

Использование отражения частиц в изогнутых кристаллах для коллимации пучка в больших адронных коллайдерах

М. Ю. Чесноков, Ю. А. Чесноков¹⁾, В. А. Маишеев, Ю. Е. Сандомирский, А. А. Янович, И. А. Язынин

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

Поступила в редакцию 6 мая 2020 г.

После переработки 17 мая 2020 г.

Принята к публикации 17 мая 2020 г.

Большой адронный коллайдер (БАК) использует многоступенчатую коллиматорную систему для поглощения растущего гало циркулирующих пучков для защиты и обеспечения надежной работы сверхпроводящих магнитов. Аналогичная система запланирована и для Будущего кольцевого коллайдера (БКК). В преддверии работы БАК с высокой светимостью проводятся исследования по совершенствованию коллимационной системы. Исследования показали, что одним из решений для улучшения коллимации пучка является использование каналирования в коротком изогнутом кристалле, который действует как первичный коллиматор, забрасывая частицы глубоко во вторичный коллиматор путем каналирования. Эта система очень чувствительна к угловому положению кристалла и возможным вибрациям различной природы. В настоящей работе предлагается иной подход к коллимации пучка, основанный на объемном отражении частиц от изогнутых кристаллографических плоскостей в последовательности кристаллов. Обоснованы положительные качества этой схемы и предложено многополосковое кристаллическое устройство, способное ее реализовать.

DOI: 10.31857/S1234567820130017

В Большом адронном коллайдере (БАК) используется многоступенчатая система коллиматоров для поглощения растущего гало циркулирующих пучков для защиты и обеспечения надежной работы сверхпроводящих магнитов [1]. Аналогичная система планируется для Будущего кольцевого коллайдера (БКК) [2]. 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 коллимационной системы. В преддверии работы БАК с большой светимостью проводятся исследования по улучшению системы коллимации. В исследованиях [3] 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 коллима-

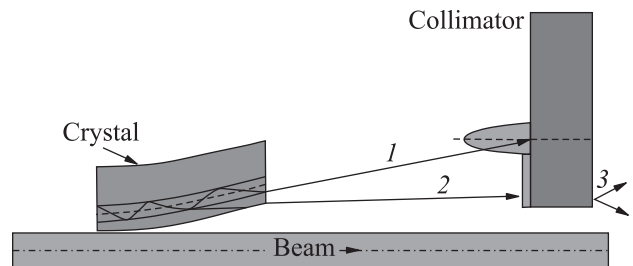


Рис. 1. Схема коллимации пучка с применением короткого кристалла: 1 – пик каналированных частиц, которые эффективно отклонились; 2 – фракция деканалированных частиц; 3 – потери на коллиматоре

тор (на несколько миллиметров) за счет каналирования (рис. 1).

Поскольку критический угол каналирования достаточно мал при высоких энергиях, $\theta_c = 2.5$ мкрад для пучка 6.5 ТэВ в БАК и $\theta_c = 0.92$ мкрад для пучка 50 ТэВ в БКК, система очень чувствительна к угловому положению кристалла и возможным вибрациям разной природы. Одним из видов вибрации может быть явление, известное с 1980-х гг. [4], которое обусловлено силой отдачи при взаимодействии сгустков частиц с кристаллом в режиме каналирования. В силу большой энергии каждой частицы, отклоненная за счет каналирования частица передает кристаллу

¹⁾e-mail: chesnokov@ihep.ru

ощутимый поперечный импульс. По оценкам [5], даже 10^6 частиц в сгустке могут создать ощутимые амплитуды колебаний, что ухудшит эффективность кристаллической коллимации.

В этой связи может быть полезным другой подход к кристаллической коллимации, основанный на объемном отражении частиц от изогнутых кристаллографических плоскостей. Это явление было открыто недавно в экспериментах [6, 7], и оно расширяет границы применения изогнутых кристаллов на ускорителях. Впервые объемное отражение было предсказано в [8] в компьютерном моделировании методом Монте-Карло и позднее детально описано в аналитическом виде в работе [9]. 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 eff велика и для положительно заряженных частиц с энергией несколько ТэВ близка к единице. В [10, 11] показано, что эффективность процесса отражения ограничена величиной альтернативного процесса, называемого объемным захватом, вероятность которого равна:

$$P_{vc}(R) = \frac{1.39AU_0^{1/4}J_p}{2^{7/4}\sqrt{\pi}E_0^{1/4}\varepsilon_{\max}d^{1/2}X_0^{1/2}} \left(\frac{R}{R_c} - \frac{\kappa_1}{\kappa_c} \right) \simeq \simeq 1 - \text{eff}, \quad (1)$$

где R – это радиус изгиба, E_0 – энергия частицы, U_0 – плоскостной потенциальный барьер, ε_{\max} – максимальное значение плоскостного электрического поля, d обозначает межплоскостное расстояние, X_0 – радиационная длина, R_c – критический радиус каналирования и константы $A = 11$ МэВ, $J_p = 1.49$, $\kappa_c = 0.186$, $\kappa_1 = 0.13$ для кремния.

Для определения значений U_0 , ε_{\max} , R_c мы использовали функцию потенциала из рентгеновских измерений [9]. В частности, $R_c = 10.83$ и 83.33 м для $E_0 = 6.5$ и 50 ТэВ соответственно. Для этих энергий частиц уравнение (1) справедливо для R/R_c менее, чем 40–50.

Параметры отражения частицы с энергией 6.5 и 50 ТэВ, средний угол отражения α , среднеквадратичное значение углового распределения при отражении rms и эффективность процесса, рассчитанные по модели [9, 10] с учетом уравнения (1), показаны на рис. 2а, б. Следует отметить, что расчеты, выполненные по данной модели, хорошо согласуются с экс-

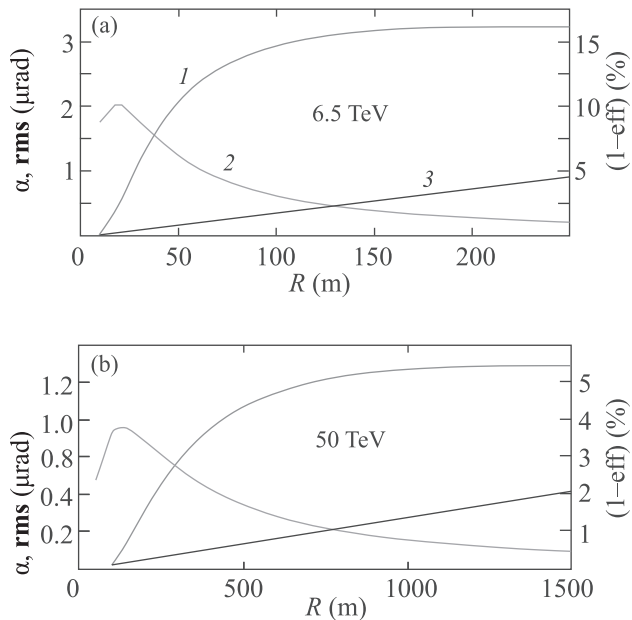


Рис. 2. (Цветной онлайн) Зависимость параметров отражения от радиуса изгиба кристалла: 1 – средний угол отражения α , 2 – среднеквадратичное значение углового распределения rms ; 3 – величина $(1 - \text{eff})$

периментальными данными при энергиях частиц до 400 ГэВ (см. подробное сравнение в работах [10, 11]).

Отражение в одном кристалле, как это видно из рис. 2, мало, около $1.4\theta_c$, но может быть усилено в последовательности кристаллов (рис. 3). В рамках УА9

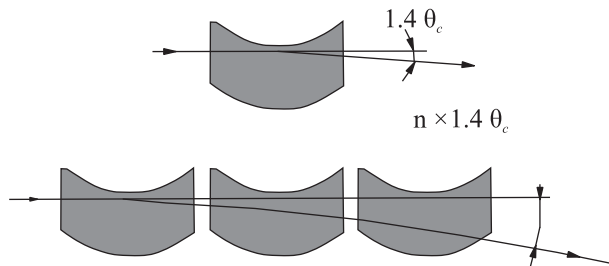


Рис. 3. Усиление угла отклонения частиц при последовательном отражении на цепочке хорошо ориентированных кристаллов. Разориентация кристаллов в цепочке относительно друг друга должна быть много меньше угла изгиба каждого из кристаллов

активности в ЦЕРН исследовались различные варианты мульткристаллических систем [12–15] для кратного увеличения отклонения частиц. Одним из удачных вариантов для ультравысоких энергий может быть разработанное в ИФВЭ устройство [16], проверенное на пучке 400 ГэВ протонов [15].

Принципиальная схема кристаллического дефлектора и его фотография приведены на рис. 4а, б.

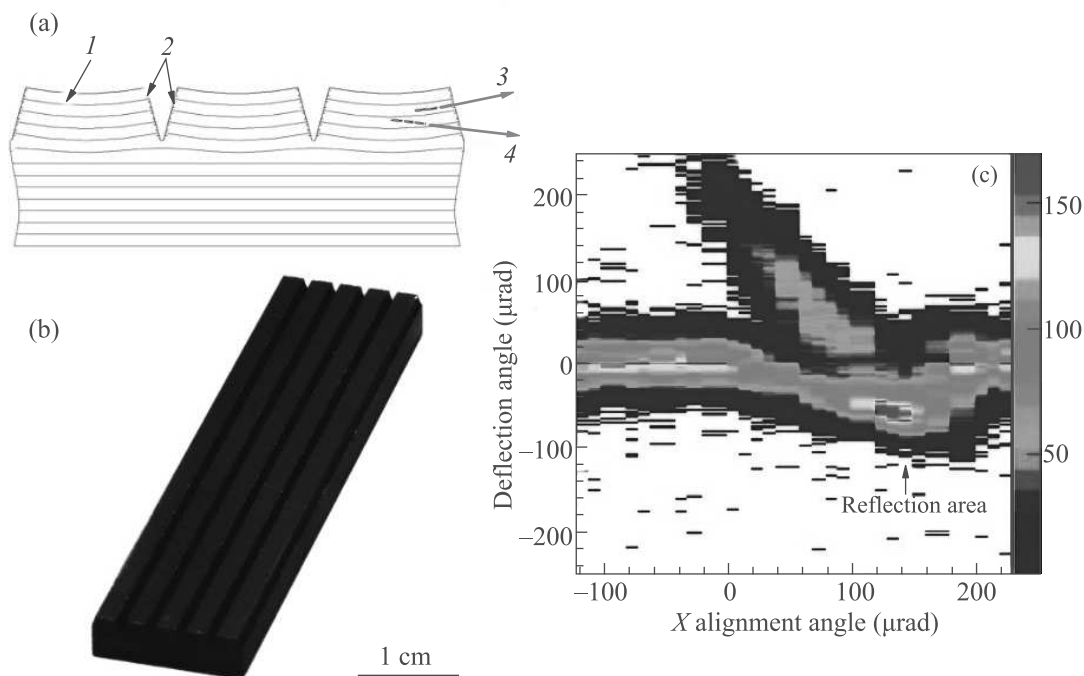


Рис. 4. (Цветной онлайн) (а) – Схематическое представление изогнутого многополоскового кристалла, образованного периодическими канавками на поверхности толстого кристалла. 1 – Изогнутые кристаллографические плоскости; 2 – шероховатые поверхности канавок; 3 – частица, отклоненная вследствие каналирования; 4 – частица, кратно отраженная изогнутыми плоскостями. (б) – Фотография кремниевой кристаллической пластины с периодическими канавками. (с) – Эффективное отклонение протонов 400 ГэВ за счет кратного отражения в изогнутых полосках, согласно [15]

Дефлектор был изготовлен из кремниевой пластины размерами $70 \times 15 \times 5$ мм. Большие грани кристаллической пластины были параллельны плоскостям кристалла (111), в то время как входная грань была перпендикулярна оси $\langle 110 \rangle$. 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. Глубина треугольных канавок в нашем случае составляла около 1.1 мм. Изгиб отдельных полос длиной 2 мм, образующихся между канавками, производился деформацией поверхностных слоев за счет эффекта Тваймана [17]. 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 4с показано эффективное (свыше 90%) отклонение протонного пучка этим кристаллом по результатам [15].

На Курчатовском источнике синхротронного излучения (КИСИ) с помощью параллельного рентге-

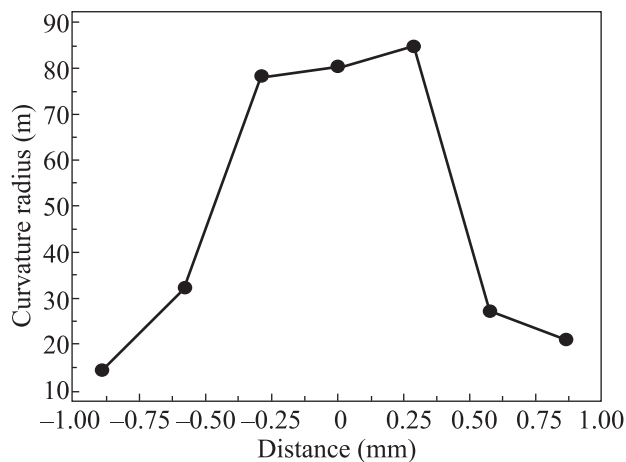


Рис. 5. Радиус изгиба кристаллической полоски вдоль ее длины, согласно измерениям [18]

новского пучка были проведены исследования изгиба отдельных полосок и их взаимной ориентации [18]. Исследования показали, что эта конструкция – серия изогнутых полосок, образованная между крупными канавками на толстой пластине – настолько хорошо взаимно ориентирована, что подходит для коллимации пучка протонов БАК и даже планируемого уско-

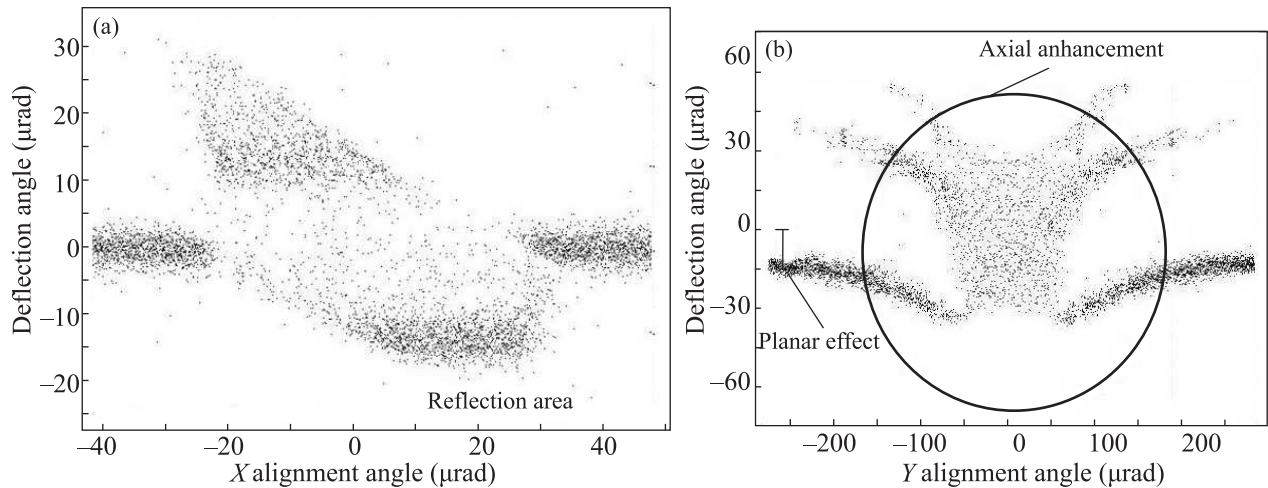


Рис. 6. (а) – Отклонение частиц с энергией 6.5 ТэВ многополосковым устройством в режиме плоскостного отражения частиц, (б) – Усиление угла отражения в осевой ориентации кристалла

рителя БКК на энергию 50 ТэВ с помощью кратного отражения частиц. На рисунке 5 показан радиус изгиба каждой кремниевой полоски по длине кристалла. В центре полоски, где происходит отражение, радиус изгиба постоянный, около 100 м, что оптимально для энергии БАК. Это утверждение поясняется данными на рис. 2. Для энергии БАК средний угол отражения сначала растет с радиусом изгиба кристалла, а затем выходит на плато в районе 100 м, это и есть оптимальный радиус изгиба кристалла. Для энергии БКК (нижний график рис. 2) выход угла отражения на плато происходит при радиусе изгиба 800 м. Оптические измерения кривизны кремниевой полоски с помощью метода автоколлиматора (см. [19], с. 85) показали, что такой радиус изгиба получается, если увеличить длину каждой кремниевой полоски до 5 мм, а глубину канавок уменьшить до 0.5 мм.

С использованием программы СКРЕПЕР [20] методом Монте-Карло проведен расчет отклонения частиц с энергиями 6.5 и 50 ТэВ в системе из нескольких кристаллических полосок. Для энергии 6.5 ТэВ был выбран кристалл с пятью полосками, каждая 3 мм длиной, радиусом изгиба 100 м и углом изгиба 30 мкрад. Для энергии 50 ТэВ кристалл имеет пять полосок по 5 мм длиной, радиусом изгиба 800 м и углом изгиба 6 мкрад. Результаты расчетов для энергии 6.5 ТэВ показаны на рис. 6а. Видно, что в широком интервале углов (все 30 мкрад) кристалл эффективно отклоняет пучок за счет кратного отражения. Эффективность кратного отражения на нескольких изогнутых полосках высока, около 92 % для энергии БАК 6.5 ТэВ и 95 % для энергии 50 ТэВ в БКК. Соответствующий угол отклонения при кратном отраже-

нии на пяти полосках равен 15 и 5 мкрад, и он может быть увеличен за счет осевой ориентации прибора, как это продемонстрировано в [15]. На рисунке 6б показан эффект расчета осевого отклонения при отражении для энергии 6.5 ТэВ. При осевой ориентации кристалла средний угол рассеяния и угловая ширина пучка увеличиваются в несколько раз, по сравнению с плоскостным случаем. Это свойство очень важно для снятия радиационных нагрузок на стенки вторичных коллиматоров. В этом случае кристалл не только улучшает эффективность коллимации, но и хорошо защищает дорогостоящие вторичные коллиматоры от разрушений.

Отметим дополнительные положительные качества использования кратного отражения, в сравнении с использованием каналирования:

- Широкий рабочий диапазон по углам, равный углу изгиба каждого кристалла в последовательности. Эта величина равна 30 мкрад для БАК и 6 мкрад для БКК. Это значит, что нет сильной чувствительности к вибрации, как при каналировании. Также меньше требования к гониометрическому устройству. Нет необходимости подстраивать кристалл по углу для каждого цикла накопления. Достаточно настроить угол один раз и дальше двигать кристалл только линейно, как обычные коллиматоры.

- Меньше требования к совершенству кристалла, так как отражение происходит в центре кристалла на малой длине порядка $1.2R \times \theta_c$, доли миллиметра (рис. 7), в то время как при каналировании частицы совершают десятки колебаний вдоль всей длины изогнутого кристалла. Поэтому и радиационная стойкость будет выше и выше, долговременная стабильность – как результат. Эти аргументы говорят

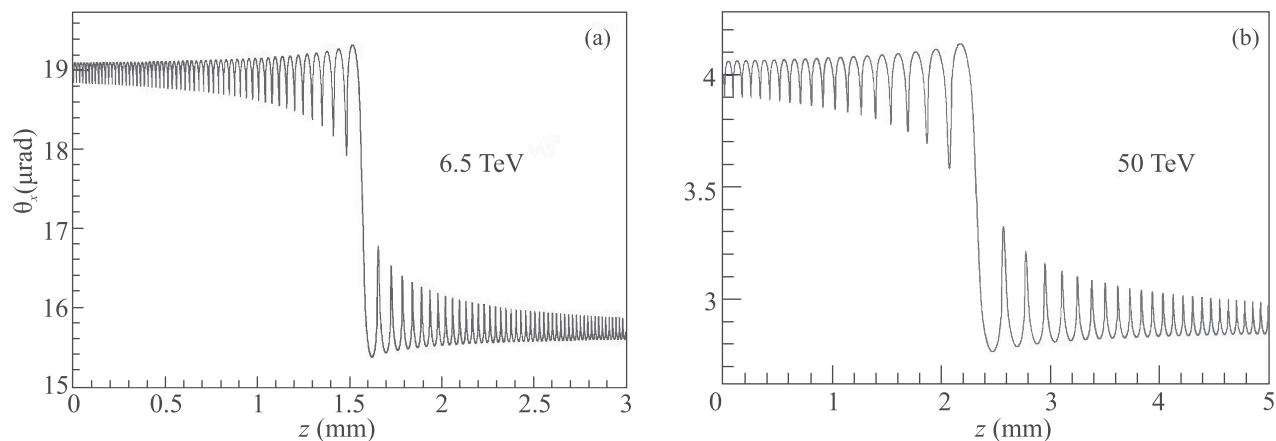


Рис. 7. (Цветной онлайн) Зависимость угла θ_x частицы от длины пути в коротком изогнутом кристалле при объемном отражении

о перспективности этого метода коллимации пучка при ультравысоких энергиях.

Следует отметить, режим отклонения пучка за счет кратного объемного отражения в многополосковых кристаллических устройствах использовался для коллимации пучка в ускорителях при меньших значениях энергии, на ускорителе У70 при энергии 70 ГэВ в ИФВЭ [21, 22] и при энергии 1 ТэВ на ускорителе Тэватрон в Фермилаб [23]. Эти исследования показали, даже при меньших значениях энергии коллимация на объемном отражении происходит не хуже, чем при каналировании в коротких кристаллах.

В заключение отметим, что кристаллы кремния в качестве первичного коллиматора обладают достаточной радиационной и тепловой стойкостью. В штатной работе потери частиц на коллиматорах в больших коллайдерах не превышают 10^8 частиц в секунду [1, 2], с учетом малых размеров пучка плотность потока на кромке коллиматора составляет $\approx 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. В экспериментах ИФВЭ [24] по выводу циркулирующего пучка показано, что кристаллы кремния длительное время выдерживают потоки $\approx 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а радиационный предел для каналирования составляет 10^{20} см^{-2} частиц. Это значит, что кристаллический коллиматор простоит около одного года в коллайдере (вполне приемлемый срок).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант # 17-12-01532.

1. 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*, JACOW publishing, CERN, Geneva (2002).

2. R. Bruce, A. Abramov, A. Bertarelli et al. (Collaboration), *J. Phys. Conf. Ser.* **1350**(1), 012009 (2019).
3. W. Scandale, G. Arduini, M. Butcher et al. (Collaboration), *Phys. Lett. B* **758**, 129 (2016).
4. А. Н. Алейник, С. Г. Афанасьев, С. А. Воробьев, В. Н. Забаев, С. И. Ильин, Б. Н. Калинин, А. П. Потылицын, *ЖТФ* **59**, 191 (1989).
5. Ф. П. Денисов, А. П. Потылицын, С. И. Ильин, *Материалы совещания “Проблемы применения эффектов каналирования частиц кристаллами в физике высоких энергий”*, ИФВЭ, Протвино (1991), с. 56; https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/24/060/24060554.pdf#page=57.
6. Yu. M. Ivanov, A. A. Petrunin, V. V. Skorobogatov et al. (Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **97**, 144801 (2006).
7. W. Scandale, D. A. Still, A. Carnera et al. (Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **98**, 154801 (2007).
8. A. M. Taratin and S. A. Vorobiev, *Phys. Lett. A* **119**, 425 (1987).
9. V. A. Maishev, *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams* **10**, 084701 (2007).
10. S. Bellucci, Yu. A. Chesnokov, V. A. Maishev, and I. A. Yazynin, *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams* **18**, 114701 (2015).
11. V. A. Maishev, *Coherent Processes in Bent Single Crystals, Proceedings of 51st Workshop “Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena” Erice, Italy, October 2008*, World Scientific Publishing Co Pte Ltd, The Science and Culture Series – Physics, Singapore (2010); doi:10.1142/9789814307017_0009.
12. W. Scandale, A. Carnera, G. Della Mea et al. (Collaboration), *Phys. Lett. B* **658**, 109 (2008).
13. W. Scandale, A. Vomiero, S. Baricordi et al. (Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **102**, 084801 (2009).
14. W. Scandale, A. Vomiero, E. Bagli et al. (Collaboration), *Phys. Lett. B* **688**, 284 (2010).

15. W. Scandale, G. Arduini, M. Butcher et al. (Collaboration), Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B **338**, 108 (2014).
16. A.G. Afonin, V.T. Baranov, V.A. Maisheev, D.A. Savin, Yu.E. Sandomirskiy, Yu.A. Chesnokov, and I.A. Yazynin, Instruments and Experimental Techniques **56**(6), 617 (2013).
17. J.C. Lambropoulos, S. Xu, T. Fang, and D. Golini, Appl. Opt. **35**, 5704 (1996).
18. A.A. Kaloyan, S.A. Tikhomirov, K.M. Podurets, V.A. Maisheev, Yu.E. Sandomirskiy, and Yu.A. Chesnokov, Crystallography Reports **62**(3), 370 (2017).
19. V.M. Biryukov, Yu.A. Chesnokov, and V.I. Kotov, *Crystal channeling and its application at high-energy accelerators*, Springer, Berlin, Germany (1997), 219 p.
20. I. I. Degtyarev, O. A. Liashenko, and I. A. Yazynin, *Proc. Eur. Particle Accelerator Conf. (EPAC_2000)*, Vienna, Austria (2000), p. 2506.
21. 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, Atomic Energy **106**(6), 409 (2009).
22. A. G. Afonin, I. A. Yazynin, E. A. Syshchikov et al. (Collaboration), JETP Lett. **93**, 187 (2011).
23. N. V. Mokhov, G. E. Annala, A. Apyan et al. (Collaboration), Int. J. Mod. Phys. A **25**(supp01), 98 (2010).
24. 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, Int. J. Mod. Phys. A **33**, 1850138 (2018).