

Кристаллы вместо магнитов: новый подход к управлению пучками на ускорителях (Миниобзор)

С. Ф. Решетников, Ю. А. Чесноков¹⁾, А. А. Янович

Институт физики высоких энергий имени А. А. Логунова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, 142281 Протвино, Россия

Поступила в редакцию 5 июня 2026 г.

После переработки 8 июня 2026 г.

Принята к публикации 8 июня 2026 г.

Развитие ускорительной техники ограничено ресурсоемкостью традиционных методов формирования пучков частиц, особенно при высоких энергиях. Современные ускорители используют медленный вывод пучка и фокусировку магнитами, что неэффективно при энергиях выше 1 ТэВ. В исследовании развивается новый метод с использованием кристаллов для фокусировки и отклонения пучков. При высоких энергиях разлет вторичных частиц уменьшается, что позволяет эффективно применять кристаллы вместо магнитов. Эта технология перспективна и для отечественного ускорителя У-70. Целью исследования было создание кристаллических систем для формирования пучков различных частиц.

DOI: 10.7868/S3034576626070125

Введение. Развитие ускорительной техники сталкивается с проблемой ресурсоемкости традиционных методов формирования пучков частиц, особенно при высоких энергиях. Современные ускорители, такие как SPS в ЦЕРНе и У-70 в Протвино, используют медленный вывод пучка, создание вторичных частиц на мишени и их фокусировку магнитами [1, 2]. При энергиях выше 1 ТэВ этот подход становится неэффективным. В миниобзоре рассматривается развитие более рационального метода, основанного на использовании изогнутых кристаллов для отклонения пучков (предложенного Э. Н. Цыгановым). При высоких энергиях (от 1 ТэВ) разлет вторичных частиц с мишени значительно уменьшается, что позволяет эффективно использовать вместо магнитов кристаллическое фокусирующее устройство. Эта технология перспективна и для отечественного ускорителя У-70 (до 70 ГэВ) при соответствующей адаптации. Целями наших исследований в 2016–2024 гг. было создание комплексных кристаллических систем для формирования пучков первичных протонов, π - и K -мезонов, нейтрино и мюонов. Несколько результатов приводятся в данном миниобзоре.

1. Эффективность отклонения пучка изогнутым кристаллом. В 1976 году Э. Н. Цыгановым из Дубны (ОИЯИ) была теоретически обоснована возможность отклонения заряженных частиц с по-

мощью изогнутых кристаллов [3]. С тех пор проведено достаточно большое количество экспериментов, подтверждающих эту идею.

Первым практическим достижением этого эффекта стало применение изогнутых кристаллов для вывода протонных пучков. В 1984 году на синхрофазотроне ОИЯИ был продемонстрирован вывод протонного пучка энергией 8.4 ГэВ с помощью кремниевого кристалла, изогнутого на 35 мрад, с эффективностью 10^{-4} [4]. В 1989 году на ускорителе У-70 ИФВЭ кристалл кремния, изогнутый на ~ 85 мрад, вывел пучки протонов с энергиями 50 и 70 ГэВ, а эффективность была доведена до 10^{-3} [5]. В 1993 году на ускорителе SPS ЦЕРНа кристаллы кремния, изогнутые на 8.5 мрад, вывели пучки протонов энергией 120 ГэВ с эффективностью около 10 % и 270 ГэВ с эффективностью примерно 20 % [6]. В 1995 году на ускорителе ФНАЛ кремниевый кристалл, изогнутый на 0.64 мрад, вывел протоны 900 ГэВ с эффективностью ~ 30 %, показав возможность параллельного вывода и эксплуатации в режиме коллайдера [7]. В конце 1990-х в ИФВЭ был отработан метод вывода с использованием коротких кристаллов (1–2 мм) с небольшими углами изгиба (1–2 мрад), позволивший достичь радикального увеличения эффективности до 85 % за счет многообратного вывода [8–10].

Этот успех позволил начать исследования по коллимации пучка на ускорителях У-70 [9], RHIC [11], Tevatron [12], SPS [13] и, наконец, LHC [14].

¹⁾e-mail: chesnokov@ihep.ru

На данный момент теоретические вопросы физики каналирования и ранние эксперименты были детально описаны в ([15–19] и ссылки там), наиболее подробные современные экспериментальные данные были получены в эксперименте UA9 (см. [20, 21] и ссылки там). Здесь лишь кратко отметим, используя обозначения [18, 19], что эффективность отклонения частиц изогнутым кристаллом определяется отношением критического угла каналирования θ_c к расходимости пучка φ и убывает экспоненциально с длиной кристалла L : $\text{Eff} \sim (\theta_c/\varphi) \times \exp(-L/L_d)$, 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 каналирование становится невозможным. Для частиц с энергией 100 ГэВ он равен 20 см для плоскости (110) кремния, и также линейно растет с энергией, как и параметр L_d . С ростом угла изгиба кристалла эффективность поворота частицы падает практически до нуля для угла $\theta_{\max} \sim L_d/R_c = 0.25$ рад. Так же 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 соответственно). Поэтому этот 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. Вывод первичного циркулирующего пучка кристаллами. В проектах РНФ были оптимизированы два типа кристаллов – с малым углом отклонения ~ 1 мрад (обозначение (1) на рис. 1) и большим углом отклонения ~ 80 мрад (обозначен (2) на рис. 1). Кристаллы первого типа обеспечивают эффективный, до 85 %, вывод первичного протонного пучка в направлении канала частиц 8 [22]. А кристаллы второго типа выводят пучок умеренной интенсивности в каналы 4 и 14 [23, 24], как показано на рис. 1. В процессе длительной работы кристаллы продемонстрировали положительные особенности кристаллического вывода: малый эмиттанс и высокая стабильность, возможность быстрой перестройки в широком диапазоне интенсивности, одновременная работа с внутренними мишенями [22, 24]. Установлен радиационный предел, при котором эффективность отклонения кристаллом падает в два раза $\sim 2 \times 10^{20}$ прот/см² [22].

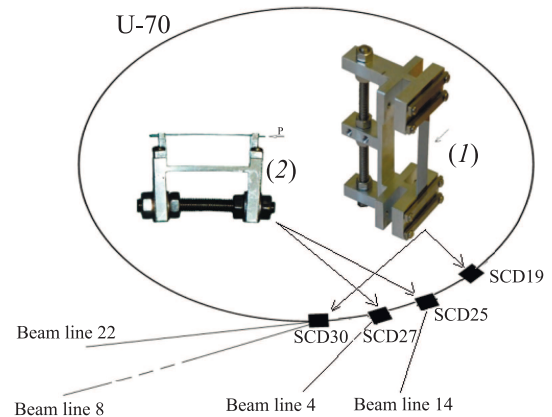


Рис. 1. (Цветной онлайн) Кольцо ускорителя У-70, в котором установлены кристаллы двух типов на станциях кристаллических дефлекторов (СКД): кристаллы первого типа в 19 и 30-м магнитных блоках, кристаллы второго типа в 25 и 27-м магнитных блоках

3. Фокусирующие кристаллы и системы формирования вторичных частиц. Новые задачи, в частности, формирование пучков вторичных частиц, требуют создания кристаллических приборов, сочетающих отклоняющие и фокусирующие свойства. Следует отметить, первые опыты по фокусировке пучка кристаллами проводились еще в 1990-е годы. Сотрудник ПИЯФ А. И. Смирнов впервые предложил идею и конструкцию устройства на основе изогнутого кристалла со скошенным торцом, чтобы фокусировать пучки частиц. В совместном опыте ПИЯФ–ИФВЭ на ускорителе У-70 это устройство было успешно проверено [25]. В этой же работе, а также в [19], были указаны перспективы применения фокусирующих кристаллов для Тевных энергий. Новый толчок к исследованию фокусировки кристаллами дал другой принцип изготовления фокусирующего кристаллического устройства, где улучшено качество изгиба и удалено вещество держателя вокруг кристалла.

Новое фокусирующее устройство, оптимизированное в [26], имеет простую конструкцию (рис. 2).

В данном устройстве изгиб кристалла в плоскости фокусировки (x, z) возникает как вторичная кривизна. Она обусловлена изгибом кремниевой пластины по вертикали (y) и связана с анизотропными свойствами кристаллической решетки [19]. Для изготовления фокусирующего устройства использовалась кремниевая пластина с боковыми гранями, параллельными плоскостям (111). Длина пластины вдоль пучка составляла обычно 30–50 мм, а толщина 1–2 мм. Треугольный срез на торце длиной около 10 мм обеспечивал фокусировку на расстоянии

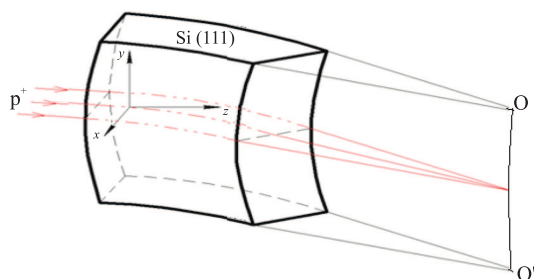


Рис. 2. (Цветной онлайн) Схема фокусирующего кристаллического устройства. Линейный срез торца кристалла приводит к тому, что частицы, захваченные в режим каналирования, испытывают различные углы поворота в зависимости от их поперечной координаты. Это позволяет фокусировать их на некотором расстоянии от кристалла на линии O–O'

несколько метров и угловой захват ~ 0.5 мрад при радиусе изгиба в плоскости (x, z) около 10 м. Сначала было проведено несколько опытов по фокусировке параллельного пучка в точку [26–29] для оптимизации устройств. Наиболее точные данные получены в [29], где с помощью микроstriповых детекторов определялась огибающая пучка (рис. 3), отклоненного кристаллом с эффективностью 30 %.

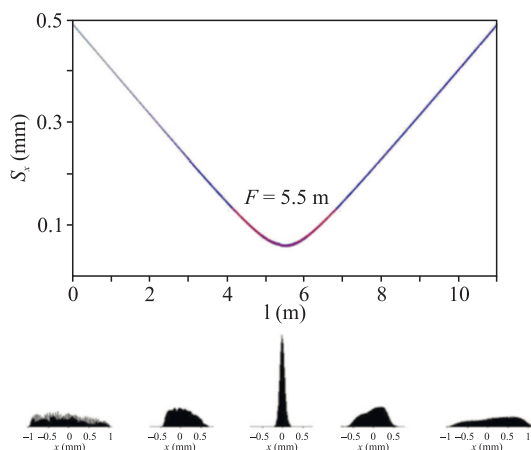


Рис. 3. (Цветной онлайн) Результаты реконструкции огибающей протонного пучка 400 ГэВ/с (размер пучка в зависимости от расстояния) за кристаллом (вверху) и профили пучка на разном расстоянии (внизу)

Затем была предложена и экспериментально проверена схема формирования пучка частиц, генерируемого на тонкой мишени, с помощью фокусирующего кристалла при обращенном направлении частиц в пучке (фокусировка из точечного источника в параллель). Сначала это с эффективностью 10 % было продемонстрировано на отечественном ускорителе при энергии 50 ГэВ [26]. Более точные данные были получены в совместном с ЦЕРН эксперименте [30] при энергии 180 ГэВ. Геометрия опыта представ-

лена на рис. 4а. Микроstriповые детекторы выделяли фракцию частиц, вылетающих с малой площадки 100 мкм, и определяли их угловое распределение на некотором удалении после кристалла. Обработка данных показала, что кристалл захватывает и значительно отклоняет долю пучка около 25 % (рис. 4б). Такая схема может быть применена для вывода вторичных частиц прямо из кольца ускорителя, установив в нем тонкую внутреннюю мишень [26]. Импульсный интервал частиц пучка будет достаточно широким.

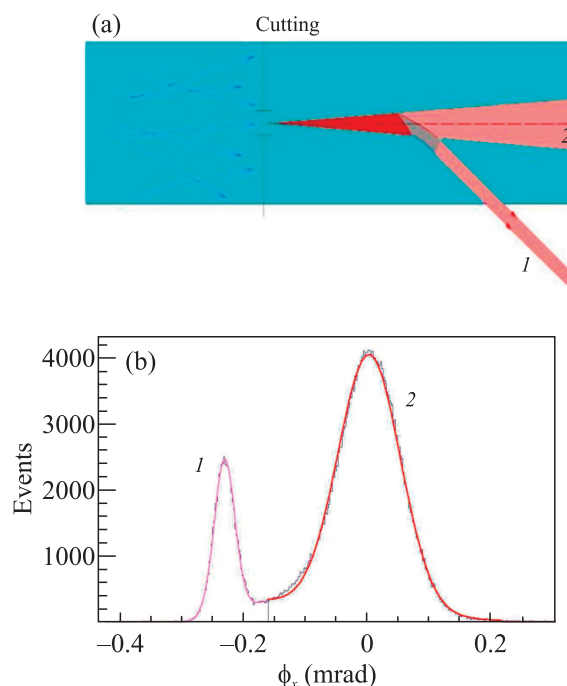


Рис. 4. (Цветной онлайн) (a) – Схематическое изображение отбора событий с помощью каттинга и захват расходящегося пучка кристаллом. (b) – Распределение частиц по углам φ_x за кристаллом. Часть пучка, сфокусированного и отклоненного кристаллом, показана слева (помечено меткой 1). Меткой 2 обозначена фракция неотклоненного пучка

4. Новый способ получения пучков нейтрино. Новый метод получения пучков нейтрино похож на способ получения пучков пионов и каонов, описанный в предыдущем параграфе. Разница в том, что фокусировать пучок пионов и каонов надо двумя кристаллами – в горизонтальной и вертикальной плоскостях, как это продемонстрировано в [28] и показано на рис. 5. Также вместо ближней экспериментальной установки надо предусмотреть распадный тоннель длиной несколько километров, где нейтрино получаются от распадов $\pi, K \rightarrow \mu \nu_\mu$.

Наибольшая практическая ценность этого метода проявляется при высоких энергиях (например,

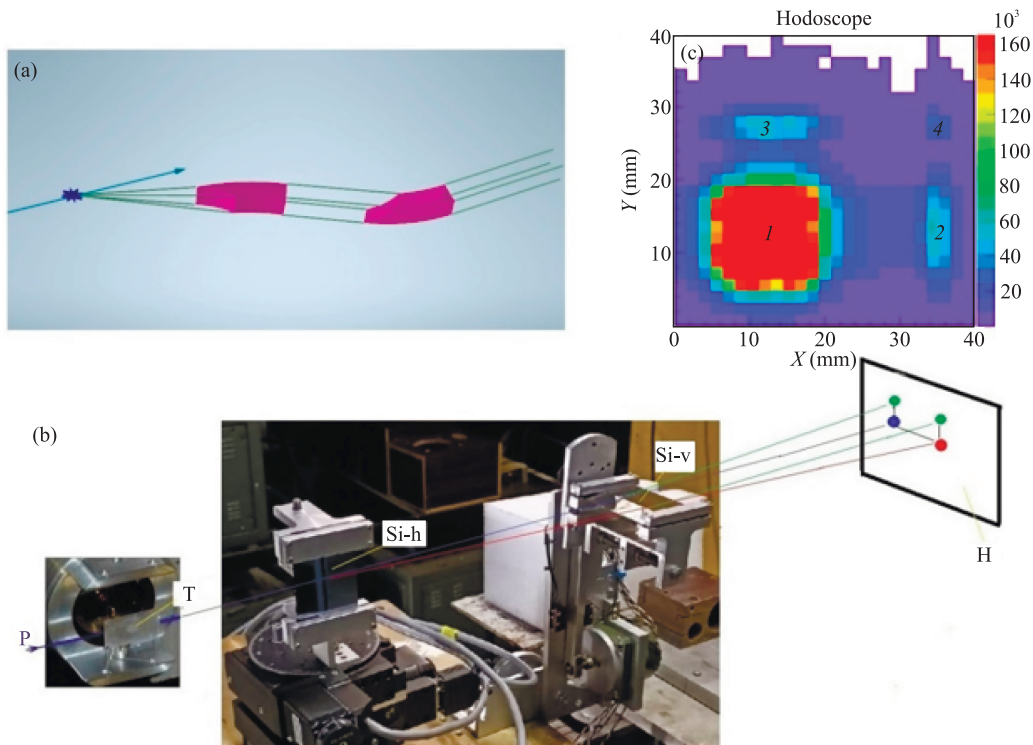


Рис. 5. (Цветной онлайн) (а) – Двухкристальная оптическая схема для формирования аксиально-симметричного пучка; (б) – конфигурация установки КРИСТАЛЛ с активной мишенью и двумя фокусирующими кристаллами: Т – активная мишень; Si-h – горизонтально фокусирующий кристалл в гониометре; Si-v – вертикально фокусирующий кристалл в гониометре; Н – сцинтилляционный годоскоп. (с) – 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

Большой адронный коллайдер – БАК). На рисунке 6 показаны результаты расчета потоков нейтрино с широким спектром (на один взаимодействующий в мишени протон) от распадов π мезонов, разлетающихся в конусе с заданным углом для энергии протонного пучка 6.5 ТэВ. Методика расчета подробно описана в [31]. Вклад распадов K мезонов не учитывался (он оценивается в [32] на уровне 5%). Для расчета спектра пионов с мишени использовался эмпирический метод [33]. Горизонтальный и вертикальный захват фокусирующего кристалла полагался равным 2 мрад, что достижимо в рамках существующих технологий. Длина распадного тоннеля выбиралась равной 5 км. Далее, с использованием подходов [34, 35] рассчитывались потоки нейтрино от распадов пионов.

На рисунке 6 видно, что рассчитанные потоки нейтрино для кристаллической схемы сравнимы с достигнутыми в экспериментах с традиционной схемой. Для сравнения использованы данные, отражающие

результаты эксперимента [36] с энергией первичного протонного пучка 450 ГэВ.

5. Получение пучка вторичных частиц с узким импульсным интервалом. Недавно был проведен демонстрационный опыт по формированию пучка пионов и каонов кристаллом на канале 4А ускорителя У-70 [37]. Схема опыта представлена на рис. 7. В этом опыте был создан точечный источник расходящегося пучка вторичных частиц с помощью активной мишени в виде тонкой пластины (толщиной 150 мкм, длиной 20 мм и высотой 10 мм) из тяжелого сцинтиллятора CsI. Фокусирующий кристалл из кремния ориентации (111) имел ширину 2 мм, рабочую высоту 20 мм, и длину 25 мм. Вертикально-отклоняющий магнит V_m отделял пионы от протонов, которые не провзаимодействовали в мишени, и выделял интервал импульсов (25 ± 2) ГэВ/с. В этих условиях мы определили эффективность получения пучка вторичных частиц. Она измерялась как отношение тройного совпадения CsI, счетчика S и ячеек

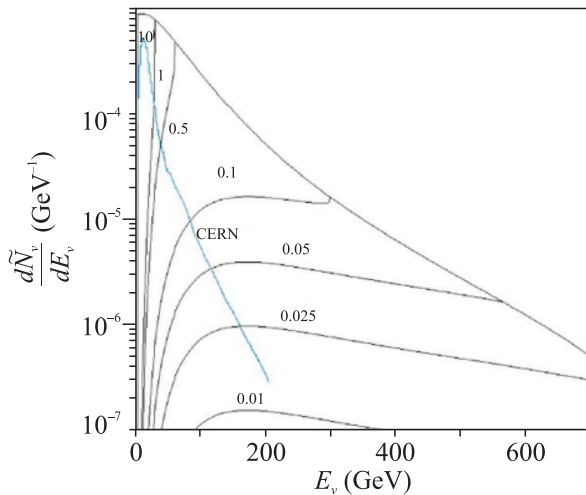


Рис. 6. (Цветной онлайн) Рассчитанные спектры нейтрино, разлетающиеся в конусе с углом 0.01–10 мрад (цифры около соответствующих кривых). Голубая кривая CERN – данные эксперимента ЦЕРН с энергией протонов 450 ГэВ

годоскопа H с пиком сигнала при каналировании, к двойному совпадению CsI и общего счетчика пучка перед мишенью. Оказалось, мы отклонили кристаллом пучок интенсивностью $\sim 0.001\%$ на каждый падающий на мишень протон, что соответствует расчету работы [38]. Эта величина примерно на порядок уступает магнитооптическим каналам У-70. Но это объясняется неоптимальностью кристаллической оптики для относительно низкой энергии первичного пучка протонов 50 ГэВ, когда размер кристалла мал, чтобы захватить в каналирование заметную часть вторичных частиц, разлетающихся на десятки миллирадиан с мишени.

С использованием этого метода на ускорителе У-70 предложено построить тестовый канал вторичных частиц (положительно заряженных пионов) нового типа, который не потребляет электрической энергии [39]. Перед кольцевым магнитом открытого типа устанавливается внутренняя мишень (рис. 8).

Положительно заряженные пионы отклоняются по горизонтали магнитом во внутреннюю часть кольцевого зала ускорителя, фокусируются и отклоняются по вертикали фокусирующим кристаллом 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. Ключевым моментом для реализации такого канала является создание фокусирующего кристалла, который должен иметь боль-

шой угол изгиба, порядка 100 мрад (чтобы вывести пучок за защиту на короткой базе), и ощутимый поперечный размер. Для этого предложена новая схема кристалла, показанная на рис. 9. Применяется массив кристаллов вместо одного. Это и позволяет решить сразу две задачи – увеличить угол изгиба за счет применения тонких пластин и увеличить количество отклоненных частиц за счет большего размера, образованного массивом кристаллов.

Ширина импульсного интервала будет равна отношению поперечного размера кристалла к линейной дисперсии, создаваемой магнитом, и в условиях У-70 составит 4 %. Ожидаемая интенсивность вторичного пучка составит 10^5 частиц в секунду. Работоспособность такого кристаллического устройства была экспериментально проверена в [40].

6. Кристаллический мюонный коллайдер.

Идея мюонного коллайдера разрабатывалась с 1970-х гг. [41]. В настоящее время рассматриваются проекты коллайдеров мюонов с разными энергиями, начиная от 120 ГэВ [42], для изучения бозона Хиггса, до ТэВ-ных энергий в пучке [43, 44] в качестве альтернативы проектам электронных линейных коллайдеров. Современные проекты мюонных коллайдеров очень дороги и сложны и 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). Здесь мы хотим предложить вариант коллайдера, где мюоны можно получить на адронном коллайдере при высокой энергии с помощью фокусирующих изогнутых кристаллов.

В разделе 4 показано, что в двухкристальной схеме в распадном туннеле длиной в несколько километров в результате распада $\pi, K \rightarrow \mu\nu_\mu$ можно получить пучки нейтрино высоких энергий. Эти нейтрино сопровождаются мюонами очень высокой энергии, которые могут быть использованы для мюонного коллайдера нового типа [45].

Суть нашего предложения показана на рис. 10. Внутренние мишени $T_{1,2}$ установлены в двух различных кольцах одного из больших адронных коллайдеров (ТэВ-класса). Две фокусирующие кристаллические системы $FC_{1,2}$ образуют пучки вторичных пионов и каонов, как описано выше. Мюонные пучки образуются в распадных туннелях $DT_{1,2}$ длиной око-

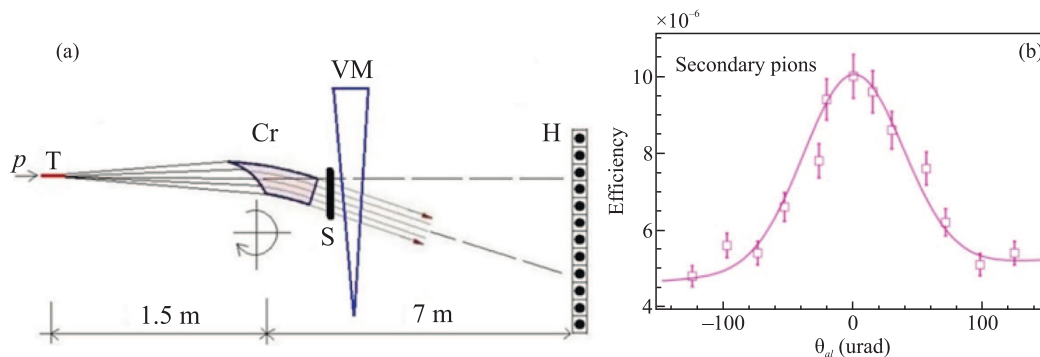


Рис. 7. (Цветной онлайн) (а) – Схема опыта: Т – мишень из CsI; Cr – кристалл в гониометре; S – миниатюрный сцинтиллятор; VM – вертикально-отклоняющий магнит; H – сцинтилляционный годоскоп; (б) – зависимость интенсивности пучка вторичных пионов от ориентации фокусирующего кристалла

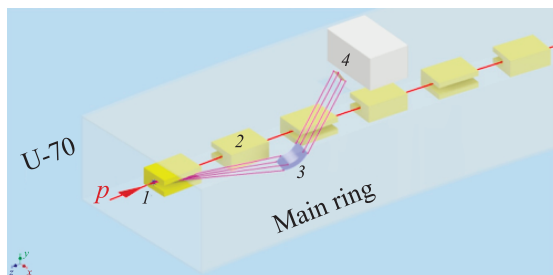


Рис. 8. (Цветной онлайн) Схема формирования пучка вторичных положительно заряженных пионов с помощью внутренней мишени и фокусирующего кристалла. 1 – мишень; 2 – магнит; 3 – фокусирующий кристалл; 4 – физическая установка

ло километра. Поскольку масса мюона много больше массы нейтрино, они рождаются с малыми углами в лабораторной системе отсчета.

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 при таких энергиях находятся в пределах десятков мкрад. Это приводит к значению эмиттанса мюонного пучка около $1 \text{ мм} \times \text{мрад}$ в конце распадного туннеля. Параметры мюонного пучка рассчитывались методом Монте-Карло с учетом кинематики двухчастичного распада [46]. Размер мюонного пучка в интервале импульсов 450–550 ГэВ/с, как показали расчеты, вписывается в апертуру типовых квадрупольных линз диаметром 200 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 диапазоне импульсов в несколько процентов.

Ниже мы дадим очень приблизительную оценку светимости такого мюонного коллайдера. Известна

формула для определения светимости коллайдера: $L = f \times \frac{N^2}{4\pi\sigma^2}$, 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. $f = 3 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$), интенсивность 10^{11} частиц в сгустке и пучок размером в несколько десятков микрон в месте встречи, это дает величину $10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Сгустки пионов величиной $10^{-3} \times 10^{11} = 10^8$ частиц будут генерироваться на тонких струйных мишенях $T_{1,2}$ длиной 0.1 г/см^2 (взаимодействие интенсивного циркулирующего пучка с тонкими мишенями рассмотрено в [37]). Принимая во внимание выбранный диапазон импульсов 10 % и размер сфокусированных мюонных пучков порядка долей миллиметра в точке пересечения мюонов, получаем значение светимости $L_\mu \sim 10^7 \times 10^{14} \times 10^3 = 10^{24} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Но если применить дополнительно в этом варианте мюонного коллайдера короткофокусные кристаллы в точке встреч, идея кристаллического мюонного коллайдера становится очень привлекательной. В этом случае светимость увеличится до $L = 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

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

Также отметим, что в предлагаемой схеме можно организовать режим столкновения π , K -мезонных пучков ТэВ-ных энергий. И светимость такого мезонного коллайдера будет на два порядка выше мюонной моды за счет большей интенсивности и меньшего

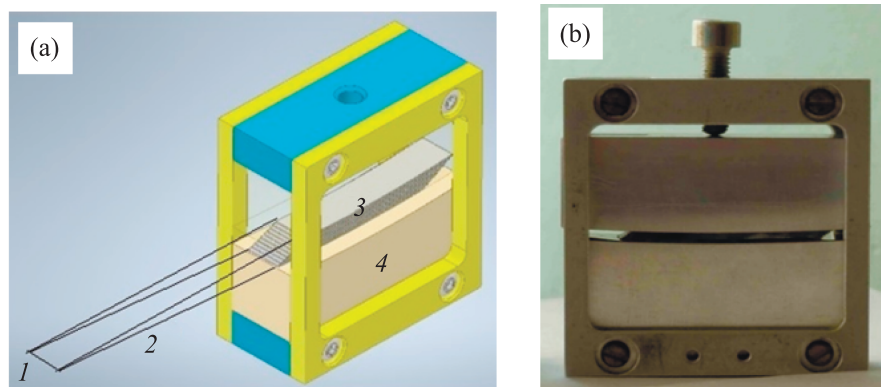


Рис. 9. (Цветной онлайн) (а) – Схема фокусировки пучка из мишени массивом кристаллов; 1 – мишень; 2 – траектории частиц; 3 – фокусирующий массив кристаллов; 4 – металлическое изгибающее устройство. (b) – Внешний вид фокусирующего устройства для У-70

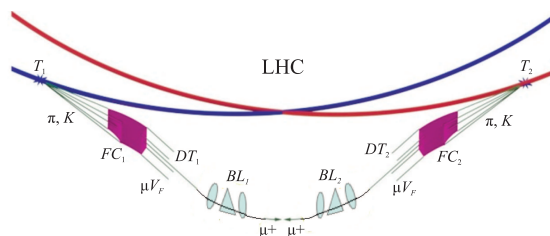


Рис. 10. (Цветной онлайн) Кристаллический мюонный коллайдер: $T_{1,2}$ – внутренние мишени в большом адронном коллайдере; $FC_{1,2}$ – двухкристалльные фокусирующие системы; $DT_{1,2}$ – распадные туннели; $BL_{1,2}$ – магнитооптические каналы

эмиттанса пучка $L_\pi \sim 10^{29} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Для этого надо лишь убрать мюонные фильтры из магнитооптических каналов $BL_{1,2}$.

7. Коллимация пучка в больших адронных коллайдерах с помощью отражения частиц в изогнутых кристаллах. В Большом адронном коллайдере (БАК) используется многоступенчатая система коллиматоров для поглощения растущего гало циркулирующих пучков для защиты и обеспечения надежной работы сверхпроводящих магнитов [47]. Аналогичная система планируется для Будущего кольцевого коллайдера (БКК) [48]. Первичные коллиматоры БАК, изготовленные из композитов из углеродного волокна, отклоняют частицы гало в результате кулоновского рассеяния, тем самым увеличивая их глубину заброса во вторичные коллиматоры от микронных величин до долей миллиметра. Взаимодействие протонов с материалом коллиматора приводит к образованию дифракционных протонов, которые могут вылетать из стенок коллиматоров и теряться в магнитах, что ограничивает эффективность очистки существующей коллима-

онной системы. В преддверии работы БАК с большой светимостью проводятся исследования по улучшению системы коллимации. В исследованиях [14] показано, что одним из решений улучшения коллимации пучка является использование каналирования в коротком изогнутом кристалле, который выполняет роль первичного коллиматора, глубоко забрасывая частицы во вторичный коллиматор (на несколько миллиметров) за счет каналирования (рис. 11a).

Поскольку критический угол каналирования достаточно мал при высоких энергиях, $\theta_c = 2.5 \text{ мкрад}$ для пучка 6.8 ТэВ , система очень чувствительна к угловому положению кристалла и возможным вибрациям разной природы. В этой связи, может быть полезным другой подход к кристаллической коллимации [50], основанный на объемном отражении частиц от изогнутых кристаллографических плоскостей. Это явление было открыто недавно в компьютерном моделировании [51] и в экспериментах [52, 53], и оно расширяет границы применения изогнутых кристаллов на ускорителях. Объемное отражение обусловлено взаимодействием налетающей релятивистской частицы с потенциалом изогнутой атомной решетки и происходит на малой длине кристалла в области, где траектория частицы выходит на касательную к изогнутой атомной плоскости, приводя к отклонению частицы в сторону, противоположную изгибу. Вероятность эффекта отражения велика и для положительно заряженных частиц с энергией несколько ТэВ близка к единице [54].

Отражение в одном кристалле, как показано в [53], мало, около $1.4\theta_c$, но может быть усилено в последовательности кристаллов (рис. 11b). В рамках UA9 активности в ЦЕРН с участием российских ученых исследовались различные варианты мульти-

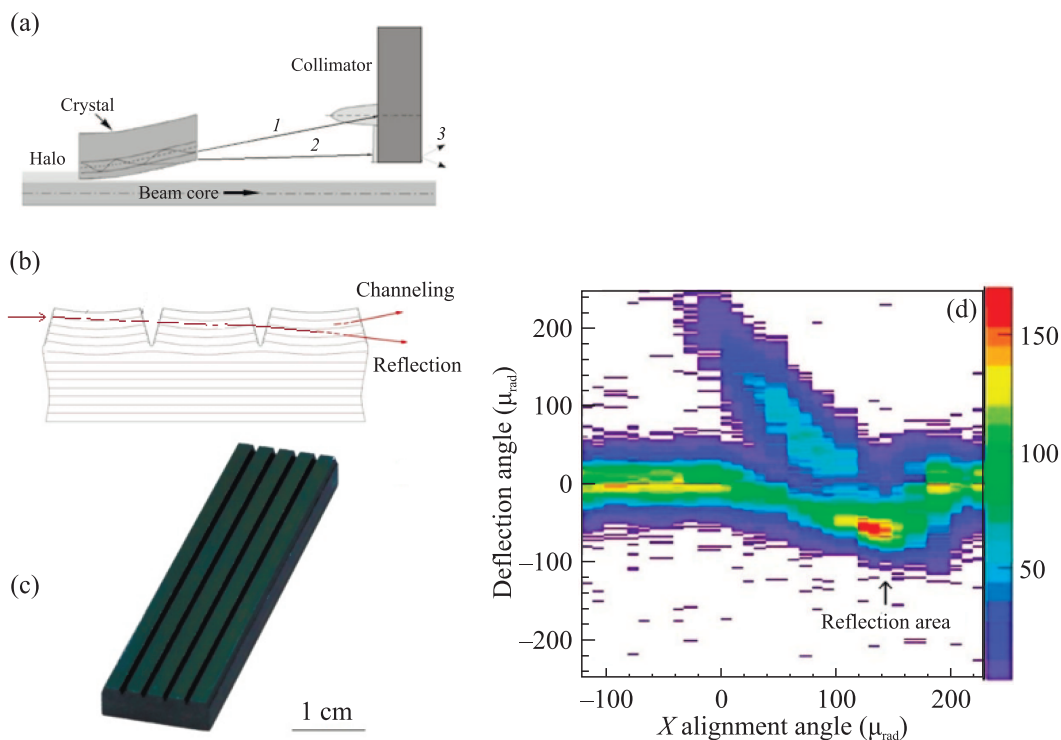


Рис. 11. (Цветной онлайн) (а) – Схема коллимации пучка с применением короткого кристалла; 1 – пик каналированных частиц, которые эффективно отклонились; 2 – фракция деканализованных частиц; 3 – потери на коллиматоре. (б) – Усиление угла отклонения частиц при последовательном отражении на цепочке хорошо ориентированных кристаллов. (с) – Фотография кремниевой кристаллической пластины с периодическими канавками. (д) – Эффективное отклонение протонов 400 ГэВ за счет кратного отражения в изогнутых полосках, согласно [49]

кристаллических систем [49, 55–57] для кратного увеличения отклонения частиц. Одним из удачных вариантов для ультравысоких энергий может быть разработанное в ИФВЭ устройство на рис. 11с [58], проверенное на пучке 400 ГэВ протонов [49]. В отличие от метода, основанного на использовании внешней силы, создаваемой держателем, предложенный метод использует внутренние напряжения, создаваемые механически нанесенными канавками на поверхности толстой кристаллической пластины. Изгиб отдельных полос длиной 2 мм, образующихся между канавками, производился деформацией поверхностных слоев за счет эффекта Тваймана [59]. Из-за толстого общего основания кристаллического дефлектора взаимное положение полосок на поверхности, как угловых, так и пространственных, значительно лучше, чем при использовании внешнего изгибающего устройства. На рисунке 11d показано эффективное (свыше 90 %) отклонение протонного пучка этим кристаллом по результатам [49]. На этом двумерном графике показано распределение рассеянных частиц за кристаллом в зависимости от угла ориентации кристаллического устройства. Максимум плот-

ности отклоненных частиц наблюдается как раз в зоне отражения.

Результаты расчетов для энергии 6.8 ТэВ [50] показали, что эффективность кратного отражения на нескольких изогнутых полосках составляет около 92 % для БАК. Соответствующий угол отклонения при кратном отражении на пяти полосках равен 15 мкрад, и он может быть увеличен за счет осевой ориентации прибора, как это продемонстрировано в [50]. Заметим, эффект усиления угла отражения вблизи кристаллографической оси был предсказан в [60]. Кристалл не только улучшает эффективность коллимации, но и хорошо защищает дорогостоящие вторичные коллиматоры от разрушений.

Следует отметить, режим отклонения пучка за счет кратного объемного отражения в многополосковых кристаллических устройствах успешно использовался для коллимации пучка в ускорителях при меньших значениях энергии, на ускорителе У70 при энергии 70 ГэВ в ИФВЭ [61, 62] и при энергии 1 ТэВ на ускорителе Тэватрон в Фермилаб [12].

Заключение. В работе мы представили новые применения изогнутых кристаллов в ускоритель-

ной науке, которые, мы надеемся, могут стимулировать новые эксперименты по физике высоких энергий. Рассмотренные возможности формирования пучков кристаллами будут способствовать продвижению программы “физика за пределами коллайдеров”. Сформулированные предложения для применения кристаллов на больших ускорителях подкрепляются экспериментальными исследованиями как на ускорителях ЦЕРН, так и на отечественном ускорителе У-70.

Авторы выражают благодарность руководству ИФВЭ за поддержку, а также всем сотрудникам ИФВЭ, помогавшим проводить исследования на ускорителе У-70. Также авторы благодарны сотрудникам ПИЯФ, ОИЯИ и иностранным специалистам за совместные усилия при проведении исследований на ускорителях ЦЕРН в рамках эксперимента UA9.

Финансирование работы. Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда (проекты # 17-12-01532, # 17-12-01532П и # 23-22-00001).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. K. G. Steffen, *High Energy Beam Optics* (Interscience, N.Y., 1965), v. 17.
2. В. П. Карташев, В. И. Котов, *Методы формирования пучков частиц на ускорителях высоких энергий* (Энергоатомиздат, М., 1989) [V. P. Kartashev and V. I. Kotov, *Methods of Particle Beams Formation in High-Energy Accelerators* (Energoatomizdat, Moscow, 1989)].
3. E. N. Tsyganov, “Estimates of cooling and bending processes for charged particle penetration through a mono crystal” (1976), preprint TM-682, TM-684, Fermilab, Batavia, <https://inspirehep.net/files/2fec453c39bebf9e7235fcade7f58a70>.
4. V. V. Avdeichikov, V. N. Buldakovskii, A. V. Buchkiv et al. (Collaboration), “Accelerated beam extraction by means of a bent single crystal at the JINR synchrophasotron”, Technical Report, Fermilab, 1986, FN-0429 (February 1986), p. 1.
5. A. A. Aseev, M. D. Bavizhev, E. A. Ludmirsky, V. A. Maishev, and Yu. S. Fedotov, “Extraction of the 70 GeV proton beam from the IHEP accelerator towards beam line 2(14) with a bent single crystal”, *Nucl. Instrum. Methods A* **309**, 1 (1991).
6. H. Akbari, X. Altuna, S. Bardin et al. (Collaboration), “First results on proton extraction from the CERN SPS with a bent crystal”, *Phys. Lett. B* **313**, 491 (1993).
7. R. A. Carrygan Jr, Dong Chen, P. Colestock et al. (Collaboration), “Extraction from TeV-range accelerators using bent crystal channeling”, *Nucl. Instrum. Methods B* **90**, 128 (1994).
8. A. G. Afonin, V. M. Biryukov, V. A. Gavrilushkin et al. (Collaboration), “New results on efficient crystal extraction of protons from the 70 GeV accelerator at the Institute of High-Energy Physics”, *JETP Lett.* **68**, 568 (1998).
9. A. G. Afonin, V. T. Baranov, V. M. Biryukov et al. (Collaboration), “High-Efficiency Beam Extraction and Collimation Using Channeling in Very Short Bent Crystals”, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 094802 (2001).
10. A. G. Afonin, V. T. Baranov, V. M. Biryukov, A. A. Kardash, V. I. Kotov, V. A. Maishev, V. I. Terekhov, E. F. Troyanov, Yu. S. Fedotov, V. N. Chepegin, Yu. A. Chesnokov, and Yu. M. Ivanov, “Proton beam extraction from the IHEP accelerator using short silicon crystals”, *Phys. Part. Nucl.* **36**, 21 (2005).
11. R. P. Fliller III, A. Drees, D. Gassner, L. Hammons, G. McIntyre, S. Peggs, D. Trbojevic, V. Biryukov, Y. Chesnokov, and V. Terekhov, “Results of bent crystal channeling and collimation at the Relativistic Heavy Ion Collider”, *Phys. Rev. ST. Accel. Beams* **9**, 013501 (2006).
12. N. V. Mokhov, G. E. Annala, A. Apyan et al. (Collaboration), “Crystal Collimation Studies at the Tevatron (T-980)”, *Int. J. Mod. Phys. A* **25**, 98 (2010).
13. W. Scandale, G. Arduini, R. Assman et al. (Collaboration), “First results on the SPS beam collimation with bent crystal”, *Phys. Lett. B* **692**, 78 (2010).
14. W. Scandale, G. Arduini, M. Butcher et al. (Collaboration), “Observation of channeling for 6500 GeV/c protons in the crystal assisted collimation setup for LHC”, *Phys. Lett. B* **758**, 129 (2016).
15. V. A. Andreev, V. V. Baublis, and E. A. Damaskinskii, “Experimental observation of volume capture by a curved single crystal”, *JETP Lett.* **36**, 340 (1982).
16. О. И. Сумбаев, “К вопросу о физических основах явления объемного захвата быстрых заряженных частиц в каналы изогнутого кристалла”, *Журнал технической физики* **57**, 2067 (1987) [O. I. Sumbaev, “K voprosu o fizicheskikh osnovah obemnogo zahvata bystrykh zaryazennykh chastic v kanaly izognutogo crystall”, *Zhurnal tehnikeskoj fiziki* **57**, 2067 (1987)] [in Russian].
17. A. Taratin, “Particle channeling in a bent crystal”, *Phys. Part. Nucl.* **29**, 437 (1998).
18. V. M. Biryukov, V. I. Kotov, and Y. A. Chesnokov, “Steering of high-energy charged-particle beams by bent single crystals”, *Phys.-Uspekhi* **37**, 937 (1994).
19. V. M. Biryukov, Yu. A. Chesnokov, and V. I. Kotov, *Crystal channeling and its application at high-energy accelerators* (Springer, Berlin, 1997), p. 219.
20. W. Scandale and A. M. Taratin, “Channeling and volume reflection of high-energy charged particles in short bent crystals. Crystal assisted collimation of the accelerator beam halo”, *Phys. Rep.* **815**, 1 (2019).

21. W. Scandale, A.G. Afonin, Yu.A. Chesnokov et al. (Collaboration), “Feasibility of crystal-assisted collimation in the CERN accelerator complex”, *Int. J. Mod. Phys. A* **37**, 2230004 (2022).
22. A.G. Afonin, V.T. Baranov, E.V. Barnov, G.I. Britvich, Yu.A. Chesnokov, P.N. Chirkov, V.A. Kalinin, V.A. Maishev, S.F. Reshetnikov, D.A. Savin, and V.I. Terekhov, “Positive features of crystal extraction of protons and carbon ions from the U-70 on basis of long-term experience”, *Int. J. Mod. Phys. A* **33**, 1850138 (2018).
23. A.G. Afonin, E.V. Barnov, G.I. Britvich, A.A. Durum, M.Yu. Kostin, V.A. Maishev, V.I. Pitalev, S.F. Reshetnikov, Yu.A. Chesnokov, P.N. Chirkov, A.A. Yanovich, R.M. Nazhmudinov, A.S. Kubankin, and A.V. Shchagin, “Extraction of the carbon ion beam from the U-70 accelerator into beamline 4a using a bent single crystal”, *Instruments and Experimental Techniques* **59**, 497 (2016).
24. S.F. Reshetnikov, A.G. Afonin, E.V. Barnov, A.N. Vasiliev, V.A. Maishev, V.V. Mochalov, P.A. Semenov, and Yu.A. Chesnokov, “Extraction of a Proton Beam of Variable Intensity from the U-70 Accelerator Using Bent Crystals”, *Physics of Atomic Nuclei* **87**, 1455 (2024).
25. A.S. Denisov, O.L. Fedin, M.A. Gordeeva, M.P. Gur'ev, Y.P. Platonov, A.I. Schetkovsky, V.V. Skorobogatov, A.I. Smirnov, V.I. Baranov, Y.A. Chesnokov, V.V. Dudenko, N.A. Galyaev, V.I. Kotov, S.V. Tsarik, and V.N. Zapolsky, “First results from a study of a 70 gev proton beam being focused by a bent crystal”, *Nucl. Instrum. Methods B* **69**, 382 (1992).
26. A.G. Afonin, G.I. Britvich, A.P. Bugorskii, M.K. Bulgakov, A.A. Durum, M.Yu. Kostin, A.V. Lutchev, V.A. Maishev, Yu.E. Sandomirskii, V.I. Pitalev, I.V. Poluektov, Yu.A. Chesnokov, P.N. Chirkov, and A.A. Yanovich, “Focusing crystal device for deflecting a divergent 50-GeV proton beam”, *JETP Lett.* **104**, 12 (2016).
27. A.G. Afonin, E.V. Barnov, G.I. Britvich, M.K. Bulgakov, A.A. Durum, M.Yu. Kostin, A.V. Lutchev, V.A. Maishev, Yu.E. Sandomirskii, V.I. Pitalev, I.V. Poluektov, S.F. Reshetnikov, Yu.A. Chesnokov, P.N. Chirkov, and A.A. Yanovich, “Focusing of a high-energy particle beam at an extremely short distance”, *JETP Lett.* **105**, 763 (2017).
28. G.I. Britvich, M.Yu. Kostin, V.I. Pitalev, I.V. Poluektov, Yu.E. Sandomirskiy, M.Yu. Chesnokov, Yu.A. Chesnokov, and A.A. Yanovich, “Formation of a High-Energy Particle Beam by Means of Focusing Crystal Devices”, *JETP Lett.* **117**, 635 (2023).
29. W. Scandale, G. Arduini, F. Cerutti et al. (Collaboration), “Comprehensive study of beam focusing by crystal devices”, *Phys. Rev. Accel. Beams* **21**, 014702 (2018).
30. W. Scandale, G. Arduini, F. Cerutti et al. (Collaboration), “Focusing of 180 GeV/c pions from a point-like source into a parallel beam by a bent silicon crystal”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **446**, 15 (2019).
31. Yu.A. Chesnokov and V.A. Maishev, “High energy neutrino beam generation based on crystal optics”, *Nucl. Instrum. Meth. A* **910**, 9 (2018).
32. M. Bonesini, A. Marchionni, F. Pietropaolo, and T. Tabarelli de Fatis, “On particle production for high energy neutrino beams”, *The European Physical Journal C* **20**, 13 (2001).
33. A.J. Malensek, Preprint FNAL FN-341 (1982). <https://lss.fnal.gov/archive/test-fn/0000/fermilab-fn-0341.pdf>.
34. M. Pavin, “Measurements of hadron yields from the T2K replica target in the NA61/SHINE experiment for neutrino flux prediction in T2K”, PhD Thesis OF THE UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE, CERN-THESIS-2017-233.
35. S. Hayakawa, *Cosmic Rays Physics: Nuclear and astrophysical aspects* (Wiley-Interscience, N.Y., 1969).
36. D. Geiregat, P. Vilain, G. Wilquet et al. (Collaboration), “Calibration and performance of the CHARM-II detector”, *Nucl. Inst. and Meth. A* **325**, 92 (1993).
37. G.I. Britvich, A.A. Durum, M.Y. Kostin, V.A. Maishev, Y.A. Chesnokov, and A.A. Yanovich, “New Method for the Generation of Secondary Particle Beams at Accelerators”, *JETP* **129**, 229 (2019).
38. V.A. Maishev, Y.A. Chesnokov, and P.N. Chirkov, “Focusing of high energy particles with the help of bent single crystal”, *Nucl. Instr. Methods B* **355**, 360 (2015).
39. A.G. Afonin, V.T. Baranov, E.V. Barnov, G.I. Britvich, I.S. Lobanov, I.V. Poluektov, S.F. Reshetnikov, D.A. Savin, Yu.E. Sandomirskiy, D.S. Smaglyuk, V.I. Terekhov, M.Yu. Chesnokov, Yu.A. Chesnokov, P.N. Chirkov, and A.A. Yanovich, “New Crystal Devices for Use at the U-70 Accelerator”, *JETP Lett.* **113**, 226 (2021).
40. A.G. Vasileva, A.A. Durum, M.Yu. Kostin, A.V. Lutchev, V.A. Maishev, V.I. Pitalev, I.V. Poluektov, Yu.E. Sandomirsky, Yu.A. Chesnokov, and A.A. Yanovich, “Investigation of 50-GeV Proton Beam Focusing Using a Crystal Device with High Angular Acceptance”, *Physics of Atomic Nuclei* **87**, 1348 (2024).
41. A.N. Skrinsky, “Intersecting storage rings at Novosibirsk”, *Proc. Int. Seminar on Prospects of High-Energy Physics (Morges, 1971)*; <https://inspirehep.net/literature/69662>.
42. D. Neuffer, “A Muon Collider as a Higgs Factory”, in *Proceedings of 4th International Particle Accelerator Conference 12–17* (2013); https://www.researchgate.net/publication/272195573_A_muon_collider_as_a_Higgs_factory.

43. M.-H. Wang, Y. Nosochkov, Y. Cai, and M. Palmerb, "Design of a 6 TeV Muon Collider, Proc IPAC'15", Richmond, USA, p. 2226; <https://inspirehep.net/files/44de5e32c50915d383b714595e4adfb3>.
44. M. Antonelli, M. Boscolo, R. Di Nardo, and P. Raimondi, "Novel proposal for a low emittance muon beam using positron beam on target", Nucl. Instrum. Meth. A **807**, 101 (2016).
45. M. Yu. Chesnokov, Yu. A. Chesnokov, and A. A. Yanovich, "Muon collider operating by means of the focusing crystals", Int. J. Mod. Phys. A **35**, 2050002 (2020).
46. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теория поля* (Наука, М., 1988) [L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Teoriya polya* (Nauka, Moscow, 1988)] [in Russian].
47. R. W. Assmann, I. S. Baishev, M. Brugger et al. (Collaboration), "Requirements for the LHC collimation system", LHC-PROJECT-REPORT-599, in 8th European Particle Accelerator Conference: A Europhysics Conference, La Vilette, Paris, France, 3–7 Jun 2002 <https://cds.cern.ch/record/572775/files/lhc-project-report-599.pdf>.
48. R. Bruce, A. Abramov, A. Bertarelli et al. (Collaboration), "Collimation system studies for the FCC-hh", J. Phys. Conf. Ser. **1350**, 012009 (2019) https://www.researchgate.net/publication/337845437_Collimation_system_studies_for_the_FCC-hh.
49. W. Scandale, G. Arduini, M. Butcher et al. (Collaboration), "Deflection of high energy protons by multiple volume reflections in a modified multi-strip silicon deflector", Nucl. Instrum. Meth. B **338**, 108 (2014).
50. M. Yu. Chesnokov, Yu. A. Chesnokov, V. A. Maisheev, Yu. E. Sandomirskiy, A. A. Yanovich, and I. A. Yazynin, "Use of the Reflection of Particles in Bent Crystals to Collimate a Beam in Large Hadron Colliders", JETP Lett. **112**, 1 (2020).
51. A. M. Taratin and S. A. Vorobiev, "Volume reflection" of high-energy charged particles in quasi-channeling states in bent crystals", Phys. Lett. A **119**, 425 (1987).
52. Yu. M. Ivanov, A. A. Petrunin, and V. V. Skorobogatov, "Volume Reflection of a Proton Beam in a Bent Crystal", Phys. Rev. Lett. **97**, 144801 (2006).
53. W. Scandale, D. A. Still, and A. Carnera, Phys. Rev. Lett. **98**, 154801 (2007).
54. V. A. Maisheev, "Volume reflection of ultrarelativistic particles in single crystals", Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 084701 (2007).
55. W. Scandale, A. Carnera, and G. Della Mea, "Double volume reflection of a proton beam by a sequence of two bent crystals", Phys. Lett. B **658**, 109 (2008).
56. W. Scandale, A. Vomiero, and S. Baricordi, "Observation of Multiple Volume Reflection of Ultrarelativistic Protons by a Sequence of Several Bent Silicon Crystals", Phys. Rev. Lett. **102**, 084801 (2009).
57. W. Scandale, A. Vomiero, and E. Bagli, "Multiple volume reflections of high-energy protons in a sequence of bent silicon crystals assisted by volume capture", Phys. Lett. B **688**, 284 (2010).
58. A. G. Afonin, V. T. Baranov, V. A. Maisheev, D. A. Savin, Yu. E. Sandomirskiy, Yu. A. Chesnokov, and I. A. Yazynin, "Deflection of ultrahigh energy particle beams by repeated reflections in bent monocrystals", Instruments and Experimental Techniques **56**, 617 (2013).
59. J. C. Lambropoulos, S. Xu, T. Fang, and D. Golini, "Twyman effect mechanics in grinding and microgrinding", Appl. Opt. **35**, 5704 (1996).
60. V. V. Tikhomirov, "Multiple volume reflection from different planes inside one bent crystal", Phys. Lett. B **655**, 217 (2007).
61. A. G. Afonin, V. T. Baranov, V. N. Gorlov, V. I. Kotov, V. A. Maisheev, V. I. Terekhov, V. N. Chepegin, Yu. A. Chesnokov, and I. A. Yazynin, "Use of particle reflection in curved crystals to improve beam collimation in a ring accelerator", Atomic Energy **106**, 409 (2009).
62. A. G. Afonin, I. A. Yazynin, E. A. Syshchikov et al. (Collaboration), "Collimation of the circulating beam in the U-70 synchrotron by means of the reflection of particles in crystals with axial orientation", JETP Lett. **93**, 187 (2011).