



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

ИФВЭ 2012–15  
ОП, ОЭФ, ОУК

А.Г. Афонин, В.И. Баранов, В.Т. Баранов, Г.И. Бритвич, А.П. Бугорский,  
М.К. Булгаков, А.А. Дурум, И.С. Лобанов, А.Н. Луньков, А.В. Лутчев,  
В.А. Маишеев, Ю.Е. Сандомирский, А.В. Склезнев, Ю.А. Чесноков,  
П.Н. Чирков, И.А. Язынин, А.А. Янович

**Исследование фокусировки пучка протонов с энергией 50 ГэВ  
с помощью нового кристаллического устройства**

Протвино 2012

**Аннотация**

Афонин А.Г. и др. Исследование фокусировки пучка протонов с энергией 50 ГэВ с помощью нового кристаллического устройства: Препринт ИФВЭ 2012 –15. – Протвино, 2012. – 6 с., 5 рис., библиогр.: 12.

Изогнутые кристаллы применяются на крупных ускорителях для отклонения пучков частиц при выводе и коллимации. Недавно сформулированы предложения исследований на Большом адронном коллайдере (БАК) с фиксированной мишенью, где может потребоваться не только отклонение, но и фокусировка пучков изогнутыми кристаллами. В данной работе сообщаются экспериментальные результаты по фокусировке пучка протонов с энергией 50 ГэВ с помощью нового кристаллического устройства, которое может быть использовано на циркулирующем пучке крупного ускорителя, включая БАК.

**Abstract**

Afonin A.G. et al. Study of 50 GeV Proton Beam Focusing by Novel Crystal Device: IHEP Preprint 2012 –15. – Protvino, 2012. – p. 6, figs. 5, refs.: 12.

The bent crystals are applied on large accelerators to deflect particle beams in process of extraction and collimation. Recently the proposals of fixed target researches in the LHC are formulated. For realization of this program not only deflection but also focusing the LHC beam by bent crystals can be used. In the given work experimental results on 50 GeV proton beam focusing with the help of novel crystal device are reported. The positive property of this device is opportunity to work near the circulating beam of an accelerator, including the LHC.

В настоящее время на нескольких крупных ускорителях проводятся исследования коллимации и вывода циркулирующего пучка с помощью когерентных явлений в ориентированных кристаллах. Так, в пионерских работах ИФВЭ на синхротроне У-70 [1-4] показано, что с помощью каналирования в коротких изогнутых кристаллах кремния можно повысить эффективность вывода и коллимации пучка до 85%. Сейчас эта возможность подтверждена на коллайдерах СПС в ЦЕРН [5] и Теватрон в Фермилаб [6].

Недавно в [7, 8] сформулированы предложения широкой программы физических исследований с фиксированной мишенью на Большом адронном коллайдере. В этих работах отмечено, что необходимые выведенные пучки частиц тераэлектронвольтных энергий можно получить с помощью каналирования в изогнутых кристаллах. Причем, для выполнения программы может потребоваться не только отклонять пучки частиц, но и фокусировать их. В данной работе сообщаются экспериментальные результаты по фокусировке пучка протонов с энергией 50 ГэВ с помощью нового кристаллического устройства, которое может быть использовано также на БАК.

Принципиальная возможность фокусировки пучка кристаллом была показана в [9], где фокусирующий эффект достигался за счет разности углов поворота частиц в равномерно изогнутом кристалле со скошенным задним торцом. Однако использованное тогда устройство было затруднительно применить вблизи циркулирующего пучка ускорителя, так как изгиб кристалла выполнялся массивными цилиндрическими зеркалами. Новое кристаллическое устройство для фокусировки пучка, удобное для установки в ускоритель, показано на рис. 1.

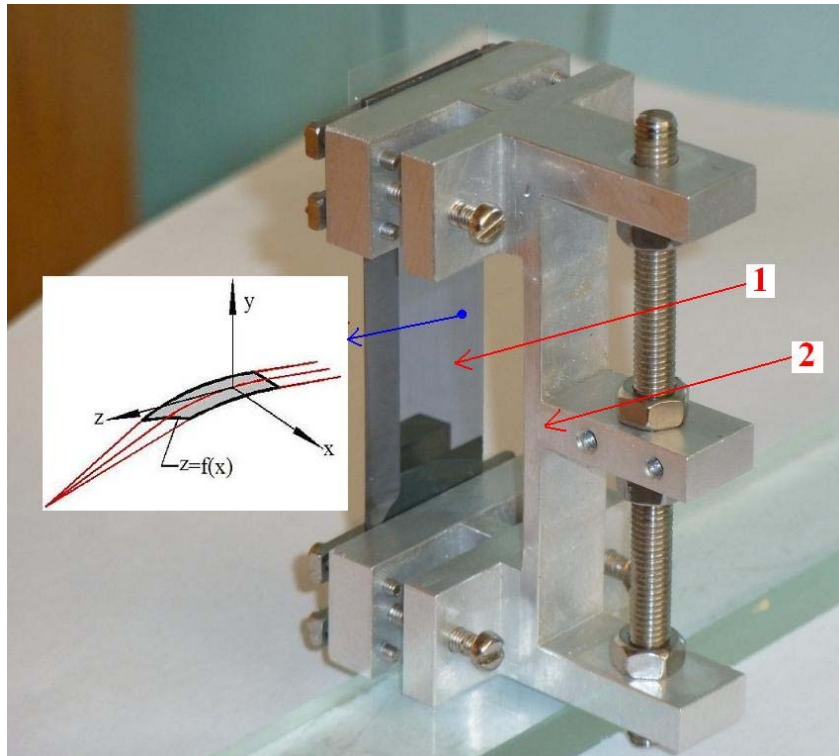


Рис.1: Новое кристаллическое устройство для фокусировки пучка. 1 – изогнутая кристаллическая пластина, 2 – металлический держатель для изгиба пластины.

Протяженная по высоте кремниевая пластина (1), вырезанная вдоль кристаллографической плоскости (111), изгибается в продольном направлении с помощью металлического держателя (2). Размеры пластины равны  $x \times y \times z = 1 \times 70 \times 20 \text{ мм}^3$ . За счет анизотропных свойств материала пластины возникает поперечный изгиб, который и используется для поворота и фокусировки пучка [10]. Траектории частиц при движении через кристалл в плоскости каналирования (в горизонтальной плоскости) показаны на вставке в левой части рисунка.

Форма горизонтального изгиба кристалла (вдоль координаты  $z$ ) в фокусирующем сегменте измерялась лазерным прибором по схеме, описанной в ([11], стр.86). Изменение радиуса изгиба вдоль координаты  $z$  можно аппроксимировать зависимостью, представленной формулой:

$$R(z) = \frac{R_0}{1 - Cz/L}$$

В этой аппроксимации радиус изгиба кристалла растет с ростом координаты от 6 м в начале среза до 30 м в конце среза. Для фокусировки пучка в точку (без aberrаций) необходимо, чтобы угол поворота частиц был линейно связан с поперечной координатой  $\varphi = \kappa x$ . В случае неравномерного изгиба кристалла с произвольной кривизной форму скошенного торца  $z = f(x)$  необходимо спрофилировать. Как показано в [10], фокусировка без aberrаций происходит в случае

$$z = f(x) = \frac{L}{C} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2CR_0\kappa x}{L}} \right)$$

где:  $\kappa = (1 - C/2)L/(R_0 d)$  при:  $C = 0.8$ ,  $L = 4.8$  мм,  $d = 0.8$  мм,  $R_0 = 6$  м.

Такая форма поверхности была получена при обработке кремниевой пластины алмазным лезвием, установленном на станке с ЧПУ.

Эксперимент по фокусировке выполнен на протонном пучке ускорителя ИФВЭ с энергией 50 ГэВ, выведенном в зону установки Истра-Кристалл, располагающейся в канале частиц 4А. Аппаратные возможности установки подробно описаны в [12]. На кристалл, установленный в гониометре, направлялся пучок размером  $\sigma_x = 2$  мм с малой угловой расходимостью  $\sigma_\alpha = 0.1$  мрад. Интенсивность прямого и отклоненного кристаллом пучка на угол (2.3-2.8) мрад измерялась сцинтилляционными счетчиками. При оптимальной ориентации кристалл отклонял  $\sim 3\%$  частиц прямого пучка, что соответствует расчетам, так как критический угол каналирования составляет 0.03 мрад для частиц с энергией 50 ГэВ в плоскостном канале Si(111). Эффект фокусировки был зарегистрирован с помощью ядерной фотоэмульсии. Несколько слоев эмульсии располагались на различном расстоянии от кристалла. Рис. 2 иллюстрирует эффект фокусировки пучка на расстоянии  $l_F = 1/\kappa = 1.7$  м от кристалла.

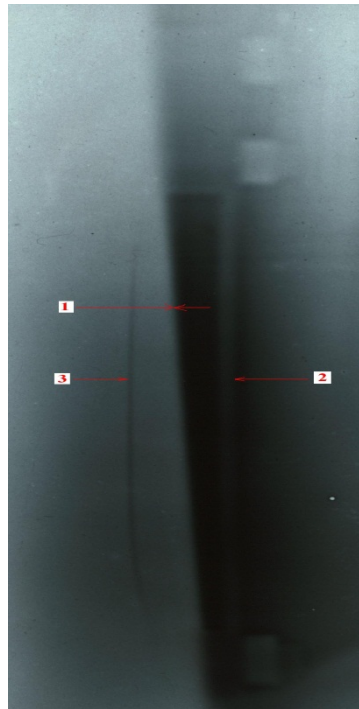


Рис.2: Изображение пучка частиц на эмульсии вблизи фокуса. 1 – граница коллиматора, 2 – отражение кристалла, 3 – сфокусированный пучок.

С помощью протяженного свинцового коллиматора сформирована резкая граница падающего пучка частиц, которая хорошо видна в центре фото. Ориентированный кристалл помещен в интенсивную часть пучка, и его тень отражается справа в лучах

падающего пучка как полоска с четкими границами. Отклоненный и сфокусированный кристаллом пучок виден слева в тени коллиматора как узкая вертикальная линия. Таким образом, наглядно представлено, как миллиметровый по горизонтали пучок, равный по размеру толщине кристалла, отклоняется и сжимается в линию шириной  $FWHM = 0.22$  мм (ширина на полувысоте). С помощью цифрового сканирования изображения (выделена полоса несколько миллиметров по вертикали) получен горизонтальный профиль всего пучка (рис.3а), а также профиль сфокусированного пучка (рис.3б).

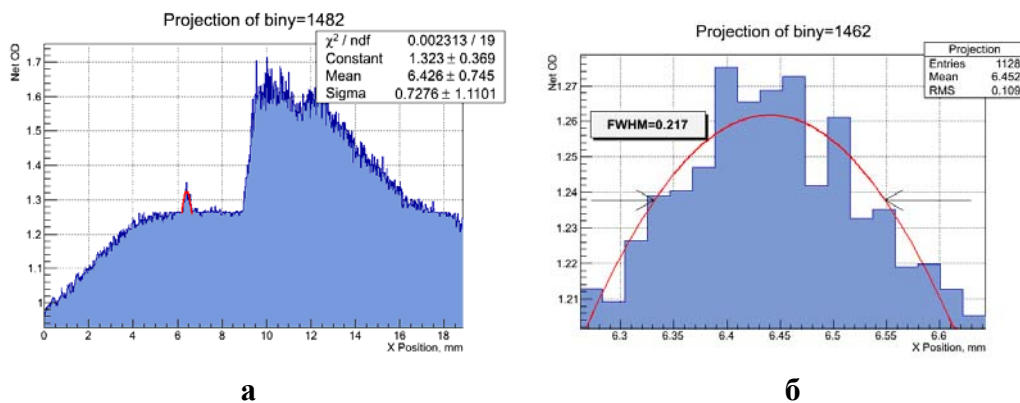


Рис.3: **а** – горизонтальный профиль пучка, видны – граница коллиматора в центре, тень от кристалла справа, и сфокусированный пучок слева; **б** – профиль сфокусированного пучка.

Обработка изображения проводилась с помощью цифрового сканера с высоким разрешением 10 мкм. На рис. 4 показана измеренная огибающая пучка, построенная по результатам обработки экспонированных эмульсий на цифровом сканере. Показана также ожидаемая теоретическая кривая, с учетом и без учета вещества на пути частиц от кристалла до фокуса 1.7 м (суммарное количество вещества около  $1 \text{ г/см}^2$ ).

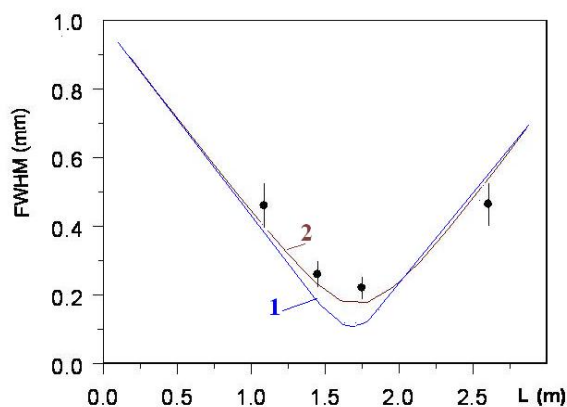


Рис.4: Огибающая пучка (размер пучка в зависимости от расстояния, отчитываемого от кристалла). Точки – эксперимент. Кривая 1 – расчет для транспортировки частиц в вакууме, кривая 2 – расчет для реальных условий с учетом рассеяния на воздухе и эмульсиях.

Как видно из рисунка, наблюдается хорошее согласие параметров фокусировки с ожидаемым значением, размер пучка в фокусе в пределах 10% совпадает с результатами моделирования, учитывающим реальные условия проведения опыта.

Фокусирующее свойство нового кристаллического устройства можно применять на БАК или другом ускорителе высокой энергии для исследования малоугловых процессов. Кристалл можно ориентировать на точечную мишень фокусирующим торцом, как показано на рис. 5, и вращая вокруг оси  $O$ , отклонять исследуемые частицы в сторону от циркулирующего пучка из неблагоприятной фоновой области. Т.е. роль кристалла заключается в создании чистых условий для регистрации нужных частиц. Другим мотивом применения такой схемы является получение пучка вторичных частиц высокой энергии весьма простым способом.

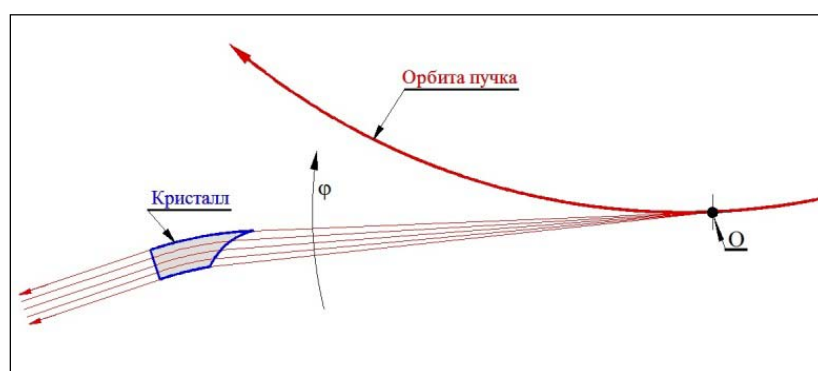


Рис.5: Пример применения фокусирующего кристалла для исследования малоугловых процессов. Эта же схема может быть источником параллельного пучка вторичных частиц для широких физических исследований, предложенных в [7,8].

Работа поддержана Дирекцией ГНЦ ИФВЭ, а также Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 12-02-91532).

## Список литературы

- [1] A.G.Afonin, V.M.Biryukov, V.A. Gavrilushkin et al, **JETP Lett.****67:781-785, 1998**
- [2] A.G.Afonin, A.A.Arhipenko, V.I. Baranov et al, **Phys.Lett.****B435:240-244, 1998.**
- [3] A.G.Afonin, V.T. Baranov, V.M.Biryukov et al, **Phys.Rev.Lett.****87:094802, 2001.**
- [4] A.G. Afonin, V.T.Baranov, V.M.Biryukov et al., **Phys.Part.Nucl.** **36 (2005) 21-50.**
- [5] W.Scandale, G.Arduini, R.Assmann et al, **Phys.Lett.****B692:78-82, 2010.**
- [6] N.V.Mokhov, G.E.Annala, A. Apyan et al, Proc. of Particle Accelerator Conference (PAC 09), Vancouver, BC, Canada, 2009, 1836-1838.
- [7] J.P. Lansberg, V. Chambert, J.P. Didelez et al, A Fixed-Target Experiment at the LHC (AFTER@LHC): luminosities, target polarization and a selection of physics studies.  
<http://arxiv.org/pdf/1207.3507.pdf>
- [8] S.J. Brodsky, F. Fleuret, C. Hadjidakis, J.P. Lansberg. Physics Opportunities of a Fixed-Target Experiment using the LHC Beams. <http://arxiv.org/pdf/1202.6585.pdf>
- [9] M.A. Gordeeva, M.P. Gur'ev, A.S. Denisov et al, **JETP Lett.****54:487-490, 1991.**
- [10] A.G. Afonin, V.T. Baranov, M.K. Bulgakov et al, Device on basis of a bent crystal with Variable curvature for particle beams steering in accelerators.  
<http://arxiv.org/pdf/1203.5586.pdf>
- [11] V.M. Biryukov, Yu.A. Chesnokov, V.I. Kotov. Crystal channeling and its application at high-energy accelerators. Berlin, Germany: Springer (1997) 219 pp.
- [12] A.G. Afonin, V.T. Baranov, G.I.Britvich et al, Apparatus to study coherent phenomena in crystals at the U-70 4A beamline

*Рукопись поступила 5 сентября 2012 г.*



А.Г. Афонин и др.

Исследование фокусировки пучка протонов с энергией 50 ГэВ с помощью нового кристаллического устройства.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

---

Подписано к печати 07.09.2012.                      Формат 60 × 84/16.    Цифровая печать.  
Печ. л. 0,62.    Уч.–изд.л. 0,768.                      Тираж 80.    Заказ 50.                      Индекс 3649.

---

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ  
142281, Протвино Московской обл.

