

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ГРИНЕНКО Анатолий Анатольевич



ПРОХОЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ  
ЧЕРЕЗ ИЗОГНУТЫЙ КРИСТАЛЛ ВЕЛИЗИ  
КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОСИ

специальность 01.04.16 - физика ядра и элементарных частиц

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Харьков - 1997

AB 38.425

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Национальном Научном Центре  
Харьковский Физико-Технический Институт ( ННЦ ХФТИ )

Научный руководитель : доктор физико-математических наук  
Шульга Николай Федорович ( ННЦ ХФТИ )

Официальные опоненты : доктор физико-математических наук  
Лазурик Валентин Тимофеевич ( ХГУ )  
доктор физико-математических наук  
Кулиш Юрий Вениаминович ( ХАРГАЖТ )

Ведущая организация: Институт теоретической физики  
НАН Украины, г. Киев.

Защита диссертации состоится " 3 " октября 1997 г.  
в 15<sup>00</sup> часов на заседании Специализированного ученого совета  
Д 02.02.12 при Харьковском государственном университете по адресу :  
310108, г. Харьков, пр.-т Курчатова, 31, ауд.301.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной  
библиотеке Харьковского государственного университета по адресу :  
310077, г. Харьков, пл. Свободы, 4.

Автореферат разослан " 3 " сентября 1997 г.

Ученый секретарь  
Специализированного ученого совета  
доктор физико-математических наук

Н.А.Азаренков

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



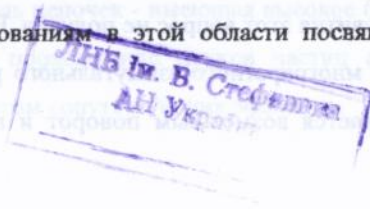
00751 121 (H)

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

### Актуальность темы.

Вопросам взаимодействия релятивистских пучков с кристаллами посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ. Этот интерес объясняется широким спектром возникающих при таком взаимодействии эффектов и их возможных применений в физике элементарных частиц. Присущие кристаллам специфические свойства - регулярность структуры, большие средние электромагнитные поля (в сравнении с полями создаваемыми физическими установками) - приводят к увеличению выхода ряда электромагнитных процессов по сравнению с соответствующими процессами в аморфной среде, внешних полях. При взаимодействии частицы с кристаллом возможны когерентные эффекты, в частности, генерация когерентного излучения со спектрально угловой плотностью значительно (на один, два порядка) превышающей спектрально угловую плотность излучения в аморфной среде.

Сравнительно недавно была предсказана и подтверждена экспериментально возможность эффективного отклонения пучков релятивистских частиц изогнутыми кристаллами, что вызывает значительный интерес в центрах, имеющих ускорители частиц высокой энергии (CERN, FERMLAB и др.). Этот интерес обусловлен широкими возможностями применения изогнутых кристаллов для управления параметрами пучков (вывода пучков из ускорителей, фокусировки, устранения гало, расщепления и др.), а также возможностью измерения аномального магнитного момента короткоживущих частиц. Теоретическим исследованиям в этой области посвящается данная работа.



### Состояние вопроса.

В начале 60-ых годов на основе компьютерного моделирования был предсказан эффект аномально большого пробега быстрых ионов, влетающих в монокристалл вдоль его главных кристаллографических направлений. Эффект обусловлен явлением каналирования частиц в кристалле вдоль открытых каналов. Вскоре это предсказание было подтверждено экспериментально. Теория явления каналирования была развита Линдхардом [1], который ввел понятие непрерывного потенциала цепочек атомов кристалла. В середине 70-ых годов Цыганов обратил внимание на возможность использования явления плоскостного каналирования для поворота частиц высоких энергий путем изгиба кристалла вдоль кристаллографических плоскостей [2]. Для релятивистских положительно заряженных частиц эффект был вскоре обнаружен и впоследствии исследован во многих ускорительных центрах, в широком (1 - 800 GeV) диапазоне энергий пучков. В тоже время эксперименты показали неприменимость данного метода для поворота отрицательно заряженных частиц. В ряде работ поднимался вопрос об использовании осевого каналирования для поворота отрицательно заряженных частиц. Однако отсутствие эффекта в исследованных областях параметров было воспринято как отсутствие эффекта вообще. В [3] было рассмотрено движение положительно заряженных частиц в изогнутых кристаллах в условиях когда одновременно проявляются и плоскости и цепочки кристалла. Была показана возможность расщепления входного монопучка на несколько выходных пучков. Было получено, для конкретного вида потенциала цепочки, значение длины аксиального деканалирования частиц в изогнутом кристалле, но дальнейшего развития этот вопрос не получил. В диссертации показано, что за счет механизма многократного азимутального рассеяния частиц на цепочках атомов, оказывается возможным поворот и положительно и отрицательно

заряженных частиц совершающих как финитное, так и инфинитное движение в поле цепочек изогнутого кристалла.

Возможность отклонения пучков на основе их взаимодействия с кристаллами стимулировала поиск различных приложений. Было предложено использовать поворот частиц в плоскостных каналах для проведения измерений аномального магнитного момента частиц. Актуальность метода связана с измерениями магнитного момента короткоживущих частиц, для которых время движения во внешнем поле является критичной величиной, что делает важным использование эффективно сильных средних полей кристаллов. Недостаток метода - его практическая неприменимость для отрицательно заряженных частиц. В настоящей работе показано, что использование механизма многократного азимутального рассеяния делает возможным проведение измерений аномального магнитного момента как положительно так и отрицательно заряженных частиц, позволяет упростить постановку эксперимента.

Сложность рассмотрения многих вопросов взаимодействия частиц с кристаллами делает актуальным вопрос численного моделирования. Одним из широко используемых методов является метод бинарных соударений. Метод состоит в последовательном рассмотрении взаимодействия налетающей частицы с атомами среды и позволяет точно учесть все сопутствующие эффекты. Однако данный подход требует больших объемов вычислений, что ограничивает толщину рассматриваемой мишени. Автором разработана компьютерная модель - модель цепочек - имеющая высокое быстродействие и позволяющая рассчитывать прохождение пучков частиц высокой энергии через толстый кристалл с учетом сопутствующих эффектов.

Таким образом различные аспекты взаимодействия быстрых заряженных частиц с кристаллами, связанные с задачей о поворотах релятивистских пучков изогнутыми плоскостями, получили тщательное исследование. В тоже время практически выпавшим из рассмотрения оказался вопрос о взаимодействии налетающих частиц с цепочками атомов изогнутого кристалла. Теоретическое исследование данной проблемы составляет основу настоящей работы.

### **Цель работы :**

- Разработка способа описания процесса многократного рассеяния быстрых частиц на цепочках атомов кристалла.
- Исследование прохождения пучков частиц высокой энергии через изогнутые кристаллы вблизи кристаллографической оси.
- Анализ влияния тепловых колебаний атомов решетки на движение релятивистских частиц при их многократном рассеянии на кристаллических цепочках.
- Изучение возможности использования механизма многократного азимутального рассеяния для измерений аномального магнитного момента частиц.
- Создание компьютерной программы численного моделирования прохождения пучков релятивистских заряженных частиц через толстые кристаллы вблизи кристаллографической оси.

### **Новизна работы :**

- Получена система рекуррентных соотношений, дающая описание процесса многократного азимутального рассеяния быстрых частиц на цепочках атомов изогнутого кристалла.
- Предсказана возможность отклонения релятивистских пучков положительно и отрицательно заряженных частиц при их прохождении вблизи кристаллографической оси изогнутого кристалла. Развита теория процесса.

- Предложен новый метод измерения аномального магнитного момента заряженных частиц с помощью механизма многократного азимутального рассеяния на цепочках атомов кристалла.
- Создана программа численного моделирования движения релятивистских частиц в периодическом поле цепочек атомов изогнутого кристалла.

#### **Практическая ценность :**

- Предложенный способ отклонения релятивистских пучков положительно и отрицательно заряженных частиц, при их прохождении вблизи кристаллографической оси изогнутого кристалла, может быть использован на ускорителях частиц высоких энергий для управления траекториями пучков, снятия гало, расщепления пучка и т.п.
- Предложенный метод измерения аномального магнитного момента короткоживущих частиц, на основе механизма многократного азимутального рассеяния на цепочках атомов, позволяет упростить методику проведения измерений и распространить их на случай отрицательно заряженных частиц.
- Разработанная программа численного моделирования позволяет производить расчет прохождения пучков через прямые и изогнутые кристаллы в широком диапазоне толщин и проводить детальное изучение сопутствующих эффектов.

#### **На защиту выносятся :**

1. Теория поворота пучков заряженных частиц высокой энергии, двигающихся вблизи кристаллографической оси, при многократном рассеянии частиц на цепочках атомов изогнутого кристалла.
2. Метод учета влияния тепловых колебаний атомов решетки на движение быстрых частиц в кристалле, основанный на связи между тепловой флуктуацией потенциала цепочки атомов и флуктуацией скорости частицы.

3. Метод измерения аномального магнитного момента частиц, основанный на отклонении частиц кристаллом за счет механизма многократного азимутального рассеяния.
4. Результаты компьютерного моделирования процесса прохождения быстрых заряженных частиц через толстый изогнутый кристалл вблизи кристаллографической оси.

#### Публикации.

По теме диссертации опубликовано 7 работ.

Материалы работ были представлены на

XX,XXI,XXII,XXIV Сессиях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 1990,91,92,94 гг.);

International Conference on Atomic Collisions in Solids(ICACS-14 Манчестер,1991г.; ICACS-15 Лондон,1993г; ICACS-16 Лион,1995г.);

Workshop on channeling and Other Coherent Crystal effects at Relativistic Energies (Орхус, Дания, 1995 г.).

#### Структура и объем Диссертации.

Диссертация состоит из Введения, 4-ех Глав основного текста и Заключения.

Она содержит 112 страниц основного текста, 12 рисунков. Список Литературы 108 наименований. Общйй объем Диссертации 123 страницы.

#### Краткое содержание.

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, изложено состояние вопроса к моменту написания, сформулирована цель работы. Отмечена новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены положения диссертации выносимые на защиту. Далее кратко изложено содержание работы.

В первой Главе рассматриваются особенности динамики релятивистских частиц в кристалле, обусловленные регулярностью структуры кристаллической решетки.

Эффективная константа взаимодействия частицы с отдельным атомом мала-  $Ze^2 / \hbar c \leq 1$  ( $Z|e|$ - заряд рассеивающего центра). Поэтому в общем случае взаимодействие заряженной частицы с веществом необходимо рассматривать методами квантовой механики. При движении релятивистской частицы под малым углом  $\psi$  к плотноупакованной атомами кристаллографической оси кристалла возможно возникновение корреляций между последовательными соударениями частицы с атомами решетки. Эффективность взаимодействия определяется при этом величиной  $N_c Ze^2 / \hbar c$ , где  $N_c$  - число атомов решетки с которыми частица взаимодействует когерентно.  $N_c$  растет с увеличением энергии частицы  $\epsilon$  и с уменьшением угла  $\psi$ . При достаточно больших  $N_c$  выполняется условие -  $N_c Ze^2 / \hbar c \gg 1$ . Данное условие соответствует возможности предельного перехода  $\hbar \rightarrow 0$ , т.е. возможности классического описания. Траектория частицы в кристалле, в этом случае, определяется классическим рассеянием в совокупном потенциале атомов решетки. При движении под малым углом  $\psi$  к одной из кристаллографических осей частица испытывает последовательные столкновения с атомами цепочки. При достаточно больших  $\epsilon$  и малых  $\psi$  углы рассеяния атомами малы и траектория частицы плавно изменяется при переходе от одного атома к другому. В этом случае при описании движения частицы в кристалле можно использовать потенциал усредненный по продольной координате - потенциал непрерывной цепочки атомов  $U_s(\vec{\rho})$ , где  $\vec{\rho}$  - радиус вектор в плоскости ортогональной оси цепочки. Переход от совокупного потенциала атомов к суммарному полю цепочек позволяет разделить движение частицы на продольное и поперечное. Уравнение движения частицы в плоскости поперечной оси кристалла имеет один интеграл движения - полную поперечную энергию частицы  $E_{\perp}$ . В зависимости от величины  $E_{\perp}$  движение в поле цепочек может быть финитным

(каналирование) или инфинитным (надбарьерное движение). При рассеянии в кристалле частица последовательно сталкивается с отдельными кристаллическими цепочками. Потенциал отдельной цепочки является радиально симметричным  $U_z(\vec{\rho}) = U_z(\rho)$ . Уравнение движения в этом случае разделяется на уравнения для радиальной и азимутальной координат частицы. Эти уравнения легко решаются в квадратурах, что позволяет определить выражения для угла прецессии  $\varphi_{pr}$  и периода прецессии  $T_{pr}$  каналированных частиц и для угла рассеяния  $\varphi_z$  надбарьерных частиц. Потенциал отдельной цепочки атомов, как показывают вычисления, быстро спадает с расстоянием. Это позволяет рассмотреть в качестве упрощенной модели взаимодействия ситуацию, когда в каждый конкретный момент времени частица взаимодействует только с ближайшей к ней цепочкой. В этом случае угловые координаты скорости частицы ( $\vartheta_x \equiv v_x / v; \vartheta_y \equiv v_y / v$ ) и прицельный параметр  $b$  взаимодействия частицы с текущей цепочкой атомов однозначно определяют прицельный параметр  $b'$  рассеяния частицы на следующей кристаллической цепочке. Знание  $b'$  позволяет определить соответствующий угол рассеяния  $\varphi'_z$ , а значит  $\vartheta'_x, \vartheta'_y$ . Таким образом, оказывается возможным записать систему рекуррентных соотношений для параметров  $(\vartheta_x, \vartheta_y, b)$ . В совокупности с начальными значениями  $(\vartheta_x^0, \vartheta_y^0, b^0)$  данная система рекуррентных соотношений дает описание процесса многократного рассеяния частицы на цепочках атомов - процесса прохождения быстрой частицы через кристалл вблизи кристаллографической оси.

Во второй Главе рассматриваются особенности прохождения быстрой частицы через кристалл, обусловленные многократным рассеянием частиц на цепочках атомов. Получены аналитические решения для некоторых предельных случаев движения частиц в поле кристаллических цепочек.

Анализируется влияние тепловых колебаний атомов решетки на прохождение частиц через кристалл.

Вначале рассматривается задача о движении заряженной частицы в поле кристаллических цепочек под большим углом ( $\psi \gg \psi_c$ ,  $\psi_c$  - критический угол каналирования [1]) к оси цепочки. При этом однократные углы рассеяния частицы цепочкой малы ( $\varphi_r \ll 1$ ). Если ортогональная составляющая скорости направлена вдоль одного из векторов трансляции решетки, то реализуется режим движения частицы вблизи кристаллографической плоскости. Выполняя разложение системы рекуррентных соотношений по малому параметру  $\varphi$ , убедимся, что данные соотношения преобразуются в известные уравнение движения частицы в поле непрерывных плоскостей кристалла. Затем рассматривается случай, когда при многократном рассеянии частиц на цепочках атомов выполняются условия динамического хаоса. Столкновения частицы с различными цепочками в этом случае являются случайными. Записав рекуррентные соотношения для функции распределения частиц по азимутальному углу  $f(\phi)$  легко убедиться, что в условиях динамического хаоса они преобразуются в кинетическое уравнение рассеяния релятивистских частиц в поле цепочек кристалла. Решение кинетического уравнения показывает, что существует такая длина  $l_x$  при прохождении которой первоначально точечный пучок становится равномерно распределенным по азимутальному углу  $\phi - f(\phi, l_x) = 1/2\pi$ . Проведем усреднение рекуррентных соотношений для угловых координат скорости частицы по  $\phi$  для двух значений толщин кристалла  $L=0$  и  $L=l_x$ . Результат усреднения показывает, что на длине  $l_x$  происходит поворот центра пучка на угол  $\Delta\theta = \psi$ . Поворот происходит в направлении оси кристалла, то есть имеет место эффект "увлечения" пучка цепочкой атомов.

Атомы кристалла совершают тепловые колебания отклоняясь от положения равновесия на некоторые (малые в сравнении с постоянной решетки) расстояния. Это приводит не только к изменению непрерывного потенциала цепочки, но и к некогерентным эффектам в рассеянии. Тепловое отклонение атома цепочки приводит к флуктуации потенциала, что вызывает флуктуацию скорости частицы. Из уравнения движения частицы в поле отдельной цепочки и закона случайности прицельного параметра  $b$  в условиях динамического хаоса несложно получить выражение для среднего квадрата флуктуации скорости -  $\overline{\vartheta_{\text{ут}}^2}(L)$ . При этом оказывается что некогерентное рассеяние надбарьерных и каналированных частиц, в условиях динамического хаоса, описывается единым образом. Качественный анализ полученных соотношений показывает, что для надбарьерных частиц величина  $\overline{\vartheta_{\text{ут}}^2}(L)$  не зависит от поперечной энергии. Для каналированных частиц с уменьшением  $E_{\perp}$  значение  $\overline{\vartheta_{\text{ут}}^2}(L)$  уменьшается для положительно заряженных и возрастает для отрицательно заряженных частиц. Для надбарьерных частиц оказывается возможным упростить выражение для  $\overline{\vartheta_{\text{ут}}^2}(L)$ , что позволяет установить связь между некогерентным тепловым рассеянием частиц в кристалле и многократным рассеянием в аморфной среде и указать на роль регулярности структуры в подавлении некогерентного рассеяния. Полученное выражение для среднего квадрата угла некогерентного рассеяния может быть посчитано аналитически не только для простейших видов цепочечного потенциала, но и для линдхардовского потенциала цепочки. Это позволяет провести численное сравнение величин некогерентного теплового, многократного аморфного и многократного азимутального рассеяний. Сравнение показывает, что в широком диапазоне параметров взаимодействия частицы с кристаллом многократное азимутальное рассеяние на цепочках атомов является

определяющим и некогерентное тепловое рассеяние может рассматриваться как малый возмущающий фактор.

В третьей Главе рассматриваются вопросы связанные с поворотами пучков частиц при рассеянии в кристалле. Определены условия при которых поворот оказывается возможным. Изучена возможность применения механизма многократного азимутального рассеяния для измерения аномального магнитного момента частиц.

Вначале получены рекуррентные соотношения для угловых координат скорости частицы при многократном рассеянии в изогнутом кристалле. При этом предполагается, что радиус кривизны кристалла достаточно велик и рассеяние частицы на отдельной цепочке атомов можно рассматривать в приближении  $\psi = const$ . Анализ показывает, что при движении частицы под большим углом  $\psi \gg \psi_c$  к оси цепочки (вдоль изогнутой кристаллографической плоскости), эти соотношения переходят в уравнение движения частицы в поле изогнутых плоскостей кристалла.

При произвольном движении частицы в поле цепочек атомов изогнутого кристалла рассчитать прохождение частицы через кристалл можно с помощью численной модели, созданной на базе полученных рекуррентных соотношений. Результаты моделирования показывают (см. Рис.1), что при некоторых условиях основная часть частиц падающего пучка следует за направлением изогнутой кристаллографической оси, т.е. имеет место поворот пучка кристаллом. При этом поворот имеет место для надбарьерных частиц, т.е. частиц совершающих инфинитное движение в поле цепочек атомов. Для объяснения этого, на первый взгляд парадоксального результата, в диссертации проведен теоретический анализ полученных рекуррентных соотношений. При выполнении условий динамического хаоса, рекуррентные соотношения можно модифицировать беря за основу не взаимодействие

частицы с отдельной цепочкой, а её многократное рассеяние на длине  $l_k$ . Усредняя данные соотношения по  $\phi$  убедимся, что, при выполнении условия равномерного распределения по азимутальному углу, центр пучка смещается вдоль изогнутой кристаллографической оси. Рекуррентные соотношения позволяют также вычислить изменение среднего квадрата поперечного углового радиуса пучка с толщиной кристалла. Оказывается, что при выполнении условий квазипрямолинейности ( $\psi_{l_k} = \text{const}$ ) и азимутального равномерного распределения, уширение пучка происходит медленнее чем поворот его центра, т.е. имеет место поворот пучка как целого. Из предельных условий определяющих возможность поворота пучка следует выражение для максимально возможного угла поворота пучка частиц  $\theta_{\max}$  и максимальной толщины кристалла  $L_{\max}$  при многократном рассеянии на цепочках атомов изогнутого кристалла. Величина  $\theta_{\max}$  оказывается практически не зависящей от конкретного вида потенциала и определяется параметрами пучка и кристалла. Отношения  $\theta_{\max}/\psi_c$  и  $L/L_{\max}$  позволяют определить возможен ли поворот данного пучка данным кристаллом и в какой степени.

В качестве приложения рассмотрена задача о рассеянии в поле цепочек кристалла частиц обладающих аномальным магнитным моментом. При движении поляризованного пучка заряженных частиц во внешнем электромагнитном поле происходит вращение вектора поляризации этих частиц. Для плоских участков траектории в электрическом поле угол вращения спина пропорционален углу поворота импульса частицы. Это послужило основой для использования плоскостного каналирования в изогнутых кристаллах при измерениях аномального магнитного момента частиц. Малость углов однократного рассеяния на цепочках атомов позволяет использовать для измерений аномального магнитного момента и механизм многократного азимутального рассеяния частиц на цепочках кристалла. Преимущества метода

- его применимость и для отрицательно заряженных частиц ; необязательность изгибания кристалла.

В четвертой Главе рассматриваются вопросы численного моделирования прохождения релятивистских частиц вблизи кристаллографической оси.

Существуют различные алгоритмы моделирования прохождения релятивистских заряженных частиц через кристалл. Метод бинарных соударений обеспечивает максимальный учет сопутствующих эффектов, но требует больших затрат машинного времени, что не подходит для случая толстых кристаллов. Рассматривая в качестве элементарного акта взаимодействия рассеяние частицы на цепочке атомов можно существенно повысить скорость моделирования. Модель цепочек , основанная на системе рекуррентных соотношений для угловых координат скорости частицы, позволяет моделировать прохождение частиц через толстые ( $L \geq 10 \text{ см}$ ) кристаллы. Это дает возможность , с минимальными затратами компьютерного времени, производить оценку возможности поворота пучков частиц изогнутыми кристаллами с учетом реальной геометрии цепочек. Модель цепочек однако не позволяет учесть прохождение каналированных отрицательно заряженных частиц. Кроме того, рекуррентные соотношения положенные в основу модели предполагают радиальную симметрию цепочечных потенциалов, что не всегда является хорошим приближением. Для проведения точных количественных расчетов движения быстрых заряженных частиц в реальном потенциале цепочек атомов модель цепочек была модифицирована в модель поперечного движения. Прохождение частицы через кристалл рассматривается здесь как двумерное движение в совокупном поле кристаллических цепочек, что соответствует известному алгоритму "укрупненных столкновений" . Данная модель , обладая меньшим быстроедействием чем модель цепочек (но большим чем бинарная модель),

позволяет учесть все эффекты сопутствующие процессу рассеяния релятивистской частицы в кристалле. Далее представлены некоторые результаты компьютерного моделирования. Приведенные результаты подтверждают возможность эффективного поворота пучков положительно и отрицательно заряженных частиц при их движении вблизи кристаллографической оси изогнутого кристалла. Констатируется хорошее согласие результатов моделирования с имеющимися экспериментальными данными и с предсказаниями разработанной теории поворота пучка изогнутым кристаллом.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации :

1. Получены рекуррентные соотношения, дающие описание процесса многократного рассеяния быстрой заряженной частицы в поле непрерывных цепочек изогнутого кристалла.
2. Показано , что полученная система рекуррентных соотношений в предельном случае переходит в уравнение движения частицы в поле плоскостей изогнутого кристалла. Такой переход имеет место при движении релятивистской частицы в поле кристаллических цепочек под большим углом  $\psi \gg \psi_c$  к оси кристалла вдоль одного из векторов трансляции решетки.
3. Показано , что в условиях динамического хаоса многократное азимутальное рассеяние может приводить к повороту пучков как положительно так и отрицательно заряженных частиц в направлении изгиба оси кристалла. Определены условия определяющие возможность поворота частиц.
4. Получено выражение для максимального угла поворота пучка частиц изогнутым кристаллом, который достижим , за счет механизма многократного азимутального рассеяния частиц на цепочках атомов, при заданных параметрах пучка и кристалла.

5. Получены выражения для среднего квадрата угла некогерентного теплового рассеяния.
6. Предложен метод измерения аномального магнитного момента частиц, основанный на использовании механизма многократного рассеяния частиц на цепочках атомов кристалла.
7. Создана программа компьютерного моделирования позволяющая проводить численный расчет процесса прохождения пучков релятивистских заряженных частиц через толстые изогнутые кристаллы вблизи кристаллографической оси.
8. Проведено численное моделирование взаимодействия быстрых заряженных частиц с изогнутым кристаллом. Результаты моделирования показывают возможность эффективного поворота релятивистских частиц при многократном рассеянии на цепочках атомов изогнутого кристалла и подтверждают основные теоретические результаты полученные в настоящей диссертации.

### Литература

1. Lindhard J. Влияние кристаллической решетки на движение быстрых заряженных частиц // УФН т.99 вып.2 (1969) с.249-296.
2. Tsyganov E.N., Fermilab TM-682 Some Aspects of the Mechanism of a Charge Particle Penetration Through a Monocrystal; TM-684; Batavia, 1976.
3. Bak J.F., Jensen P.R., Madsboll H., Moller S.P., Schiott H.E. and Uggerhoj E. Detailed investigation of the channeling phenomena involved in bending of high-energy beams by means of crystals // Nucl. Phys. B242 (1984) 1-30.

Публикации

1. Ахизер А.И., Шульга Н.Ф., Трутень В.И., Гриненко А.А., Сыщенко В.В. Динамика заряженных частиц высоких энергий в прямых и изогнутых кристаллах // УФН т.165 №10 (1995) с.1165-1192.
2. Shul'ga N.F., Greenenko A.A. Multiple scattering of ultrahigh energy charged particles on atomic strings of a bent crystal //Phys. Lett. B353(1995) p.373-377.
3. Greenenko A.A. and Shul'ga N.F. Deflection of high energy particles during multiple scattering by atomic strings of a bent crystal // Nucl. Instr. & Meth. B90 (1994) p.179-182.
4. Greenenko A.A. and Shul'ga N.F. Spin rotation and deflection of high energy charged particles in a bent crystal due to multiple scattering by atomic strings // Nucl. Instr. & Meth. B67 (1992) p.212-216.
5. Гриненко А.А., Шульга Н.Ф. О повороте пучка заряженных частиц высоких энергий при рассеянии на цепочках атомов изогнутого кристалла // Письма в ЖЭТФ т.54 в.9 (1991) с.520-524.
6. Greenenko A.A. and Shul'ga N.F. Spin rotation at multiple scattering of high energy particles by atomic strings in a crystal //Phys. Lett. 150A(1990)p402-404.
7. Гриненко А.А., Шульга Н.Ф. О вращении спина при многократном рассеянии быстрой заряженной частицы в кристалле. Препринт ХФТИ-89-39. Харьков. 1989 - 6с.

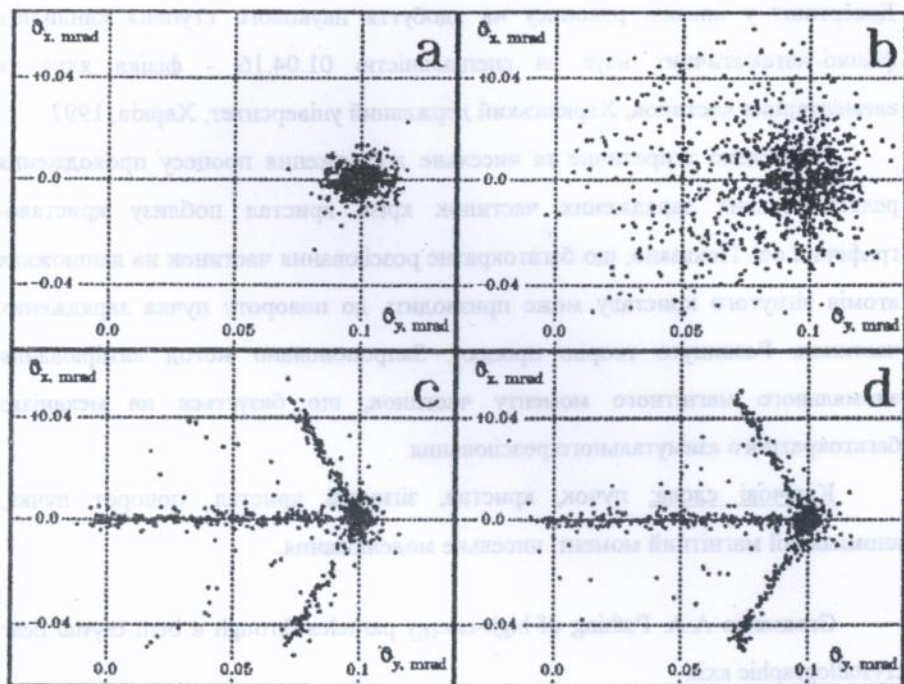


Рис. 1 Угловые распределения отрицательно (а,б) и положительно (с,д) заряженных частиц с энергией  $E=800$  Гэв , проходящих через изогнутый кристалл Si толщиной  $L=3$  см и радиусом кривизны  $R=300$  м вблизи оси  $\langle 111 \rangle$  ; (а,с) - без учета, (б,д) - с учетом некогерентного рассеяния на тепловых колебаниях ; начальные угловые координаты частиц пучка -  $(\vartheta_x, \vartheta_y) = (0,0)$ .

$$\theta_{\max} = 26 \cdot \psi_c ; L_{\max} = 13 \text{ см.}$$

Гриненко А.А. Проходження частинок високої енергії крізь зігнутий кристал поблизу кристалографічної осі.

Дисертація у вигляді рукопису на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 - фізика ядра та елементарних частинок, Харківський державний університет, Харків, 1997.

Проведено теоретичне та чисельне дослідження процесу проходження релятивістських заряджених частинок крізь кристал поблизу кристалографічної осі. Показано, що багатократне розсіювання частинок на ланцюжках атомів зігнутого кристалу може призводити до повороту пучка заряджених частинок. Розвинуто теорію процесу. Запропоновано метод вимірювання аномального магнітного моменту частинок, що базується на механізмі багатократного азимутального розсіювання.

Ключові слова: пучок, кристал, зігнутий кристал, поворот пучка, аномальний магнітний момент, чисельне моделювання.

Greenenko A.A. Pathing of high-energy particles through a bent crystal near crystallographic axis.

Thesis as a manuscript for the candidate of physical and mathematical sciences scientific degree on a speciality 01.04.16 - nuclear physics and physics of elementary particles, Kharkov State University, Kharkov, 1997.

Theoretic and numerical studying of relativistic charged particles pathing through a crystal near crystallographic axis are made. It is shown that under multiple scattering of relativistic particles on atomic strings of a bent crystal the charged particle beam deflection is possible. The theory of process is developed. Anomalous magnetic moment measuring method, based on doughnut scattering mechanism, is proposed.

Key words: beam, crystal, bent crystal, beam deflection, anomalous magnetic moment, computer simulation.



Грищенко А.П. Прохождение и взаимодействие высокоэнергетических протонов с кристаллами кварца и флюорокварца. Харьков, 1997. 100 с.

Диссертация на соискание должности кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 - ядерная физика и физика элементарных частиц. Харьковская государственная академия образования. Харьков, 1997.

Подписано в печать 01.09.97 г. Формат 60×84/16. Бумага печ. №2  
Усл. Печат. Лист. 1.0 Тираж 100 экз. Зам. №7-135  
Харьков, ООО ПФ «Поли-Экспресс», Московский пр-т, 5, кв.58. Тел. 149-737

Копия для автора, редактора, библиотечного экземпляра. Тираж  
использований не имеет. Удостоверение №...

Grishchenko A. P. Passing of high energy protons through a quartz crystal and  
fluorquartz crystal.

... as a manuscript for the candidate of physical and mathematical sciences  
scientific degree on a speciality 01.04.16 - nuclear physics and physics of elementary  
particles. Charikov State University, Kharkov, 1997.

Problems and analytical solution of interaction of high energy protons passing  
through quartz and fluorquartz crystals are made. It is shown that under multiple  
scattering of relativistic particles on atomic nuclei of a solid crystal we can get

Подписано к печати 01.09.97 г. Формат 60×84/16. Бумага печ. №2

Усл. Печат. Лист. 1.0 Тираж 100 экз. Зам. №7-135

Харьков, ООО ПФ «Поли-Экспресс», Московский пр-т, 5, кв.58. Тел. 149-737

433473

AB 38.425