

ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧКА ЧАСТИЦ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ИЗ ДВУХ ФОКУСИРУЮЩИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

*Г. И. Бритвич, М. Ю. Костин, В. И. Питалев, И. В. Полуэктов,
Ю. Е. Сандомирский, М. Ю. Чесноков¹, Ю. А. Чесноков, А. А. Янович*

Институт физики высоких энергий им. А. А. Логонова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Протвино, Россия

В ТэВ-ной области значений энергии 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.

In the TeV energy domain, it becomes difficult and very costly to control the trajectories of particles using electromagnets to obtain the extracted beams on accelerators. Highly gradient devices based on curved crystals are more suitable for these purposes. These crystals can work as super-strong lenses with a focal length of less than 1 m, with an equivalent magnetic field of 1000 T. In this paper, a scheme for the formation of a divergent beam with an energy of 50 GeV by two sequentially arranged focusing crystals is implemented to create an axially symmetric beam with a small divergence of 30 mrad in both horizontal and vertical planes. One of the promising applications of such a scheme is the creation of high-energy neutrino beams.

PACS: 29.27.Ac

1. ЭКСПЕРИМЕНТ НА УСКОРИТЕЛЕ У-70

Современные крупные ускорители уходят по энергии в ТэВ-ную область, ЛНС уже оперирует на 7 ТэВ. Планируется FCC (будущий кольцевой коллайдер) с энергией до 50 ТэВ. В России также имеется проект ускорителя в ТэВ-ной области энергии — Ускорительно-накопительный комплекс (УНК) на энергию 3 ТэВ.

¹E-mail: chesnokov@ihep.ru

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 [2–8]. В работах [9–13] 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 [14, 15]. Недавно в работе ЦЕРН [16] 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 трапецеидальной формы со скошенным торцом (рис. 1).

В этой оригинальной конструкции кристаллическая пластина трапецеидальной 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. Металлический 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

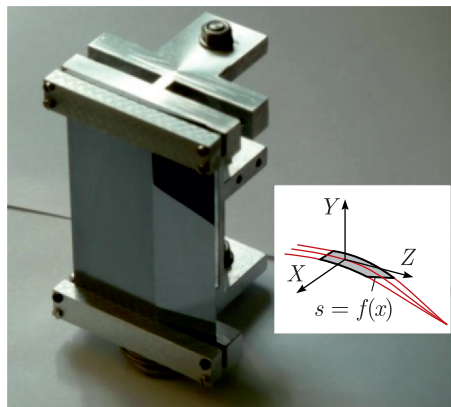


Рис. 1. Внешний вид фокусирующего кристаллического устройства и схема фокусировки пучка из параллельного в точку с помощью такого монокристалла

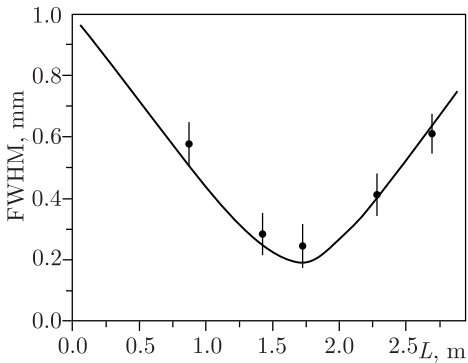


Рис. 2. Огибающая пучка (размер пучка в зависимости от расстояния, отсчитываемого от кристалла). Точки — эксперимент. Кривая — расчет для реальных условий с учетом рассеяния на воздухе и эмульсиях

не попадает в пучок, облучается только 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 (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 [11].

Заметим, что в экспериментах ЦЕРН [17–19] 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 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).

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

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 $2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. Пучок протонов в мишени был распущен до необходимой величины угловой расходимости $\sigma_x = \sigma_y = 0,9$ мрад. Кристаллы вводились

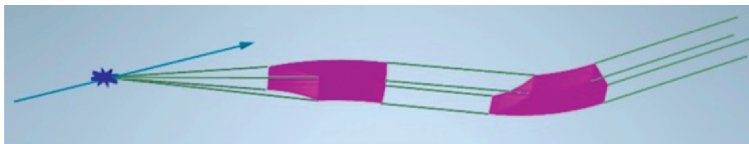


Рис. 3. Двухкристалльная оптическая схема для формирования аксиально-симметричного пучка

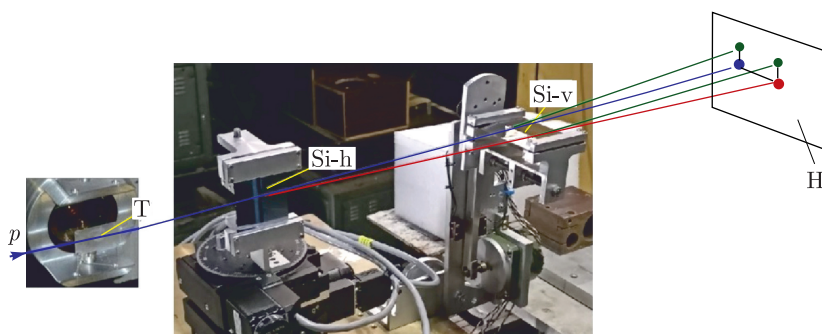


Рис. 4. Конфигурация установки КРИСТАЛЛ с активной мишенью и двумя фокусирующими кристаллами: Т — активная мишень; Si-h — горизонтально фокусирующий кристалл в гониометре; Si-v — вертикально фокусирующий кристалл в гониометре; Н — сцинтилляционный годоскоп. Лучи разных цветов показывают отклонение пучка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

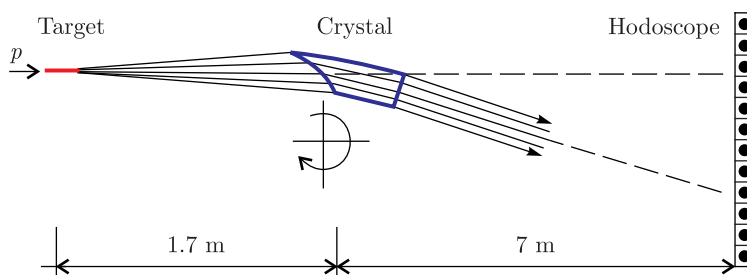


Рис. 5. Схема нахождения режима каналирования в кристалле, расположенном в гониометре

в режим каналирования поочередно, по схеме, представленной на рис. 5, как это делалось в [14].

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 [14].

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

На рис. 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 ~ 2 см. Эффективность кристаллической системы резко возрастает для ТэВ-ных энергий, где длина деканалирования свыше 50 см (согласно измеренным величинам [20]).

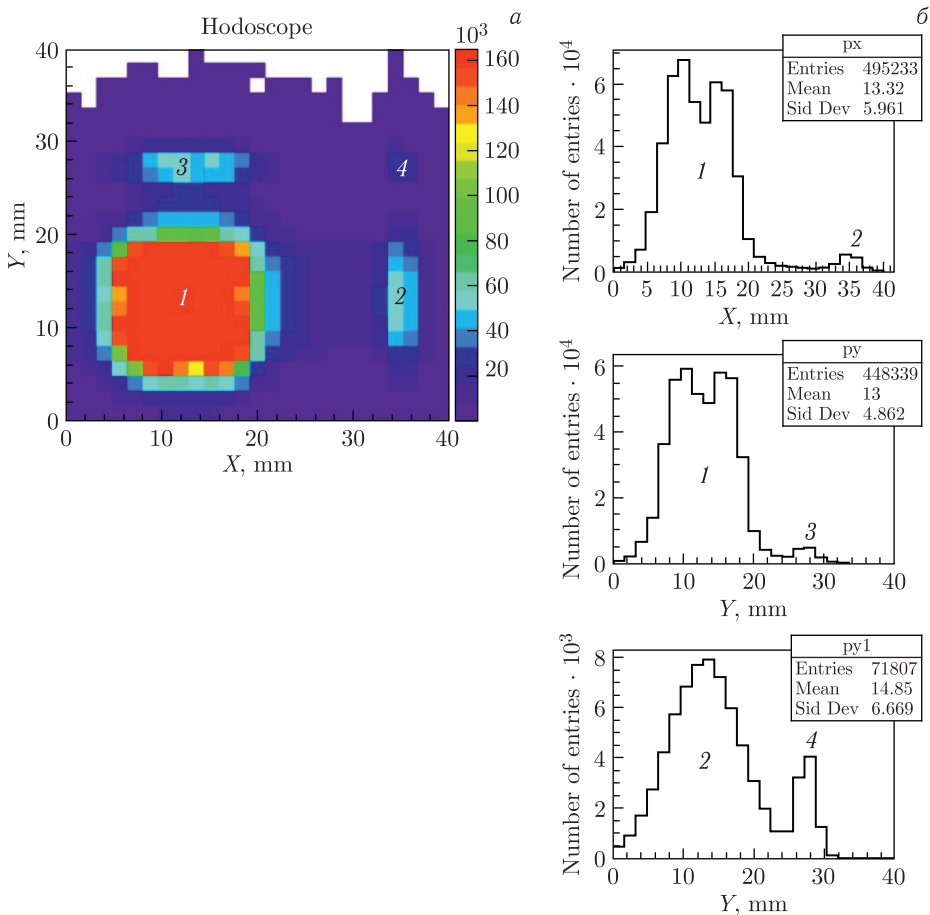


Рис. 6. *a*) Двумерное изображение профилей пучка: 1 — неотклоненный пучок протонов 50 ГэВ; 2 — отклоненный по горизонтали пучок первым кристаллом за счет каналирования; 3 — отклоненный по вертикали пучок вторым кристаллом, но не захваченный первым кристаллом в каналирование; 4 — аксиально-симметричный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

2. НОВЫЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ПУЧКОВ НЕЙТРИНО ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

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 сейчас схемами, которые требуют вывода протонного пучка, его взаимодействия с внешней мишенью и фокусировки пионов и каонов, родителей нейтрино, специальными высокоточными электромагнитными устройствами — горнами [21]. Такая громоздкая

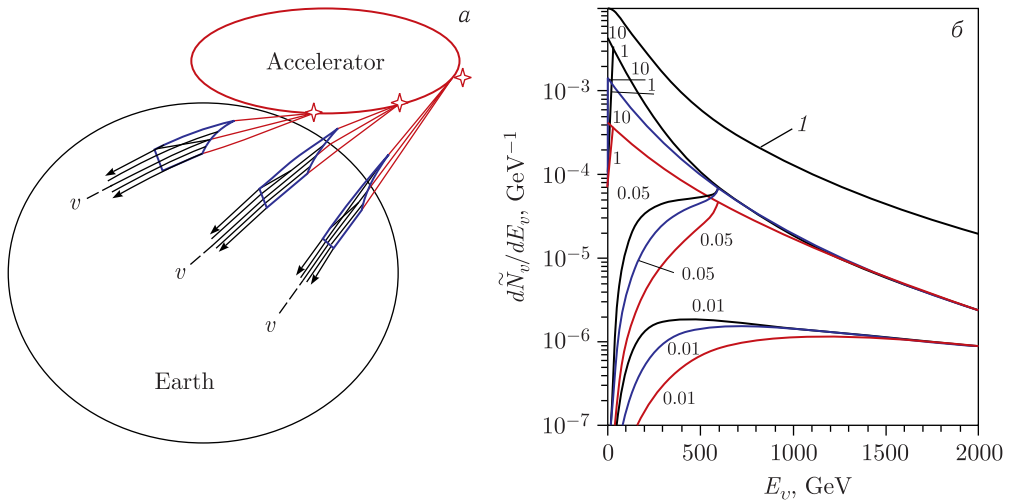


Рис. 7 (цветной в электронной версии). а) Иллюстрация зондирования Земли пучком нейтрино от кристаллов. В этой схеме пучки пионов и каонов генерируются на внутренних струйных газовых мишенях, отклоняются и фокусируются кристаллами, далее образуют нейтрино в распадных тоннелях. б) Рассчитанные нормированные распределения пучков нейтрино по энергии (см. [22]). Серая кривая (1) соответствует распадному тоннелю длиной 25 км, остальные — 5 км. Цифры над кривыми обозначают угловой конус в миллирадианах, в пределах которого нейтрино распространяются

схема позволяет получить пучок нейтрино только в одном заданном направлении, в то время как кристаллы легко могут быть установлены в произвольных точках ускорителя для зондирования Земли с помощью высокоэнергетичных нейтрино (рис. 7, а). Количественная информация о спектрах и потоках нейтрино подробно представлена нами ранее в работе [22]. С помощью аналитического подхода и метода Монте-Карло рассчитаны спектры нейтрино от распада пионов, сформированных фокусирующими кристаллами, в тоннеле длиной 5 и 25 км. Результаты расчетов для FCC представлены на рис. 7, б.

В работе мы представили новые применения изогнутых кристаллов в ускорительной науке, которые, надеемся, могут стимулировать новые эксперименты по физике высоких энергий. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-22-00001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Biryukov V. M., Chesnokov Yu. A., Kotov V. I.* Crystal Channeling and Its Application at High-Energy Sccelearators. Berlin: Springer, 1997. 219 p.
2. *Tsyganov E. N.* Estimates of Cooling and Bending Processes for Charged Particle Penetration through a Mono Crystal. Preprint TM-682, TM-684. Batavia: Fermilab, 1976.
3. *Elishev A. F. et al.* Steering of Charged Particle Trajectories by a Bent Crystal // Phys. Lett. B. 1979. V. 88. P. 387; JETP Lett. 1979. V. 30. P. 442.

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. High-Efficiency Beam Extraction and Collimation Using Channeling in Very Short Bent Crystals // *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. Results of Bent Crystal Channeling and Collimation at the Relativistic Heavy Ion Collider // *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. Crystal Collimation Studies at the Tevatron (T-980) // *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. Observation of Channeling for 6500 GeV/c Protons in the Crystal Assisted Collimation Setup for LHC // *Phys. Lett. B.* 2016. V. 758. P. 129.
8. Scandale W., Afonin A. G., Chesnokov Yu. A., Durum A. A., Maisheev V. A., Sandomirskiy Yu. E., Yanovich A. A., Yazynin I. A. et al. Feasibility of Crystal-Assisted Collimation in the CERN Accelerator Complex // *Intern. J. Mod. Phys. A.* 2022. V. 37. P. 2230004.
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. First Results on the Focusing of a 70-GeV Proton Beam by a Curved Single Crystal // *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. Highly Efficient Deflection of the Divergent Beam by Bent Single Crystal // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1995. V. 95. P. 449.
11. Afonin A. G., Baranov V. I., Baranov V. T., Britovich G. I., Bugorskii A. P., Bulgakov M. K., Durum A. A., Lobanov I. S., Lun'kov A. N., Lutchev A. V. et al. Investigation of the Focusing of a 50-GeV Proton Beam Using a New Crystal Device // *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. Observation of Focusing of 400 GeV/c Proton Beam with the Help of Bent Crystals // *Phys. Lett. B.* 2014. V. 733. P. 366.
13. Afonin A. G., Vasilyeva A. G., Durum A. A., Kostin M. Yu., Maisheev V. A., Sandomirskiy Yu. E., Pitalev V. I., Poluektov I. V., Chesnokov M. Yu., Chesnokov Yu. A., Yanovich A. A. Short-Focus Crystal Device and Its Applications on Modern Accelerators // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2022. V. 19, No. 4. P. 389–392.
14. Afonin A. G., Britovich 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. Focusing Crystal Device for Deflecting a Divergent 50-GeV Proton Beam // *JETP Lett.* 2016. V. 104. P. 12.
15. Scandale W., Afonin A. G., Chesnokov Y. A., Durum A. A., Maisheev V. A., Sandomirskiy Y. E., Yanovich A. A. Focusing of 180 GeV/c Pions from a Point-Like Source into a Parallel Beam by a Bent Silicon Crystal // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2019. V. 446. P. 15.
16. Scandale W., Arduini G., Cerutti F. et al. Double-Crystal Measurements at the CERN SPS // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2021. V. 1015. P. 165747.
17. Scandale W., Afonin A. G., Chesnokov Yu. A., Durum A. A., Maisheev V. A., Sandomirskiy Yu. E., Yanovich A. A. et al. Reduction of Multiple Scattering of High-Energy Positively Charged Particles During Channeling in Single Crystals // *Eur. Phys. J. C.* 2019. V. 79, No. 12. P. 993.
18. Scandale W., Afonin A. G., Chesnokov Yu. A., Durum A. A., Maisheev V. A., Sandomirskiy Yu. E., Yanovich A. A. et al. Observation of Strong Reduction of Multiple Scattering for Channeled Particles in Bent Crystals // *Phys. Lett. B.* 2020. V. 804. P. 135396.

19. Scandale W., Afonin A.G., Chesnokov Yu.A., Durum A.A., Maisheev V.A., Sandomirsky Yu.E., Yanovich A.A. et al. Multiple Scattering of Channeled and Non-Channeled Positively Charged Particles in Bent Monocrystalline Silicon // Eur. Phys. J. Plus. 2022. V.137, No.7. P.811.
20. Scandale W., Afonin A.G., Chesnokov Yu.A., Durum A.A., Maisheev V.A., Sandomirsky Yu.E., Yanovich A.A. et al. Dechanneling of High Energy Particles in a Long Bent Crystal // Nucl. Instr. Meth. B. 2019. V.438. P.38.
21. Карташев В.П., Котов В.И. Методы формирования пучков частиц на ускорителях высоких энергий. М.: Энергоатомиздат, 1989.
22. Chesnokov Y.A., Maisheev V.A. Neutrino Beams at Ultra High Energy Proton Colliders on the Basis of Focusing Single Crystals // Nucl. Phys. A. V.1003. P.122012.

Получено 7 февраля 2023 г.