

## Формирование пучка частиц высокой энергии с помощью фокусирующих кристаллических устройств

Г. И. Бритвич, М. Ю. Костин, В. И. Питалев, И. В. Полуэктов, Ю. Е. Сандомирский, М. Ю. Чесноков<sup>1)</sup>,  
Ю. А. Чесноков, А. А. Янович

Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт” –  
Институт физики высоких энергий, 142281 Протвино, Россия

Поступила в редакцию 20 марта 2023 г.

После переработки 20 марта 2023 г.

Принята к публикации 29 марта 2023 г.

В тэвной области энергий управлять траекториями частиц с помощью электромагнитов для получения выведенных пучков на ускорителях становится сложно и очень затратно. Для этих целей больше подходят высокоградиентные устройства на основе изогнутых кристаллов. Эти кристаллы могут работать как сверхсильные линзы с фокусным расстоянием менее 1 м, с эквивалентным магнитным полем 1000 Тл. В данной работе реализована схема формирования расходящегося пучка с энергией 50 ГэВ двумя последовательно расположенными фокусирующими кристаллами для создания аксиально-симметричного пучка с малой расходимостью 30 мкрад как в горизонтальной, так и вертикальной плоскостях. Одно из перспективных применений такой схемы – создание пучков нейтрино высоких энергий.

DOI: 10.31857/S123456782309001X, EDN: bnljrv

Современные крупные ускорители уходят по энергии в тэвную область, БАК (Большой адронный коллайдер, ЛНС) уже оперирует на 7 ТэВ. Планируется БКК (Будущий кольцевой коллайдер, FCC) с энергией до 50 ТэВ. В России также имеется проект ускорителя в тэвной области энергии – Ускорительно накопительный комплекс (УНК) на энергию 3 ТэВ.

В этой области энергий управлять траекториями частиц с помощью электромагнитов для получения выведенных пучков становится сложно и очень затратно. Для этих целей больше подходят высокоградиентные устройства на основе изогнутых кристаллов [1]. Эти кристаллы могут работать как сверхсильные линзы с фокусным расстоянием менее 1 м, с эквивалентным магнитным полем 1000 Тл. В данной работе реализована схема формирования расходящегося пучка с энергией 50 ГэВ двумя последовательно расположенными фокусирующими кристаллами для создания аксиально-симметричного пучка с малой расходимостью  $\theta_c = 30$  мкрад как в горизонтальной, так и вертикальной плоскостях. ( $\theta_c = (2U_c/pv)^{1/2}$  – критический угол каналирования, или угол Линдхарда, где  $U_c \sim 20$  эВ – величина потенциального барьера плоскостного канала (111) в кремнии,  $p$ ,  $v$  – импульс и скорость налетающей частицы, см. [1]). Одно из перспективных применений такой схемы – создание пучков нейтрино высоких энергий.

Изогнутые кристаллы используются на ускорителях для вывода или коллимации протонных пучков [2–9]. В [10–14] показано, что с помощью изогнутого кристалла с фокусирующим торцом можно одновременно отклонять и фокусировать пучки частиц высоких энергий. Несколько экспериментов показали, что эффективность отклонения пучка частиц фокусирующим кристаллом может достигать десятков процентов [15, 16]. Недавно в работе ЦЕРН [17] показано, что два последовательно расположенных кристалла с прямоугольными торцами могут использоваться для эффективного управления протонным пучком на ускорителе. Кристаллы же с фокусирующей кромкой могут формировать пучки вторичных частиц, вылетающих из мишеней со значительной угловой расходимостью.

Для реализации схемы формирования расходящегося пучка двумя последовательно расположенными фокусирующими кристаллами на У-70 было изготовлено 2 экземпляра кристаллических устройств с фокусным расстоянием 1.7 и 2 м на основе пластин трапецидальной формы со скошенным торцом (рис. 1).

В этой оригинальной конструкции кристаллическая пластина трапецидальной формы, вырезанная из кремния вдоль кристаллографической плоскости (111), имеет размеры: 2 мм по ширине  $X$ , 70 мм по высоте  $Y$ , и длину вдоль пучка по координате  $Z$  от 20 до 40 мм, благодаря скошенному торцу. Металличе-

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

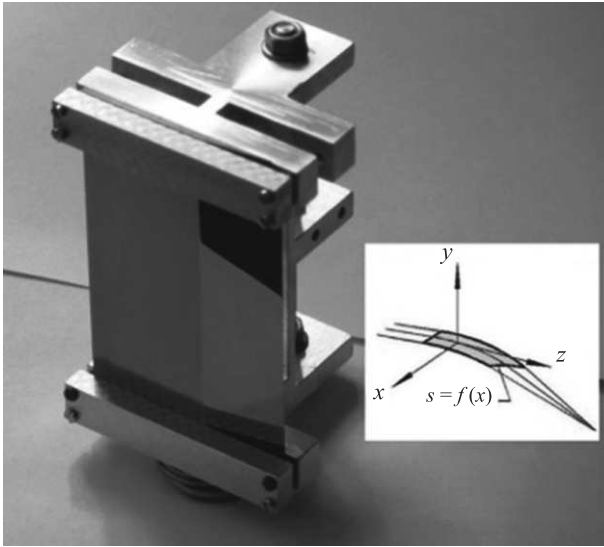


Рис. 1. (Цветной онлайн) Внешний вид фокусирующего кристаллического устройства и схема фокусировки пучка из параллельного в точку с помощью такого монокристалла, показанная на вставке рисунка

ский кристаллодержатель создает продольный изгибающий момент по координате  $Y$ . Благодаря анизотропным свойствам кристаллической решетки (см., например, [1, с. 85]) возникает поперечный изгиб кристалла с радиусом несколько метров, который и используется для фокусировки и последующего отклонения частиц. Особенности конструкции (большая высота кристалла), как это видно из рис. 1, позволяют снизить фоновые условия, так как вещество металлического держателя не попадает в пучок, облучается лишь сам кристалл, имеющий длину лишь 6% от длины ядерного взаимодействия. По сравнению с прежними образцами кристаллических линз, эти отличаются еще и более прецизионными методами обработки поверхности.

Сначала на установке КРИСТАЛЛ, расположенной на выведенном пучке У-70, эти кристаллы были протестированы в режиме фокусировки из параллельного пучка в точку (см. рис. 2), где были измерены фокусные расстояния и проверено качество фокусировки. Режим каналирования находился с помощью сцинтилляционных телескопов, а огибающая пучка в результате фокусировки определялась с помощью слоев эмульсионной пленки, как это делалось ранее в [12].

Заметим, что в экспериментах ЦЕРН [18–20] было выяснено, что в режиме каналирования при высоких энергиях многократное рассеяние частиц уменьшается в 8 раз. Столь слабое кулоновское рассеяние в режиме каналирования означает, что вертикально

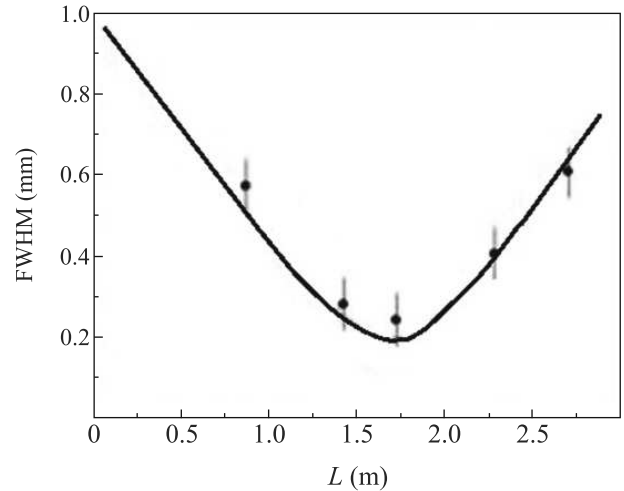


Рис. 2. Огибающая пучка (размер пучка в зависимости от расстояния, отсчитываемого от кристалла). Точки – эксперимент. Кривая – расчет для реальных условий с учетом рассеяния на воздухе и эмульсиях

и горизонтально фокусирующие кристаллы, расположенные последовательно, не будут мешать друг другу. Это позволяет создавать системы формирования пучка из нескольких последовательно расположенных кристаллов, например, создавать аксиально симметричные пучки пионов и каонов для генерации нейтрино по новой схеме.

На канале 4а У-70 проведен эксперимент по проверке кристаллооптической системы, составленной из этих кристаллов, а именно, двухкристалльная схема, позволяющая получить аксиально-симметричный пучок с малой угловой расходимостью для генерации нейтрино (рис. 3).

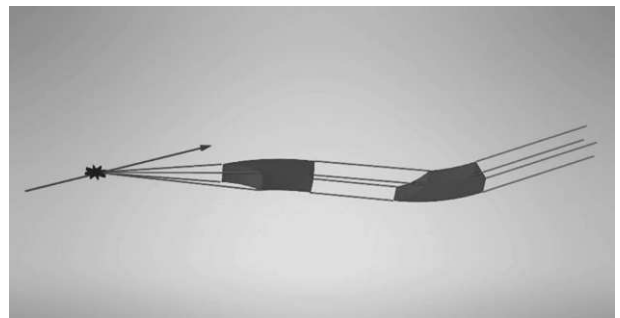


Рис. 3. (Цветной онлайн) Двухкристалльная оптическая схема для формирования аксиально-симметричного пучка

Существующая установка КРИСТАЛЛ для этих тестов была дополнена вторым гониометром для вертикально-отклоняющего кристалла (рис. 4).

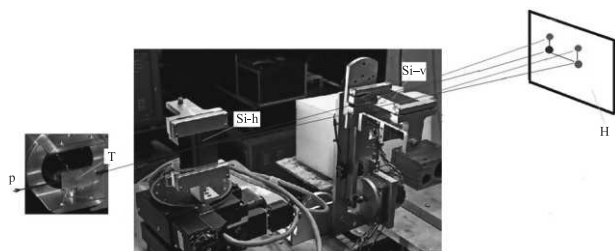


Рис. 4. (Цветной онлайн) Конфигурация установки КРИСТАЛЛ с активной мишенью и двумя фокусирующими кристаллами: Т – активная мишень; Si-h – горизонтально фокусирующий кристалл в гониометре; Si-v – вертикально фокусирующий кристалл в гониометре; Н – сцинтилляционный годоскоп. Лучи разных цветов показывают отклонение пучка кристаллами, пояснения представлены на рис. 6а

Для создания точечного источника расходящегося пучка протонов с энергией 50 ГэВ была установлена активная мишень Т в виде тонкой пластины (толщиной 150 мкм) из тяжелого сцинтиллятора CsI. На мишень попадала лишь малая доля пучка интенсивностью  $2 \times 10^3$  частиц/с. Пучок протонов в мишени был распушен до необходимой величины угловой расходимости  $\sigma_x = \sigma_y = 0.9$  мрад. Кристаллы вводились в режим каналирования поочередно, по схеме, представленной на рис. 5, как это делалось в [15].

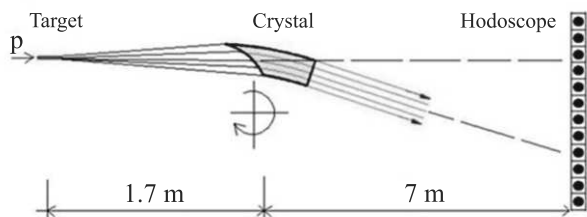


Рис. 5. (Цветной онлайн) Схема нахождения режима каналирования в кристалле, расположенном в гониометре

Эффект фокусировки и последующего отклонения расходящегося пучка фиксировался сцинтилляционным годоскопом (с шагом 1.6 мм), включенным на совпадения со сцинтиллятором тонкой мишени, согласно методу, примененному в [15].

По аналогичной схеме был настроен на режим каналирования вертикально-отклоняющий кристалл. После этого кристаллы вводились в пучок одновременно.

На рисунке 6 показаны первые результаты по эффективности отклонения расходящегося с мишени

пучка после прохождения в режиме каналирования через два кристалла.

Каждый из кристаллов фокусировал и отклонял пучок с ожидаемой эффективностью около 10%. Относительно невысокая эффективность двойного каналирования (около 1.4%) объясняется сравнительно низкой энергией протонов 50 ГэВ, где длина деканалирования составляет  $\sim 2$  см. Эффективность кристаллической системы резко возрастает для тэвных энергий, где длина деканалирования свыше 50 см (согласно измеренным величинам [21]).

Применение такой схемы с внутренней мишенью и двумя кристаллами позволит реализовать на крупных ускорителях новый метод формирования пучков нейтрино, который отличается существенной простотой, по сравнению с применяемыми схемами сейчас, которые требуют вывода протонного пучка, его взаимодействие с внешней мишенью и фокусировку пионов и каонов, родителей нейтрино, специальными высокоточными электромагнитными устройствами – горнами [22]. Такая громоздкая схема позволяет получить пучок нейтрино только в одном заданном направлении, в то время как кристаллы легко могут быть установлены в произвольных точках ускорителя, например, для зондирования Земли с помощью высокоэнергетичных нейтрино. Количественная информация о спектрах и потоках нейтрино подробно представлена ранее в работе [23].

В работе мы представили новые применения изогнутых кристаллов в ускорительной науке, которые, мы надеемся, могут стимулировать новые эксперименты по физике высоких энергий.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект # 23-22-00001).

1. V. M. Biryukov, Yu. A. Chesnokov, and V. I. Kotov, *Crystal channeling and its application at high-energy accelerators*, Springer, Berlin, Germany (1997), 219 p.
2. E. N. Tsyganov, *Estimates of cooling and bending processes for charged particle penetration through a mono crystal*, preprint TM-682, TM-684, Fermilab, Batavia (1976).
3. A. F. Elishev, N. A. Filatova, V. M. Golovatyuk et al. (Collaboration), *Phys. Lett. B* **88**, 387 (1979).
4. A. F. Elishev, N. A. Filatova, V. M. Golovatyuk et al. (Collaboration), *JETP Lett.* **30**, 442 (1979).
5. A. G. Afonin, V. T. Baranov, V. M. Biryukov et al. (Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **87**, 094802 (2001).
6. R. P. Fliller, A. Drees, D. Gassner, L. Hammons, G. McIntyre, S. Peggs, D. Trbojevic, V. Biryukov,

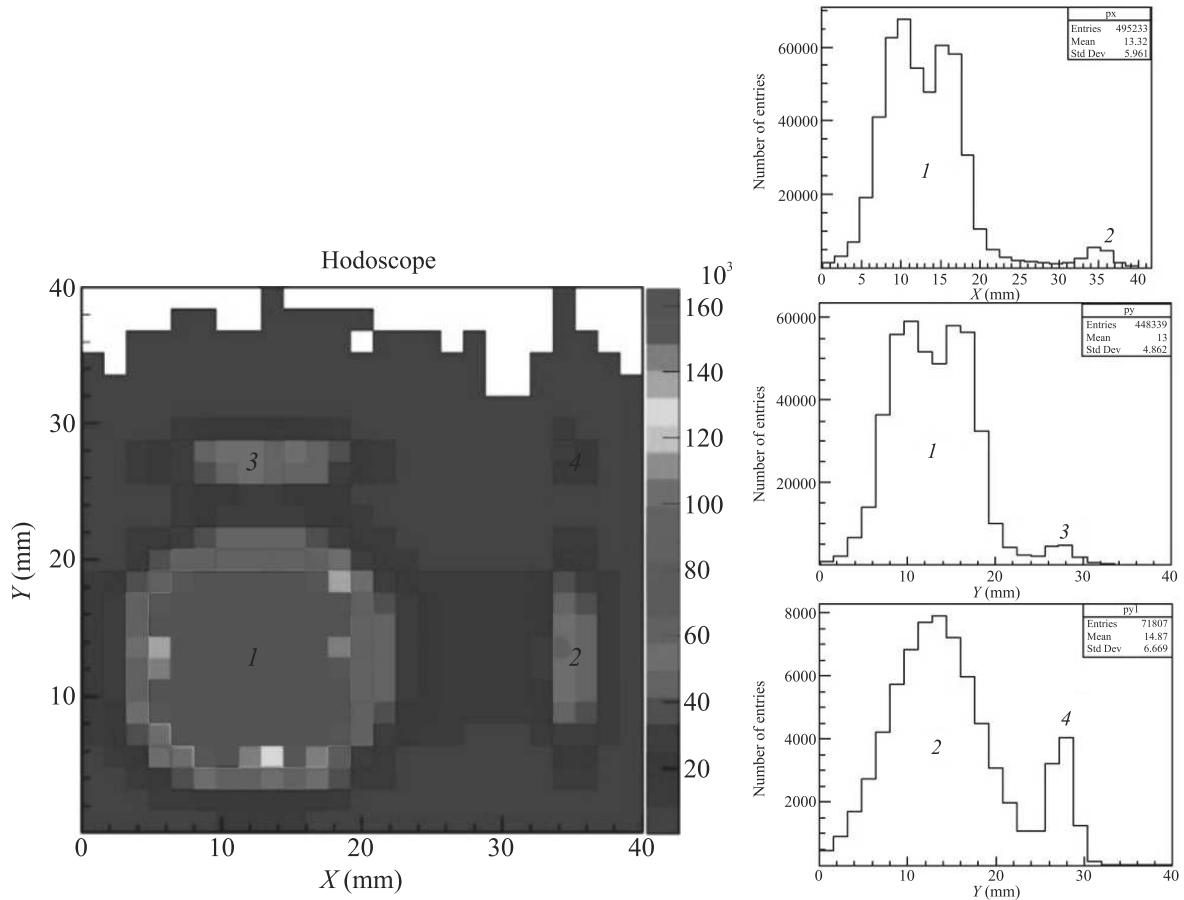


Рис. 6. (Цветной онлайн) (а) – Двумерное изображение профилей пучка: 1 – неотклоненный пучок протонов 50 ГэВ; 2 – отклоненный по горизонтали пучок первым кристаллом за счет каналирования; 3 – отклоненный по вертикали пучок вторым кристаллом, но не захваченный первым кристаллом в каналирование; 4 – аксиально симметричный пучок с малой расходимостью (угол Линдхарда, 30 мкрад), прошедший через два кристалла в режиме каналирования. (б) – Соответствующие одномерные проекции профилей пучка

- Y. Chesnokov, and V. Terekhov, Nucl. Instrum. Methods B **234**, 47 (2005).
7. N.V. Mokhov, G.E. Annala, A. Apyan et al. (Collaboration), Int. J. Mod. Phys. A **25**, 98 (2010).
  8. W. Scandale, G. Arduini, M. Butcher et al. (Collaboration), Phys. Lett. B **758**, 129 (2016).
  9. W. Scandale, G. Arduini, R. Assmann et al. (Collaboration), Int. J. Mod. Phys. A **37**, 2230004 (2022).
  10. M.A. Gordeeva, M.P. Gur'ev, A.S. Denisov et al. (Collaboration), JETP Lett. **54**, 487 (1991).
  11. V.I. Baranov, V.M. Biryukov, A.P. Bugarsky, Yu.A. Chesnokov, V.I. Kotov, M.V. Tarakanov, V.I. Terekhov, S.V. Tsarik, O.L. Fedin, M.A. Gordeeva, M.P. Gur'ev, Yu.P. Platonov, and A.I. Smirnov, Nucl. Instrum. Methods B **95**, 449 (1995).
  12. A.G. Afonin, V.I. Baranov, V.T. Baranov et al. (Collaboration), JETP Lett. **96**, 424 (2012).
  13. W. Scandale, G. Arduini, M. Butcher et al. (Collaboration), Phys. Lett. B **733**, 366 (2014).
  14. A.G. Afonin, A.G. Vasilyeva, A.A. Durum, M.Yu. Kostin, V.A. Maisheev, Yu.E. Sandomirsky, V.I. Pitalev, I.V. Poluektov, M.Yu. Chesnokov, Yu.A. Chesnokov, and A.A. Yanovich, Physics of Particles and Nuclei Letters **19**(4), 389 (2022).
  15. A.G. Afonin, G.I. Britvich, A.P. Bugorskii, M.K. Bulgakov, A.A. Durum, M.Yu. Kostin, A.V. Lutchev, V.A. Maisheev, Yu.E. Sandomirskiy, V.I. Pitalev, I.V. Poluektov, Yu.A. Chesnokov, P.N. Chirkov, and A.A. Yanovich, JETP Lett. **104**, 12 (2016).
  16. W. Scandale, G. Arduini, F. Cerutti et al. (Collaboration), Nucl. Instrum. Meth. B **446**, 15 (2019).
  17. W. Scandale, G. Arduini, F. Cerutti et al. (Collaboration), Nucl. Instrum. Methods A **1015**, 165747 (2021).

18. W. Scandale, L.S. Esposito, M. Garattini et al. (Collaboration), The European Physical Journal C **79**(12), 993 (2019).
19. W. Scandale, G. Arduini, F. Cerutti et al. (Collaboration), Phys. Lett. B **804**(10), 135396 (2020).
20. W. Scandale, G. Arduini, F. Cerutti et al. (Collaboration), The European Physical Journal Plus **137**(7), 811 (2022).
21. W. Scandale, G. Arduini, F. Cerutti et al. (Collaboration), Nucl. Instrum. Methods B **438**, 38 (2019).
22. В.П. Каргашев, В.И. Котов, *Методы формирования пучков частиц на ускорителях высоких энергий*, Энергоатомиздат, М. (1989).
23. Y. A. Chesnokov and V. A. Maishev, Nucl. Phys. A **1003**, 122012 (2020).