

# Анализ кристаллических дефлекторов на основе моделирования ориентационных эффектов заряженных частиц

email: ivanova\_py@pnpi.nrcki.ru

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

Иванова П.Ю., Иванов Ю.М.



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Петербургский институт ядерной физики  
им. Б. П. Константинова

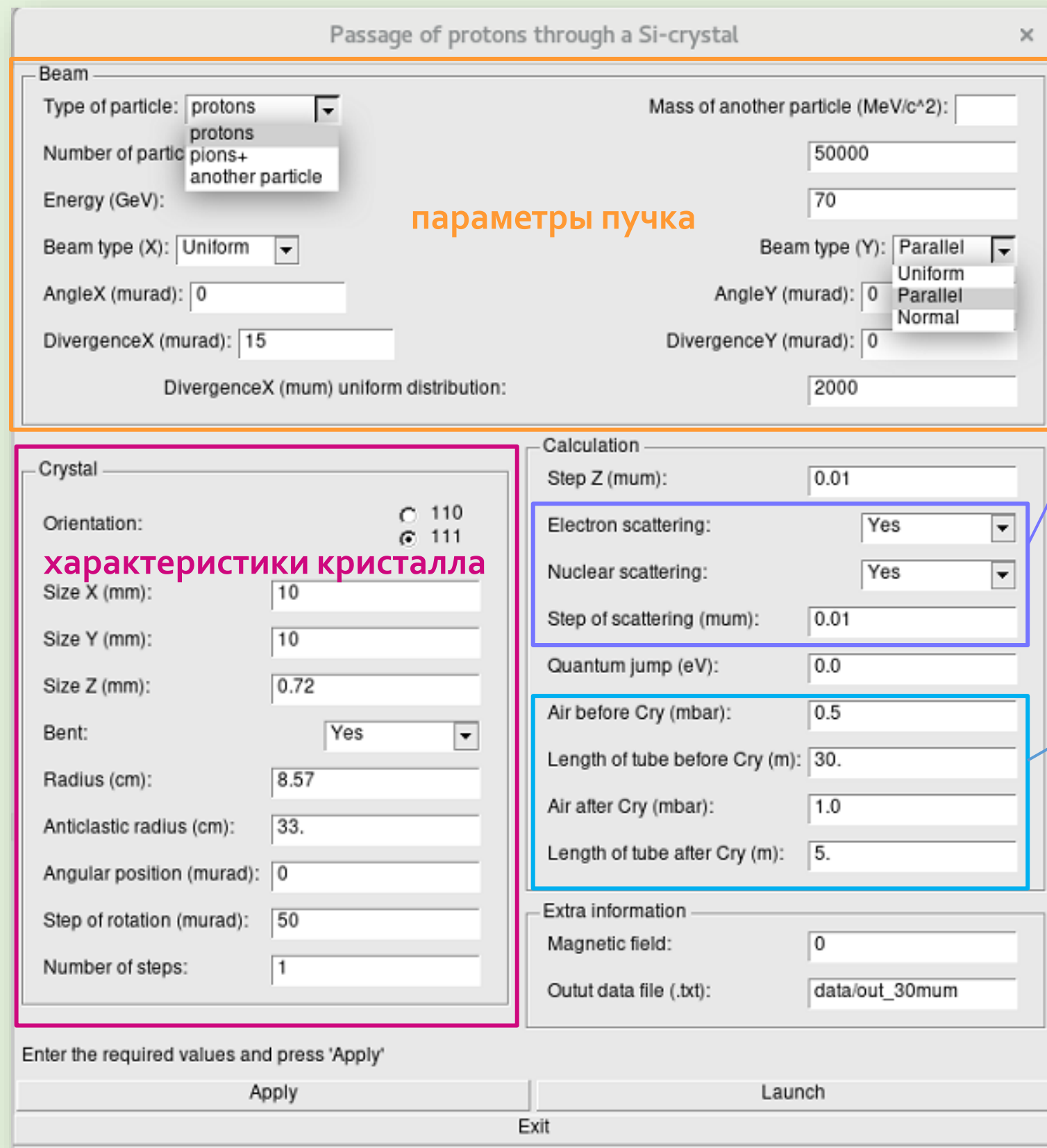
## Введение

За последние двадцать лет изогнутые ориентированные кристаллы превратились в инженерный инструмент, позволяющий управлять пучками заряженных частиц гига- и тераэлектронвольтных энергий с высокой точностью и эффективностью [1, 2]. За счет сверхсильного электрического поля кристаллической решетки частицы захватываются в пространство между плоскостями и следуют вдоль них – плоскостное каналирование.

В работе представлен анализ данных, экспериментальных и полученных при моделировании. Расчетная эффективность отклонения и длина деканалирования согласуются с измеренными значениями в пределах погрешностей. Инструмент применен для протонов с энергией 1 ГэВ (синхроциклотрон СЦ-1000 ПИЯФ [3, 4]), для протонов с энергией 70 ГэВ (синхротрон У-70 ИФЭ [5]), для положительных пионов с энергией 180 ГэВ (ЦЕРН [6]), а также для анализа различий торцевого и объемного захвата частиц. В программе реализована возможность отслеживания каждой частицы и контроля вклада различных физических механизмов.

## Программа моделирования

Разработка кристаллических дефлекторов для управления пучками заряженных частиц требует оптимизации параметров изогнутых монокристаллов (длины, радиуса изгиба, ориентации). Для решения этой задачи создан программный инструмент, написанный на C++ с использованием пакета ROOT, моделирующий траектории частиц при прохождении заряженных частиц через кристалл с учетом многократного кулоновского рассеяния на ядрах и электронах методом Монте-Карло [7], благодаря чему можно наблюдать такие ориентационные эффекты, как каналирование, деканалирование, квазиканалирование, объемное отражение, объемный захват.



Интерфейс программы моделирования

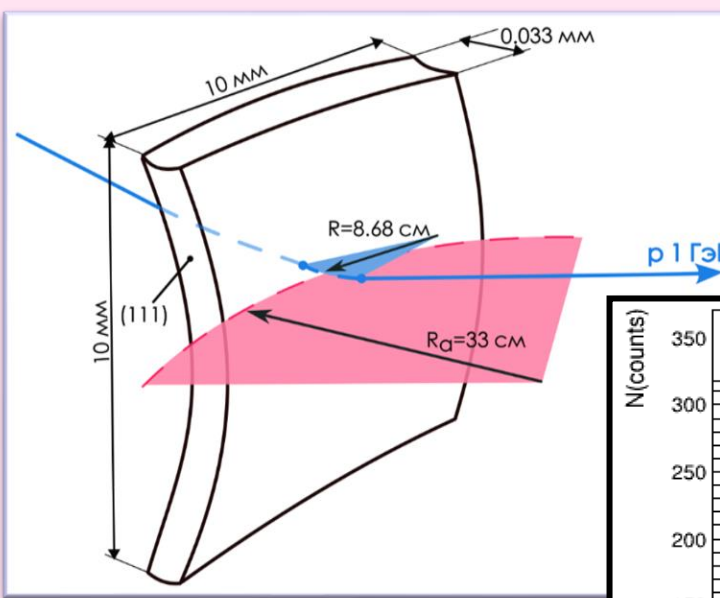
рассеяние на электронах и ядрах

поправка входного угла и выходного с учетом воздуха в канале

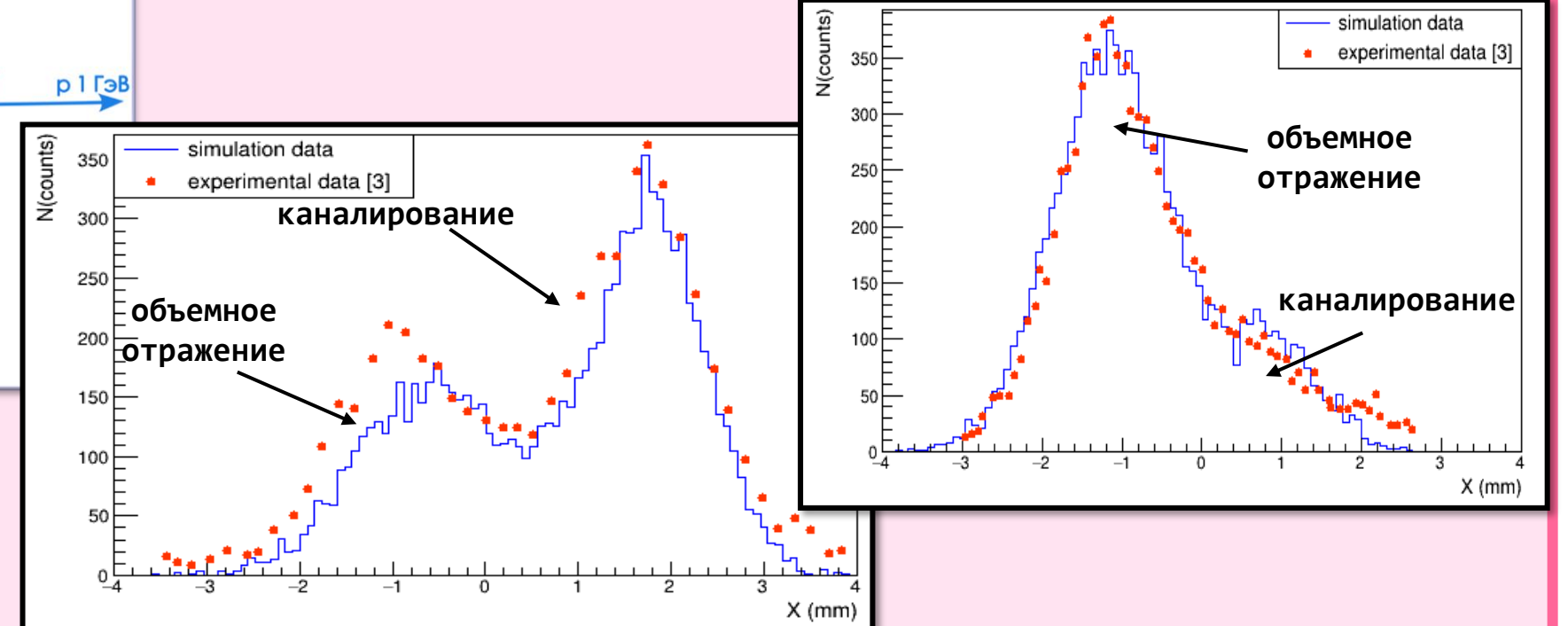
## Средние энергии

Исследование ориентационных эффектов заряженных частиц в изогнутых кристаллах для энергий порядка 1 ГэВ и ниже представляет особый интерес, связанный с перспективой использования кристаллов на медицинских пучках.

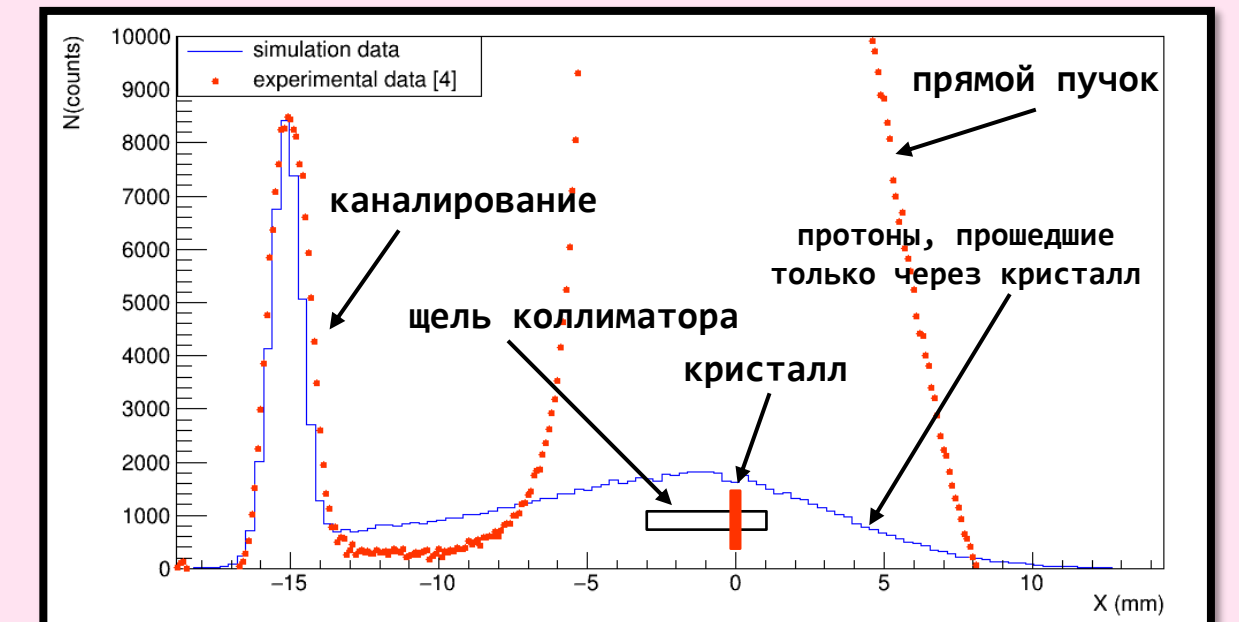
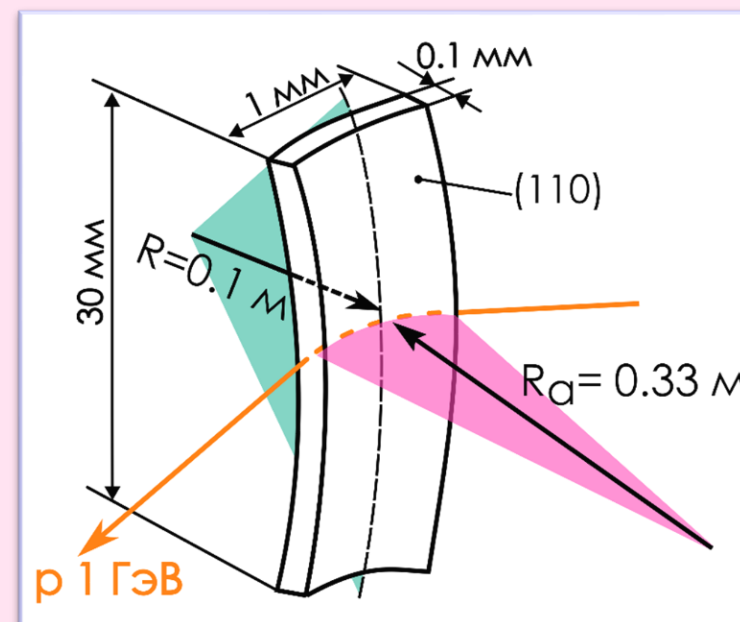
Для анализа были выбраны два ключевых эксперимента, выполненных на синхроциклотроне ПИЯФ с протонами энергией 1 ГэВ, в которых использованы различные способы изгиба кристалла.



Первый эксперимент [3] (2006 г.): наблюдение объемного отражения протонов с энергией 1 ГэВ в кристалле кремния с упруго-квазимозаичным изгибом.

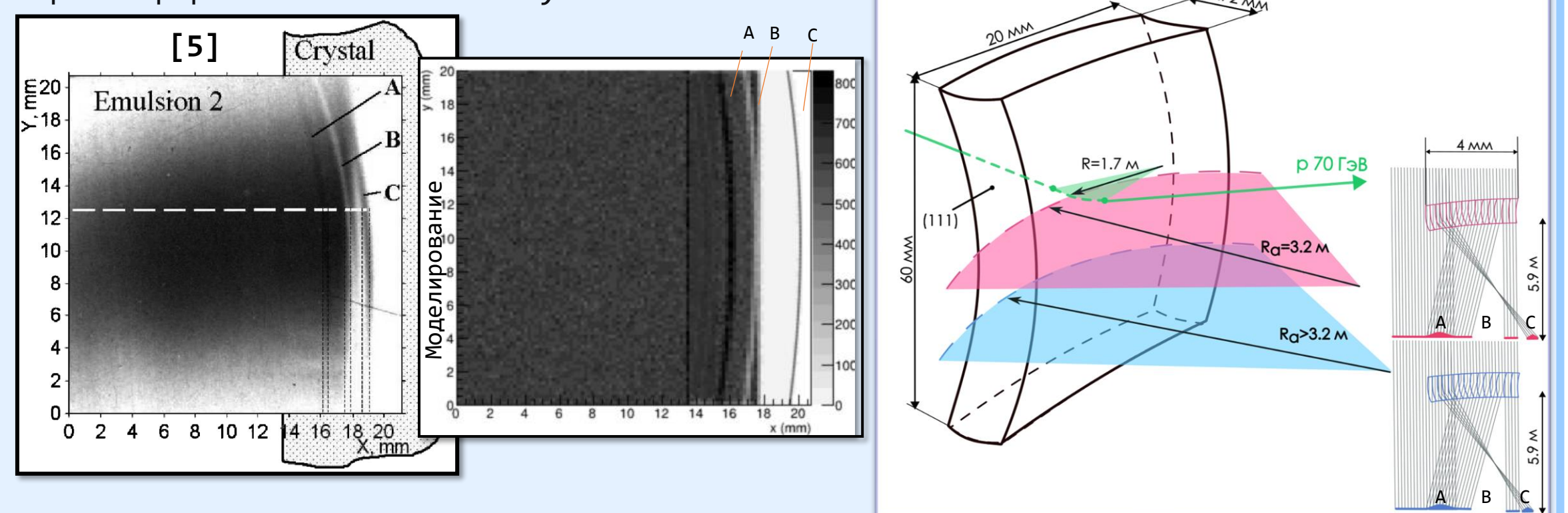


Второй эксперимент [4] (2023 г.): высокоэффективное отклонение протонного пучка с энергией 1 ГэВ с использованием кристалла с антикластическим изгибом.

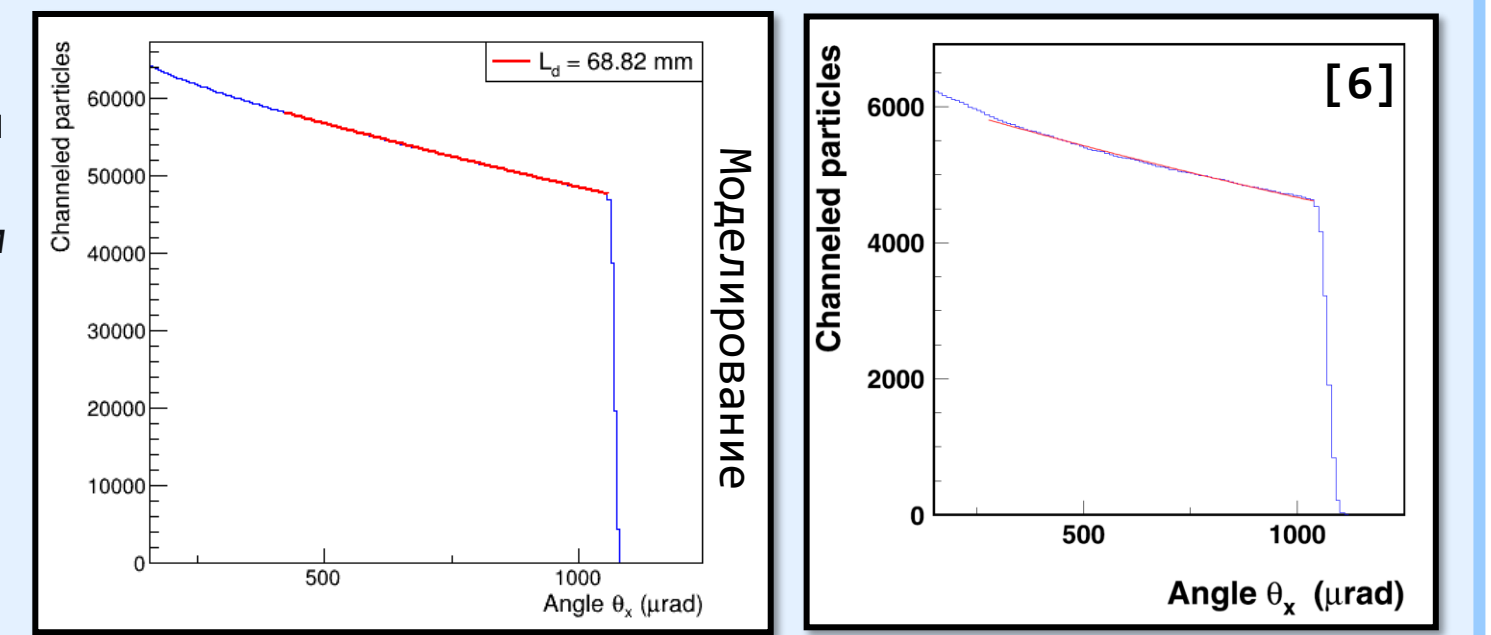
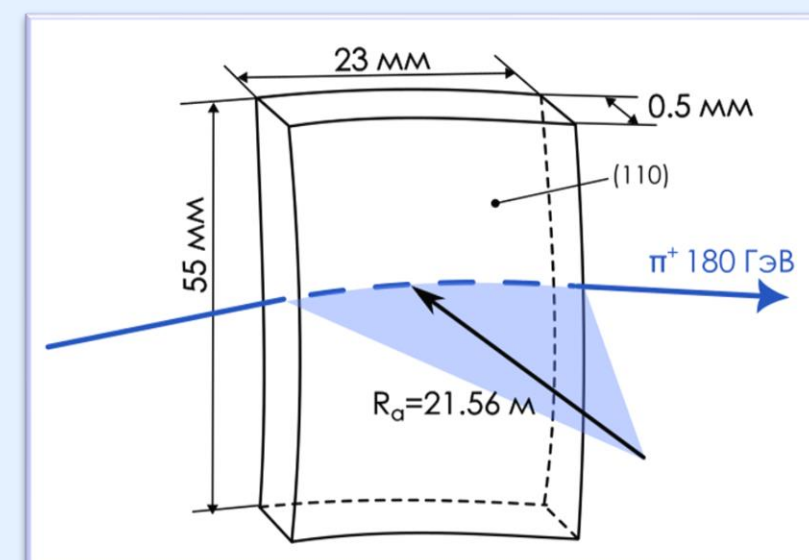


## Высокие энергии

Эксперимент [5] (2006 г.) выполнен на пучке протонов с энергией 70 ГэВ в кристалле кремния с упруго-квазимозаичным изгибом. Удалось объяснить наблюдаемый на эмульсионных пластинках изгиб треков частиц по высоте, который был связан с изменением радиуса антикластического изгиба кристалла. Моделирование позволило воспроизвести форму зарегистрированных линий на эмульсиях.



Эксперимент [6] (2019 г.): деканалирование  $\pi^+$  с энергией 180 ГэВ в длинном (23 мм) кристалле с антикластическим изгибом.



	$\theta_{def}$ , мкрад	Эффективность, %	$L_d$ , мм
эксперимент	1067	55.3±0.8	71.3±0.7
моделирование	1067	59.7	68.8

## Заключение

В выполненной работе представлены результаты моделирования движения частиц с энергией от 1 ГэВ до 180 ГэВ в кристаллах с различными механизмами изгиба. Проведена количественная оценка результатов для экспериментов, выполненных в ПИЯФ. Небольшое расхождение формы пика объемно отраженных частиц для кристалла толщиной 30 мкм связано с неучтенным вкладом объемного отражения от косых плоскостей.

С помощью программы показано, что форма линий, зарегистрированных на эмульсиях, облученных протонами с энергией 70 ГэВ, связана с изменением радиуса антикластического изгиба по высоте кристалла. Моделирование процесса каналирования и деканалирования 180 ГэВ пионов в изогнутом кристалле с учетом многократного кулоновского рассеяния на ядрах и электронах дало результат, согласующийся с экспериментальными данными.

## Список использованной литературы

- V.M. Biryukov, Y.A. Chesnokov, V.I. Kotov, Crystal channeling and its application at high-energy accelerators, Springer Science & Business Media, 2013
- UA9 Collaboration, Feasibility of crystal-assisted collimation in the CERN accelerator complex, International Journal of Modern Physics A, 37 (13), 2022
- Ю. М. Иванов и др., Объемное отражение протонов с энергией 1 ГэВ изогнутым кристаллом кремния, Письма в ЖЭТФ, 84 (7): 445-450, 2006
- Д. А. Амерканов и др. Эксперимент по высокоэффективному отклонению протонного пучка с энергией 1 ГэВ изогнутым кристаллом на синхроциклотроне ПИЯФ, Письма в ЖЭТФ 118: 551-556, 2023
- Yu.M. Ivanov et al., Volume Reflection of a Proton Beam in a Bent Crystal, Physical Review Letters 97(14): 144801(4), 2006
- W. Scandale et al., Dechanneling of high energy particles in a long bent crystal, Nuclear Inst. and Methods in Phys. R. B, 438: 38-41, 2019
- П.Ю. Иванова. Моделирование эксперимента по высокоэффективному отклонению протонов с энергией 1 ГэВ изогнутым кристаллом. СПбГУ: магистр. дисс., 2024