Письма в ЖЭТФ, том 113, вып. 4, с. 223 – 228

Использование новых кристаллических устройств на ускорителе У-70

А. Г. Афонин, В. Т. Баранов, Е. В. Барнов, Г. И. Бритвич, И. С. Лобанов, И. В. Полуэктов, С. Ф. Решетников, Д. А. Савин, Ю. Е. Сандомирский, Д. С. Смаглюк, В. И. Терехов, М. Ю. Чесноков, Ю. А. Чесноков[1], П. Н. Чирков, А. А. Янович

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

Поступила в редакцию 17 декабря 2020 г.
После переработки 2 января 2021 г.
Принята к публикации 4 января 2021 г.

На основе успешного опыта по генерации вторичного пучка пионов и каонов с помощью фокусирующего кристалла предложено создать на У-70 канал вторичных частиц нового типа – не потребляющий электрической энергии. Экспериментально показано, что с помощью многополоскового кристаллического устройства можно защитить выводной септум-магнит от радиации путем затенения токовой перегородки кристаллом, использующим для отклонения частиц режим объемного отражения. Указанные применения кристаллов являются новыми в мировой практике ускорителей.

DOI: 10.31857/S1234567821040029

На ускорителе У-70 применяется метод формирования пучков частиц с помощью каналирования в изогнутых кристаллах [1]. Общий недостаток метода – кристаллы отклоняют пучки частиц с малой угловой расходимостью, в пределах угла Линдхарда. В ходе выполнения работ по теме разработаны новые кристаллические устройства – фокусирующие элементы и многополосковые структуры, которые расширяют границы метода, кратно увеличивая угловой аксептанс кристаллической системы. Благодаря этому решаются новые ускорительные задачи – формирование пучков вторичных частиц, а также защита септум магнитов, предназначенных для вывода циркулирующего пучка, с помощью кристаллов.

Канал частиц нового типа для положительно заряженных пионов на основе фокусирующего кристалла. Получение вторичных частиц на протонных ускорителях является сложной научно-технической задачей. Для этого применяются протяженные магнитооптические каналы, насыщенные электромагнитами [2, 3]. Мы предлагаем революционный способ получения пионного пучка с помощью внутренней мишени, кольцевого магнита и фокусирующего кристалла. Созданные в ИФВЭ фокусирующие кристаллы, способные не только отклонять, но и фокусировать пучок частиц за счет скошенного входного торца, были неоднократно тестированы на протонных пучках (см. [4] и ссылки). Недавно был проведен демонстрационный опыт по формированию пучка пионов и каонов кристаллом на канале 4А ускорителя ИФВЭ [5].

Схема опыта представлена на рис. 1a. 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 Vm отделял пионы от протонов, которые не провзаимодействовали в мишени, и выделял интервал импульсов $(25 \pm \pm 2)$ ГэВ/с. В этих условиях мы определили эффективность получения пучка вторичных частиц. Она измерялась как отношение тройного совпадения CsI, счетчика S и ячеек 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 [6]. 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

[1]e-mail: Yury.Chesnokov@ihep.ru

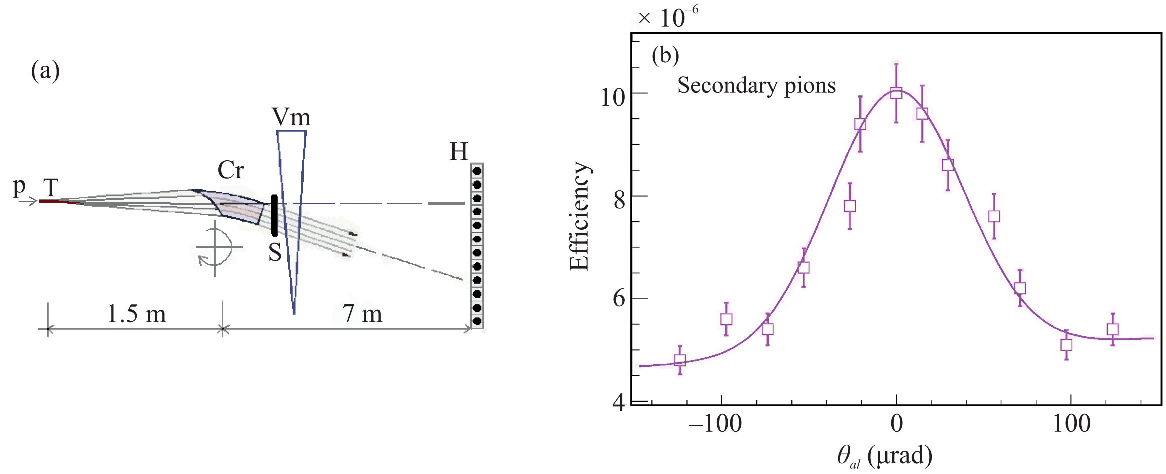

Рис. 1. (Цветной онлайн) (a) Схема опыта: T – мишень из CsI; Cr – кристалл в гониометре; S – миниатюрный сцинтиллятор; Vm – вертикально-отклоняющий магнит; H – сцинтилляционный годоскоп. (b) – Зависимость интенсивности пучка вторичных пионов от ориентации фокусирующего кристалла

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. Перед кольцевым магнитом открытого типа устанавливается внутренняя мишень (рис. 2). Положительно заряженные пионы отклоняются по

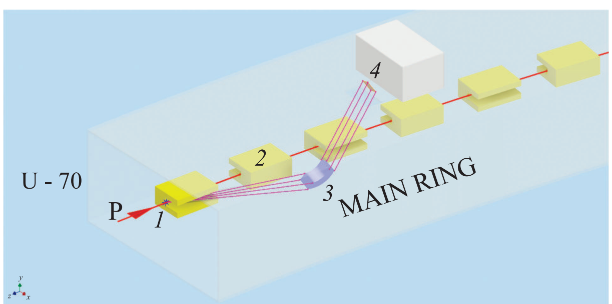

Рис. 2. (Цветной онлайн) Схема формирования пучка вторичных положительно заряженных пионов с помощью внутренней мишени и фокусирующего кристалла Вставка редактора. У-70 главное кольцо: *1* – мишень; *2* – магнит; *3* – фокусирующий кристалл; *4* – физическая установка

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 большой 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. 3. Применяется целая стопка кристаллов

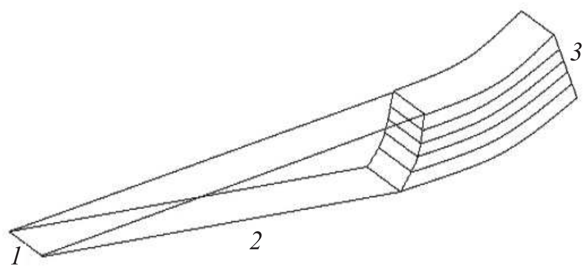

Рис. 3. Схема фокусирующего кристаллического устройства на основе массива изогнутых кристаллов: *1* – мишень; *2* – траектории частиц; *3* – массив изогнутых кристаллических пластин

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. В реальном устройстве мы использовали 7 кристаллических пластин толщиной 0.4 мм. Такое кристаллическое устройство имеет угловой захват около 1 мрад по вертикали и 3 мрад по горизонтали.

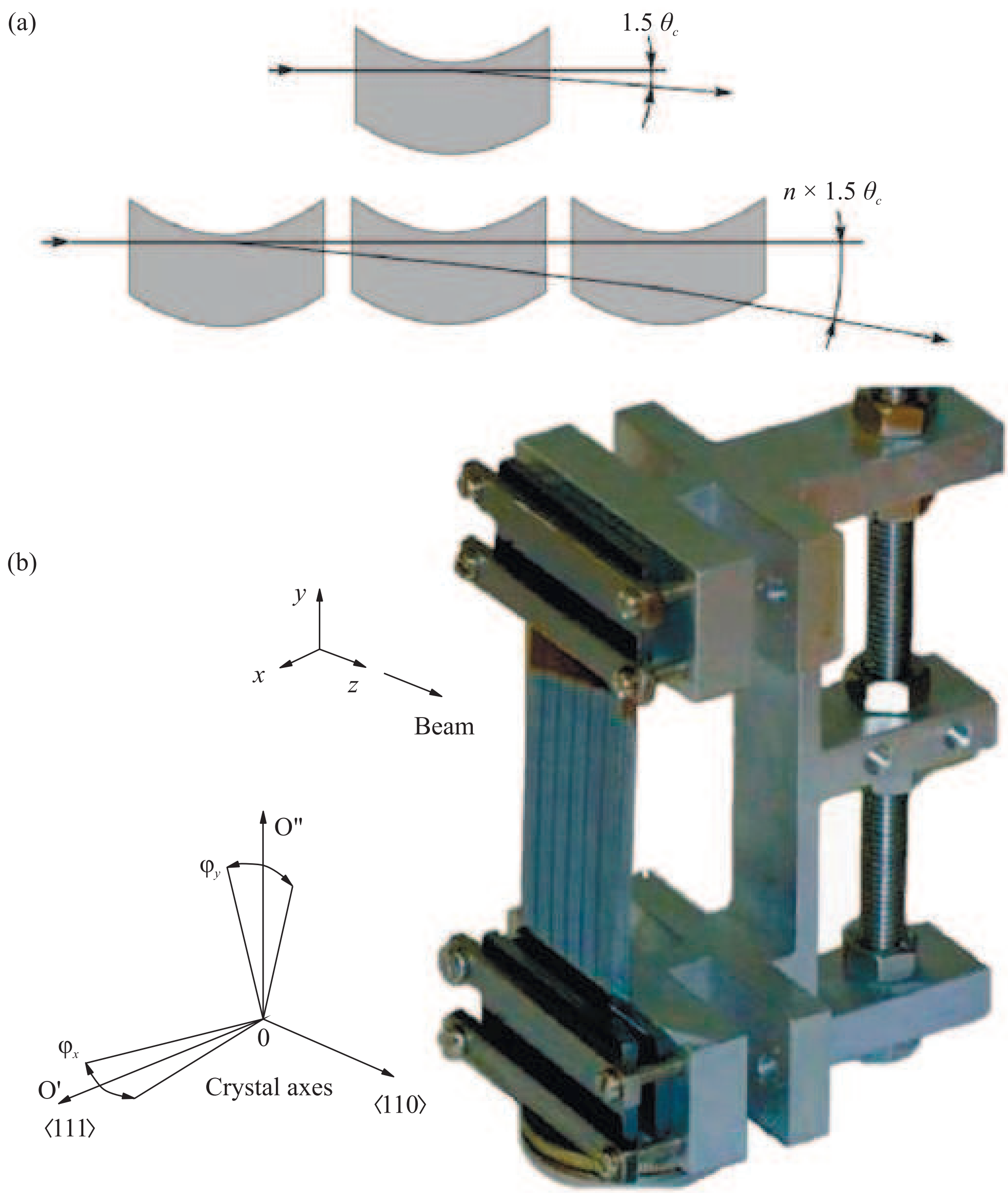

Рис. 4. (Цветной онлайн) (a) – Принцип работы многополоскового кристаллического устройства; (b) – его внешний вид

Ширина импульсного интервала будет равна отношению поперечного размера кристалла к линейной дисперсии, создаваемой магнитом, как обычно в магнитной оптике [3]: $\frac{\Delta p_0}{p_0} = \frac{H_{\rm cryst}}{d_{13}}$, где $H_{\rm cryst}$ – это размер кристалла по горизонтали, линейная дисперсия $d_{13} = \alpha_{\rm bend} D$ для системы из дипольного магнита и свободного промежутка [3], где $\alpha_{\rm bend}$ – угол поворота пионов в магните, D – расстояние между центром магнита и кристаллом.

Если мы фиксируем импульс пионов $p_0 = 25$ ГэВ/с, то при значении магнитного поля в У-70 $B = 0.86$ Тл и длине пути в магните до выхода из вакуумной камеры $l = 5$ м угол поворота составит $\alpha_{\rm bend} = \frac{303Bl}{p_0} = 50$ мрад (см. [3]). Для кристалла, который имеет ширину $H_{\rm cryst} = 10$ мм, установленного в 5 м от центра поворота в магните, выделяемый импульсный интервал составит $\frac{\Delta p_0}{p_0} = \frac{1}{25} = 4\,\%$.

Если мы применим нитевидную внутреннюю мишень, на которую наводится 10^{12} протонов в цикле, интенсивность пучка вторичных пионов составит $\sim 10^5$ частиц за цикл, с учетом экспериментальных данных на рис. 1b и потерь частиц в сильно изогнутом кристалле (эффективность поворота пучка сильно изогнутым кристаллом рассчитана в [1]). Опыты с пучком начнутся сразу после модернизации У-70.

Предложенный способ получения вторичного пучка пионов с помощью фокусирующих кристаллов перспективен также для развития программы “физики за пределами коллайдеров” [7], которая может быть реализована на пучках, выведенных из кольца БАК.

Применение многополосковых кристаллов для защиты септум-магнитов. Актуальной задачей на крупных ускорителях является организация вывода пучка частиц высокой интенсивности для задач физики высоких энергий (пучки нейтрино), нейтронные источники и т.д. При интенсивности пучка 10^{13}–10^{14} частиц в секунду возникает проблема радиационной защиты электростатических и магнитных септумов [8]. Эта задача может быть решена с помощью изогнутых кристаллов путем затенения кристаллическим рассеятелем перегородки септума. О первых результатах по защите электростатического септума ускорителя СПС в ЦЕРН коротким кристаллом в режиме каналирования сообщается в [8]. Для У-70 более актуальна защита магнитного септума СМ24 с токовой перегородкой 2 мм, которая значительно толще вольфрамовых проволок на электростатическом септуме СПС. Для решения этой задачи предложен другой путь.

Для радиационной защиты токовой перегородки выводного септум-магнита предлагается устройство для кратного отклонения протонного пучка несколькими изогнутыми полосками кремния в режиме объемного отражения (рис. 4a). Объемное отражение обусловлено взаимодействием налетающего протона с потенциалом изогнутой атомной решетки и происходит на малой длине в области касательной к изогнутой атомной плоскости [9–12]. Вероятность однократного отражения высока и при энергиях около 100 ГэВ приближается к единице. Для увеличения угла отражения и практического применения объемного отражения необходимо увеличить значение угла отклонения заряженных частиц. Это делается с помощью взаимно ориентированных с высокой точностью кристаллов, расположенных последовательно.

Для защиты септум-магнита У-70 с токовой перегородкой 2 мм нами разработано устройство “бутерброд” (рис. 4b). Устройство содержит 24 изогнутых

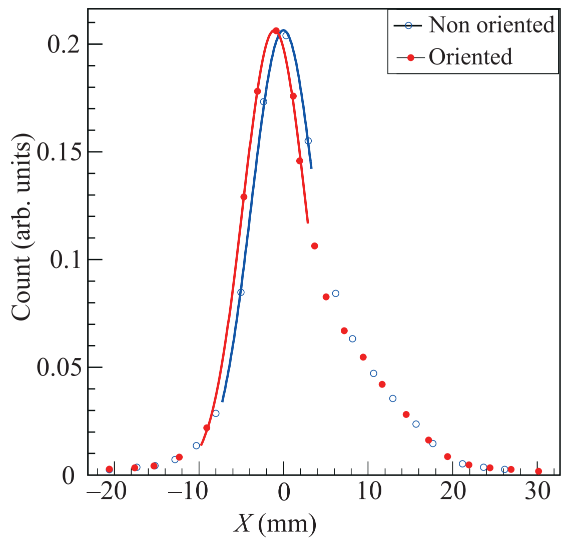

Рис. 5. (Цветной онлайн) Профиль пучка протонов 50 ГэВ, измеренный для ориентированного и разориентированного случая с помощью сканирующего счетчика

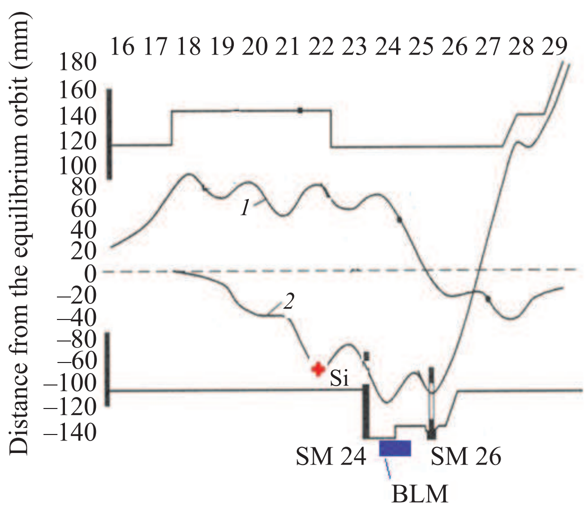

Рис. 6. (Цветной онлайн) Расположение кристалла Si в 22 магнитном блоке У-70 для защиты септум-магнита СМ24. BLM – монитор потерь; кривая *1* – циркулирующий пучок; *2* – выводимый пучок; СМ26 – следующий магнит по трассе вывода

кристалла в виде изогнутых полосок. Метод изгиба нескольких полосок в одном держателе был развит в экспериментах по объемному отражению протонных пучков [13]. Шесть полосок вдоль пучка длиной 2.5 мм каждая усиливают эффект отражения, а четыре слоя по 0.5 мм поперек пучка обеспечивают необходимый поперечный размер 2 мм (толстые кристаллы не могут изгибаться на нужные углы, поэтому необходим такой сэндвич). В результате опти-

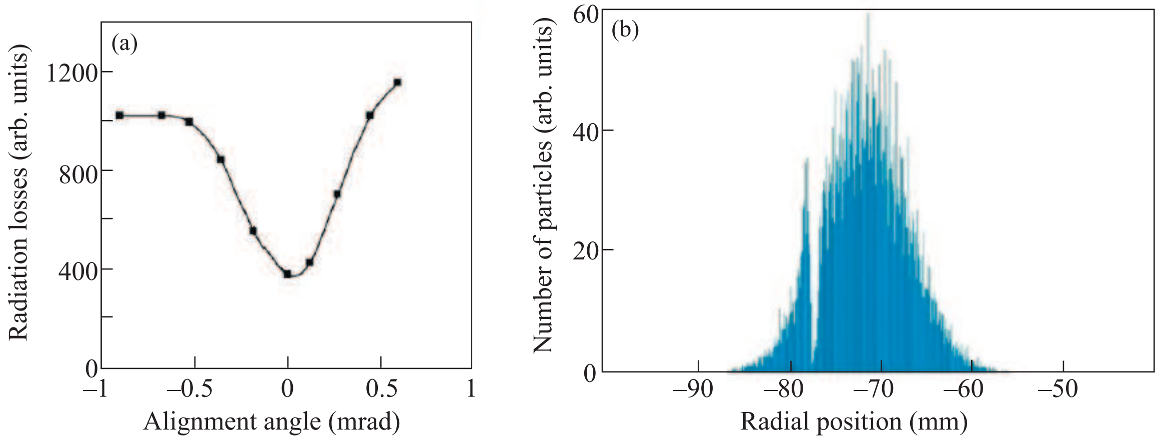

Рис. 7. (Цветной онлайн) (a) – Измеренные монитором BLM потери частиц на септуме СМ24 в зависимости от ориентации кристалла. (b) – Расчетный профиль выводимого пучка перед септумом; провал в левой части профиля, как раз на координате токовой перегородки, образован тенью от ориентированного кристалла

ческой проверки было установлено, что угол изгиба каждой полоски равен 1.1 мрад. Он заметно больше, чем расходимость пучка в точке установки кристалла в ускоритель ($\sim$0.1 мрад), поэтому эффективно должны отклоняться все падающие на кристалл частицы.

Высокие цифры по эффективности отклонения ($>$ 90 %) были получены при проверке кристаллического устройства на выведенном пучке канала частиц 4А ускорителя ИФВЭ (рис. 5).

Угол отклонения пучка 0.2 мрад совпал с ожидаемым. Проверенное на выведенном пучке многополосковое устройство было установлено в 22 магнитном блоке У-70 для защиты септума СМ24 с токовой перегородкой 2 мм (рис. 6).

В первых ускорительных тестах мы просто направляли пучок на септум быстрым кикермагнитом. С помощью штатных мониторов потерь [14] мы измерили, как уменьшаются потери частиц на септуме для оптимальной ориентации кристалла (рис. 7a). Измеренное уменьшение радиационных потерь на септуме составляет 60 %. Это подтверждается расчетами Монте-Карло (рис. 7b), использующими модель взаимодействия частиц с многополосковым кристаллом [15]. Движение частиц от кристалла до септума описывалось матрицей перехода, с учетом геометрии опыта и структурных функций ускорителя.

Эти результаты оказались еще более оптимистичны, чем результаты, полученные в ЦЕРНе [8] на ускорителе СПС (уменьшение потерь на электростатическом септуме 40 %), где вместо многополосковой структуры была использована одиночная изогнутая кристаллическая полоска, в которой использовался режим каналирования. В дальнейшем планируется использовать многополосковое устройство для затенения перегородки не в экспериментальном режиме, а в интенсивном пучке медленного резонансного вывода интенсивностью 10^{13} частиц в одном цикле ускорения.

Аналогичные задачи могут быть решены с помощью нашей методики и на других крупных ускорителях, таких как СПС (ЦЕРН), Главный инжектор (Фермилаб), АГС (Брукхэйвен), Японский ускорительный комплекс в г. Токай.

Отметим, что кристаллы кремния в качестве защитного элемента обладают достаточной радиационной и тепловой стойкостью. В штатной работе медленного вывода протонов потери частиц на септуме СМ24 ускорителя У-70 не превышают 10^{11} частиц в секунду [16]. В экспериментах ИФВЭ [17] по выводу циркулирующего пучка показано, что кристаллы кремния длительное время выдерживают потоки $\simeq 10^{12}$ см$^{-2}$ с$^{-1}$, а радиационный предел для каналирования составляет 10^{20} см$^{-2}$ частиц. Это значит, что кристаллический прибор простоит несколько лет при непрерывной работе У-70 (вполне приемлемый срок).

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

1. V. M. Biryukov, V. I. Kotov, and Yu. A. Chesnokov, Phys.-Uspekhi **37**, 937 (1994).
2. K. G. Steffen, *High Energy Bam Optics*, Interscience, N.Y. (1965), v. 17.
3. V. P. Kartashev and V. I. Kotov, *Methods of Particle Beams Formation in High-Energy Accelerators*, Energoatomizdat, M. (1989) [in Russian].

4. A. G. Afonin, G. I. Britvich, A. P. Bugorskii, M. K. Bulgakov, A. A. Durum, M. Yu. Kostin, A. V. Lutchev, V. A. Maisheev, Yu. E. Sandomirskiy, V. I. Pitalev, I. V. Poluektov, Yu. A. Chesnokov, P. N. Chirkov, and A. A. Yanovich, JETP Lett. **104**, 12 (2016).
5. G. I. Britvich, A. A. Durum, M. Y. Kostin, V. A. Maisheev, Y. A. Chesnokov, and A. A.Yanovich, JETP **129**(2), 229 (2019)
6. V. A. Maisheev, Y. A. Chesnokov, and P. N. Chirkov, Nucl. Instrum. Methods B **355**, 360 (2015).
7. C. Barschel, *Report from the LHC Fixed Target working group of the CERN Physics Beyond Colliders Forum*, Tech. Rep. CERN-PBC-REPORT-2019-001, CERN, Geneva (2019).
8. F. M. Velotti, L. S. Esposito, M. A. Fraser, V. Kain, S. Gilardoni, B. Goddard, M. Pari, J. Prieto, R. Rossi, W. Scandale, L. S. Stoel, F. Galluccio, M. Garattini, and Yu. Gavrikov, Phys. Rev. AB **22**, 093502 (2019).
9. Y. M. Ivanov, A. A. Petrunin, V. V. Skorobogatov et al. (Collaboration), Phys. Rev. Lett. **97**, 144801 (2006).
10. W. Scandale, D. Still, A. Carnera et al. (Collaboration), Phys. Rev. Lett. **98**, 154801 (2007).
11. A. M. Taratin and S. A. Vorobiev, Phys. Lett. A **119**, 425 (1987).
12. V. A. Maisheev, Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 084701 (2007).
13. W. Scandale, G. Arduini, Yu. A. Chesnokov et al. (Collaboration), JETP Lett. **101**, 679 (2015).
14. A. G. Afonin, V. T. Baranov, E. V. Barnov et al. (Collaboration), Nucl. Instrum. Meth. B **457**, 10 (2019)
15. V. A. Maisheev and M. Yu. Chesnokov, Technical Physics **65**, 820 (2020).
16. S. V. Ivanov and O. P. Lebedev, Instrum. Exp. Tech. **49**, 157 (2006) [Prib. Tekh. Eksp. **49**, 14 (2006)].
17. 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).