

А. Д. Коваленко, А. М. Таратин

Эксперимент UA9 по коллимации пучка SPS изогнутыми кристаллами

Большой адронный коллайдер (LHC) действует уже три года. Получено много впечатляющих физических результатов. В течение этого времени система коллимации LHC успешно работала, обеспечивая поглощение образующегося гало циркулирующего пучка и предохраняя от повреждений узлы ускорителя. Небольшая твердотельная мишень используется в качестве первичного коллиматора для увеличения заброса частиц на массивный вторичный коллиматор-поглотитель. Однако признано, что в существующем виде система коллимации не сможет обеспечивать необходимый уровень локализации гало пучка при планируемом увеличении светимости LHC.

Требуемая эффективность системы коллимации может быть достигнута при использовании кристаллического дефлектора в качестве первичного коллиматора

вместо твердотельной мишени. Обычная твердотельная мишень отклоняет частицы за счет кулоновского рассеяния. При этом максимум в распределении частиц остается на краю поглотителя (рис. 1, *a*). В отличие от этого изогнутый кристалл отклоняет частицы в режиме каналирования или объемного отражения, направляя их вглубь поглотителя (рис. 1, *b*). Это существенно уменьшает вероятность их рассеяния из поглотителя обратно в циркулирующий пучок.

Возможность применения изогнутых кристаллов для коллимации и вывода протонов и ядер из гало пучков ускорителей и коллайдеров впервые рассматривалась методом моделирования в работах [1, 2]. Кристаллический дефлектор в качестве первичного коллиматора исследовался в течение последних лет на циркулирующем пучке SPS в рамках эксперимента UA9

A. D. Kovalenko, A. M. Taratin

Experiment UA9 on the SPS Beam Collimation by Bent Crystals

The LHC collider has already been in action for three years. Many impressive physical results have been obtained. During this time the collider collimation system has been working successfully, ensuring the absorption of a growing halo of the circulating beam and protecting the accelerator components from damage. A small solid target is used as a primary collimator to increase the impact parameters of halo particles with the large secondary collimator-absorber. However, it was accepted that the collimation system with its present status will not be able to ensure the necessary level of the halo beam localization with the increased luminosity planned for the LHC.

The required efficiency of the collimation system may be achieved using a crystal deflector as a primary collimator instead of a solid target. A usual solid target deflects particles due to the Coulomb scattering. Therefore, the maximum of the halo particle distribution stays at the absorber edge (Fig. 1, *a*). On the contrary, a bent crystal deflects halo

particles due to channeling or volume reflection directing them deeply onto the absorber (Fig. 1, *b*). This should significantly decrease the possibility of particle scattering from the absorber back to the circulating beam.

An opportunity to use bent crystals for the collimation and extraction of protons and nuclei from the beam halo of the accelerators and colliders was considered by simulation for the first time in [1, 2]. The use of a crystal deflector as a primary collimator was studied in the UA9 experiment at the circulating beam of the SPS during the last years [3–6]. The JINR team actively participated in the UA9 experiment together with the teams from IHEP, PNPI, INFN, CERN, and the Imperial College (London).

The silicon crystals used in the experiment were 2 mm long with bend angles of 140–170 μrad . The crystal bend along 2 mm has been fulfilled due to the curvature produced along the crystal plate width (anticlastic curvature) or along its thickness (quasi-mosaic curvature) when the plate was

[3–6]. Сотрудники ЛФВЭ ОИЯИ активно участвовали в этом эксперименте совместно с коллегами из ИФВЭ, ПИЯФ, INFN, ЦЕРН и Имперского колледжа (Лондон).

В эксперименте использовались кристаллы кремния с длиной по пучку около 2 мм и углами изгиба 140–170 мкрад. Изгиб на длине 2 мм создавался за счет кривизны, возникающей вдоль ширины (anticlastic curvature) или толщины (quasi-mosaic curvature) пластины при изгибе вдоль ее длины. Перед установкой в камеру SPS изогнутые кристаллы тестировались на выведенном пучке протонов с импульсом 400 ГэВ/с. Пять микростриповых кремниевых детекторов, два из которых установлены перед кристаллом и три после,

использовались для измерения углов отклонения частиц в режиме каналирования и объемного отражения с угловым разрешением около 5 мкрад.

На рис. 2 показана упрощенная схема эксперимента по коллимации пучка SPS с использованием изогнутого кристалла. Первичный кристаллический коллиматор С установлен перед фокусирующим магнитом QF1. Вторичный коллиматор-поглотитель TAL — перед фокусирующим магнитом QF2. Двухсторонний коллиматор COL используется для нахождения положения орбиты и выстраивания всех подвижных элементов. Пиксельный детектор MED позволяет наблюдать отклоненный кристаллом пучок. Мишень SC в области с высо-

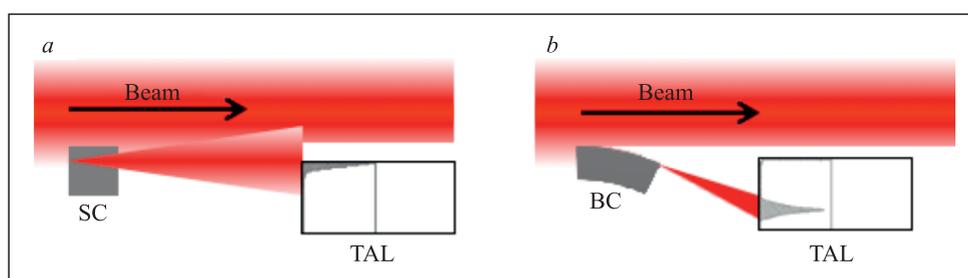


Рис. 1. Схема коллимации гало пучка коллайдера: *a*) с использованием твердотельной мишени-рассеивателя SC в качестве первичного коллиматора; *b*) с использованием изогнутого кристалла BC, отклоняющего и направляющего частицы гало вглубь поглотителя TAL

Fig. 1. *a*) Collimation scheme using a solid state primary collimator-scatterer (SC). *b*) Collimation scheme with a bent crystal (BC) as a primary collimator. Halo particles are deflected and directed onto the absorber (TAL — Target Aperture Limitation) far from its edge

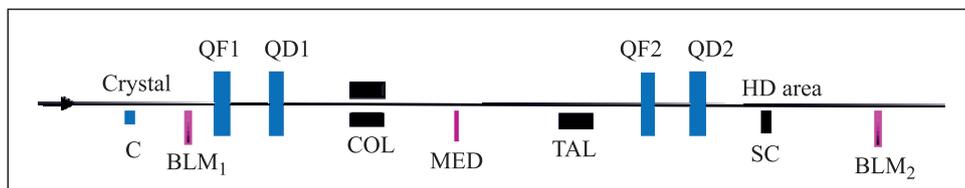


Рис. 2. Схема эксперимента UA9

Fig. 2. The layout of the UA9 experiment

bent along its length. The bent crystals were tested before the installation in the SPS using the beam of 400 GeV/c protons extracted from the SPS. Five microstrip silicon detectors, two upstream and three downstream the crystal, were used to measure the deflection angles of particles in the regimes of channeling and volume reflection with an angular resolution of about 5 μ rad.

Figure 2 shows the schematic layout of the experiment on the SPS beam collimation using a bent crystal. The crystal primary collimator C is located upstream the focusing quadrupole (QF1). The TAL acting as a secondary collimator-absorber is upstream the quadrupole (QF2). The two-sided collimator (COL) is used to find the orbit position and align all movable elements. The pixel detector MED

is used to observe the beam deflected by the crystal. The target SC in a high dispersion HD area is used to detect off-momentum particles produced in the collimation process. BLM₁ and BLM₂ are the beam loss monitors.

The goniometers produced at CERN and IHEP were used for the crystal orientation relative to the SPS circulating beam. The IHEP goniometer ensured the better orientation accuracy of $\pm 10 \mu$ rad. The tungsten bar 60 cm long was used as a secondary collimator-absorber (TAL). The primary and secondary collimators were installed at the SPS azimuths with large values of the horizontal beta function of the magnetic structure of the synchrotron. The relative horizontal betatron phase advance between them is close to 90 degrees. Protons or Pb nuclei were accelerated

кой дисперсией HD используется для детектирования частиц со значительными отклонениями импульса от равновесного, образовавшихся в процессе коллимации. BLM_1 и BLM_2 — мониторы потерь пучка.

Для ориентирования кристаллов относительно гало циркулирующего пучка SPS использовались гониометры, созданные в ЦЕРН и ИФВЭ. Гониометр ИФВЭ обеспечивал лучшую точность ориентирования ± 10 мкрад. В качестве вторичного коллиматора-поглотителя использовался блок из вольфрама длиной 60 см (TAL). Первичный кристаллический коллиматор и поглотитель располагались на азимутах с большим значением горизонтальной бета-функции магнитной структуры синхротрона. Фазовый сдвиг между ними составлял около 90° . Протоны или ядра свинца ускорялись в SPS до 120 или 270 ГэВ/с на единицу заряда. Скорость роста гало ускоренного пучка и его время жизни определялись рассеянием на остаточном газе. Скорость роста гало могла также регулироваться за счет возбуждения поперечных колебаний частиц шумами, генерируемыми внешним источником высокочастотного напряжения на инфлекторных пластинах.

В начале каждого сеанса определялось положение орбиты пучка с помощью двухстороннего коллиматора (COL). Величина раствора коллиматора задавала также

значение огибающей пучка. Затем определялись положение кристалла, поглотителя и других элементов относительно орбиты, с фиксацией их на краю тени коллиматора COL. Для измерений один из кристаллов, выполняющий роль первичного коллиматора, придвигался немного к орбите, а поглотитель, наоборот, отодвигался, чтобы между ними был некоторый зазор. Этот зазор дает возможность частицам, рассеянным в кристалле, миновать поглотитель и попасть на кристалл повторно на последующих оборотах, чтобы иметь дополнительный шанс быть отклоненными в режиме каналирования.

Для поиска режима каналирования производилось сканирование горизонтальных углов ориентации кристалла с помощью гониометра. В ориентированном кристалле, когда кристаллографические плоскости на входе в кристалл становятся параллельны огибающей пучка, большая часть частиц гало, попадающих на кристалл, захватывается в режим каналирования. Траектории каналированных частиц осциллируют между соседними плоскостями кристалла. При этом хорошо каналированные частицы, которые не подходят близко к стенкам канала, не испытывают ядерных взаимодействий в кристалле. Таким образом, потери частиц в ориентированном кристалле резко уменьшаются.

in the SPS up to 120 or 270 GeV/c per charge. The rate of growing accelerator beam halo and the beam lifetime were governed by the particle scattering with the residual gas. The halo growing rate may also be regulated using the excitation of the transverse oscillations of particles by the noise generated by the external RF voltage source on the inflector plates.

At the beginning of each run, the position of the beam orbit was found using the two-sided collimator (COL). The COL half gap determined the reference beam envelope. Then the positions of the crystal and absorber as well as other movable elements were determined by fixing their positions at the COL shadow edge. For the measurements, one of the crystals, as a primary collimator, was moved closer to the beam and the TAL moved further away from the orbit to produce a gap between them. The gap gives a possibility for particles scattered by the crystal to pass by the absorber and to hit the crystal repeatedly at the subsequent turns to have an additional chance to be deflected in the channeling regime.

The horizontal angles of the crystal orientation were scanned using the goniometer to find channeling regime. In the oriented crystal, when the crystallographic planes

at the crystal entrance become parallel to the beam envelope, a larger part of the halo particles that hit the crystal are captured into the channeling regime. The trajectories of channeled particles oscillate between the neighboring crystal planes. Well-channeled particles, which do not approach closely the channel walls, do not have nuclear interactions in the crystal. So, the particle losses decrease strongly in the oriented crystal. This property was used to orient the crystal primary collimator. The secondary particles generated due to nuclear interactions of the beam halo particles in the crystal were detected by the beam loss monitors (BLM). In our experiment, the scintillation telescopes possessing a better sensitivity were used as the BLMs together with the ionization detectors developed for the LHC. Such BLMs were installed near the beam pipe behind the crystal collimator (BLM_1 in Fig. 2).

The crystal collimation experiments were performed using the SPS beams of both protons and Pb nuclei. The pixel detector MEDIPIX with 256×256 square pixels was used to detect the particles deflected by the crystal. The pixel size is $55 \mu\text{m}$. The detector was installed inside the box with thin walls (Roman pot), which can move along the radial direction, approaching the beam orbit (MED in

Именно это обстоятельство использовалось нами для ориентирования первичного кристаллического коллиматора. Вторичные частицы, генерируемые в ядерных взаимодействиях частиц гало циркулирующего пучка в кристалле, детектировались мониторами потерь пучка. В нашем эксперименте наряду с ионизационными детекторами, разработанными для ЛНС, в качестве мониторов потерь использовались телескопы сцинтилляционных счетчиков, имеющие большую чувствительность. Такие мониторы потерь были установлены вблизи камеры ускорителя за кристаллическим коллиматором (BLM_1 на рис. 2).

Эксперименты по коллимации проводились как на пучке протонов, так и на пучке ядер свинца. Для детектирования отклоненного кристаллом пучка использовался пиксельный детектор MEDIPIX, имеющий 256×256 квадратных пикселей размером 55 мкм. Пиксельный детектор был установлен внутри тонкостенного бокса (Roman pot), который мог перемещаться в горизонтальном направлении, приближаясь к орбите циркулирующего пучка (MED на рис. 2). На рис. 3 по-

казано отклоненное кристаллом гало пучка протонов 120 ГэВ/с и его горизонтальный профиль. Видно, что отклоненная кристаллом фракция гало пучка далеко отстоит от циркулирующего пучка. Эффективность отклонения частиц гало кристаллом на полный угол изгиба (эффективность каналирования), согласно измерениям, достигала 85%.

Утечки системы коллимации формируются в основном за счет частиц, теряющих заметную долю своего импульса при взаимодействиях с коллиматорами. На азимутах с высокой дисперсией такие частицы могут покинуть апертуру ускорителя на одном обороте. Для измерений утечек коллимации в нашем эксперименте в первой за коллиматорами области с высокой дисперсией (HD) использовалась перемещаемая мишень (SC), которая устанавливалась на периферии камеры в тени поглотителя для обнаружения частиц с большими отклонениями импульса от равновесного значения. Вторичные частицы, генерируемые в этой мишени, детектировались монитором потерь BLM_2 (рис. 2).

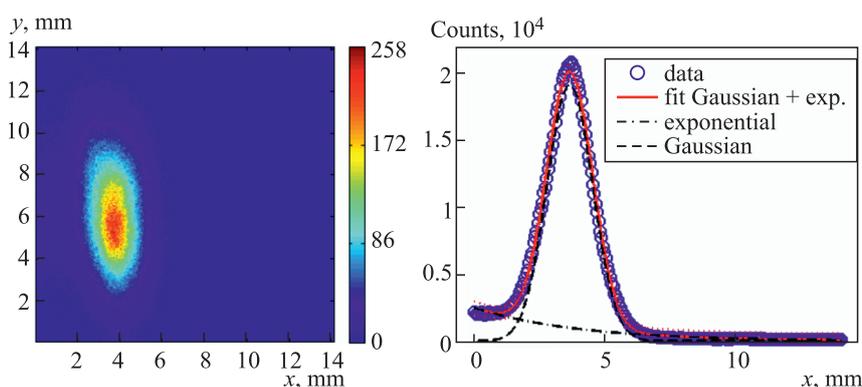


Рис. 3. Изображение пучка, отклоненного кристаллом (слева), и его горизонтальная проекция (справа), полученные с пиксельным детектором MEDIPIX

Fig. 3. The image of the beam deflected with the crystal (left) and its horizontal projection (right) obtained with the MEDIPIX detector

Fig. 2). Figure 3 shows the image of the beam halo deflected by the crystal and its horizontal projection obtained with the MEDIPIX detector in the case of 120 GeV/c protons. It is seen that the halo fraction deflected by the crystal is far from the circulating beam. The deflection efficiency of halo particles by the crystal bend angle (channeling efficiency) reached 85% according to the measurements.

The leakage of the collimation system is mainly formed by the particles losing a sufficiently large part of their momentum in the interactions with the collimators. At the azimuths with high dispersion such particles can exceed the accelerator aperture at one turn. The movable target (SC) was installed in the first high dispersion (HD) area behind the collimation system at the beam periphery in the shadow of the absorber to measure the collimation leakage detecting particles with large deviations from the equilibrium momentum. The secondary particles generated in the SC target were detected by the monitor BLM_2 (Fig. 2).

Figure 4 shows the dependence of the beam loss value in the crystal (a) and in the HD target (b) placed at 35 mm

from the orbit on the crystal orientation angle. The experiment was performed with the SPS beam of Pb nuclei accelerated up to 270 GeV/c per charge. The particle losses in the crystal for its channeling orientation (the left deep minimum in Fig. 4, a) decrease more than 7 times. The losses are mainly formed by particles uncaptured into the channeling regime. This fraction also generates the particles with large momentum losses, which can interact with the HD target. The beam loss reduction on the right from the channeling minimum occurs due to volume reflection of particles in the crystal. The loss dependencies in the crystal and in the HD target are nearly identical because the contribution of the secondary collimator is small. Practically all Pb nuclei that hit the absorber have interactions with its nuclei. A strong decrease of the beam losses in the HD target at the channeling crystal orientation is the evidence of the population reduction of the far longitudinal halo and consequently the evidence of a strong reduction of the collimation leakage.

The experiments on the crystal collimation of the SPS beam showed that the crystal alignment could be obtained

Рис. 4 показывает зависимость от угла ориентации кристалла для величины потерь пучка в кристалле (*a*) и в HD-мишени (*b*), установленной на расстоянии 35 мм от орбиты. Эксперимент выполнен на пучке ядер свинца, ускоренных в SPS до 270 ГэВ/с на единицу заряда. Потери частиц в кристалле при каналировании (левый глубокий минимум на рис. 4, *a*) уменьшаются более чем в 7 раз. Потери формируются в основном за счет частиц, не захваченных в каналирование. Эта фракция генерирует также частицы с большими потерями импульса, которые могут взаимодействовать с мишенью в HD-области. Снижение потерь пучка в области углов ориентации справа от минимума каналирования обусловлено объемным отражением частиц в кристалле. Наблюдается практически полная идентичность зависимостей потерь в кристалле и HD-мишени, так как вклад вторичного коллиматора мал: практически все

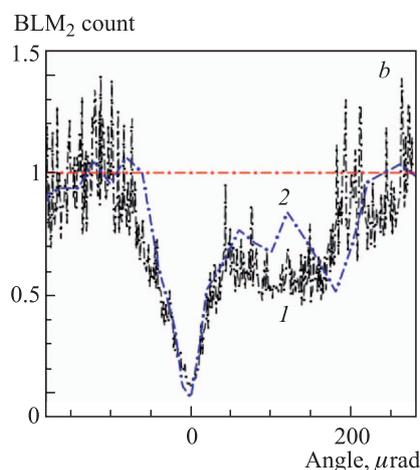
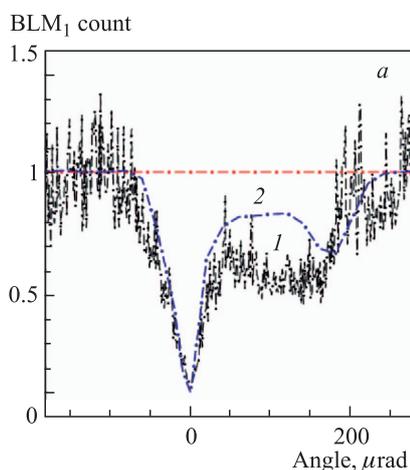


Рис. 4. Кристаллическая коллимация пучка SPS для ядер свинца с импульсом 270 ГэВ/с на единицу заряда. Кривые 1 — экспериментальные зависимости потерь пучка в кристалле (*a*) и в HD-мишени (*b*) от угла ориентации кристалла, нормированные на значение потерь в неориентированном кристалле. Кривые 2 — результаты моделирования

ядра свинца, попадая в поглотитель, испытывают взаимодействие с его ядрами. Значительное уменьшение потерь в HD-мишени при ориентации каналирования свидетельствует об уменьшении заселенности далекого продольного гало и, следовательно, о значительном уменьшении утечек коллимации.

Исследования кристаллической коллимации на SPS показали, что ориентирование кристалла для отклонения частиц гало в режиме каналирования выполняется быстро и хорошо воспроизводится. Использование кристалла в качестве первичного коллиматора позволяет значительно уменьшить утечки коллимации в оптимальных условиях более чем на порядок. Таким образом, кристаллическая коллимация гало пучка LHC может стать важным вкладом в решение проблемы повышения светимости комплекса.

Fig. 4. Crystal collimation of the SPS beam of Pb ions with 270 GeV/c per charge. Curves (1) are the dependencies of beam losses observed in the crystal (*a*) and in the HD target (*b*) on the angular position of the crystal normalized to its value for the amorphous orientation of the crystal. Curves (2) are the simulation results

quickly and is well reproducible to achieve deflection of halo particles due to channeling. The use of a bent crystal as a primary collimator allows one to decrease strongly the collimation leakage, more than 10 times in the optimum conditions. Thus, the crystal assisted collimation of the LHC beam halo has a good chance to be successful that will be an important contribution to solving the problem of the collider luminosity increase.

Список литературы / References

1. Taratin A. M., Vorobiev S. A., Bavizhev M. D., Yazygin I. A. // Nucl. Instr. Meth. B. 1991. V. 58. P. 103.
2. Kovalenko A. D., Taratin A. M., Tsyganov E. N. JINR Preprint E1-92-8. Dubna, 1992.
3. Scandale W. et al. // Phys. Lett. B. 2010. V. 692. P. 78.
4. Scandale W. et al. // Ibid. 2011. V. 703. P. 547.
5. Scandale W. et al. // Ibid. 2012. V. 714. P. 231.
6. Коваленко А. Д., Таратин А. М. // Новости ОИЯИ. 2009. № 1. С. 13. / Kovalenko A. D., Taratin A. M. // JINR News. 2009. No. 1. P. 13.