

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Г-61

1-84-289

ГОЛОВАТЮК
Вячеслав Михайлович

ОТКЛОНЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
ИЗОГНУТЫМИ МОНОКРИСТАЛЛАМИ

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1984

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
профессор

ЦЫГАНОВ
Эдуард Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

ГРАМЕНИЦКИЙ
Игорь Михайлович

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

ПОХИЛ
Григорий Павлович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Ленинградский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
г. Ленинград.

Защита состоится "21" июня 1984 года в
"10³⁰" часов на заседании специализированного совета Д-047.01.02
при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных
исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ

Автореферат разослан "18" мая 1984 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

 М. Ф. ЛИХАЧЕВ

Актуальность проблемы. Ориентационные эффекты, связанные с прохождением заряженных частиц через вещество с кристаллической структурой, уже более двух десятилетий привлекают внимание физиков во многих лабораториях мира.

Взаимодействие налетающих частиц с атомами монокристалла нельзя рассматривать как многократное независимое рассеяние на отдельных изолированных центрах, так как существует сильная корреляция между последовательными соударениями, которая радикально меняет характер процессов в монокристалле. Наиболее ярко это проявляется в явлении, получившем название эффекта каналирования.

Для положительно заряженных частиц, движущихся под малыми углами относительно кристаллографических осей или плоскостей, этот эффект проявляется в том, что резко уменьшается интенсивность ядерных реакций, вероятность рассеяния на большие углы, а также существенно изменяется характер энергетических потерь и угловое распределение рассеянных частиц по сравнению с аналогичными процессами в аморфном теле.

Перечисленные эффекты обусловлены тем, что траектория частицы, захваченной в режим каналирования, проходит на большом расстоянии от атомов. В связи с этим траектории каналированных частиц имеют определенную стабильность, которая возрастает с увеличением энергии частицы.

В работе* впервые была высказана гипотеза о возможности удержания частиц в режиме каналирования при изгибе кристалла до определенного радиуса кривизны. Экспериментальное подтверждение этой гипотезы существенно расширило бы наши знания о динамике движения частиц через упорядоченные системы атомов.

Помимо научного интереса явление отклонения заряженных частиц изогнутыми кристаллами может найти применение в различных областях как ускорительной техники, так и физического эксперимента. Наиболее интересные из них:

использование изогнутого кристалла вместо специализированных магнитных систем, служащих для вывода ускоренного пучка из кольцевых ускорителей**.

* Tsyanov E. N., Fermilab TM-682, TM-684, Batavia, 1976.

** Кошкарев Г. Д., препринт ИТЭФ, №30, 1977.

Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ

вывод из ускорителя высокоэнергетичных пучков вторичных частиц^{*}, использование соответствующим образом изогнутых кристаллических пластин для фокусировки пучков частиц^{*},

поворот спина частиц при прохождении через изогнутые кристаллы в режиме каналирования^{**},

выделение короткоживущих частиц при помощи изогнутого монокристалла^{*}.

Цель работы – экспериментальная проверка возможности отклонения траекторий заряженных частиц изогнутыми кристаллами, изучение эффектов, связанных с прохождением протонов с энергией 8,4 ГэВ через прямые и изогнутые на различные углы кристаллы в режимах осевого и плоскостного каналирования.

Новизна работ. Впервые удалось отклонить пучок протонов с энергией 8,4 ГэВ при помощи изогнутого монокристалла. Экспериментально измерена интенсивность выбывания частиц из осевого и плоскостного каналирования в прямых и изогнутых на различные углы кристаллах кремния.

Практическая и научная ценность. Минимальный радиус поворота заряженной частицы, достигнутый в эксперименте, составил приблизительно 19 см, что соответствует среднему значению напряженности поперечного электрического поля, действующего на частицу в кристалле около 10^{10} В/см. Это эквивалентно магнитному полю с индукцией 150 Т.

Полученные в работе данные по отклонению протонов изогнутыми кристаллами могут быть использованы для уточнения теоретических предсказаний, для создания кристаллического септума в устройствах вывода пучков частиц из ускорителя, а также при использовании кристаллов в других областях физического эксперимента.

Одноплечевой спектрометр, созданный для эксперимента по изучению прохождения протонов через прямые и изогнутые кристаллы, использовался впоследствии для экспериментов по изучению спонтанного излучения, возникающего при каналировании электронов и позитронов.

Апробация и публикации. Основные результаты диссертации докладывались на международной конференции в Бад-Ибург (1983г., ФРГ) и опубликованы в работах /1-4/.

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Работа содержит 103 страницы, включая 32 рисунка, 3 таблицы и библиографический список литературы из 75 наименований.

* Carrigan R.A., Tsyanov E.N. et al., Nucl. Instr. Meth., 194, 1982, 205.

** Барышевский В.Г., письма в ЖТФ, т.5, 1979, 182; Любошиц В.Л., ЯФ, т.31, 1980, 986; Михалев В.Л., препринт ИФВЭ, 82-29, 1983.

Автор защищает:

1. Создание экспериментальной установки для изучения отклонения траекторий заряженных частиц изогнутыми кристаллами.

2. Создание комплекса программ для обработки экспериментальных данных.

3. Результаты эксперимента по отклонению траекторий протонов с энергией 8,4 ГэВ, проходящих изогнутый на различные углы кристалл в режиме плоскостного каналирования.

4. Результаты эксперимента по отклонению траекторий протонов с энергией 8,4 ГэВ, проходящих изогнутый кристалл в режиме осевого каналирования.

5. Результаты измерения длины деканалирования протонов с энергией 8,4 ГэВ в монокристалле кремния.

Во введении рассматриваются теоретические представления, лежащие в основе эффекта каналирования в прямых и изогнутых кристаллах, сделан обзор экспериментов по изучению каналирования в изогнутых кристаллах, выполненных в других лабораториях.

Одной из основных характеристик, определяющих эффект каналирования, является критический угол. Положительно заряженная частица, падающая на кристалл под углом относительно кристаллографических осей или плоскостей меньше критического, с большой вероятностью захватится в режим каналирования. В случае большого угла входа частица пройдет кристалл как аморфное вещество. Вследствие того, что каналированная частица испытывает ряд последовательных малоугловых рассеяний на атомах кристаллической решетки, она удерживается на достаточно большом расстоянии от атомных цепочек и плоскостей и, в первом приближении, имеет стабильную траекторию с сохраняющейся величиной поперечной энергии.

Как упоминалось выше, Цыгановым было показано, что при изгибе кристалла до определенного радиуса кривизны траектория каналированной частицы должна повторять форму изогнутого кристалла. Это несколько необычное явление связано с тем, что положительно заряженная частица, захваченная в потенциальную яму канала, двигаясь прямолинейно при изгибе кристалла постепенно входит в область сильных электрических полей атомов и начинает отклоняться в сторону поворота оси кристалла. Устойчивая траектория частицы при этом находится уже не в области потенциального минимума, а в области электрических полей, достаточных для уравновешивания центробежной силы, действующей на частицу в изогнутой части кристалла. Критический радиус кривизны траектории частицы можно связать с ее импульсом соотношением:

$$R_c = \frac{PV}{eE_c}$$

где E_c - напряженность электрического поля на границе канала, e - заряд электрона, P, V - соответственно импульс и скорость каналированной частицы.

Теоретическое рассмотрение каналирования в изогнутом монокристалле обычно выполняется в предположении возможности замены изгиба канала введением центробежного потенциала и определения условий, при которых суммарный потенциал, включающий потенциал прямого канала и центробежный потенциал, имеет достаточно выраженный минимум для обеспечения поперечных колебаний каналированной частицы. В изогнутом кристалле движение положительно заряженной частицы определяется эффективным потенциалом:

$$U_{eff}(yR) = U_s(y) + \frac{PV}{R}y;$$

поперечная координата $-y$ отсчитывается от середины межплоскостного расстояния. Для простоты потенциал прямого канала $U_s(y)$ выбран равным нулю при $y=0$.

Для частиц, попавших в изогнутый канал, высота потенциального барьера, удерживающего их в режиме движения между плоскостями уменьшается, что приводит к выбыванию из этого режима частиц с большой поперечной энергией. Назовем этот механизм деканализации центробежным. Траектория частиц, оставшихся в канале, будет смещена к одной из его стенок, в результате этого при *малых* радиусах кривизны для таких частиц возрастает интенсивность рассеяния на ядрах кристаллической решетки и на электронах в канале. В дальнейшем этот механизм выбывания из канала для краткости будем называть деканализацией за счет рассеяния в канале. При больших радиусах кривизны кристалла - это обычный механизм выбывания частиц из режима каналирования.

В первой главе выделены основные принципиальные особенности экспериментальной установки для изучения явлений, возникающих при каналировании заряженных частиц с импульсом больше 1 ГэВ/с, содержится описание основных элементов спектрометра: координатных детекторов, кристаллов, изгибающего устройства, гониометрической системы, электронных логических схем, приводятся параметры системы регистрации данных и их передачи в ЭВМ.

Преимущество изучения эффекта каналирования при высоких энергиях заключается в том, что с ростом энергии многократное рассеяние, являющееся основной причиной выбывания частиц из режима каналирова-

ния, уменьшается как $\theta \sim 1/E$, в то же время критический угол каналирования уменьшается как $\theta \sim 1/\sqrt{E}$

Эксперимент проводился на пучке протонов синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ. Схема установки приведена на рис. I. Телескоп счетчиков С1, С2, С3, С4 и АО отбирал частицы, попадающие в рабочую область кристалла и рассеянные в заданном телесном угле, и запускал систему дрейфовых камер. Регистрация координат частиц производилась при помощи 20 прецизионных дрейфовых камер, объединенных в три блока.

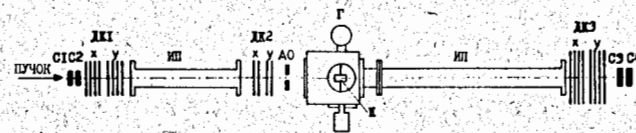


Рис. I. Схема установки. С1-С4 - сцинтиляционные счетчики, ДК1-ДК3 - блоки дрейфовых камер, АО - антисовпадательный счетчик, Г - гониометр, К - кристалл, ИП - ионопровод.

Для определения углов налетающих частиц использовались блоки ДК1-ДК2, а для выходящих - ДК2-ДК3. Блоки ДК1 и ДК3 состояли из 4X и 4Y- плоскостей. Угловое разрешение установки для входных углов, в основном, определялось многократным рассеянием в блоке ДК2, установленном непосредственно перед кристаллической мишенью. С целью уменьшения количества вещества на пути частицы блок ДК2 был составлен из 2X- и 2Y- плоскостей. Точность измерения выходных углов составляла 10 микрорадиан и определялась в первую очередь координатной точностью блоков ДК2 и ДК3 и расстоянием между ними, равным 11 м. Координатная точность (стандартное отклонение) каждой плоскости дрейфовых камер была не хуже 100 мкм.

Экспериментально измеряемым параметром установки является разрешение по углу рассеяния. Это разрешение измерялось при выведенном из пучка кристалле. Угол рассеяния определялся как разность входного и выходного по отношению к кристаллу углов. Ширина распределения числа событий в зависимости от угла рассеяния обусловлена, в основном, рассеянием в блоке ДК2. Среднеквадратичное отклонение распределения углов рассеяния составляет 80 мкрад для каждой проекции.

Для уменьшения многократного рассеяния между блоками дрейфовых камер были установлены вакуумные ионопроводы.

Для ориентации монокристалла относительно оси пучка использовался прецизионный гониометр.

Пучок протонов проходил через монокристалл кремния длиной 20 см, часть которого могла подвергаться контролируемому изгибу. Схема размещения кристалла в изгибающем устройстве показана на рис.2.

К ПРЕДУСИЛИТЕЛЮ

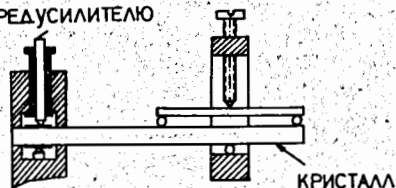


Рис.2. Схема расположения изгибающего устройства на кристалле.

Уменьшение ионизационных потерь при каналировании положительно заряженных частиц по сравнению с ионизационными потерями в разориентированном кристалле является одной из характерных черт этого эффекта. Для измерения ионизационных потерь протонов, проходящих через кристалл, его передняя часть была выполнена в виде полупроводникового детектора. На рис.3 приведены амплитудные спектры сигналов от частиц, прошедших через детектирующую часть прямого кристалла. Пик в области малых амплитуд (рис.3б), соответствует каналированным частицам, в то время как средние потери на ионизацию для частиц, не попавших в режим каналирования, соответствует пику с максимумом около 300 канала АЦП. Таким образом, по величине ионизации можно выделить частицы, каналированные в передней части кристалла. Доля таких событий определяется как шириной углового распределения входного пучка, так и величиной критического угла каналирования. Процедура ориентации кристаллов относительно оси пучка осуществлялась следующим образом: два одноканальных анализатора вырезали части спектра ионизационных потерь, ответственных за каналирование (0,2 - 0,7 максимума распределения) и остальную часть. Поиск

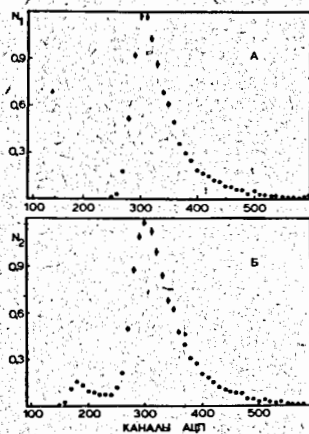


Рис.3. Амплитудные спектры сигналов с полупроводникового детектора, А - в разориентированном кристалле, Б - в кристалле, ориентированном плоскостью (III) параллельно оси пучка

производился по измерению зависимости отношения отсчетов в дискриминаторах при различных углах поворота гониометра. Проводя сканирование в двух плоскостях, можно однозначно выявить расположение всех кристаллографических осей и плоскостей. Таким образом удается довольно быстро без использования вычислительной машины провести ориентирование кристалла относительно оси пучка. Окончательный контроль ориентации кристалла можно осуществить при помощи ЭВМ.

Во второй главе диссертации рассматриваются вопросы создания программ для обработки данных, полученных в эксперименте.

В процессе эксперимента для каждого зарегистрированного события на магнитную ленту записывалась первичная информация о координатах частиц в дрейфовых камерах, расположенных до и после кристалла, амплитуда с детекторной части кристалла, отсчеты спцинтиляционных счетчиков, сигналы со схем совпадений и другая вспомогательная информация. Назначение программ обработки экспериментальных данных:

- 1) считывание и распаковка записанной в эксперименте информации,
- 2) отбор полезных событий с учетом эффективности дрейфовых камер,
- 3) подбор констант для правильного проведения трека,
- 4) проведение треков до и после кристалла,
- 5) отбор треков по заданным критериям,
- 6) запись параметров отобранного трека, а также амплитуды с детекторной части кристалла на ленту суммарных результатов,
- 7) корректировка параметров треков для каждого сеанса,
- 8) подбор коррекций на входные и выходные углы в зависимости от координаты на кристалле,
- 9) анализ физической информации.

В основе работы дрейфовой камеры лежит принцип определения координаты траектории частицы по времени дрейфа электронов первичной ионизации в электрическом поле от места прохождения частицы до сигнальной проволоки. Для определения координаты прохождения частицы через дрейфовую камеру необходимо знать формулу преобразования измеряемых временных отсчетов время-цифрового преобразователя (ВЦП) в пространственные координаты. В нашем случае, когда скорость дрейфа считалась постоянной во всех точках дрейфового промежутка, эта связь описывалась следующим образом:

$$X = V(T_K - T_0) + X_0,$$

где V - скорость дрейфа электронов, T_0 - минимальное время, соответствующее прохождению частицы через сигнальную проволочку, X_0 - координата сигнальной проволочки относительно общей системы отсчета,

T_k - интервал времени между моментом запуска время-цифрового преобразователя и приходом на него останавливающего импульса с сигнальной проволоочки.

Чтение событий с магнитной ленты, декодировка информации, поиск и реконструкция треков, запись результатов на вторичную ленту осуществлялись программой "Квант". На стадии подбора констант программа организована следующим образом: на первом шаге на заданном статистическом материале с учетом заложенных минимальных времен для каждой проволоочки вычислялись скорости дрейфа для каждого дрейфового промежутка. На втором шаге по этому же статистическому материалу определялись сдвиги каждой плоскости камер относительно общей системы координат с новыми скоростями дрейфа, определенными на первом шаге. С этой целью для каждого события программа определяла координаты искры каждой плоскости относительно общей системы координат. Затем вычислялись отклонения координат искры от прямой, проведенной по опорным плоскостям в блоках ДК1 и ДК3. Для координат, которые попали в заданный коридор вокруг прямой, строились распределения отклонения искры от опорной прямой в каждой плоскости. Полученные распределения фитировались гауссианом, средние значения распределений использовались для корректировки первоначальных сдвигов, определенных из геодезических измерений с учетом конструктивных особенностей камер.

С новыми константами программа "Квант" реконструировала трек первоначально по блокам ДК1-ДК2 в X- и Y- проекциях независимо, а затем - трек прошедшей через кристалл частицы по координате в кристалле и в блоке ДК3 в обеих проекциях. Средняя точность определения координаты составляла около 100 мкм (среднеквадратичное отклонение). Если треки были найдены в обеих частях установки, их параметры - наклон и координата пересечения кристалла в обеих проекциях записывались на ленту суммарных результатов. На обработку полной ленты, на которой было записано около 70 тысяч событий, программа затрачивала около 2 часов на ЭВМ ЕС-1040. Около 50% событий от общего числа запусков было восстановлено. Потери были обусловлены, в основном, неэффективностью дрейфовых камер.

В третьей главе диссертации приводятся результаты, полученные при обработке экспериментального материала по прохождению протонов через прямые и изогнутые кристаллы кремния в режиме осевого и плоскостного каналирования.

В первых двух разделах этой главы обсуждаются данные по прохождению протонов с энергией 8,4 ГэВ через прямые кристаллы кремния длиной 2 см в режиме осевого и плоскостного каналирования, рассматриваются различные критерии выделения каналированных частиц.

В разделе 3 приводятся угловые распределения протонов, прошедших изогнутые на различные углы кристаллы, которые являются непосредственным подтверждением существования явления поворота траекторий заряженных частиц изогнутыми кристаллами.

Во время эксперимента кристаллы изгибались в вертикальной плоскости под углами 0,0; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,7; 12,0 и 25,7 мрад. Плоскость (III) была расположена горизонтально. Было обнаружено, что для всех углов каналированная часть пучка следует за изгибом кристаллографической плоскости (III). При этом угловые распределения протонов, прошедших изогнутый кристалл, показывают отсутствие заметного увеличения числа частиц, деканалированных в связи с изгибом кристалла. На рис. 4 приведены распределения по выходным углам протонов, прошедших кристалл, изогнутый под углами 2,0 и 25,7 мрад. Широкое распределение в левой части рисунка обусловлено частицами, испытавшими многократное рассеяние в образце. Справа наблюдается узкий пик, связанный с исследуемым эффектом. На рис. 5 приведены аналогичные распределения для событий, отобранных по критериям выделения каналированных частиц, в которых амплитуда сигнала соответствовала диапазону от 0,2 до 0,7 амплитуды в максимуме спектра. Приведенные распределения подтвержда-

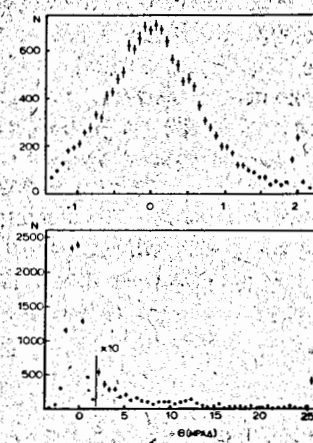


Рис. 4. Распределение числа частиц, прошедших кристалл кремния, изогнутый под углами 2,0 и 25,7 мрад в зависимости от угла выхода.

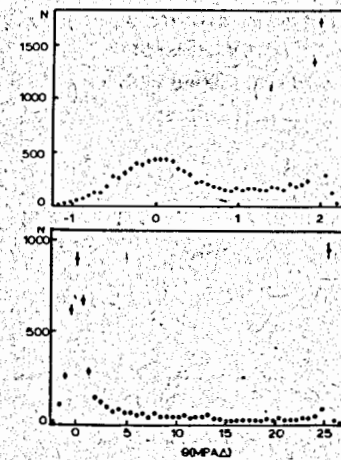
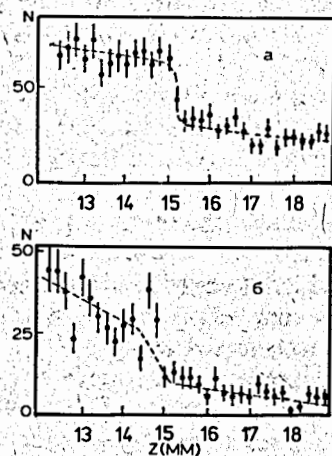


Рис. 5. Распределение числа частиц, испытавших минимальные ионизационные потери в передней части изогнутых под углами 2,0 и 25,7 мрад кристаллов в зависимости от угла выхода.

ит, что угловое положение пика каналированных частиц соответствует углу изгиба кристалла. Таким образом, было экспериментально показано, что с помощью изогнутого кристалла можно управлять траекториями заряженных частиц.

В разделе 4 описывается процедура определения доли частиц, деканалированных за счет центробежного механизма.

Вследствие того, что изгибающее устройство с тремя роликами не обеспечивало постоянной кривизны кристалла, по мере движения частиц к области минимального радиуса будет происходить дополнительное выбывание их из режима каналирования за счет центробежного механизма. Частица, выбывшая из каналирования в изогнутой половине, больше не отклоняется, а проходит оставшуюся часть кристалла приблизительно как в аморфном веществе. Зная уравнение, описывающее деформацию кристалла, можно для каждого угла, под которым частица вышла из кристалла, определить расстояние, пройденное ею в режиме каналирования. Деканалированными считались такие события, в которых частицы отклонились на угол θ в интервале углов $36_x < \theta < \theta_c - 36_c$, где $6_{x,c}$ — стандартное отклонение распределения многократного рассеянных и отклоненных на угол θ_c каналированных частиц соответственно. В частности, при отклонении на 25,7 мрад деканалированными считались частицы, попавшие в диапазон углов от 2,1 до 25,7 мрад. Для этого случая распределение числа частиц, выбывших из режима каналирования на данной глубине кристалла приведено на рис.6.



В области длин кристалла от 12 до 19 мм частицы отклонились на углы от 2,1 до 25,2 мрад. Видно, что в первой половине изогнутого кристалла (12 мм < Z < 15 мм) из режима каналирования выбыло значительно больше частиц, чем во второй (15 мм < Z < 19 мм), где радиус кривизны возрастает.

Рис.6. Распределения числа деканалированных частиц, полученные с отбором (а) и без отбора — (б) по ионизации по глубине в изогнутой части кристалла для угла отклонения 25,7 мрад. Пунктирные кривые проведены от руки.

Это иллюстрируется таблицей I, которая показывает долю частиц, деканалированных на участках длиной 1 мм.

Для того, чтобы отделить вклад центробежного механизма от обычного деканалирования, необходимо из значения полной доли протонов, выбывших на данном участке, вычесть долю частиц, деканалированных в равномерно изогнутом кристалле. Из-за отсутствия таких данных мы оценили долю частиц, выбывших из режима каналирования за счет центробежного механизма косвенным путем. С этой целью из доли частиц, деканалированных на рассматриваемом участке кристалла, вычиталась доля частиц, выбывших из режима каналирования на первом миллиметре после точки максимальной кривизны. В этой области центробежный механизм уже отсутствует, в то время как траектория частицы еще смещена максимально к стенке канала. Полученные таким образом оценки и теоретические величины, посчитанные в работе^{3*}, приведены в таблице 2. Отметим, что для событий без отбора по минимальной ионизации, экспериментальные оценки величины центробежного механизма заметно превосходят теоретические предсказания^{3*}, в то время как для событий, отобранных с помощью критерия минимальной ионизации, наблюдается неплохое совпадение этих величин. Большую разницу в величине деканалирования при отборе и без отбора по минимальной ионизации можно объяснить одновременным действием нескольких механизмов:

1. При отборе по минимальной ионизации мы выбираем протоны, каналированные плоскостями $(III)_L$, отстоящими друг от друга на 2,35 ангстрем. Частицы, попавшие между плоскостями $(III)_S$, отстоящими на 0,78 ангстрем, испытывают более интенсивное рассеяние на электронах в канале и тепловых колебаниях атомов решетки.

2. При отборе по минимальной ионизации мы обогащаем нашу выборку частицами с малой поперечной энергией, что также сказывается на интенсивности деканалирования.

3. Отбирая частицы, каналированные в передней части кристалла, мы устраняем из рассмотрения протоны, падающие на кристалл под углом больше критического, которые могут захватиться в режим каналирования в изогнутой части кристалла.

С другой стороны, теоретические оценки как для обычного, так и для центробежного деканалирования определяются пространственным распределением частиц в канале, а также сильно зависят от выбора параметров модели, в частности, минимального расстояния от плоскости, при котором частицы удерживаются в режиме каналирования.

Полученные в диссертации экспериментальные данные могут быть ис-

* Kudo H., Nucl.Instr.Meth., 1981, v.189, 609.

пользованы для дальнейшего усовершенствования теоретического описания.

В разделе 5 описано несколько процедур определения из экспериментальных данных длины деканализации — расстояния, при прохождении которого число канализованных частиц уменьшается в два раза.

Из распределения, показанного на рис. 6 (и аналогичных распределений для других углов изгиба) можно получить зависимость числа частиц в канале от глубины прохождения кристалла. На рис. 7 приведены прямые, которые получены с помощью фитирования экспериментальных точек в диапазоне глубин от 1,5 до 1,9 см. В случае отклонения на 12 мрад с отбором по минимальной ионизации прямая хорошо ложится на точки в диапазоне глубин 1,2 — 1,9 см, что указывает на то, что до такого радиуса изгиба влияние центробежного механизма деканализации не является существенным. Величина длины деканализации, полученная усреднением значений наклонов прямых, соответствующих отклонению на 4,7 и 12 мрад, составляет $0,57 \pm 0,02$ см.

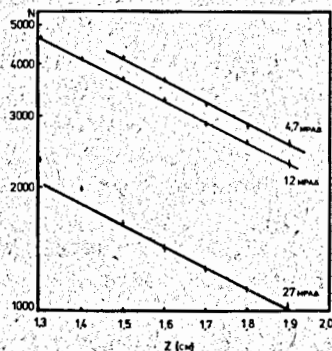


Рис. 7. Зависимость числа частиц в плоскостном канале (III) от глубины прохождения кристалла для событий, отобранных по минимальной ионизации.

Для кристалла, изогнутого под углом 25,7 мрад, точки хорошо аппроксимируются линейной зависимостью в диапазоне глубин 1,5 — 1,9 см, в то время как точки в области 1,3 — 1,5 см лежат выше прямой, что указывает на проявление центробежного механизма выбывания из режима канализования. Для событий без отбора по критериям выделения канализованных частиц наклон прямых в области 1,5 — 1,9 см остается таким же. Отсутствие разницы в длинах деканализации при отборе и без отбора по ионизации указывает на то, что в этой области в режиме канализования остались только частицы, попавшие в плоскостные каналы (III). Вследствие большого рассеяния в канале (III)_S на электронах и тепловых колебаниях атомов решетки, почти все частицы выбыли из режима канализования раньше.

В разделе 6 представлены экспериментальные результаты по осево-

му канализованию протонов в изогнутых кристаллах.

Использование осевого канализования для отклонения пучков частиц вызывает интерес в связи с тем, что критический угол осевого канализования в 3 — 4 раза больше плоскостного, длина деканализации при осевом канализовании несколько больше, чем при плоскостном. Однако величина потенциального барьера, удерживающего частицы в режиме осевого канализования, имеет минимальные значения в направлениях низкоиндексных кристаллографических плоскостей. Поэтому при попадании в изогнутую часть кристалла вследствие действия центробежной силы частицы будут выбывать из осевого в плоскостные каналы. Интенсивность этого процесса определяется углом между кристаллографической плоскостью и направлением изгиба кристалла.

Представленные в диссертации экспериментальные данные подтверждают существование перехода частиц, канализованных осью в плоскости, составляющие небольшие углы с направлением изгиба кристалла.

В эксперименте кристаллографическая ось $\langle 110 \rangle$, лежащая в плоскости (III), подвергалась контролируемому изгибу под углами 1,6 и 4,7 мрад. При изгибе кристалла под углом 4,7 мрад доля частиц, отклоненных осью $\langle 110 \rangle$ заметно меньше, чем в случае изгиба на 1,6 мрад. За счет большой величины центробежной силы почти все частицы, захваченные в режим канализования осью $\langle 110 \rangle$, выбывают из этого канала.

В разделе 7 приводятся данные, подтверждающие существование "объемного" захвата в режим канализования.

В работе³⁶ была высказана гипотеза о том, что внутри изогнутого кристалла возможен захват в режим канализования в случае, когда траектория частицы совпадает с касательной к изогнутой кристаллографической плоскости. В указанной работе приводятся экспериментальные факты в пользу существования этого эффекта, который был назван авторами "объемным" захватом. В диссертации приводятся результаты нашего эксперимента, которые подтверждают существование "объемного" захвата.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы:

1. Предложен, рассчитан и поставлен эксперимент по изучению явления отклонения заряженных частиц изогнутыми монокристаллами.

2. Впервые экспериментально обнаружено явление отклонения заряженных частиц изогнутыми монокристаллами. Минимальный радиус поворота траектории протонов с энергией 8,4 ГэВ, достигнутый в эксперименте с изогнутыми кристаллами, составил 19 см, что может быть получено при помощи магнитного поля напряженностью около 150 тесла.

³⁶ Андреев В.А. и др., препринт ДИЯФ, № 792, 1982.

3. Для проведения эксперимента по отклонению протонов с энергией 8,4 ГэВ изогнутыми монокристаллами была создана установка, состоящая из сцинтилляционных счетчиков и дрейфовых камер, работающая на линии с ЭВМ. Данная установка полностью отвечала требованиям эксперимента.

4. Проработана и испытана конструкция изгибающего устройства, проведены испытания работы детектирующей части кристалла при изгибе образца. Ухудшения разрешения полупроводникового детектора при изгибе соседней части кристалла до критического по излому предела замечено не было:

5. Создан ряд программ для обработки данных, полученных в эксперименте по отклонению протонов изогнутыми кристаллами кремния. Проведена статистическая обработка данных, полученных в этом эксперименте.

6. Измерена длина деканалирования протонов с энергией 8,4 ГэВ при прохождении кристаллографической плоскости (III).

7. Изучена возможность отклонения заряженных частиц, проходящих кристалл вдоль изогнутой оси $\langle 110 \rangle$. При отклонении на углы до 4,7 мрад было обнаружено интенсивное выбывание протонов из режима осевого каналирования.

8. Экспериментально обнаружен дополнительный механизм выбывания частиц из режима каналирования, имеющий место при попадании в изогнутую часть кристалла.

9. Получены экспериментальные данные, которые подтверждают возможность захвата частиц в режим каналирования внутри объема изогнутого кристалла.

Таблица I.

Доля частиц, деканалированных в изогнутом под углом 25,7 мрад кристалле кремния для плоскости (III).

Диапазон радиусов (см)	первая половина изогнутого кристалла		вторая половина изогнутого кристалла	
	без отбора (%)	с отбором (%)	без отбора (%)	с отбором (%)
19,5-24,3	29,6±3,2	16,8±1,2	16,5±2,9	13,1±1,1
24,3-32,4	24,8±2,6	15,2±1,0	12,2±2,7	11,1±1,0
32,4-48,6	24,0±2,2	14,7±0,9	11,5±2,7	10,2±1,1
48,6-97,2	-	-	8,8±2,5	10,6±1,2

Таблица 2.

Величины центробежного деканалирования

Область на кристалле (см)	Диапазон радиусов (см)	Доля частиц, выбывших за счет центробежного механизма (%)		
		без отбора	с отбором	теория
I,5-I,4	19,5±24,3	13,1±4,3	3,7±1,6	3,0
I,4-I,3	24,3±32,4	8,3±3,9	2,1±1,5	3,0
I,3-I,2	32,4±48,6	7,5±3,6	1,6±1,4	3,0

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Водопьянов А.С., Головатик В.М. и др., ОИЯИ, ДИ-12716, Дубна, 1979; Письма в ЖЭТФ, 1979, т.30,474; Phys.Lett., 1979, 88v, 387.
2. Водопьянов А.С., Говорун Н.Н., Головатик В.М. и др., ОИЯИ, Р-13-80-225, Дубна, 1980.
3. Булгаков Н.К.,..., Головатик В.М. и др., ОИЯИ, I-83-725, Дубна, 1983.
4. Булгаков Н.К.,..., Головатик В.М. и др., ОИЯИ, I-83-726, Дубна, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 апреля 1984 года