

Применение объемного захвата в каналирование в изогнутом кристалле для вывода циркулирующего пучка из ускорителя

С. Ф. Решетников⁺, Е. В. Барнов⁺, А. Н. Васильев^{+,*}, В. В. Мочалов^{+,*}, В. А. Маишеев^{+,1)}, Ю. А. Чесноков⁺

⁺ НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ, 142281 Протвино, Россия

^{*} Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Москва, Россия

Поступила в редакцию 30 июня 2026 г.

После переработки 15 июля 2026 г.

Принята к публикации 16 июля 2026 г.

Представлены результаты исследования вывода пучка протонов, циркулирующего в ускорителе У-70 кристаллом с использованием явления объемного захвата частиц в режим каналирования. При наведении на кристалл в кольце ускорителя У-70 первичного пучка интенсивностью 3×10^{11} прот./цикл на установке “СПАСЧАРМ” наблюдалась интенсивность до 6×10^6 прот./цикл. Данный метод был впервые реализован в мировой ускорительной практике. Несмотря на меньшую интенсивность выводимого пучка по сравнению с традиционным выводом, основанным на торцевом захвате частиц, вывод с использованием явления объемного захвата обеспечивает более стабильные параметры выведенных пучков.

DOI: 10.7868/S3034576626090024

Введение. Идея применения изогнутых кристаллов для управления пучками частиц, впервые предложенная в работе [1], получила широкое подтверждение и развитие в многочисленных экспериментах [2–10]. Одним из наиболее значимых практических результатов стало успешное применение этого метода для вывода циркулирующего в ускорителях протонного пучка во внешнюю зону.

Этот подход нашел свое наиболее широкое практическое применение на ускорителе У-70 в Институте физики высоких энергий (ИФВЭ). Здесь изогнутые кристаллы регулярно используются для вывода и формирования пучка в штатном режиме работы [11, 12]. Одним из первых применений изогнутых кристаллов в ИФВЭ стал вывод протонного пучка умеренной интенсивности в канал 14, где в настоящее время функционирует установка СПАСЧАРМ [13, 14].

Установка изогнутого на большой угол (80 мрад) кристалла в 25-м блоке ускорителя У-70 позволила работать с первичным протонным пучком интенсивностью от 10^6 до 10^7 частиц за цикл [3, 12]. Часть циркулирующего пучка направляется к кристаллу с помощью медленно нарастающего магнитного поля дополнительных катушек (так называемых бампов). Система с обратной связью обеспечивает регулирование этой части пучка в широком диапазоне, позволяя осуществлять наведение на внутренние мишени.

Такая система дает возможность реализовать режим одновременного вывода пучка протонов с кристалла 25-го блока и работы внутренних мишеней для других установок.

Ключевым аспектом успешного вывода частиц является организация их захвата в режим каналирования. Во всех реализованных ранее методах вывода частиц применялся так называемый торцевой захват. При этом входная торцевая грань кристалла ориентируется таким образом, чтобы циркулирующий пучок частиц входил параллельно одной из выбранных сильных плоскостей кристалла. Такой подход позволяет захватить в режим каналирования частицы, входящие в кристалл под углами, меньшими угла Линдхарда.

Однако работа кристалла в таких условиях сопряжена с определенными неудобствами. Во-первых, возникает необходимость периодически менять угловое положение кристалла при перемещении координат соседних мишеней или при нестабильности режима ускорителя. Это связано с тем, что при торцевом захвате в режим каналирования попадают только частицы, входящие в кристалл в пределах угла Линдхарда (25 мкрад для пучка с энергией 50 ГэВ, см. [1]). Во-вторых, требуется с высокой точностью выполнить изгиб кристалла, поскольку этот угол однозначно определяет величину поворота пучка.

В данной работе предложен и впервые реализован метод вывода циркулирующего в ускорителе пучка, основанный на объемном захвате частиц в режим ка-

¹⁾ e-mail: maisheev@ihep.ru

налирования. Несмотря на несколько меньшую эффективность захвата частиц, этот метод позволяет получать выведенные пучки с более стабильными параметрами.

Принцип объемного захвата в каналировании. Принцип вывода пучка посредством объемного захвата наглядно продемонстрирован на рис. 1.

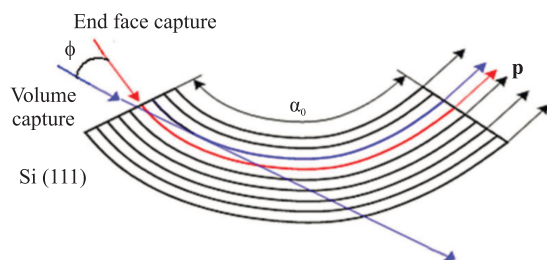


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема вывода частиц при объемном захвате

В традиционной схеме вывода кристалл располагают параллельно кристаллографической плоскости дефлектора – направлению, практически перпендикулярному входной торцевой грани. Однако при отклонении кристалла от этого положения на определенный угол, частицы начинают входить в него под значительно большим, нежели угол Линдхарда, углом. Вследствие этого они не попадают в режим каналирования.

Суть же метода, иллюстрируемого рис. 1, заключается в постепенном уменьшении угла между траекторией частицы и изогнутой кристаллографической плоскостью. В точке их касания растет вероятность того, что частица в результате многократного кулоновского рассеяния потеряет поперечную энергию и войдет в режим каналирования. Часть таких “захваченных” частиц достигает выходного торца кристалла, отклоняясь на угол, который, как видно из рис. 1, меньше полного угла его изгиба. Разумеется, некоторая доля этих частиц не дойдет до конца из-за явления деканалирования.

Объемный захват частиц был открыт в 1982 г. [15] в ПИЯФ и далее был предметом детального изучения в ряде публикаций [16–21]. В настоящей работе мы придерживаемся модели захвата, изложенной в [18, 19]. Также в работе [22] была сделана попытка увеличить интенсивность медленного нерезонансного вывода, поместив изогнутый кристалл перед септумом СМ18 в ускорителе У-70. Достигнуто увеличение интенсивности вывода на 20 %, которое можно объяснить объемным захватом в каналирование наряду с другими ориентационными эффектами в кристалле.

Наше аналитическое описание объемного отражения основано на известных уравнениях движения частиц в плоских полях изогнутых монокристаллов. В частности, для такого движения справедливо следующее уравнение [19]:

$$\frac{E_0 \beta^2 v_x^2}{2c^2} + U(x) + \frac{E_0 \beta^2 x}{R} = E, \quad (1)$$

где E_0 , E и β – полная и поперечная энергии частицы и ее скорость, деленная на скорость света, периодический плоский потенциал в прямом кристалле как функция поперечной координаты, R – радиус изгиба кристалла. В действительности, уравнение (1) описывает одномерное движение частицы в эффективном потенциале. На рисунке 2 показано движение частицы в таком потенциале. Видно, что частица при движении по траектории 1 в направлении возрастания эффективного потенциала подвергается отражению. Траектория 2 иллюстрирует альтернативный процесс, называемый объемным захватом в каналирование, обусловленный многократным рассеянием на атомных ядрах.

Отсюда мы получаем вероятность изменения начальной поперечной энергии E ($E_m < E < E_M$) частицы ниже критической энергии $E_c < E_m$ (т.е. вероятность объемного захвата) в следующем виде [18, 19]

$$\varepsilon = K_p \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \int_0^1 \operatorname{erf} \left(\frac{\xi + \xi_m}{\sqrt{2\Sigma}} \right) d\xi \right\}, \quad (2)$$

где $\xi_m(\xi) = \bar{E}/\delta E$ и $\Sigma(\xi) = \sigma_E/\delta E$, $\bar{E}$, σ_E – средние и среднеквадратичные потери поперечной энергии из-за многократного рассеяния на ядрах и электронах $\delta E = E_0 \beta^2 d/R$, $K_p = 1, 3/4$ и $1/4$ для плоскостей (110) и (111) (для широкого и узкого каналов потенциала (111)) соответственно, $\operatorname{erf}(x) = 2/\sqrt{\pi} \int_0^x \exp(-t^2) dt$.

Эти выражения для вероятности объемного захвата были использованы для расчета эффективности кристаллического вывода.

В рамках данного экспериментального исследования был задействован кристалл кремния толщиной 0.5 мм и длиной 6 см, расположенный в блоке 24 ускорителя. Угол изгиба этого кристалла составил 0.075 радиан, что соответствует радиусу изгиба в 80 см. Для вывода пучка протонов в канал требовалось отклонение на 0.07 радиан. При повороте протонного пучка на 0.075 радиан захвата в магнитооптический канал не происходило.

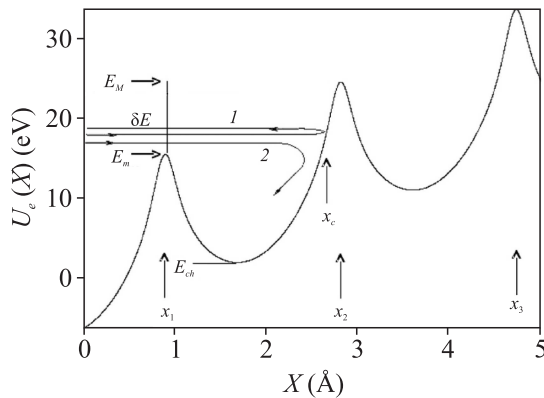


Рис. 2. Схема процессов отражения и объемного захвата: кривая показывает эффективный потенциал изогнутой кристаллографической плоскости, x – поперечная координата. E_M и E_m – значения поперечной энергии, соответствующие соседним локальным максимумам потенциала; E_{ch} – одна из поперечных энергий, соответствующих локальному минимуму потенциала; x_1, x_2, x_3 – поперечные координаты локальных максимумов

Чтобы отклоненные частицы попали в магнитооптический канал установки, кристалл надо повернуть на 0.005 радиан относительно угла торцевого захвата. Это означает, что объемный захват становится возможным в глубине кристалла на расстоянии $z = 4$ мм. При этом угол поворота пучка, составляющий 0.07 радиан, коррелирует с направлением магнитооптического канала транспортировки частиц. Таким образом, на расстоянии 4 мм от входа в кристалл траектория частиц совпадает с касательной к изогнутой плоскости. Часть таких частиц захватывается в плоскостные каналы монокристалла. Согласно приведенным уравнениям (1), (2) получаем, что вероятность этого захвата для конкретных рассматриваемых условий равна 2.67 %. Большая доля этих частиц деканализирует в протяженном кристалле. Согласно расчетам, эффективность отклонения кристаллом до полного угла изгиба в этом режиме составляет 1.11×10^{-4} (см. рис. 3).

С учетом геометрического фактора 30 %, который характеризует долю частиц, попадающих в сечение кристалла на расстоянии 4 мм от торца (другие частицы попадают в держатель или в другие сечения протяженного изогнутого кристалла), расчетная эффективность вывода пучка уменьшится до величины 3×10^{-5} .

Однако эта величина должна рассматриваться лишь как верхняя граница искомой эффективности. При кратном прохождении циркулирующего пучка через кристалл каждое такое прохождение сопровождается значительным рассеянием пучка на веще-

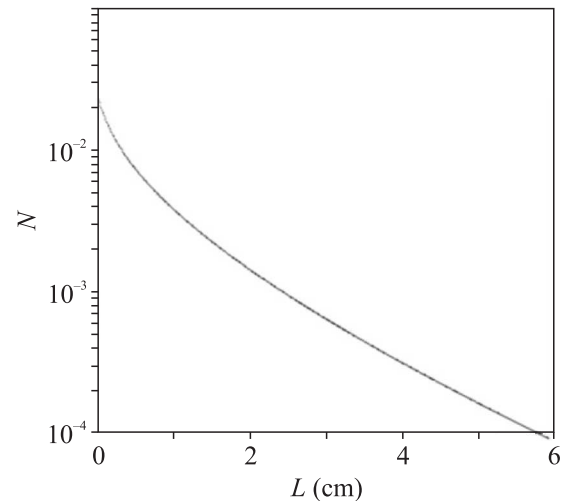


Рис. 3. Эффективность отклонения в зависимости от длины кристалла. Расчет выполнен согласно методу, представленному в [19]

стве мишени (кристалла), что ведет к существенному увеличению его угловых и координатных характеристик. Корректный учет этого фактора требует комплексных расчетов. В данной работе мы опираемся на результат, полученный ранее для условий ускорителя ИФВЭ. В начале 1970-х гг., сразу после запуска ускорителя, были проведены измерения эффективности бериллиевой и алюминиевой мишеней, установленных в вакуумной камере У-70. С помощью этих мишеней генерировались пучки вторичных частиц, которые затем использовались в экспериментах. Согласно работе [23], эффективность составляла 70 % для бериллия и 40 % для алюминия. Мы предлагаем использовать значение 40 % в качестве грубой оценки для нашего случая. Таким образом, для окончательной оценки эффективности вывода пучка мы получаем величину порядка 1.2×10^{-5} .

На первый взгляд при многократном прохождении протонов через мишень часть пучка за счет многократного рассеяния может приобрести углы, близкие к 5 мрад, а следовательно, может быть выведена с помощью торцевого захвата. Однако наши расчеты указывают на ничтожную вероятность этого процесса. Расчеты основаны на стандартной теории многократного рассеяния [24]. Использование функций распределений частиц по углам рассеяния и с учетом поглощения протонов в веществе показывает, что в нашем случае вероятность протону рассеяться на угол больший, чем 5 мрад, составляет менее 2×10^{-6} , а вероятность торцевого вывода – порядка 10^{-4} . Таким образом, вклад от торцевого захвата пренебрежимо мал (не более 10^{-10}).

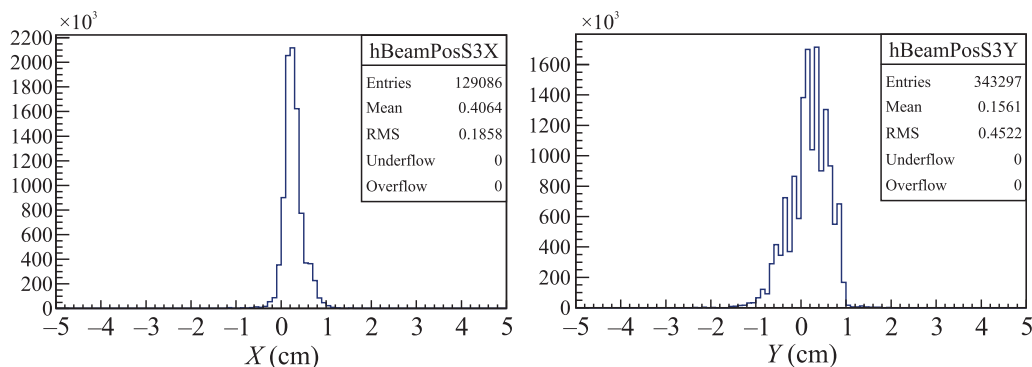


Рис. 4. (Цветной онлайн) Горизонтальный (слева) и вертикальный (справа) профили пучка протонов, выведенного кристаллом с использованием явления объемного захвата

Экспериментальная реализация вывода протонного пучка с использованием кристаллического дефлектора при объемном захвате. Новый метод вывода циркулирующего протонного пучка был реализован для обеспечения эксперимента СПАСЧАРМ. Эта экспериментальная установка расположена во внешней зоне (относительно кольцевой магнитной структуры ускорителя). Для установки имеется возможность получения различных пучков, в частности, протонного. Пучки генерируются на мишенях ускорителя и транспортируются до экспериментальной мишени с помощью магнитов и квадрупольных линз, образующих канал 14. Необходимый кристалл (с увеличенным углом изгиба) был подготовлен для канала 14 и установлен в 24-м блоке У-70. Конструкция кристаллического дефлектора аналогична описанной в [12]. Для попадания в акцептанс канала с выбранной координаты требуется угол поворота протонов 70 мрад, однако кристалл был изогнут под несколько большим углом – 75 мрад.

В начале эксперимента, с помощью системы обратной связи, был установлен режим наведения на кристалл с интенсивностью циркулирующего пучка 3×10^{11} протонов/цикл. Далее была произведена настройка вывода пучка в режиме торцевого каналирования. Этот режим достигался дистанционным вращением кристалла и наблюдением отклоненного пучка на большом люминофорном экране. Обнаруженный пучок не попадал в канал, поскольку угол изгиба кристалла был больше требуемого. Тем не менее, пучок был хорошо виден на экране. Полученное изображение показало, что пучок проходил примерно на 3 см левее центра канала, что делало его транспортировку по каналу невозможной. Далее был проведен переход к объемному захвату для успешного вывода пучка. Кристалл был повернут на 5 мрад.

Это позволило перевести его в режим объемного захвата в каналирование. В результате координата выводимого пучка сместилась и стала достаточной для транспортировки частиц по каналу # 14. После этого были настроены режимы магнитов для оптимального прохождения пучка по годоскопам экспериментальной установки «СПАСЧАРМ».

При сбросе на кристалл (работавший в режиме объемного захвата) интенсивности 3×10^{11} протонов/цикл, на сцинтилляционных счетчиках установки «СПАСЧАРМ» была зафиксирована интенсивность до 6×10^6 протонов/цикл, т.е. зафиксирована эффективность вывода частиц кристаллом 2×10^{-5} . Эта величина является приемлемой для работы физической установки и удовлетворительно совпадает с расчетными данными. Поскольку импульс пучка при выводе с помощью кристаллов не меняется, режим фокусирующих элементов канала остался прежним и соответствовал обычному режиму вывода протонного пучка [11]. Измеренные с помощью годоскопа установки СПАСЧАРМ [25] профили протонного пучка на экспериментальной мишени иллюстрирует рис. 4.

Сравнение методов вывода пучка. Новый метод вывода пучка с применением объемного захвата был успешно реализован в двух сеансах работы ускорителя. Одним из ключевых результатов исследования стало сравнение нового метода с традиционным торцевым выводом протонов. Результаты этого сравнения представлены на рис. 5, где показаны временные структуры пучка, выведенных на мишень установки «СПАСЧАРМ» обоими методами.

Временная структура пучка, полученная при использовании объемного захвата, оказалась значительно устойчивее к условиям наведения пучка на кристалл. Это позволило регистрировать в два раза больше событий при той же интенсивности выведенного пучка.

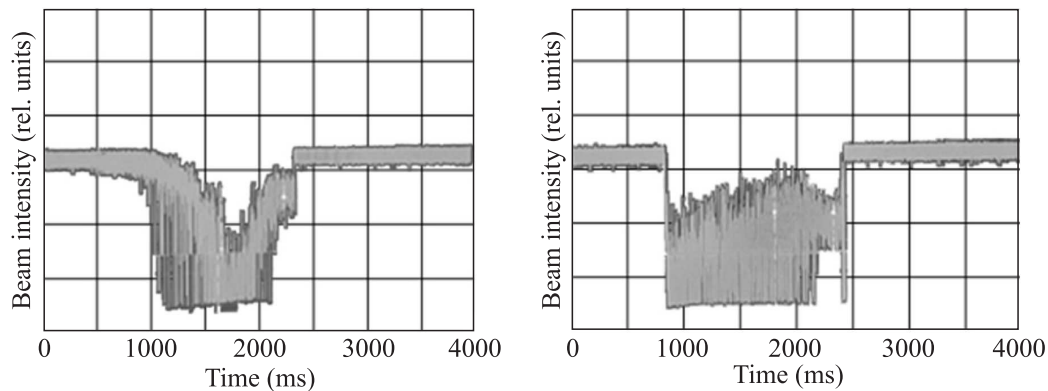


Рис. 5. Временные структуры пучка (интенсивности, измеренные счетчиками в канале как функции времени), выведенного на мишень установки СПАСЧАРМ: слева – с помощью стандартного метода (торцевой захват), справа – с помощью объемного захвата

Финансирование работы. Данная работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда # 25-22-00555 при поддержке Национального исследовательского центра “Курчатовский институт” – Институт физики высоких энергий. Работа сотрудников Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ” поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, проект “Приоритет-2030”.

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

1. 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. URL: <https://inspirehep.net/files/2fec453c39bebf9e7235fcade7f58a70/>.
2. A.F. Elishev, N.A. Filatova, V.M. Golovatyuk et al. (Collaboration), “Steering of charged particle trajectories by a bent crystal”, *Phys. Lett. B* **88**, 387 (1979).
3. A.A. Asseev, M.D. Bavizhev, E.A. Ludmirsky, V.A. Maisheev, 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).
4. A.A. Asseev, A.N. Vasiliev, E.A. Lyudmirsky, V.A. Maisheev, S.B. Nurushev, and Y.S. Fedotov, “Peculiarities of using the bent crystal for the extraction of protons from the IHEP accelerator to the PROZA setup”, *Nucl. Instrum. Methods A* **330**, 39 (1993).
5. 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).
6. 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).
7. 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).
8. 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).
9. 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).
10. 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).
11. A.G. Afonin, V.T. Baranov, E.V. Barnov, G.I. Britvich, Yu.A. Chesnokov, P.N. Chirkov, V.A. Kalinin, V.A. Maisheev, 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).
12. S.F. Reshetnikov, A.G. Afonin, E.V. Barnov, A.N. Vasiliev, V.A. Maisheev, 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).
13. V.V. Abramov, I.L. Azhgirey, A.A. Borisov et al. (Collaboration), “Conceptual Design of the SPASCHARM Experiment”, *Physics of Particles and Nuclei* **54**(1), 69 (2023).

14. V.V. Abramov, G.D. Alekseev, I.G. Alekseev et al. (Collaboration), "SPASCHARM Experimental Setup for Studying the Spin Effects in Hadron Collisions at the U-70 Accelerator Complex", *Instruments and Experimental Techniques* **67**(6), 1065 (2024).
15. V.A. Andreev, V.V. Baublis, E.A. Damaskinskii et al. (Collaboration), "Experimental observation of volume capture by a curved single crystal", *JETP Lett.* **36**, 340 (1982).
16. V.M. Biryukov, Yu.A. Chesnokov, and V.I. Kotov, *Crystal channeling and its application at high-energy accelerators* (Springer, Berlin, 1997), p. 219.
17. Yu.A. Chesnokov, N.A. Galyaev, V.I. Kotov, S.V. Tsarik, and V.N. Zapolsky, "70 GeV proton volume capture into channeling mode with a bent Si single crystal", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **69**(2–3), 247 (1992).
18. S. Bellucci, Y.A. Chesnokov, V.A. Maisheev, and I.A. Yazynin, "Volume reflection and volume capture of ultra relativistic particles in bent single crystals", *Phys. Rev. Accel. Beams* **18**(11), 114701 (2015).
19. V.A. Maisheev, "Volume capture of positive charged particles in bent single crystal", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **1077**, 170487 (2025).
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. A.G. Vasil'eva, A.A. Durum, M.Yu. Kostin, V.A. Maisheev, E.V. Parmenova, I.V. Poluektov, Yu.E. Sandomirskii, M.Yu. Chesnokov, Yu.A. Chesnokov, and A.A. Yanovich, "Volume Capture into Channeling in a Weakly Bent Crystal", *JETP Lett.* **122**(1), 8 (2025).
22. A.A. Asseev and M. Yu. Gorin, "Crystal-aided non-resonant extraction of 70 GeV protons from the IHEP accelerator", *NIMB* **119**, 210 (1996).
23. В.И. Гридасов, К.П. Мызников, В.Н. Чепегин, "Эффективность внутренних мишеней ускорителя ИФВЭ на 70 ГэВ", *Журнал технической физики* **44**(7), 1477 (1974) [V.I. Gridasov, K.P. Myznikov, and V.N. Chepegin, "Effektivnost vnutrennih mishenei uskoritelya IFVE na 70 GeV", *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* **44**(7), 1477 (1974)].
24. B. Rossi and K. Greisen, "Cosmic Ray Theory", *Rev. Mod. Phys.* **14**, 240 (1941).
25. A.V. Ryazantsev, S.I. Bukreeva, A.N. Vasiliev, A.M. Gorin, Yu.M. Goncharenko, V.V. Moiseev, V.V. Mochalov, and P.A. Semenov, "AScintillating Fiber Hodoscope for the SPASCHARM Experiment at the U-70 Accelerator Complex", *Instruments and Experimental Techniques* **66**(4), 563 (2023).