



# Исследование канализирования 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  $\leq 1$  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/wermp028.pdf>

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

# Первые результаты

---

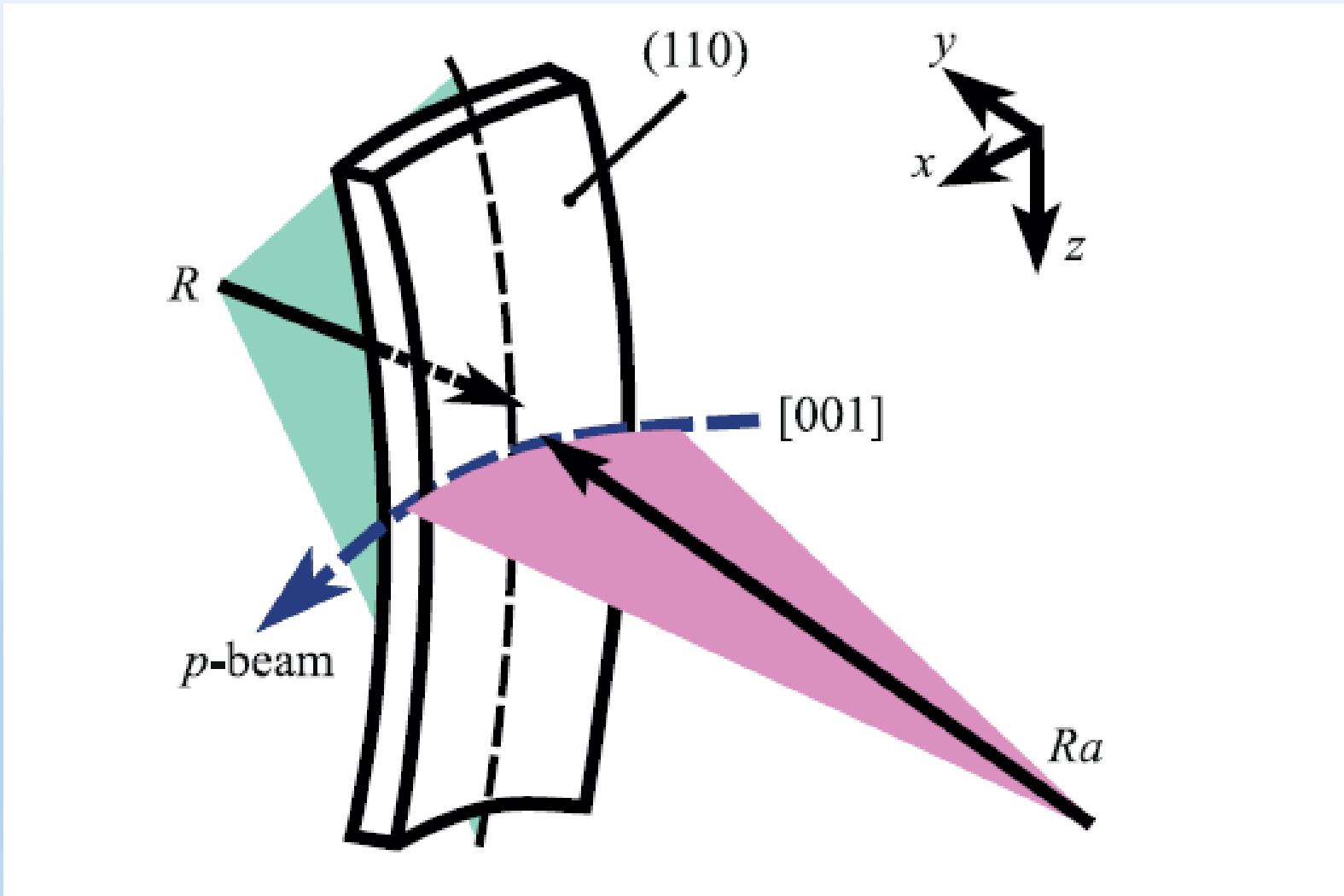
Длина деканализации в кристаллах уменьшается с понижением энергии частиц. Это существенно влияет на выбор рабочих размеров кристаллов и схем изгиба.

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

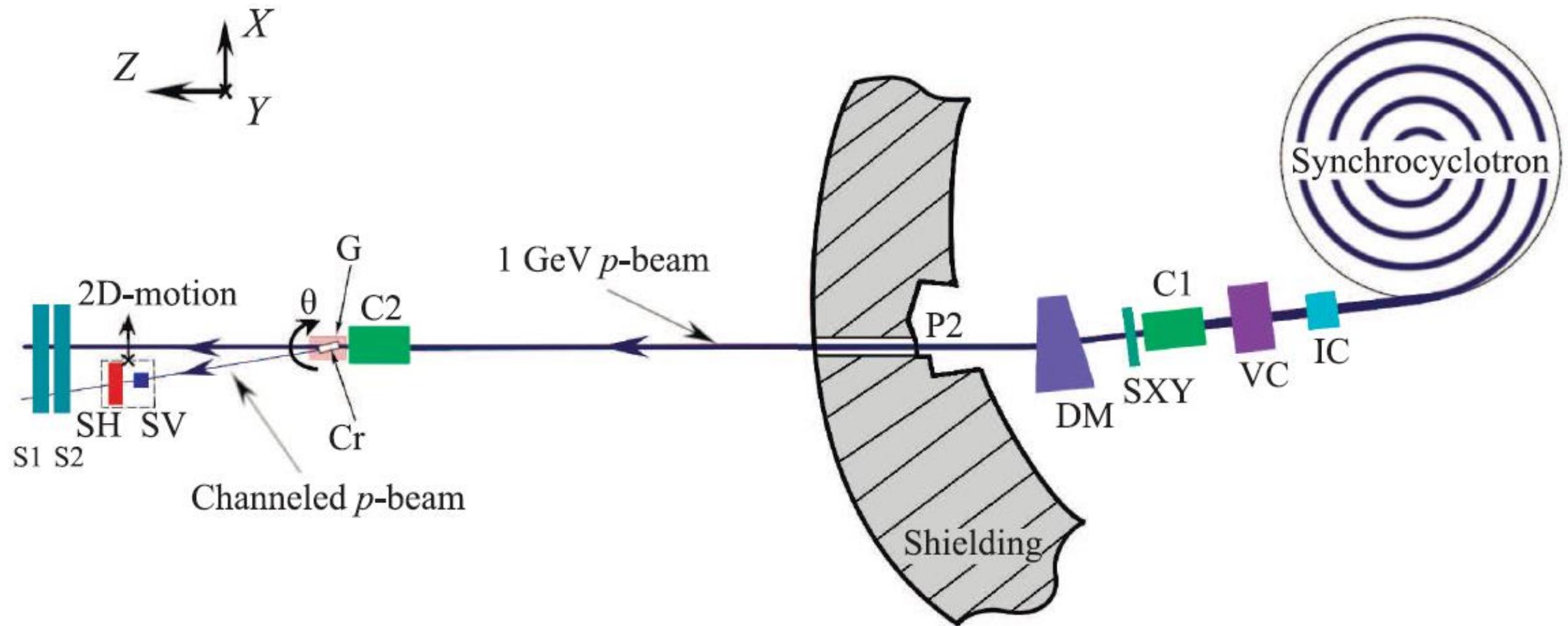
Наблюдено отклонение протонов на угол 3 миллирадиана с эффективностью 30%. Первые результаты опубликованы в статье:

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://jetletters.ru/ps/2439/index.shtml>

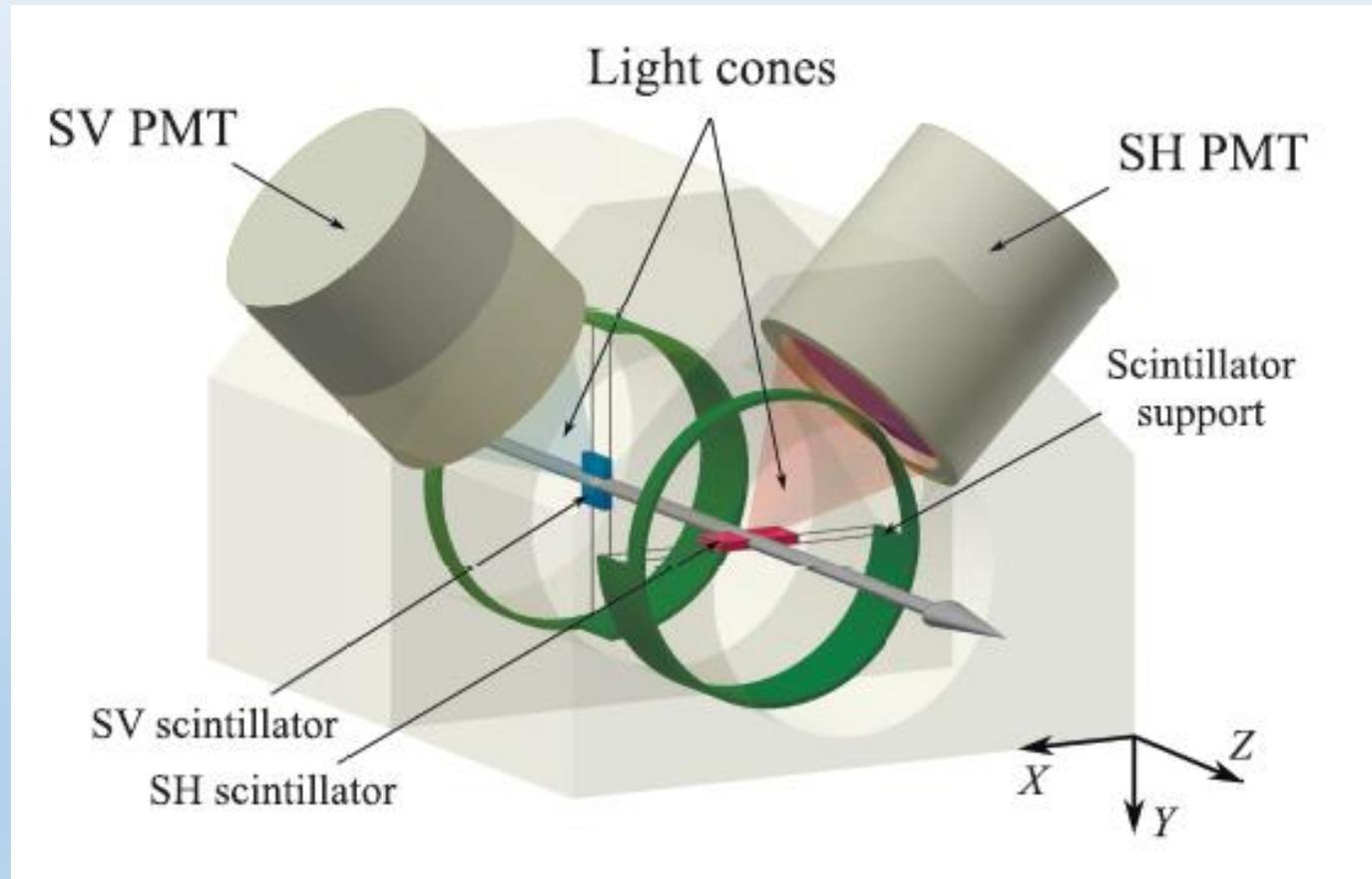
# Ориентация кристаллов и схема изгиба



# Экспериментальная установка для исследования канализования в изогнутых кристаллах на синхроциклотроне ПИЯФ



# Детектор - сцинтиляционный профилометр протонного пучка



## В 2024 году

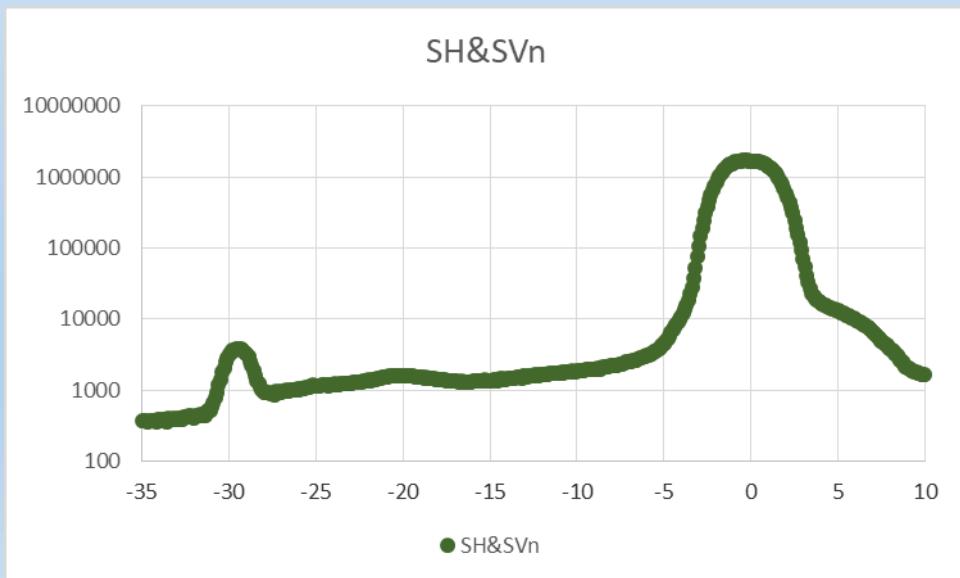
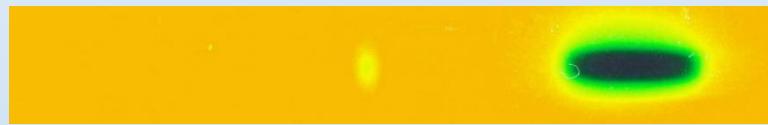
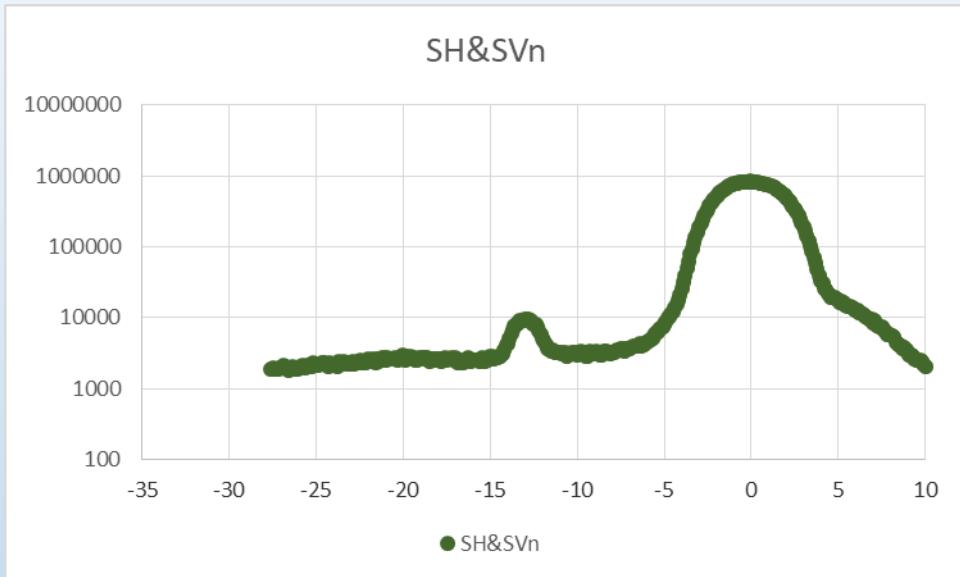
---

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.

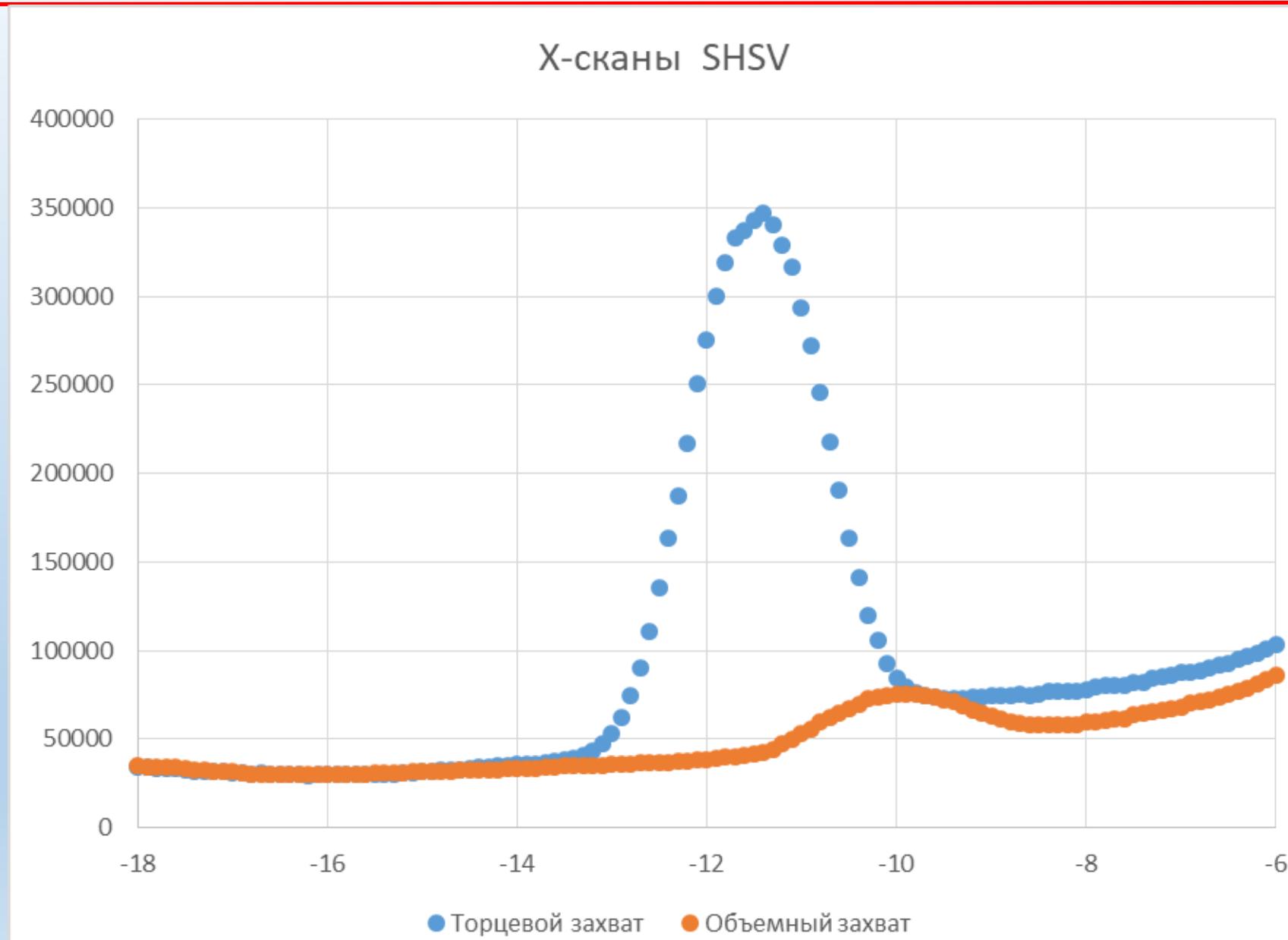
В новых опытах наблюдено:

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

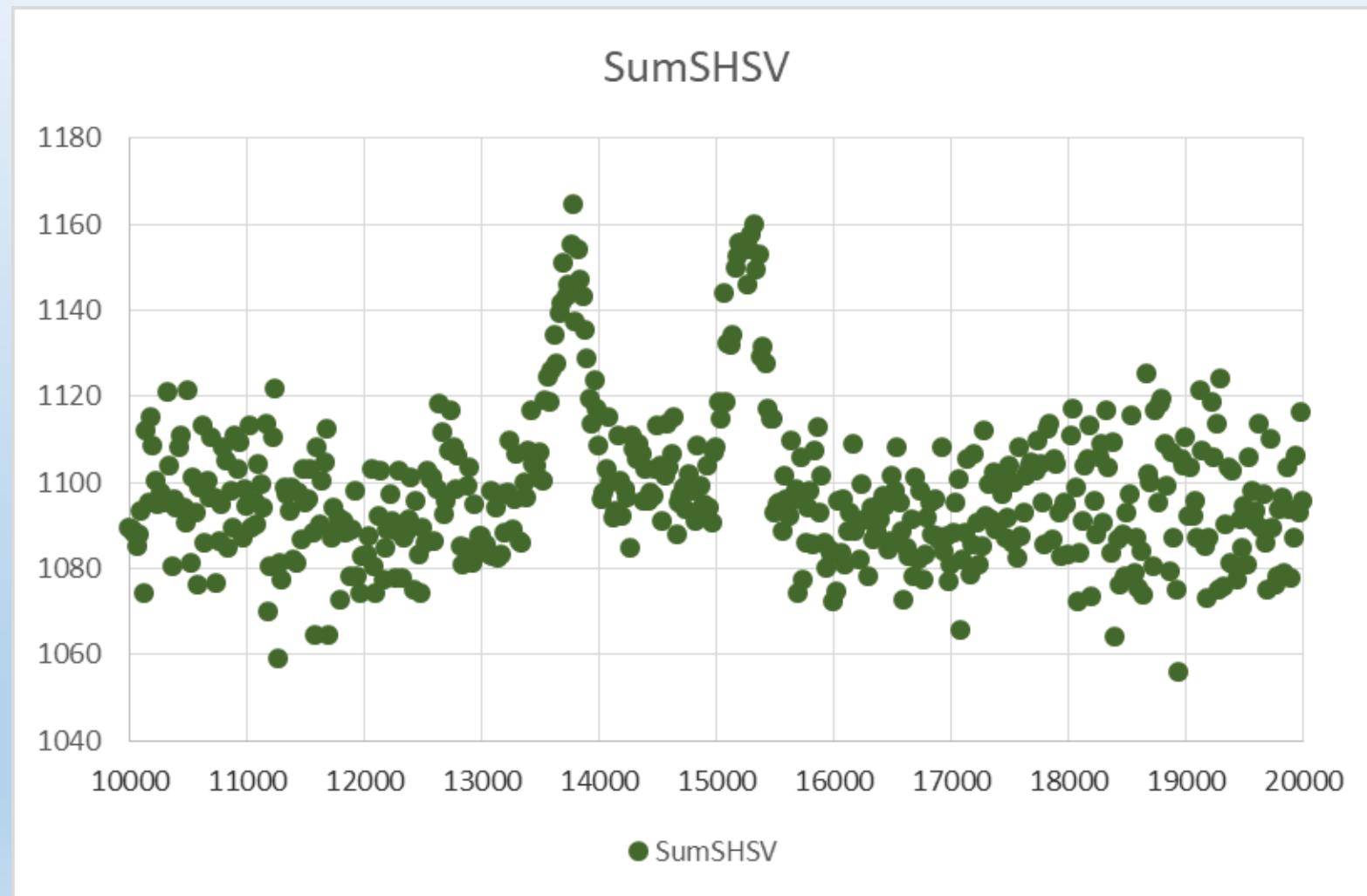
# Линейные X-сканы SHSV с 1 мм и 3 мм кристаллами



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



# Угловой скан SHSV с 7 мм кристаллом



## Моделирование экспериментов по отклонению протонов изогнутыми кристаллами на синхроциклотроне ПИЯФ

Иванова Полина Юрьевна<sup>1</sup>

email: ivanova\_py@rpri.nrcki.ru

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

### 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 канализирования – частица, попавшая под малым углом в пространство между двумя атомными плоскостями ориентированного кристалла, под действием электрического поля движется вдоль кристаллографических плоскостей.

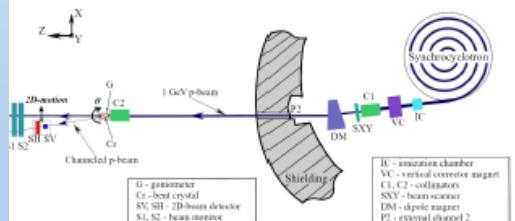


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

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 канализированию 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:

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

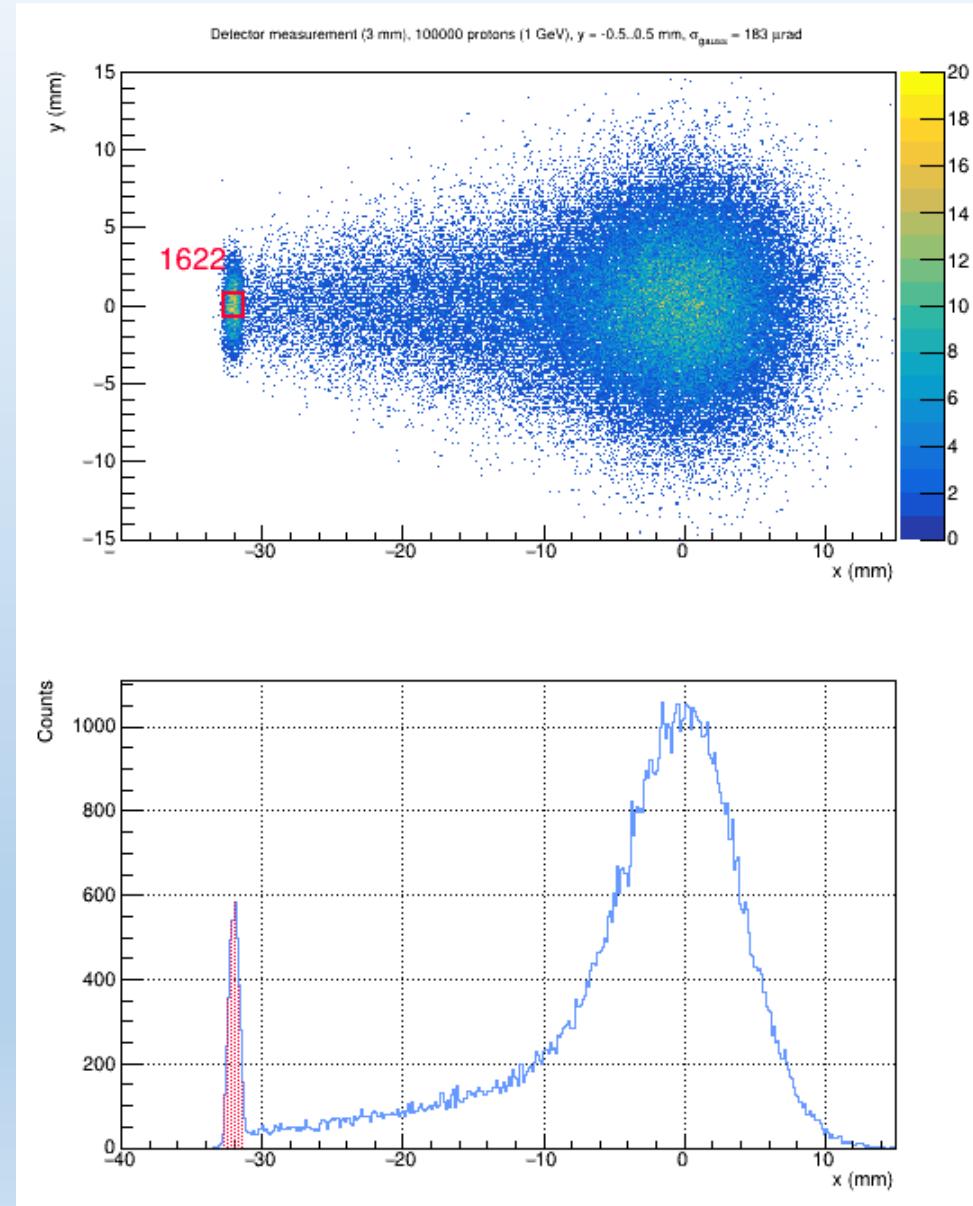
Учет многократного рассеяния частицы на ядрах и электронах при прохождении через кремний осуществлен при помощи метода Монте-Карло: смещение положения и поворот угла определяются соответственно

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

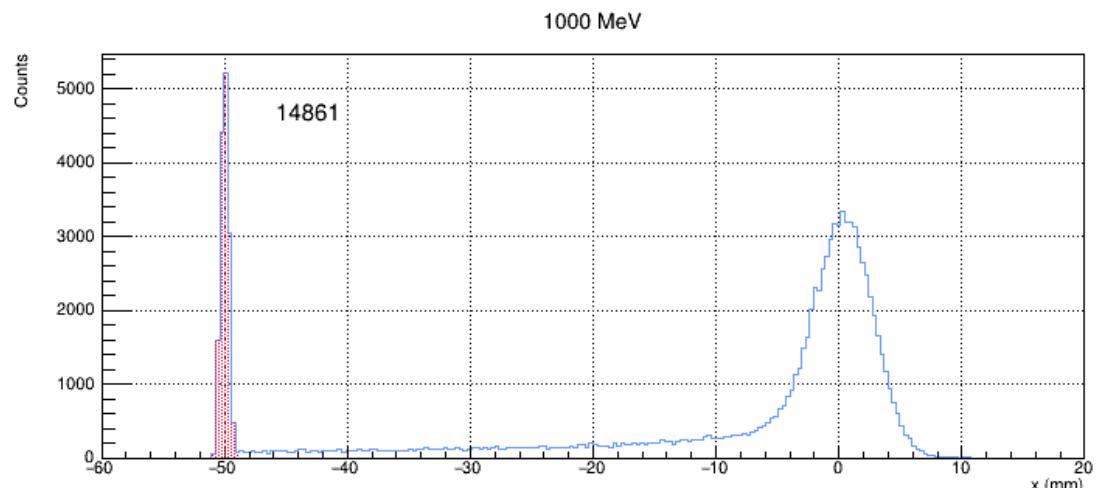
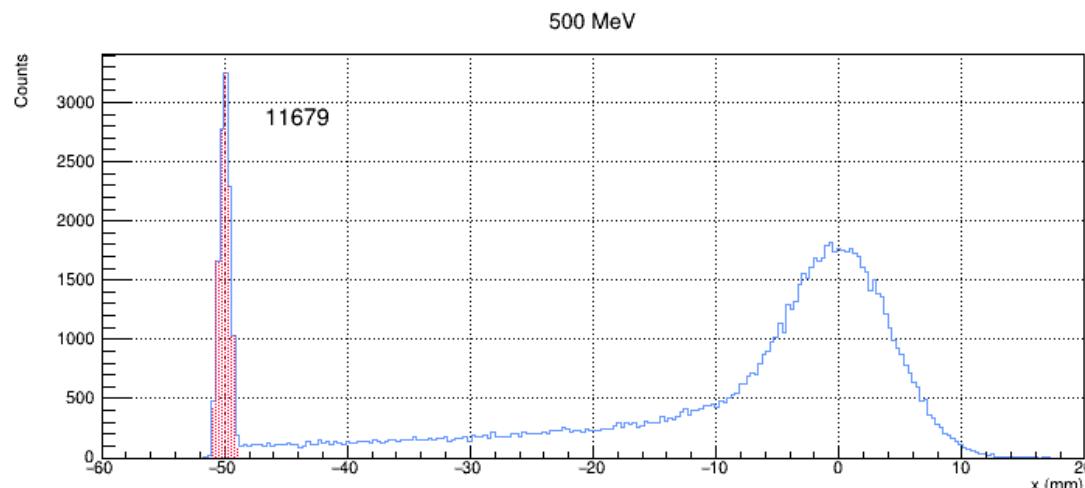
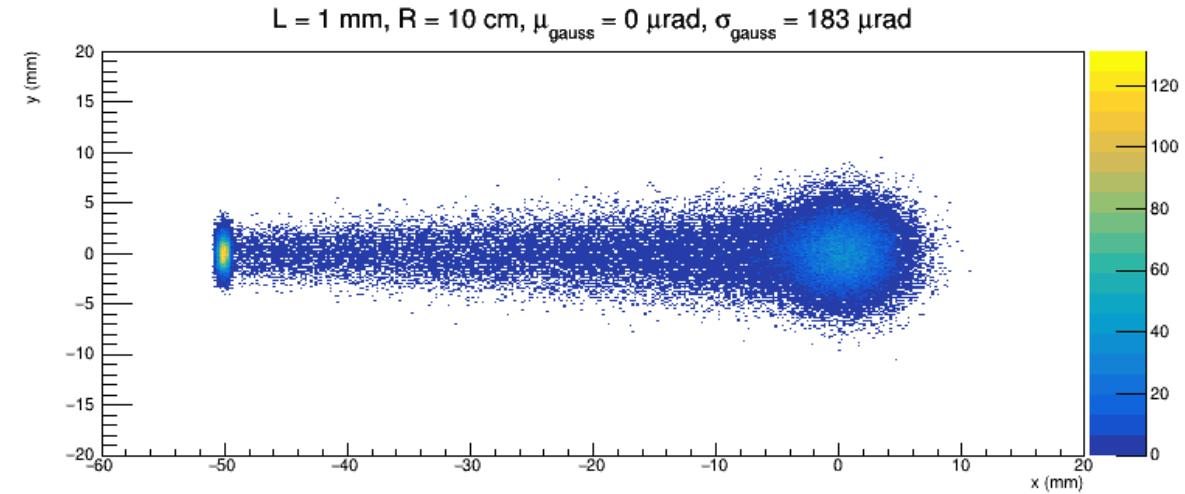
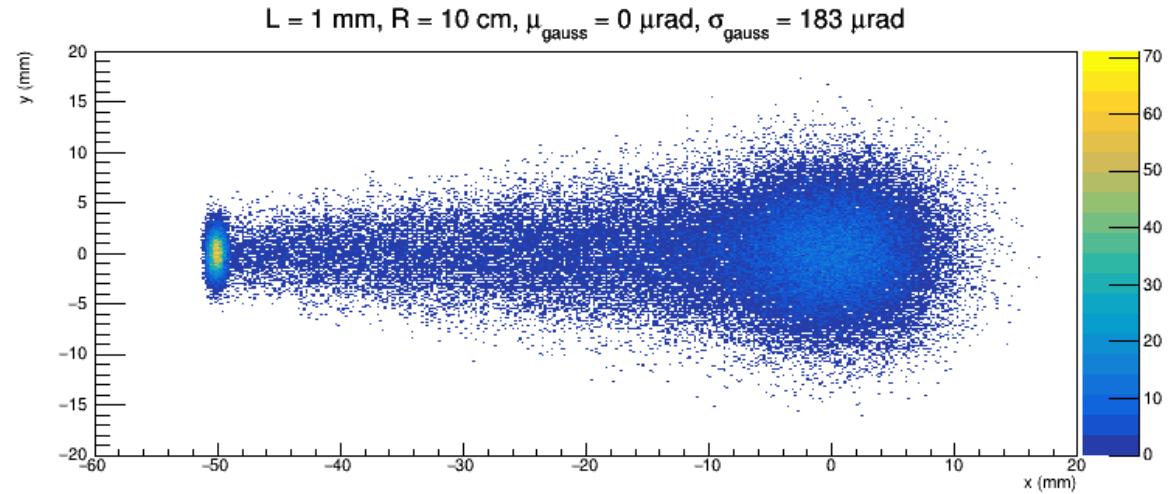
$$\theta_s = \sqrt{\langle (\delta\theta_s)^2 \rangle} \cdot \eta_2,$$

где  $\langle (\delta\theta_s)^2 \rangle$  – средний квадрат угла многократного рассеяния на ядрах и электронах;  $\delta z$  – шаг рассеяния;  $\eta_1, \eta_2$  – случайные величины нормального распределения.

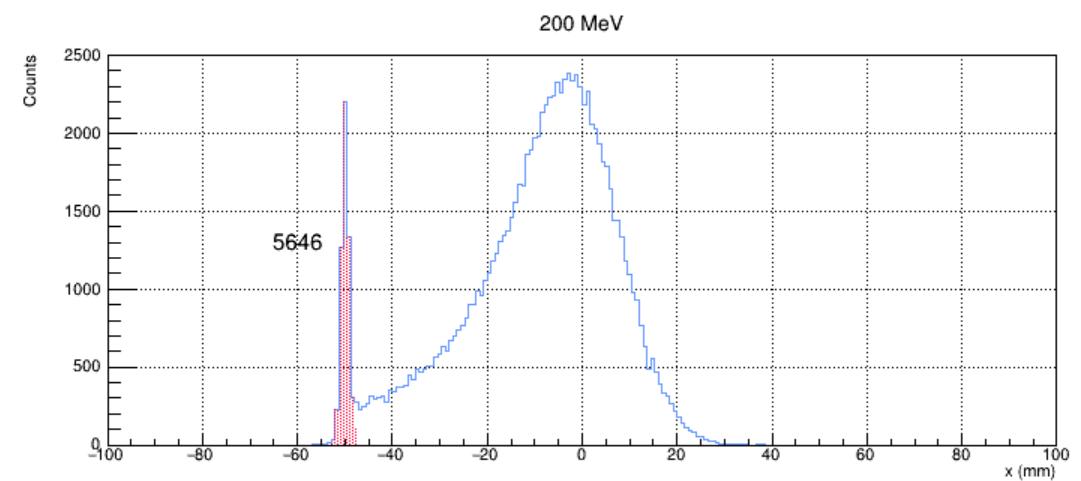
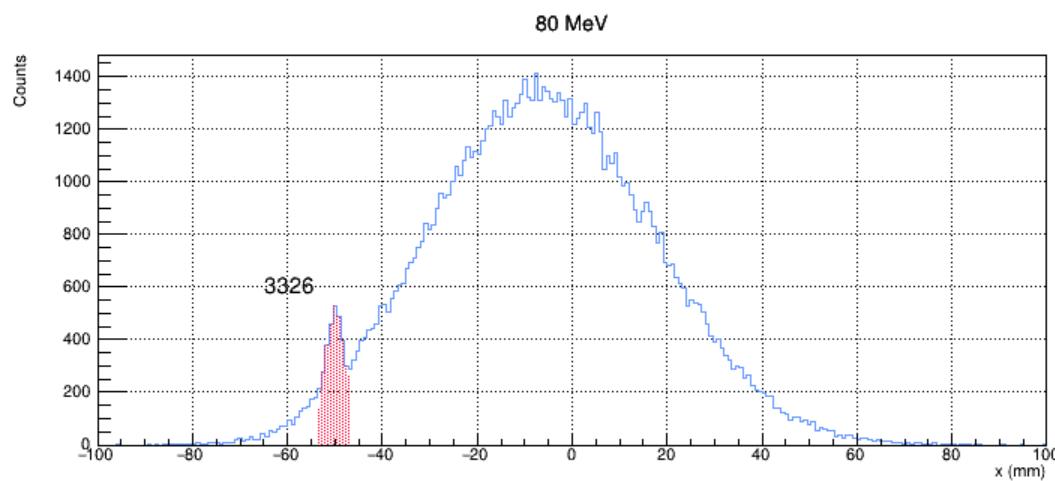
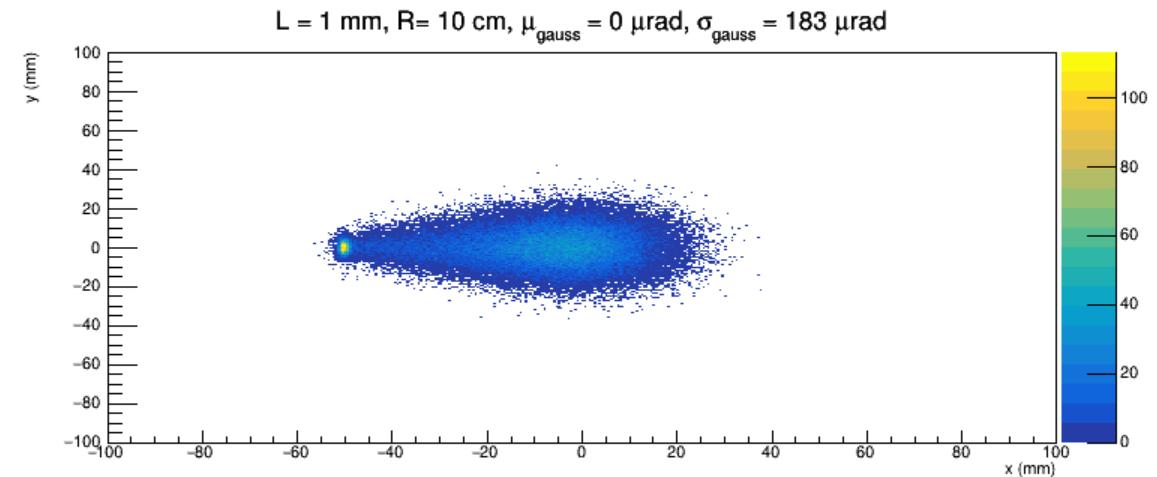
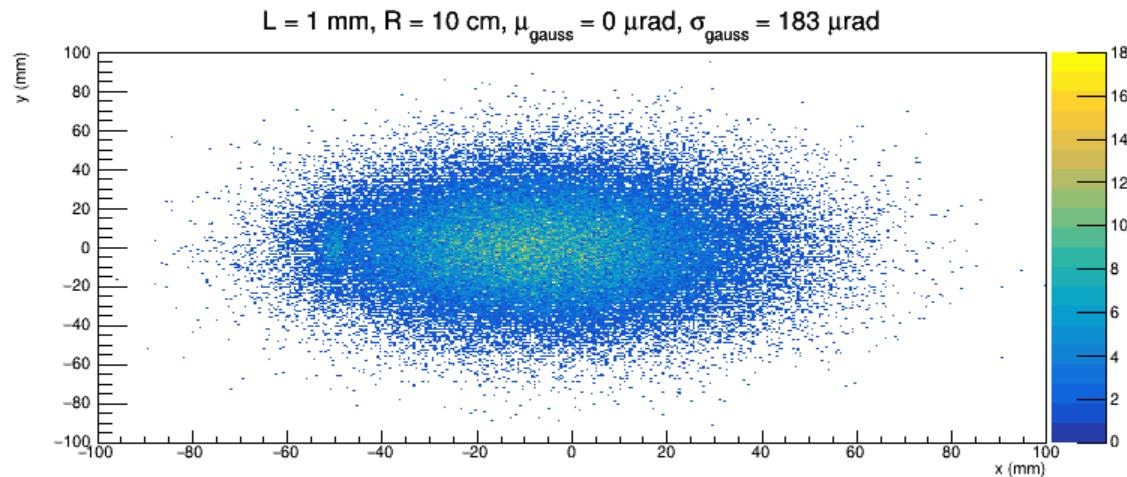
# Пример расчета для 3 мм кристалла с изгибом 6.4 миллирадиан



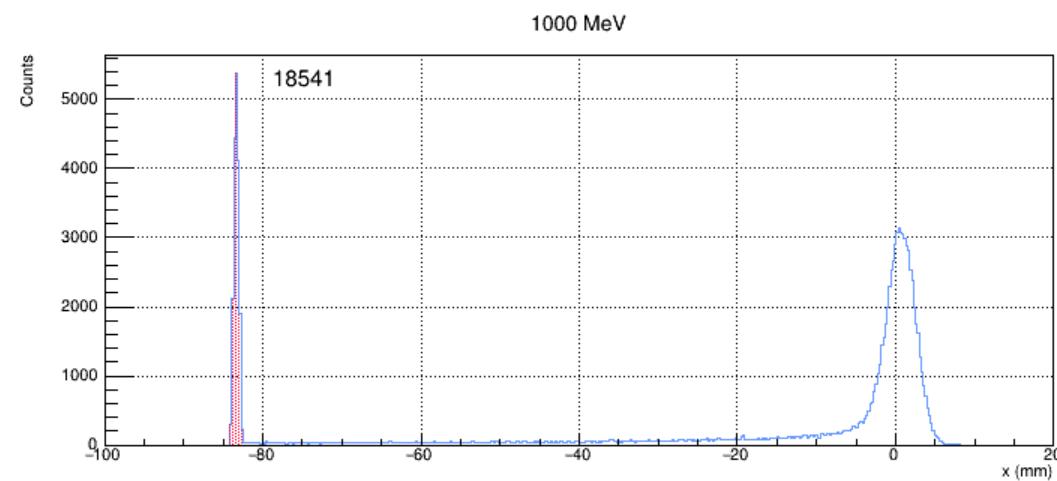
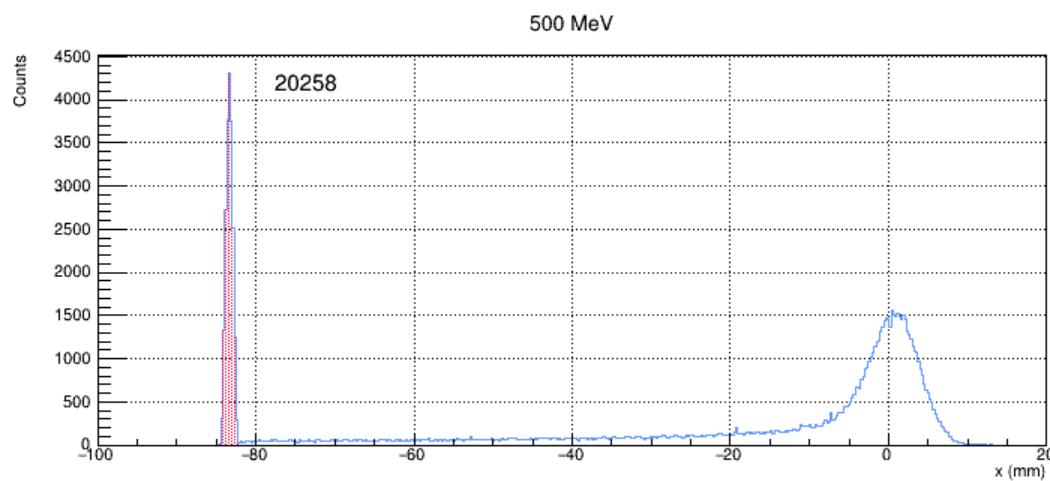
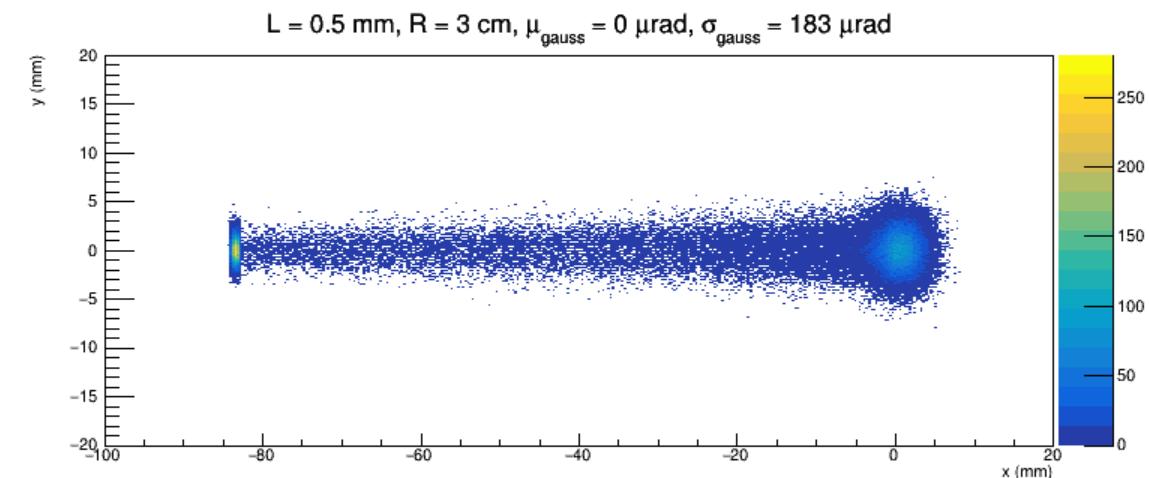
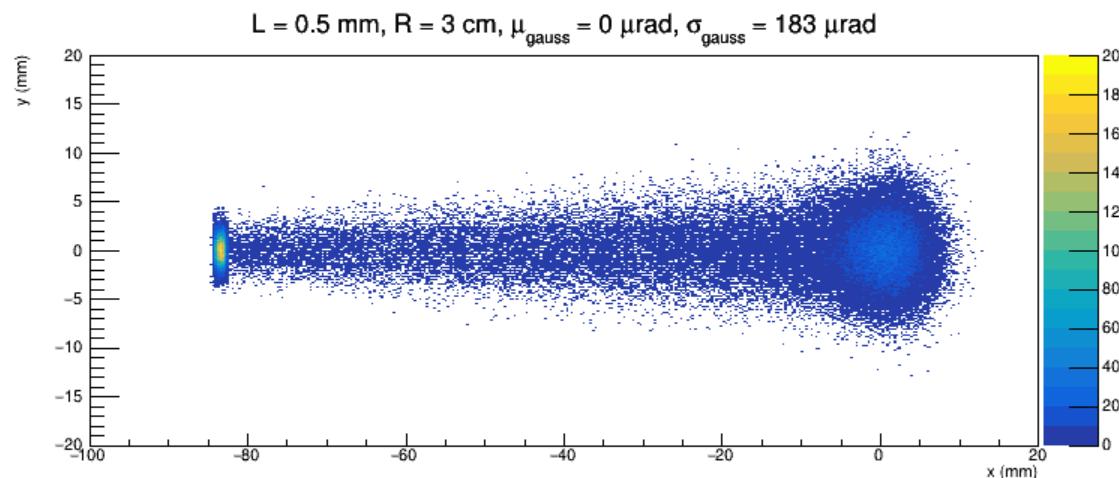
# 1 мм кристалл с изгибом 10 мрад - 500 и 1000 МэВ



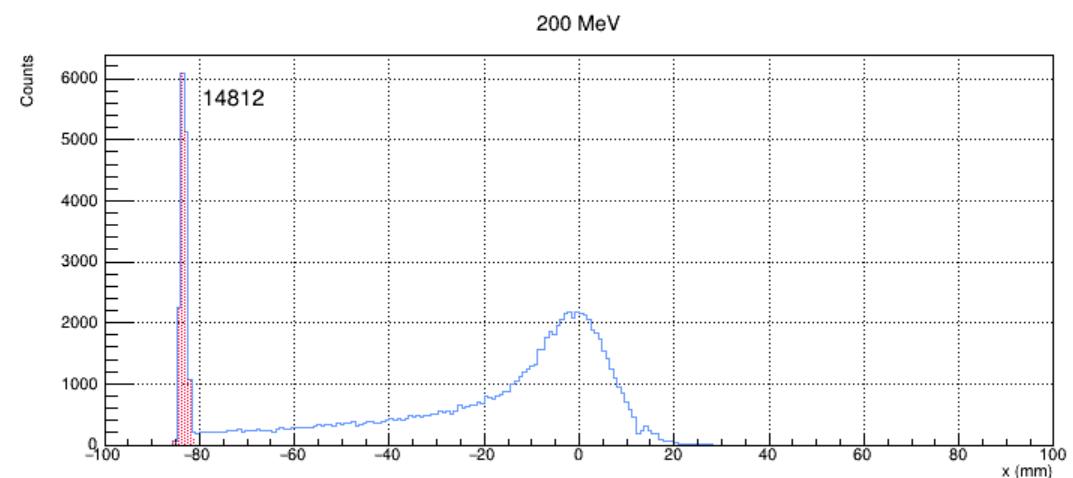
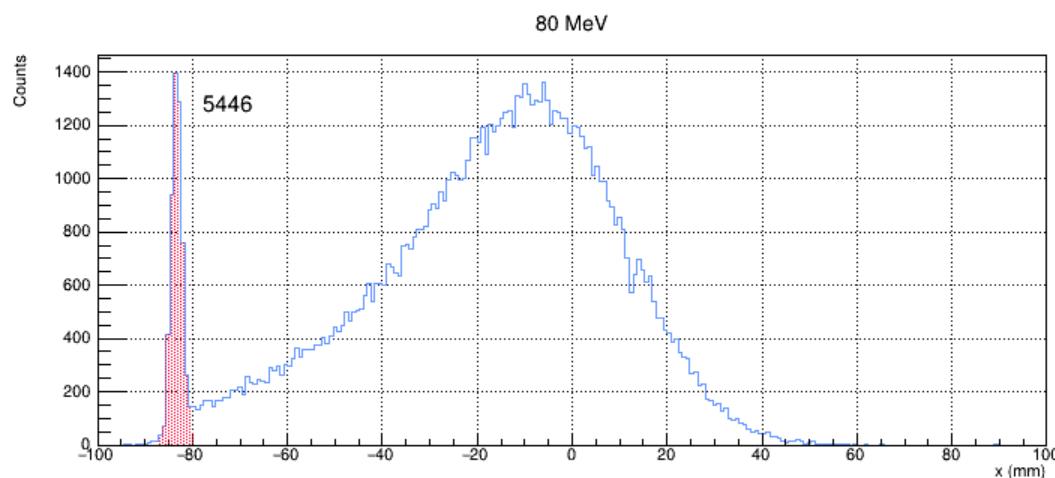
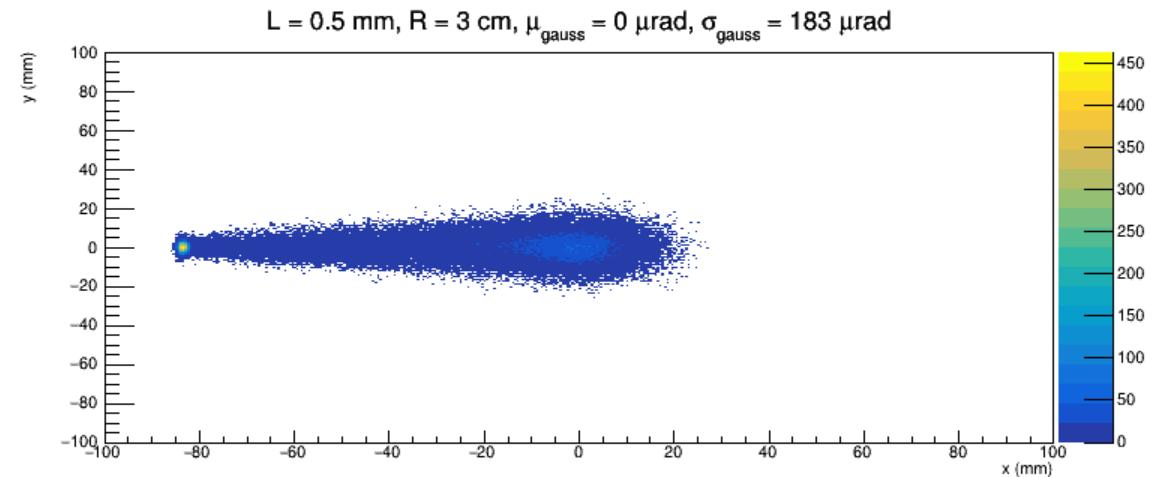
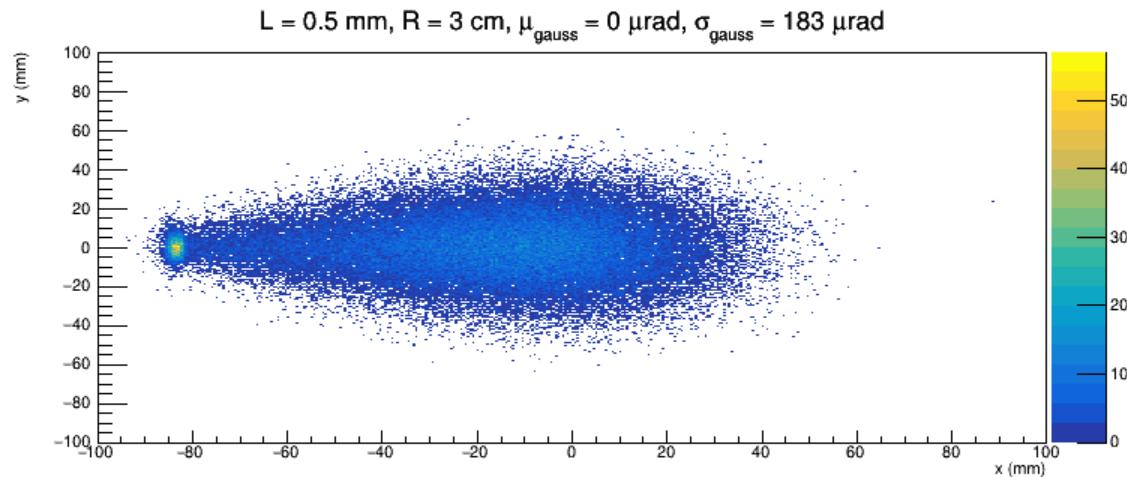
# 1 мм кристалл с изгибом 10 мрад - 80 и 200 МэВ



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



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



# Проблемы

---

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

# Планы

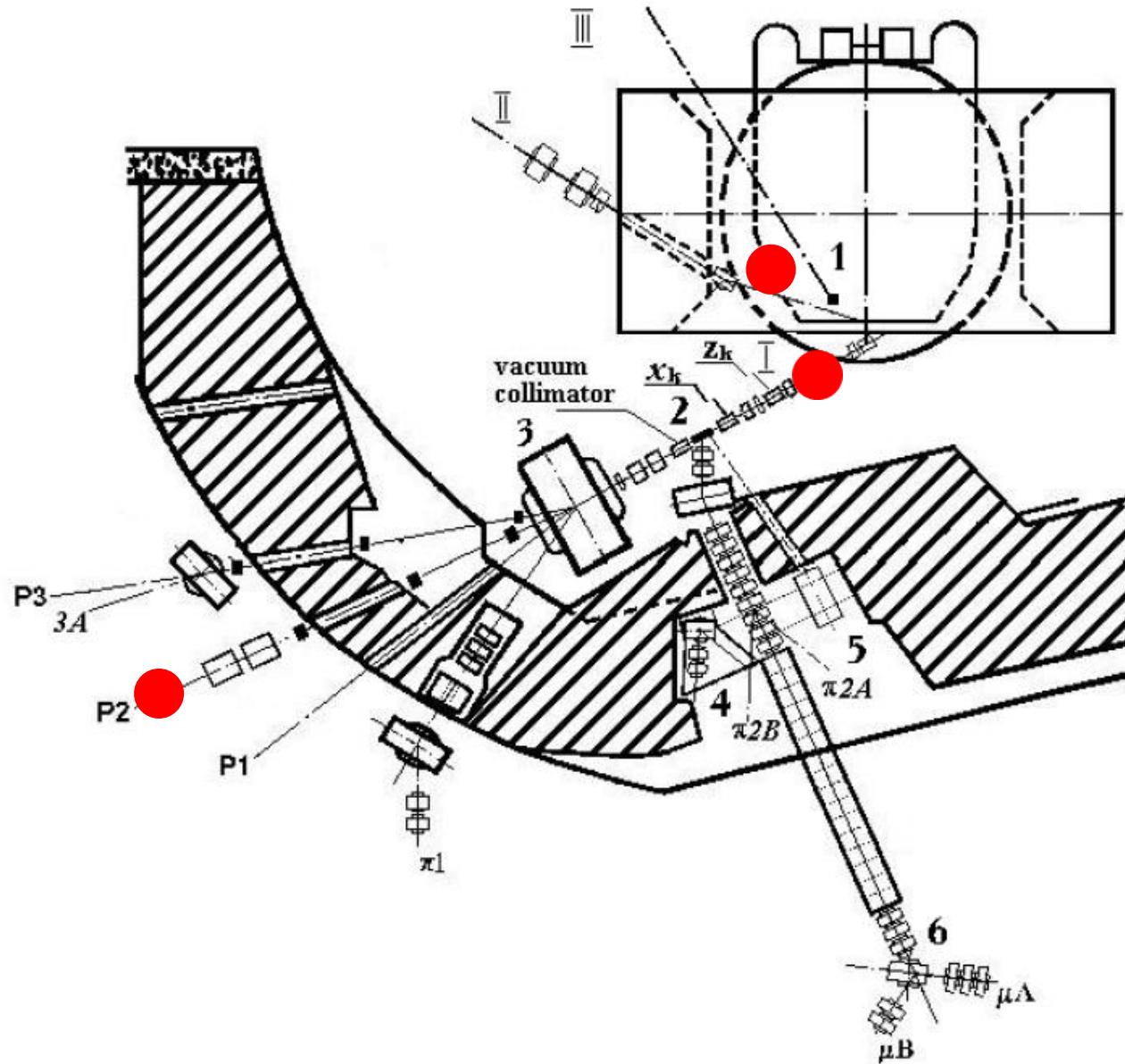
---

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

# Спасибо за внимание!

# Резервные слайды

# Синхроциклотрон и пучки



# Вывод пучка кристаллом

