

## КОРОТКОФОКУСНОЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО И ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ НА СОВРЕМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

*А. Г. Афонин, А. Г. Васильева, А. А. Дурум, М. Ю. Костин,  
В. А. Маишеев, Ю. Е. Сандомирский, В. И. Питалев,  
И. В. Полуэктов, М. Ю. Чесноков<sup>1</sup>, Ю. А. Чесноков, А. А. Янович*

Институт физики высоких энергий Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт», Протвино, Россия

В работе описан эксперимент по фокусировке пучка протонов с энергией 50 ГэВ на ускорителе У-70 с помощью кристаллического устройства. Фокусирующее устройство основано на использовании изгиба плоскопараллельной кремниевой пластины, в которой боковые грани повернуты относительно кристаллографических плоскостей на небольшой угол. Пучок был сфокусирован на расстоянии 10 см в узкую линию шириной  $\text{fwhm} \sim 7$  мкм. Описаны перспективы применения такого короткофокусного устройства на современных ускорителях.

The paper describes an experiment on focusing a proton beam with an energy of 50 GeV on the U-70 accelerator using a crystal device. The focusing device is based on the use of bending a plane-parallel silicon wafer in which the side faces are rotated relative to the crystallographic planes by a small angle. The beam was focused at a distance of 10 cm into a narrow line with a width of  $\text{fwhm} \sim 7 \mu\text{m}$ . The prospects of using such a short-focus device on modern accelerators are described.

PACS: 29.27.Ac

Идеи профессора Э. Н. Цыганова из Дубны по использованию каналирования в изогнутых кристаллах для управления пучками частиц [1] были подтверждены во многих экспериментах (см. [2, 3] и ссылки в них). В настоящее время на нескольких современных ускорителях проводятся исследования коллимации и вывода циркулирующего пучка с помощью каналирования в изогнутых кристаллах [4–7]. Поскольку критический угол каналирования (угол Линдхарда) довольно мал ( $\theta_L \sim (1/E)^{1/2} = 0,02\text{--}0,002$  мрад для протонов с энергией  $E = 100\text{--}10\,000$  ГэВ соответственно), применение кристаллов достаточно эффективно для управления первичным протонным пучком, но для манипуляций со вторичными пучками  $\pi$ ,  $K$ ,  $p$  и др. требуется не только отклонять их, но и фокусировать, так как здесь расходимости пучков гораздо выше [8].

---

<sup>1</sup>E-mail: chesnokov@ihep.ru

К настоящему времени успешно испытаны кристаллические фокусирующие устройства, в основе которых — скошенный выходной торец изогнутого кристалла [9–13]. Достигнуты фокусные расстояния порядка 1 м. Недавно в физике высоких энергий сформулированы перспективные задачи: уменьшение размера пучка в электронном линейном коллайдере CLIC [14] и проведение экспериментов по измерению магнитных моментов короткоживущих частиц на ускорителях LHC и FCC с помощью вращения спина в изогнутом кристалле [15], в котором необходимо фокусировать пучки частиц на расстоянии нескольких сантиметров. Применяемую ранее идею кристалла со скошенным выходным торцом здесь трудно реализовать, поскольку для такого короткого фокусного расстояния нужен острый угол скоса — около  $1^\circ$  и меньше (при таких условиях кремний начинает крошиться вблизи острого ребра). Недавно нами была предложена новая идея для фокусировки на коротком расстоянии, основанная на использовании изгиба обычной плоскопараллельной кремниевой пластины, в которой боковые грани повернуты относительно кристаллографических плоскостей на небольшой угол. Этот угол  $\text{Miscut} = D/L$ , где  $D$  — это толщина пластины, а  $L$  — длина пластины вдоль направления пучка, так что кристаллографические плоскости совпадают с направлением диагонали пластины (рис. 1, а).

Из геометрии рисунка видно, что при изгибе пластины на угол  $\alpha$  достигается фокусное расстояние  $F = D/\alpha$ . В проведенных опытах [16, 17] с новым устройством по фокусировке пучка протонов с энергией 50 и 400 ГэВ было достигнуто фокусное расстояние 15 см. В данной работе устройство было оптимизировано, чтобы уменьшить фокусное расстояние до 10 см, что является достаточным для применений [14, 15] на современных ускорителях. В работе использовалась кремниевая пластина длиной 10 мм и толщиной 500 мкм. Боковые грани пластины при вырезке были повернуты на угол  $3^\circ$  относительно кристаллографических плоскостей (111). Пластина была равномерно изогнута на угол 5 мрад способом, аналогичным применяемому в [11]. Принцип изгиба основан на использовании анизотропии кристаллической решетки.

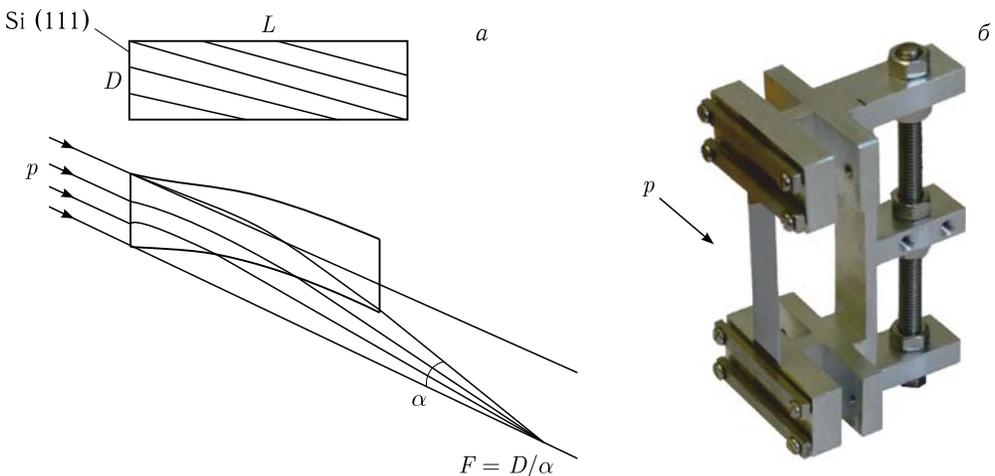


Рис. 1. а) Схема фокусировки пучка пластиной кремния, в которой кристаллографические плоскости совпадают с направлением диагонали в прямоугольном сечении; б) внешний вид фокусирующего устройства

С помощью механического момента сил пластина кремния изгибается в продольном направлении с помощью держателя (рис. 1, б), при этом в поперечном направлении создается необходимый равномерный изгиб. В этом случае фокусное расстояние равно  $F = D/\alpha = 10$  см.

Пучок протонов умеренной интенсивности  $\sim 10^6$  частиц/с выводился из ускорителя У-70 кристаллическим дефлектором. Эта техника подробно описана в [18]. Пучок имел расходимость  $\sigma_x \sim 0,1$  мрад. С помощью коллиматоров формировался профиль пучка с резкими границами размером  $S_x \times S_y = 10 \times 20$  мм.

Геометрия расположения детекторов и кристалла в гониометре описана в [16]. Режим каналирования находился с помощью телескопа сцинтилляционных счетчиков. Эффект фокусировки был зарегистрирован дозиметрической пленкой ЕВТЗ при обработке изображения цифровым сканером с высоким разрешением. На рис. 2 показаны результаты опыта. На рис. 2, а видно увеличенное изображение сфокусированного пучка на пленке в виде узкой линии. На рис. 2, б приводится профиль пучка, полученный при цифровом сканировании. Видно, что сфокусированный пучок (пик в центре), прошедший через кристалл в режиме каналирования, в несколько раз выше по плотности, чем падающий пучок. И это несмотря на то, что только  $\sim 10\%$  падающих частиц отклонялись за счет каналирования в кристалле. Измеренный размер пучка в фокусе равен 7 мкм на полувысоте, как это видно на рис. 2, б. При идеальных условиях размер пучка в фокусе определяется величиной  $fwhm = F \times \theta_L \sim 3$  мкм. Однако измерить точно такую малую величину трудно, поскольку разрешение сканера и пленки также находится на уровне нескольких микрометров. Поэтому наш измеренный профиль дает завышенную оценку реального размера сфокусированного пучка.

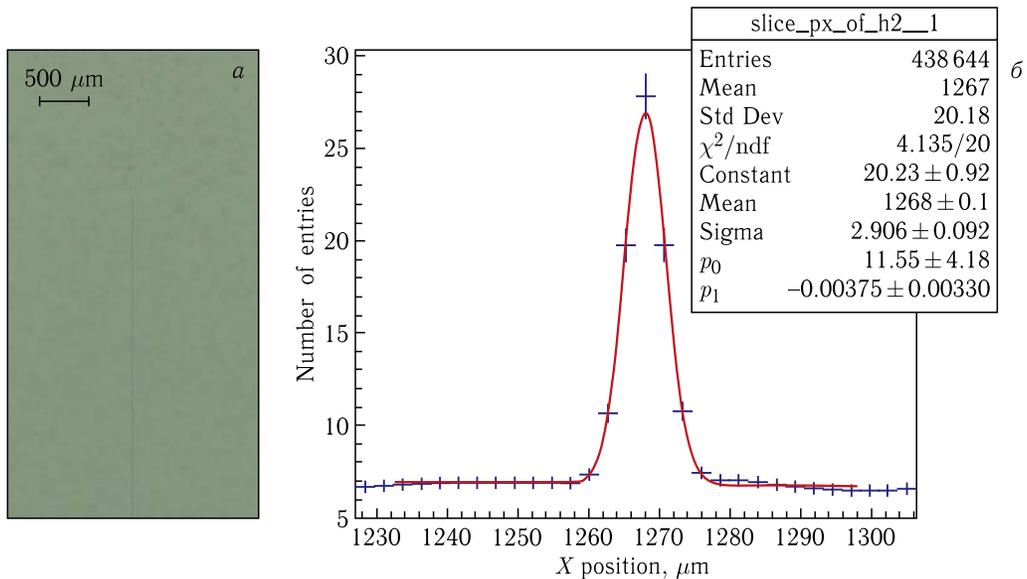


Рис. 2. а) Изображение сфокусированного пучка на пленке (вертикальная линия в центре); б) профиль пучка со сканера при максимальном разрешении

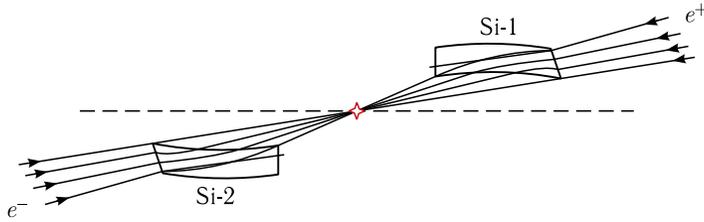


Рис. 3. Применение двух кристаллических устройств для организации конечного фокуса на CLIC

Таким образом, в работе впервые экспериментально проверена фокусировка пучка частиц высокой энергии кристаллическим устройством на расстоянии 10 см. Данное устройство позволяет реализовать упомянутые предложения [14, 15] более оптимально.

В частности, можно уменьшить размер сталкивающихся пучков до наномасштаба на линейных электрон-позитронных коллайдерах типа CLIC и ILC (рис. 3).

В этой схеме кристаллы встраиваются в существующую магнитную оптику, фокусируя пучок размером от несколько десятков микрометров до наномасштаба. Предварительные оценки показывают, что размер пучка в фокусе кристаллов  $x_F$  можно ужать в несколько десятков раз, а следовательно, получить выигрыш в светимости в тысячу раз ( $L_{int} \sim 1/x_F^2$ ). Следует отметить: конечный фокус на кристаллах можно применить и в кольцевых коллайдерах с умеренной интенсивностью циркулирующего пучка, например, на будущих мюонных коллайдерах.

Также с помощью короткофокусного кристаллического устройства можно оптимизировать планируемый на ЛHC опыт [15] по измерению магнитных моментов короткоживущих частиц с помощью поворота спина в изогнутом кристалле (рис. 4). Здесь представлена двухкристальная схема из короткофокусного и «обычного» отклоняющего кристалла. Эта схема в отличие от принятого на установке ЛHCb предложения с одним «обычным» кристаллом для поворота спина увеличивает выход отклоненных гиперонов на два порядка за счет фокусирующего эффекта (отношение угла конуса рождения гиперонов, порядка 1 мрад, к критическому углу каналирова-

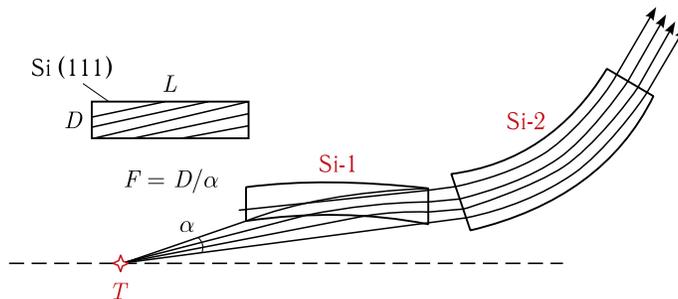


Рис. 4. Использование короткофокусного кристалла для измерения магнитного момента  $\Lambda_c$  гиперона на ЛHC путем вращения спина,  $T$  — нитевидная внутренняя мишень на циркулирующем пучке; Si-1 — короткофокусный кристалл; Si-2 — «обычный» изогнутый кристалл

ния около 10 мкрад). Это может стать решающим фактором успешности выполнения эксперимента.

Очевидно, что в будущем круг возможных применений короткофокусного кристаллического устройства на ускорителях значительно расширится, поскольку простое устройство на редкость удачно работает.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-12-00006.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tsyganov E. N.* Preprint ТМ-682, ТМ-684. Batavia: Fermilab, 1976.
2. *Elishev A. F. et al.* // Phys. Lett. B. 1979. V. 88. P. 387; JETP Lett. 1979. V. 30. P. 442.
3. *Biryukov V. M., Chesnokov Yu. A., Kotov V. I.* Crystal Channeling and Its Application at High-Energy Accelerators. Berlin: Springer, 1997. 219 p.
4. *Afonin A. G., Baranov V. T., Biryukov V. M., Breese M. B. H., Chepegin V. N., Chesnokov Yu. A., Guidi V., Ivanov Yu. M., Kotov V. I., Martinelli G. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. P. 094802.
5. *Fliller R. P., Drees A., Gassner D., Hammons L., McIntyre G., Peggs S., Trbojevic D., Biryukov V., Chesnokov Y., Terekhov V.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2005. V. 234. P. 47.
6. *Mokhov N. V., Annala G. E., Apyan A., Carrigan R. A., Drozhdin A. I., Johnson T. R., Legan A. M., Reilly R. E., Shiltsev V., Still D. A. et al.* // Intern. J. Mod. Phys. A. 2010. V. 25. P. 98.
7. *Scandale W., Arduini G., Butcher M., Cerutti F., Garattini M., Gilardoni S., Lechner A., Losito R., Masi A., Mirarchi D. et al.* // Phys. Lett. B. 2016. V. 758. P. 129.
8. *Maisheev V. A., Chesnokov Yu. A., Chirkov P. N.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2015. V. 355. P. 360.
9. *Gordeeva M. A., Gur'ev M. P., Denisov A. S., Platonov Yu. P., Skorobogatov V. V., Smirnov A. I., Fedin O. L., Shchetkovskii A. I., Baranov V. I., Galyaev N. A. et al.* // JETP Lett. 1991. V. 54. P. 487.
10. *Baranov V. I., Biryukov V. M., Bugarsky A. P., Chesnokov Yu. A., Kotov V. I., Tarakanov M. V., Terekhov V. I., Tsarik S. V., Fedin O. L., Gordeeva M. A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. B. 1995. V. 95. P. 449.
11. *Afonin A. G., Baranov V. I., Baranov V. T., Britvich G. I., Bugorskii A. P., Bulgakov M. K., Durum A. A., Lobanov I. S., Lun'kov A. N., Lutchev A. V. et al.* // JETP Lett. 2012. V. 96. P. 424.
12. *Scandale W., Arduini G., Butcher M., Cerutti F., Gilardoni S., Lechner A., Losito R., Masi A., Metral E., Mirarchi D. et al.* // Phys. Lett. B. 2014. V. 733. P. 366.
13. *Afonin A. G., Britvich G. I., Bugorskii A. P., Bulgakov M. K., Durum A. A., Kostin M. Yu., Lutchev A. V., Maisheev V. A., Sandomirskiy Yu. E., Pitalev V. I. et al.* // JETP Lett. 2016. V. 104. P. 12.
14. *Tomas R.* // CLIC Workshop. March 2017; <https://indico.cern.ch/event/577810/contributions/2492715/>.
15. *Burmistrov L., Calderini G., Ivanov Yu., Massacrier L., Robbe P., Scandale W., Stocchi A.* Preprint CERN-SPSC-2016-030; SPSC-EOI-012; <http://cds.cern.ch/record/2194564>.
16. *Afonin A. G., Barnov E. V., Britvich G. I. et al.* // JETP Lett. 2017. V. 105, No. 12. P. 763–765.
17. *Scandale W. et al.* // Nucl. Instr. Meth. B. 2018. V. 414. P. 104–106.
18. *Afonin A. G., Barnov E. V., Britvich G. I., Durum A. A., Kostin M. Yu., Maisheev V. A., Pitalev V. I., Reshetnikov S. F., Chesnokov Yu. A., Chirkov P. N. et al.* // Instr. Exp. Tech. 2016. V. 59. P. 497.