



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

98-76
На правах рукописи

Чесноков Юрий Андреевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
КАНАЛИРОВАНИЯ ПРОТОНОВ
В ИЗОГНУТЫХ МОНОКРИСТАЛЛАХ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПУЧКАМИ
НА УСКОРИТЕЛЕ ИФВЭ**

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Д и с с е р т а ц и я
в форме научного доклада
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Протвино 1998

УДК 539.1.07

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г.Протвино).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, член-корр. РАН С.П.Денисов, доктор физико-математических наук В.М.Самсонов, доктор физико-математических наук А.М.Таратин.

Ведущая организация – НИИ ядерной физики МГУ (г. Москва).

Защита диссертации состоится “_____” _____ 1999 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142284, Протвино Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Диссертация разослана “_____” _____ 1998 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 034.02.01

Ю.Г.Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 1998

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Начиная с 60-х годов, широкое развитие получили исследования, относящиеся к новому направлению в физике взаимодействия заряженных частиц с веществом — каналированию частиц в монокристаллах. На основе исследований различных проявлений эффекта каналирования для низкоэнергетических частиц в настоящее время уже разработаны и применяются много методов изучения структуры и степени совершенства кристаллов, а также различных физических процессов, протекающих в них. Однако в последние годы интерес сместился к изучению каналирования частиц высоких и сверхвысоких энергий.

Стимулирующее воздействие на экспериментальные исследования в этой области оказала идея использования сверхсильных внутрикристаллических полей (10^9 В/см и выше) для отклонения пучков заряженных частиц высоких энергий изогнутыми кристаллами, выдвинутая в 1976 году профессором Э.Н. Цыгановым из Дубны. Если в первых экспериментах с изогнутыми кристаллами эффективность отклонения пучков частиц (отношение интенсивностей отклоненного пучка к падающему на кристалл) была очень низкой (десятые доли процента), то в последующих экспериментах она была доведена до десятков процентов. Это позволило сформулировать предложения и начать исследования по применению изогнутых кристаллов для вывода и коллимации пучка на ускорителях, формирования пучков в каналах транспортировки частиц и экспериментах с короткоживущими частицами. Во всех этих направлениях получены интересные результаты, вселяющие большой оптимизм. Углубление экспериментальных исследований в этой области приводит к существенному расширению средств ускорительной техники и физики высоких энергий в целом.

Цель диссертационной работы состояла в исследовании закономерностей каналирования в мультигэвной области энергий, выяснении принципиальных возможностей кристаллов для отклонения и фокусировки пучков, а также в создании реально действующих систем кристаллооптики на ускорителе ИФВЭ для повышения эффективности его использования.

Научная новизна и результаты, выносимые на защиту:

1. Результаты исследований объемного захвата частиц и установленная зависимость его эффективности от радиуса изгиба кристалла, а также процессов деканалирования и реканалирования частиц в прямом кристалле и наблюдение состояния динамического равновесия. Экспериментальное подтверждение особого вида захвата частиц в режим каналирования, обусловленного градиентом кривизны кристалла.

2. Оригинальный способ измерения длины деканалирования и полученные результаты для протонов с энергией 70 ГэВ в изогнутых кристаллах кремния ориентации (111) и (110).

3. Исследование тепловой и радиационной стойкости кристаллов. Сделанные выводы о возможности использования изогнутых кристаллов в интенсивных пучках протонных ускорителей. Разработка нескольких видов устройств изгиба и крепления кристаллов. Достижение рекордных параметров формируемых кристаллами пучков.

4. Исследование влияния дефектов реальных кристаллов на процесс отклонения пучков частиц высоких энергий: деканалирование на дислокациях кристаллической решетки; зависимость от электропроводности материала; обнаружение тонких эффектов влияния поверхностных дефектов, учет которых принципиально важен для оптимизации вывода частиц из ускорителей.

5. Результаты экспериментов, показывающих возможность фокусировки пучка изогнутым кристаллом. Эффективное отклонение с помощью фокусирующего кристалла пучка протонов с большой угловой расходимостью (в 50 раз превышающей критический угол каналирования).

6. Создание, исследование и проверка в течение десятилетней эксплуатации кристаллических станций деления выведенного пучка на части для повышения эффективности его использования (выигрыш около 30%).

7. С помощью изогнутого на гигантский угол 150 мрад кристалла создан канал транспортировки частиц нового типа, не потребляющий электроэнергии (экономятся сотни мегаватт-часов за один сеанс работы ускорителя). На базе нового канала организована оснащенная аппаратно-программными средствами экспериментальная установка для исследования кристаллических элементов.

8. Способ измерения с помощью изогнутого кристалла в сочетании с магнитным спектрометром основных характеристик пучков частиц (профили, гало, эмиттанс, разброс по импульсам).

9. Результаты исследования высокоэффективного вывода частиц кристаллом из У-70, намного опередившие известные мировые данные, полученные этим способом.

Практическая ценность. Приведенные в диссертации результаты исследований используются на ускорителе ИФВЭ и открывают большие возможности применения изогнутых кристаллов как на действующих, так и на строящихся ускорителях на большие энергии и кроме ИФВЭ могут быть использованы в других научных центрах по физике высоких энергий (ИЯФ СОАН, ОИЯИ, ИЯИ, ИТЭФ, CERN, FNAL, BNL, DESY, KEK и др.).

Апробация результатов и публикации. Диссертация написана на основе работ [1–29], опубликованных в виде препринтов и статей в отечественных и зарубежных журналах, включая монографию [1] и обзор в УФН [2]. Результаты исследований докладывались на отечественных и международных конференциях по когерентным эффектам в кристаллах и ускорителям заряженных частиц [9, 14, 16, 18, 22, 24, 25, 26, 28]. О нескольких полученных результатах, представляющих интерес для широкой научной общественности, сообщалось в журналах “CERN Courier” (№10 – 1989 г., №9 – 1991 г., №9 – 1997 г., №2, №5 – 1998 г.) и “Наука в России” (№4 – 1997 г.). За выполненный цикл работ автор диссертации (с коллективом соавторов) удостоен звания лауреата Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники за 1996 год.

Объем и структура диссертации. Диссертация в форме научного доклада изложена на 51 странице, состоит из четырех глав и заключения, содержит 30 рисунков, 3 таблицы и список цитируемой литературы из 29 наименований.

Содержание работы

1. Исследование особенностей каналирования в мультигэвной области энергий

1.1. Сравнение эффективностей торцевого и объемного захватов частиц в режим каналирования кристаллами кремния

Как известно, в изогнутом кристалле существуют два механизма захвата частиц в режим каналирования. В “стандартном” торцевом захвате участвуют частицы пучка с угловой расходимостью меньше критического угла каналирования относительно кристаллографических плоскостей на торце кристалла. Объемный захват возникает в глубине изогнутого монокристалла, в области, где траектории частиц совпадают с касательными к изогнутому кристаллографическим плоскостям.

В проведенном эксперименте [17] наблюдались оба вида захвата. Применение кристалла с переменной кривизной позволило детально исследовать закономерности объемного захвата, что проделано впервые. Эксперимент был проведен на магнитооптическом канале № 21 ускорителя ИФВЭ. Схема расположения оборудования представлена на рис. 1. Пучок протонов магнитом $M1$ наводился на ориентированный изогнутый на угол 21 мрад монокристалл кремния Si, расположенный в гониометрическом устройстве. Пучок отклоненных кристаллом частиц с помощью корректирующего магнита $M2$ пропускаться сквозь 6-метровый стальной коллиimator $C1$ вдоль геодезической оси канала № 21 и двумя последующими магнитами $M3$ и $M4$ очищался от фона. Интенсивность отклоненных частиц измерялась двумя сцинтилляционными счетчиками $S1$ и $S2$ размером 100×100 мм², включенными на совпадения. Мониторирование падающего пучка осуществлялось пропорциональной

камерой $D1$, камеры $D2, D3$ (апертурой $100 \times 100 \text{ мм}^2$), работающие в аналоговом режиме, контролировали положение и размеры отклоненного кристаллом пучка.

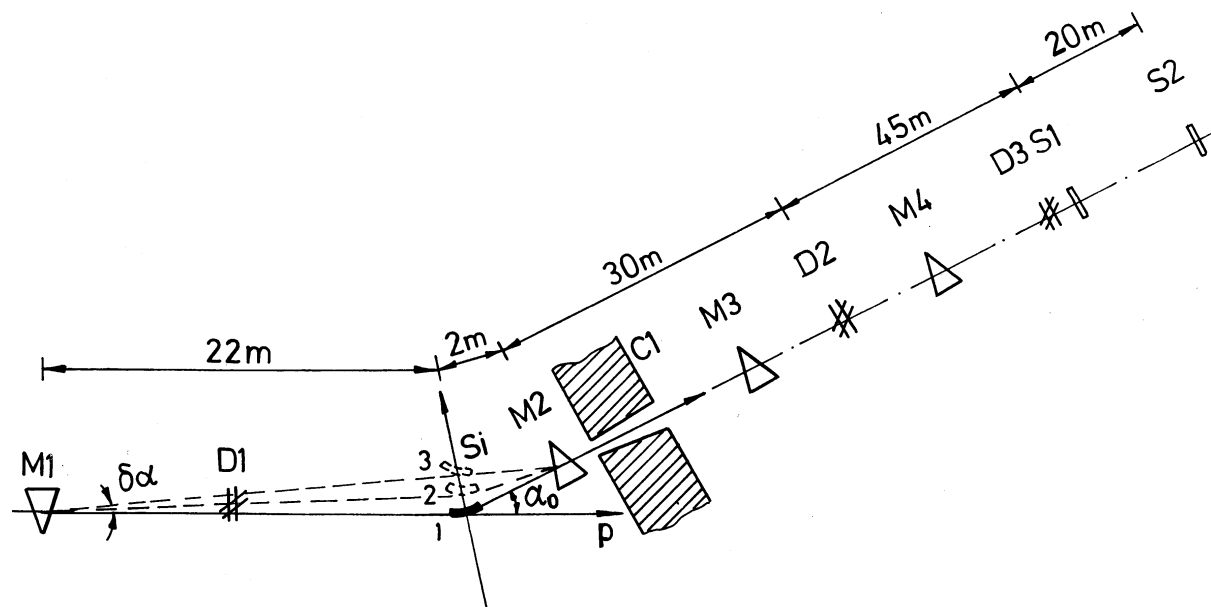


Рис. 1. Схема расположения оборудования эксперимента.

Суть опыта заключалась в том, чтобы выявить зависимость числа отклоненных каналированных частиц от угла поворота кристалла относительно направления падающего пучка. При повороте кристалла в сторону его изгиба на угол φ , превышающий расхожимость падающего пучка, возникают условия выхода пучка в глубине кристалла на касательные к изогнутым плоскостям, т.е. реализуются условия объемного захвата (рис. 2).

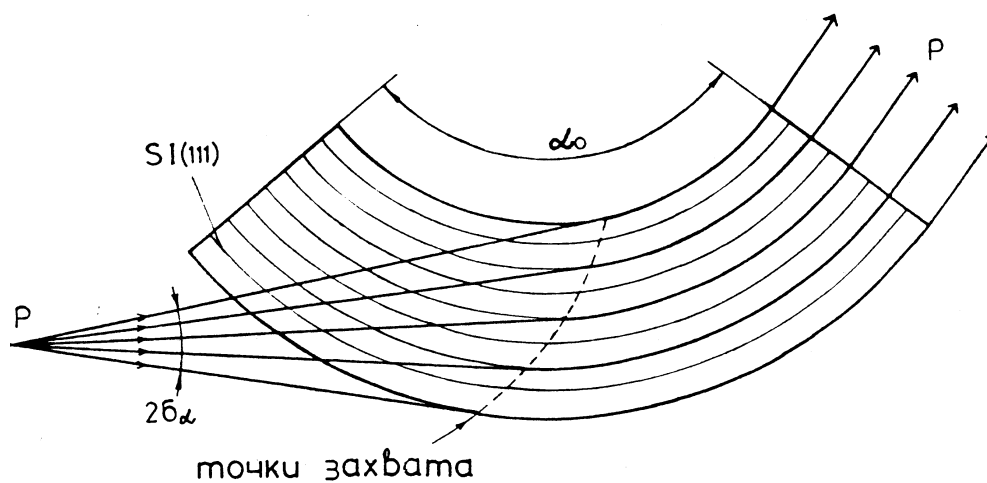


Рис. 2. Условия объемного захвата.

Счетчики $S1$, $S2$ находились на значительном удалении $\simeq 100$ м от кристалла, в связи с чем угловой аксептанс системы регистрации частиц составил $\pm 0,5$ мрад в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Этот угловой интервал позволял регистрировать без потерь все каналированные частицы, выходящие из заднего торца кристалла. В то же время частицы, деканалировавшие в изогнутой части кристалла, практически не попадали на счетчики. Фон вторичных частиц из-за наличия трех магнитов, настроенных на импульс первичного протонного пучка $p = 70$ ГэВ/с, отсутствовал полностью. Фон упругорассеянных на кристалле и материале держателя протонов был зафиксирован только при больших углах поворота кристалла $\varphi \geq 15$ мрад и вычитался как ориентационно-независимый сигнал на счетчиках. При углах поворота $\varphi < 15$ мрад наблюдался 100%-ый ориентационный эффект, т.е. выделение каналированных частиц было идеальным.

В опыте использовалась пластина, вырезанная из бездислокационного кремния, ориентации (111) с размерами: $H \times V \times L = 0,5 \times 15 \times 100$ мм³ (толщина, высота, длина по пучку). Точность изготовления менее одной угловой минуты. Кристалл был изогнут с переменной кривизной, как показано на рис. 3. Один из его концов был закреплен между плоскими зеркалами, другой нагружен с помощью небольшого усилия. При таком способе изгиба форма кристалла описывается кубической кривой, а радиус кривизны и угол касательной к плоскостям меняются по закону:

$$R(l) = L_0^2 / (2\alpha_0 l), \quad \alpha(l) = \alpha_0 (l/L_0)^2, \quad (1)$$

где l — расстояние, отсчитываемое от места приложения усилия; $L_0 = 92$ мм — длина изогнутой части кристалла; α_0 — полный угол изгиба кристалла.

Измерение зависимости числа отклоненных частиц от угла поворота было проведено дважды. Сначала пучок падал на кристалл со стороны нагруженного конца, так что по мере вращения кристалла в области объемного захвата кривизна нарастала. Затем кристалл был перевернут так, что частицы налетали со стороны закрепленного конца (в этом случае в месте объемного захвата кривизна спадала). Графики зависимости числа отклоненных частиц от угла поворота в первом и втором случаях приводятся на рис. 4а. Острые пики слева соответствуют торцевому захвату частиц в режим каналирования, пологая часть — объемному захвату.

Наблюдаемое в опыте количество отклоненных частиц определяется вероятностью захвата и последующим процессом деканалирования. Число частиц, отклоняемых оптимально-ориентированным ($\varphi = 0$) кристаллом при торцевом захвате, определяется выражением [1]

$$N(0) = I_{si} \times \frac{\theta_c}{\Phi} \times A_s \times A_b \times \exp\left(\frac{-L}{L_D^b}\right), \quad (2)$$

где I_{si} обозначает количество частиц пучка, попадающих в сечение кристалла; θ_c/Φ — отношение критического угла каналирования к расходимости пучка; $A_s \simeq 0,7$ — аксептанс прямого кристалла; $A_b \approx (1 - R_c/R)^2$ — уменьшение аксептанса в изогнутой с радиусом R части кристалла; R_c — критический радиус каналирования; L_D^b — длина деканалирования в изогнутом кристалле.

Количество частиц, отклоненных в результате объемного захвата при повороте кристалла на угол φ , равно

$$N(\varphi) = I_{si} \times W(R(\varphi)) \times A_b(\varphi) \times \exp\left(\frac{-l(\varphi)}{L_D^b}\right), \quad (3)$$

где $l(\varphi)$ — длина пути каналированных частиц в кристалле от точки захвата до выхода из него, определяемая соотношениями (1); $R(\varphi)$ — радиус кривизны кристалла в точке захвата частиц в режим каналирования; $W(R(\varphi))$ — зависящая от радиуса кривизны вероятность объемного захвата.

При анализе экспериментальных кривых 1, 2 на рис. 4а, проведенном с помощью соотношений (2) и (3), рассчитано значение вероятности объемного захвата частиц $W(R)$ при различных радиусах изгиба кристалла R , показанное на рис. 4б. Зависимость $W(R)$ близка к линейной. Линейное нарастание расхождения в значении $W(R) \sim 20\%$ для двух случаев измерения, соответствующих спадающей и нарастающей кривизне кристалла, является экспериментальным подтверждением существования эффекта “градиентного” захвата, обоснованного в известных теоретических работах. Этот эффект является обратным центробежному деканалированию, подобно тому как объемный захват за счет рассеяния есть процесс, обратный к обычному деканалированию.

В гармоническом приближении для нашего случая величина “градиентной добавки” [1] есть

$$w_g(l) = \frac{R'\lambda}{R} = (\alpha_0\lambda/L_0^2) \times R, \quad (4)$$

где $\lambda \simeq 15$ мкм — длина осцилляции траектории каналированной частицы при 70 ГэВ в кремнии. Скорректированные значения $W(R)$ с учетом этого эффекта показаны на рис. 4б штриховыми линиями.

Измеренная величина вероятности объемного захвата оказалась невысокой. Так, например, для радиуса изгиба кристалла 10 м она равна $(0,9 \pm 0,15)\%$ с учетом статистических и систематических погрешностей измерения. Сопоставляя наши данные с результатом ПИЯФ для энергии протонов 1 ГэВ, мы сконструировали эмпирическую формулу: $W(pv, R) = 45R/(pv)^{\frac{3}{2}}$ где $W(\%)$, pv (ГэВ), R (м). Существует простое объяснение зависимости $W \sim R/(pv)^{3/2}$. Объемный захват можно рассматривать как частный случай реканалирования в изогнутом кристалле, когда внутри канала ничего нет, а вне его функция распределения определяется плотностью падающего пучка. Каждая квазиканалированная частица ориентирована вблизи канала на протяжении длины порядка $R \times \theta_c$ ($\theta_c \sim 1/P^{\frac{1}{2}}$ — критический угол каналирования). По правилу обратимости Линдхарда вероятность частице оказаться внутри канала равна вероятности деканалирования на этой длине:

$$W \sim \frac{R \cdot \theta_c}{L_D} \sim \frac{R}{(pv)^{3/2}}, \quad (5)$$

где $L_D \sim pv$ — длина деканалирования. В.М. Бирюковым в [1] в результате строгого рассмотрения получена аналитическая формула для вероятности объемного

захвата, с точностью до 10% согласующаяся с данными эксперимента, что находится в пределах погрешности измерений. Так же хорошо совпадают с теорией [1] измеренные и показанные на рис. 4а отношения эффективностей торцевого и объемного захватов частиц в режим каналирования, составляющие в нашем случае (для радиуса изгиба 10 м и расходимости пучка $\Phi = 0,1$ мрад) величину $\frac{N(\varphi)}{N(0)} \simeq 5\%$.

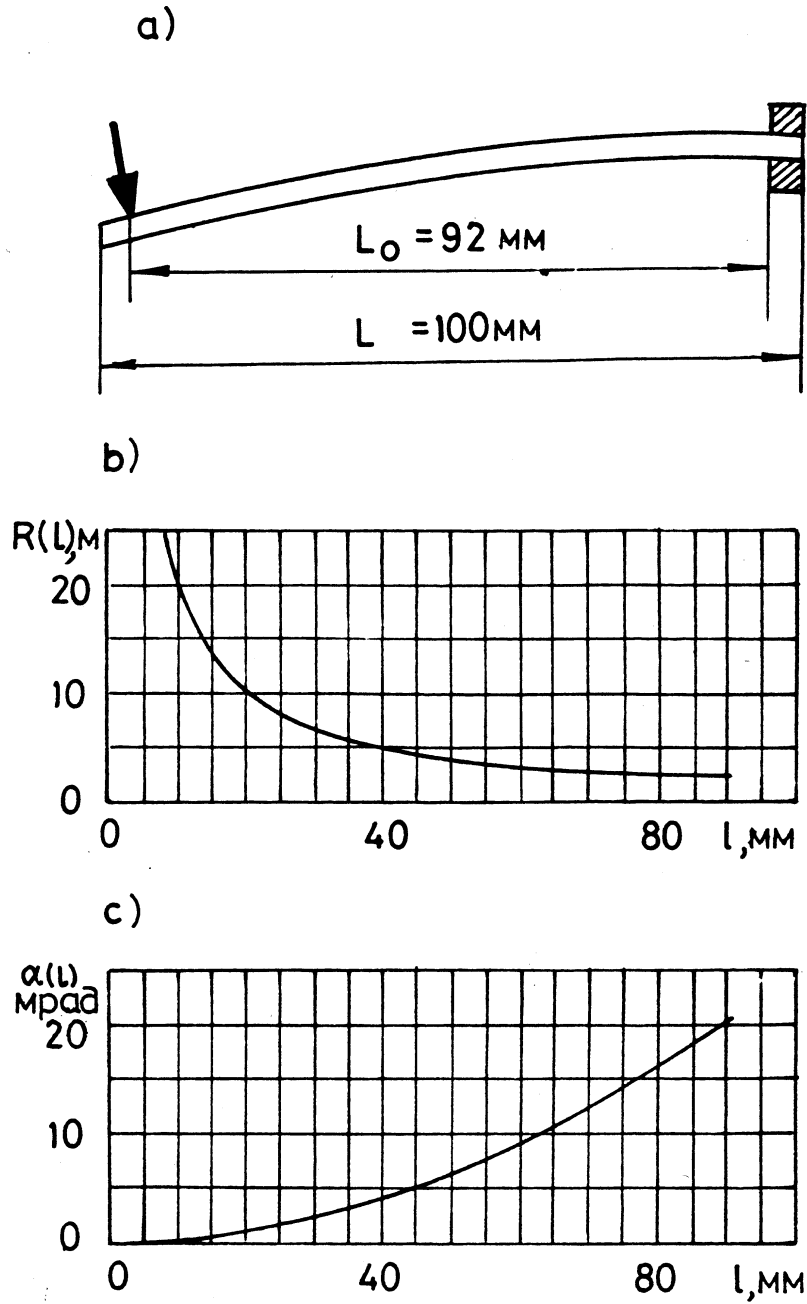


Рис. 3. Способ изгиба кристалла — (а). Радиус и угол изгиба в зависимости от продольной координаты кристалла — соответственно (б) и (в).

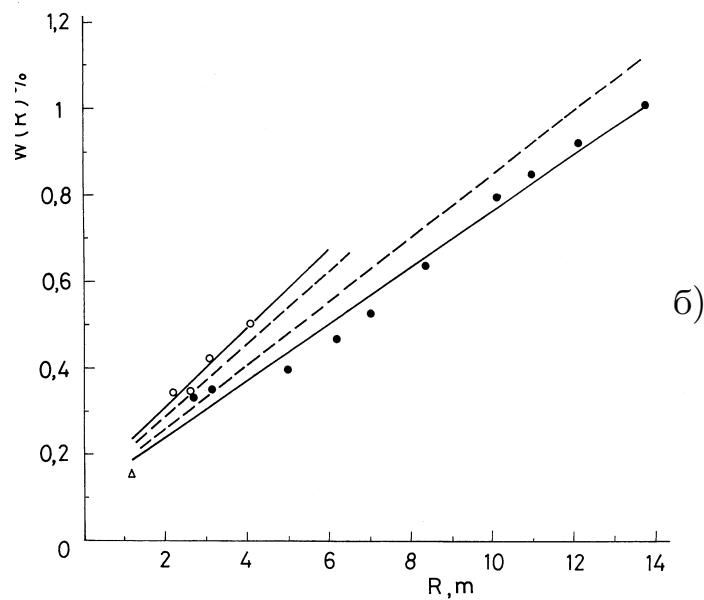
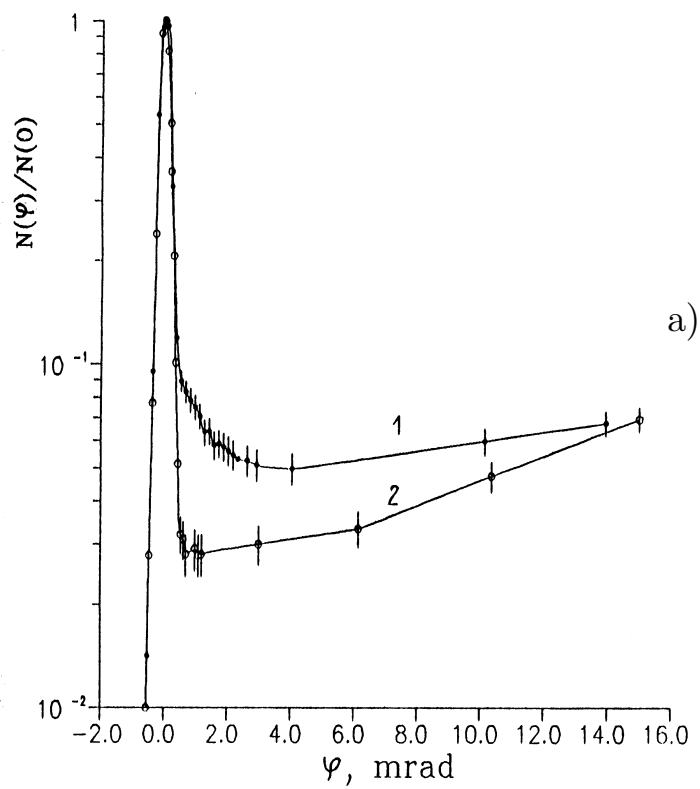


Рис. 4. Ориентационные зависимости количества отклоненных частиц для двух разных положений кристалла (кривые 1 и 2) — (а). Вероятность объемного захвата протонов с энергией 70 ГэВ в зависимости от радиуса кривизны кристалла Si(111), для нарастающей (●) и спадающей (○) кривизны. Пунктиром показаны значения, скорректированные с учетом градиентной добавки — (б).

1.2. Исследование динамики каналирования в прямом кристалле. Наблюдение состояния динамического равновесия

В опыте [20] наблюдались некоторые закономерности каналирования частиц в прямом кристалле в зависимости от расходимости падающего пучка протонов. Мультигэвные энергии предоставляют уникальную возможность провести **прямое** наблюдение состояния динамического равновесия, когда число каналированных частиц на входе и на выходе кристалла одинаково.

Этот опыт также проводился в канале № 21 ускорителя ИФВЭ. Схема опыта аналогична предыдущей, но магнит $M2$ был выключен. Кристалл был вырезан вдоль кристаллографической плоскости (111). Он изгибался специальным образом по форме, напоминающей хоккейную клюшку. При общей длине 100 мм он имел прямую часть длиной $L_1 = 65$ мм, другая часть длиной $L_2 = 35$ мм изгибалась равномерно на угол 20 мрад. На кристалл с помощью начальной части магнитооптической системы канала № 21 наводился пучок протонов с энергией 70 ГэВ. Неотклоненный пучок гасился в поглотителе $C1$. Отклоненные кристаллом частицы, попадающие в аксептанс конечной части магнитооптической системы, освобождались ею от фона вторичных частиц и регистрировались детекторами (состав регистрирующей аппаратуры и все подробности измерения уже обсуждались ранее). Измерение числа отклоненных частиц проводилось дважды. Сначала пучок падал на кристалл со стороны прямой части, как это показано на рис. 5а сверху. Затем кристалл переворачивался в вертикальной плоскости так, что частицы налетали со стороны изогнутой его части (см. рис. 5а внизу).

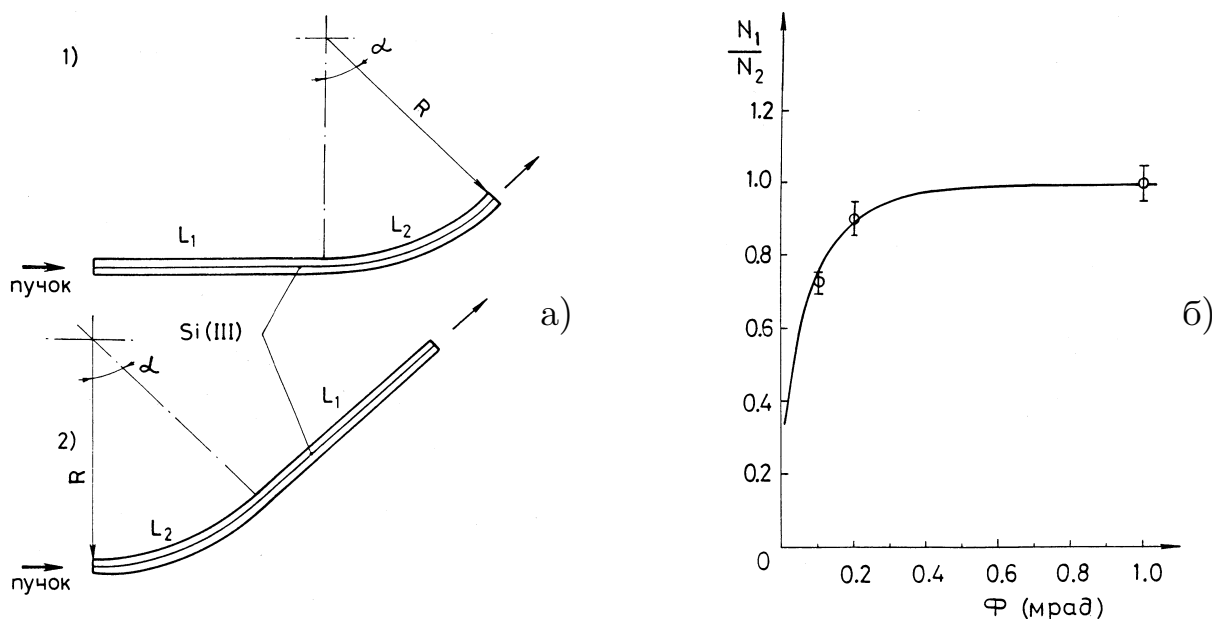


Рис. 5. Положения кристалла при двух измерениях интенсивности отклоненного пучка — (а). Зависимость N_1/N_2 от угловой расходимости падающего на кристалл пучка (сплошная кривая — расчетная, точки — результаты измерений) — (б).

Во втором случае наличие прямой части в кристалле было несущественным, так как частицы были уже повернуты кристаллом и обязательно регистрировались детекторами (как каналированные, так и деканалировавшие на этом участке). В первом же случае частицы, деканализовав в прямом участке, не отклонялись и поэтому не регистрировались вовсе. Таким образом, измеряя отношение количества отклоненных частиц в первом и во втором случаях N_1/N_2 , мы получали информацию о деканализовании протонов на прямом участке длиной L_1 с учетом обратного процесса подзахвата из неканализованной фракции.

Угловая расходимость падающего пучка протонов могла варьироваться магнитооптической системой. Для пучка с малой угловой расходимостью $\Phi = 0,1$ мрад (стандартное отклонение) было получено отношение $N_1/N_2 = 0,72 \pm 0,03$. При расходимости $\Phi = 0,2$ мрад отношение составило $N_1/N_2 = 0,91 \pm 0,05$. Для пучка с широкой угловой расходимостью $\Phi = 1$ мрад оказалось, что $N_1/N_2 = 1 \pm 0,05$, т.е. роль процессов реканализования усиливается с ростом угловой расходимости падающего пучка, приводя в последнем случае к состоянию динамического равновесия $N_1 = N_2$.

Такое поведение соотношения N_1/N_2 представляется вполне логичным. На протяжении прямого участка из-за многократного рассеяния расходимость неканализованной фракции пучка увеличивается:

$$\Phi_z = \sqrt{\Phi^2 + \Phi_{mult}^2} = \sqrt{\Phi^2 + \left(\frac{14 \text{ MeV}/c}{p}\right)^2 \frac{z}{L_R}}, \quad (6)$$

где Φ — начальная расходимость пучка; p — импульс частиц; L_R — радиационная длина. Многократное рассеяние на длине L_1 в нашем случае составляет величину $\Phi_{mult} \simeq 0,2$ мрад. Если начальная расходимость пучка много больше этой величины, фазовая плотность неканализованной фракции пучка не меняется сколько-либо заметно на длине L_1 . Значит, скорость “подпитки” сохраняется на всей длине, обеспечивая $N_1 \simeq N_2$. Если же $\Phi \leq \Phi_{mult}$, фазовая плотность частиц вблизи канала и, соответственно, скорость реканализования быстро падают, частицы из канала убывают за счет деканализования, поэтому $N_1 < N_2$ заметно.

Измеренные в эксперименте отношения (N_1/N_2) приведены на рис. 5б в сравнении с расчетной кривой [20], учитывающей процессы обмена между каналированной и неканализованной фракциями пучка. Проведенный опыт демонстрирует, как важен в прямом кристалле объемный захват, когда в экспериментальных условиях доля каналированных частиц с глубиной кристалла отнюдь не убывает экспоненциально.

1.3. Измерение длины деканализования 70-ГэВ протонов в кристаллах кремния ориентации (110) и (111), изогнутых с постоянным радиусом кривизны

Для практических целей особый интерес представляет измерение длины деканализования в изогнутых кристаллах. В опыте [21] длина деканализования протонов

с энергией 70 ГэВ была прецизионно измерена в кристаллах кремния нетрадиционным методом, основанным на использовании явления объемного захвата. Это единственный опыт, в котором прецизионное измерение осуществлялось для двух плоскостных каналов (111) и (110).

Использовалась та же схема эксперимента, что и на рис. 1, но кристаллы изгибались с постоянным радиусом кривизны. Кристаллы разной ориентации, вырезанные из одного материала, были изогнуты по цилиндру радиусом $R = 3$ м на длине $L = 60$ мм. Отклонение от среднего радиуса было $\sim 1\%$. На кристаллы поочередно наводился пучок 70 ГэВ протонов с малой угловой расходимостью $\Phi = 0,1$ мрад. Экспериментально измерялась зависимость количества отклоненных частиц от угла поворота кристалла. Наблюдались только частицы, вылетающие из заднего торца кристалла; деканализовавшие в изогнутой части кристалла частицы не регистрировались. Так же, как и в предыдущих опытах, они гибли на поглотителе $C1$ (см. рис. 1).

В начале измерений кристалл с помощью гониометра настраивался на торцевой захват по максимуму отклоненных частиц и поворачивал пучок на полный угол $\alpha_0 = L_0/R = 20$ мрад. Затем происходило вращение кристалла в сторону его изгиба на угол φ , превышающий расходимость падающего пучка — возникали условия объемного захвата.

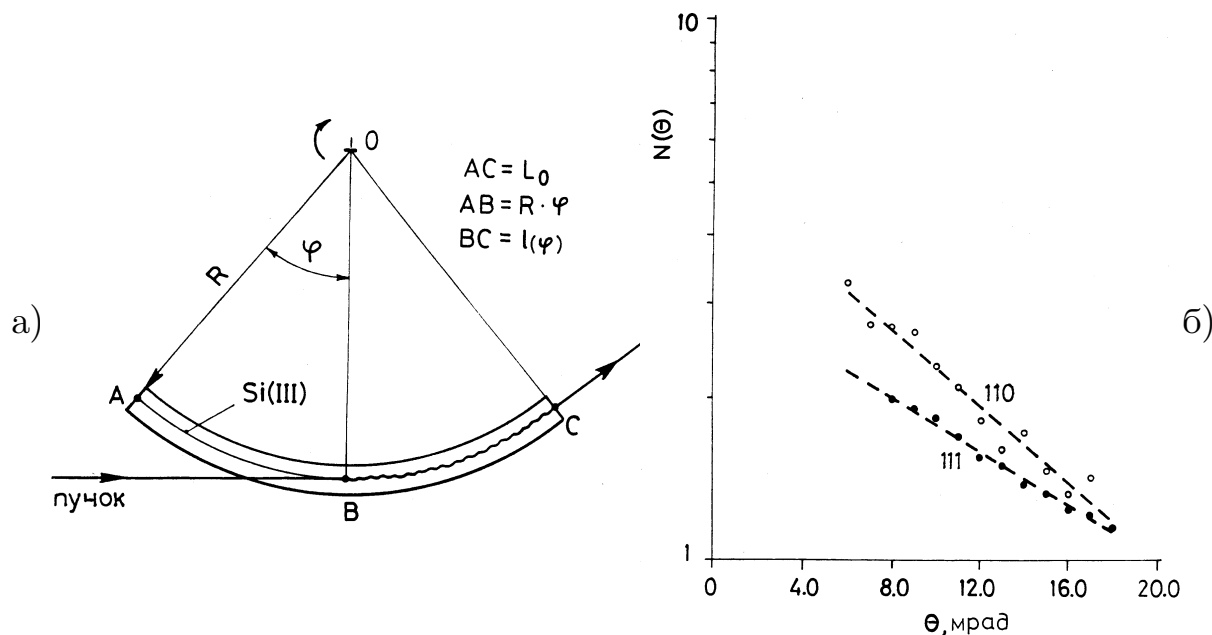


Рис. 6. Схема наведения протонного пучка на кристалл — (а). Экспериментальные зависимости количества отклоненных частиц $N(\theta)$ для кристаллов Si(111) и Si(110) в логарифмическом масштабе — (б).

Так как кривизна кристалла постоянна, то при его вращении в режим каналирования при объемном механизме захватывается одно и то же количество частиц $I \times W(R) = const$, где I обозначает интенсивность падающего на кристалл пучка,

а $W(R)$ — вероятность объемного захвата. Однако путь каналированных частиц l от точки захвата и до заднего торца кристалла уменьшается линейно с ростом угла вращения кристалла (рис. 6а): $l(\varphi) = L_0 - R \cdot \varphi = R \cdot \theta$, где θ — угол поворота частиц в кристалле. Регистрируя количество отклоненных кристаллом частиц можно установить, таким образом, закон деканализирования частиц. Экспериментальные зависимости $N(\theta)$ для кристаллов ориентации (111) и (110) показаны на рис. 6б, из которого видно, что они подчиняются экспоненциальному закону. Причем, измеренные длины деканализирования равны $L^{111} = (52 \pm 2)$ мм, $L^{110} = (37 \pm 5)$ мм соответственно. Известно, что изгиб кристалла укорачивает длину деканализирования. Если привести эти данные к прямому кристаллу, то полученные величины равны $L_D^{111} = (61 \pm 2)$ мм, $L_D^{110} = (42 \pm 5)$ мм.

Эти результаты интересно сравнить с предсказанием теории. Диффузионная теория предсказывает, что в глубине кристалла доля каналированных частиц убывает экспоненциально $\sim \exp(-z/L_D)$, с длиной деканализирования

$$L_D = \frac{4E_c}{j_{0,1}^2 D_0}, \quad (7)$$

которая не зависит от начального распределения частиц. Здесь E_c — критическая энергия поперечного движения; $j_{0,1}$ — 1-й корень функции Бесселя; величина D_0 — коэффициент трения, определяемый средним квадратом угла рассеяния на электронах и ядрах. Из соотношения (7) В.М.Бирюковым в [21] получено аналитическое выражение для L_D (при расчёте коэффициента трения D_0 использовался потенциал Линдхарда для атомной плоскости):

$$L_D = \frac{256}{9\pi^2} \cdot \frac{pv}{\ln(2m_e c^2 \gamma / I) - 1} \cdot \frac{a_{TF} d_p}{Z_i r_e m_e c^2}. \quad (8)$$

Здесь r_e — классический радиус электрона; m_e — масса покоя электрона; I — потенциал ионизации (172 эВ в кремнии). $a_{TF} = 0,8853 a_B Z^{-1/3}$; $a_B = 0,529 \text{ \AA}$ — параметр экранирования Томаса-Ферми; $Z_i = (Q/e)$ — заряд каналированной частицы в единицах e ; γ — релятивистский фактор.

Согласно модели (8), длина деканализирования пропорциональна межплоскостному расстоянию d_p . Кристалл кремния ориентации (110) представляет собой регулярную структуру с одинаковым расстоянием d_p между плоскостями. В кристалле с ориентацией (111) периодически большое расстояние d_{pL} между атомными плоскостями сменяется малым d_{pS} , при этом $d_{pS} = (1/3)d_{pL}$. В протяжённых кристаллах Si (111) можно не учитывать частицы, движущиеся в малом межплоскостном интервале d_{pS} . Для случая $E = 70$ ГэВ выражение (8) приводит к величинам: $L_D^{111} = 53,5$ мм, $L_D^{110} = 43,7$ мм, обеспечивая удовлетворительное согласие с экспериментом. Отношение L_D^{111}/L_D^{110} , согласно (8), должно равняться $d_{pL}/d_p = 1,23$ для кремния. Экспериментальное отношение составляет $1,4 \pm 0,2$.

На рис. 7 результаты измерения длин деканализирования при 70 ГэВ сравниваются с теоретическими величинами (8) и известными экспериментальными данными для других энергий.

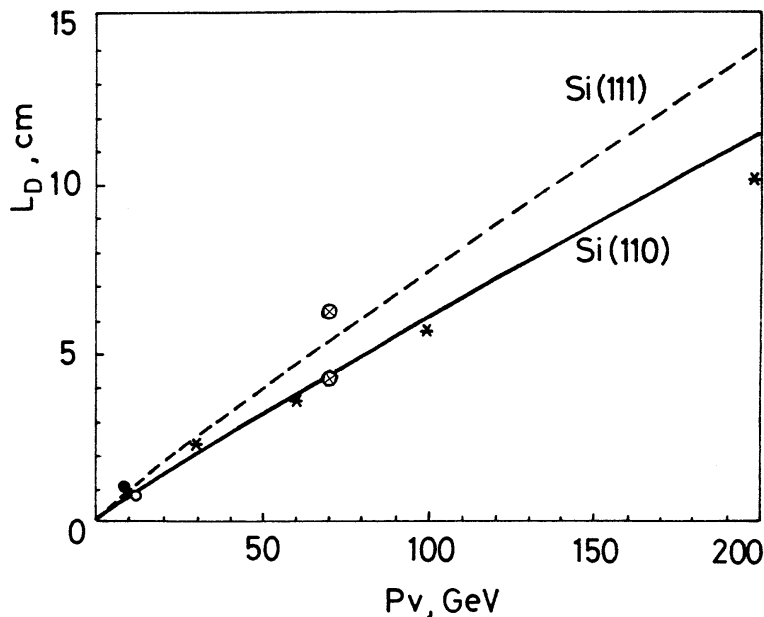


Рис. 7. Расчетные зависимости L_D от энергии частиц в каналах Si(111) и Si(110) совместно с экспериментальными данными: ● — ОИЯИ; ○ — CERN; ★ — FNAL; ⊗ — ИФВЭ.

2. Исследования принципиальных возможностей применения изогнутых кристаллов для формирования пучков

Для практического использования монокристаллов на ускорителях необходимо получить ответы на следующие вопросы. Пучки какой предельной интенсивности и на какие углы можно отклонить кристаллом. Каков запас прочности механической, радиационной; не будет ли разгибаться кристалл от температуры и радиации. Какой длины могут быть совершенные кристаллы; как влияет качество изгиба кристалла и обработки его поверхности на характеристики отклоняемых пучков?...

Для прояснения этих вопросов был проведен большой объем исследований. В процессе работы были изогнуты и испытаны в пучках десятки (если не сотни) кристаллов.

2.1. Приготовление монокристаллических пластин и изгибающих устройств

Для эффективного отклонения пучков частиц высоких энергий необходимо обеспечить высокое качество ориентации и обработки граней монокристаллических пластин. В проведенных опытах с пучками 70-ГэВ протонов кристаллы, имеющие длину около 100 мм и толщину $\simeq 1$ мм должны были иметь эффективно отклоняющий слой, близкий по размерам к полному сечению кристалла. Это достигается, если выдерживается точность ориентации пластин ~ 1 угловой минуты,

непараллельность и неплоскостность боковых граней около 10 мкм по всей длине кристалла. Глубина нарушенного кристаллического слоя при полировке боковых граней должна быть на том же уровне. Эти требования, в принципе, обеспечиваются существующим уровнем технологии.

В планируемых применениях кристаллов на ускорителях тэвных энергий, в особенности для вывода пучков из сверхпроводящих коллайдеров, требования к качеству ориентации и обработки граней ужесточаются. Так, ожидается, что параметр наведения пучка на кристалл при выводе его из ускорителя ЛНС будет составлять доли микрона [1], что, по-видимому, потребует создания новых средств контроля и обработки кристаллической поверхности для захвата с первого оборота. С ростом энергии отклоняемых частиц до тэвного диапазона ужесточаются также требования к качеству материала монокристаллических пластин. Мозаичность кристаллов не должна превышать величину ~ 1 мкрад, определяемую критическим углом каналирования.

Согласно известному эмпирическому правилу, кремниевую пластину толщиной H можно изогнуть упруго по цилиндру радиуса R при условии $R > 1000 \times H$. В то же время для эффективного поворота пучков существует оптимальный радиус изгиба R_{opt} , для значительных углов поворота равный нескольким критическим радиусам R_c ([2]): $R_{opt} \sim (3 \div 5) \times R_c$. Для кремния $R_c[M] = 0,0018 \times E$ [ГэВ]. Поэтому этот прочностной критерий приводит к ограничению толщины используемых пластин H [мм] $\leq 0,007 \times E$ [ГэВ]. Так, в случае энергии отклоняемых частиц $E = 70$ ГэВ оптимальный поворот осуществляет пластина толщиной $H \leq 0,5$ мм. Но для строящихся ускорителей на тэвные энергии, толщина пластин может составлять десятки миллиметров, что, как правило, много больше характерных размеров пучка.

Изгиб кристалла по заданной поверхности в общем случае является непростой задачей. Исторически, изогнутые кристаллы широко применялись для фокусировки рентгеновских и гамма-лучей в кристалл-дифракционных приборах для нужд ядерной спектроскопии. В решении проблемы применялись два общих подхода: 1) изгиб с помощью цилиндрических зеркал; 2) метод моментов.

Особенности требований к изогнутым кристаллам, применяемым для отклонения пучков частиц высоких энергий по сравнению с их использованием для фокусировки гамма-лучей связаны с различными направлениями траекторий движения частиц: гамма-лучи пересекают пластины поперек больших граней, заряженные частицы движутся вдоль вырезанных пластин. Поэтому требования постоянства радиуса изгиба по продольной координате, как правило, не очень жесткие (точность $\Delta R/R \sim 1\%$ вполне достаточна). Однако возникают специфические требования на краях изогнутых пластин. Необходимо выдержать полный угол изгиба Θ в пределах углового аксептанса существующих магнитооптических каналов транспортировки частиц, куда необходимо отклонять пучки. Обычно эта величина $\Delta\Theta \simeq 0,1$ мрад. Такая точность может контролироваться по отраженному лазерному лучу при прямолинейном движении кристалла на микрометрическом столике.

Как показал опыт, большой проблемой является устранение неравномерности изгиба по поперечной координате. В неотчетливых случаях, при использовании кристаллов для деления выведенного пучка, можно было ограничиться все той же точностью $\Delta\theta_{\perp} \simeq 0,1$ мрад, что, как правило, значительно меньше расходимости падающего пучка ($\simeq 1$ мрад). Для вывода пучка из ускорителя или для исследования эффективности захвата частиц в режим каналирования такая точность является неприемлемой и определяется величиной критического угла каналирования. В этом случае края кристалла приходится оставлять плоскими, либо применять для проверки качества изгиба лазерную интерферометрию, и корректировать поверхности изгибающих зеркал.

В проведенных опытах с отклонением пучков частиц присутствуют те или иные разновидности указанных методов изгиба кристалла (предложено и испытано около десятка конструкций, часть из них описана в соответствующих параграфах). На рис. 8 показан разработанный и широко применяемый [10,13, 19] вариант конструкции изгибающего устройства на основе металлического зеркала, получивший в литературе название “bridge” (мост). В этой конструкции центральная часть освобождена от вещества, чтобы свети к минимуму потери частиц. Кристалл крепится к изогнутой металлической поверхности с помощью упругих шайб, действующих по принципу известной в технике подпружиненной опоры, снимающей механические напряжения, которые возникают при взаимодействии интенсивного пучка с кристаллом.

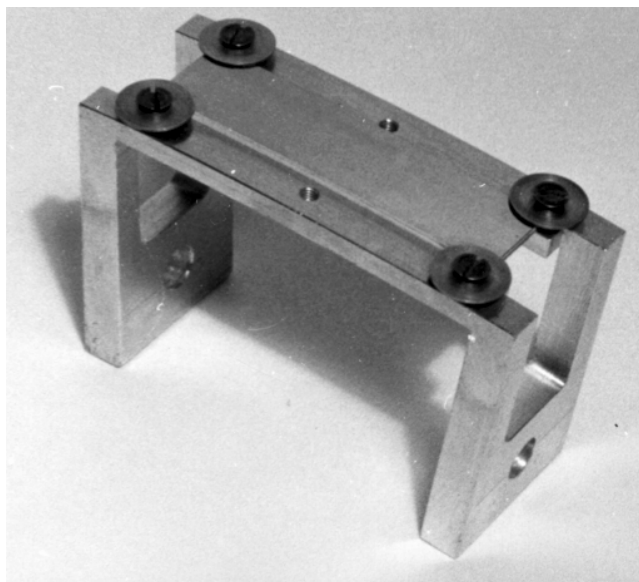


Рис. 8. Разработанное устройство для изгиба и крепления кристаллов.

Гониометрические устройства

Необходимой частью экспериментального оборудования являются гониометрические устройства для ориентации кристаллов относительно пучка. Обычно для ориентации кристаллов требуется минимальный шаг углового перемещения, сравнимый с критическим углом каналирования ($\simeq 20$ мкрад при 70 ГэВ). Такие точности обеспечивает известная компактная конструкция, содержащая коромысло, приводимое в движение микрометрическим винтом, расположенным на оси шагового двигателя. В зависимости от величины коромысла и шага резьбы микрометрического винта в конструкциях достигался шаг углового перемещения 8–30 мкрад.

Для управления использовались шаговые двигатели марки ШДР-711, ШДР-721. Управляющие импульсы на двигатели поступали от модулей управления МУШД, выполненных в стандарте КАМАК. Число и частота управляющих импульсов могли задаваться от ЭВМ и вручную с передней панели модулей. Указанные конструкции легко размещались внутри стандартных вакуумных боксов и устанавливались на устройства, обеспечивающие координатные перемещения (на рис. 9 в качестве примера показано устройство кристаллической станции деления пучка, установленной в канале № 8).

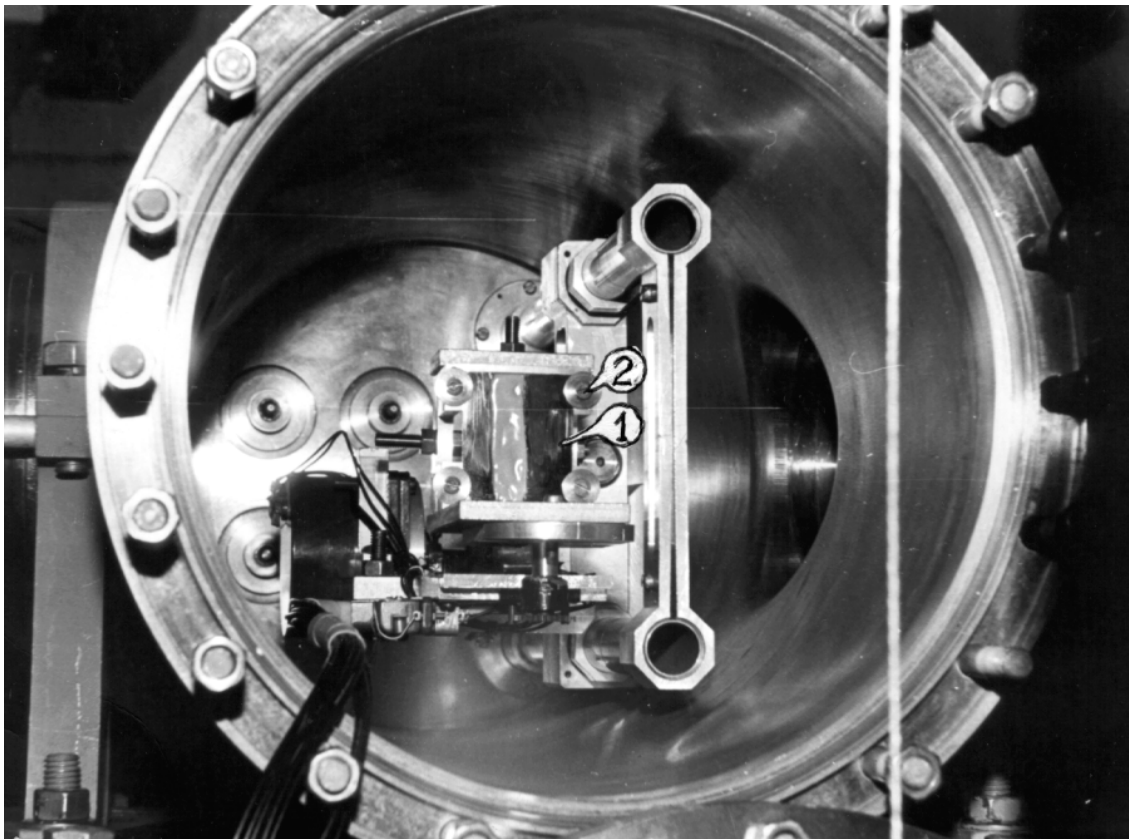


Рис. 9. Кристаллическая станция деления пучка. 1 — изогнутый монокристалл; 2 — кристаллодержатель; Показан также одноосевой гониометр с горизонтальным перемещением.

2.2. Влияние дефектов кристалла

Приведенная формула (8) для величины длины деканализирования дает следующую зависимость от свойств вещества: $L_D \sim a_{TF} \cdot d$, что для изоморфных кристаллов приводит к зависимости $L_D \sim Z^{-1/3}$ (слабое убывание с ростом Z). Но поскольку критический радиус изгиба $R_c \sim Z^{-1}$ (величина, обратная критическому полю), то “сила” дефлектора $\Theta_D \sim L_D/R_c \sim Z^{2/3}$ — заметно растет с ростом Z . Кроме того, критический угол захвата $\theta_c \sim \sqrt{U_c} \sim Z^{1/3}$ также возрастает. Поэтому тяжелые материалы, в принципе, предпочтительнее для поворотов пучка.

Практика, однако, показывает, что главным фактором в использовании кристаллов в области высоких энергий пока является совершенство кристаллической структуры. В этом отношении кремний — истинный рекордсмен. О высоком качестве этого материала говорят данные по измерению длин деканалирования, приведенные в разделе 1, а также ряд результатов опытов по отклонению пучка протяженными кристаллами [25], в разное время устанавливаемыми в магнитооптических каналах частиц, позволивших продвинуть исследования “вширь”.

Так, в одном из них был испытан в пучке изогнутый на угол 20 мрад кристалл кремния (110) длиной 150 мм. Метод введения в режим каналирования и анализ данных аналогичны рассмотренным в разделе 1.1. Соответствие доли отклоненных частиц расчетным величинам, полученным из соотношения (2), свидетельствует о совершенстве кристалла.

В опытах сравнивались отклоняющие свойства протяженных (до 100 мм) кристаллов кремния, полученных из разных источников. Обнаружена устойчивая повторяемость результатов от кристалла к кристаллу 5%, соответствующая точности измерений.

Интересные выводы были сделаны из сравнения эффективности отклонения пучка кристаллами кремния с различной электропроводностью (этот параметр зависит от концентрации примесной добавки и является определяющим в микроэлектронике). Ранее частицы высоких энергий отклоняли только высокоомными материалами ($\rho \geq 5$ КОм·см). Испытания в пучке протонов с энергией 70 ГэВ показали, что кремний с удельным сопротивлением $\rho \simeq 100$ Ом·см обладает столь же высокими отклоняющими свойствами. Таким образом, подтверждаются предсказания теории об уменьшении с ростом энергии влияния на каналирование концентрации одиночных примесных атомов.

Даже кремниевые пластины массового производства, вырезанные из слитков большого диаметра для приготовления микросхем, обнаруживают хорошие отклоняющие свойства. В одном из опытов из пластины диаметром 100 мм (ориентация (111); n — тип проводимости; не более $100/\text{см}^2$ — плотность дислокаций) был приготовлен дефлектор длиной 30 мм. По сравнению с бездислокационным “эталоном” он отклонял $(90 \pm 5)\%$ частиц.

Именно дислокации при высоких энергиях представляют наибольшую опасность, так как сечение деканалирования на остальных типах дефектов с ростом энергии падает, либо остается постоянным. На рис. 10 показана теоретическая кривая

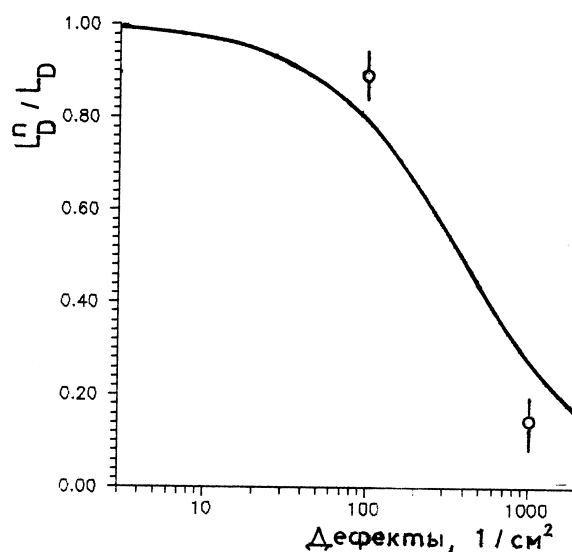


Рис. 10. Зависимость длины деканалирования L_D^n при 70 ГэВ от количества дислокаций в кристалле. Точки — эксперимент; кривая — теория.

уменьшения длины деканалирования с ростом количества дислокаций в кристалле при 70 ГэВ [1]. На график нанесена экспериментальная точка, отражающая уменьшение длины деканалирования в несовершенном кремниевом кристалле.

Было испытано несколько кристаллов германия длиной до 45 мм. На рис. 11 показаны данные рентгенографического анализа фрагмента одного из германиевых кристаллов, с помощью которых определена концентрация дислокаций: $n_d = (1000 \pm 100)/\text{см}^2$ (под микроскопом на фотопластинке подсчитывалась суммарная длина дислокаций на единицу объема). При тестировании кристаллов германия в пучке 70-ГэВ протонов по доле отклоненных частиц из соотношения (2) в [10], а также из сравнения с кристаллами кремния в идентичных условиях [25] была определена величина $L_D = (5 \pm 1)$ мм (это составляет 15% от характеристики для совершенного материала). Измеренная величина концентрации дислокаций около $1000/\text{см}^2$ объясняет аномальное деканалирование в образце германия и количественно хорошо согласуется с теорией (экспериментальная точка нанесена на график рис. 10).

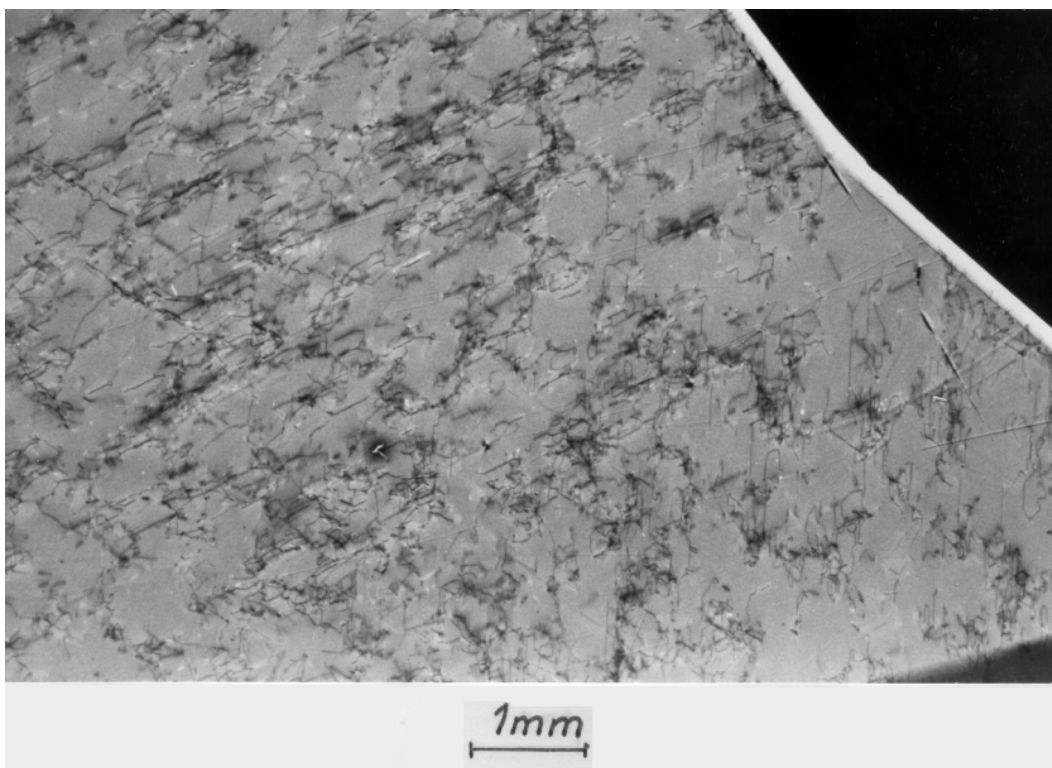


Рис. 11. Результаты рентгенографической съемки образца германия по методу Бормана. В этом методе дислокации отображаются в рентгеновских лучах на нижней грани кристалла черными линиями, что зафиксировано на фотографии.

Установлено также влияние дефектов кристаллической поверхности, вносимых при обработке пластин, на характеристики пучка частиц высоких энергий, отклоненного изогнутым монокристаллом [24]. Эта задача актуальна при оптимизации

кристаллических септумов, предназначенных для эффективного вывода циркулирующего пучка из ускорителя, где пучок имеет малую угловую расходимость и особо чувствителен к дефектам кристалла на его поверхности, соприкасающейся с пучком.

В опыте прецизионно с точностью менее 1 мкм измерены профили отклоненного кристаллом пучка частиц с помощью ядерных фотоэмульсий. Путем сравнения изображений пучка на ближних эмульсиях с размерами кристаллов было выяснено, что испытанные кристаллы имеют заметный неканализующий слой (см. табл. 1), ширина которого колеблется в пределах $\sim 40 \div 60$ мкм.

Таблица 1. **Характеристики кристаллов и размеры отклоненных пучков.**

Тип кристалла	Длина, мм	Толщина, мкм	Размер пучка, мкм	Неэффективный слой, мкм
Si(110)	25	300	215	42
Si(111)	30	520	435	42
Ge(110)	17	600	510	45
Si(111)	47	650	550	50
Si(111)	80	700	580	60
Si(111)	28	1970	1850	60

Наблюдалась также специфическая мозаичность кристаллов вблизи торцов, приводящая к угловым искажениям отклоненного пучка, превосходящим критический угол каналирования. Так, на рис. 12а показано изображение отклоненного пучка, структура которого отражает характер поверхностных дефектов на торце кристалла. Фотография этого торца, увеличенная под микроскопом, приведена на рис. 12б. На расстоянии ~ 1 м от кристалла наблюдается фрагментирование пучка на отдельные зоны с разрывом между ними ~ 100 мкм. Соответствующие этому наблюдаемые искажения углов вылета частиц пучка $\alpha \sim 100$ мкрад в этом случае обусловлены деформациями решетки на глубину $h \sim (3R_c) \times \alpha = 50$ мкм на торце кристалла. Здесь принято, что $(3R_c)$ — радиус изгиба плоскостей, равный трем критическим радиусам $R_c \simeq 15$ см, при котором возможно эффективное каналирование (при меньших радиусах деформации плоскостей частицы просто выходили бы из режима каналирования, не давая такой скоррелированной картины, как это видно из рисунка). Обнаруженные глубокие угловые деформации кристаллической решетки, образующиеся из-за мельчайших микронных дефектов на поверхности, и могут быть причиной возникновения существенного приповерхностного слоя, неэффективного для каналирования мультигэвных частиц. Последующие опыты показали, что качество отклоненного пучка заметно улучшается при тонкой химической полировке торцов кристалла.

a



b

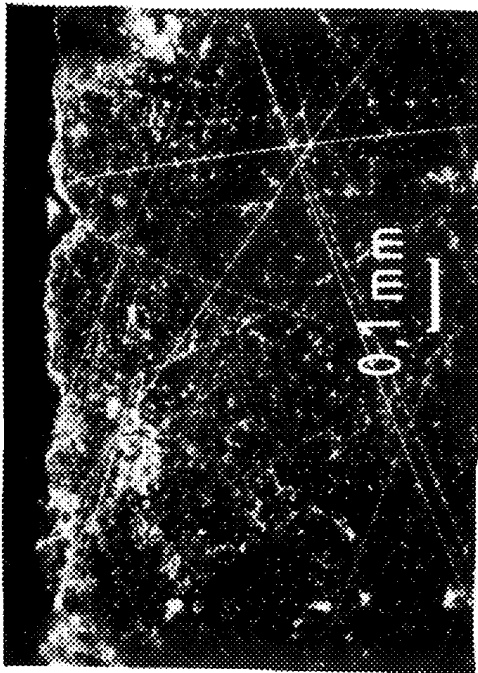


Рис. 12. Изображение отклоненного кристаллом пучка на расстоянии ~ 0.5 м (верх рисунка) и ~ 1 м (низ рисунка) — (а). Увеличенная под микроскопом фотография выходного плоского торца кристалла толщиной 1970 мкм — (б).

Проведенные исследования таким образом помогли уточнить требования к кристаллам и усовершенствовать технологии изготовления монокристаллических пластин, пригодных для отклонения и вывода пучков на ускорителях.

2.3. Тепловая и радиационная стойкость кристаллов

В экспериментальной работе Э.Н.Цыганова и др. (1979 г.), где впервые проверялась идея отклонения частиц изогнутым монокристаллом, интенсивность отклоненного пучка едва достигала нескольких частиц в секунду. В дальнейшем из-за невысокой эффективности отклонения частиц кристаллами (главным образом, из-за несоответствия эмиттанса пучка акцептансу кристалла), а также радиационных повреждений полупроводниковых кристаллов сложилось мнение об ограниченных возможностях этого метода формирования пучков.

С целью практического изучения возможности формирования с помощью монокристалла интенсивного пучка протонов, достаточного, в принципе, для генерации пучков вторичных частиц, был поставлен специальный эксперимент [18].

Изогнутый на угол 13 мрад кристалл кремния устанавливался на выведенном из ускорителя протонном пучке с энергией 70 ГэВ (конструкция кристаллической станции приведена на рис. 9). Часть пучка, захваченная в режим каналирования, отклонялась в магнитооптический канал, где размещалась детектирующая аппаратура. Кристалл кремния ориентации (111) имел размеры $H \times V \times L = 0,5 \times 40 \times 30$ мм³ (ширина, высота, длина по пучку), длина изогнутой части составляла 20 мм, а средний радиус изгиба 1,5 м. На кристалл наводился быстро выведенный пучок интенсивностью $1,3 \times 10^{13}$ в цикле при длительности вывода 5 мксек и времени повторения циклов 9 секунд. Пучок имел размеры $\sigma_x = \sigma_y = 1,4$ мм и угловую расходимость в х-плоскости (плоскости поворота пучка) $\sigma_\theta = 0,8$ мрад. Около $1,8 \times 10^{12}$ частиц за цикл попадали непосредственно на торец кристалла, вызывая среднее во времени энерговыделение ~ 1 Вт. Кристалл нагревался пучком до температуры $\sim 150^\circ\text{C}$, кроме того, подвергался динамическому механическому воздействию в момент прохождения пучка.

Первые попытки использовать монокристалл для отклонения быстро выведенного интенсивного пучка закончились неудачно. Кристалл, изогнутый с помощью приклеивания к металлическому цилиндру по всей своей поверхности, лопался от динамических нагрузок. Удачной оказалась конструкция, когда кристалл прижимался к металлическому основанию с помощью пружинных креплений (рис. 8).

В максимуме кристалл отклонял $9,5 \times 10^9$ частиц/цикл. Потери частиц основного пучка были на уровне 1%, это примерно в десять раз превышало интенсивность отклоненного пучка т.е. эффективность деления пучка кристаллическим сплиттером составила $\sim 10\%$. Для приведенных выше параметров падающего пучка, когда угловая расходимость в ~ 40 раз превышала критический угол каналирования, эта цифра соответствует расчету.

На рис. 13 приведена зависимость интенсивности отклоненного пучка от времени с момента начала работы кристалла (положение кристалла оптимальное).

Флуктуации интенсивности от цикла к циклу составляли приемлемую величину 12%. На этом уровне не было замечено изменения средней интенсивности, что подтверждает благоприятные теоретические предсказания [1] о слабой температурной зависимости отклоняющих свойств при плоскостном каналировании.

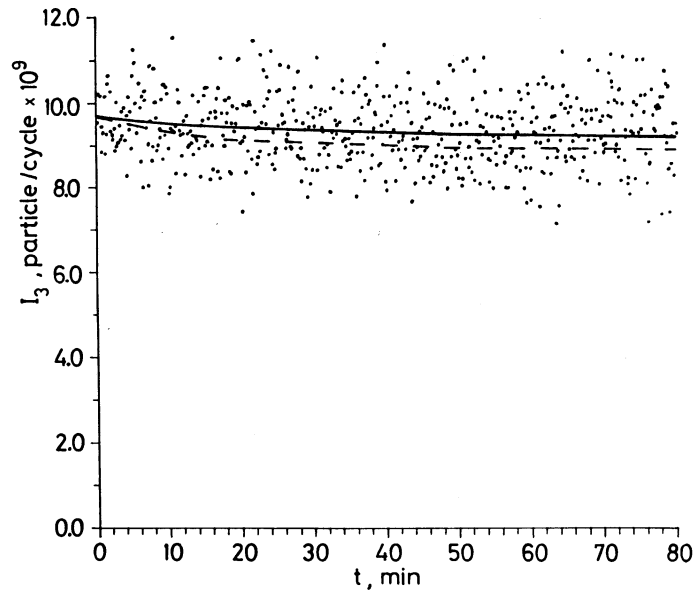


Рис. 13. Зависимость интенсивности отклоненного кристаллом пучка от времени (положение кристалла оптимальное). Сплошная кривая фитирует экспериментальные точки, каждая из которых соответствует одному циклу ускорения. Штриховая — расчет, учитывающий температурную зависимость каналирующих свойств.

Определялась также пространственная стабильность отклоненного пучка, которая контролировалась удаленной ионизационной камерой. Было установлено, что изменения угла изгиба кристалла $\Delta\Theta/\Theta < 10^{-2}$.

Облучение кристалла в быстро выведенном интенсивном пучке продолжалось в течение одного сеанса работы ускорителя. Выдержав поток частиц $\sim 10^{19}/\text{см}^2$ в условиях теплового и механического воздействий кристалл не только не разрушился, но и сохранил каналирующие свойства без значительных ухудшений.

Полученный результат является неожиданным по своей оптимистичности. Из результатов опыта следует, что в обычных магнитооптических каналах частиц кристаллы могут эксплуатироваться годами, а также могут быть использованы для вывода интенсивных пучков из ускорителя (что успешно подтвердилось позднее).

2.4. Отклонение пучка на большие углы

Следует отметить, что для создания экспериментальных зон на тэвных ускорителях также перспективно использовать изогнутые монокристаллы, так как они позволяют отклонять пучки на значительно большие углы, чем обычные электромагниты. Как отмечено в [2], “сила” кристаллического дефлектора $\Theta_D = L_D/R_c$.

Поскольку и L_D и R_c почти одинаково (линейно) растут с ростом энергии E , максимально возможный угол отклонения пучка кристаллом не зависит от энергии частиц. Это является важным достоинством кристаллической оптики. Согласно данным измерения L_D , приведенным в главе 1, для Si(111) и Si(110) будем иметь $\Theta_D = 0,47$ рад и $\Theta_D = 0,34$ рад соответственно. Для частиц высоких энергий мультитераэвного диапазона это просто гигантская величина в сравнении с поворотом в обычном электромагните

$$\Theta_M/\text{мрад} = \frac{300Bl/(\text{Тл} \cdot \text{м})}{p/(\text{ГэВ}/c)}.$$

Например, в случае поворота пучка с импульсом 1000 ГэВ/с 6-метровым железным магнитом угол отклонения будет равен только 3 мрад.

Возможность отклонения пучка на большой угол также проверялась экспериментально на быстро выведенном пучке протонов с энергией 70 ГэВ. Интенсивность прямого пучка до и после кристалла измерялась трансформаторами тока с абсолютной ошибкой около 1%. Интенсивность отклоненного кристаллом пучка регистрировалась специальным трансформатором тока повышенной чувствительности с систематической погрешностью 10%.

Кремниевый кристалл был изогнут на угол $\Theta = 130$ мрад. Его размеры были $H \times V \times L = 0,5 \times 15 \times 100$ мм³. При оптимальной ориентации кристалл отклонял $\simeq 10^8$ р/цикл, доля отклоненных частиц соответствовала расчету по формуле (2). Для отклонения тераэвных частиц на такие углы потребуются совершенные кристаллы длиной несколько десятков сантиметров. Существует определенный оптимизм и в решении этой проблемы; во всяком случае, кристаллы длиной 15 см уже испытаны в пучке (раздел 2.2).

3. Методы фокусировки пучка кристаллами и перспективы применения

Экспериментально показано, что с помощью изогнутого монокристалла можно не только отклонять пучок, но и фокусировать его. Перспективный способ фокусировки был предложен в середине 80-х годов сотрудником ПИЯФ А.И.Смирновым.

Суть этого метода заключается в том, что поверхности выходного торца изогнутого кристалла придается специальная форма, чтобы касательные к кристаллографическим плоскостям на этой поверхности проходили через одну линию и, следовательно, частицы в плоскости отклонения собирались в линейный фокус за счет разности углов поворота. В случае изгиба кристаллографических плоскостей по цилиндру с радиусом R (см. рис. 14) необходимо, чтобы линия, на которой лежат центры кривизны OO' , была расположена на поверхности цилиндра радиуса r , по которому обработан торец кристалла. При этом фокусное расстояние F будет определяться выражением $F = \sqrt{4r^2 - R^2}$.

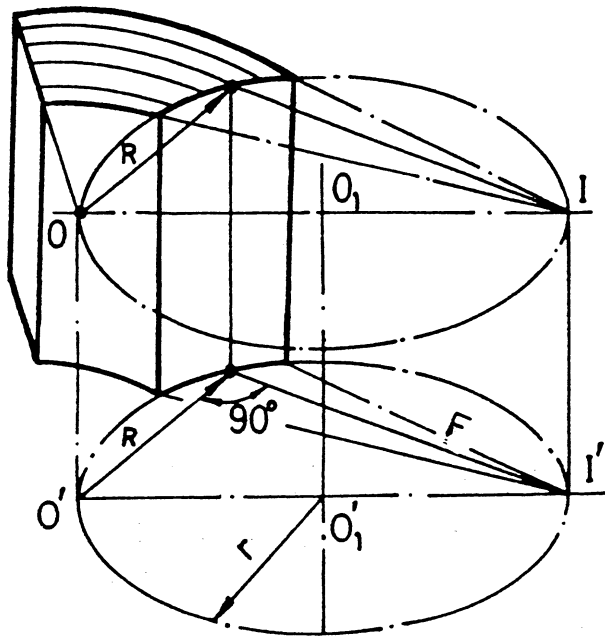


Рис. 14. Принцип фокусировки пучка кристаллом. OO' — линия, на которой лежат центры кривизны кристаллографических плоскостей; OO' — ось цилиндра радиуса r , по которому обрабатывается торец кристалла; I' — линия фокуса, в которой сходятся касательные к изогнутым плоскостям, согласно известной геометрической теореме.

В случае идеального изгиба и обработки кристалла размер пучка в точке фокуса Δx , обусловленный его угловой расходимостью в пределах критического угла каналирования θ_c , равен $\Delta x = 2F\theta_c$.

Так как критический угол каналирования достаточно мал ($\theta_c = 0,02-0,002$ мрад для частиц с энергией от 100 ГэВ до 10 ТэВ при плоскостном каналировании в кремнии), а технология изгиба и обработки кристалла позволяет получить фокусное расстояние порядка нескольких сантиметров, достижимые размеры пучка составят ~ 10 мкм в гэвной и ~ 1 мкм в тэвной области энергий. Заметим, что коэффициент линейного увеличения при фокусировке $q = 2F\theta_c/H$, где H — характерная ширина кристалла ~ 1 мм, может достигать соответственно величины сотых и тысячных долей.

Описанный способ фокусировки был реализован в совместном эксперименте ИФВЭ—ПИЯФ на протонном пучке с энергией 70 ГэВ [15,16]. В опыте использовались три кристалла кремния размерами $H \times V \times L = 2 \times 15 \times 70$ мм³ (ширина, высота, длина по пучку) ориентации (111). Кристаллы изгибались по цилиндру радиусом $R = 2,7$ м на длине ~ 65 мм. Чтобы иметь различные фокусные расстояния, выходные торцы кристаллов обрабатывались по цилиндрам с радиусами, значения которых приведены в табл. 2. (соответственно геометрии рис. 14 менялись также углы среза фокусирующей кромки $\alpha = \arccos(R/2r)$).

Таблица 2. Характеристики фокусирующих кристаллов и размеры пучков в фокусе.

№ Кристалла	R, м	r, м	α , град	F, м	Размер фокуса $2\sigma_x$, мкм	
					расчет	измерен.
1	2,7	2,21	58,2	3,5	175	200
2	2,7	1,52	30,4	1,4	70	80
3	2,7	1,374	11,9	0,5	25	43

На кристалл, устанавливаемый в гониометре, направлялся протонный пучок размером $\sigma_x = 2$ мм с малой угловой расходимостью $\sigma_{x'} = 0,1$ мрад. По ориентационной зависимости сигнала на удаленных детекторах кристалл вводился в режим каналирования. Интенсивности прямого и отклоненного исследуемым кристаллом на угол $\simeq 24$ мрад пучков измерялись сцинтилляционными счетчиками. При оптимальной ориентации кристалл отклонял 3% частиц прямого пучка (для указанных характеристик пучка и кристаллов эта величина соответствует расчету).

Эффект фокусировки регистрировался с помощью ядерных фотоэмульсий. Несколько слоев эмульсии располагалось на различном расстоянии от выходного торца кристалла. Обработка экспонированных эмульсий при работе с кристаллом № 1 проводилась на микрофотометре, а при работе с кристаллами № 2 и № 3 осуществлялся прямой счет плотности распределения треков по сечению пучка под микроскопом. Размер проявленных зерен трека (“ширина трека”) — около 1 мкм.

Рис. 15 иллюстрирует эффект фокусировки отклоненного кристаллом № 1 пучка. На рис. 16 показано изображение пучка, сфокусированного кристаллом № 3 на расстоянии 0,5 м (самая жесткая фокусировка). Размеры пучков в кроссоверах $2\sigma_x$ (расчетные и измеренные) указаны в таблице, из которой видно, что они для кристаллов № 1 и № 2 согласуются между собой в пределах 15%. Для кристалла № 3 размер пучка в кроссовере существенно больше расчетного, что связано с увеличением вклада аберраций при уменьшении фокусного расстояния.

Реализованный способ фокусировки может быть использован для получения пучков частиц микронных размеров тэвной области энергий на ускорителях нового поколения. Для этого изображение отклоненного кристаллом пучка достаточно передать с помощью единичной оптики до экспериментальной установки.

Другое важное применение фокусирующего кристалла может быть связано с обращенным направлением движения частиц — преобразование в параллельный пучка, расходящегося из точечного источника. Для этих целей специальным образом должен быть обработан входной торец кристалла. Задача фокусировки расходящегося пучка актуальна для формирования пучков вторичных частиц, в частности, их вывода из ускорителя коллайдерного типа.

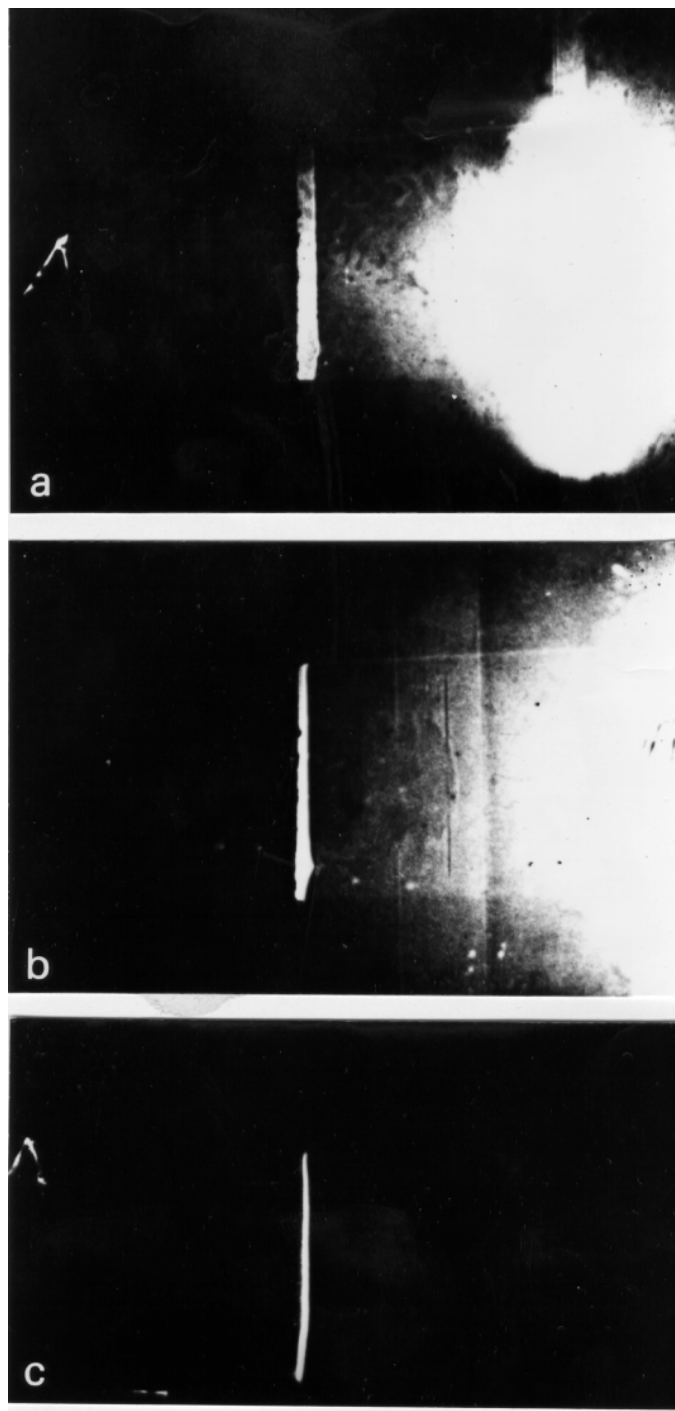
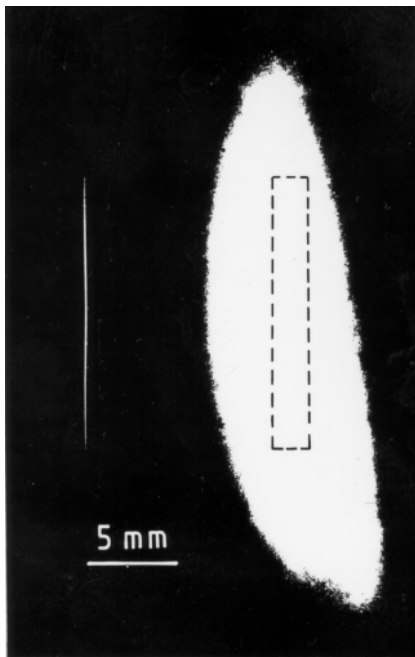
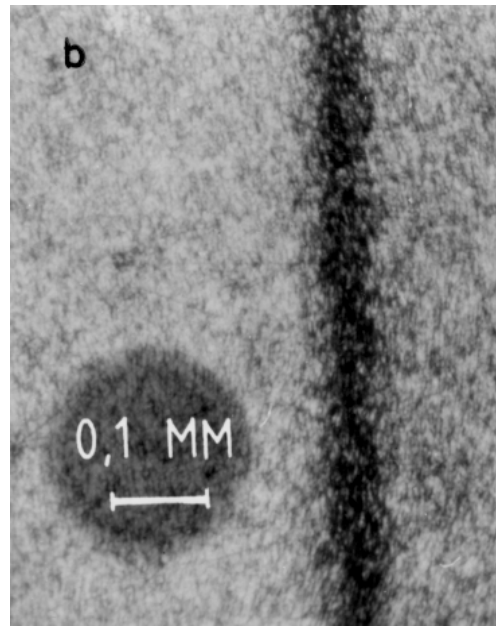


Рис. 15. Изображение отклоненного кристаллом № 1 пучка на трех эмульсиях, расположенных на расстояниях 0,7; 2; 3,5 м от кристалла (справа виден неотклоненный пучок с ореолом вторичных частиц, а также шлейф деканализированных в изогнутой части кристалла частиц).



а



б

Рис. 16. (а) Изображение пучка, сфокусированного кристаллом № 3. Профиль отклоненного и сфокусированного пучка виден слева. Справа штриховой линией обозначено сечение кристалла. (б) Изображение того же пучка при увеличении под микроскопом.

Чтобы вывести основную часть вторичных частиц, рожденных на мишени, установленной в вакуумной камере ускорителя и совмещенной с фокусом кристалла (схема такого вывода представлена на рис. 17), необходимо выполнить некоторые условия. Как известно, основная часть вторичных частиц, рожденных на мишени, будет сосредоточена в угловом интервале

$$\pm \theta = \frac{400}{p}, \quad (9)$$

где импульс частиц p берется в ГэВ/с; θ — в мрад. Поэтому угловой аксептанс фокусирующего кристалла

$$\pm \varphi = \frac{H}{2F} \quad (10)$$

где H — толщина кристалла; F — фокусное расстояние, должен быть порядка $\pm \theta$.

Высокая эффективность захвата частиц в режим каналирования может быть получена, если размеры мишени Δx в плоскости отклонения частиц удовлетворяют условию

$$\Delta x \leq 2\theta_c F. \quad (11)$$

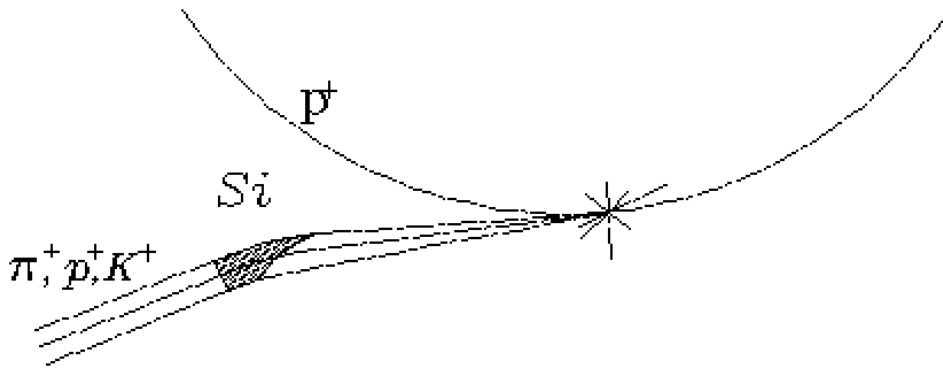


Рис. 17. Схема вывода пучка вторичных частиц из ускорителя фокусирующим кристаллом.

В этом случае на входном торце кристалла направление движения частиц совпадает с направлением кристаллографических плоскостей в пределах критического угла каналирования θ_c , а эффективность захвата η может быть близкой к теоретическому пределу $\sim 70\%$. В реальных условиях эксперимента дефекты фокусирующего устройства могут приводить к существенному уменьшению η .

Указанным выше условиям получения эффективного вывода вторичных частиц несложно удовлетворить в области тэвновых энергий. Оценки, выполненные для коллайдера ЛНС (энергия ускоренных протонов 7 ТэВ), показали, что таким способом из ЛНС можно вывести вторичные частицы с интенсивностью $\sim 10^8/\text{сек}$.

Эксперимент по исследованию эффективности захвата и отклонения расходящегося из точечного источника пучка был выполнен на выведенном протонном пучке ускорителя ИФВЭ с энергией 70 ГэВ [23]. Схема эксперимента представлена на рис. 18. Кристалл Si_1 , изогнутый на угол 60 мрад, с обычными плоскими торцами вводился в интенсивный ($10^{11}/\text{сек}$) выведенный пучок протонов с энергией 70 ГэВ. Канализованный пучок умеренной интенсивности $10^7/\text{сек}$ отклонялся кристаллом в направлении магнитооптической системы, где были установлены еще два кристалла. Пучок формировался начальной частью магнитной системы и наводился на кристалл Si_2 , имеющий фокусирующий задний торец. Этот кристалл имел толщину 2 мм, высоту 15 мм, длину 70 мм и был изогнут на угол 18 мрад. Кристалл фокусировал пучок на расстоянии 0,5 м в узкую вертикальную линию с размером в кроссовере $\simeq 80$ мкм (ширина на полувысоте) и угловой расходимостью ± 2 мрад.

Полученный таким образом пучок был использован как источник протонов. Для фокусировки и последующего отклонения этого расходящегося пучка использовался кристалл Si_3 с фокусным расстоянием 2,5 м. Он имел размеры $2 \times 20 \times 30$ мм³ и изгибался на угол 6 мрад (первый и второй кристаллы имели ориентацию (111), третий был вырезан вдоль плоскости (110)). Этот кристалл обеспечивал угловой акцептанс $\varphi = \pm 0,4$ мрад. Согласно предварительным измерениям, он обеспечивал при фокусировке из параллели в точку размер кроссовера ~ 200 мкм (идеальная величина $\Delta x = 2\theta_c F = 125$ мкм). Кристаллы вводились в режим каналирования последовательно. Каждый из них имел самостоятельное гониометрическое устройство.

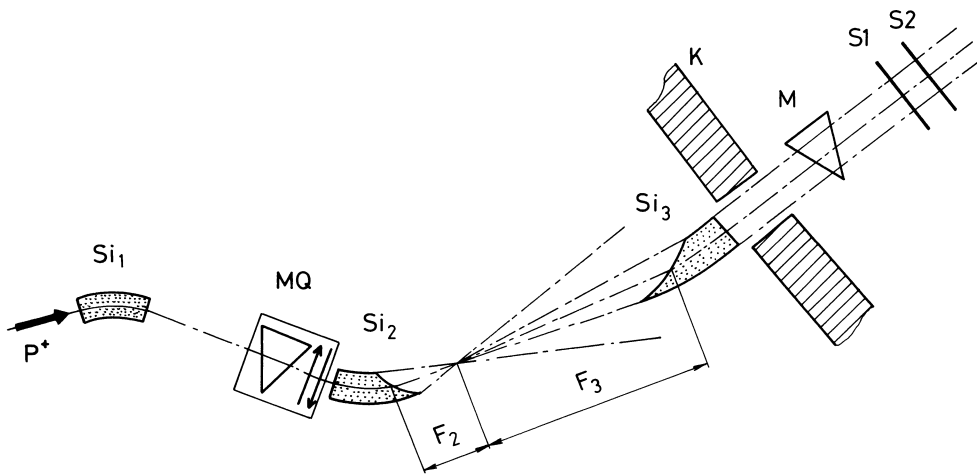


Рис. 18. Схема эксперимента по фокусировке расходящегося пучка.

Эффект фокусировки пучка из расходящегося в параллель был зарегистрирован измерением интенсивности пучка, отклоняемого третьим кристаллом, при его вращении вокруг вертикальной оси, проходящей через его передний торец. Результаты измерения интенсивности при угловом сканировании показаны на рис. 19. Ширина этого распределения на полувысоте приближается к $2\theta_c$ (по основанию $\simeq 4\theta_c$), что свидетельствует о хорошем качестве фокусировки. Согласно измерениям удаленными сцинтилляционными счетчиками S1 и S2, кристалл Si_3 при оптимальной ориентации отклонял $(15 \pm 2)\%$ падающих на его торец протонов, что в ~ 2 раза меньше расчета для идеальной фокусировки.

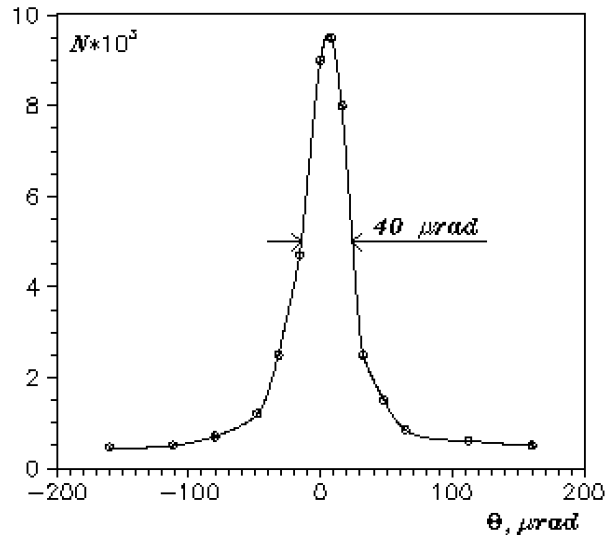


Рис. 19. Ориентационная зависимость интенсивности пучка, отклоняемого третьим кристаллом.

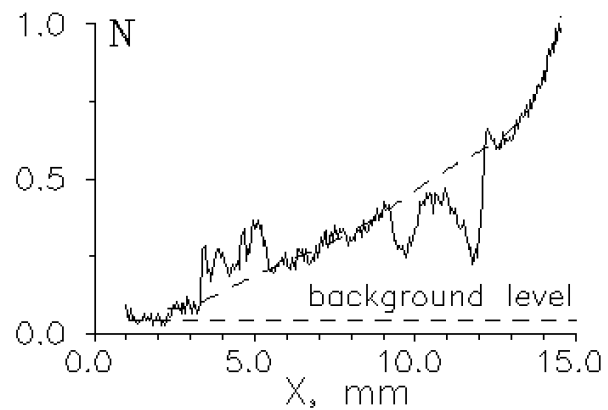


Рис. 20. Профиль пучка на ядерной эмульсии, располагаемой за третьим кристаллом.

Высокоэффективное отклонение расходящегося пучка подтверждается данными обработки профиля пучка на ядерной эмульсии, расположенной за кристаллом Si_3 при его оптимальной ориентации. Этот профиль представлен на рис. 20. Широкий пучок (превышение над фоном) соответствует расходящемуся пучку, сформированному кристаллом Si_2 . Провал справа представляет тень от кристалла Si_3 , обусловленную захватом части пучка в режим каналирования. Как можно установить из соотношения площадей, в режим каналирования захвачено $\sim 30\%$ частиц. Слева на графике виден вклад отклоненных кристаллом Si_3 частиц, накладывающийся на широкий профиль расходящегося пучка от кристалла Si_2 . Доля отклоненного пучка, согласно графику, составила 14% от числа падающих частиц. Эта величина хорошо согласуется с измерениями сцинтилляционными счетчиками. Убывание числа отклоненных частиц в 2,2 раза в сравнении с захваченными в режим каналирования объясняется процессами деканалирования.

Полученная эффективность отклонения фокусирующим кристаллом пучка частиц с большой угловой расходимостью оказалась достаточно высокой, несмотря на то, что в принятой схеме эксперимента на ее величину влияют не только дефекты исследуемого фокусирующего кристалла Si_3 , но также и кристалла Si_2 , формирующего источник. Дальнейшее повышение эффективности отклонения η требует специальных исследований и совершенствования технологии изготовления фокусирующих кристаллов.

Отметим, что использованная в эксперименте система из двух фокусирующих кристаллов, отклоняющих пучок в одну и ту же сторону, может представлять самостоятельный интерес, например для транспортировки выведенного из ускорителя пучка протонов.

Фокусировка пучка кристаллами существенно расширяет область их применения. Появляется возможность управления пучками с большой угловой расходимостью, что создает основу для систем формирования вторичных частиц нового типа.

4. Внедрение систем кристаллооптики на ускорителе ИФВЭ

4.1. Применение изогнутых монокристаллов в каналах транспортировки частиц

Комплексы магнитооптических каналов, формирующие пучки различных частиц, являются неотъемлемой частью ускорителя ИФВЭ. Разработка и создание систем каналов частиц с использованием внешних мишеней 70-ГэВ ускорителя ИФВЭ осуществлялись последовательно в течение ряда лет на базе быстрого и медленного выводов протонов. Серьезная модернизация канала № 8 [3] и строительство новых каналов №№ 21, 22, 23 [4,5] были проведены в 80-х годах (при активном участии автора диссертации) в связи с вводом в строй ускорителя-бустера и увеличением интенсивности ускоренного пучка свыше 10^{13} протонов в цикле.

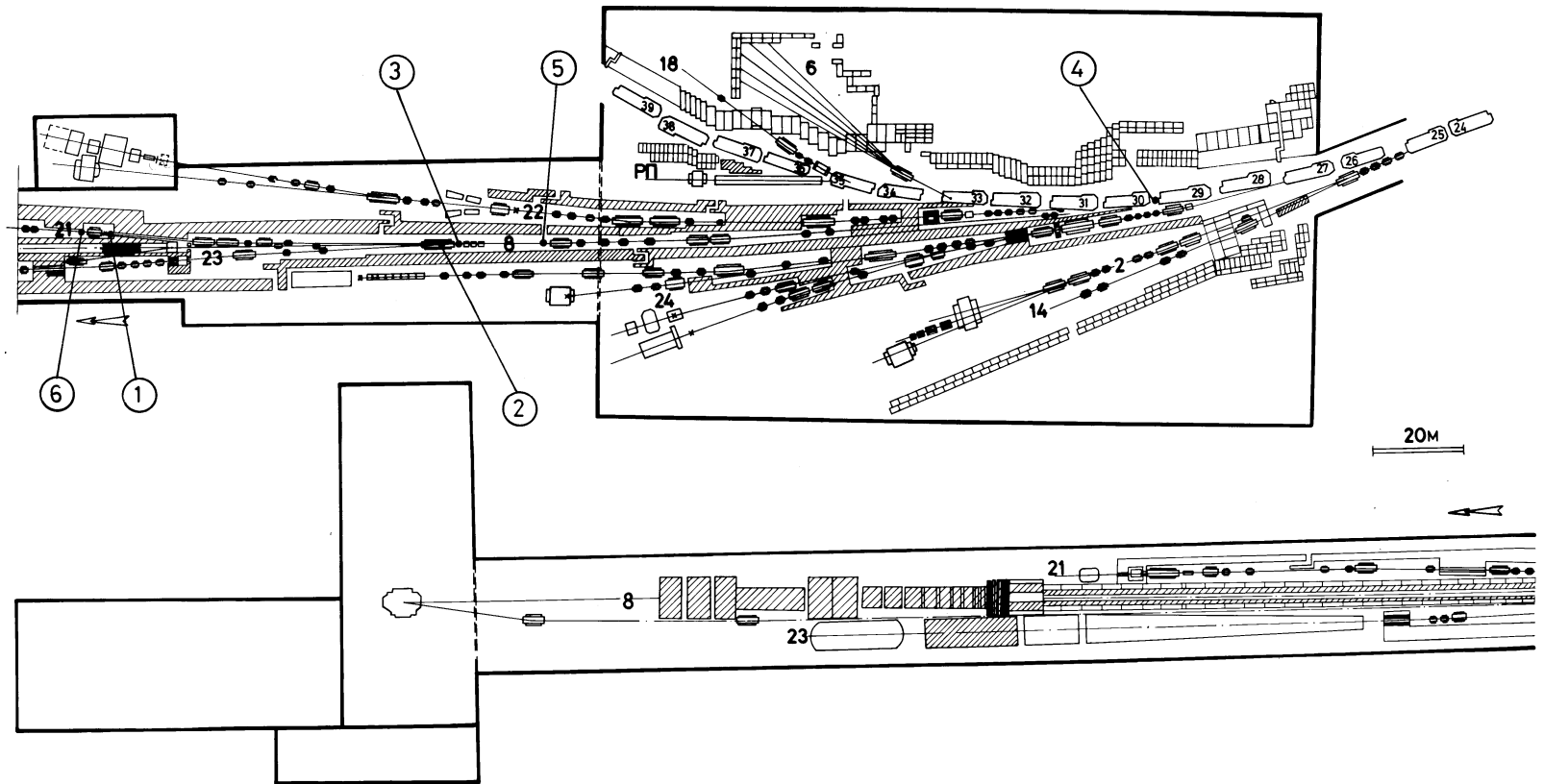


Рис. 21. Расположение каналов частиц в экспериментальных залах. Выносными линиями обозначены места установки кристаллов.

Современное расположение каналов частиц, занимающих три больших экспериментальных зала, представлено на рис. 21 (учтены некоторые перспективные планы (канал № 24)). В центре залов расположен канал № 8 для исследования нейтрино с широким спектром, в южной части залов (низ рисунка) — канал транспортировки частиц для меченых нейтрино № 23. Универсальные адронные каналы № 21 на установку СФИНКС и № 22 на установки ФОДС, СВД находятся в северной части залов (верх рисунка).

По своей структуре каналы представляют собой сложные установки протяжённостью несколько сотен метров. В них использовано около сотни единиц магнитооптического оборудования (двухметровые квадрупольные линзы и трёх-, шестиметровые дипольные магниты) и десятки дистанционно-управляемых коллиматоров. Каналы оснащены унифицированными системами диагностики пучка [6] и управления элементами [5]. Основу системы диагностики пучка составляют многоканальные профилометры (около 30 единиц), содержащие по 16 регистрационных каналов в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Применяются два типа детекторов: ионизационные камеры для мониторинга пучков интенсивностью до 10^{10} /цикл, и камеры вторичной эмиссии для пучков 10^{10} – 10^{13} /цикл. В зависимости от размеров пучка и требуемого разрешения детекторы изготовлены с шагом от 0,5 мм (в местах изображений), до 10 мм — в местах больших размеров пучка. Электроника предварительной обработки сигналов размещена по трассе каналов в непосредственной близости от детекторов, а интеллектуальная электроника с программным обеспечением находится в пультовых управления каналами.

По данным, поступающим с каждого профилометра, в “линию” вычисляется и выводится на визуальные мониторы информация о средних размерах и положении центра тяжести пучка. Необходимый набор детекторов на каждом канале позволяет измерять эмиттанс пучка, его линейные и угловые огигающие. Сбор, первичная обработка и отображение информации с детекторов пучка осуществляются интеллектуальными контроллерами АКК-83. Управление технологическим оборудованием каналов реализовано на микроЭВМ “Электроника-60”. Кроме того, эта микромашина взаимодействует с ЭВМ управления источниками питания магнитооптических элементов, обеспечивая автоматическое управление токами. Контроль и управление подсистемами, реализованными в микроЭВМ нижнего уровня, а также вычисления, связанные с определением характеристик пучка и коррекцией режимов магнитооптических элементов, осуществляет ЭВМ РС. Она же обеспечивает запись и хранение данных для of-line обработки.

Богатые спектрометрические возможности созданных электромагнитных каналов транспортировки частиц и штатная регистрирующая аппаратура, которая может работать с интенсивными пучками частиц, позволили использовать их в качестве основы экспериментальной установки для проведения описанных опытов по исследованию каналирования в кристаллах.

В то же время широкое применение кристаллических элементов в каналах частиц позволило снять многие проблемы, связанные с режимами их работы. На рис. 21 выносными линиями обозначены места установки кристаллических эле-

ментов. Нумерация линий соответствует хронологической последовательности их внедрения. Основное назначение установленных кристаллов отражено в табл. 3.

Таблица 3. Назначение установленных в каналах транспортировки частиц кристаллов.

Номер кристалла	Год внедрения	Назначение	Описание
1	1987	Формирование узконаправленного пучка протонов на установку СФИНКС интенсивностью до 10^7 за цикл	[7]
2	1988	Деление пучка между направлениями № 23 и № 21, $I_{23} = 10^{13}$, $I_{21} = 10^7$ частиц за цикл	[10]
3	1990	Деление пучка между направлениями № 8 и № 21, $I_8 = 10^{13}$, $I_{21} = 10^{10}$ частиц за цикл	[18]
4	1990	Деление пучка между направлениями № 8 и № 22, $I_8 = 10^{13}$, $I_{22} = 10^8$ частиц за цикл	[13]
5	1994	Создание канала частиц нового типа без электромагнитов, интенсивность пучка до 10^6 за цикл	[22]
6	1995	Организация тестового пучка низкой интенсивности путем “кратного каналирования”, $I = 1 - 10^4$ частиц за цикл	[23]

Первые применения кристаллического элемента были связаны с созданием узконаправленного пучка варьируемой интенсивности на установку СФИНКС [7,8,9]. При этом кристалл использовался как аттенуатор пучка; неотклонённый основной пучок гасился в поглотителе. Впоследствии совершенствование технологии изгиба кристаллов позволило минимизировать потери частиц и решить более актуальную задачу деления пучка кристаллическим сплиттером.

Деление пучка

Обычно деление пучка для организации одновременной работы физических установок осуществлялось электростатическим или магнитным сплиттерами. Это достаточно сложный в техническом отношении путь, требующий для реализации схемы деления значительного пространства, так как углы отклонения пучка обычным сплиттером весьма ограничены. Применение кристаллов позволяет просто решить задачу деления выведенного пучка, где обычными средствами это сделать невозможно.

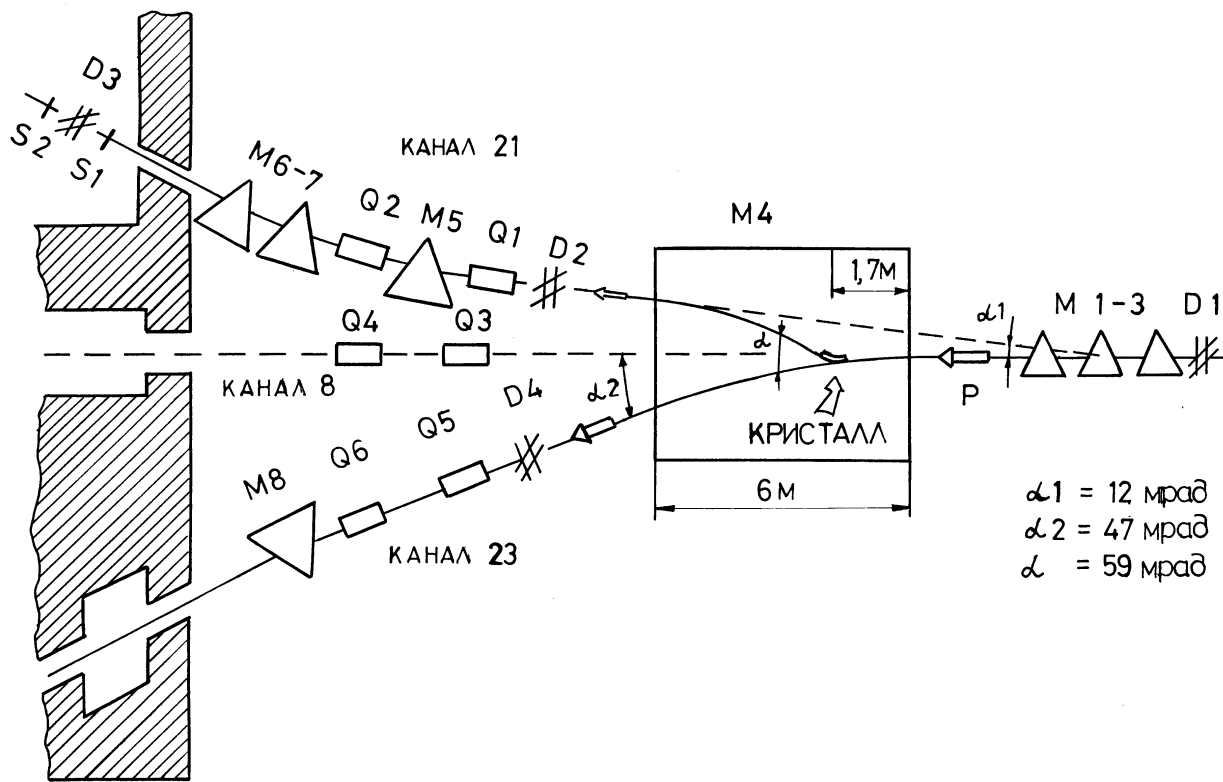


Рис. 22. Схема деления пучка в направлении магнитооптических каналов № 23 и № 21.

Первая кристаллическая станция деления пучка [10] начала функционировать с конца 1988 года. Схема деления пучка представлена на рис. 22. При первых испытаниях медленно выведенный из ускорителя пучок протонов интенсивностью 5×10^{11} /цикл транспортировался на мишень экспериментальной установки по изучению процессов в пучке меченых нейтрино. С помощью изогнутого на угол 60 мрад монокристалла кремния часть пучка умеренной интенсивности отклонялась в магнитооптический канал на мишень установки, предназначенной для адронных исследований. Для совмещения трассы каналированного пучка с осью существующего магнитооптического канала кристаллический дефлектор располагался внутри шестиметрового поворотного магнита М4.

Наведение пучка на кристалл контролировалось по мониторам вторичных частиц, а также телевизионной системой наблюдения. Первичный протонный пучок контролировался многоканальными профилометрами вторичной эмиссии D1, D4. Для регистрации параметров пучка отклоненных частиц использовались пропорциональные камеры D2, D3, работающие в режиме интегрирования заряда, и сцинтилляционные счетчики S1, S2, включенные на совпадения. Сочетание аналоговых и счетных методов регистрации частиц позволяло определять интенсивность пучка в большом динамическом диапазоне $1 - 10^8$ частиц/цикл.

В качестве дефлекторов испытывалось несколько экземпляров кристаллов: два кремниевых, вырезанных вдоль кристаллографической плоскости (111), и один гер-

маниевый, вырезанный вдоль плоскости (110). Размеры кристаллов были следующие: $Si - 1 : 0,5 \times 15 \times 60 \text{ мм}^3$, $Si - 2 : 0,55 \times 15 \times 60 \text{ мм}^3$, $Ge : 0,6 \times 15 \times 45 \text{ мм}^3$. Довольно протяженная длина кристаллов определяется значительной величиной требуемого угла поворота (существует оптимальный радиус изгиба и длина: если кристалл слишком короткий — частицы деканализируют из-за центробежного эффекта, слишком длинный — происходит сильное рассеяние на электронах и ядрах, т.е. доминирует обычное деканализирование).

Для изгиба кристаллов была применена конструкция, показанная на рис. 8. В результате первых испытаний было выяснено, что с помощью кристалла можно осуществить деление пучка протонов в рабочем режиме магнитооптических каналов: $I_{23} = 10^{13}/\text{цикл}$, $I_{21} = 10^7/\text{цикл}$, размещая кристалл в области гало пучка, чтобы потери частиц не превышали допустимую величину $\sim 10^{10}/\text{цикл}$ ($0,1\% I_{23}$).

Опыт последующих лет работы доказал высокую надежность кристаллической станции деления пучка. Кремниевый кристалл Si-1 отработал без замены 10 лет: выдержав поток частиц свыше $10^{18}/\text{см}^2$, он сохранил отклоняющие свойства без значительных ухудшений. Впоследствии в каналах было установлено еще несколько кристаллов [13,14,18], назначение которых отражено табл.3. Коэффициент одновременности работы физических установок вырос в среднем на 30%.

В этих условиях пучок отклонялся кристаллами на значительно меньший угол, $\Theta \sim 10$ мрад, что позволило увеличить интенсивность формируемых кристаллами пучков до $10^8 - 10^{10}$ частиц в цикле. Важно отметить, что возникающий при небольших углах изгиба кристалла фон упругорассеянных протонов, по данным измерений интенсивметров установленных в каналах частиц, не превышал 3% от интенсивности каналированного пучка. Измерения фонового пучка проводились обычно путем разориентации кристалла, и кроме рассеяния на кристалле, учитывали вклад вторичных частиц, образующихся от взаимодействия первичных протонов с апертурами магнитов, остаточным газом и разделительными фольгами вакуумной системы. Это доказывает преимущества (по параметру величины интенсивности) применения кристаллов над методом формирования пучка за счет дифракционного рассеяния в мишени. Позднее это было подтверждено и при выводе пучка кристаллом из ускорителя (раздел 4.2).

В заключение отметим, что формируемые кристаллами пучки имеют ряд положительных особенностей, они:

- а) легко перестраиваются в широком диапазоне интенсивности,
- б) обладают малым эмиттансом,
- в) имеют удивительную по сравнению с обычными пучками пространственную стабильность.

Создание экспериментальных зон нового типа

Возможность отклонения пучка заряженных частиц изогнутым монокристаллом на большой угол, доказанная в экспериментах гл.2, позволяет на очень короткой базе нетрадиционным образом организовывать выведенные пучки для проведения

физических экспериментов, как на любых существующих, так и на строящихся ускорителях. Изогнутый на 150 мрад (рекордная на сегодня величина) монокристалл кремния ориентации (110) длиной 100 мм был использован в таком качестве в ИФВЭ для создания новой тестовой зоны [22]. Схема расположения оборудования представлена на рис. 23. Размещенный на трассе канала 8 кристалл Si_1 вводит в гало интенсивного 70-ГэВ пучка и выводит за двухметровую биологическую защиту пучок интенсивностью $\sim 10^6$ протонов в секунду, что достаточно для проведения широкой программы методических исследований.

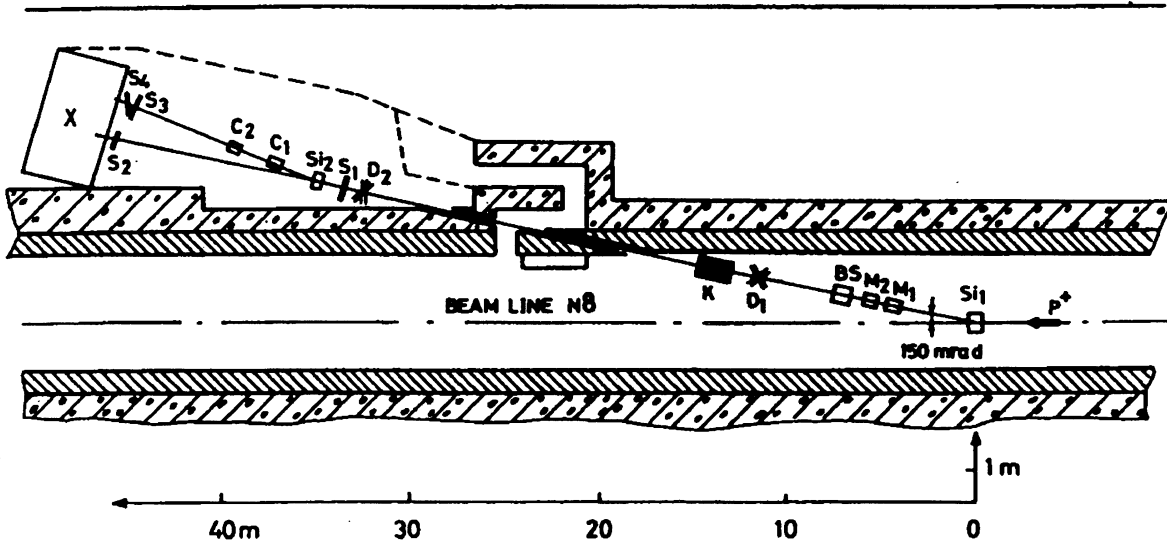


Рис. 23. Расположение канала частиц нового типа и созданной на его основе установки для испытания кристаллов. Si_1, Si_2 — отклоняющий и исследуемый кристаллы кремния; M_1, M_2 — корректирующие магниты; BS — пучковый затвор; D_1, D_2 — пропорциональные камеры; K — коллиматор; $S_1 - S_4$ — сцинтилляционные счетчики; C_1, C_2 — слои ядерной эмульсии; X — поглотитель пучка.

Фоновые частицы в направлении отклоненного кристаллом пучка в несколько десятков раз ниже по энергии ($p_s \sim 3$ ГэВ/с), чем первичный пучок. Избавиться от таких вторичных частиц не представляет труда. Это достигается с помощью небольших корректирующих магнитов M_1, M_2 , коллиматора K и узкого коллимированного отверстия в железобетонной защите канала.

Аппаратура диагностики пучка включает две подсистемы: подсистему измерения профиля пучка; подсистему измерения интенсивности пучка.

Подсистема измерения профиля пучка использует две 2-координатные пропорциональные камеры D1 и D2 с шагом 5 мм, причем D1 с катодным съемом сигнала, D2 — с анодным. Объем камер заполняется CO_2 . Каркасы предварительной электроники, размещаемые непосредственно у камер, и регистрирующая электроника в стандарте СУММА аналогичны используемым в системе диагностики пучка каналов частиц ускорителя ИФВЭ [6]. Подсистема измерения интенсивности пучка

основана на использовании нескольких сцинтилляционных счетчиков, включенных на совпадения.

В первом сеансе работы тестовой зоны с пучком интенсивность протонного пучка в канале № 8 была равна $2 \cdot 10^{11}$ р/с, на кристалл падало $\sim I = 2 \cdot 10^{10}$ р/с. В этих условиях количество отклоненных кристаллом частиц, измеренное сцинтилляционными счетчиками в экспериментальной зоне, составило $\sim 5 \cdot 10^5$ р/с, что согласуется с расчетом. Ориентационно-независимая компонента сигнала (фоновые частицы) на счетчиках размером 10×10 см² не превышала 3% от интенсивности каналированного пучка. Профили отклоненного пучка, измеренные камерой D2, показаны на рис. 24.

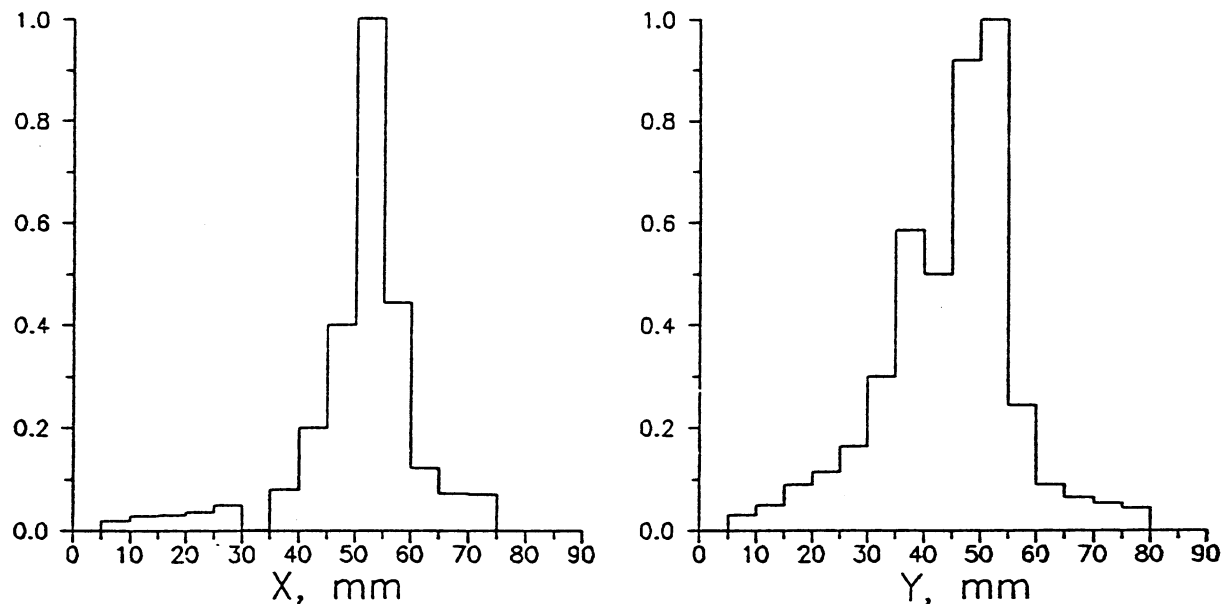


Рис. 24. Профили пучка в горизонтальной (x) и вертикальной (y) плоскостях.

Созданная тестовая зона позволяет продолжить эксперименты по каналированию, в частности по изучению каналирующих свойств кристаллов, повышению эффективности отклонения и фокусировки пучков, а также тестированию детекторов. Новая зона практически не потребляет электрической энергии (заметим, типичный электромагнитный канал на 70 ГэВ имеет мощность несколько мегаватт). Она позволяет работать одновременно с другими каналами, не оказывая существенного воздействия на работу других физических установок. Создание подобных систем не требует больших капитальных затрат (стоимость одного кристалла ~ 100 \$, стоимость нескольких заменяющих его магнитов ~ 1 млн. \$).

При необходимости, если того требуют геометрические условия, для транспортировки пучков можно использовать системы, содержащие не один, а несколько последовательно расположенных изогнутых кристаллов. Такая возможность была экспериментально показана в [12], а также демонстрируется на рис. 18.

В работе [11] сформулированы конкретные предложения по применению кристаллических систем транспортировки пучка в экспериментальной зоне создаваемого ускорителя УНК и на других крупных ускорителях.

Диагностика пучка

В работе [19] показано, что с помощью изогнутого монокристалла можно получить полную информацию о характеристиках пучка (эмиттанс, профили, гало, разброс по импульсам).

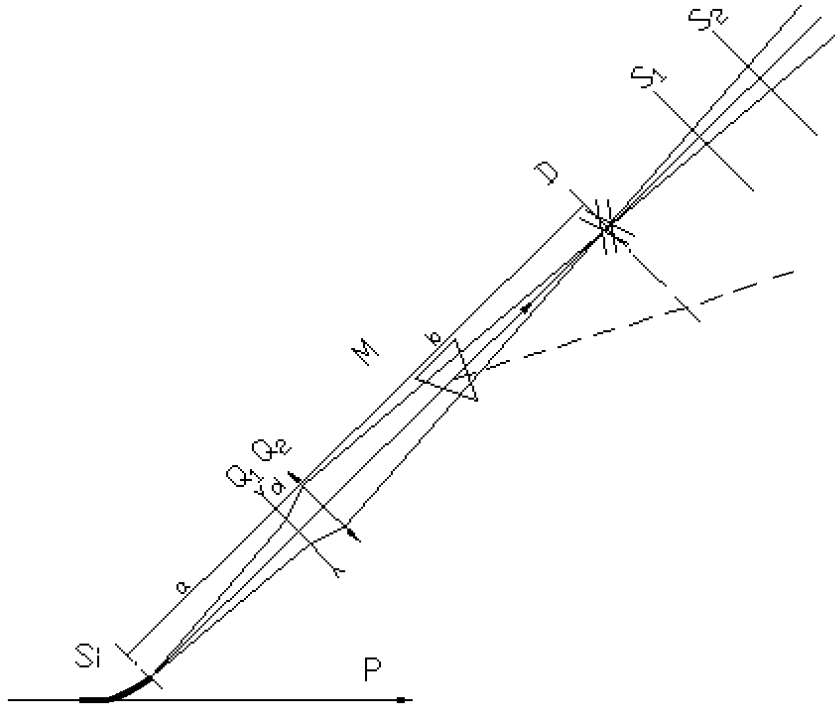


Рис. 25. Принцип измерения характеристик пучка: Si — изогнутый монокристалл; D, S1, S2 — регистрирующая аппаратура; Q_1, Q_2 — дублет квадрупольных линз; M — отклоняющий магнит (сплошные кривые — ход лучей в горизонтальной плоскости, штриховая — дисперсия).

Схема измерения представлена на рис. 25. В интенсивный пучок высокоэнергетичных частиц на координату (x) с ориентацией (x') вводится изогнутый монокристалл кремния Si. Отклоненная кристаллом часть пучка направляется на ось протяженной магнитооптической системы (линзы Q_1, Q_2 ; магнит M) и регистрируется в конце этой системы аналоговой ионизационной камерой D и сцинтилляционными счетчиками S1 и S2, включенными на совпадения. Аксептанс магнитооптической системы позволяет регистрировать все отклоненные каналированные частицы, в то же время обеспечивается полная очистка от фона вторичных частиц, возникающих при взаимодействии неканалированной фракции первичного пучка с веществом кристалла.

В этих условиях количество частиц, регистрируемых счетчиками, равно

$$I(x, x') = \left(\int_{-H/2}^{H/2} \int_{-\theta_c}^{\theta_c} \rho(x, x') dx dx' \right) \times \eta_D(L, R, p),$$

где $\rho(x, x')$ — фазовая плотность пучка в координатно-угловом пространстве; $\eta_D(L, R, p)$ — фактор деканализирования, зависящий от длины кристалла, радиуса изгиба и импульса отклоненных частиц. С учетом малости аксептанса кристалла можно записать:

$$I(x, x') = \rho(x, x') \times 2\theta_c H \times \eta_D,$$

и тогда

$$\rho(x, x') = \frac{1}{2\theta_c H \eta_D} \times I(x, x'),$$

т.е. фазовая плотность пучка в точке (x, x') пропорциональна количеству отклоненных кристаллом частиц, если только увеличение температуры кристалла из-за нагрева его пучком не приводит к существенному изменению каналирующих свойств.

Измерение пространственно-угловых характеристик пучка. Описанная схема измерения характеристик пучка была реализована на одном из каналов частиц ускорителя ИФВЭ. Часть пучка протонов с энергией 70 ГэВ, захваченная в режим каналирования, отклонялась на угол 13 мрад и направлялась в канал, оптика начальной части которого обеспечивает реализацию схемы, приведенной на рис. 25.

Измерение фазовой плотности $\rho(x, x')$ осуществлялось при интенсивности выведенного пучка 3×10^{12} /цикл. На рис. 26а представлены результаты измерения $\rho(x, x')$ в виде эквипотенциальных линий на плоскости (x, x') , соединяющих экспериментальные точки. Эти точки получены угловым сканированием пучка на каждом шаге перемещения кристалла по горизонтали. Пять замкнутых линий, начиная от центра, ограничивают фазовый объем пучка на уровне 0,75; 0,5; 0,25; 0,1; 0,01 от максимальной плотности. При этом значение эмиттанса пучка, соответствующее этим уровням, равно: (0,26; 0,68; 1,2; 1,6; 4,2) $\times \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$.

Перемещая кристалл, оптимально ориентированный по углу, можно измерить значение $\rho(x, 0)$, т.е. профиль пучка $N(x)$, в большом динамическом диапазоне. Результаты измерения профиля $N(x)$ до величины 10^{-7} от максимума представлены на рис. 26б. Следует отметить, что возможность измерения гало интенсивного пучка до столь низкого уровня (10^{-7}) достигается благодаря четкой ориентационной зависимости полезного сигнала на детекторах. При разориентации кристалла на угол, превышающий аксептанс магнитооптической системы, каналированный пучок исчезает и, таким образом, легко отличим от фонового сигнала.

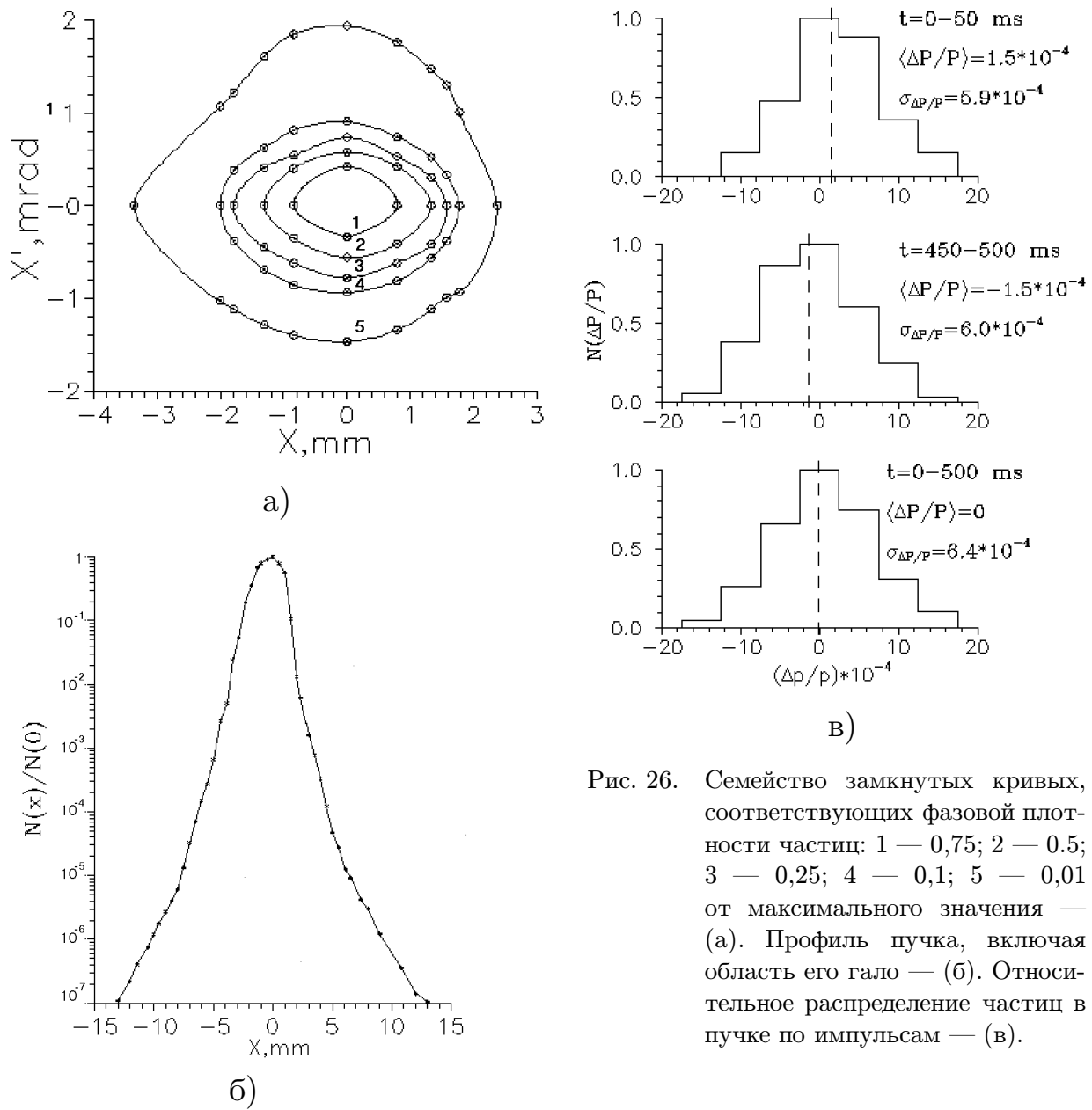


Рис. 26. Семейство замкнутых кривых, соответствующих фазовой плотности частиц: 1 — 0,75; 2 — 0,5; 3 — 0,25; 4 — 0,1; 5 — 0,01 от максимального значения — (а). Профиль пучка, включая область его гало — (б). Относительное распределение частиц в пучке по импульсам — (в).

Измерение распределения частиц по импульсам. Свойства кристалла формировать пучок малого эмиттанса в сочетании со спектрометрическими возможностями магнитооптического канала позволили также осуществить прецизионное измерение распределения частиц по импульсам. На детекторе D, размещенном в месте изображения отклоненного кристаллом пучка (рис. 25) координата x любой частицы (без учета хроматических aberrаций) определяется соотношением

$$x = q_{11}x_0 + q_{13}(\Delta p/p), \quad (12)$$

q_{11} — коэффициент линейного увеличения; q_{13} — линейная дисперсия; $x_0 \leq H/2$ — начальная координата вылетевшей из кристалла частицы; $\Delta p/p$ — относительный разброс частиц по импульсам.

Если первый член в (12) много меньше второго, то размер изображения пучка будет целиком определяться разбросом частиц по импульсам, а форма его профиля соответствовать распределению частиц по импульсам. В данном конкретном случае ($q_{11} = 1/2$, $q_{13} = 25$ мм на % $\Delta p/p$, $H = 0,5$ мм) это условие будет выполняться для $\Delta p/p \gg 5 \times 10^{-5}$.

Профиль пучка в изображении измерялся аналоговой ионизационной камерой D с шагом 1,25 мм. Восстановленное с его помощью распределение частиц в пучке по импульсам показано на рис. 26в. Величина импульсного разброса в пучке в течение вывода составила $\sigma_{\Delta p/p} = 6,4 \times 10^{-4}$.

Описанный способ измерения характеристик пучка может применяться на ускорителях для определения параметров интенсивных пучков, где использование счетных методов регистрации частиц невозможно. Особенно перспективной представляется возможность измерения таким способом гало циркулирующего пучка на больших адронных коллайдерах, где проблема потерь частиц чрезвычайно остра.

4.2. Исследование высокоэффективного вывода протонов из У-70 с помощью монокристалла

Изогнутые монокристаллы успешно применяются для вывода пучка из ускорителей, в том числе из крупных современных ускорителей-коллайдеров SPS, TEVATRON. В ИФВЭ использование монокристаллов для вывода части протонного пучка энергией 70 ГэВ в каналы отрицательных частиц стало обычной практикой.

Одним из важнейших параметров вывода является его эффективность. Накопленные экспериментальные данные (см., например, [26]) и теоретический анализ показывают, что решающим фактором, определяющим эффективность вывода, является многократность прохождения пучка через кристалл. Это происходит из-за того, что при медленном наведении пучка глубина заброса частиц на первом обороте мала и составляет доли микрона, в то время как разрушенный при обработке приповерхностный слой равен нескольким микронам. Как показано в разделе 2, угловые деформации решетки из-за поверхностных дефектов могут приводить к возникновению слоя толщиной около 50 микрон, неэффективного для каналирования частиц высоких энергий. Чтобы преодолеть неэффективный для каналирования слой и радикально увеличить эффективность вывода, необходимо обеспечить возможность увеличения кратности прохождения частиц через кристалл (на возможность многооборотного вывода указывали в начале 90-х В.М.Бирюков и А.М.Таратин). Для исследования такого режима вывода на ускорителе ИФВЭ были использованы короткие кристаллы кремния длиной 7 и 5 мм и углами изгиба 1,7 и 1,5 мрад соответственно [27,28,29].

Изгиб кристалла малой длины с выполнением ряда условий, связанных с его установкой в ускоритель, представляет собой определенную проблему. В первом

варианте конструкции мы использовали кристалл Si(111) в виде короткой пластины большой высоты размерами $0,5 \times 40 \times 7 \text{ мм}^3$ (толщина, высота, длина вдоль пучка).

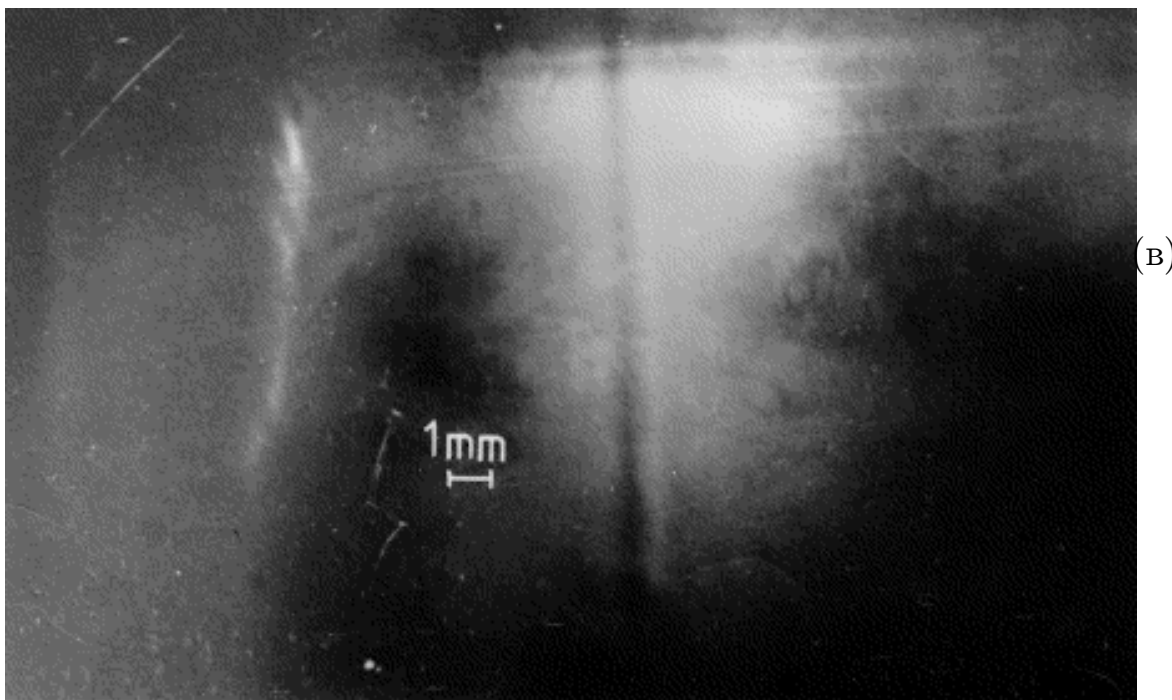
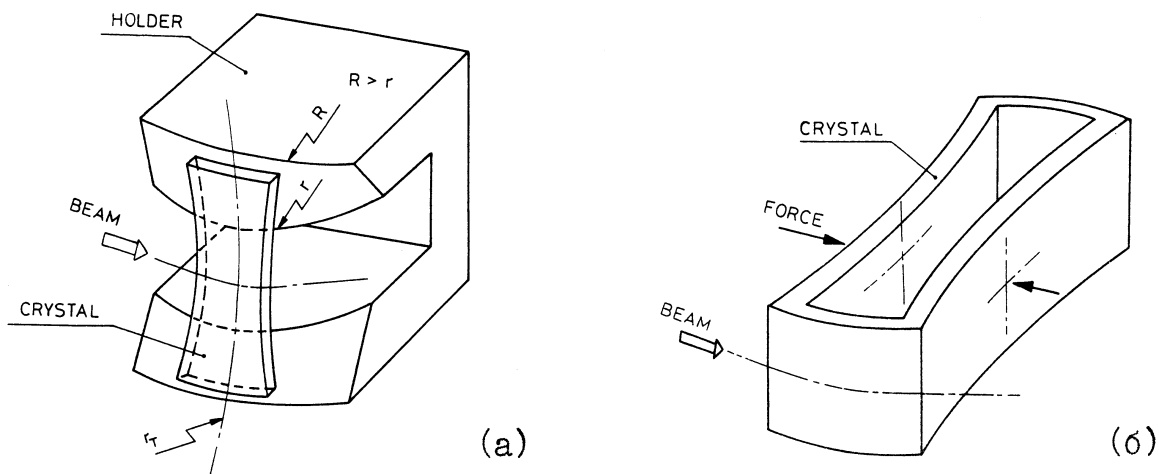


Рис. 27. (а) Схема изгиба кристалла, имеющего вид короткой, но высокой пластины, с помощью металлического кристаллодержателя. (б) Изогнутый кристалл, полученный сжатием монолитного куска кремния, вырезанного в виде буквы "О". (в) Результаты тестирования кристалла (а) на выведенном пучке протонов. Справа видно изображение падающего пучка с вертикальной полосой тени от кристаллической пластины, слева — изображение отклоненного пучка.

Такой кристалл изгибался с помощью металлического держателя, имеющего прорезь в центральной части размером 20 мм для прохождения пучка (рис. 27а). Для уменьшения неизбежной в этой конструкции угловой деформации (“твиста”) по высоте использовался поперечный изгиб пластины, создаваемый имеющим форму параболического гиперboloида кристаллодержателем. Изогнутый таким образом кристалл предварительно тестировался на выведенном пучке протонов энергией 70 ГэВ. На рис. 27в показан отклоненный этим кристаллом пучок, зарегистрированный с помощью ядерной фотоэмульсии, расположенной в 4 м за кристаллом. Определенная таким образом величина “твиста” при изгибе выражается формулой $\alpha(y) = 5y^2$, где α [мкрад], y [мм] — расстояние от центра кристалла по высоте, и была использована в расчетах эффективности вывода пучка из ускорителя У-70.

Позднее с помощью специалистов ПИЯФ была разработана иная, более перспективная технология получения кристалла без “твиста”. Она основана на изготовлении кристалла из монолитного куска в виде буквы “О”. Необходимый изгиб создается путем сжатия кристалла в его центральной части (рис. 27б). Размеры рабочей зоны кристалла, имеющей ориентацию Si(110), равны $0,6 \times 5 \times 5$ мм³ (толщина, высота, длина вдоль пучка).

При планировании эксперимента мы исходили из того, что угол изгиба ~ 2 мрад недостаточен для прямого вывода пучка из ускорителя. Поэтому было решено опробовать кристалл в существующей схеме медленного вывода в качестве первого септум-магнита. Кристалл размещается в свободном прямолинейном промежутке № 19 ускорителя У-70 перед септум-магнитом ОМ-20 медленного вывода, толщина перегородки которого равна ~ 8 мм. Специально создаваемое локальное искажение орбиты обеспечивает подведение пучка к кристаллу, который находится в рабочем положении на расстоянии 60–65 мм от равновесной орбиты.

Заброс пучка в апертуру ОМ-20 и его проводка по трассе вывода контролировались с помощью комплексной системы диагностики пучка, включающей в себя телевизионную систему наблюдения, мониторы потерь, профилометры, измерители интенсивности. Все приборы диагностики предварительно тестировались в режиме быстрого вывода и калибровались с помощью трансформаторов тока. Согласно результатам калибровки, абсолютная ошибка измерений интенсивности выведенного пучка не превышала 2%. Фоновые условия периодически измерялись при отсутствии кристалла и наличии его на рабочем месте путем разориентации. Согласно измерениям уровня фона, вместе с шумами аппаратуры он не превышал 3% от величины каналированного пучка. Доля наведенного на кристалл пучка определялась разностью измерений трансформаторами тока интенсивности циркулирующего пучка до и после осуществления вывода с систематической ошибкой $\sim 1\%$. С учетом всех факторов общая систематическая ошибка измерений эффективности составляла $\simeq 4\%$. Эффективность вывода (отношение интенсивности выведенного пучка к величине интенсивности, наведенной на кристалл) определялась в каждом цикле работы ускорителя. Для каждой экспериментальной точки набиралась статистика в течение нескольких сотен циклов. Для получения равномерного наведения пучка на кристалл использовался монитор обратной связи на основе ФЭУ с сцинтиллятором.

Интенсивность ускорителя за время проведения опыта с первым кристаллом менялась в диапазоне от 1×10^{12} до $1,5 \times 10^{12}$ протонов в цикле. Величина интенсивности, сбрасываемой на кристалл, варьировалась в процессе эксперимента от 20 до 100%. Было измерено распределение интенсивности в пучке по радиусу и установлено, что эмиттанс пучка в горизонтальной плоскости равен 2π мм · мрад, а угловая расходимость пучка в месте установки кристалла 0,6 мрад. Наблюдалось также гало, содержащее до 10% пучка. В следующем сеансе работы ускорителя для вывода пучка использовался кристалл без твиста, при этом удалось также устранить гало пучка. Интенсивность ускорителя в этом случае менялась в диапазоне от 1×10^{12} до $2,4 \times 10^{12}$ протонов в цикле. Величина интенсивности, сбрасываемой на кристалл-2, варьировалась в процессе эксперимента от 16 до 92%.

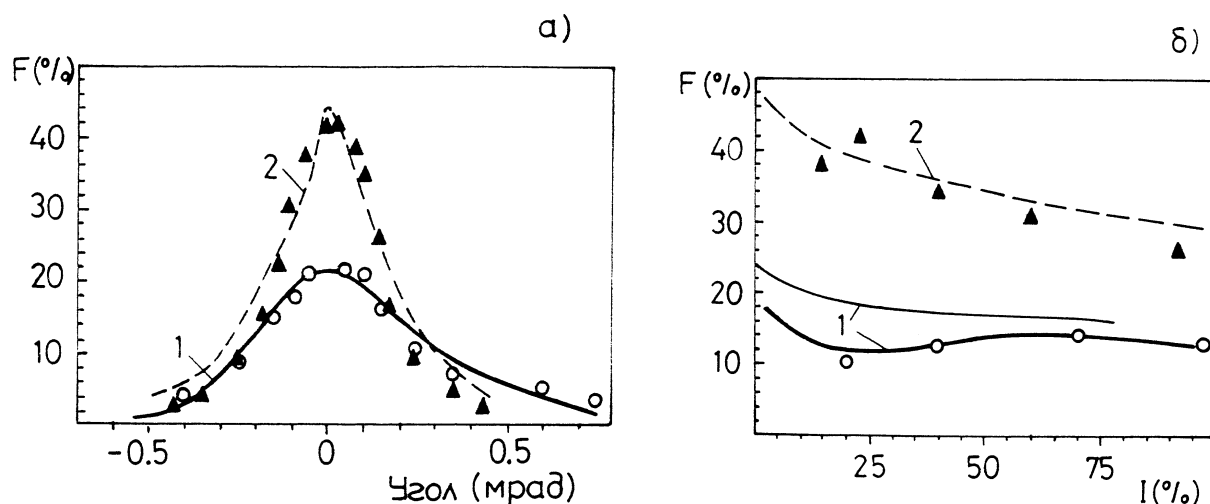


Рис. 28. (а) Экспериментальные зависимости эффективности вывода пучка F кристаллами от ориентации первого (o) и второго (♠) кристаллов в сравнении с теорией (кривые 1 и 2, соответственно). (б) Измеренные зависимости эффективности вывода пучка F кристаллами от интенсивности пучка I , наведенного на первый (o) и второй (♠) кристаллы (в процентах от пучка, циркулирующего в У-70). Показаны также соответствующие результаты моделирования: толстая и тонкая кривые 1 (без учета гало и с учетом гало 10%) — для первого кристалла, и кривая 2 — для второго кристалла.

Прямым доказательством того, что выводимый пучок является каналированным, служит так называемая ориентационная кривая — зависимость интенсивности выведенного пучка от ориентации кристалла по углу. На рис. 28а ориентационные кривые для обоих кристаллов представлены в сравнении с результатами моделирования [27], учитывающего транспортировку частиц в кристалле (программа САТСН) и многооборотное движение в ускорителе. Ширина этих кривых определяется сверткой углового распределения частиц в разбухшем от кратных прохождений через кристалл пучке и аксептансом кристалла. Видно, что для кристалла-2 он заметно меньше из-за отсутствия твиста.

Основной задачей эксперимента было определение эффективности вывода. Проводились измерения как интегральной эффективности, т.е. за все время вывода, так и дифференциальной — за конкретные промежутки времени вывода. На рис. 28б показаны экспериментальные данные измерения эффективности вывода при разной доле наводимого на кристаллы пучка и соответствующие результаты моделирования. Видно, что имеется хорошее согласие между экспериментом и расчетами. При работе с первым кристаллом максимальная интегральная эффективность вывода составила $(14 \pm 1,5)\%$, а пиковая величина эффективности достигала $(23,4 \pm 2,5)\%$. Для второго кристалла максимальная интегральная эффективность вывода была зафиксирована для небольшой доли 23% забираемого из ускорителя пучка и была равна $(42 \pm 2)\%$. Существенный выигрыш в эффективности для второго кристалла, помимо ликвидации гало в пучке, связан с улучшением характеристик самого кристаллического дефлектора. В нем отсутствуют твист и вещество держателя вблизи пучка. Уменьшен размер кристалла по высоте и, как следствие, минимизированы потери отклоненного пучка по трассе вывода. Малость размеров отклоненного кристаллом-2 пучка в сравнении с апертурой ближайшего септум-магнита ОМ-20 демонстрируется на рис. 29.

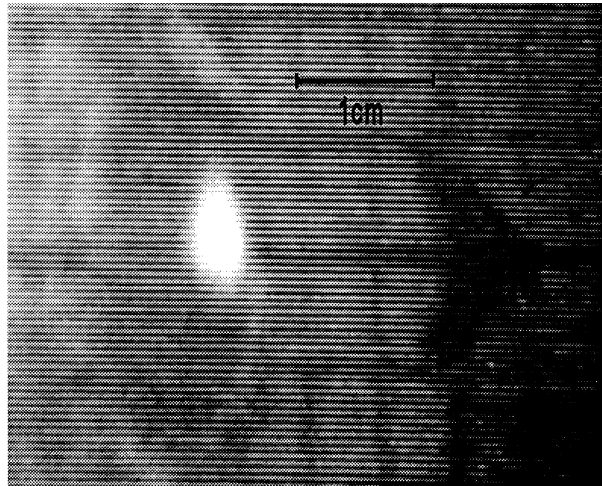


Рис. 29. Изображение отклоненного кристаллом-2 пучка (яркое пятно размерами $3 \times 5 \text{ мм}^2$) в апертуре септум-магнита ОМ-20, расположенном в 12 м за кристаллом.

При увеличении доли забираемой интенсивности в случае со вторым кристаллом интегральная эффективность падает из-за значительного дрейфа (до 0,3 мрад) угла падения частиц на кристалл при наведении пучка бампом, что подтверждается расчетами (для кристалла-1 этот эффект менее заметен из-за наличия гало в пучке, как это видно из рис. 28б). Дифференциальная эффективность по этой же причине меняется во времени (см. рис. 30), особенно это проявляется при большой доле забора пучка. Характерно, что пиковая эффективность составила величину $(47 \pm 3)\%$ вне зависимости от доли забираемого пучка.

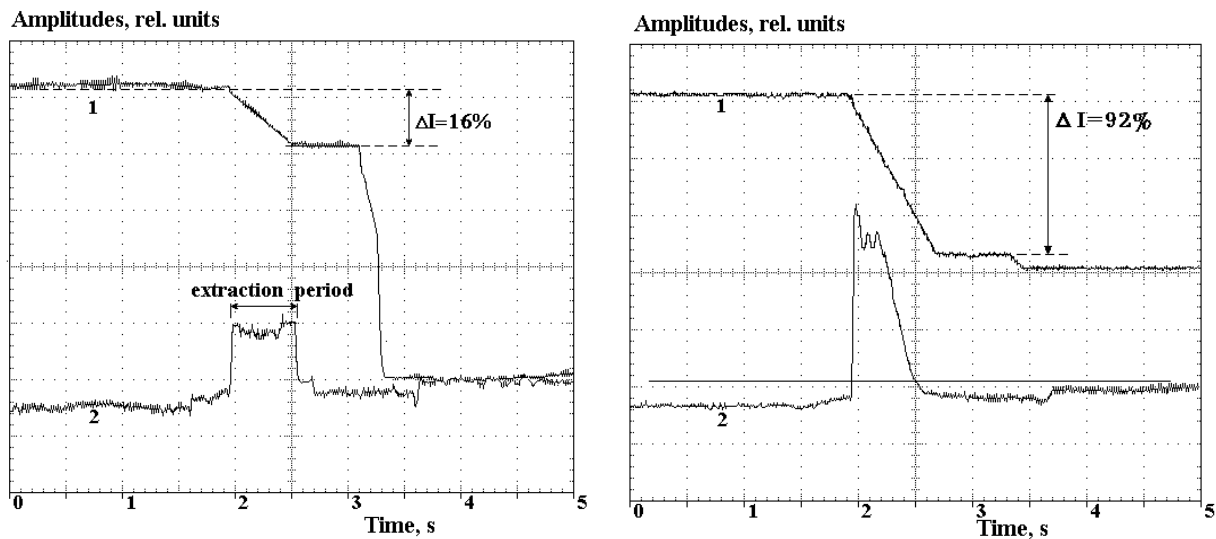


Рис. 30. Временные зависимости процесса вывода для разной доли наводимого пучка: 1 — интенсивность циркулирующего пучка; 2 — интенсивность выводимого кристаллом-2 пучка.

Максимальная интенсивность пучка, выведенного кристаллом-2 при наведении на него $2,2 \times 10^{12}$ протонов в цикле, была равна 6×10^{11} протонов за цикл, что на 5 порядков выше полученных ранее результатов. Кристалл, находясь в пучке в течение нескольких суток, успешно выдержал радиационные и тепловые нагрузки, нагреваясь, по оценкам, до нескольких сотен градусов. Выведенный пучок был сформирован с помощью магнитооптического канала на мишень экспериментальной установки (комплекс меченых нейтрино), где его размеры составили 4×4 мм² на полувысоте.

Полученные нами экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с теорией, из которой следует, что на ускорителях и коллайдерах более высоких энергий можно достичь эффективности вывода 70-90% при использовании коротких кристаллов. Такая эффективность делает весьма перспективным их применение для задач коллимирования и вывода пучков.

Заключение

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Предложен и реализован эксперимент по исследованию эффективности торцевого и объемного захватов частиц в режим каналирования. Объемный захват впервые исследован столь детально, определена зависимость его эффективности от радиуса изгиба кристалла. Получено экспериментальное подтверждение существования особого вида объемного захвата, обусловленного градиентом кривизны кристалла.

2. Исследована динамика каналирования частиц в прямом кристалле. Определено влияние процессов реканалирования в зависимости от начальной расходимости падающего пучка. Показано, что в широких пучках наступает состояние динамического равновесия, когда количество каналированных частиц не убывает с ростом длины кристалла.

3. Оригинальным методом, в одних экспериментальных условиях измерена длина деканалирования 70 ГэВ протонов в изогнутых кристаллах кремния ориентации (111) и (110). Этот единственный опыт, в котором наиболее прецизионное измерение осуществлялось для двух плоскостных каналов, позволил сделать важные теоретические обобщения.

4. Изучено влияние дефектов реальных кристаллов на характеристики процесса отклонения частиц высоких энергий (данные в настоящее время единственны): исследовано деканалирование на дислокациях кристаллической решетки; проверены каналирующие свойства кремния различной электропроводности; обнаружены тонкие эффекты влияния поверхностных дефектов на характеристики каналирования в приповерхностных слоях (толщиной до ~ 50 мкм), учет которых принципиально важен для оптимизации кристаллических септумов, используемых при выводе пучка из ускорителей.

5. Исследована тепловая и радиационная стойкость кристаллов. Показано, что кристаллы способны длительное время сохранять отклоняющие свойства в интенсивных пучках 10^{13} /цикл при прохождении потока частиц 10^{19} /см², нагреваясь до температуры в сотни градусов. При этом для решения технических проблем было предложено и испытано несколько способов изгиба и крепления кристаллов.

6. В коллаборации с сотрудниками ПИЯФ проведены уникальные опыты по фокусировке пучков кристаллами, имеющими специальную форму торца: пучок протонов с энергией 70 ГэВ размером 2 мм фокусировался на расстоянии до 0,5 м в узкую линию шириной до 40 мкм. При обратном направлении движения частиц в кристалле (фокусировка из точки в параллель) было продемонстрировано эффективное (15%) отклонение расходящегося пучка (с угловой расходимостью много больше, около 50 раз, угла Линдхарда) фокусирующим кристаллом. Таким образом, открываются перспективы формирования кристаллами не только протонных, но и пучков вторичных частиц на ускорителях. Появляются также заманчивые возможности использования кристаллов в экспериментах с короткоживущими частицами высоких энергий.

7. Экспериментально показана возможность применения изогнутых кристаллов в сочетании с магнитной оптикой для измерения основных параметров (эмиттанс, профили, гало, разброс по импульсам) интенсивных пучков, где использование счетных методов регистрации частиц невозможно. В измерении гало на уровне 10^{-7} и $\Delta p/p \leq 10^{-4}$ продемонстрированы уникальные возможности этого метода.

8. Осуществлено практическое применение кристаллов в каналах частиц для повышения эффективности использования ускорителя У-70: кристаллические станции деления пучка в течение ряда лет обеспечивают одновременную работу нескольких физических установок. Создан канал транспортировки протонов нового типа без

потребления электроэнергии, организованный с помощью изогнутого на гигантский угол 150 мрад кристалла, с интенсивностью пучка 10^6 частиц за цикл. Следует отметить, что создание подобных систем не требует больших капитальных затрат (стоимость одного кристалла ~ 100 \\$, стоимость нескольких заменяющих его магнитов ~ 1 млн. \\$).

9. Сформулированы требования на кристаллический септум для проведения эксперимента по высокоэффективному выводу из У-70. Подготовлены кристаллические устройства, удовлетворяющие этим требованиям, и проведены экспериментальные исследования многооборотного медленного вывода пучка из У70 с помощью кристалла. Благодаря применению короткого кристаллического септума длиной до 5 мм достигнута высокая кратность прохождения частиц через кристалл и рекордная эффективность вывода 47%. Интенсивность выведенного пучка $6 \cdot 10^{11}$ протонов в цикле на 5 порядков величины превысила известные мировые данные, полученные при выводе кристаллами.

Список литературы

- [1] Biryukov V.M., Chesnokov Yu.A. and Kotov V.I. Crystal Channeling and its Application at High Energy Accelerators. (Berlin: Springer, 1997, 219pp.)
- [2] Бирюков В.М., Котов В.И. и Чесноков Ю.А. Управление пучками заряженных частиц высоких энергий при помощи изогнутых монокристаллов. // УФН. 1994, т. 164, № 10, с.1017.
- [3] Афонин А.Г., Бритвич Г.И., Галяев Н.А., Давыденко Ю.П., Запольский В.Н., Курнаев О.В., Лапицкий С.Н., Лебедев В.Н., Минченко А.В., Пелешко В.Н., Расцветалов Я.Н., Рзаев Р.А., Сахаров В.П., Селезнев В.С., Сычев В.А., Терехов В.И., Холоденко М.А., Чепегин В.Н., Черноусько Ю.С., Чесноков Ю.А., Шарипов С.А. Возможности систем быстрого вывода и транспортировки высокоинтенсивного пучка протонов на мишень нейтринного канала: Препринт ИФВЭ 86-3, Серпухов, 1986.
- [4] Баталов А.А., Ветлицкий И.А., Галяев Н.А., Гресь В.Н., Гришкин Ю.Л., Давыденко Ю.П., Дуденко В.В., Зайцев А.М., Запольский В.Н., Зеленин В.Е., Котов В.И., Кубаровский В.П., Ландсберг Л.Г., Лапицкий С.Н., Лебедев А.В., Ломкаци Г.С., Пичугин В.А., Погорелко О.И., Рзаев Р.А., Сахаров В.П., Селезнев В.С., Склезнев А.В., Смолянкин В.Т., Соляник В.И., Терехов В.И., Филимонов Б.Б., Черный С.А., Чесноков Ю.А. Универсальный канал пучков частиц для установки СФИНКС на ускорителе ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 87-116, Серпухов, 1987.
- [5] Афонин А.Г., Галяев Н.А., Гресь В.Н., Давыденко Ю.П., Дианов В.И., Дышкант А.С., Запольский В.Н., Котов В.И., Крючков В.П., Лапицкий С.Н., Лебедев В.Н., Максимов А.В., Минченко А.В., Мойбенко А.Н., Селезнев В.С.,

Суляев Р.М., Терехов В.И., Холоденко М.А., Черный С.А., Чесноков Ю.А. Универсальный высокоинтенсивный канал пучков частиц на ускорителе ИФВЭ (канал № 22): Препринт ИФВЭ 90-38, Протвино, 1990.

- [6] Галяев Н.А., Гресь В.Н., Давыденко Ю.П., Данцевич Г.А., Лапицкий С.Н., Селезнев В.С., Сенько В.А., Солдатов М.М., Терехов В.И., Чесноков Ю.А. Система измерения профилей пучка на протяженной трассе канала транспортировки заряженных частиц: Препринт ИФВЭ 85-61, Серпухов, 1985.
- [7] Афонин А.Г., Бавижев М.Д., Котов В.И., Логинов А.А., Меркер Э.А., Мокрушин С.Б., Мызников К.П., Рзаев Р.А., Сидоров С.Е., Федотов Ю.С., Чесноков Ю.А., Воробьев С.А., Дзыба А.Р., Розум Е.И. Экспериментальное исследование эффективности поворота пучка протонов с энергией 70 ГэВ с помощью изогнутого монокристалла: Препринт ИФВЭ 87-121, Серпухов, 1987.
- [8] Бавижев М.Д., Баталов А.А., Галяев Н.А., Запольский В.Н., Котов В.И., Меркер Э.А., Рзаев Р.А., Федотов Ю.С., Чесноков Ю.А. Применение изогнутых монокристаллов для формирования протонных пучков умеренной интенсивности на ускорителе ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 87-148, Серпухов, 1987.
- [9] Бавижев М.Д., Баталов А.А., Галяев Н.А., Дзыба А.Р., Запольский В.Н., Котов В.И., Меркер Э.А., Рзаев Р.А., Федотов Ю.С., Чесноков Ю.А. Применение изогнутых монокристаллов для формирования протонных пучков на ускорителе ИФВЭ. — В сб.: Труды 11 Всесоюзного совещания по ускорителям, Т.2. — Дубна, 1989, с.285.
- [10] Бавижев М.Д., Галяев Н.А., Гресь В.Н., Дуденко В.В., Запольский В.Н., Котов В.И., Рзаев Р.А., Чесноков Ю.А. Деление пучка протонов с энергией 70 ГэВ изогнутыми монокристаллами: Препринт ИФВЭ 89-77, Серпухов, 1989.
- [11] Галяев Н.А., Гаркуша В.И., Запольский В.Н., Карташев В.П., Котов В.И., Новоскольцев Ф.Н., Рзаев Р.А., Чесноков Ю.А. Перспективы использования изогнутых монокристаллов при формировании пучков частиц в экспериментальной зоне УНК: Препринт ИФВЭ 89-191, Серпухов, 1989.
- [12] Галяев Н.А., Гресь В.Н., Дуденко В.В., Запольский В.Н., Рзаев Р.А., Терехов В.И., Царик С.В., Чесноков Ю.А. Канал транспортировки частиц высоких энергий с применением элементов кристаллической оптики: Препринт ИФВЭ 90-19, Протвино, 1990.
- [13] Архипенко А.А., Афонин А.Г., Бугорский А.П., Галяев Н.А., Дышкант А.С., Запольский В.Н., Кузьмин Г.Т., Рожков Г.А., Царик С.В., Чесноков Ю.А. Использование кристаллического сплиттера для организации одновременной работы медленного вывода в двух направлениях: Препринт ИФВЭ 90-91, Протвино, 1990.

- [14] Галяев Н.А., Запольский В.Н., Котов В.И., Царик С.В., Чесноков Ю.А. Применение изогнутых монокристаллов в задачах формирования пучков частиц высоких энергий. — В сб.: Проблемы применения эффектов каналирования частиц кристаллами в физике высоких энергий. Материалы Всесоюзного совещания. — Изд-во ИФВЭ, Протвино, 1991 с.29; Proc. of PAC-91, V1, p.192, San Francisco, 1991.
- [15] Гордеева М.А., Гурьев М.П., Денисов А.С., Платонов Ю.П., Скоробогатов В.В., Смирнов А.И., Федин О.Л., Щетковский А.И., Баранов В.И., Галяев Н.А., Дуденко В.В., Запольский В.Н., Котов В.И., Царик С.В., Чесноков Ю.А. Первые результаты исследования фокусировки пучка протонов с энергией 70 ГэВ изогнутым монокристаллом. // Письма в ЖЭТФ. 1991, т.54, с.485.
- [16] Kotov V.I., Baranov V.I., Chesnokov Yu.A., Dudenko V.V., Galyaev N.A., Tsaric S.V., Zapolsky V.N., Denisov A.S., Fedin O.L., Gordeeva M.A., Gurev M.P., Platonov Yu.P., Schetcovsky A.I., Skorobogatov V.V., Smirnov A.I. Results on studying 70 GeV proton beam focusing by bent crystal. — In: Proc. of 15 international conference on high energy accelerators, V1, p.128, Hamburg, 1992.
- [17] Chesnokov Yu.A., Galyaev N.A., Kotov V.I., Tsaric S.V. and Zapolsky V.N. 70 GeV proton volume capture into channeling mode with a bent Si single crystal. // Nucl.Instr. and Meth. 1992, B69, p.247.
- [18] Chesnokov Yu.A., Dudenko V.V., Galyaev N.A., Kotov V.I., Tsaric S.V., Zapolsky V.N. The results on experimental investigation of possibility to use bent crystals in intense high energy beams. — In: Proc. of 15 international conference on high energy accelerators, V1, p.173, Hamburg, 1992.
- [19] Chesnokov Yu.A., Dudenko V.V., Galyaev N.A., Greth V.N., Kim L.A., Kotov V.I., Pudovkin A.K., Terekhov V.I., Tsaric S.V. High energy particle beam diagnostics using bent single crystals. // Nucl. Instr. and Meth. 1992, B63, p.366.
- [20] Biryukov V.M., Chesnokov Yu.A., Galyaev N.A., Kotov V.I., Tsaric S.V., Zapolsky V.N. Investigation of the rechanneling and dynamic equilibrium effects in crystals. // Nucl.Instr.and Meth. 1993, B73 153.
- [21] Biryukov V.M., Chesnokov Yu.A., Galyaev N.A., Kotov V.I., Narsky I.V., Tsaric S.V., Zapolsky Z.N., Fedin O.L., Gordeeva M.A., Platonov Yu.P., Smirnov A.I. On measuring 70 GeV proton dechanneling lengths in silicon crystals (110) and (111). // Nucl. Instrum. Meth. 1994, B 86, p.245.
- [22] Бирюков В.М., Гресь В.Н., Иванов А.А., Котов В.И., Селезнев В.С., Тараканов М.В., Терехов В.И., Царик С.В., Чесноков Ю.А. Канал транспортировки частиц высоких энергий, основанный на применении изогнутого монокристалла: Препринт ИФВЭ 95-14, Протвино, 1995; In: Proceed. of Part. Accel. Conf. PAC-95, V.3, p.1948, (Dallas, 1995)

- [23] Baranov V.I., Biryukov V.M., Bugorsky A.P., Chesnokov Yu.A., Kotov V.I., Tarakanov M.V., Terekhov V.I., Tsarik S.V., Fedin O.L., Gordeeva M.A., Gur'ev M.P., Platonov Yu.P., Smirnov A.I. Highly efficient deflection of a divergent beam by a bent single crystal. // Nucl. Instr. and Meth. 1995, B95, p.449.
- [24] Баранов В.И., Бирюков В.М., Котов В.И., Тараканов М.В., Царик С.В., Чесноков Ю.А. Наблюдение влияния дефектов кристаллической поверхности на характеристики пучка частиц высоких энергий, отклоненного изогнутым монокристаллом: Препринт ИФВЭ 95-13, Протвино, 1995; In: Proceed. of Part. Accel. Conf. PAC-95, V.3, p.1949, (Dallas, 1995)
- [25] Chesnokov Yu.A. Review of IHEP experiments for focusing and deflection 70 GeV proton beam with bent crystals. // Nucl. Instr. and Meth., 1996, B119, p.163, (special issue, proc. of international symposium: Channeling and other Crystal Effects at Relativistic Energy, Aarhus, 1995).
- [26] Biryukov V.M., Chepegin V.N., Chesnokov Yu.A., Kotov V.I., Lyudmirsky E.A., Maishev V.A., Troyanov E.F., Vishnevsky N.K., Zarucheisky V.G. Development of crystal extraction studies at the IHEP accelerator; In: Proceed. of Part. Accel. Conf., (Vancouver, 1997).
- [27] Афонин А.Г., Бирюков В.М., Гаврилушкин В.А., Гресь В.Н., Зеленов Б.А., Котов В.И., Маишеев В.А., Минченко А.В., Терехов В.Н., Троянов Е.Ф., Чесноков Ю.А., Гордеева М.Г., Денисов А.С., Иванов Ю.М., Петрунин А.А., Skorobogatov V.V., Чунин Б.А. Первые результаты экспериментов по высокоэффективному выводу протонов из У-70 с помощью монокристалла. // Письма в ЖЭТФ, 1998 т. 67, с.741.
- [28] Afonin A.G., Arkhipenko A.A., Baranov V.I., Biryukov V.M., Chesnokov Yu.A., Gavrilushkin V.A., Gres V.N., Kotov V.I., Maishev V.A., inchenko A.V.M., Terekhov V.I., Troyanov E.F., Zelenov V.A., Chunin B.A., Denisov A.S., Gordeeva M.G., Ivanov Yu.M., Petrunin A.A., Skorobogatov V.V. High-efficiency multipass extraction of 70-GeV protons from accelerator with a short bent crystal. // Phys. Lett. 1998, B435, 240; In Proc. of 6th European Particle Accelerator Conference, Stockholm, 1998.
- [29] Афонин А.Г., Бирюков В.М., Гаврилушкин В.А., Гресь В.Н., Зеленов Б.А., Котов В.И., Маишеев В.А., Минченко А.В., Терехов В.Н., Троянов Е.Ф., Чесноков Ю.А., Гордеева М.Г., Денисов А.С., Иванов Ю.М., Петрунин А.А., Skorobogatov V.V., Чунин Б.А. Новые результаты по изучению эффективного вывода протонов кристаллом из ускорителя ИФВЭ. // Письма в ЖЭТФ. 1998, т. 68, с.544.

Рукопись поступила 16 ноября 1998 г.

Ю.А.Чесноков.

Экспериментальные исследования каналирования протонов в изогнутых монокристаллах и их применение для управления пучками на ускорителе ИФВЭ.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 17.11.98. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.

Печ.л. 6,4. Уч.-изд.л. 4,9. Тираж 100. Заказ 314. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

