

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.663

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗОГНУТЫХ
КРИСТАЛЛОВ НА СОВРЕМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ¹

© 2024 г. А. Г. Афонин^а, А. Г. Васильева^{а, *}, М. Ю. Чесноков^а,
Ю. А. Чесноков^а, А. А. Янович^а

^аИнститут физики высоких энергий им. А.А. Логунова

Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”

Россия, 142281, Протвино, Московская обл., площадь Науки, 1

*e-mail: vasilyeva-ag@ihep.ru

Поступила в редакцию 08.12.2023 г.

После доработки 23.04.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Представлены новые применения изогнутых кристаллов в ускорительной науке, которые могут стимулировать не проводимые ранее эксперименты по физике высоких энергий: каналы частиц нового типа для положительных вторичных частиц, получение пучков высокоэнергетичных нейтрино и кристаллический мюонный коллайдер. Сформулированы предложения для применения кристаллов на больших адронных коллайдерах, подкрепляемые экспериментальными исследованиями как на ускорителях ЦЕРН, так и на отечественном ускорителе У-70.

~~Ключевые слова: каналирование в кристаллах, ускорители, вывод пучков, мюонный коллайдер.~~

1. ВВЕДЕНИЕ

На крупных ускорителях для исследований физики высоких энергий траекториями частиц управляют магнитооптические системы, использующие поперечное магнитное поле. В 70-х годах профессор Э.Н. Цыганов из Дубны предложил использовать для отклонения пучков частиц изогнутые монокристаллы (рис. 1) [1]. За счет процесса каналирования (финитного движения в межплоскостном потенциале, где плотность ядер

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

мала) частицы поворачиваются, следуя за изгибом атомных плоскостей. Идея была успешно проверена во многих экспериментах и внедрена на ускорителях для вывода, коллимации и деления пучков [2].

Рис. 1. Схема поворота траектории частицы в изогнутом кристалле.

Этот метод нашел наиболее широкое практическое применение на ускорителе У-70 в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ, где кристаллы используются в регулярных сеансах работы для вывода и деления пучка. Теоретические вопросы физики каналирования были детально описаны в [2], наиболее подробные экспериментальные данные были получены в эксперименте UA9 в ЦЕРН с участием ученых из России [3]. Здесь лишь кратко отметим, что эффективность отклонения частиц изогнутым кристаллом определяется отношением критического угла каналирования θ_c к расходимости пучка φ и убывает экспоненциально с длиной кристалла L :

$$Eff \sim (\theta_c / \varphi) \cdot \exp(-L / L_d),$$

где характерный параметр L_d , называемый длиной деканалирования, линейно растет с энергией частиц и для протонов с энергией 100 ГэВ составляет 5 см в слабоизогнутом кристалле. Изгиб кристалла приводит к возникновению центробежной силы, уменьшающей эффективность каналирования. Существует критический радиус каналирования R_c , при котором оно становится невозможным. Для частиц с энергией 100 ГэВ этот радиус равен 20 см для плоскости (110) кремния и также линейно растет с энергией, как и параметр L_d . Следует отметить, что критический угол каналирования (угол Линдхарда) довольно мал: $\theta_c \sim (1/E)^{1/2} = 0.02-0.002$ мрад для протонов с энергиями $E = 100-10000$ ГэВ. По этой причине данный метод управления пучками не является универсальным, но может быть очень полезным в нескольких случаях, особенно для вывода циркулирующего пучка и его деления в каналах частиц, где изогнутые кристаллы выполняют роль миниатюрных магнитов.

2. ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОГНУТЫХ КРИСТАЛЛОВ В УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ У-70

В настоящее время на ускорителе У-70 действуют 10 специальных станций, на которых установлены 13 различных кристаллических дефлекторов CD [4]. Расположение станций с изогнутыми кристаллами в У-70 представлено на рис. 2а. Часть циркулирующего пучка направляется к кристаллу медленно нарастающим магнитным полем дополнительных катушек (так называемых бамп-магнитов). Система с обратной связью

может регулировать эту часть пучка в широком диапазоне как наведение к внутренним мишеням. Данная система позволяет реализовать режим одновременного вывода пучка в разных направлениях несколькими кристаллами. Одним из способов использования изогнутых кристаллов является прямой вывод протонов из кольца ускорителя кристаллом. В этом случае используются протяженные кристаллы, которые дают возможность получать большие углы отклонения, сравнимые с $\theta_{max} = 250$ мрад. Существуют две станции такого типа в ускорителе. Они выводят пучки протонов на экспериментальные установки, которые обычно работают со вторичными частицами от внутренних мишеней. Углы изгиба для таких дефлекторов составляют (80–90) мрад, а длина – (60–70) мм.

Рис. 2. а – Схема расположения кристаллов в кольце У-70 (на вставке показаны изогнутый кристалл и изображение отклоненного им пучка), **б** – полосковый кристаллический дефлектор.

Из-за большой длины кристалла и изгиба эффективность вывода низкая и составляет порядка 10^{-4} . Причина невысокой эффективности вывода в этих экспериментах заключается в том, что при больших длинах и углах изгиба кристаллов захват частиц в режим каналирования происходит в основном при первом прохождении кристалла, не захваченные же частицы сильно рассеиваются и в итоге теряются. Для реализации эффективного многооборотного вывода, когда частицы, не захваченные при первом прохождении кристалла, могут захватиться в последующие прохождения, требуются кристаллы небольшой длины (около 1 мм) с малыми углами изгиба. Эта возможность была реализована в [5] кристаллами, показанными на рис. 2б. На рис. 3а обобщаются данные по измерению эффективности кристаллического вывода из У-70 кристаллами, изогнутыми на разные углы.

Рис. 3. а – Эффективность кристаллического вывода в зависимости от угла изгиба, **б** – фокусировка и отклонение пучка частиц кристаллом со скошенным торцом.

В результате многолетней практики было установлено, что кристаллы могут выводить пучки с варьируемой интенсивностью от 10^6 до 10^{12} частиц в цикле без специального охлаждения в течение тысячи часов и без видимого ухудшения эффективности. Радиационная стойкость для кристаллов кремния в режиме каналирования составляет 10^{20} см⁻². Этот метод вывода пучка является хорошим дополнением к медленному классическому выводу пучка интенсивностью до 10^{13} частиц в импульсе. Он

показывает надежную воспроизводимую работу с предсказуемым результатом. Пучки от кристаллов обладают малым эмиттансом, имеют высокую по сравнению с обычными пучками пространственную стабильность, легко перестраиваются в широком диапазоне по интенсивности.

3. ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗОГНУТЫХ КРИСТАЛЛОВ НА СОВРЕМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

В последние несколько лет метод формирования пучков кристаллами был существенно развит. Большим успехом стало применение кристаллов в системе коллимации пучка БАК [3]. Также интересны эксперименты по фокусировке частиц кристаллами, проведенные в ЦЕРН в рамках коллаборации UA9 и на отечественном ускорителе У-70 [6–12]. Разработанные фокусирующие кристаллы раскрывают возможности новой оптики для сверхвысоких энергий. Современные ускорители уходят в область энергий порядка нескольких ТэВ, БАК уже оперирует энергией 7 ТэВ. Планируется БКК (будущий кольцевой коллайдер) с энергией до 50 ТэВ. В этой области энергий разлет частиц с мишеней очень узок, угол составляет доли миллирадиан. Для формирования пучков частиц таких энергий созданы специальные кристаллические элементы с фокусирующей кромкой (рис. 3б). Эти кристаллы могут работать как сверхсильные линзы с фокусным расстоянием менее 1 м, с эквивалентным магнитным полем 1000 Тл. На ускорителях СПС и У-70 проведена серия экспериментов с такими кристаллическими элементами: фокусировка параллельного пучка в точку, фокусировка из точки в параллель, фокусировка на экстремально малые расстояния.

Также показана возможность управлять вторичными частицами, рожденными на фиксированной мишени [13]. Эта идея в пилотном режиме реализована на У-70 [14], где построен тестовый канал положительных π -мезонов нового типа, который не потребляет электрической энергии. Перед кольцевым магнитом открытого типа (рис. 4) установлена внутренняя мишень. Положительно заряженные π -мезоны выталкиваются горизонтальным магнитом во внутреннюю часть кольцевого зала ускорителя, фокусируются и отклоняются фокусирующим кристаллом по вертикали в зону физической установки. Кристалл действует на пучок локально, не имеет обратных полей, как у магнитов, поэтому на короткой базе обеспечивает очистку от нежелательных фоновых частиц, что делает возможным вывод пучка из кольцевого зала через небольшое отверстие в защите.

Рис. 4. Схема формирования пучка вторичных положительно заряженных π -мезонов с помощью внутренней мишени и фокусирующего кристалла.

При применении нитевидной внутренней мишени, на которую наводятся 10^{12} протонов в цикле, интенсивность пучка вторичных π -мезонов составила порядка 10^5 частиц за цикл. Низкая интенсивность пучка связана с относительно невысокой энергией протонного пучка в У-70, равной 50 ГэВ. На будущих ускорителях в диапазоне ТэВ, где вторичные частицы имеют узкий конус разлета, эффективность кристаллической системы резко вырастет.

Фокусирующие кристаллы позволяют также осуществить новый метод формирования пучков нейтрино, который отличается существенной простотой по сравнению с применяемыми на данный момент схемами. Подобные схемы обычно требуют вывода протонного пучка, его взаимодействия с внешней мишенью и дальнейшую фокусировку π -мезонов и K -мезонов, родителей нейтрино, специальными сильноточными электромагнитными устройствами – горнами. 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 для зондирования Земли с помощью высокоэнергетических нейтрино. Рис. 5 демонстрирует такую возможность. Количественная информация о спектрах и потоках нейтрино подробно представлена в работе [15].

Рис. 5. Иллюстрация зондирования Земли пучком нейтрино от кристаллов. В этой схеме пучки π - и K -мезонов генерируются на внутренних струйных газовых мишенях, отклоняются и фокусируются кристаллами, далее образуют нейтрино в распадных тоннелях.

Следует отметить, что, помимо дальних нейтрино, существует большой интерес к исследованиям и с ускорительными нейтрино высоких энергий. Например, в проектах [16–18] рассматриваются схемы мечения нейтрино и измерения сечений взаимодействий нейтрино, где нужны качественные пучки π - и K -мезонов. В этих проектах предполагается традиционный способ получения нейтрино с помощью фокусировки электромагнитами. Очевидно, при высоких энергиях рассмотренные схемы с кристаллами позволяют сделать это лучше. Кристаллы обеспечивают высокую параллельность мезонного пучка с углом Линдхарда 10 мкрад и простой отбор частиц по импульсу по схеме, приведенной на рис. 4.

Еще одно интересное применение фокусирующего кристалла связано с возможностью создания мюонного коллайдера, идея которого разрабатывалась с 70-х годов [19]. В настоящее время рассматриваются проекты коллайдеров мюонов с разными

энергиями, начиная от 120 ГэВ [20] для изучения бозона Хиггса и заканчивая энергиями в диапазоне ТэВ в пучке [21, 22] в качестве альтернативы проектам электронных линейных коллайдеров. Современные проекты мюонных коллайдеров очень дороги и сложны, требуют построения цепочки новых сверхпроводящих ускорителей для решения проблем с коротким временем жизни мюонов и уменьшением эмиттанса пучка. В этих проектах мюоны получают на мишенях при низких или промежуточных энергиях. Затем после уменьшения эмиттанса пучка они должны очень быстро ускориться, поскольку время жизни очень мало ($\tau_\mu = 2$ мкс в системе покоя). В работе [23] предложен вариант коллайдера, где мюоны можно получить на адронном коллайдере при высокой энергии с помощью фокусирующих изогнутых кристаллов.

Суть нашего предложения показана на рис. 6. Внутренние мишени $T_{1,2}$ установлены в двух различных кольцах одного из больших адронных коллайдеров (диапазона ТэВ). Две фокусирующие кристаллические системы $FC_{1,2}$, образуют параллельные пучки вторичных π -мезонов и K -мезонов, как описано выше. Мюонные пучки образуются в распадных туннелях $DT_{1,2}$ длиной около километра. Если энергия первичного протонного пучка составляет 7 ТэВ, как в БАК, то можно рассчитывать на образование мюонных пучков порядка сотен ГэВ в распадных туннелях. Углы образования мюонов в результате распада $\pi, K \rightarrow \mu\nu_\mu$ при таких энергиях находятся в пределах десятков мкрад. Это приводит к значению эмиттанса мюонного пучка около $1 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ в конце распадного туннеля длиной около 1 км. Размер мюонного пучка в интервале импульсов 450–550 ГэВ/с, как это видно на рис. 7, вписывается в апертуру типовых квадрупольных линз диаметром 250 мм. В этом случае магнитооптические каналы транспортировки частиц $BL_{1,2}$ с начальным и конечным объективами линз с высоким градиентом магнитного поля могут захватывать и фокусировать мюонные пучки в большом (несколько процентов) диапазоне импульсов.

Рис. 6. Кристаллический мюонный коллайдер: $T_{1,2}$ – внутренние мишени в большом адронном коллайдере, $FC_{1,2}$ – фокусирующие кристаллические системы, $DT_{1,2}$ – распадные туннели, $BL_{1,2}$ – магнитооптические каналы.

Рис. 7. Рассчитанное методом Монте-Карло распределение мюонов с импульсами 450–550 ГэВ/с по радиусу в конце распадного туннеля длиной 1 км.

Ниже мы дадим очень приблизительную оценку светимости такого мюонного коллайдера. Известна формула для определения светимости коллайдера:

$$LUM = f \frac{N^2}{4\pi\sigma^2},$$

где f – частота столкновений, N – число частиц в пучке, σ – размер пучка. Например, для БАК, где вращаются около 3000 сгустков с частотой обращения около 10000 оборотов в секунду (т. е. $f = 3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$) с интенсивностью 10^{11} частиц в сгустке и пучком размерами в несколько десятков микрон в месте встречи, эта величину составляет $10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Сгустки π -мезонов величиной $10^{-3} \cdot 10^{11} = 10^8$ частиц будут генерироваться на тонких струйных мишенях $T_{1,2}$ толщиной 0.1 г/см^2 (взаимодействие интенсивного циркулирующего пучка с тонкими мишенями рассмотрено в [13]). Принимая во внимание выбранный диапазон импульсов 10% и размер сфокусированных мюонных пучков порядка долей миллиметра в точке пересечения мюонов, получаем значение светимости $LUM_{\mu} = 10^7 \cdot 10^{14} \cdot 10^3 = 10^{24} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Этого недостаточно для полномасштабных мюонных экспериментов, но такую схему мюонного коллайдера можно использовать по крайней мере в качестве пилотного варианта для будущих экспериментов. Неоспоримое положительное качество этого предложения заключается в его простоте. Нет необходимости строить новый ускоритель. Проект может быть реализован либо в существующих ускорителях БАК и Теватрон, либо в строящемся БКК и законсервированном российском проекте УНК.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы представили новые применения изогнутых кристаллов в ускорительной науке: каналы частиц нового типа для положительных вторичных частиц, получение пучков высокоэнергетичных нейтрино и кристаллический мюонный коллайдер. Мы надеемся, эти предложения будут стимулировать новые эксперименты по физике высоких энергий. Сформулированные предложения с кристаллами применимы для настоящих и будущих адронных коллайдеров. Изложенные идеи подкрепляются экспериментальными исследованиями как на ускорителях ЦЕРН, так и на отечественном ускорителе У-70.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-22-00001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tsyganov E.N.* // Fermilab preprint ТМ-684, Batavia, 1976.

2. *Biryukov V.M., Chesnokov Yu.A., Kotov V.I.* Crystal channeling and its application at high-energy accelerators. Berlin: Springer, 1997.
3. *Arduini G., Assmann R., Bracco C., Butcher M., Cerutti F., D'Andrea M., Esposito L.S., Garattini M., Gilardoni S., Laface E., Lari L., Losito R., Masi A., Metral E., Mirarchi D. et al.* // International Journal of Modern Physics A. 2022. V. 37. P. 2230004.
<https://doi.org/10.1142/S0217751X22300046>
4. *Afonin A.G., Baranov V.T., Barnov E.V., Britvich G.I., Chesnokov Y.A., Chirkov P.N., Kalinin V.A., Maisheev V.A., Reshetnikov S.F., Savin D.A., Terekhov V.I.* // International Journal of Modern Physics A. 2018. V. 33. P. 1850138.
<https://doi.org/10.1142/S0217751X18501385>
5. *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., Scandale W., Stefancich M., Terekhov V.I., Trbojevic D., Troyanov E.F., Vincenzi D.* // Physical Review Letters. 2001. V. 87. P. 948021.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.094802>
6. *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., Dudenko V.V., Zapol'skii V.N., Kotov V.I., Tsarik S.V., Chesnokov Yu.A.* // JETP Letters. 1991. V. 54. P. 487.
7. *Baranov V.I., Biryukov V.M., Bugorsky A.P., Chesnokov Y.A., Kotov V.I., Tarakanov M.V., Terekhov V.I., Tsarik S.V., Fedin O.L., Gordeeva M.A., Gur'yev M.P., Platonov Y.P., Smirnov A.I.* // Proceedings of the 1995 Particle Accelerator Conference. Dallas. IEEE. 1995. P. 426.
8. *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., Maisheev V.A., Sandomirskii Y.E., Skleznev A.V., Chesnokov Y.A., Chirkov P.N. et al.* // JETP Letters. 2012. V. 96. P. 424.
<https://doi.org/10.1134/S0021364012190022>
9. *Scandale W., Arduini G., Butcher M., Cerutti F., Gilardoni S., Lechner A., Losito R., Masi A., Metral E., Mirarchi D., Montesano S., Redaelli S., Smirnov G., Bandiera L., Baricordi S. et al.* // Physics LettersB. 2014. V. 733. P. 366.
<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2014.05.010>
10. *Afonin A.G., Vasilyeva A.G., Durum A.A., Kostin M.Yu., Maisheev V.A., Sandomirsky Yu.E., Pitalev V.I., Poluektov I.V., Chesnokov M.Yu., Chesnokov Yu.A., Yanovich A.A.* // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2022. V. 19. P. 389.
<https://doi.org/10.1134/s1547477122040021>

11. *Afonin A.G., Britvich G.I., Bugorskii A.P., Bulgakov M.K., Durum A.A., Kostin M.Y., Lutchev A.V., Maisheev V.A., Sandomirskii Y.E., Pitalev V.I., Poluektov I.V., Chesnokov Y.A., Chirkov P.N., Yanovich A.A.* // JETP Letters. 2016. V. 104. P. 12.
<https://doi.org/10.1134/S0021364016130051>
12. *Scandale W., Arduini G., Cerutti F., Garattini M., Gilardoni S., Lechner A., Losito R., Masi A., Mirarchi D., Montesano S., Natochii A., Redaelli S., Rossi R., Smirnov G., Murtas F. et al.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2019. V. 446. P. 15. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.03.024>
13. *Britvich G.I., Durum A.A., Kostin M.Y., Maisheev V.A., Chesnokov Y.A., Yanovich A.A.* // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2019. V. 129. P. 229.
<https://doi.org/10.1134/S1063776119070045>
14. *Afonin A.G., Baranov V.T., Barnov E.V., Britvich G.I., Lobanov I.S., Poluektov I.V., Reshetnikov S.F., Savin D.A., Sandomirskiy Y.E., Smaglyuk D.S., Terekhov V.I., Chesnokov M.Y., Chesnokov Y.A., Chirkov P.N., Yanovich A.A.* // JETP Letters. 2021. V. 113. P. 226.
<https://doi.org/10.1134/S002136402104007X>
15. *Chesnokov Y.A., Maisheev V.A.* // Nuclear Physics A. 2020. V. 1003. P. 122012.
<https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2020.122012>
16. *Berra A., Cecchini S., Cindolo F., Jollet C., Longhin A., Ludovici L., Mandrioli G., Mauri N., Meregaglia A., Paoloni A., Pasqualini L., Patrizii L., Pupilli F., Pozzato M., Prest M. et al.* // Proceedings of the XVII International Workshop on Neutrino Factories and Future Neutrino Facilities. Rio de Janeiro. 2015. P. 368. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.08202>
17. *Charitonidis N., Pari M., Parozzi E.G., Longhin A., Terranova F.* // Applied Sciences . 2021. V. 11. P. 1.
<https://doi.org/10.3390/app11041644>
18. *Berra A., Bonesini M., Brizzolari C., Calviani M., Catanesi M.G., Cecchini S., Cindolo F., Collazuol G., Conti E., Dal Corso F., De Rosa G., Gola A., Intonti R. A., Jollet C. et al.,* ENUBET Collaboration // CERN preprint SPSC-EOI-014. 2016.
19. *Skrinsky A.N.* $\mu^+\mu^-$ possibilities. Intersecting Storage Rings // Morges Seminar. Novosibirsk. 1971.
20. *Neuffer D., Palmer M., Alexahin Y., Ankenbrandt C., Delahaye J.P.* // Proceedings of the 13th International Particle Accelerator Conference. Shanghai. 2013. P. 1472.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1502.02042>

21. *Wang M-H., Nosochkov Y., Cai Y., Palmer M.* // Proceedings of the 15th International Particle Accelerator Conference. Richmond. 2015. P. 2226.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/09/P09003>
22. *Antonelli M., Boscolo M., Di Nardo R., Raimondi P.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2016. V. 807. P. 101.<https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.10.097>
23. *Chesnokov M.Y., Chesnokov Y.A., Yanovich A.A.* // International Journal of Modern Physics A. 2020. V. 35. № 1. P. 2050002.
<https://doi.org/10.1142/S0217751X20500025>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема поворота траектории частицы в изогнутом кристалле.

Рис. 2. а – Схема расположения кристаллов в кольце У-70 (на вставке показаны изогнутый кристалл и изображение отклоненного им пучка), **б** – полосковый кристаллический дефлектор.

Рис. 3. а – Эффективность кристаллического вывода в зависимости от угла изгиба, **б** – фокусировка и отклонение пучка частиц кристаллом со скошенным торцом.

Рис. 4. Схема формирования пучка вторичных положительно заряженных π -мезонов с помощью внутренней мишени и фокусирующего кристалла.

Рис. 5. Иллюстрация зондирования Земли пучком нейтрино от кристаллов. В этой схеме пучки π - и K -мезонов генерируются на внутренних струйных газовых мишенях, отклоняются и фокусируются кристаллами, далее образуют нейтрино в распадных туннелях.

Рис. 6. Кристаллический мюонный коллайдер: $T_{1,2}$ – внутренние мишени в большом адронном коллайдере, $FC_{1,2}$ – фокусирующие кристаллические системы, $DT_{1,2}$ – распадные туннели, $BL_{1,2}$ – магнитооптические каналы.

Рис. 7. Рассчитанное методом Монте-Карло распределение мюонов с импульсами 450–550 ГэВ/с по радиусу в конце распадного туннеля длиной 1 км.

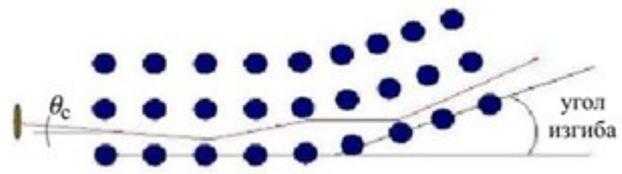
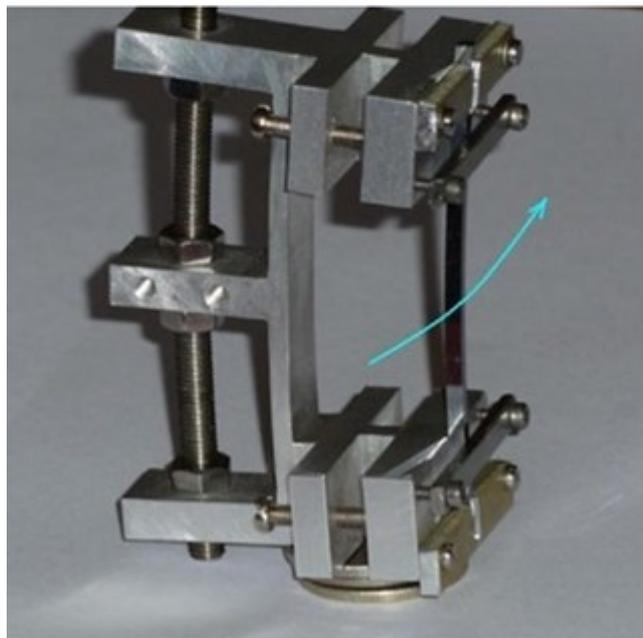


Рис. 1.

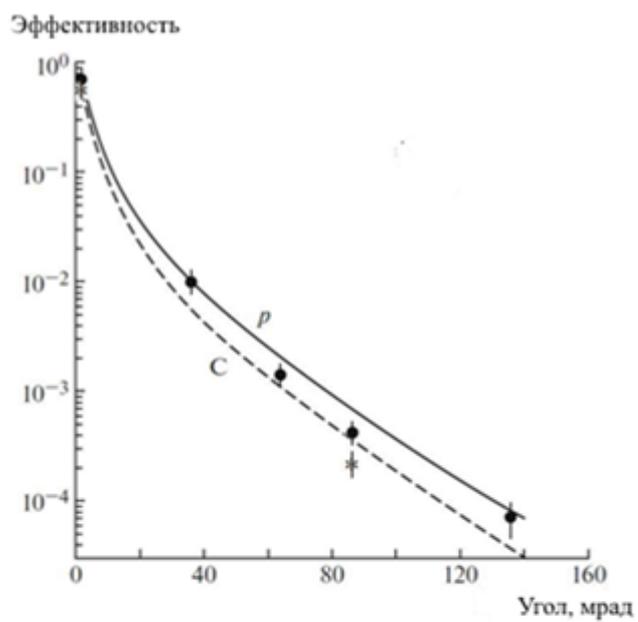


а

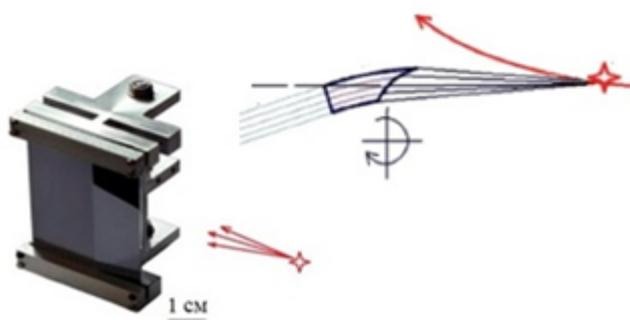


б

Рис. 2.



а



б

Рис. 3.

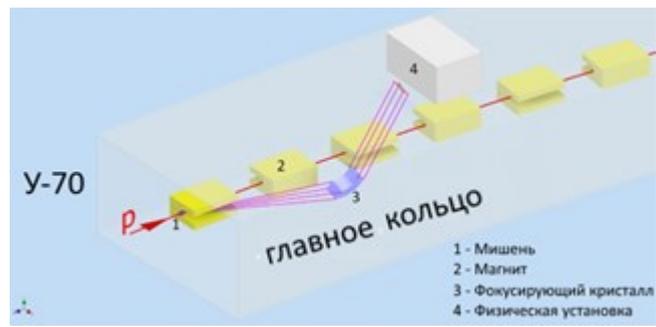


Рис. 4.



Рис. 5.

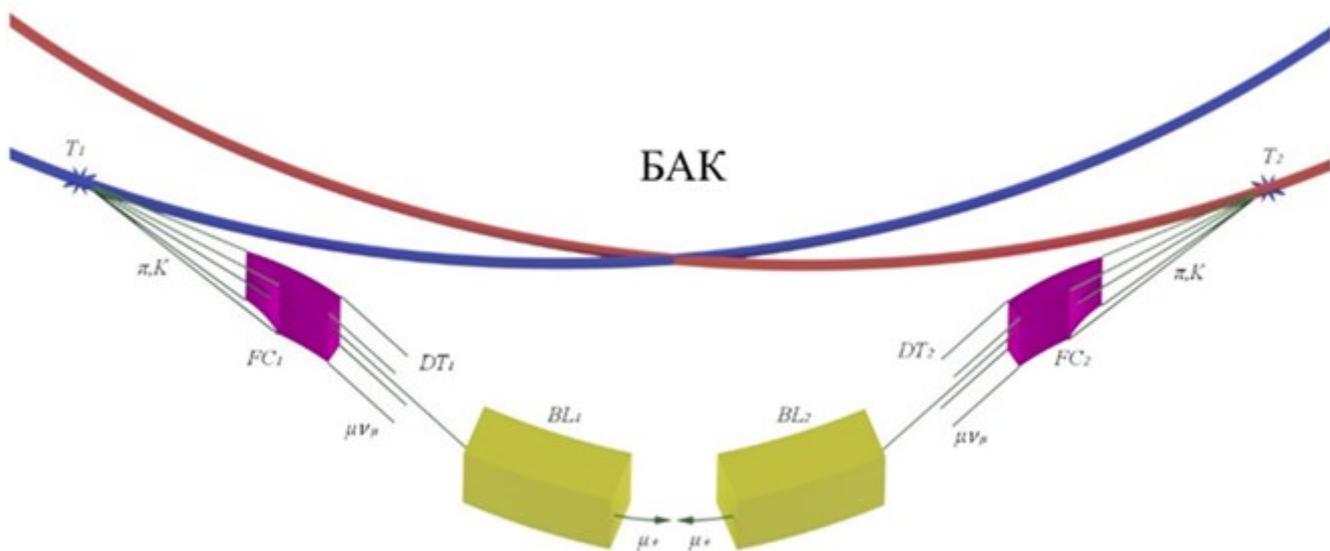


Рис. 6.

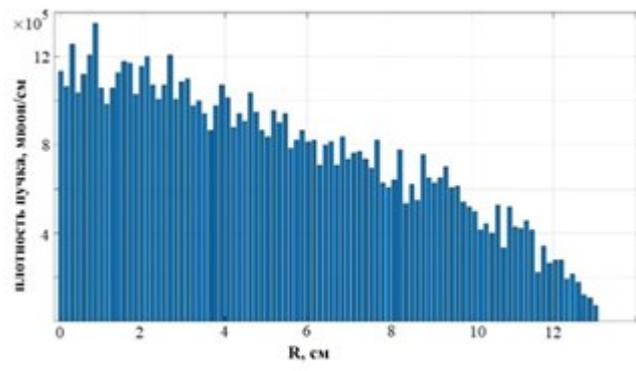


Рис. 7.

Для связи с авторами:

Васильева Алина

vasilyeva-ag@ihep.ru

Тел.: 8-903-500-73-13 (моб.)

Чесноков Юрий Андреевич

E-mail: chesnikov@ihep.ru

Тел.: 8-916-742-36-40 (моб.)

Чесноков Михаил Юрьевич

Michailchesnikov@yandex.ru

Афонин Александр

E-mail: afonin@ihep.ru

Янович Андрей

E-mail: yanovich@ihep.ru

Для переводчика:

**NEW POSSIBILITIES FOR APPLYING BENT CRYSTALS IN MODERN
ACCELERATORS**

A. G. Afonin, A. G. Vasilyeva, M. Yu. Chesnikov, Yu. A. Chesnikov, A. A. Yanovich,

The article presents new applications of bent crystals in accelerator science, which can stimulate new experiments in high-energy physics: particle channels of new type made for positive secondary particles, production of high-energy neutrino beams and a crystalline muon collider. Proposals were formulated for the use of crystals in large hadron colliders, which were confirmed by experimental studies both at CERN accelerators and at the domestic U-70 accelerator.

Keywords: channeling in crystals, accelerators, beam extraction, muon collider

We acknowledge the Russian Science Foundation (project no. 23-22-00001) for support.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tsyganov E.N. // Fermilab preprint ТМ-684, Batavia, 1976.
2. Biryukov V.M., Chesnikov Yu.A., Kotov V.I. Crystal channeling and its application at high-energy accelerators. Berlin: Springer, 1997.
3. Arduini G., Assmann R., Bracco C., Butcher M., Cerutti F., D'Andrea M., Esposito L.S., Garattini M., Gilardoni S., Laface E., Lari L., Losito R., Masi A., Metral E., Mirarchi D. et al. // International Journal of Modern Physics A. 2022. V. 37. P. 2230004.
<https://doi.org/10.1142/S0217751X22300046>
4. Afonin A.G., Baranov V.T., Barnov E.V., Britvich G.I., Chesnikov Y.A., Chirkov P.N., Kalinin V.A., Maishev V.A., Reshetnikov S.F., Savin D.A., Terekhov V.I. // International Journal of Modern Physics A. 2018. V. 33. P. 1850138.
<https://doi.org/10.1142/S0217751X18501385>
5. Afonin A.G., Baranov V.T., Biryukov V.M., Breese M.B.H., Chepegin V.N., Chesnikov Yu.A., Guidi V., Ivanov Yu.M., Kotov V.I., Martinelli G., Scandale W., Stefancich M.,

- Terekhov V.I., Trbojevic D., Troyanov E.F., Vincenzi D. // *Physical Review Letters*. 2001. V. 87. P. 948021.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.094802>
6. 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., Dudenko V.V., Zapol'skii V.N., Kotov V.I., Tsarik S.V., Chesnokov Yu.A. // *JETP Letters*. 1991. V. 54. P. 487.
 7. Baranov V.I., Biryukov V.M., Bugorsky A.P., Chesnokov Y.A., Kotov V.I., Tarakanov M.V., Terekhov V.I., Tsarik S.V., Fedin O.L., Gordeeva M.A., Gur'yev M.P., Platonov Y.P., Smirnov A.I. // *Proceedings of the 1995 Particle Accelerator Conference*. Dallas. IEEE. 1995. P. 426.
 8. 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., Maishev V.A., Sandomirskii Y.E., Skleznev A.V., Chesnokov Y.A., Chirkov P.N. et al. // *JETP Letters*. 2012. V. 96. P. 424.
<https://doi.org/10.1134/S0021364012190022>
 9. Scandale W., Arduini G., Butcher M., Cerutti F., Gilardoni S., Lechner A., Losito R., Masi A., Metral E., Mirarchi D., Montesano S., Redaelli S., Smirnov G., Bandiera L., Baricordi S. et al. // *Physics Letters B*. 2014. V. 733. P. 366.
<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2014.05.010>
 10. Afonin A.G., Vasilyeva A.G., Durum A.A., Kostin M.Yu., Maishev V.A., Sandomirsky Yu.E., Pitalev V.I., Poluektov I.V., Chesnokov M.Yu., Chesnokov Yu.A., Yanovich A.A. // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2022. V. 19. P. 389.
<https://doi.org/10.1134/s1547477122040021>
 11. Afonin A.G., Britvich G.I., Bugorskii A.P., Bulgakov M.K., Durum A.A., Kostin M.Y., Lutchev A.V., Maishev V.A., Sandomirskii Y.E., Pitalev V.I., Poluektov I.V., Chesnokov Y.A., Chirkov P.N., Yanovich A.A. // *JETP Letters*. 2016. V. 104. P. 12.
<https://doi.org/10.1134/S0021364016130051>
 12. Scandale W., Arduini G., Cerutti F., Garattini M., Gilardoni S., Lechner A., Losito R., Masi A., Mirarchi D., Montesano S., Natochii A., Redaelli S., Rossi R., Smirnov G., Murtas F. et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2019. V. 446. P. 15. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.03.024>
 13. Britvich G.I., Durum A.A., Kostin M.Y., Maishev V.A., Chesnokov Y.A., Yanovich A.A. // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2019. V. 129. P. 229.
<https://doi.org/10.1134/S1063776119070045>
 14. Afonin A.G., Baranov V.T., Barnov E.V., Britvich G.I., Lobanov I.S., Poluektov I.V., Reshetnikov S.F., Savin D.A., Sandomirskiy Y.E., Smaglyuk D.S., Terekhov V.I., Chesnokov M.Y., Chesnokov Y.A., Chirkov P.N., Yanovich A.A. // *JETP Letters*. 2021. V. 113. P. 226.
<https://doi.org/10.1134/S002136402104007X>
 15. Chesnokov Y.A., Maishev V.A. // *Nuclear Physics A*. 2020. V. 1003. P. 122012.
<https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2020.122012>
 16. Berra A., Cecchini S., Cindolo F., Jollet C., Longhin A., Ludovici L., Mandrioli G., Mauri N., Meregaglia A., Paoloni A., Pasqualini L., Patrizii L., Pupilli F., Pozzato M., Prest M. et al. // *Proceedings of the XVII International Workshop on Neutrino Factories and Future Neutrino Facilities*. Rio de Janeiro. 2015. P. 368. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.08202>
 17. Charitonidis N., Pari M., Parozzi E.G., Longhin A., Terranova F. // *Applied Sciences*. 2021. V. 11. P. 1.
<https://doi.org/10.3390/app11041644>
 18. Berra A., Bonesini M., Brizzolari C., Calviani M., Catanesi M.G., Cecchini S., Cindolo F., Collazuol G., Conti E., Dal Corso F., De Rosa G., Gola A., Intonti R. A., Jollet C. et al., ENUBET Collaboration // *CERN preprint SPSC-EOI-014*. 2016.
 19. Skrinsky A.N. $\mu^+\mu^-$ possibilities. *Intersecting Storage Rings // Morges Seminar*. Novosibirsk. 1971.
 20. Neuffer D., Palmer M., Alexahin Y., Ankenbrandt C., Delahaye J.P. // *Proceedings of the 13th International Particle Accelerator Conference*. Shanghai. 2013. P. 1472.

- <https://doi.org/10.48550/arXiv.1502.02042>
21. Wang M-H., Nosochkov Y., Cai Y., Palmer M. // Proceedings of the 15th International Particle Accelerator Conference. Richmond. 2015. P. 2226.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/09/P09003>
 22. Antonelli M., Boscolo M., Di Nardo R., Raimondi P. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2016. V. 807. P. 101.<https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.10.097>
 23. Chesnokov M.Y., Chesnokov Y.A., Yanovich A.A. // International Journal of Modern Physics A. 2020. V. 35. № 1. P. 2050002.
<https://doi.org/10.1142/S0217751X20500025>