

ПРИМЕНЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПУЧКАМИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ГЕНЕРАЦИИ НАПРАВЛЕННЫХ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ НА СИНХРОТРОНЕ У-70

*Ю. А. Чесноков**, *А. Г. Афонин*, *В. Т. Баранов*, *Г. И. Бритвич*,
П. Н. Чирков, *В. А. Мамшеев*, *Д. А. Савин*, *В. И. Терехов*

*Институт физики высоких энергий,
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
142281, Протвино, Московская обл., Россия*

Поступила в редакцию 9 марта 2018 г.

На протяжении ряда лет в ИФВЭ ведутся работы по формированию потоков частиц и излучений с помощью каналирования и отражения частиц в ориентированных кристаллах. Всесторонние теоретические и экспериментальные исследования привели к созданию на ускорителе У-70 реально действующих систем. В частности, на У-70 создан медленный вывод пучка протонов с помощью каналирования частиц в коротких изогнутых кристаллах, имеющих беспрецедентно высокие параметры: эффективность вывода около 85 % при интенсивности пучка 10^{12} частиц в цикле. Были проведены опыты по внедрению метода отражения частиц в кристаллах для вывода и коллимации пучка на У-70. В настоящее время кристаллические элементы используются в регулярных сеансах У-70 и обеспечивают половину пучков частиц для физических экспериментов. В работе обобщаются результаты этого уникального опыта в мировой практике ускорителей и излагаются его перспективы.

DOI: 10.1134/S0044451018070118

1. ВВЕДЕНИЕ

Идеи профессора Э. Н. Цыганова из Дубны использовать каналирование в изогнутых кристаллах для управления пучками частиц (см. рис. 1а, [1]) были проверены и продвинуты во многих экспериментах (см. [1–3] и ссылки в работах). Этот метод нашел наиболее широкое практическое применение на ускорителе У-70 в ИФВЭ, где кристаллы используются в регулярных сеансах работы для вывода и формирования пучка. Вопросы физики каналирования были описаны в [4, 5]. Здесь мы сосредоточимся на особенностях применения изогнутых кристаллов и описании кристаллических устройств. Лишь кратко отметим, что эффективность отклонения частиц изогнутым кристаллом (см. [4]) определяется отношением критического угла каналирования θ_c к расходимости пучка φ и убывает экспоненциально с уменьшением длины кристалла L :

$Eff \sim (\theta_c/\varphi) \exp(-L/L_d)$, 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. Сильный 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 увеличением энергии, как и параметр L_d . С ростом угла изгиба кристалла эффективность поворота частицы уменьшается практически до нуля для угла $\theta_{max} \approx L_d/R_c = 0.25$ рад. Также 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 такой метод управления пучками не является универсальным, но может быть очень полезным в нескольких случаях, особенно для вывода циркулирующего пучка и его деления

* E-mail: chesnokov@ihep.ru

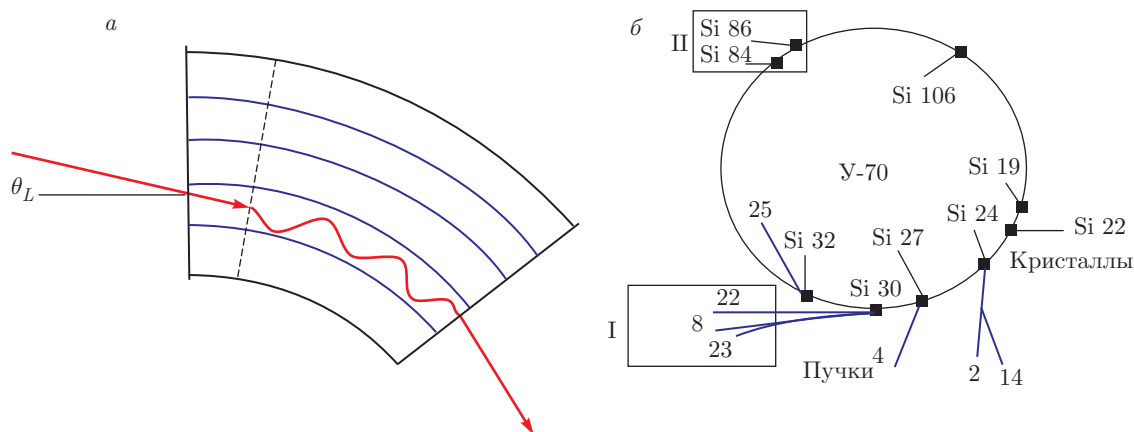


Рис. 1. а) Отклонение частиц изогнутым кристаллом. б) Расположение кристаллов в кольце ускорителя У-70

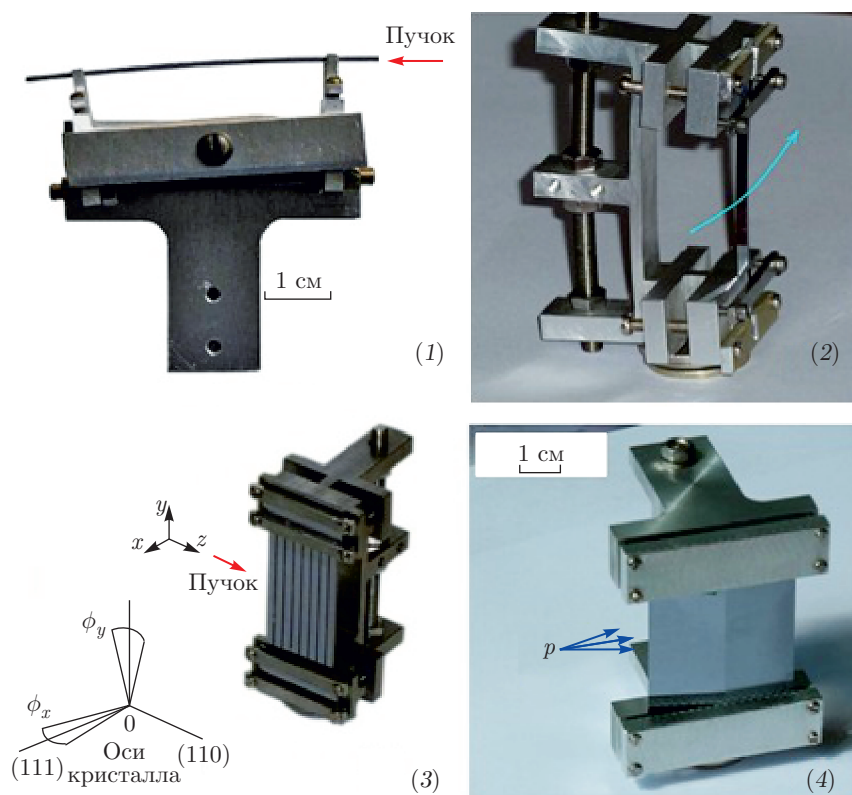


Рис. 2. Внешний вид кристаллических deflectоров пучка

в каналах частиц, где изогнутые кристаллы выполняют роль миниатюрных магнитов.

2. РАЗЛИЧНЫЕ ВАРИАНТЫ ОТКЛОНЕНИЯ ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ ИЗОГНУТЫХ КРИСТАЛЛОВ

Сегодня существует около 10 кристаллических станций для вывода пучка из основного кольца

У-70, предназначенных для одновременной работы нескольких экспериментальных установок, при этом эффективность физических исследований значительно повышается (см. рис. 1б). Часть циркулирующего пучка подводится к кристаллу медленно нарастающим магнитным полем дополнительных обмоток (так называемые бампы). Система обратной связи может регулировать эту долю пучка в широких пределах, подобно наведению на внутренние

мишени. Эта система позволяет осуществить режим одновременного вывода пучка по разным направлениям несколькими кристаллами. Для управления положением и ориентацией кристаллов разработаны специальные вакуумные гониометры.

На рис. 2 представлен внешний вид нескольких разработанных кристаллических устройств для управления пучком: 1 — первый изогнутый кристалл для деления пучка в каналах частиц (1987) [6], такая же конструкция использовалась для вывода пучка в каналы № 2 и № 4 [7]; 2 — тонкий кристалл в виде полоски для высокоэффективного вывода пучка в канал частиц № 8 [8, 9]; 3 — устройство для коллимации пучка, основанное на многократном отражении частиц на цепочке из изогнутых кристаллов [10, 11]; 4 — устройство для фокусировки траекторий частиц в области сверхвысоких энергий [12]. На рис. 3–6 поясняются принципы работы и характеристики этих устройств.

С использованием устройства 1 были получены первые выведенные пучки протонов умеренной интенсивности до 10^7 частиц в секунду с эффективностью вывода 10^{-4} – 10^{-3} . В 1989 г. на ускорителе У-70 впервые пучок протонов с энергией 50 и 70 ГэВ был выведен в один из существующих каналов частиц. Чтобы направить пучок из кольца в канал, потребовалось кристалл кремния ориентации (111) размерами $65 \times 5 \times 0.6$ мм³ изогнуть на большой угол около 90 мрад, сравнимый с углом θ_{max} . Как видно на рис. 2, кристалл 1 изгибается в продольном направлении с помощью металлических держателей [7]. Умеренная эффективность вывода пучка с помощью длинных кристаллов была вызвана тем, что частицы захватываются в режим каналирования в основном во время первого прохождения через кристалл. Далее было показано, что эффективность вывода пучка кристаллом стремительно растет при уменьшении длины кристалла и его угла изгиба (рис. 7).

В частности, было предсказано в работе [13], что эффективность вывода пучка кристаллом может быть увеличена до значительно более высоких значений при многократных прохождениях частиц через короткий кристалл (около 1 мм в длину), установленный на циркулирующем пучке (см. рис. 7а). Чтобы прояснить этот механизм, в ИФВЭ в конце 1997 г. был начат новый эксперимент, его целью было испытать очень короткие кристаллы и достичь очень высокой эффективности вывода [8, 9]. Радикальное увеличение эффективности вывода до 85 % было достигнуто с помощью устройства 2 на рис. 2, известного как «полосковый кристалл». Этот способ

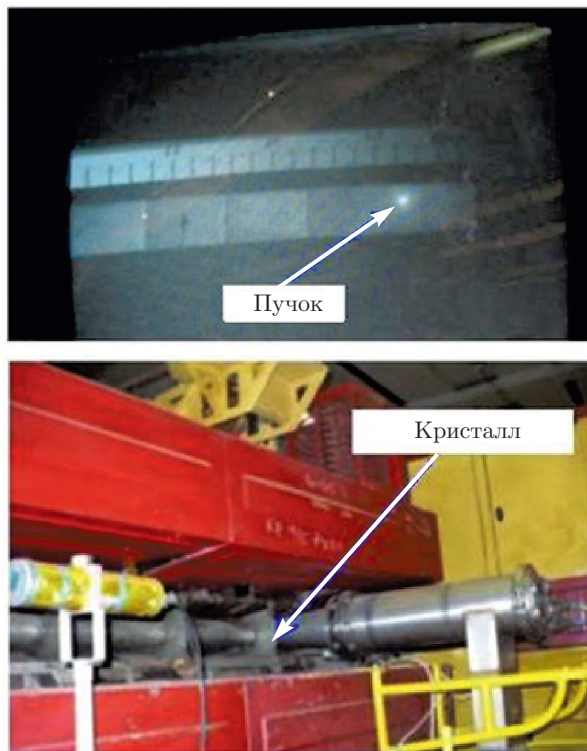


Рис. 3. Вывод пучка из кольца У-70 кристаллом типа 1 в направлении каналов частиц № 2 и № 4. На мониторе видно, как мал размер выведенного пучка, не требующего фокусировки квадрупольями

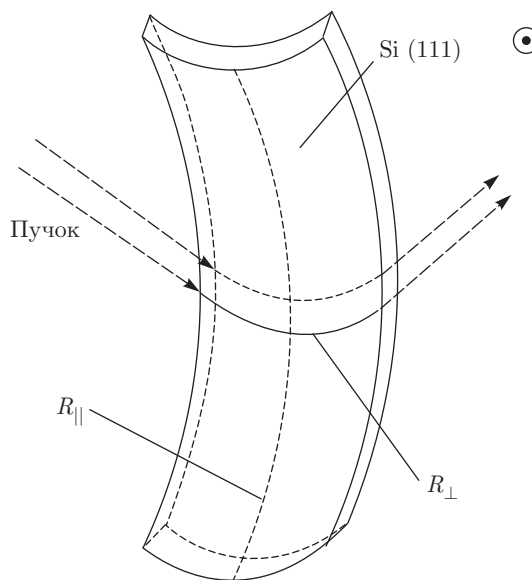


Рис. 4. Принцип изгиба кристалла-полоски (устройство 2 на рис. 2)

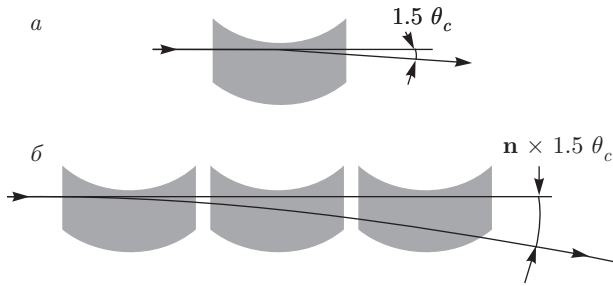


Рис. 5. Усиление угла отклонения частицы путем многократного отражения на цепочке из изогнутых кристаллов (устройство 3 на рис. 2)

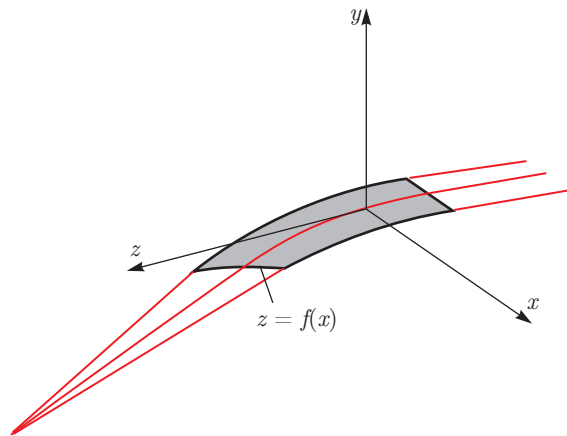


Рис. 6. Принцип фокусировки пучка с помощью устройства 4 (см. рис. 2). Фокусирующий эффект создается за счет разности углов поворота частиц на скошенном торце кристалла

изгиба кристалла основан на анизотропных свойствах кристаллических решеток. Из теории упругости известно, что изгиб кристаллической пластинки в продольном направлении приводит к деформациям в поперечном направлении, которые приобретают седловидную или бочкообразную форму в зависимости от анизотропных свойств и ориентации кристалла (см., например, [4], с. 85). В кристаллах кремния удобно использовать поперечные деформации, которые возникают при изгибе пластины с ориентацией (111), имеющей седловидную форму (см. рис. 4). В данном случае, изгибая кристалл по высоте на угол 100 мрад, можно обеспечить отклонение пучка на угол около 1 мрад в поперечном направлении, что является достаточным для вывода пучка. Этот принцип изгиба кристалла оказался плодотворным для создания мультикристаллов (устройство 3, рис. 2) и фокусирующих кристаллов (устройство 4, рис. 2). Этот дизайн был применен в даль-

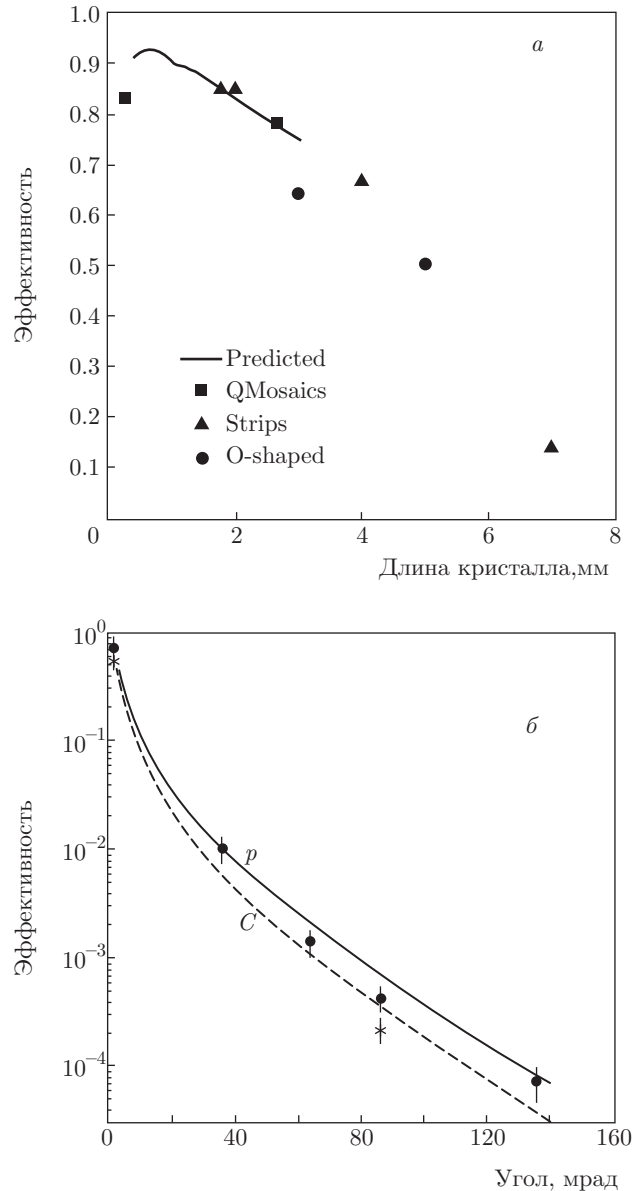


Рис. 7. а) Эффективность вывода пучка слабоизогнутым кристаллом в зависимости от длины кристалла (вдоль пучка). б) Эффективность вывода пучка в зависимости от угла изгиба кристалла

нейшем в прецизионных экспериментах с короткими кристаллами в ЦЕРН.

После успеха [9] международная научная программа UA9 стартовала в ЦЕРН с участием специалистов ИФВЭ, ПИЯФ и ОИЯИ по применению коротких кристаллов для эффективного управления пучками частиц. Основной целью этих исследований является кристаллическая коллимация пучка на Большом адронном коллайдере (БАК) для увеличения его светимости [14].

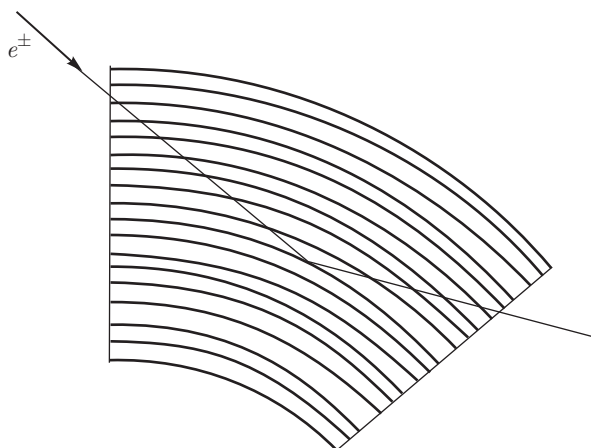


Рис. 8. Схема объемного отражения

Большое внимание в этих исследованиях уделяется повороту пучка с помощью объемного отражения частиц в кристаллах [15, 16]. Объемное отражение возникает в результате взаимодействия налетающей частицы с потенциалом изогнутой атомной решетки и происходит на небольшой длине в непосредственной близости от касательной к изогнутой атомной плоскости, что приводит к отклонению частицы в сторону, противоположную изгибу (рис. 8). Вероятность отражения очень высока и приближается к единице при энергиях больше 100 ГэВ. Отражение происходит в широкой зоне углов и является более эффективным, чем обычное каналирование. Хотя угол отражения ограничен величиной $1.5\theta_c$, эта проблема преодолевается с помощью устройства 3 (рис. 2) при кратном отражении. В работах [10, 11], выполненных на У-70, показано, что существуют реальные перспективы использования отражения для вывода и коллимации пучков из ускорителей, даже таких, как БАК, на энергию 7 ТэВ.

Дальнейшее развитие получили работы по фокусировке частиц кристаллами. Устройство 4 на рис. 2 было применено для отклонения расходящегося пучка протонов 50 ГэВ в опыте [17]. Пучок протонов расходимостью около 1 мрад (в 30 раз превышающей угол Линдхарда) отклонялся на угол 1.8 мрад с эффективностью около 15%. Таким образом, продемонстрированы возможности новой оптики пучков частиц на основе фокусирующего кристаллического элемента, перспективного для организации пучков вторичных частиц в тэраэлектронвольтовой области энергий. Кристаллическое устройство одновременно фокусирует и отклоняет пучок, его эквивалентное магнитное поле ~ 1000 Тл намного превосходит возможности обычных квадрупольей.

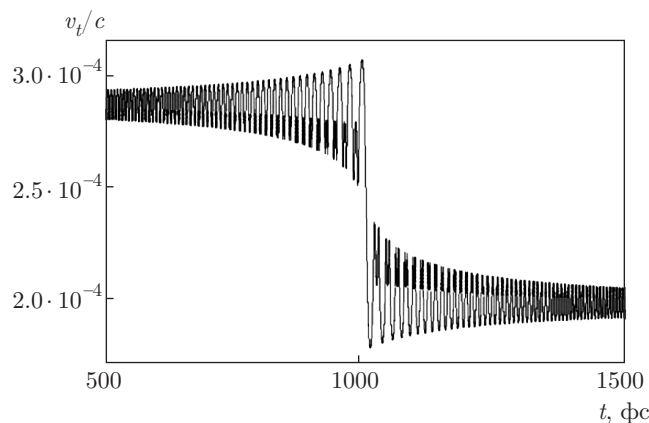


Рис. 9. Поведение скорости вблизи точки отражения

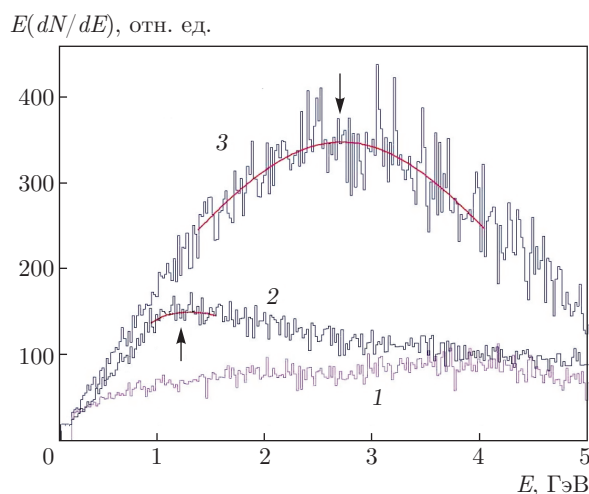


Рис. 10. Спектры излученной энергии в разных положениях кристаллического радиатора: 1 — разориентированный случай, 2 — плоскостная ориентация, 3 — осевая ориентация

3. НОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ, ОСНОВАННЫЕ НА КОРОТКИХ ИЗОГНУТЫХ КРИСТАЛЛАХ

В 2008 г. в работе [18] мы в первый раз обратили внимание, что короткие изогнутые кристаллы являются новым источником интенсивного излучения фотонов при прохождении через них заряженных частиц в режиме отражения. При объемном отражении частица пересекает ряд изогнутых кристаллографических плоскостей (рис. 8) и поведение ее поперечной скорости имеет характер аperiодических колебаний (рис. 9). На основе рассмотрения этого движения в [18] новый тип интенсивного когерентного излучения электронов и позитронов был предсказан для этих условий. Из-за высоко-

Таблица. Использование кристаллов в шести сеансах У-70 с 2012 по 2016 гг.

Сеанс У-70	2012-2	2013-1	2014-3	2015-1	2015-2	2016-1
Время работы, часы	792	744	600	840	756	408
Общее количество установок	10	8	9	10	9	6
Время работы с пучком от кристаллов, часы	744	864	240	744	732	408
Количество установок с пучком от кристаллов	3	3	3	4	3	4

го значения лоренц-фактора γ это излучение является более значительным для легких лептонов, чем для других частиц. В первом опыте [19] на ускорителе У-70 и в последующих опытах на СПС в ЦЕРН [20–22] показано, что излучение при объемном отражении совпадает с предсказанием теории. Замечательным свойством этого излучения является независимость от входного угла налетающей частицы (в пределах угла изгиба кристалла), при том что интенсивность его сравнима с излучением при канализировании [21]. Это дает возможность создать мощный источник излучения при движении электронов в цепочке изогнутых кристаллов (порядка 10 штук). Заметим, в прямых кристаллах рост интенсивности излучения быстро замедляется с длиной кристалла. Это посчитано в монографии В. Н. Байера с коллегами [23], с. 321 и многократно проверено в опытах [24]. В недавнем эксперименте на У-70 [25] показано, что интенсивность излучения в цепочке из шести хорошо ориентированных друг относительно друга изогнутых кристаллов линейно возрастает с ростом числа кристаллов (использовалось устройство типа 3, показанное на рис. 2). По результатам нескольких измерений с учетом ошибок при начальной энергии электронного пучка 7 ГэВ получено значение для потерь энергии $\Delta E_{pl} = (0.8 \pm 0.3)$ ГэВ для плоскостной ориентации и $\Delta E_{ax} = (2.0 \pm 0.3)$ ГэВ для ориентации вблизи оси. На рис. 10 показана излученная энергия $E dN/dE$ по спектрам фотонов.

Для плоскостного случая наиболее вероятная излученная энергия равна $W_{pl} = (1.2 \pm 0.2)$ ГэВ, а для осевого — $W_{ax} = (2.7 \pm 0.3)$ ГэВ. То есть излученная энергия по спектру фотонов близка к потерям энергии по спектру электронов. Это значит, что все электроны излучают достаточно интенсивно. Это резко отличается от измерений с прямыми кристаллами, где существует сильная зависимость от входного угла частицы. Разработанные многослойные кристал-

лические радиаторы имеют перспективу применения для коллимации пучков на больших электрон-позитронных коллайдерах [26], могут применяться в специальных электромагнитных калориметрах (например, в космосе), а также в качестве источника высокоэнергетических фотонов на электронных ускорителях.

4. ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПУЧКОВ, ФОРМИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАМИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИХ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ НА У-70

В результате многолетней практики было установлено, что кристаллы могут выводить пучки частиц с варьируемой интенсивностью от 10^6 до 10^{12} частиц в цикле без специального охлаждения в течение тысяч часов без видимого ухудшения эффективности. Этот метод вывода пучка является хорошим дополнением к медленному классическому выводу пучка с интенсивностью до 10^{13} частиц в импульсе. Он показывает надежную, воспроизводимую и предсказуемую работу. В таблице приведены данные использования кристаллов на У-70 в течение нескольких лет.

Пучки от кристаллов обладают малым эмиттансом, имеют удивительную по сравнению с обычными пучками пространственную стабильность, легко перестраиваются в широком диапазоне по интенсивности. Эти положительные особенности вывода пучка кристаллом из У-70 позволили недавно провести исследование калориметров крупной международной установки АТЛАС [27]. Свойство варьировать интенсивность полезно также при выводе пучка ионов из кольца, чтобы избежать фрагментации при взаимодействии ионного пучка с материалом коллиматоров [28].

Важным моментом является радиационная стойкость кристаллических дефлекторов пучка. По результатам длительного применения было установлено, что кристаллы выдерживают примерно $2 \cdot 10^{20}$ протонов на см^2 без нарушения каналирования. Проведенные в ИФВЭ исследования позволяют оптимистично смотреть на перспективы применения кристаллов на самых крупных ускорителях класса БАК [29]. Также нами показано, что кристаллы могут применяться в качестве источников жесткого гамма-излучения высокой спектральной плотности на электронных ускорителях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 17-12-01532).

ЛИТЕРАТУРА

1. A. F. Elishev et al., Phys. Lett. B **88**, 387 (1979); JETP Lett. **30**, 442 (1979).
2. V. Shiltsev et al., IPAC-2010-TUOAMH03, FERMI-LAB-CONF-10-127-APC.
3. W. Scandale et al., Phys. Lett. B **692**, 78 (2010).
4. V. M. Biryukov, Yu. A. Chesnokov, and V. I. Kotov, *Crystal Channeling and its Application at High-Energy Accelerators*, Springer, Berlin (1997).
5. Yu. A. Chesnokov, A. G. Afonin, V. T. Baranov et al., Nuovo Cim. C **34**, 407 (2011).
6. M. D. Bavizhev et al., IHEP Preprint 1989-77, Protvino (1989).
7. A. A. Arkhipenko, A. G. Afonin, V. T. Baranov et al., JETP Lett. **88**, 229 (2008).
8. A. G. Afonin et al., JETP Lett. **68**, 568 (1998).
9. A. G. Afonin et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 094802 (2001).
10. A. G. Afonin et al., Atomic Energy **106**, 409 (2009).
11. A. G. Afonin et al., JETP Lett. **93**, 187 (2011).
12. A. G. Afonin et al., JETP Lett. **96**, 424 (2012).
13. V. Biryukov, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B **53**, 202 (1991).
14. W. Scandale et al., Phys. Lett. B **758**, 129 (2016).
15. Y. M. Ivanov, A. A. Petrunin, V. V. Skorobogatov et al., Phys. Rev. Lett. **97**, 144801 (2006).
16. W. Scandale, D. Still, A. Carnera et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 154801 (2007).
17. A. G. Afonin, Yu. A. Chesnokov, P. N. Chirkov et al., JETP Lett. **104**, 12 (2016).
18. Yu. A. Chesnokov, V. I. Kotov, V. A. Maishev, and I. A. Yazynin, JINST **3**, P02005 (2008).
19. A. G. Afonin, V. T. Baranov, G. I. Britvich, A. P. Bugorskii, V. I. Kotov, A. E. Kushnirenko, V. A. Maishev, V. A. Pikalov, V. N. Chepegin, Yu. A. Chesnokov, I. A. Yazynin, Yu. M. Ivanov, and V. V. Skorobogatov, JETP Lett. **88**, 414 (2008).
20. W. Scandale, A. Vomiero, S. Baricordi, P. Dalpiaz, M. Fiorini, V. Guidi, A. Mazzolari, R. Milan, G. Della Mea, G. Ambrosi et al., Phys. Rev. A **79**, 012903 (2009).
21. D. Lietti, E. Bagli, S. Baricordi, A. Berra, D. Bolognini, P. N. Chirkov, P. Dalpiaz, G. Della Mea, D. De Salvador, S. Hasan, V. Guidi, V. A. Maishev, A. Mazzolari, M. Prest, E. Vallazza, D. Vincenzi, and I. A. Yazynin, Nucl. Instrum. Meth. B **283**, 84 (2012).
22. L. Bandiera, E. Bagli, V. Guidi, A. Mazzolari, A. Berra, D. Lietti, M. Prest, E. Vallazza, D. De Salvador, and V. Tikhomirov, Phys. Rev. Lett. **111**, 255502 (2013).
23. V. N. Baier, V. M. Katkov, and V. M. Strakhovenko, *Electromagnetic Processes at High Energies in Oriented Single Crystals*, World Sci., Singapore (1998).
24. T. Suwada, M. Satoh, K. Furukawa, T. Kamitani, T. Sugimura, K. Umemori, H. Okuno, Y. Endou, T. Haruna, R. Hamatsu, T. Sumiyoshi, K. Yoshida, A. P. Potylitsyn, I. S. Tropin, and R. Chehab, Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 073501 (2007).
25. А. Г. Афонин и др., Письма в ЖЭТФ **107**, 477 (2018).
26. A. Seryi, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **623**, 23 (2010).
27. A. Glatte et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **669**, 47 (2012).
28. A. G. Afonin et al., Instrum. Exp. Tech. **59**, 497 (2016).
29. W. Scandale et al., Phys. Lett. B **758**, 129 (2016).