



Исследование каналирования 1 ГэВ протонов в изогнутых кристаллах кремния на синхроциклотроне ПИЯФ

Ю. М. Иванов

Сессия Ученого Совета ОФВЭ ПИЯФ, 24 декабря 2024

Мотивация

Цель работы - исследование возможностей кристаллооптики заряженных частиц в области промежуточных энергий ≤ 1 ГэВ. Стимулирована успешными применениями кристаллооптических методов на ускорителях высоких энергий (SPS, LHC в CERN)

<https://cds.cern.ch/journal/CERNBulletin/2015/49/News%20Articles/2105080>

<https://accelconf.web.cern.ch/ipac2019/papers/wepmp028.pdf>

<https://cds.cern.ch/record/2815331/files/document.pdf>

Первые результаты

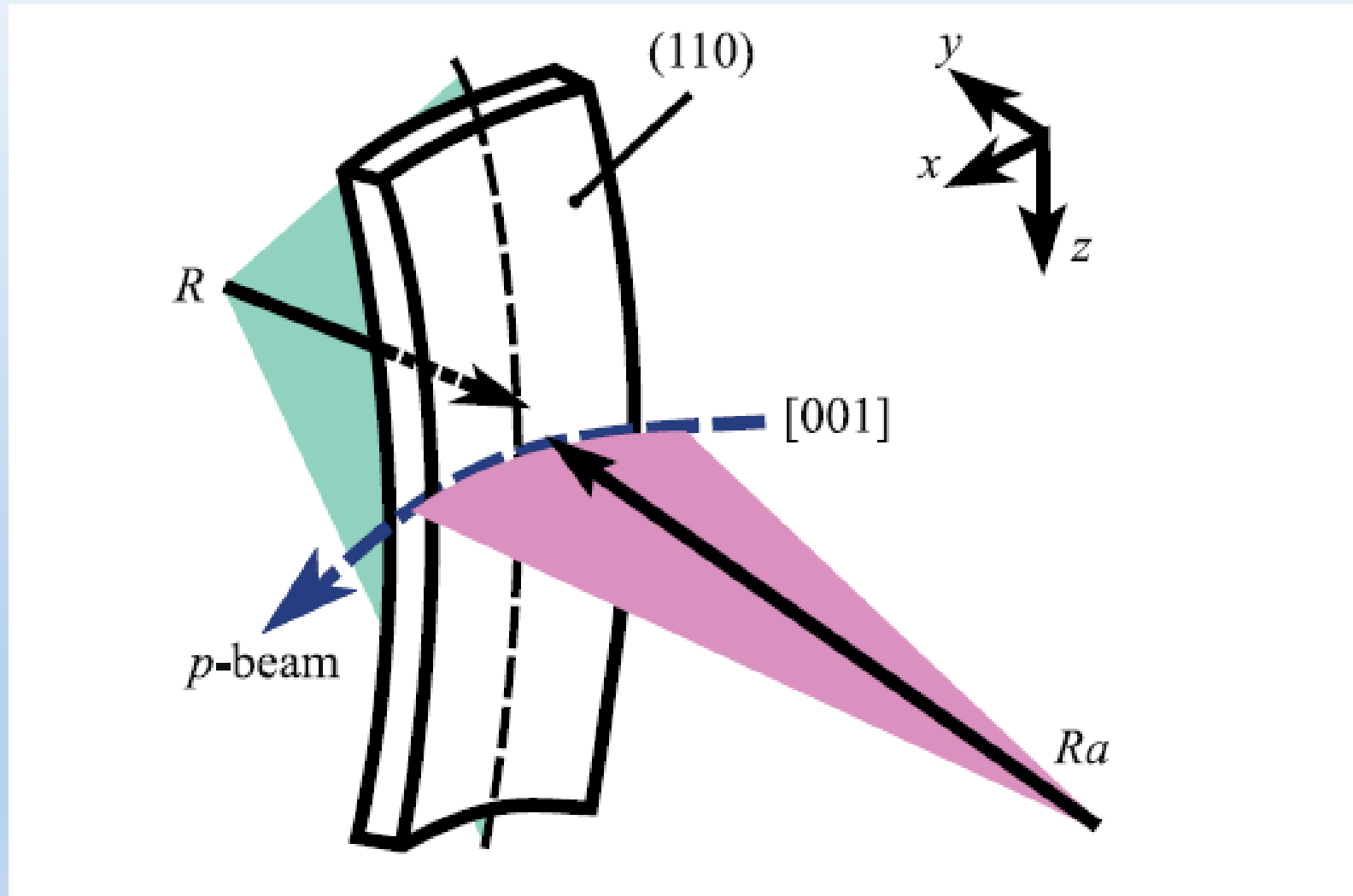
Длина деканалирования в кристаллах уменьшается с понижением энергии частиц. Это существенно влияет на выбор рабочих размеров кристаллов и схем изгиба.

Нами разработана технология и изготовлена серия кристаллов длиной в направлении пучка 1 миллиметр и изгибом более 3 миллирадиан.

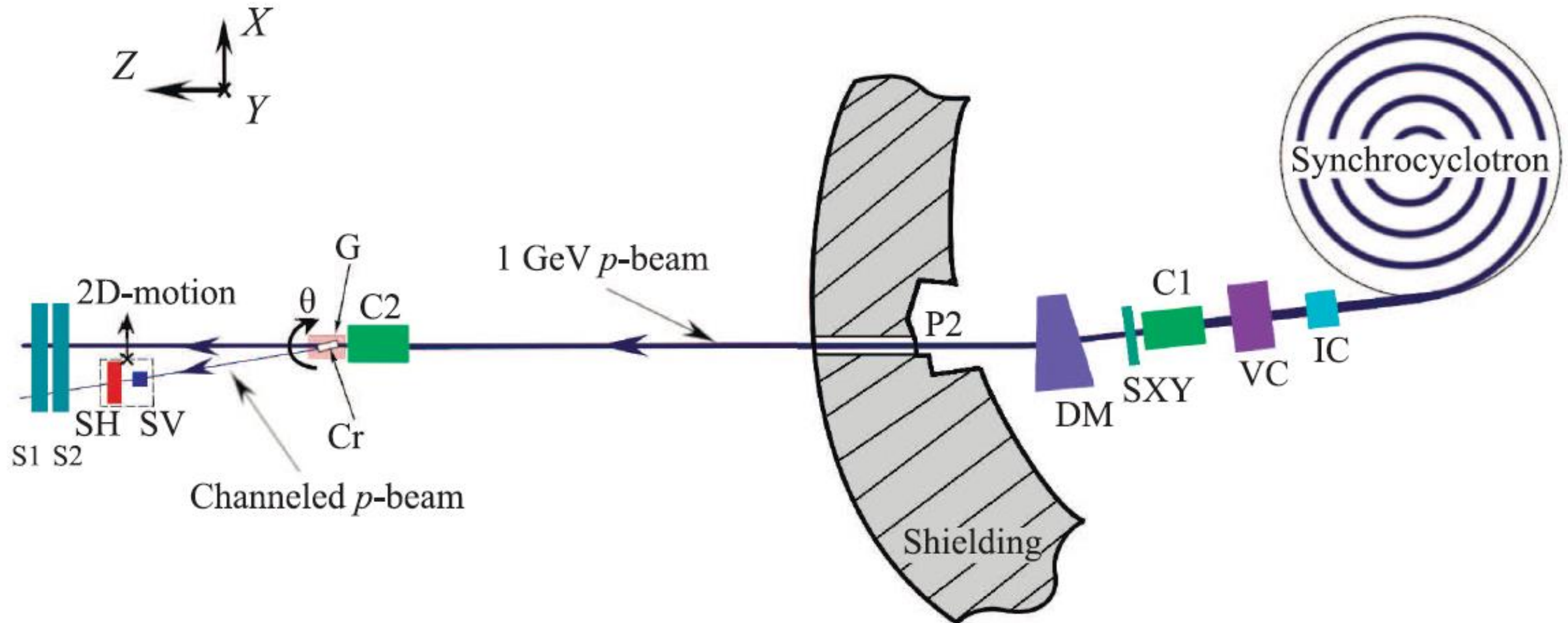
Наблюдено отклонение протонов на угол 3 миллирадиана с эффективностью 30%. Первые результаты опубликованы в статье:

Д.А.Амерканов, Л.А.Вайшнене, Ю.А.Гавриков, Б.Л.Горшков, А.С.Денисов, Е.М.Иванов, П.Ю.Иванова, Ю.М.Иванов, М.А.Кознов, В.И.Мурзин, Л.А.Щипунов, Эксперимент по высокоэффективному отклонению протонного пучка с энергией 1 ГэВ изогнутым кристаллом на синхроциклотроне ПИЯФ, Письма в ЖЭТФ, том 118, вып. 8, с. 551, DOI:10.31857/S1234567823200016, <http://jetpletters.ru/ps/2439/index.shtml>

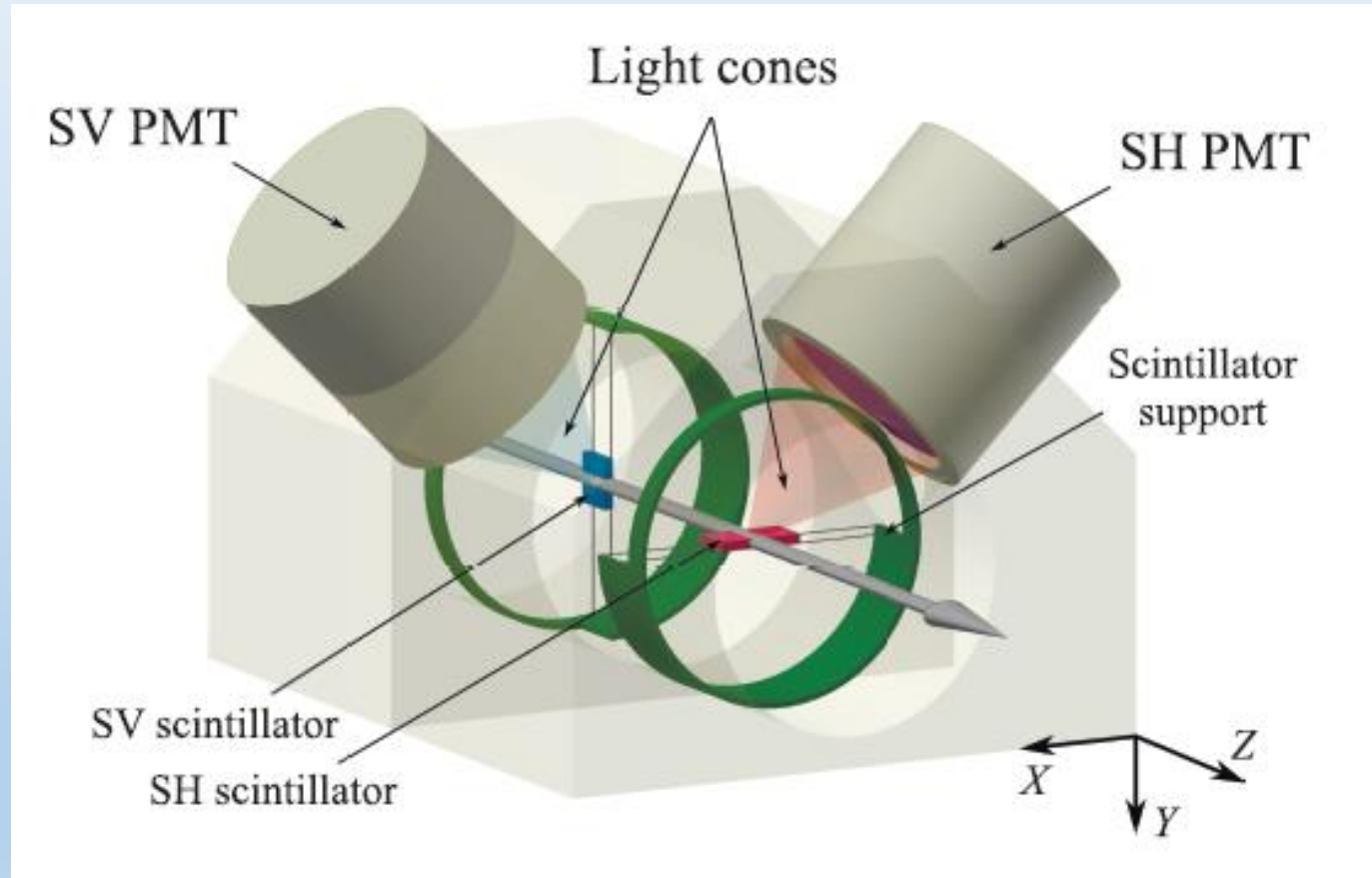
Ориентация кристаллов и схема изгиба



Экспериментальная установка для исследования каналирования в изогнутых кристаллах на синхроциклотроне ПИЯФ



Детектор - сцинтилляционный профилометр протонного пучка



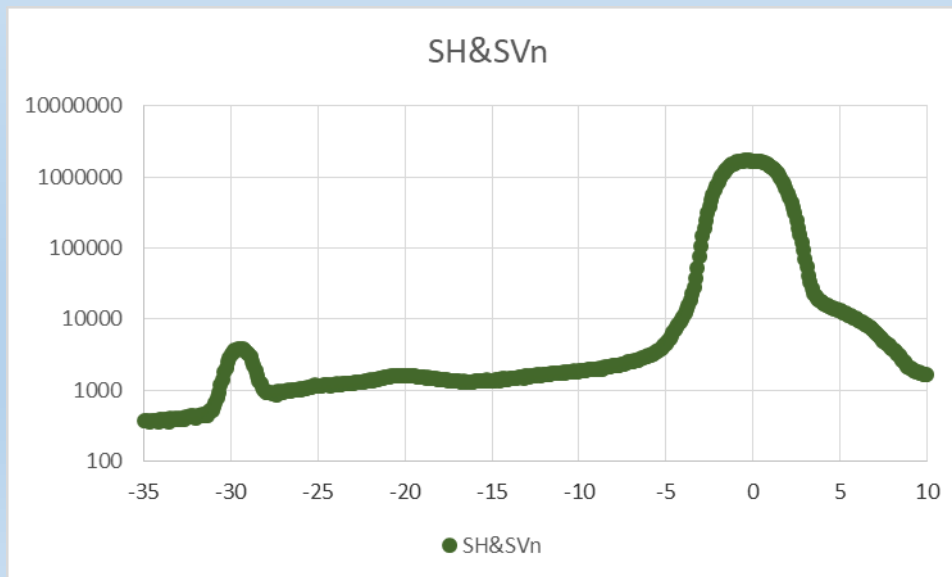
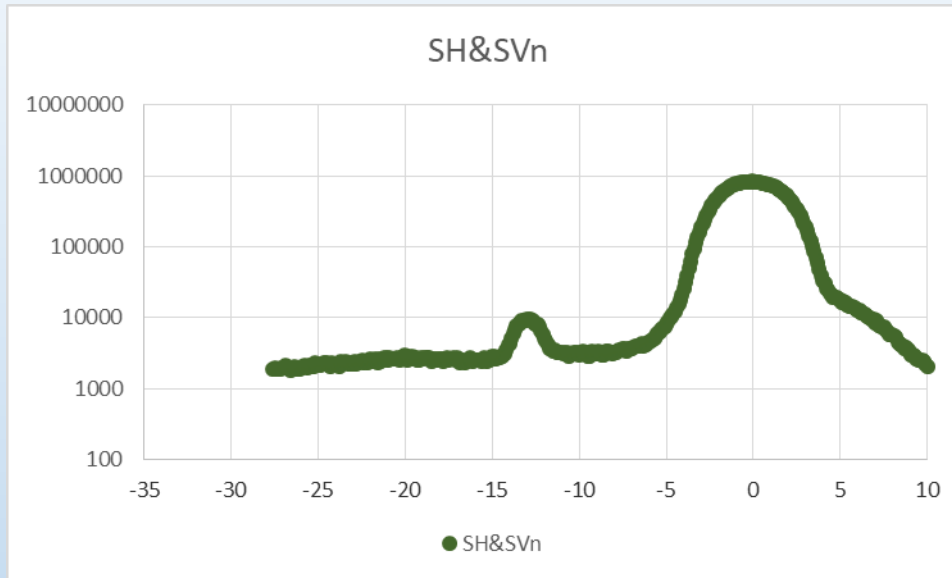
В 2024 году

Подготовлена новая серия кристаллов с длиной 1, 3, 7 мм в направлении пучка и изгибом до 20 миллирадиан. Новые образцы изучены оптическими и рентгеновскими методами и проверены на протонном пучке синхроциклотрона ПИЯФ.

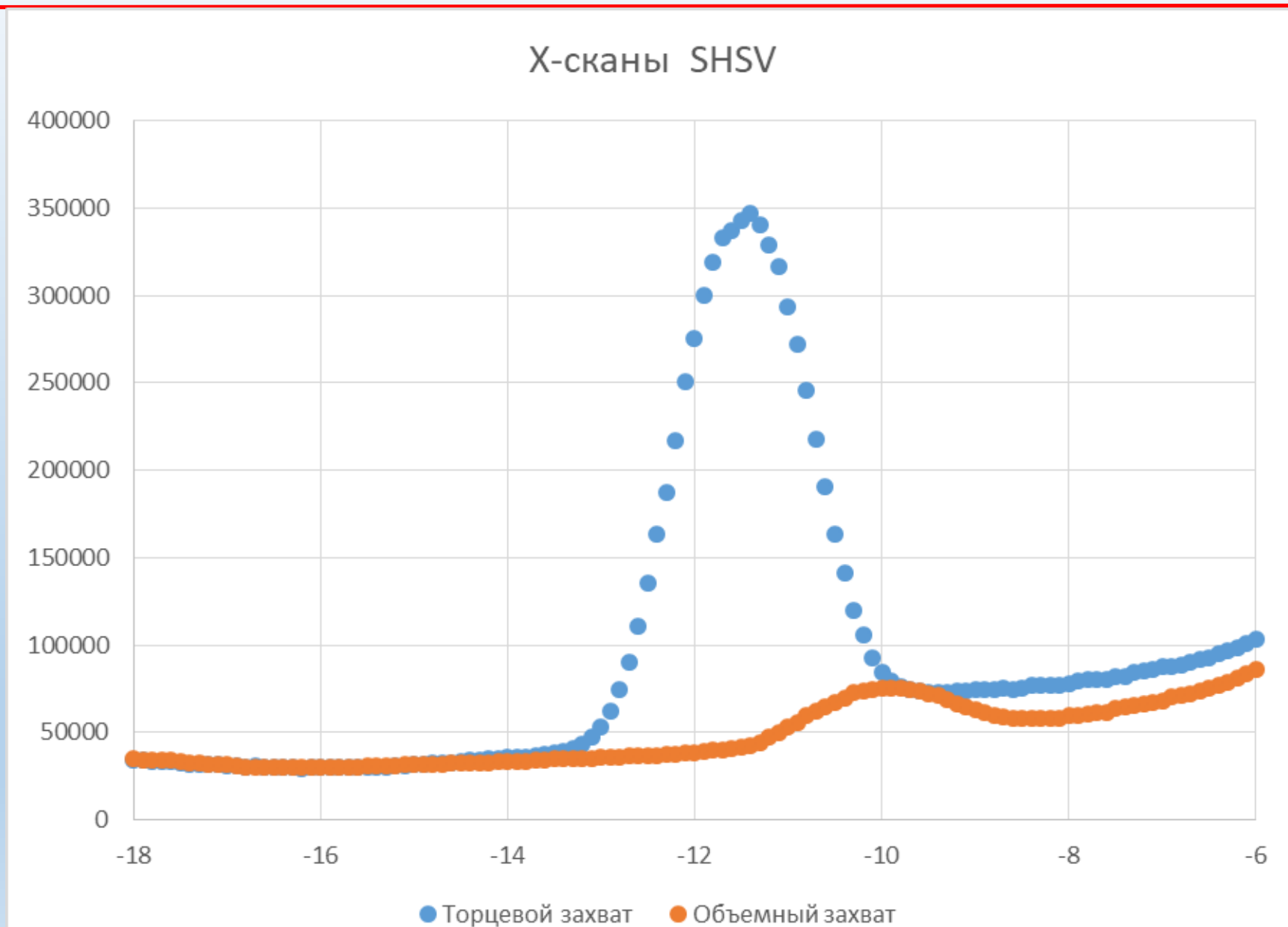
В новых опытах наблюдается:

- существенное увеличение угла отклонения частиц до 6.4 миллирадиан с 3 мм кристаллом,
- измерена длина деканалирования протонов с энергией 1 ГэВ для (110) плоскостей кремния при торцевом захвате 1.6 ± 0.3 мм
- измерены интенсивности отклоненных пучков при торцевом и объемном захвате в режим каналирования, получена оценка длины деканалирования при объемном захвате 1.0 ± 0.2 мм.

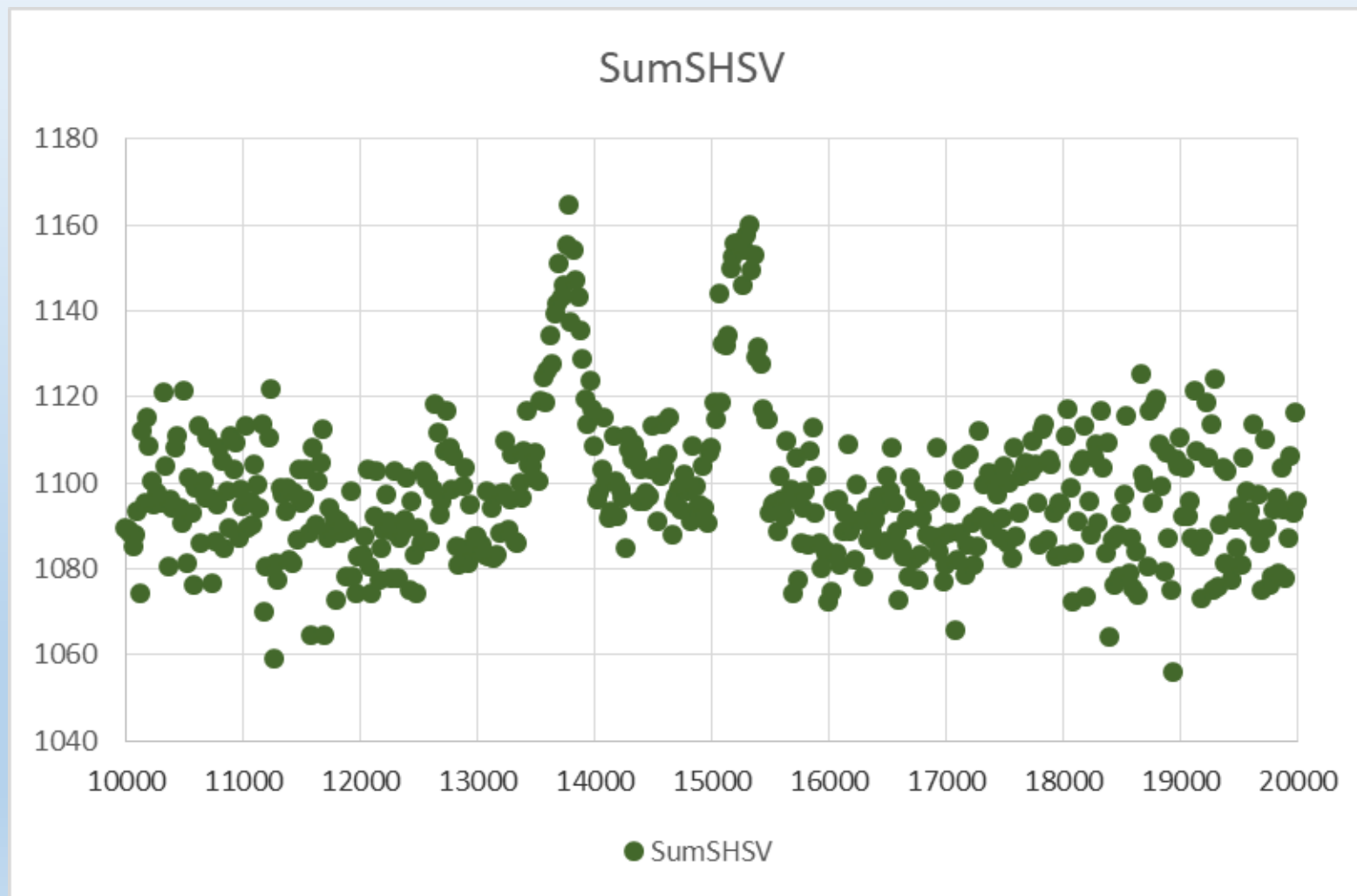
Линейные X-сканы SHSV с 1 мм и 3 мм кристаллами



Линейные X-сканы SHSV с 1 мм кристаллом в СН и VC



Угловой скан SHSV с 7 мм кристаллом



Моделирование экспериментов по отклонению протонов изогнутыми кристаллами на синхроциклотроне ПИЯФ

Иванова Полина Юрьевна¹

email: ivanova_py@pnpi.nrcki.ru

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Петербургский институт ядерной физики
им. Б. П. Константинова

Введение

В крупнейших ускорительных центрах таких, как ОИЯИ, ИФВЭ, ЦЕРН, Фермилаб, БНЛ, активно используются изогнутые кристаллы для управления траекториями частиц высоких и сверхвысоких энергий [1]. В основе этих исследований лежит эффект каналирования – частица, попавшая под малым углом в пространство между двумя атомными плоскостями ориентированного кристалла, под действием электрического поля движется вдоль кристаллографических плоскостей.

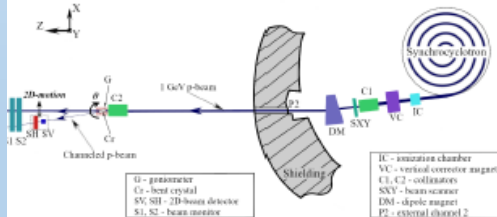


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

Планируется провести серию экспериментов по исследованию ориентационных эффектов в кремниевых кристаллах разной длины от 1 мм до 7 мм для протонов с энергией 200, 500 и 1000 МэВ. Это позволит определить области возможных применений кристаллов для развития пучковой инфраструктуры синхроциклотрона ПИЯФ, а также перспективы использования на установках адронной терапии.

Результаты моделирования

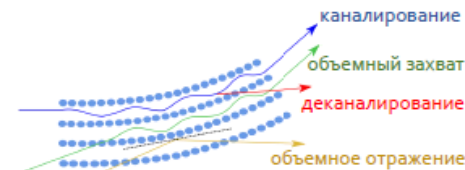


Рис. 1. Движение заряженной частицы в ориентированном кристалле.

В недавно выполненном на синхроциклотроне ПИЯФ эксперименте по каналированию протонов с энергией 1000 МэВ эффективность отклонения малорасходящегося пучка частиц на угол 3 мрад составила около 30 % [2], в последующем исследовании угол отклонения увеличен до 6 мрад, что расширяет возможности применения изогнутых кристаллов в области промежуточных энергий.

Моделирование траекторий

В малоугловом приближении движение частицы в изогнутом кристалле определяется суммой непрерывного потенциала атомных плоскостей и центробежного потенциала, зависящего линейно от поперечной координаты. Данная модель реализована в программе [3], написанной на C++ с использованием программного пакета ROOT.



Рис. 3. Интерфейс программы.

Для каждой частицы, проходящей через кристалл, численно решается уравнение движения, записанное в системе координат, связанной с каналом (за ось z выбрано направление вдоль плоскости, за ось x — поперечное направление), вида:

$$pv \frac{d^2 x}{dz^2} = - \frac{dU}{dx} - \frac{pv}{R}.$$

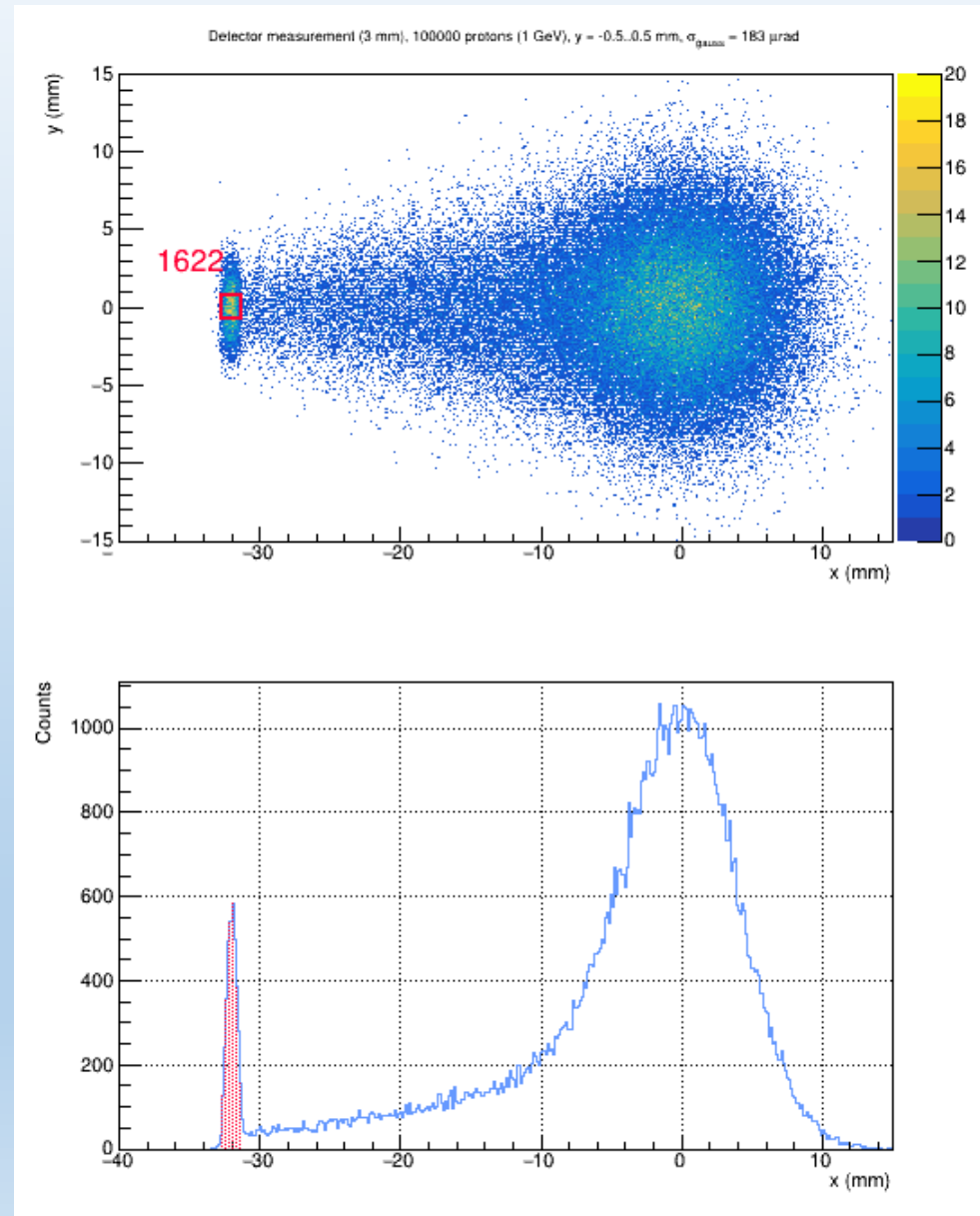
Учет многократного рассеяния частицы на ядрах и электронах при прохождении через кремний осуществлен при помощи метода Монте-Карло: смещение положения и поворот угла определяются соответственно

$$\delta x = \sqrt{\langle (\delta \theta_s)^2 \rangle} \cdot \delta z \left(\frac{\eta_1}{\sqrt{12}} + \frac{\eta_2}{2} \right),$$

$$\theta_s = \sqrt{\langle (\delta \theta_s)^2 \rangle} \cdot \eta_2,$$

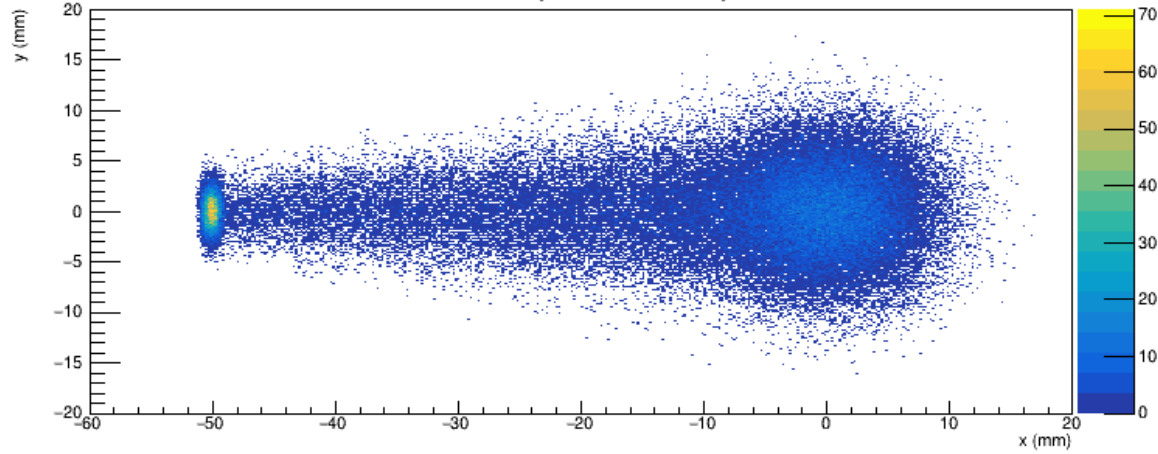
где $\langle (\delta \theta_s)^2 \rangle$ – средний квадрат угла многократного рассеяния на ядрах и электронах; δz – шаг рассеяния; η_1, η_2 – случайные величины нормального распределения.

Пример расчета для 3 мм кристалла с изгибом 6.4 миллирадиан

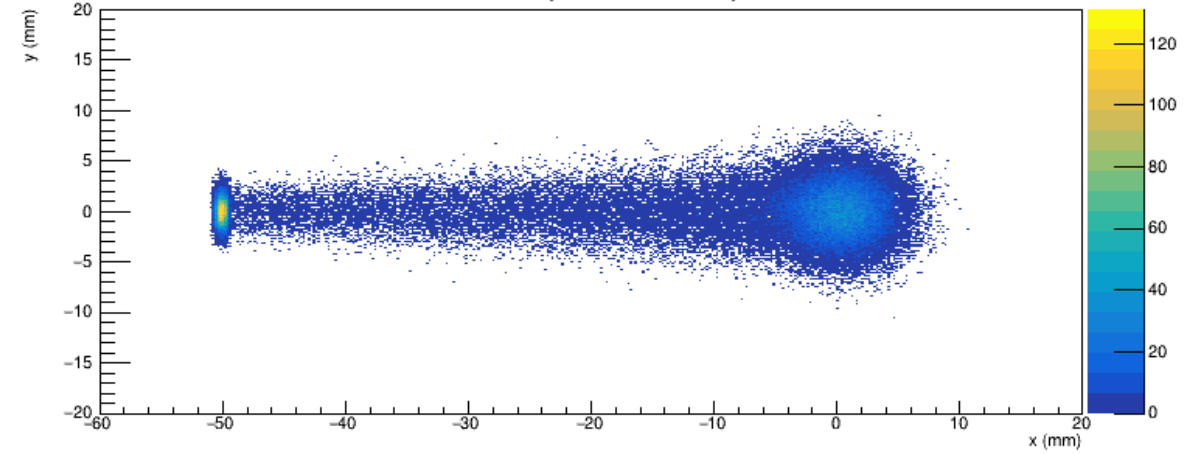


1 мм кристалл с изгибом 10 мрад - 500 и 1000 МэВ

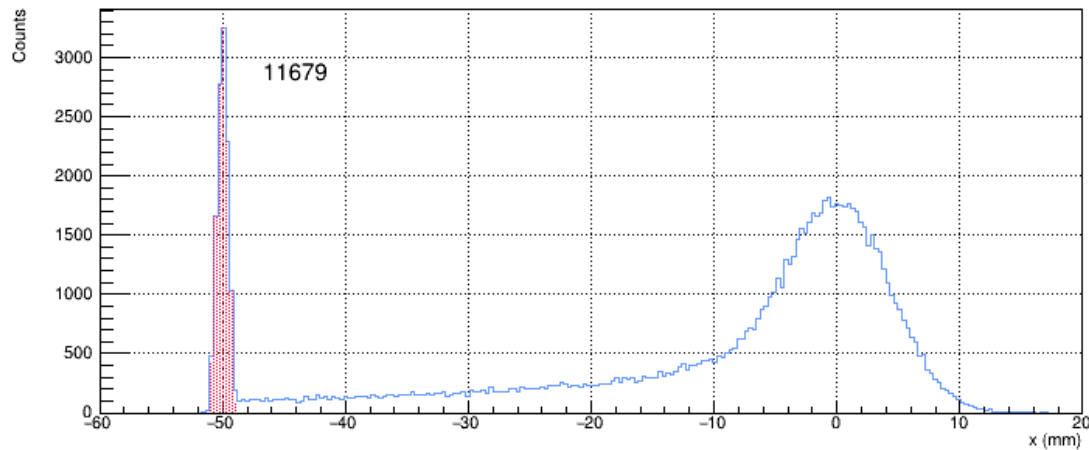
$L = 1 \text{ mm}$, $R = 10 \text{ cm}$, $\mu_{\text{gauss}} = 0 \text{ } \mu\text{rad}$, $\sigma_{\text{gauss}} = 183 \text{ } \mu\text{rad}$



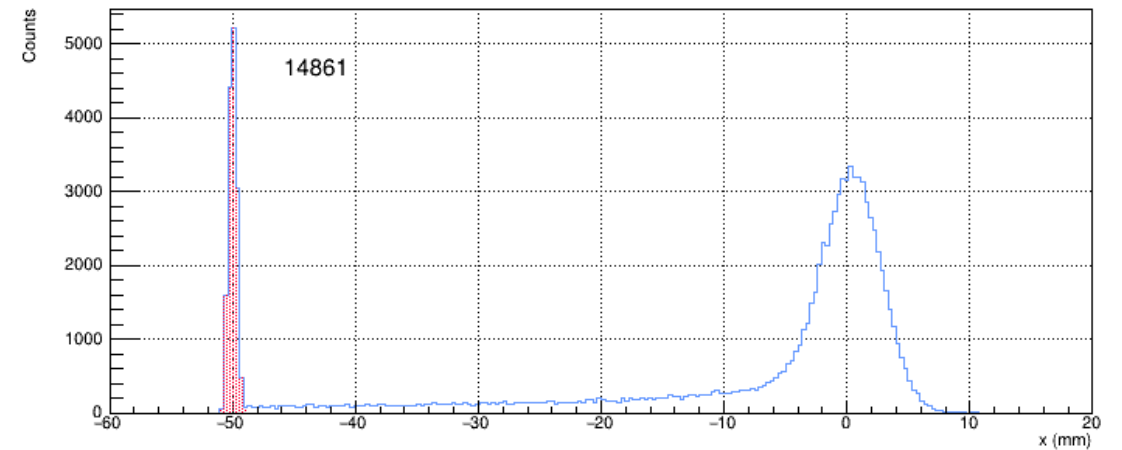
$L = 1 \text{ mm}$, $R = 10 \text{ cm}$, $\mu_{\text{gauss}} = 0 \text{ } \mu\text{rad}$, $\sigma_{\text{gauss}} = 183 \text{ } \mu\text{rad}$



500 MeV

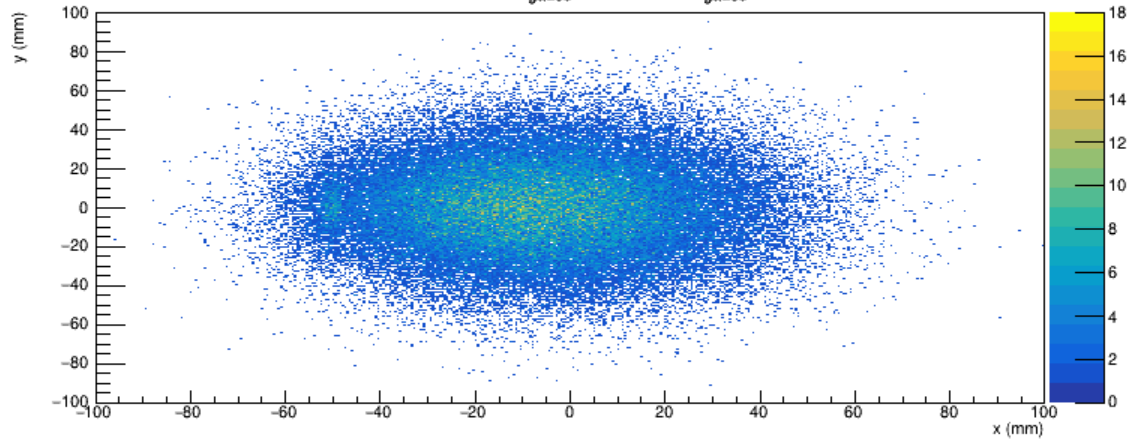


1000 MeV

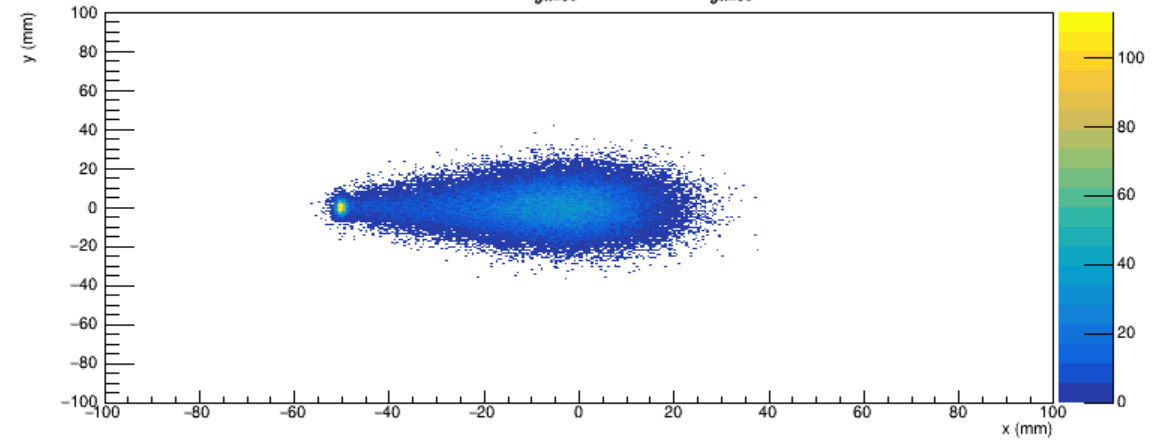


1 мм кристалл с изгибом 10 мрад - 80 и 200 МэВ

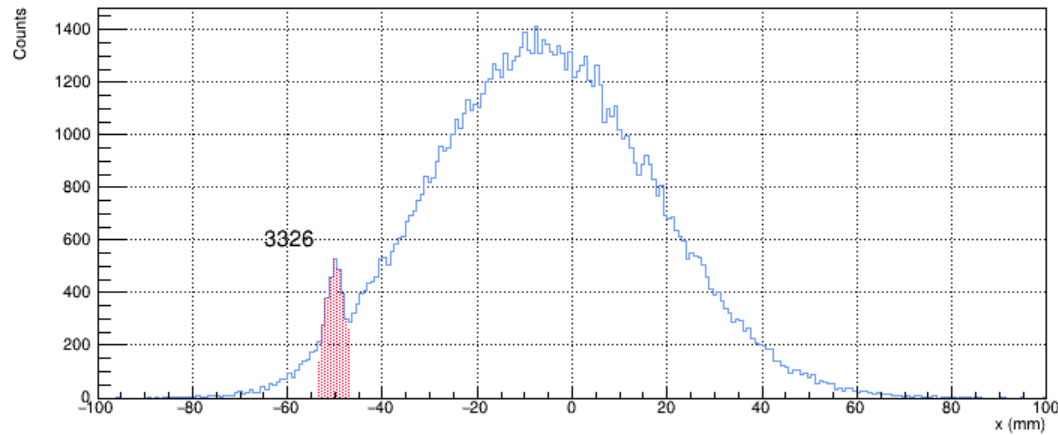
$L = 1 \text{ mm}$, $R = 10 \text{ cm}$, $\mu_{\text{gauss}} = 0 \text{ } \mu\text{rad}$, $\sigma_{\text{gauss}} = 183 \text{ } \mu\text{rad}$



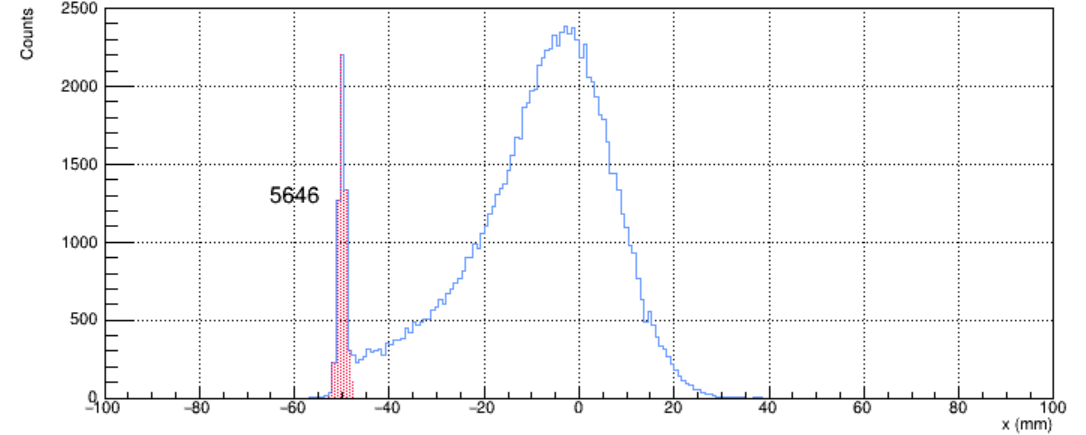
$L = 1 \text{ mm}$, $R = 10 \text{ cm}$, $\mu_{\text{gauss}} = 0 \text{ } \mu\text{rad}$, $\sigma_{\text{gauss}} = 183 \text{ } \mu\text{rad}$



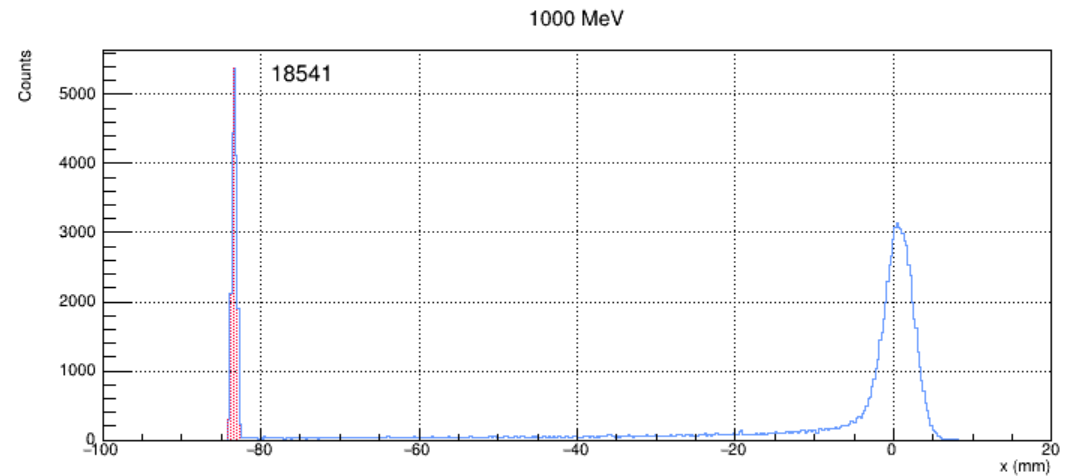
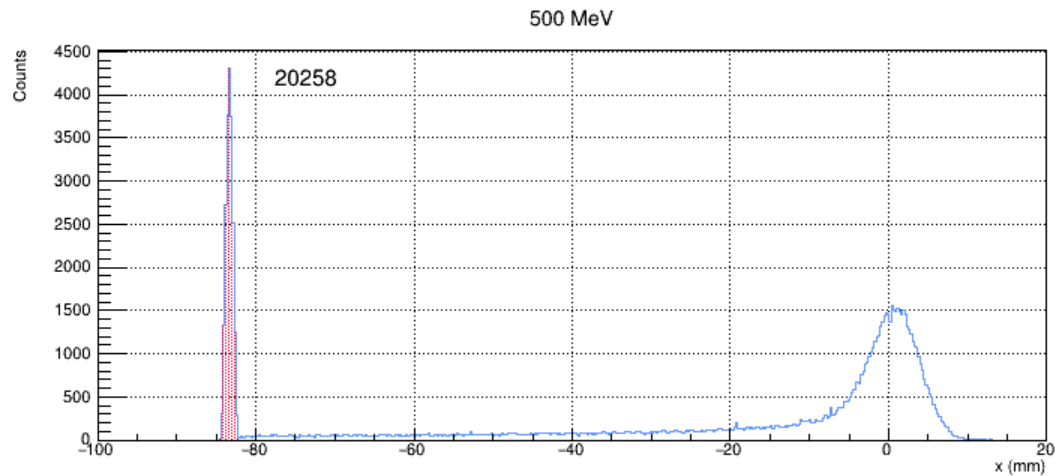
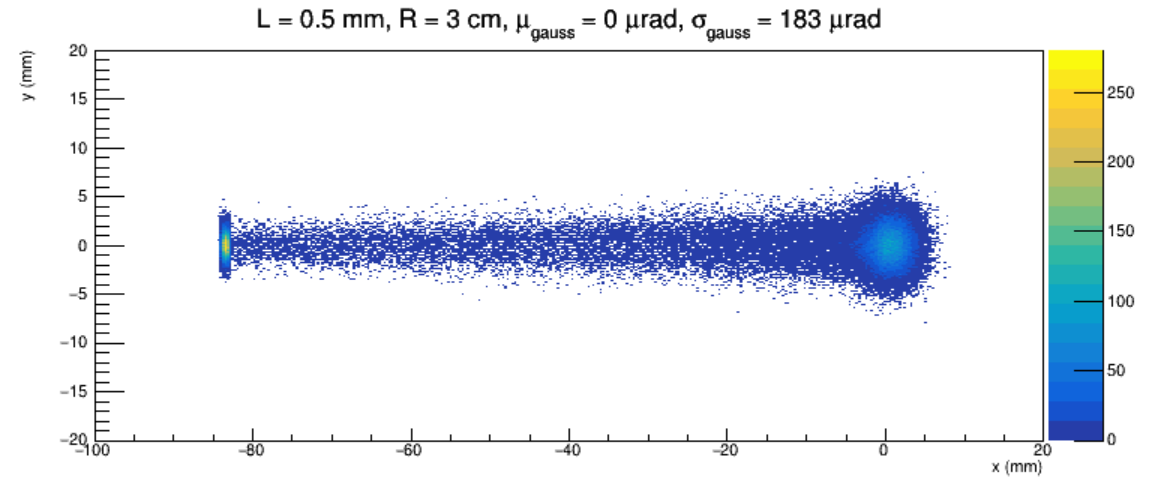
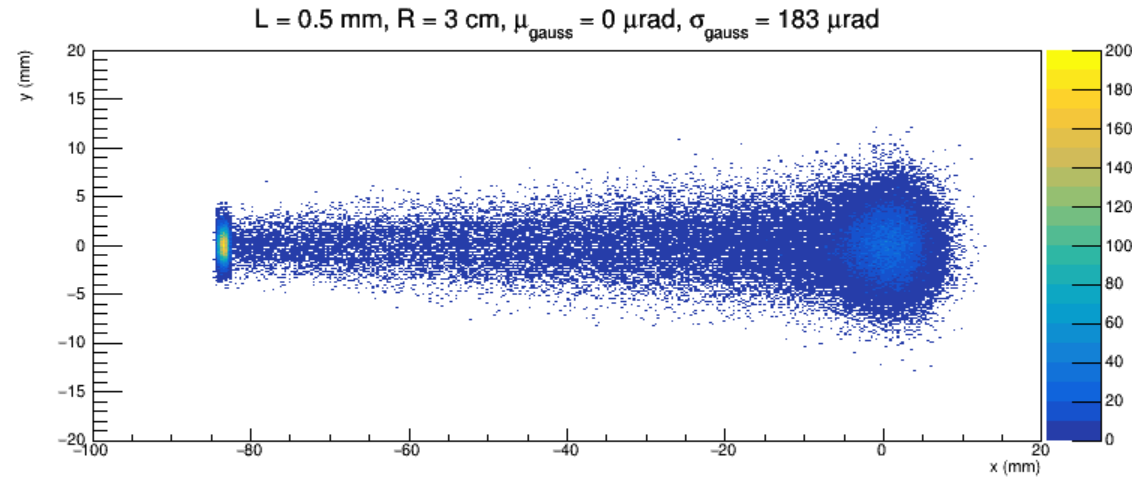
80 MeV



200 MeV

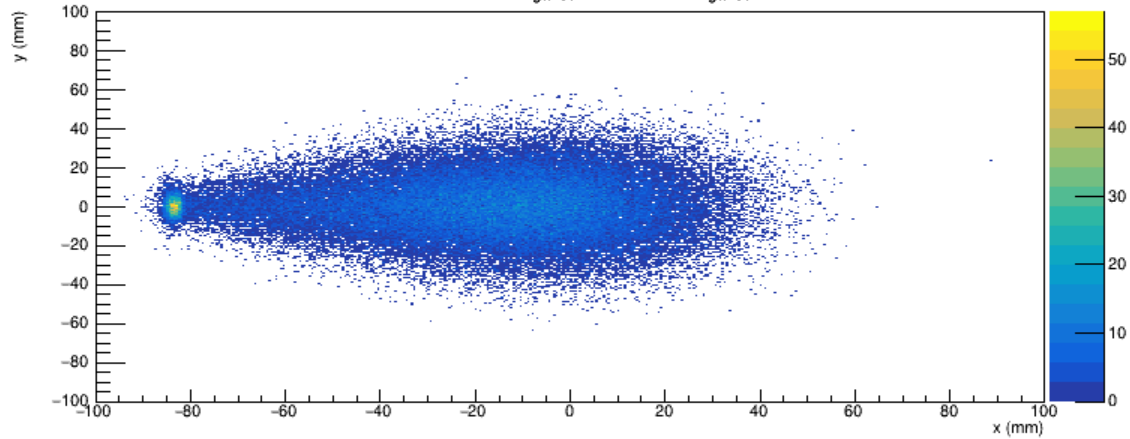


0.5 мм кристалл с изгибом 16 мрад - 500 и 1000 МэВ

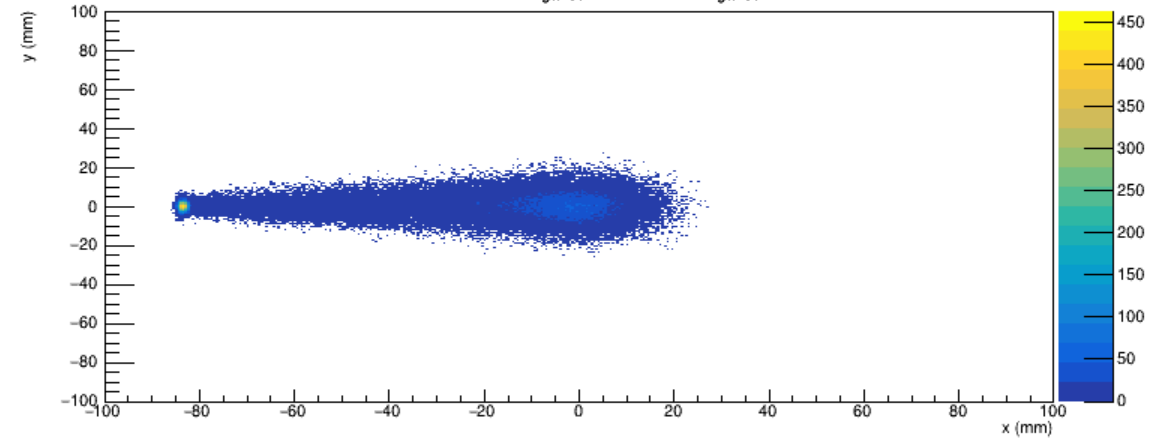


0.5 мм кристалл с изгибом 16 мрад – 80 и 200 МэВ

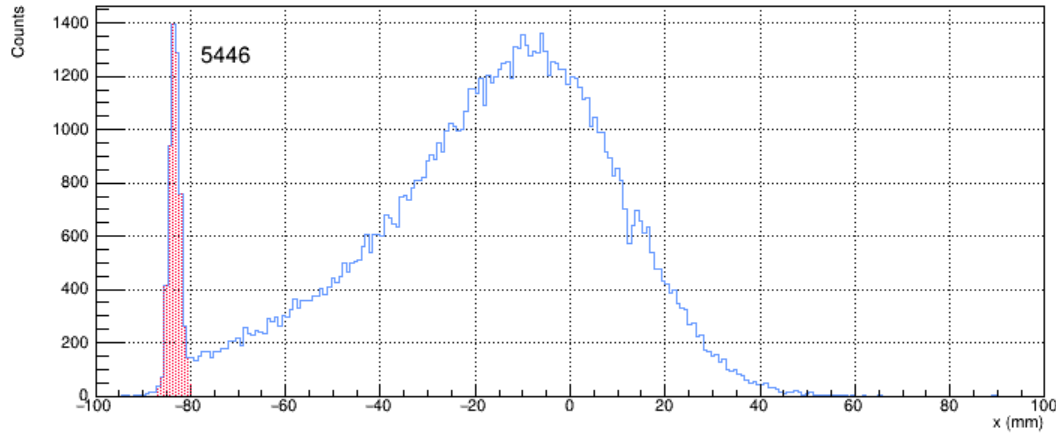
$L = 0.5 \text{ mm}$, $R = 3 \text{ cm}$, $\mu_{\text{gauss}} = 0 \text{ } \mu\text{rad}$, $\sigma_{\text{gauss}} = 183 \text{ } \mu\text{rad}$



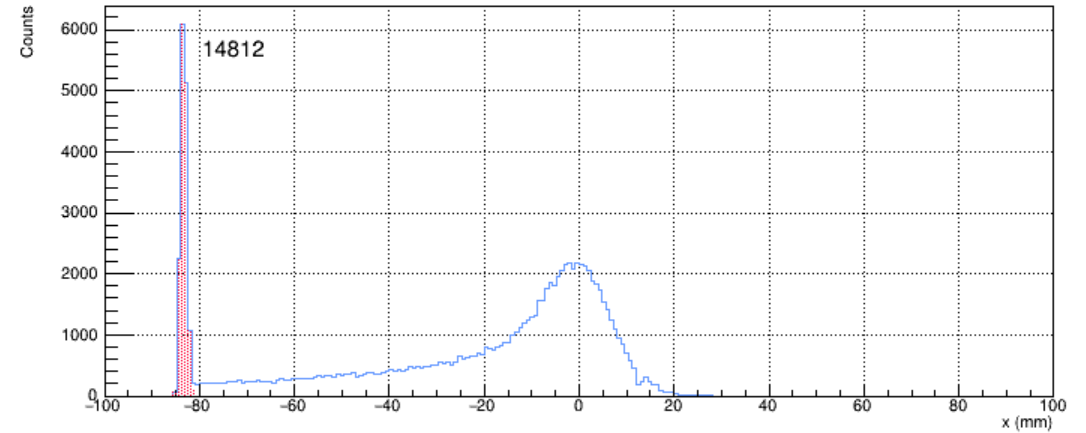
$L = 0.5 \text{ mm}$, $R = 3 \text{ cm}$, $\mu_{\text{gauss}} = 0 \text{ } \mu\text{rad}$, $\sigma_{\text{gauss}} = 183 \text{ } \mu\text{rad}$



80 MeV



200 MeV



Проблемы

- Нужны специалисты
- Нужны автоматизированные станки для обработки кристаллов
- Нужны современные детекторы (Timerix)

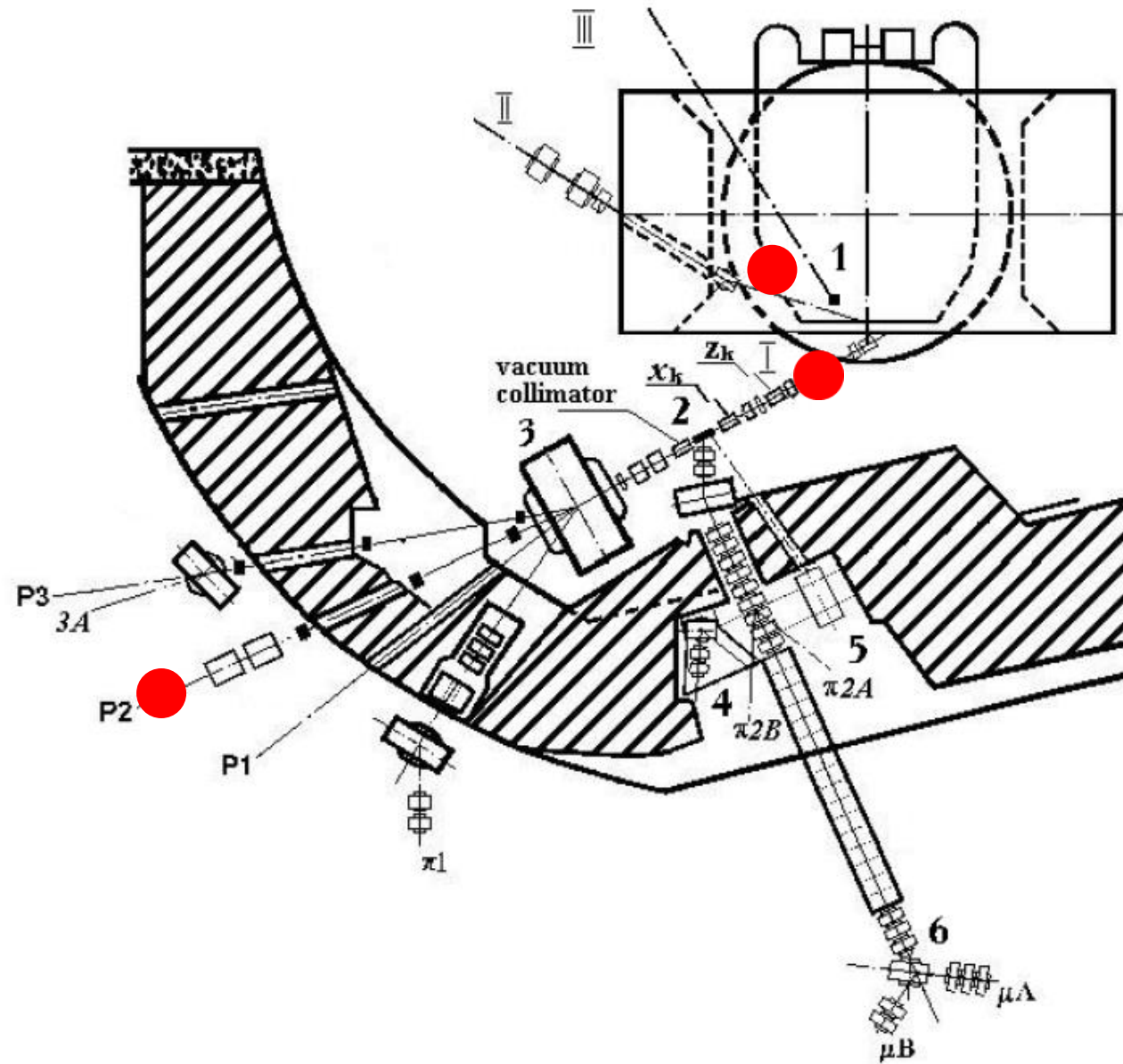
Планы

- Улучшить детектор
- Восстановить управление коллиматорами
- Ввести линейное перемещение кристалла

Спасибо за внимание!

Резервные слайды

Синхроциклотрон и пучки



Вывод пучка кристаллом

