



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 98-15  
ОКУ-ОП

А.Г.Афонин, В.М.Бирюков, В.А.Гаврилушкин, В.Н.Гресь,  
Б.А.Зеленов, В.И.Котов, В.А.Маишеев, А.В.Минченко,  
В.Н.Терехов, Е.Ф.Троянов, Ю.А.Чесноков  
*ИФВЭ, Протвино*

М.Г.Гордеева, А.С.Денисов, Ю.М.Иванов,  
А.А.Петрунин, В.В.Скоробогатов, Б.А.Чунин  
*ПИЯФ, Санкт-Петербург*

**ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ  
ПО ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОМУ ВЫВОДУ ПРОТОНОВ  
ИЗ У-70 С ПОМОЩЬЮ МОНОКРИСТАЛЛА**

Направлено в *Письма в ЖЭТФ*

Протвино 1998

### Аннотация

Афонин А.Г. и др. Первые результаты экспериментов по высокоэффективному выводу протонов из У-70 с помощью монокристалла: Препринт ИФВЭ 98-15. – Протвино, 1998. – 10 с., 5 рис., библиогр.: 11.

Благодаря применению короткого кристалла длиной 7 мм, изогнутого на небольшой угол 1,7 мрад, достигнуто радикальное увеличение эффективности вывода пучка из ускорителя. В отличие от ситуации с длинным кристаллом, здесь начинает работать механизм роста эффективности вывода, связанный с увеличением среднего числа проходов частиц через кристалл. Экспериментально достигнута эффективность вывода частиц около 20%, согласующаяся с данными теории. Получена рекордная величина интенсивности выведенного пучка  $1,9 \cdot 10^{11}$  протонов за цикл.

### Abstract

Afonin A.G. et al. First Results on Experimental Study of Efficient Crystal Extraction at 70 GeV IHEP Accelerator: IHEP Preprint 98-15. – Protvino, 1998. – p. 10, figs. 5, refs.: 11.

A radical increase of extraction efficiency is reached with the use of a short crystal, bent at a small angle of 1,7 mrad. Unlike with a long crystal, another mechanism of the efficiency growth of particles extraction begins to work, which is related to the increase of an average number of particles passing through a crystal. The 20% extraction efficiency which agrees with the theory has been experimentally achieved by means of a 7-mm long crystal. A record value of extracted beam intensity of about  $1,9 \cdot 10^{11}$  ppp is reached.

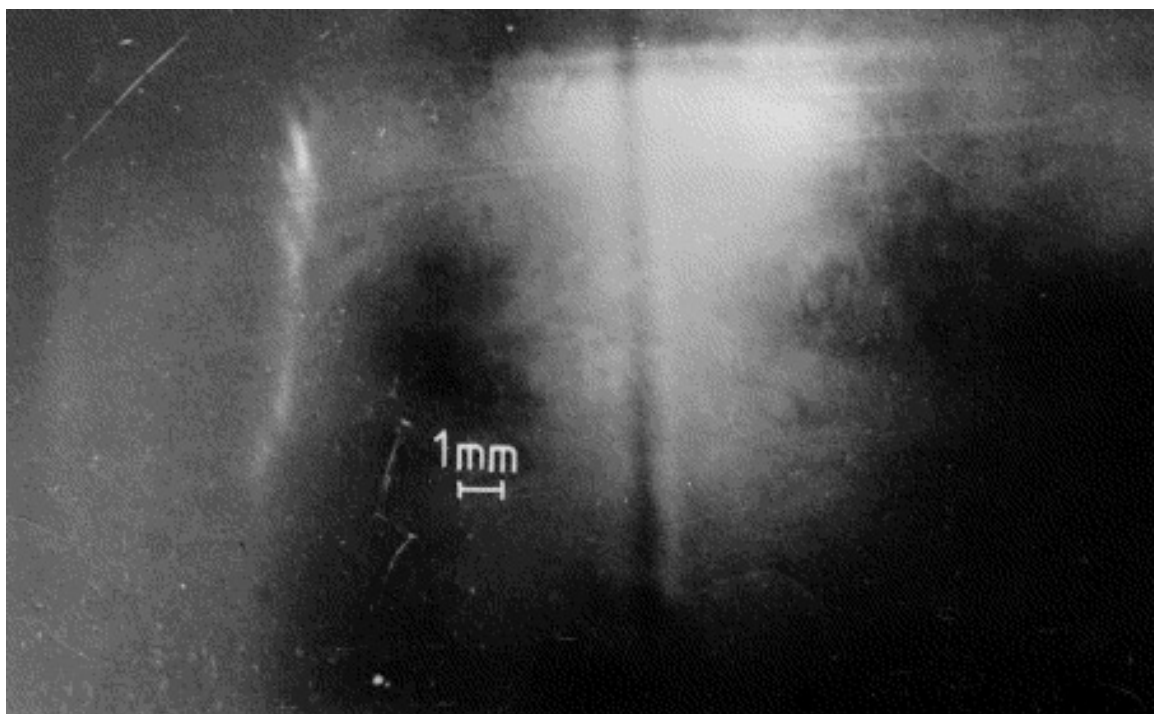
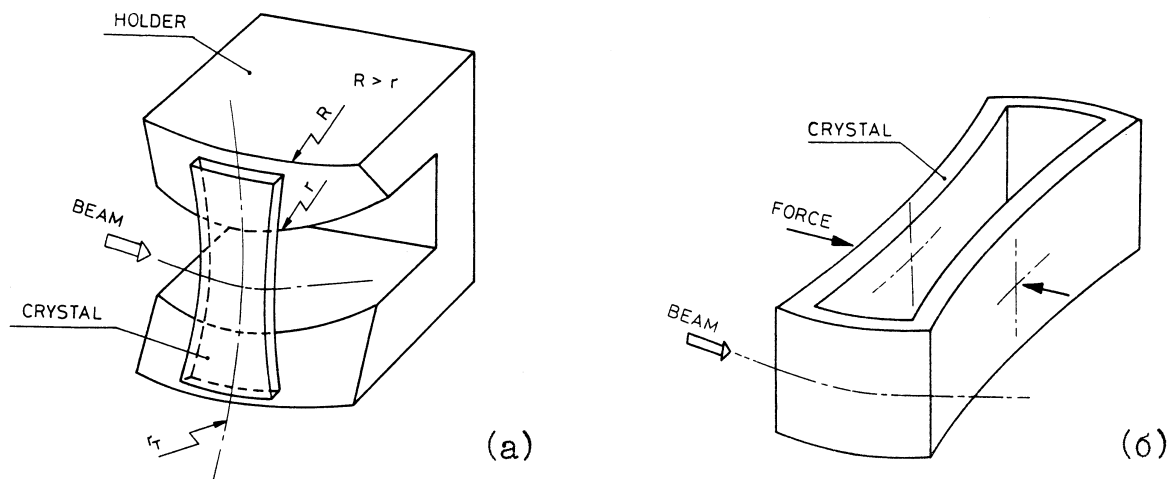
## Введение

Изогнутые монокристаллы уже достаточно давно и успешно применяются для вывода пучка из ускорителей, в том числе из крупных современных ускорителей-коллайдеров [1,2,3]. В ИФВЭ использование монокристаллов для вывода части протонного пучка энергией 70 ГэВ в каналы отрицательных частиц стало обычной практикой [4,5].

Одним из важнейших параметров вывода является его эффективность. Накопленные экспериментальные данные [1,2,3] и теоретический анализ [6] 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 [7], 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 [8,9]. Для исследования такого режима вывода на ускорителе ИФВЭ был использован короткий кристалл кремния длиной 7 мм и углом изгиба 1,7 мрад. Ниже приводятся первые результаты выполненных экспериментов.

## 1. Кристалл

Изгиб кристалла малой длины с выполнением ряда условий, которые должны быть соблюдены исходя из его установки в ускоритель, представляет собой определенную проблему. Мы использовали кристалл  $Si(111)$  в виде короткой пластины большой высоты размерами  $0,5 \times 40 \times 7$  мм<sup>3</sup> (толщина, высота, длина вдоль пучка).



(b)

Рис. 1. (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. 1а). 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. 1в 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:  $\alpha$  (мкрад) =  $5y^2$  (мм) (где  $y$  — расстояние от центра кристалла по высоте) и используется в расчетах эффективности вывода пучка из ускорителя У-70.

В настоящее время в стадии исследования находится 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. 1б). Здесь используется тот же принцип, что и в известной конструкции “U-образный кристалл”, примененный в [1]. Разница заключается в том, что для короткого кристалла форма буквы “О” оказалась более удобной.

## 2. Схема эксперимента

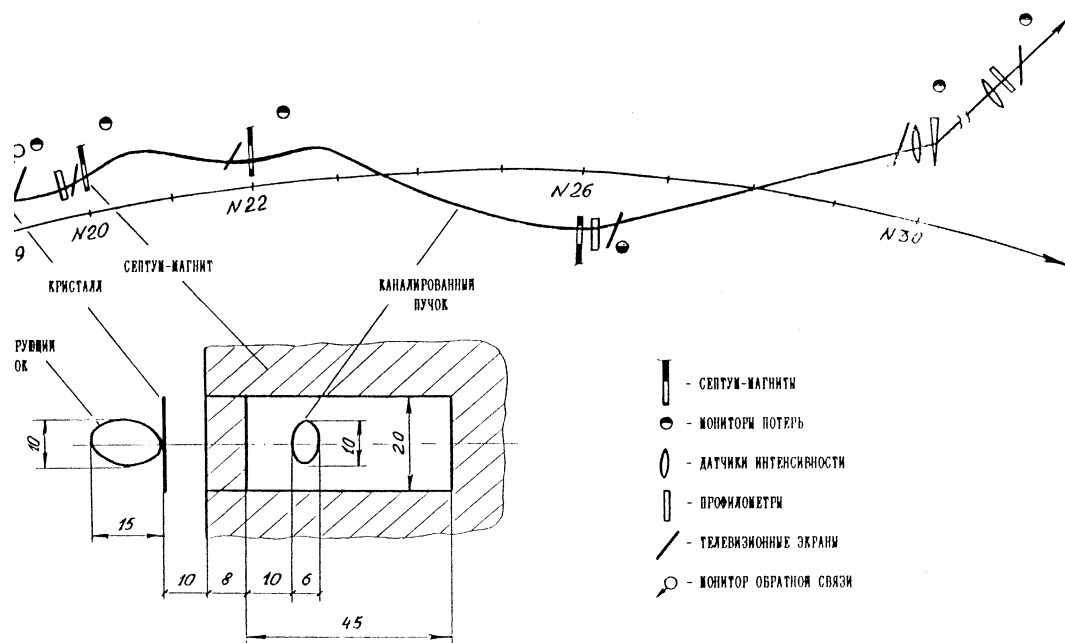


Рис. 2. Схема эксперимента. Размеры даны в мм.

Схема вывода пучка кристаллом представлена на рис. 2. При планировании эксперимента мы исходили из того, что угол изгиба 1,7 мрад недостаточен для прямого вывода пучка из ускорителя. Однако с учетом структурных функций У-70

этот угол может обеспечить отклонение на величину  $\sim 30$  мм. Поэтому было решено включить кристалл в существующую схему медленного вывода. Станция кристаллического дефлектора размещается в свободном прямолинейном промежутке № 19 ускорителя У-70 между тонким септум-магнитом ОМ-18 и септум-магнитом ОМ-20 медленного вывода, толщина перегородки которого равна  $\sim 8$  мм (см. рис. 2). Специально создаваемое локальное искажение орбиты обеспечивает подведение пучка к кристаллу, который находится в рабочем положении на расстоянии 60 – 65 мм от равновесной орбиты, и в то же время удерживает подводимый к кристаллу пучок на достаточном удалении как от ОМ-18, так и от ОМ-20. По расчетам, между циркулирующим пучком и апертурой ОМ-20 имеется расстояние 18 мм, а величина заброса каналированного пучка составляет 28 мм.

Станция кристаллического сплиттера имеет механизмы горизонтального и углового перемещения. Точность установки кристалла на заданную координату составляет 0,1 мм, точность установки по углу — 45 мкрад. Из реальных характеристик ускоренного пучка (горизонтальный эмиттанс  $\sim 2\pi$  мм·мрад, расходимость пучка в месте установки кристалла  $\sim 1$  мрад) и выполненного компьютерного моделирования следует, что эти характеристики обеспечивают надежную информацию при проведении эксперимента. Электродвигатели механизмов перемещения находятся вне вакуумного объема на достаточном удалении от кристалла для снижения радиационных нагрузок.

Станция кристаллического дефлектора снабжена вводимым под пучок люминесцентным экраном. Таким образом с помощью телевизионной камеры обеспечивался визуальный контроль подведения пучка на заданную координату. Кроме того, взаимодействие пучка с кристаллом детектировалось двумя мониторами потерь — ионизационной камерой и монитором на базе ФЭУ.

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, была проведена их калибровка в достаточно широком диапазоне интенсивности.

Наведение пучка на кристалл при проведении эксперимента обеспечивалось как в режиме программирования токов системы локального искажения орбиты с помощью генератора функций, так и в режиме обратной связи по пучку. Для получения равномерного наведения пучка на кристалл в режиме обратной связи использовался монитор обратной связи на основе ФЭУ-93 с сцинтиллятором. Монитор располагался на уровне орбиты пучка на расстоянии  $\sim 10$  м за кристаллом. Общая полоса частот всей трассы обратной связи составляла  $\sim 10$  кГц.

### 3. Экспериментальные результаты

Интенсивность ускорителя за время проведения эксперимента менялась в диапазоне от  $1 \cdot 10^{12}$  до  $1,5 \cdot 10^{12}$  протонов в цикле. Величина интенсивности, сбрасываемой

на кристалл, варьировалась в процессе эксперимента от  $\sim 20$  до  $100\%$  (от  $2 \cdot 10^{11}$  до  $1,5 \cdot 10^{12}$  протонов).

Эксперименты проводились в несколько этапов. Прежде всего было измерено распределение интенсивности в пучке по радиусу. Было показано, что около  $90\%$  всей интенсивности находится в ядре размером  $\sim 15$  мм. Плотное ядро окружено гало, в котором интенсивность медленно падает. Как будет видно ниже, наличие такого гало существенно влияет на эффективность вывода. На рис. 3 показаны фазовые эллипсы пучка на входе в кристалл, смоделированные по результатам измерения размеров пучка.

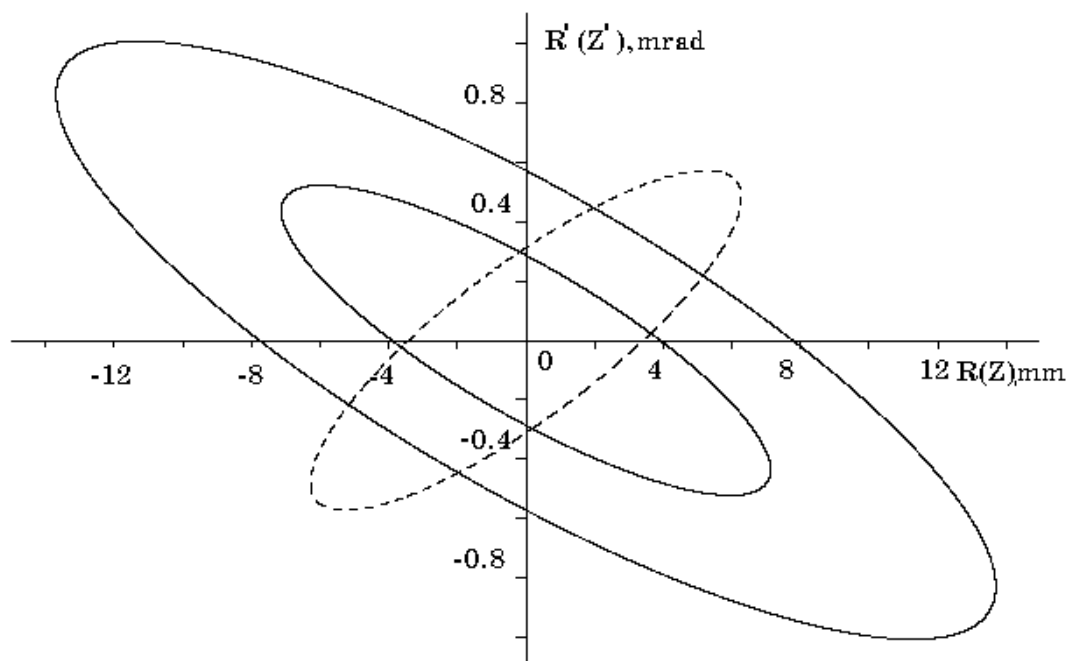


Рис. 3. Фазовый портрет циркулирующего пучка в Y-70 в месте расположения кристалла: две сплошные кривые (обозначающие ядро и гало) – в горизонтальной плоскости, пунктирная кривая – в вертикальной плоскости.

Затем был получен каналированный пучок в апертуре OM-20. Величина заброса находилась в хорошем согласии с результатами расчетов. Угол ориентации кристалла также с хорошей точностью совпал с расчетным. Далее пучок был проведен по всему тракту вывода и каналу транспортировки до района размещения физической установки.

Важнейшей характеристикой каналированного пучка является так называемая ориентационная кривая — зависимость интенсивности выведенного пучка от ориентации кристалла по углу. На рис. 4б представлена экспериментальная ориентационная кривая в сравнении с результатами моделирования.

Другой основной задачей было определение эффективности вывода, как интегральной, т.е. за все время вывода, так и дифференциальной, т.е. измеренной за конкретные промежутки времени вывода. Наша аппаратура позволяла проводить такие измерения. Необходимо подчеркнуть, что в нашем эксперименте измерялась

полная эффективность вывода. Она определялась как отношение интенсивности выведенного пучка к величине интенсивности забираемого из ускорителя пучка. Таким образом, величина эффективности характеризует не только эффективность работы кристалла, но и всего тракта вывода.

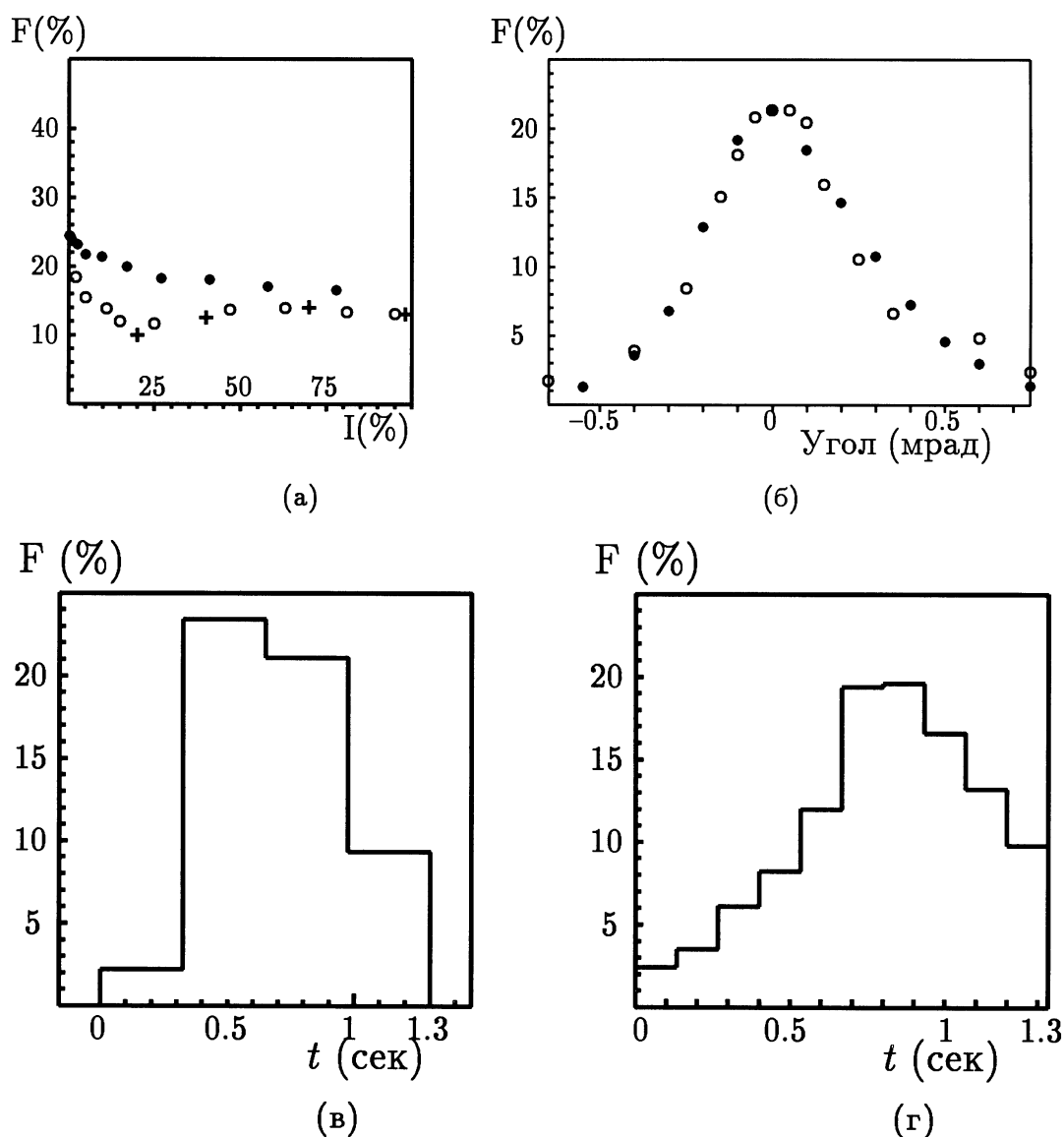


Рис. 4. (а) Измеренная зависимость (+) эффективности вывода пучка  $F$  кристаллом от интенсивности пучка  $I$ , наведенного на кристалл (в процентах от пучка, циркулирующего в У-70). Показаны также результаты моделирования без учета гало (•) и с учетом гало 10% (о). (б) Зависимость эффективности вывода пучка  $F$  кристаллом от ориентации кристалла: теория (•) и эксперимент (о). (в) Измеренная зависимость эффективности вывода от времени при наведении пучка. (г) Смоделированная зависимость эффективности вывода от времени, полученная в предположении постоянной скорости наведения.



На рис. 4а показаны экспериментальные данные измерения эффективности вывода при разной интенсивности наводимого пучка и соответствующие результаты моделирования, с учетом и без учета 10-процентного гало реального пучка. Видно, что имеется хорошее согласие между экспериментом и расчетами. Снижение эффективности для пучка с гало объясняется большим рассогласованием между углом ориентации кристалла и углом падения пучка на кристалл при значительном изменении тока в системе локального искажения орбиты (рис. 3).

Максимальная интегральная эффективность вывода была зафиксирована для большой доли забираемого из ускорителя пучка (около 75%) и была равна  $(14 \pm 1,5)\%$ . Дифференциальная эффективность в процессе вывода менялась из-за дрейфа угла падения пучка на кристалл (см. рис. 3), результаты ее измерения за 4 интервала времени показаны на рис. 4в. Абсолютный максимум эффективности равен  $(23,4 \pm 2,5)\%$  и зарегистрирован в интервале 325 мс при длительности вывода  $\sim 1,3$  с в средней части времени вывода. Асимметрия кривой объясняется распределением интенсивности в пучке. Результаты моделирования подтверждают такой характер временной зависимости (рис. 4г). В расчетах предполагалось, что скорость подведения пучка к кристаллу постоянна, в то время как в реальных условиях при наличии обратной связи она менялась.

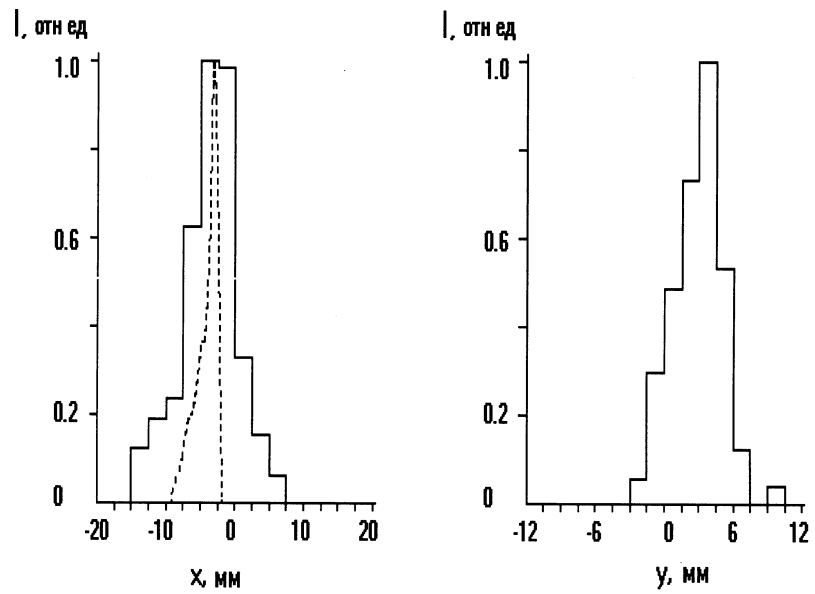
Максимальная интенсивность пучка, выведенная кристаллом при наведении всего циркулирующего в ускорителе пучка, была равна  $1,9 \cdot 10^{11}$  протонов/цикл, что на 4 порядка выше полученных ранее результатов [1-5]. Кристалл успешно выдержал радиационные и тепловые нагрузки, нагреваясь, по оценкам, до нескольких сотен градусов. Следует отметить, что при небольших углах изгиба кристалла в выведенном пучке присутствует доля протонов, упруго рассеянных на кристалле. Эта доля, согласно ориентационной кривой на рис. 4б (величина сигнала, не зависящая от ориентации кристалла), не превышала 3%, что подтверждается расчетами.

На рис. 5 приведены профили выведенного пучка на различных участках трассы. Увеличенные по сравнению с ожидаемыми горизонтальные размеры объясняются, в основном, тем, что расходимость пучка в горизонтальной плоскости ( $\sim 0,2$  мрад) значительно превышает угол Линдхарда (критический угол каналирования в кристалле  $\simeq 20$  мрад при 70 ГэВ). Увеличение угловой расходимости, помимо “твиста” кристалла, учтенного в расчетах на рис. 5а, может быть вызвано дефектами полировки торца кристалла [7], а также возможными эффектами деформаций и вибраций кристалла при его взаимодействии с интенсивным пучком.

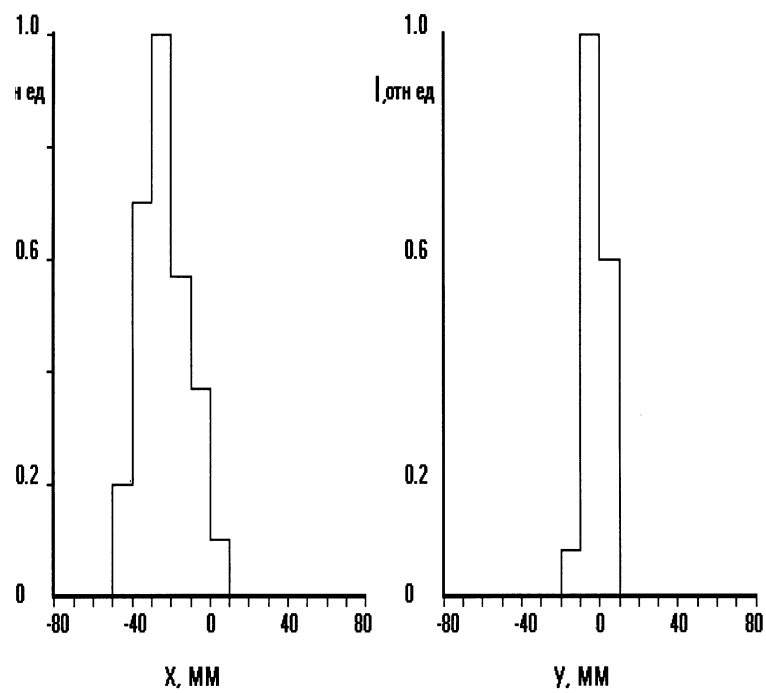
#### 4. Компьютерное моделирование вывода

Компьютерное моделирование эксперимента [10] было проведено заранее с целью выбора оптимального размера кристалла, оценки влияния на эффективность различных параметров, а также проверки теории.

Моделирование учитывало реальную геометрию кристалла с продольным и поперечным изгибами и конструкцию держателя кристалла. Решетка кристалла считалась идеальной, однако на поверхности кристалла моделировался неканализующий



(а)



(б)

Рис. 5. Измеренные камерами вторичной эмиссии профили выведенного кристаллом пучка: (а) в 26-м прямолинейном промежутке ускорителя на расстоянии 80 м от кристалла (пунктирной кривой обозначены результаты расчета горизонтального профиля с учетом твиста кристалла и оптики ускорителя); (б) в канале № 8 на расстоянии 300 м от кристалла.

(“аморфный”) слой в несколько десятков микрон [7]. Начальная глубина заброса  $<1$  мкм при этом исключала каналирование при первом прохождении частицей кристалла. Отметим сразу, что в этих условиях варьирование в модели толщины неканализующего слоя от 60 до 1 мкм приводило лишь к очень незначительному росту эффективности кристалла — на  $\sim 3\%$ .

Моделирование включало в себя эффекты многократного прохождения частиц через кристалл и многооборотного движения в ускорителе [11]. Протоны транспортировались через кристалл и ускоритель до их вывода либо потери на апертуре или в ядерных взаимодействиях в кристалле. Для описания движения частиц в ускорителе использовались линейные матрицы. Плотная часть пучка описывалась гауссовым распределением, учитывалось также гало, содержащее 10% пучка и линейно спадающее до нуля при максимальном размере по радиусу 30 мм.

Распределение в выведенном пучке по горизонтальному углу  $x'$  оказалось резко асимметричным и определялось неравномерностью изгиба кристалла по высоте. Среднеквадратичный размер распределения  $\sigma_{x'}=90$  мкрад. Для идеально изогнутого кристалла мы бы имели  $\sigma_{x'} \simeq 10$  мкрад. Распределение по вертикальному углу  $y'$  было гауссовым со среднеквадратичным углом  $\sigma_{y'}=290$  мкрад.

В моделировании исследовалось также распределение выведенных протонов по количеству прохождений через кристалл; было найдено, что среднее число прохождений для выведенного пучка  $\langle N \rangle \simeq 12$  (заметим, что кратность прохождения циркулирующих частиц, не захваченных в режим каналирования, гораздо выше — около 40). Таким образом, фактор кратности в увеличении эффективности вывода был очень значительным.

Важность этого фактора в нашем эксперименте можно также охарактеризовать следующим образом. Максимальные достигнутые значения эффективности вывода пучков кристаллами на крупнейших ускорителях мира на сегодняшний день — одного порядка: около 20% в ЦЕРНе и ИФВЭ и около 30% в Фермилабе. Однако в ЦЕРНе эта эффективность была достигнута при расходимости падающего на кристалл пучка величиной меньше угла Линдхарда. В наших условиях расходимость пучка была в  $\sim 20$  раз больше угла Линдхарда, поэтому лишь несколько процентов частиц пучка могло быть каналировано при однократном прохождении.

Результаты моделирования представлены на рис. 4 в сравнении с экспериментальными данными. Видно прекрасное согласие между измерениями и предсказанием для эффективности вывода и ориентационной кривой.

## Заключение

В результате применения короткого кристалла интегральная эффективность вывода каналированного пучка из протонного синхротрона У-70 ИФВЭ достигла 14%, а интенсивность пучка выросла с  $1 \cdot 10^7$  в экспериментах [4,5] до  $1,9 \cdot 10^{11}$  частиц за цикл. Получен выведенный пучок протонов длительностью до 1,3 с с хорошими временными характеристиками. Такой пучок существенно расширяет возможности физической программы ИФВЭ.

Планируя дальнейшие эксперименты на У-70, мы хотим провести прецизионные измерения эффективности при предварительном формировании пучка как в радиальной, так и в вертикальной плоскостях, в том числе с более совершенным кристаллом. Расчеты показывают, что, используя короткий кристалл без “твиста”, можно получить эффективность вывода до 30%. Практический интерес для У-70 представляет режим одновременной работы кристалла с внутренними мишенями, что также входит в программу наших дальнейших исследований.

Полученные нами первые 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.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность А.А. Логунову и Н.Е. Тюрину за поддержку данной работы.

Работа была поддержана грантом РФФИ № 98-02-16941.

### Список литературы

- [1] Akbari H. et al.//*Phys. Lett.*, 1993, v. **B313**, p. 491.
- [2] Murphy C.T. et al.//*Nucl. Instr. and Meth.*, 1996, v. **B119**, p. 231
- [3] Arduini G. et al. — Proc. of Part. Accel. Conf. PAC-97, Vancouver, 1997.
- [4] Asseev A.A. et al.//*Nucl. Instr. and Meth.*, 1991, v. **A309**, p. 1.
- [5] Biryukov V.M. et al. — Proc. of Part. Accel. Conf. PAC-97, Vancouver, 1997.
- [6] Biryukov V., Murphy C.T. Fermilab TM-2026, 1997, Batavia.
- [7] Biryukov V.M., Chesnokov Yu.A. and Kotov V.I. Crystal Channeling and its Application at High Energy Accelerators. — Berlin: Springer, 1997.
- [8] Biryukov V.M.//*Nucl. Instr. and Meth.*, 1991, v. **B53**, p. 202.
- [9] Taratin A.M. et al.//*Nucl. Instr. and Meth.*, 1991, v. **B58**, p. 103.
- [10] Biryukov V.M. Invited talk given at the *Near Beam Physics Symp.* Fermilab, Batavia, 1997 (in press).
- [11] Biryukov V.M.//*Phys. Rev.*, 1995, v. **E51**, p. 3522; v. **E52**, p. 2045, 6818; *Phys. Rev. Lett.*, 1995, v. **74**, p. 2471.

*Рукопись поступила 4 марта 1998 г.*

А.Г.Афонин и др.

Первые результаты экспериментов по высокоэффективному выводу протонов из У-70 с помощью монокристалла.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы  $\text{\LaTeX}$ .

Редактор Л.Ф.Васильева.

Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 11.03.98. Формат  $60 \times 84/8$ .      Офсетная печать.  
Печ.л. 1,25.    Уч.-изд.л. 0,96.    Тираж 150.    Заказ 156.    Индекс 3649.  
ЛР №020498 17.04.97.

---

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

