^2(l_{coh}) = 8\pi n l_{coh} (Z\alpha/\epsilon)^2 \ln \vartheta_2/\vartheta_1 \quad (8)$$

( $n$  - концентрация ядер,  $\alpha = 1/137$ ,  $\vartheta_{1,2}$  - минимальный и максимальный углы рассеяния) на длине когерентности  $l_{coh}$  превышает характерный угол  $m/\epsilon$ , где  $\epsilon$  - энергия  $e^-$  или  $e^+$ , многократное рассеяние должно оказывать существенное влияние на процессы получения и ОП, выражающееся в уменьшении их вероятностей. Поскольку в случае аморфной среды при получении фотонов с энергией  $\omega \sim \epsilon$   $l_{coh} \simeq \epsilon\epsilon'/m^2\omega \sim \epsilon/m^2$ , а при ОП с  $\epsilon_{\pm} \sim \omega$  -  $l_{coh} \simeq \epsilon_+\epsilon_-/m^2\omega \sim \omega/m^2 \sim \epsilon_{\pm}/m^2$ , имеем  $\vartheta_s^2(l_{coh}) \propto 1/\epsilon$ , благодаря чему при достаточно высоких энергиях неизбежно выполняется условие  $\vartheta_s(l_{coh}) > m/\epsilon$ , обеспечивающее проявление эффекта Ландау-Померанчука в аморфной среде. Однако даже в наиболее плотных конденсированных веществах последний критерий выполняется при энергиях  $e^{\pm}$  и  $\gamma$  порядка 10 ТэВ и более, что значительно затрудняет проведение экспериментальных исследований.

Условия наблюдения эффекта Ландау-Померанчука могли бы быть облегчены, если бы удалось значительно увеличить концентрацию рассеивателей  $n$ , чего действительно можно достичь, направив частицы параллельно кристаллическим осям. Ситуация при этом, однако, не совсем совпадает с ситуацией, рассмотренной Л.Д.Ландау и И.Я.Померанчуком в случае аморфной среды, главной причиной чему служит наличие когерентного рассеяния  $e^{\pm}$ , влияние которого на процессы получения и ОП описывается приближением однородного поля. При достаточно высоких энергиях  $e^{\pm}$  и  $\omega \sim \epsilon$  характерный угол получения  $\vartheta_{rad} \sim (m/\epsilon)(\chi\epsilon'/\omega)^{1/3}$  оказывается пропорциональным  $\epsilon^{-2/3}$ , а не  $1/\epsilon$ , как в аморфной среде. Когерентная длина  $l_{coh} \simeq (\epsilon\epsilon'/m^2\omega)(\omega/\chi\epsilon')^{2/3}$  пропорциональна  $\epsilon^{1/3}$ . Подставив ее в определение (8), нетрудно видеть, что  $\vartheta_s(l_{coh}) \propto \epsilon^{-5/6}$ . Энергетические зависимости углов  $\vartheta_{rad}$  и  $\vartheta_s$  позволяют убедиться в неизбежном при достаточно высоких энергиях частиц выполнении неравенства  $\vartheta_s(l_{coh}) < m/\epsilon$ ,

противоположного неравенству, реализующемуся в аморфной среде, что позволяет говорить о подавлении ЭЛП в присутствии внешнего поля.

Подробному исследованию влияния многократного рассеяния произвольной интенсивности на магнитотормозные процессы посвящены §7-10. Достаточно общая теория таких процессов развита в §7. При помощи метода континуального интегрирования там получены выражения, обобщающие выражения А.В.Мигдала, которые описывают проявление ЭЛП в аморфной среде, и выражения А.И.Никишова и В.И.Ритуса для вероятностей процессов излучения и ОП в однородном поле. Кроме того, эти выражения учитывают преломление фотонов и описывают процессы излучения, ОП и поляризационные явления в условиях асимметричного рассеяния. Переход к указанным предельным случаям рассмотрен в §8, 9 и 18.

Кроме того, в §8 показано, что в логарифмическом приближении для обеспечения правильного перехода к пределу слабого многократного рассеяния, в котором вероятности процессов излучения и ОП описываются формулами Бете-Гайтлера, к выражениям теории А.В.Мигдала необходимо добавить вероятности процессов, имеющих место в поле отдельного ядра. Построенная на основе рассмотрения процессов однократного и многократного рассеяния в присутствии внешнего поля теория некогерентных магнитотормозных процессов в кристаллах изложена в §10. Показано, что даже в условиях достаточно интенсивного некогерентного рассеяния  $e^{\pm}$  ядрами атомов, образующих кристаллические оси и плоскости, некогерентные магнитотормозные процессы излучения и ОП описываются в логарифмическом приближении сечениями этих процессов на отдельных ядрах при наличии внешнего поля. Эти сечения были получены А.В.Борисовым и В.Ч.Жуковским и несколько уточнены в нашей работе. В §10 иллюстрируется наиболее существенное следствие развитой теории некогерентных магнитотормозных процессов, заключающееся в уменьшении вероятностей этих процессов с ростом энергии исходных  $e^{\pm}$ ,  $\gamma$ .

Четвертая глава посвящена поляризационным явлениям при прохождении через кристалл фотонов высоких энергий и их излучении электронами (позитронами). Эффекты дихроизма и двулучепреломления в оптической области электромагнитного спектра были хорошо известны уже в первой половине девятнадцатого века. Однако лишь во второй половине двадцатого было выяснено, что эти эффекты проявляются в чрезвычайно широком диапазоне электрома-

гнитного спектра. Существенный шаг в этом направлении был сделан Кабиббо и сотрудниками. В рамках теории когерентного тормозного ОП ими было обосновано существование эффектов дихроизма и двулучепреломления в области энергий фотонов порядка 1 ГэВ и выше.

Предсказание в наших работах проявления магнитотормозного механизма ОП позволило обосновать существование связанных с ним эффектов дихроизма и двулучепреломления при энергиях, как минимум на три порядка превышающих границу применимости теории когерентного тормозного ОП. Рассмотрению магнитотормозного дихроизма и двулучепреломления посвящены соответственно §11 и 12.

Подобно процессу магнитотормозного ОП сопровождающие его эффекты дихроизма и двулучепреломления проявляются, начиная с энергий (4), при углах падения фотонов (5) на кристаллические плоскости и описываются квантовой электродинамикой однородного интенсивного поля. Для получения действительных и мнимых частей поперечного тензора показателя преломления фотонов в кристалле играющий в нем роль локального тензор преломления фотонов однородным полем должен быть усреднен по поперечнику кристалла. Кроме того, должен быть учтен вклад некогерентных процессов. Локальный характер процесса магнитотормозного ОП позволяет убедиться, что оптические эффекты сильно подавляются при усреднении по поперечнику кристалла в осевом случае, но полностью сохраняются в плоскостном. Собственные направления действительных и мнимых частей поперечного тензора преломления фотонов кристаллом в плоскостном случае, естественно, направлены параллельно и перпендикулярно кристаллическим плоскостям.

Эффекты магнитотормозного дихроизма и двулучепреломления позволяют получать и анализировать поляризованные пучки с энергиями в сотни ГэВ и выше. В качестве примера в §12 рассмотрена система вольфрамового поляризатора и кремниевой четвертьволновой пластинки, позволяющая получать линейно и циркулярно поляризованные фотонные пучки с энергиями  $\omega \gtrsim 300$  ГэВ. Энергетические зависимости поляризации и интенсивности этих пучков представлены на рис. 3.

Теория процессов излучения и ОП в однородном поле может быть применена для количественного описания процессов в кристаллах лишь при  $\psi \ll V_0/m$ . Между тем, хотя рассмотрение процессов излучения и ОП сильно усложняется

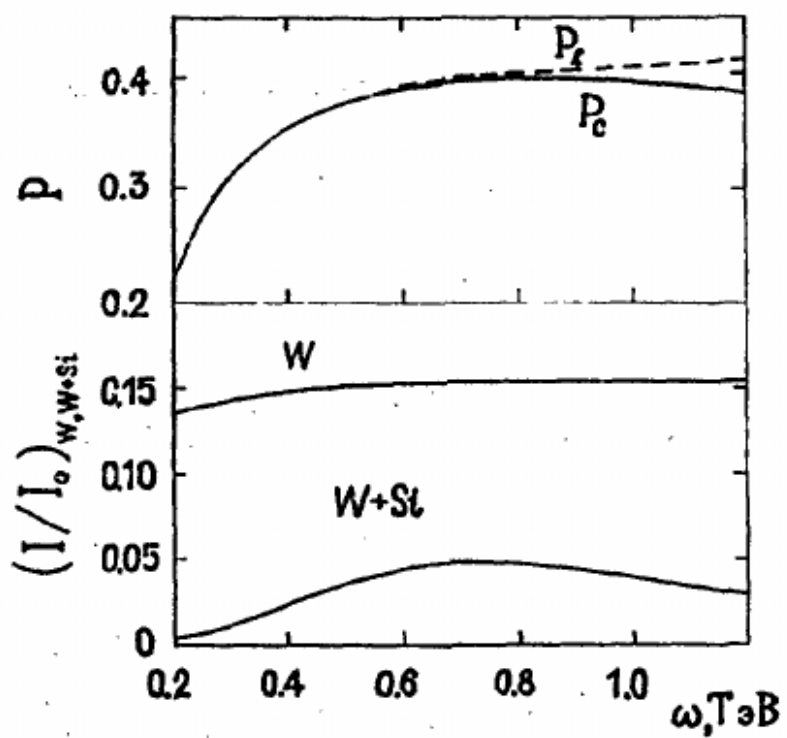


Рис.3

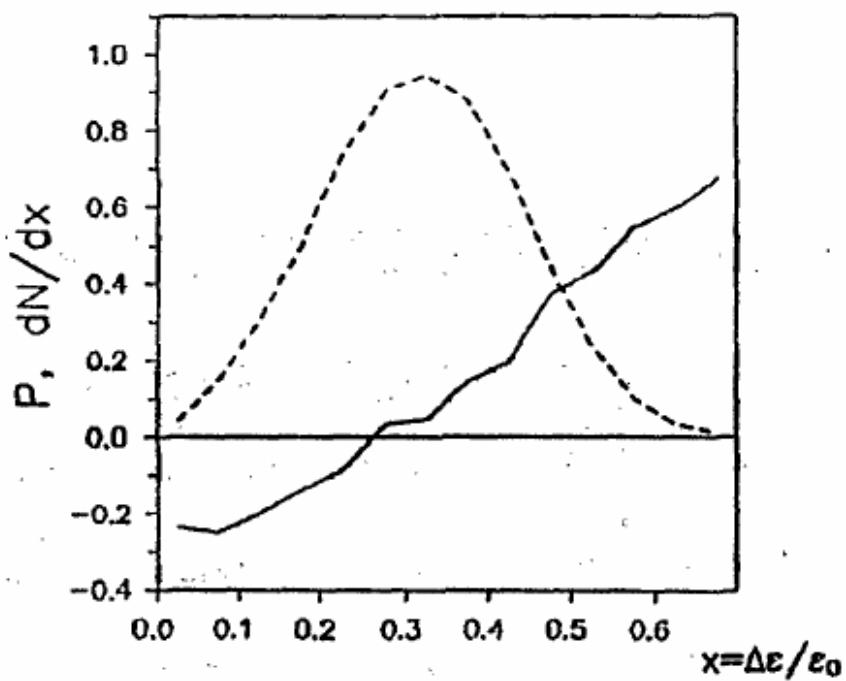


Рис.4

при  $\psi \sim V_0/m$ , характер их формирования и такие полезные особенности, как высокая вероятность и сильная поляризационная зависимость, сохраняются без существенных изменений. Это делает задачу описания процессов излучения и ОП при  $\psi \sim V_0/m$  важной как для исследования природы этих процессов, так и для выяснения возможностей их наиболее эффективного использования. Для решения задачи описания процессов излучения и ОП при  $\psi \sim V_0/m$ ,  $\omega \gg \omega_{k=1}$  нами был предложен метод расчета характеристик этих процессов, основанный на использовании алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Его применение для расчетов вероятностей ОП и получения как каналированных, так и неканалированных  $e^+$  и  $e^-$ , движущихся в реалистичном усредненном потенциале кристаллических плоскостей, рассмотрено в §13.

Развитый метод расчета позволяет количественно проанализировать возможности использования излучения  $e^\pm$  с энергией в сотни ГэВ и выше для получения жестких поляризованных фотонных пучков при углах падения  $e^\pm$   $\psi \sim V_0/m$  на кристаллические плоскости. Выбор именно этих углов объясняется тем, что позволяет обеспечить подавление испускания мягких фотонов, затрудняющих использование поляризованного излучения  $e^\pm$ , падающих под углами  $\psi \ll V_0/m$ , а с другой стороны – добиться высокой поляризации фотонов с энергией, соответствующей первому интерференционному максимуму их спектра.

Пятая глава посвящена спиновым явлениям в изогнутых кристаллах. К числу таких явлений относятся рассматриваемые в §14-16 радиационная самополяризация, образование фотонами поперечно поляризованных  $e^+e^-$ -пар и поворот спина каналированных частиц.

Поляризация  $e^\pm$  возникает в кристаллах только в условиях квантового магнитотормозного излучения и ОП, то есть при  $\chi, \kappa \gg 1$ . В случае ОП это связано с тем, что когерентные эффекты в образовании фотонами каналированных  $e^\pm$  проявляются лишь в условиях действия магнитотормозного механизма ОП. Связь же возможности самополяризации при излучении в кристаллах с его квантовым характером не столь очевидна. Пользуясь выражением для интенсивности излучения  $I = 2\alpha m^2 \chi^2/3$  и выражением для времени самополяризации  $\tau_{pc} = 8\epsilon/5\sqrt{3}\alpha m^2 \chi^3$ , полученными А.А.Соколовым и И.М.Терновым в пределе  $\chi \ll 1$ , получаем для величины энергетических потерь  $e^\pm$  за время самополяризации оценку

$$I \cdot \tau_{\text{рс}} \approx 16\epsilon/15\sqrt{3}\chi. \quad (9)$$

Нетрудно видеть, что при  $\chi \ll 1$  эта величина значительно превышает энергию частицы, вследствие чего процесс самополяризации в накопителях может идти лишь в условиях постоянного восполнения энергетических потерь.

Отсутствие реальной возможности пополнения энергетических потерь в кристаллах не позволяет надеяться реализовать в них процесс радиационной самополяризации при  $\chi \ll 1$  и делает неизбежным обращение к квантовому режиму магнитотормозного излучения  $\chi \gg 1$ , проявляющемуся в полях кристаллических плоскостей при энергиях от полутора сотен ГэВ до ТэВ и позволяющему поляризовать вторичные  $e^\pm$ -пучки крупнейших существующих и строящихся протонных ускорителей. В квантовом режиме значительная поляризация  $e^\pm$ , движущихся в изогнутом кристалле, должна достигаться при испускании нескольких фотонов, энергии наиболее жестких из которых сравнимы с энергией  $e^\pm$ . Необходимость учета существенного изменения энергии  $e^\pm$  и зависимость интенсивности излучения от их спинового состояния существенно усложняет картину процесса. Метод учета спиновых эффектов в квантовом магнитотормозном излучении был отработан нами в случае однородного поля и включен затем в схему моделирования процесса магнитотормозного излучения в кристалле, изложенную в §6. Сплошной и штриховой линиями на рис. 4 представлены графики энергетической зависимости поляризации и функции распределения  $e^+$  с начальной энергией 287 ГэВ, прошедших через двухмиллиметровый кристалл  $Si(110) 293 K$  с радиусом изгиба один метр. Поскольку начальная энергия  $e^+$  совпадает с максимальной энергией  $e^\pm$ -пучка ЦЕРН, представленные численные результаты доказывают возможность наблюдения эффекта радиационной самополяризации в кристаллах на имеющийся экспериментальной базе. В §14 приведены также результаты численного моделирования самополяризации тэвных  $e^+$  и  $e^-$  и показано, что изменение кривизны кристалла позволяет заметно повысить эффективность получения поляризованных  $e^+$ . Заметим, что процесс самополяризации  $e^\pm$  в изогнутых кристаллах моделировался В.А. Айрутюновым и соавторами. Из-за использования многочисленных неоправданных приближений и неверного выражения для вероятности излучения поляризованных  $e^\pm$  им не удалось обнаружить высокой эффективности рассматриваемого процесса, иллюстрируемой результатами, приведенными в §14.

Напомним, что электрон-фотонные пучки получают на протонных ускорителях по схеме, предложенной М.А.Марковым, в соответствии с которой фотоны возникают при распаде  $\pi^0$ ,  $\eta$  и других нейтральных мезонов, рождающихся при столкновении протонов с ядрами. Поскольку  $e^\pm$ -пучки в этой схеме генерируются при дальнейшей конверсии фотонов, возможность сообщения поляризации  $e^\pm$  в момент их рождения явилась бы более прямым способом получения поляризованных  $e^\pm$ , чем рождение неполяризованных  $e^\pm$  и их дальнейшая самополяризация. Эта возможность реализуется благодаря эффекту образования поперечно поляризованных каналированных  $e^+e^-$ -пар в кристаллах, рассматриваемому в §15. Представленные в нем численные результаты показывают, что этот эффект позволяет достичь более высокой степени поляризации, чем радиационная самополяризация, однако уступает ей в интенсивности поляризованных пучков, которые могут быть получены на его основе. В этом же параграфе обсуждаются преимущества использования поляризованных вторичных  $e^\pm$ -пучков, которые можно будет получать, благодаря поляризационным явлениям в изогнутых кристаллах, в экспериментальных исследованиях спиновой структуры нуклонов.

Использование эффекта поворота спина каналированных частиц в изогнутых кристаллах для измерения аномальных магнитных моментов короткоживущих частиц анализируется в §16 на примере очарованного лямбда плюс гиперона.

Изогнутые кристаллы могут оказаться полезны также при измерении поляризации протонных пучков очень высокой энергии. Наиболее перспективными методами измерения поляризации протонов высоких энергий считается их рассеяние в области кулон-ядерной интерференции и эффект Примакова. При их использовании на SSC понадобится регистрировать протоны, рассеянные на микрорадианные углы, что при применении традиционных методов потребует километровых расстояний. В §17 анализируется возможность регистрации таких протонов при помощи кристаллов. Кроме того, в §17 обсуждается возможность использования кристаллов для разделения пучков, движущихся на малом расстоянии друг от друга, что может облегчить получение поляризованных протонных, антипротонных и ядерных пучков путем разделения неполяризованных на поляризованные составляющие в соответствии с предложением Ниниковского и Росманиса.

Последняя шестая глава диссертации посвящена рассмотрению процессов,

сопровождающих взаимодействие  $e^{\pm}$  и  $\gamma$  с кристаллическими осями при углах падения существенно больших и существенно меньших характерного угла  $V_0/m$ , ограничивающего область действия магнитотормозного механизма излучения и ОП. §18 посвящен теории процессов излучения и ОП при некоррелированном рассеянии  $e^{\pm}$  атомными цепочками и сопровождающих их поляризационных явлений при энергиях  $\omega, \epsilon \geq \omega_{\kappa=1} = \epsilon_{\kappa=1}$  и углах падения  $\psi \geq V_0/m$ . В наших работах было показано, что асимметрия некоррелированного рассеяния  $e^{\pm}$  последними приводит к таким поляризационным явлениям, как дихроизм и линейная поляризация фотонов, получаемых  $e^{\pm}$ . Существование этих явлений обусловлено асимметрией данного типа рассеяния. Действительно, при падении под малым углом  $\psi$  рассеяние в значительной степени определяется действием усредненного потенциала цепочек, приводящим к повороту перпендикулярной им составляющей скорости. Пусть угол этого поворота  $\varphi$  удовлетворяет условию  $\varphi \ll 1$ . Как обычно, будем называть плоскость  $yz$ , параллельную начальной скорости  $e^{\pm}$  и атомным цепочкам, плоскостью падения. Сравним угол поворота проекции скорости на эту плоскость  $\vartheta_y = \psi\varphi^2/2 \ll 1$  с углом поворота  $\vartheta_x = \psi\varphi$  ее проекции на плоскость  $xz$ , перпендикулярную плоскости падения и параллельную начальной скорости  $e^{\pm}$   $\vec{v} = (0, 0, v)$ . При  $\varphi \ll 1$ , очевидно, выполняется соотношение  $\vartheta_y \ll |\vartheta_x|$ , означающее наличие практически полной асимметрии рассеяния в плоскости, перпендикулярной скорости  $e^{\pm}$  (отклонение этой плоскости на угол  $\psi \ll 1$  от плоскости  $xy$  здесь несущественно). Теория процессов излучения, ОП и поляризационных явлений в условиях некоррелированного рассеяния  $e^{\pm}$  атомными цепочками полагается в §18. Ее основой служит выражение для вероятности излучения в условиях асимметричного рассеяния, являющееся частным случаем выражения, полученного в §7. Проведен анализ поляризационных явлений в излучении и ОП в пределах слабого и сильного рассеяния на длине когерентности и показано, что эти явления выражены значительно лучше в первом по ним. Существенно, что область углов падения частиц на атомные цепочки, в которой асимметрия рассеяния  $e^{\pm}$  мало отличается от полной, достигает в веществах с не слишком большим атомным номером нескольких миллирадиан. Благодаря этому поляризационные явления в условиях некоррелированного рассеяния  $e^{\pm}$  атомными цепочками проявляются в значительно более широком угловом интервале, чем анализировавшиеся в четвертой главе поляризационные явления в полях кристаллических плоскостей, что по-

озволяет надеяться эффективно использовать поляризационные явления в полях атомных цепочек для преобразования сильно расходящихся вторичных пучков протонных ускорителей.

В §18 также подробно описана область проявления эффекта Ландау-Померанчука, на облегчение наблюдения которого в условиях некоррелированного рассеяния  $e^\pm$  атомными цепочками было указано А.И.Ахиссером, Н.Ф.Шульгой и соавторами. Показано, что как и в аморфной среде, наилучшие условия наблюдения этого эффекта в условиях некоррелированного рассеяния реализуются в веществах с большим атомным номером, усиление интенсивности рассеяния в которых по сравнению со случаем аморфной среды достигает нескольких раз. В заключение §18 анализируются возможности наблюдения поляризационных явлений в условиях предсказанной В.Л.Любошицем и М.И.Подгорецким асимметрии некогерентного рассеяния  $e^\pm$  атомами, образующими кристаллические плоскости. Показано, что наилучшие условия наблюдения этой асимметрии реализуются при падении  $e^\pm$  с энергией порядка ГэВ на одну из главных плоскостей кристалла алмаза под углами 10-20 мрад.

Общепринятая процедура усреднения вероятности ОП в однородном поле по поперечнику кристалла, использованная, в частности, в главах 1 и 4, не всегда оказывается адекватной. Она предполагает однородность потока фотонов, которая, очевидно, нарушается, если их распространение описывается геометрической оптикой и если фотоны падают на оси (плоскости) под столь малыми углами, что успевают поглотиться в области скопления ядер атомов, образующих ось (плоскость). Поскольку возможность подобного поглощения быстро пропадает при увеличении угла падения фотонов, все это должно приводить к новому ориентационному эффекту, обсуждаемому в §19. Условие применимости приближения геометрической оптики оказывается достаточно жестким и приводит к тому, что этот ориентационный эффект проявляется только в области действия магнитотормозного механизма ОП  $\omega \geq 4\omega_{k=1}$ .

В случае кристаллических осей величина характерного угла эффекта оказывается порядка одного микрорадиана, а в случае плоскостей она еще на порядок меньше, что делает в этом случае эксперимент малореальным и оправдывает использование в §11 и 12 процедуры усреднения вероятности ОП по поперечнику кристалла. Рассматриваемый эффект вызывает также десятипроцентное уменьшение вероятности ОП при углах расходимости фотонного пучка порядка

10 мкрад. Можно ожидать, что анизотропия поглощения жесткого электромагнитного излучения в микрорадианном диапазоне углов падения на кристаллические оси и плоскости будет полезна при ориентировании кристаллов с точностью  $\sim 1-10$  мкрад и прецизионном анализе их качества в условиях эксперимента с электрон-фотонными пучками.

В включении перечислены основные результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Впервые корректно определена область, в которой проявляются процессы квантового магнитотормозного излучения и образования  $e^+e^-$ -пар в кристаллах. Тем самым указано на возможность экспериментального исследования этих процессов, которое было начато в ЦЕРН в 1984 году.
2. Рассчитана ориентационная зависимость процесса магнитотормозного образования пар в области малых углов падения фотонов на кристаллические оси и плоскости и указано на ошибочность результатов первого эксперимента по наблюдению его энергетической и ориентационной зависимости.
3. Впервые дана интерпретация экспериментально измеренных спектров энергетических потерь электронов высоких энергий в достаточно тонких кристаллах и показано, что появление пика в жесткой части этих спектров связано с эффектом радиационного охлаждения.
4. Разработаны модели, учитывающие влияние многократного рассеяния и радиационного охлаждения на движение электронов и позитронов в условиях магнитотормозного излучения в кристаллах. Показано, что приближение статистически равновесного распределения по поперечным координатам не позволяет количественно описать излучение фотонов электронами высоких энергий в полях осей достаточно тонких кристаллов.
5. Развита теория, описывающая влияние некоррелированного рассеяния произвольной интенсивности на излучение и образование фотонами пар ультрарелятивистских электронов и позитронов в однородном внешнем поле. Показано, что в отличие от случая отсутствия поля, влияние некогерентного рассеяния на эти процессы убывает с ростом энергии частиц, не давая проявиться эффекту Ландау-Померанчука.
6. Показано, что в основанных на использовании уравнения Фоккера-Планка теориях процессов получения и образования пар в условиях некоррелированного

рассеяния для обеспечения перехода к формулам Вете-Гайтлера в пределе низких энергий необходимо дополнительно учесть процессы получения и образования пар в поле отдельного ядра.

7. Построена теория некогерентных процессов в условиях действия магнитотормозного механизма процессов излучения и образования пар в кристаллах. Показано, что вероятности этих процессов, в отличие от вероятностей, предсказываемых теорией когерентного тормозного излучения и образования пар, убывают с ростом энергии частиц.

8. Построена теория эффектов дихроизма и двулучепреломления кристаллов, проявляющихся в условиях действия магнитотормозного механизма процесса образования фотонами  $e^+e^-$ -пар.

9. На основе использования алгоритма быстрого преобразования Фурье впервые проведены последовательные расчеты вероятностей процессов излучения и образования пар при произвольных углах падения частиц на кристаллические плоскости. Показано, что в том диапазоне энергий оптимальной для получения жесткого поляризованного излучения является область углов падения электронов и позитронов на кристаллические плоскости, в которой для описания испускания фотонов не могут быть использованы ни теория когерентного тормозного излучения, ни приближение однородного поля.

10. Проведено моделирование радиационной самополяризации электронов и позитронов в изогнутых кристаллах и впервые продемонстрирована ее высокая эффективность.

11. Путем численного моделирования доказана возможность повышения эффективности процесса радиационной самополяризации электронов введенной переменной кривизны изгиба кристалла.

12. Предсказан эффект образования фотонами поперечно поляризованных  $e^+e^-$ -пар в кристаллах и построена его теория.

13. Предсказано существование поляризационных эффектов в излучении и образовании пар в условиях некоррелированного рассеяния электронов и позитронов атомными цепочками.

14. Построена теория процессов излучения, образования пар и поляризационных явлений в условиях некоррелированного рассеяния электронов и позитронов атомными цепочками.

Тем самым обоснована возможность эффективного использования поляризаци-

онных явлений в кристаллах для получения достаточно интенсивных и высоко поляризованных вторичных пучков на протонных ускорителях твнного диапазона (пункты 8-14).

15. Теоретически обоснована возможность использования изогнутых кристаллов для радикального сокращения пространственного промежутка, необходимого для измерения поляризации пучков наиболее мощных протонных ускорителей методами, требующими выделения частиц, рассеянных на микрорадианные углы.

16. Предложено использовать изогнутые кристаллы для разделения пучков частиц высоких энергий, движущихся на очень малом расстоянии друг от друга, что может позволить ускорить получение поляризованных протонных и ядерных пучков высоких энергий методом разделения неполяризованных пучков на поляризованные составляющие.

17. Предсказано и описано теоретически явление ориентационной зависимости вероятности магнитотормозного образования пар при микрорадианных углах падения фотонов на кристаллические оси и плоскости.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Барышевский В. Г., Тихомиров В. В. Двулучепреломление  $\gamma$ -квантов больших энергий в монокристаллах // Журн. технич. физ. 1982. Т. 52. Вып. 7. С. 1476-1478.

2. Барышевский В. Г., Тихомиров В. В. Двулучепреломление  $\gamma$ -квантов больших энергий в кристаллах // Ядерн. физ. 1982. Т. 36. Вып. 3(9). С. 697-706.

3. Барышевский В. Г., Тихомиров В. В. Поляризационные явления в процессах ионизации и рождения пар частиц, каналированных в кристаллах // Труды XI Всес. Совец. по физ. взаимодей. заряженных частиц с кристаллами. М.: Иод-во МГУ. 1982. С. 315-319.

4. Baryshevskii V.G., Tikhomirov V.V. Birefringence of the high-energy  $\gamma$ -quanta in monocrystals // Phys. Lett. 1982, V. 90A, N 3. P. 153-155.

5. Барышевский В. Г., Тихомиров В. В. Рождение поперечно поляризованных электронов и позитронов высоких энергий в кристаллах // Журн. эксперим.

и теорет. физ. 1983. Т. 85. Вып. 1(7). С. 232-242.

6. Тихомиров В. В. Спектр излучения каналированных частиц при высоких энергиях // Вестник Белгосуниверситета. Сер. 1, физ., мат. и мех. 1983, N 2. С. 6-10.

7. Baryshevskii V.V., Tikhomirov V.V. Creation of transversely polarized high-energy electrons and positrons in crystals // Phys. Lett. 1983. V. 96A, N 4. P. 215-218.

8. Тихомиров В. В. Влияние многократного рассеяния на процессы излучения и рождения пар в кристаллах при сверхвысоких энергиях // Вестник Белгосуниверситета. Сер. 1, физ., мат. и мех. 1983, N 3. С. 27-32.

9. Барышевский В. Г., Тихомиров В. В. Поляризация явления при прохождении  $\gamma$ -квантов через монокристаллы // Труды XII Всес. Совещ. по физ. взаимодей. заряж. частиц с кристаллами. М.: Изд-во МГУ. 1983. С. 130-132.

10. Тихомиров В. В. Отсутствие эффекта Ландау-Померанчука при малых углах падения электронов, позитронов и  $\gamma$ -квантов высоких энергий на оси и плоскости монокристалла // Труды XIII Всес. Совещ. по физ. взаимодей. заряж. частиц с кристаллами. М.: Изд-во МГУ. 1984. С. 151-153.

11. Baryshevsky V. G., Tikhomirov V. V. Pair production in a slowly varying electromagnetic field and pair production process // Phys. Lett. 1985. V. 113A, N 6. P. 335-340.

12. Baryshevskii V.G., Tikhomirov V.V. New polarization effects accompanying pair production in crystals // Nucl. Instrum. and Meth. 1985. V. A234. P. 430-434.

13. Барышевский В.Г., Тихомиров В.В. Роль некогерентного рассеяния в радиационных процессах при малых углах падения частиц на кристаллические оси и плоскости // Журн. эксперим. и теорет. физ. 1986. Т. 90. Вып. 6. С. 1908-1921.

14. Baryshevsky V. G., Tikhomirov V. V. On the possibilities of polarized  $e^{\pm}$  and  $\gamma$ -beam production in the proton accelerators. Proc. of High-Energy Spin Physics VII Intern. Symp. Protvino. 1986. Serpukhov, 1987. V. II. P. 213-214.

15. Tikhomirov V.V. On the theory of electron-positron pair production in crystals // J. Physique (Paris). 1987. V. 48. P. 1009-1016.

16. Tikhomirov V.V. The position of the peak in the spectrum of 150 GeV electron energy losses in a thin Germanium crystal is proposed to be determined by radiation cooling // *Phys. Lett. A*. 1987. V. 125, N 8. P.411-415.

17. Барышевский В. Г., Тихомиров В. В. К вопросу о возможностях получения поляризованных  $e^\pm$ -пучков на протонных ускорителях // *Ядерн. физ.* 1988. Т. 48. Вып. 3(9). С. 670-678.

18. Тихомиров В.В. Об интерпретации результатов измерения энергетических потерь  $e^-$  в кристаллах // *Труды XVII Всес. Совещ. по физ. взаимод. заряж. частиц с кристаллами*. М.: Изд-во МГУ. 1988. С. 87-89.

19. Барышевский В. Г., Тихомиров В. В. Использование ориентационных явлений в кристаллах для получения поляризованных пучков на протонных ускорителях // *Вопр. атомн. науки и техн. Сер. общ. и ядерн. физ.* 1988. Т. 41. Вып. 1. С. 65-68.

20. Тихомиров В.В. Радиационное охлаждение электронов в кристаллах // *Докл. АН БССР*. 1988. Т. 32. Вып. 1. С. 29-31.

21. Барышевский В.Г., Тихомиров В.В., Шехтман А.Г. Новый механизм возникновения поглощения гамма-квантов высоких энергий в кристаллах // *Письма в Журн. техн. физ.* 1989. Т. 15. Вып. 4. С. 77-80.

22. Барышевский В. Г., Тихомиров В. В. Радиационные процессы магнитотормозного типа в кристаллах и сопровождающие их поляризационные явления // *Усп. физ. наук*. 1989. Т. 159, N 3. С. 529-565.

23. Тихомиров В. В. Моделирование спектра энергетических потерь 150-гэВных  $e^-$  в кристалле германия методом Монте-Карло // *Труды XVIII Всес. Совещ. по физ. взаимод. заряж. частиц с кристаллами*. М.: Изд-во МГУ. 1989. С. 122-124.

24. Tikhomirov V.V. Simulation of multi-GeV electron energy losses in crystals // *Nucl. Instrum. and Meth.* 1989. V. B36. P. 282-285.

25. Baryshevsky V. G., Tikhomirov V. V. On the production of polarized  $e^\pm$  and  $\gamma$ -beams in the proton accelerators. *Proc. of High-Energy Spin Physics VIII Intern. Symp. Minneapolis. MN. 1988. Amer. Inst. of Physics Conf. Proc. N 187. NY. 1989. V. II. P. 1174-1182.*

26. Барышевский В. Г., Тихомиров В. В. Получение поляризованных  $e^\pm$ ,

$\gamma$ -пучков на основе использования эффектов магнитотормозного дихроизма и двулучепреломления // III Рабоч. Совец. по спин. явлениям в физ. высок. энерг. Протвино. 1989. ИВФЭ. 1990. С. 448-449.

27. Барышевский В. Г., Тихомиров В. В., Шехтман А. Г. О влиянии дифракции на анизотропию поглощения сверхжесткого гамма-излучения при малых (микрорадианных) углах падения на кристаллические оси // Изв. АН БССР. Сер. физ.-энерг. наук. 1991, N 2. С. 39-46.

28. Тихомиров В.В. О поляризационных явлениях, проявляющихся в условиях асимметричного многократного рассеяния электронов и позитронов // Ядерн. физ. 1991. Т. 53. Вып. 2. С. 338-350.

29. Tikhomirov V. V. Polarization effects accompanying penetration of high-energy electrons, positrons and gamma-quanta through crystals // Rad. effects. and defects in solids. 1991. V. 117, N 1. P. 27-32.

30. Силенко А. Я., Тихомиров В. В. О поляризации  $e^{\pm}$ , прошедших через изогнутый кристалл с малыми потерями энергии // Труды XX Всес. Совец. по физ. взаимодей. заряж. частиц с кристаллами. М.: Изд-во МГУ. 1991. С. 23-25.

31. Tikhomirov V. V. Use of crystals for measuring proton beam polarization at high-energy proton accelerators // Nucl. Instrum. and Meth. 1991. V. B61. P. 403-407.

32. Тихомиров В.В. Использование метода быстрого преобразования Фурье для расчета интенсивности излучения электронов (позитронов) высоких энергий в полях кристаллических плоскостей // Изв. АН Беларуси. 1992, N 2. С. 60-66.