



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2001-22  
ОП,ОКУ

А.Г. Афонин, В.Т. Баранов, В.М. Бирюков, В.И. Котов,  
В.А. Маишеев, В.И. Терехов, Е.Ф. Троянов, Ю.С. Федотов,  
В.Н. Чепегин, Ю.А. Чесноков  
*ИФВЭ, Протвино, Россия*

Ю.М. Иванов  
*ПИЯФ, Санкт-Петербург, Россия*

В. Гвиди, Г. Мартинелли, М. Стефанчик, Д. Винченци  
*Университет Феррара, Италия*

Д. Трбоевич  
*БНЛ, США*

В. Скандале  
*ЦЕРН, Швейцария*

М.Б.Х. Бриз  
*Университет Суррей, Великобритания*

**ПРОГРЕСС В ИССЛЕДОВАНИИ  
ВЫВОДА ПУЧКА ПРОТОНОВ ИЗ У-70  
С ПОМОЩЬЮ ИЗОГНУТЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ**

Направлено в "Письма в ЖЭТФ"

Протвино 2001

**Аннотация**

Афонин А.Г. и др. Прогресс в исследовании вывода пучка протонов из У-70 с помощью изогнутых монокристаллов: Препринт ИФВЭ 2001–22. – Протвино, 2001. – 7 с., 4 рис., 1 табл., библиогр.: 11.

Благодаря применению коротких кристаллов длиной до 1.8 мм, изогнутых на небольшой угол  $\sim 1$  мрад, достигнуто радикальное увеличение эффективности вывода пучка из ускорителя, связанное с ростом кратности прохождения частиц через кристалл. Экспериментально достигнута рекордная эффективность вывода 70 ГэВ протонов свыше 80%, согласующаяся с предсказанием теории. Показана возможность эффективной работы кристалла при энергии инжекции 1.3 ГэВ.

**Abstract**

Afonin A.G. et al Progress in the Studies of Proton Beam Extraction from U-70 by Means of Bent Monocrystals: IHEP Preprint 2001–22. – Protvino, 2001. – p. 7, figs. 4, tables 1, refs.: 11.

A radical increase in the efficiency of beam extraction from accelerator is reached by use of short, down to 1.8 mm, crystals bent a small angle  $\sim 1$  mrad, due to an increase in the average number of particle encounters with crystal. A record extraction efficiency of over 80% at 70 GeV is experimentally achieved, in agreement with theory predictions. The feasibility of efficient work of a crystal at the injection energy, 1.3 GeV is also demonstrated.

В нескольких лабораториях мира развивается новый метод вывода пучков из ускорителей, основанный на применении изогнутых кристаллов [1-5].

Положительными сторонами этого метода являются простота реализации, возможность совмещения с коллайдерным режимом или внутренними мишенями и малая величина пульсаций интенсивности во времени. Кристалл имеет минимальную “толщину септума” и поэтому очень удобен также для применения в системе локализации потерь в качестве когерентного рассеивателя.

Однако долгое время исследователям не удавалось достичь высокой эффективности вывода, так как при однократном прохождении пучка ускорителя через кристалл в режим каналирования захватывалась лишь небольшая доля частиц. Идея резкого увеличения эффективности вывода заключается в использовании очень короткого кристалла [6,7]. В протяженных, изогнутых на большие углы кристаллах, которые использовались ранее, потери частиц при деканалировании были велики. В случае короткого кристалла, помимо уменьшения потерь частиц из-за деканалирования, выигрыш в росте эффективности достигается также за счет значительного уменьшения рассеяния на длине кристалла. При этом начинает работать механизм роста эффективности вывода частиц, связанный с увеличением среднего числа прохождений частиц через кристалл. Уже первые экспериментальные работы в этом направлении [3-5], выполненные коллаборацией исследователей на 70 ГэВ ускорителе ИФВЭ, привели к существенному улучшению параметров вывода в сравнении с известными мировыми данными: была достигнута интенсивность вывода пучка протонов с энергией 70 ГэВ свыше  $10^{11}$  протонов в цикле при эффективности около 40%. При этом были использованы короткие кристаллы кремния длиной 7 и 5 мм и углами изгиба 1.7 и 1.5 мрад соответственно, изготовленные по двум разным технологиям: в виде полоски и O-образной формы (эти конструкции описаны в [3-5]).

Эти технологии приготовления изогнутых кристаллов получили дальнейшее развитие. Путем создания новых кристаллов, более коротких, лучше полированных и лучше изогнутых, удалось получить эффективность вывода до 85%.

В настоящее время на ускорителе У-70 размещено несколько кристаллов. Их места расположения выбраны таким образом, чтобы изогнутые кристаллы представляли собой первые ступени системы медленного вывода. Характеристики кристаллов представлены в табл. 1. Кристаллы в виде полосок (П-тип) имеют ориентацию Si(111), O-кристаллы (O-тип) имеют ориентацию Si(110). Специально создаваемое локальное искажение орбиты обеспечивает подведение пучка к рабочему кристаллу. Расположение оборудования и приборов диагностики, а также характеристики пучка в ускорителе подробно описаны в [3-5].

Таблица 1. Характеристики установленных кристаллов

№ кристалла	Место расп., № магн. блока	Тип	Угол, мрад	Длина × высота × толщина, мм <sup>3</sup>	Эф-ть, %	Примечания
№ 1	106	П	1.0	2.0×35×0.5	85	схема вывода: 106-24-26 схема вывода: 106-20-22
					80	
№ 2	106	О	0.7	3.5×5.0×0.7	60	
№ 3	19	П	2.0	5.0×45×0.5	67	
№ 4	19	О	2.1	5.0×5.0×0.7	65	
№ 5	19	О	2.3	5.0×5.0×0.6	45	поток частиц ~ 2 × 10 <sup>20</sup> /см <sup>2</sup>
№ 6	84	П	0.8	1.8×27×0.5	85 20	
№ 7	84	О	1.7	2.5×5.0×0.5	60	70 ГэВ 1.3 ГэВ
№ 8	86	П	1.4	4.0×45×0.5	65	

Все приборы диагностики пучка (телевизионная система наблюдения, мониторы потерь, профилометры, измерители интенсивности) предварительно тестировались в режиме быстрого вывода и калибровались с помощью трансформаторов тока. Согласно результатам калибровки, абсолютная ошибка измерений интенсивности выведенного пучка не превышала 2% [8]. Фоновые условия периодически измерялись при разориентации кристалла и при выводе его из пучка ускорителя. Согласно измерениям, уровень фона вместе с шумами аппаратуры не превышал 3% от интенсивности каналированного пучка. Доля наведенного на кристалл пучка определялась с систематической ошибкой ~ 1% по измерениям интенсивности циркулирующего пучка до и после осуществления вывода. 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.

Наилучший результат был получен с применением самых коротких кристаллов № 1 и № 6 длиной 2 и 1.8 мм соответственно, выполненных в виде узких полосок. На рис. 1а,б представлены результаты исследований для кристалла № 1. При работе с этим кристаллом достигалась эффективность вывода  $(85 \pm 2.8)\%$  при интенсивности пучка в ускорителе  $1 \times 10^{12}$  частиц в цикле. Дальнейшие исследования должны показать, насколько интенсивность выводимого кристаллом пучка может быть увеличена.

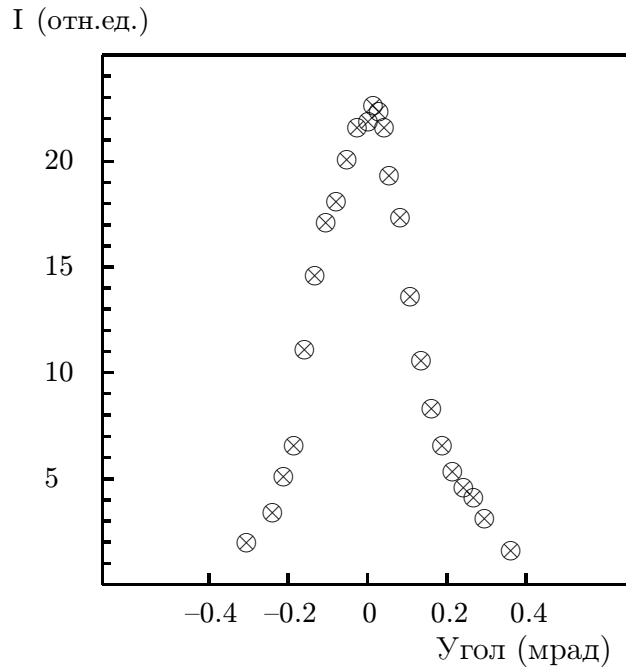


Рис. 1. (а) Зависимость интенсивности выведенного пучка от ориентации кристалла № 1.

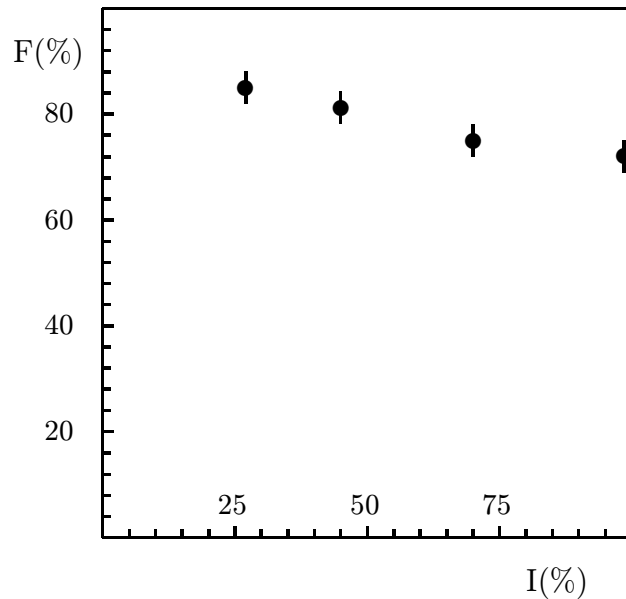


Рис. 1. (б) Зависимость эффективности вывода пучка  $F$  кристаллом № 1 от интенсивности пучка  $I$ , наведенного на кристалл (в процентах от пучка, циркулирующего в У-70).

Кристалл № 6 был использован в системе локализации потерь в качестве когерентного рассеивателя. Он был установлен в 20 м перед коллиматором пучка и  $(85 \pm 2.8)\%$  падающих частиц забрасывал в глубь его тела. На рис. 2 представлены результаты измерения профиля пучка на входе коллиматора в различных режимах. При наведении непосредственно на край коллиматора (2а), как и ожидалось, параметры заброса частиц очень малы, сосредоточены вблизи края, это уменьшает эффективность коллимации.

Случай (2b) соответствует разориентированному кристаллу, (2c) — ориентированному, когда большая часть частиц падает в глубь коллиматора. График (2d) отражает ситуацию, когда пучок забрасывается на коллиматор быстрым кикер-магнитом. Заброс кикер-магнитом использовался для калибровки измерений доли отклоненного кристаллом пучка.

При применении кристалла радиационные уровни за коллиматором были снижены в несколько раз.

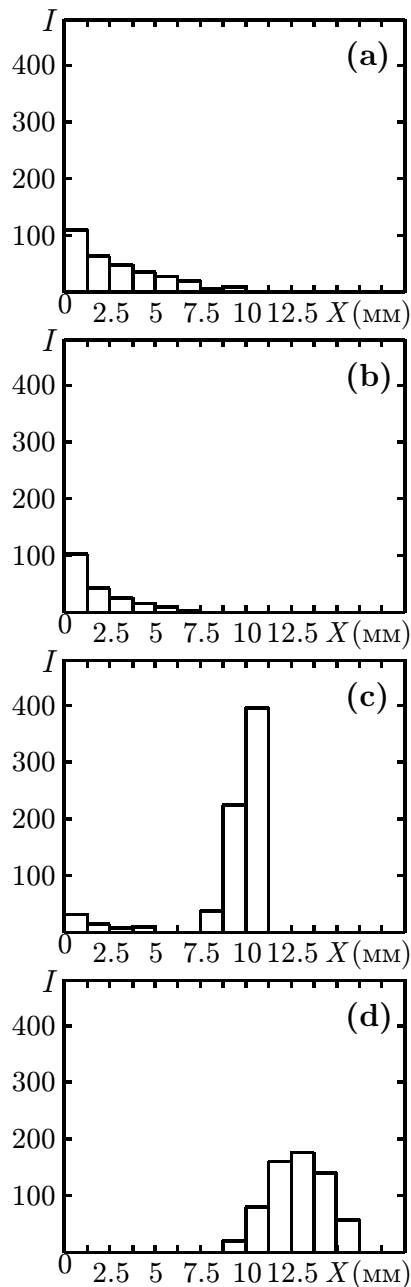


Рис. 2. Профили пучка, измеренные на торце коллиматора: (a) кристалла нет, наведение прямо на коллиматор; (b) кристалл в пучке, разориентирован; (c) кристалл в пучке, ориентирован; (d) кристалла нет, пучок забрасывается кикер-магнитом.

На рис. 3 представлены обобщенные экспериментальные результаты измерений эффективности вывода пучка кристаллами разной длины (табл. 1) в сравнении с результатами моделирования, учитывающего транспортировку частиц в кристалле (программа SATCH [9]) и многооборотное движение в ускорителе. Как видно из этого рисунка, экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными.

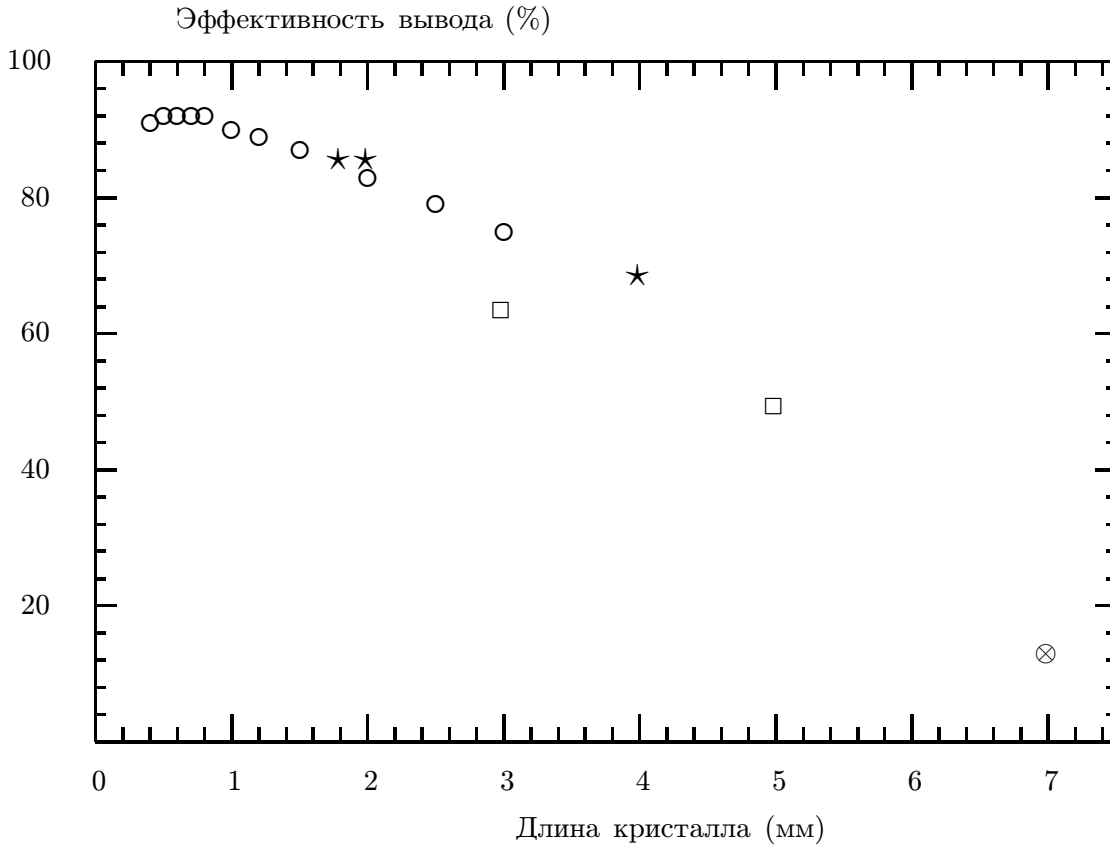


Рис. 3. Эффективность вывода пучка протонов кристаллом, измеренная при энергии 70 ГэВ: (\*) — результаты 2000 г., (□) — 1999-2000 г.г., (⊗) — 1997 г., (o) — теоретически предсказанная (EPAC'2000 [11]) эффективность вывода для дефлектора с идеальным изгибом на 0.9 мрад.

Разработанные короткие кристаллы длиной по пучку  $\sim 1$  мм могут применяться не только на ускорителях высоких энергий, но и при энергии частиц  $\sim 1$  ГэВ. Так, на ускорителе У-70 были проведены первые тесты по отклонению протонов с энергией 1.3 ГэВ (энергия инжекции синхротрона У-70). Полученный в этих условиях профиль отклоненного кристаллом № 6 пучка показан на рис. 4. Спецификой этого случая является значительное кулоновское рассеяние частиц на кристалле. Среднеквадратичный угол рассеяния  $\sim 1$  мрад сравним с углом изгиба кристалла. Однако и здесь каналированные частицы составляют заметную долю ( $\sim 50\%$ ) от всего пучка, заброшенного на коллиматор. Соответствующая этому случаю эффективность заброса каналированного пучка кристаллом составляет, по оценкам,  $\sim 20\%$ . Дальнейшая оптимизация коротких кристаллов, предусматривающая применение новой технологии их выращивания [10], в принципе позволит достичь и для низких энергий, менее 1 ГэВ, эффективности вывода столь же высокой, как и при 70 ГэВ.

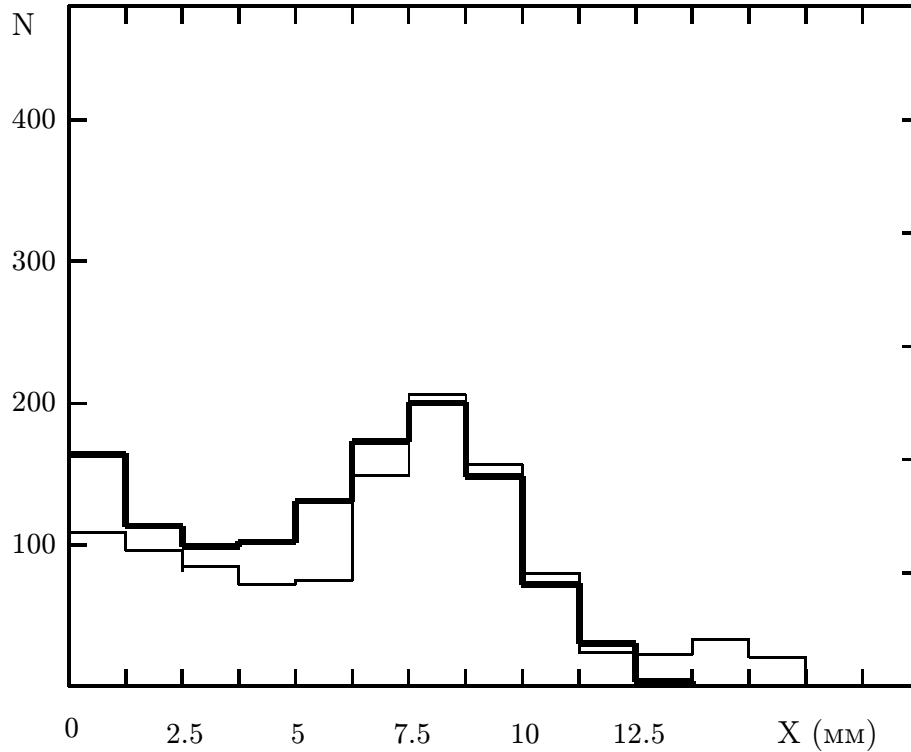


Рис. 4. Профиль пучка протонов 1.3 ГэВ, измеренный на торце коллиматора при применении кристалла № 6. Тонкой линией показан смоделированный профиль частиц, каналированных и рассеянных в кристалле, с учетом вращения частиц в кольце.

Внедрение на ускорителе ИФВЭ вывода пучка кристаллом на установку по изучению редких распадов К-мезонов позволило увеличить в 40 раз мировую статистику этих распадов за 2 месяца работы [11]. Заметим, что в этом режиме одновременно с выводом протонов с помощью кристалла работали две внутренние мишени, генерировавшие вторичные частицы для других экспериментов. Результаты исследований показывают, что изогнутые кристаллы могут успешно применяться для вывода и коллимации пучков на ускорителях в широком диапазоне энергий.

Работа была поддержана грантами РФФИ 01-02-16229 и ИНТАС-ЦЕРН 132-2000.

### Список литературы

- [1] H.Akbari, X.Altuna, S.Bardin et al. // *Phys. Lett.* **В 313** (1993), 491.
- [2] C.T.Murphy, R.A.Carrigan, Jr.D.Chen et al. // *Nucl. Instr. and Meth.* **В 119** (1996), 231.
- [3] А.Г.Афонин, В.М.Бирюков, В.А.Гаврилушкин и др. // Письма в ЖЭТФ, т. **67** (1998), 741.
- [4] A.A.Arhipenko, A.G.Afonin, V.I.Baranov et al. // *Phys. Lett.* **В 435** (1998), 240.



- [5] А.Г.Афонин, В.М.Бирюков, В.А.Гаврилушкин и др. // Письма в ЖЭТФ, т. **68** (1998), 544.
- [6] V.Biryukov. // *Nucl. Instr. and Meth.* **B53** (1991), 202.
- [7] A.M. Taratin, S.A.Vorobiev, M.D. Bavizhev et al.// *Nucl. Instr. and Meth.* **B 58** (1991), 103.
- [8] A.G.Afonin, V.N.Gres and V.I.Terekhov. // Proc. of EPAC (Stockholm, 1998).
- [9] V.Biryukov // *Phys. Rev.* **E 51** (1995), 3522.
- [10] M.Breese. // *Nucl. Instr. and Meth.* **B 132**, (1997), 540.
- [11] V.I.Kotov, A.G.Afonin, V.M.Biryukov et al. // Proc. of EPAC (Vienna, 2000), p.364.

*Рукопись поступила 26 апреля 2001 г.*

А.Г. Афонин и др.

Прогресс в исследовании вывода пучка протонов из У-70 с помощью изогнутых монокристаллов.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

Редактор Л.Ф.Васильева.

Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 03.05.2001. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.

Печ.л. 0,87. Уч.-изд.л. 0,7. Тираж 130. Заказ 82. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

---

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

