



Новые результаты по каналированию 1 ГэВ протонов изогнутыми кристаллами кремния на синхроциклотроне ПИЯФ

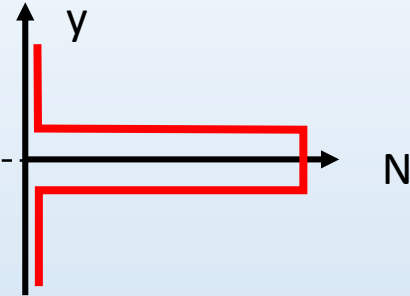
Ю. М. Иванов (НИЦ КИ - ПИЯФ)

+ Д.А. Амерканов, Б.Л. Горшков, Е.М. Иванов, П.Ю. Иванова, В.И. Мурзин, Э.В. Фомин

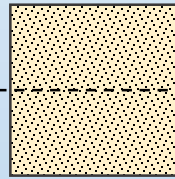
Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, 17 февраля 2025, Москва

Канализирование

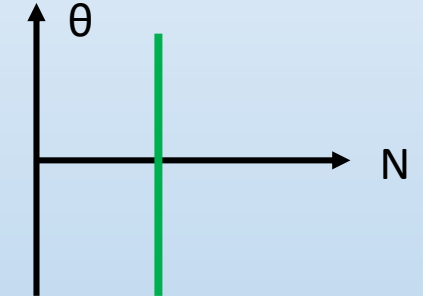
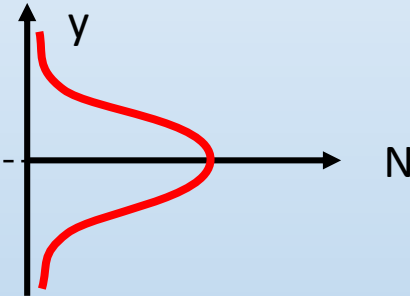
Параллельный пучок



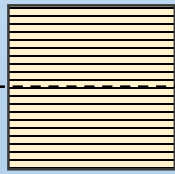
аморфное



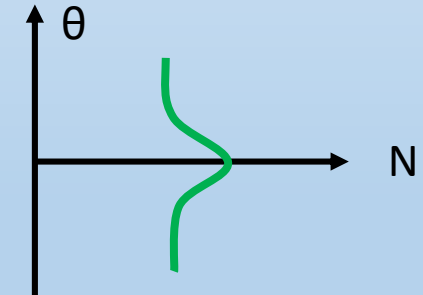
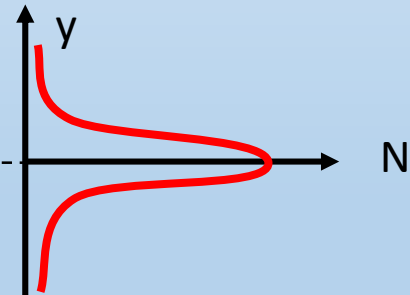
θ



кристаллическое



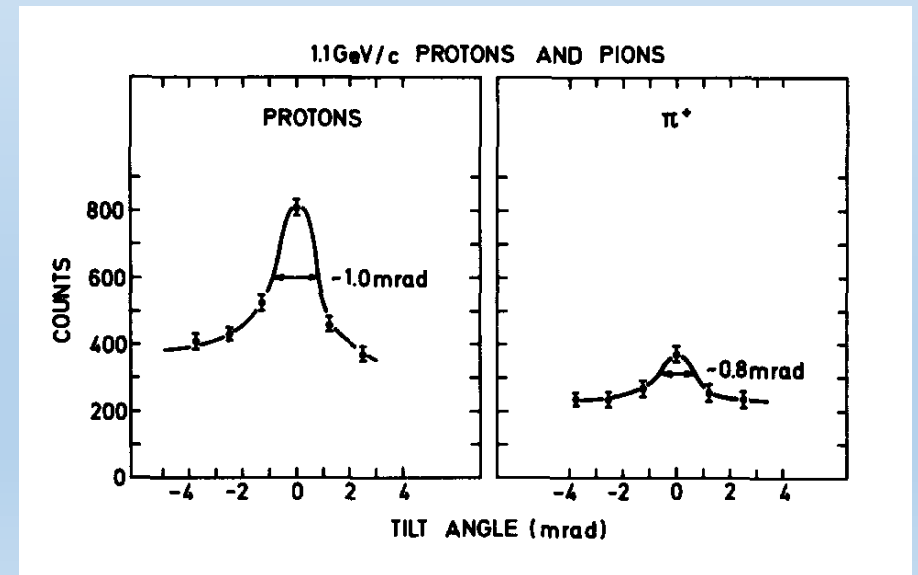
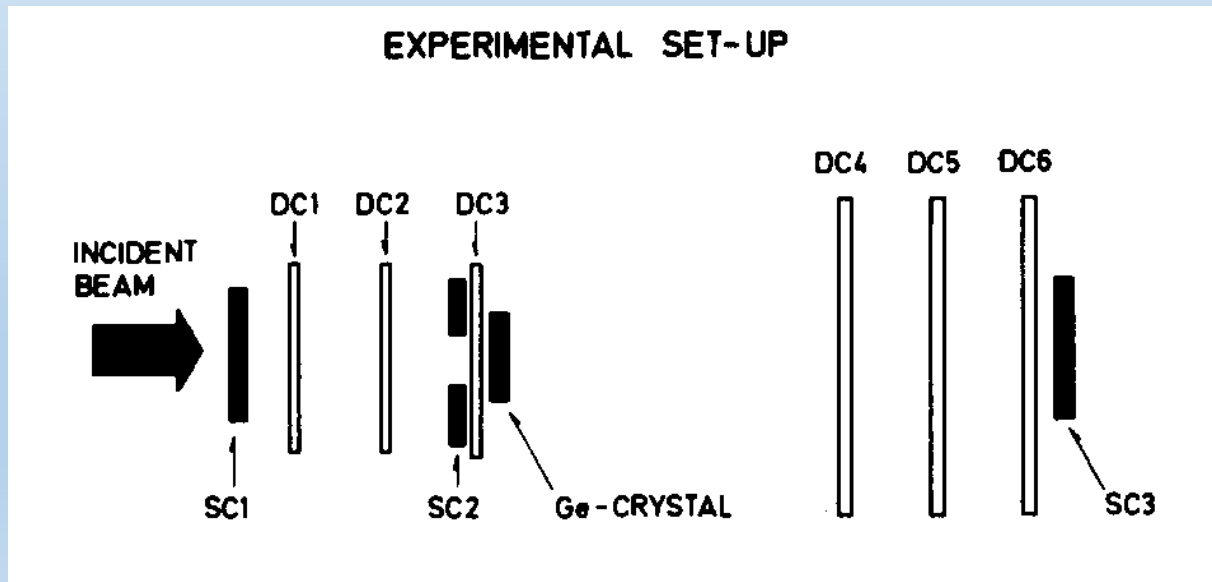
θ



Каналирование частиц высоких энергий в плоском кристалле, CERN

O. Fich, J.A. Golovchenko, K.O. Nielsen, E. Uggerhoj, G. Charpak and F. Sauli, **Channeling of 1.1 GeV/c protons and pions**, Physics Letters 57B (1975) 90

“... мы наблюдали каналирование положительных частиц в толстом кристалле как увеличение вероятности рассеяния вперед в условиях каналирования...”



Каналирование частиц высоких энергий в изогнутом кристалле, ОИЯИ

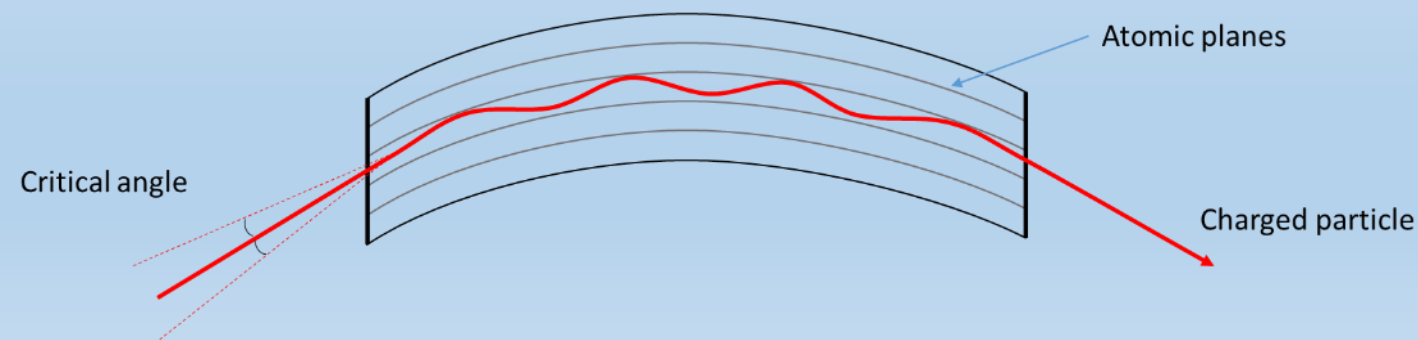
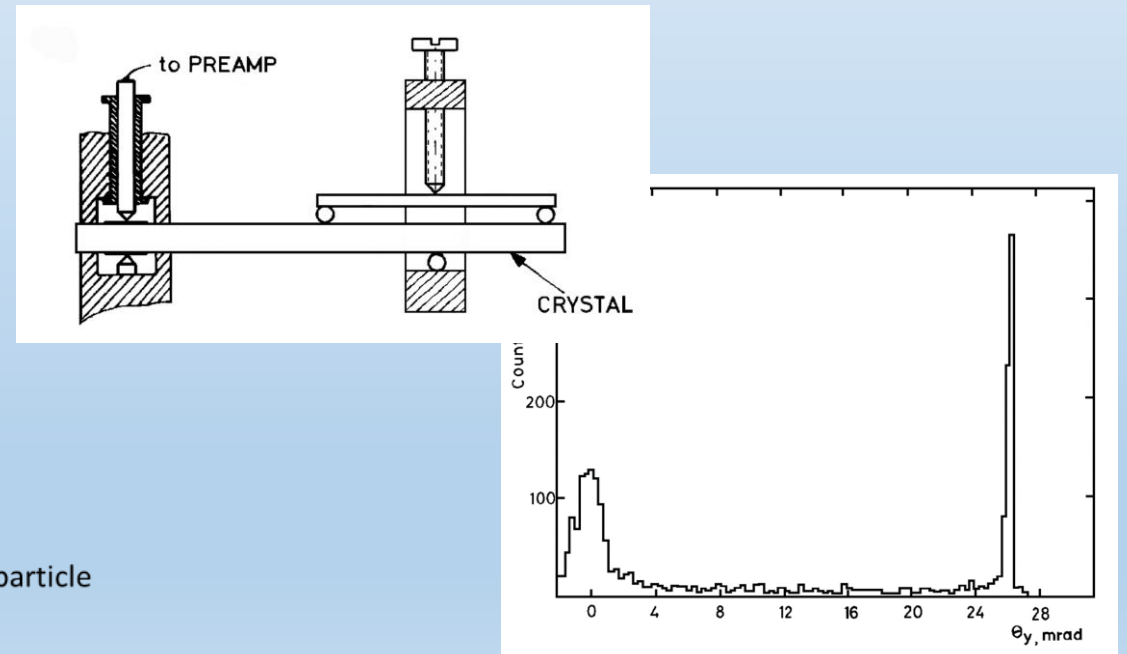
- Идея – Э.Н. Цыганов, 1976

E.N.Tsyganov, **Some aspects of the mechanism of a charge particle penetration through a monocrystal**, Fermilab TM-682, 1976

“До некоторого критического значения радиуса изгиба траектория частицы будет повторять форму изогнутого кристалла”.

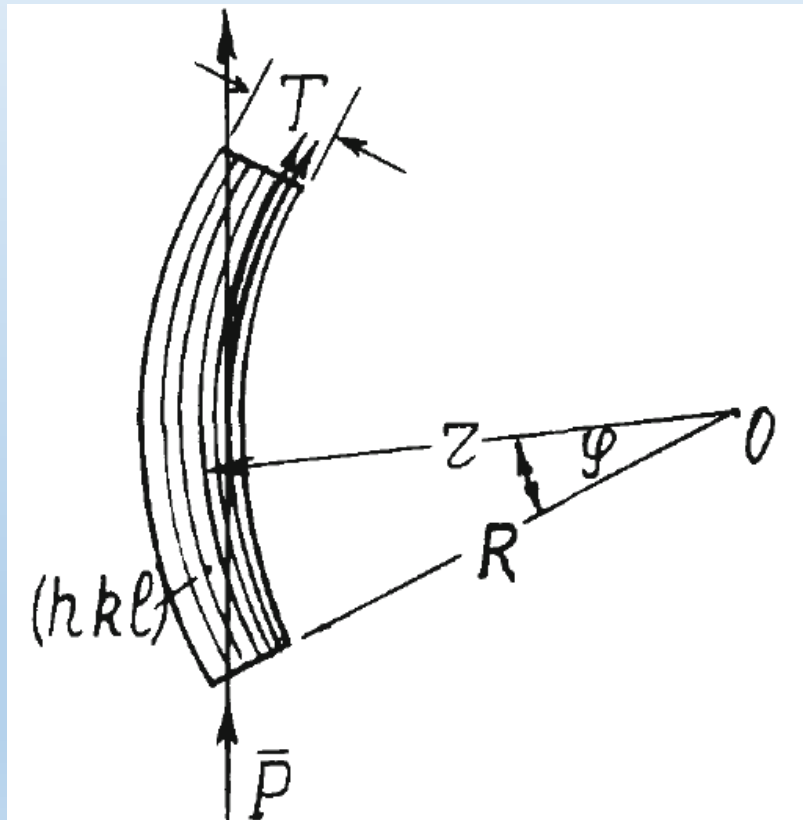
- Эксперимент – ОИЯИ, 1979

A.F.Elishev et al., **Steering of charged particle trajectories by a bent crystal**, Physics Letters 88B (1979) 387



Объемный захват частиц в изогнутом кристалле, ПИЯФ

- Идея – О.И. Сумбаев, 1980



- Эксперимент – ПИЯФ, 1982

В.А. Андреев и др., Экспериментальное обнаружение эффекта объемного захвата в режим каналирования изогнутым монокристаллом, Письма в ЖЭТФ, том 36, выпуск 9, стр. 340, 1982

«... показано, что изогнутый монокристалл обладает способностью захватывать частицы в режим каналирования в интервале углов много больших, чем угол Линдхарда. Протоны с энергией 1 ГэВ захватывались в процесс каналирования (111), (110) – плоскостями и $\langle 110 \rangle$ - осью по всей длине 1 см изогнутого по радиусу 46 см монокристалла кремния в суммарном угловом интервале до 20 мрад.»

Объемное отражение частиц в изогнутом кристалле

- Моделирование – А.М. Таратин и С.А. Воробьев, 1986

А.М. Таратин и С.А. Воробьев, **Аномальное отклонение пучка заряженных частиц изогнутым монокристаллом**, Журнал технической физики, том 56, выпуск 5, стр. 960, 1986

«... компьютерным моделированием траекторий частиц обнаружен новый эффект при прохождении заряженных частиц через изогнутый кристалл — отклонение части пучка в сторону, противоположную изгибу.»



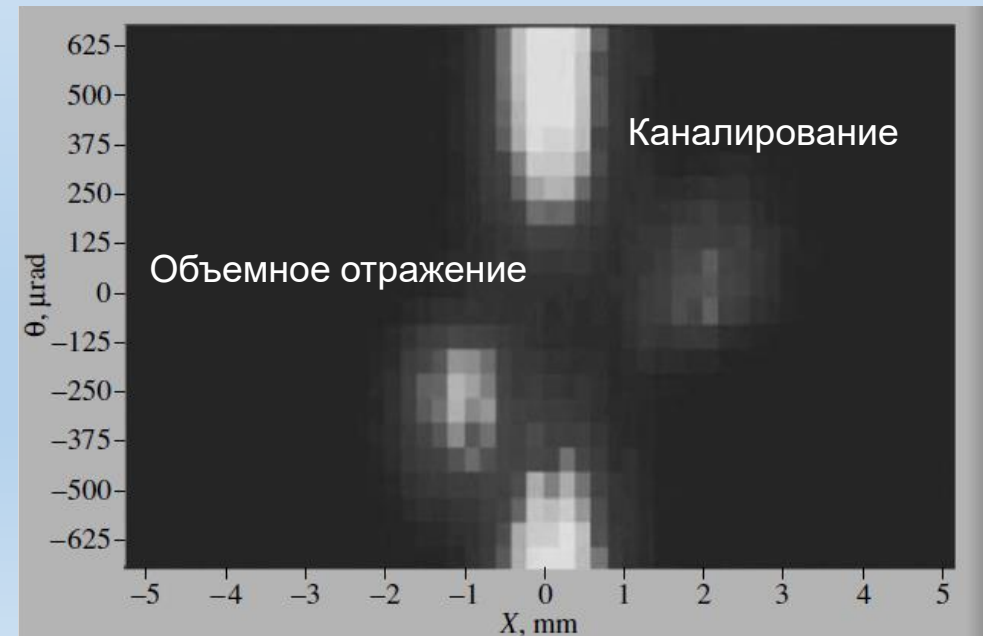
1 – Канализованные частицы

2 – Объемно-отраженные частицы

- Эксперимент – ПИЯФ-ИФВЭ, 2006

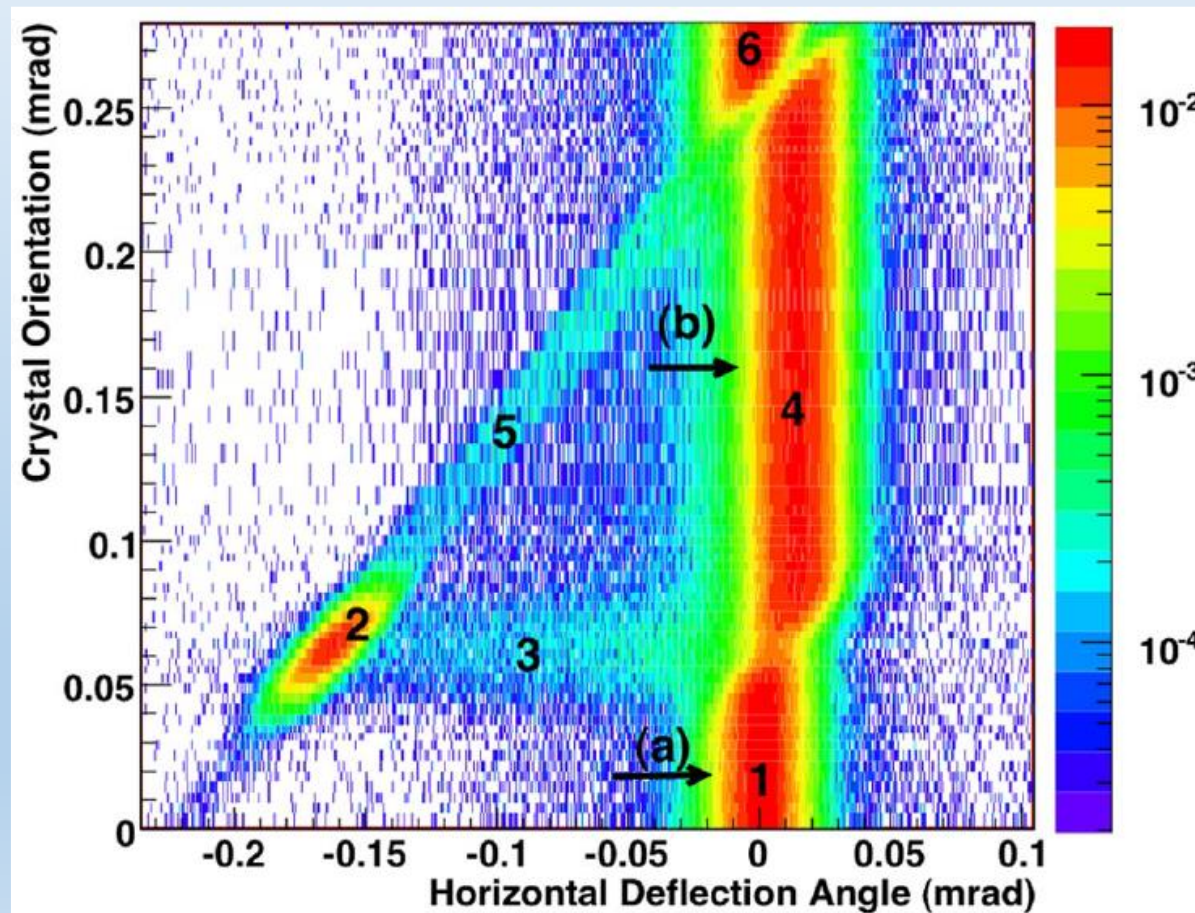
Ю.М.Иванов и др., **Объемное отражение протонов с энергией 1 ГэВ изогнутым кристаллом кремния**, Письма в ЖЭТФ, том 84, выпуск 7, стр. 445, 2006

«Наблюдено объемное отражение протонов с энергией 1 ГэВ изогнутым кристаллом ...» длиной по пучку 30 мкм, при которой многократное кулоновское рассеяние много меньше угла Линдхарда.



Каналирование, деканалирование, объемный захват и объемное отражение протонов с энергией 400 ГэВ, CERN

W.Scandale et al., [High-efficiency volume reflection of an ultrarelativistic proton beam with a bent silicon crystal](#), Phys. Rev. Letters 98, 154801 (2007)



- 1 – неориентированный кристалл
- 2 – каналирование
- 3 – деканалирование
- 4 – объемное отражение
- 5 – объемный захват
- 6 – неориентированный кристалл

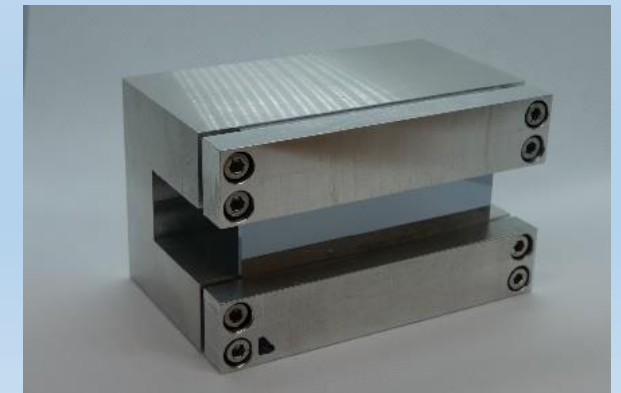
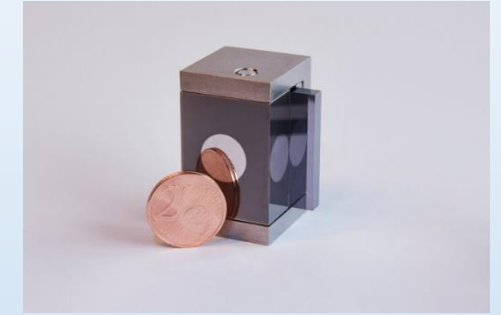
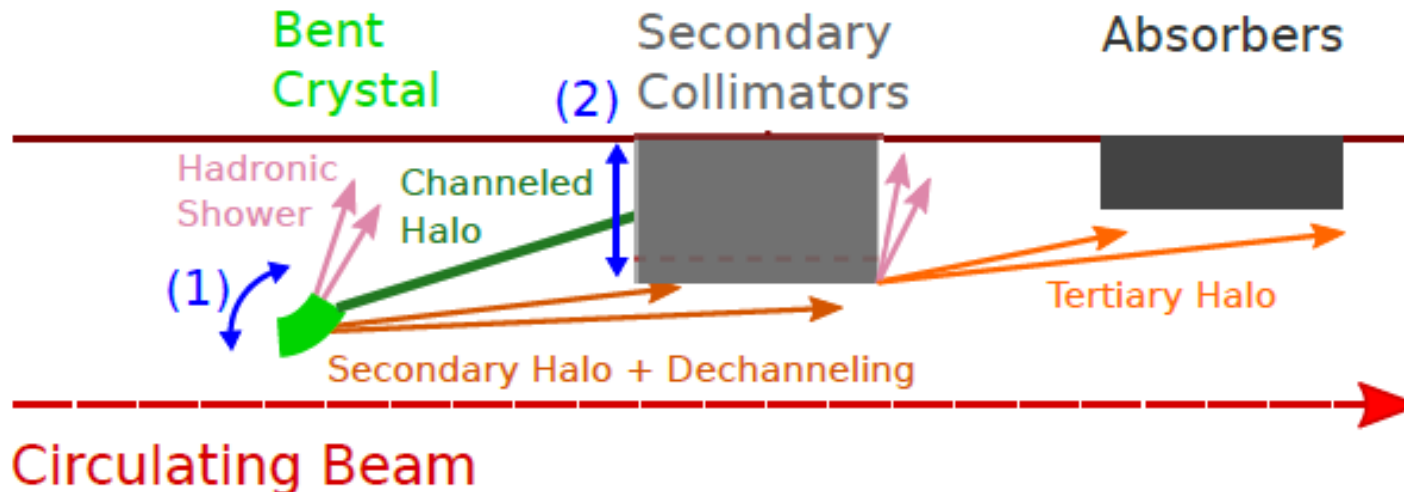
Коллимация и вывод пучков LHC изогнутыми кристаллами

ПИЯФ внес существенный вклад в исследования и разработки кристаллооптических методов на ускорителях высоких энергий SPS и LHC в CERN (проекты H8-RD22, UA9, HL-LHC):

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

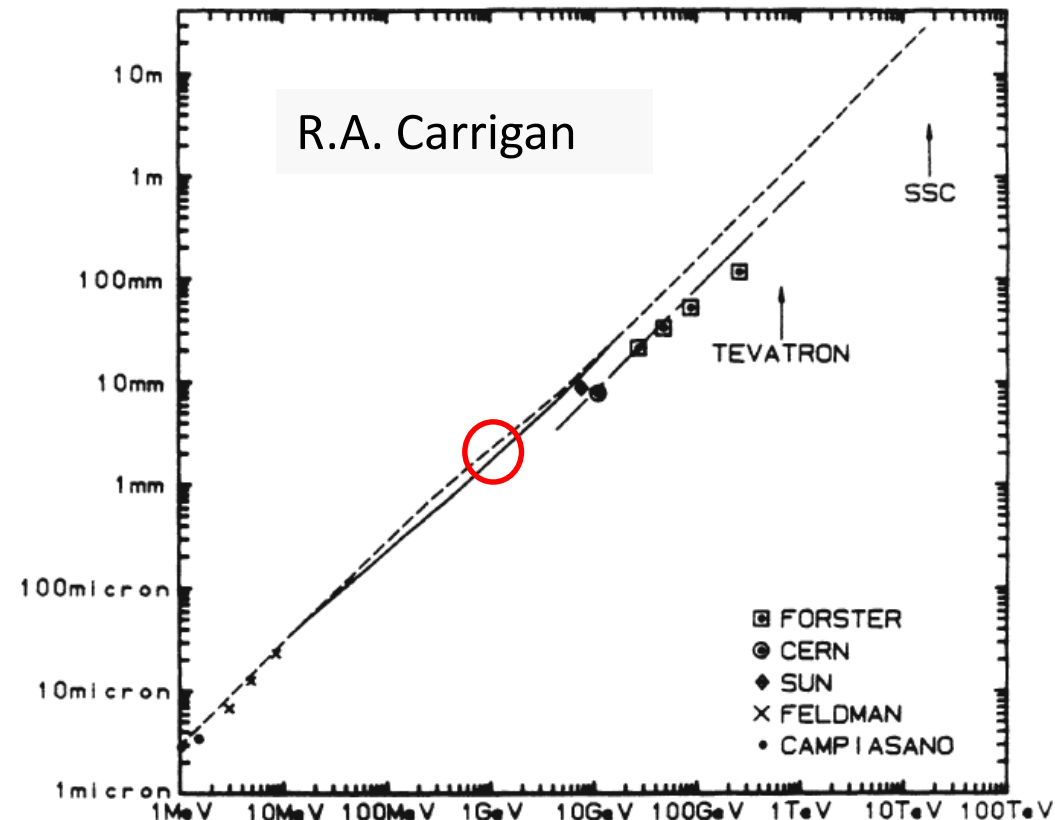
<https://accelconf.web.cern.ch/ipac2019/papers/wepmp028.pdf>

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



Возможно ли перенести накопленный в CERN опыт на область ≤ 1 ГэВ ?

На синхроциклотроне ПИЯФ начаты работы по исследованию возможностей кристаллооптики заряженных частиц в области промежуточных энергий ≤ 1 ГэВ. Для получения больших углов необходимо использовать эффект каналирования. Основная трудность и ограничения возникают из-за деканалирования.



Длина деканалирования существенно влияет на выбор рабочих размеров кристалла и схемы изгиба. При энергии 1 ГэВ длина деканалирования составляет около 1 мм.

Эксперимент

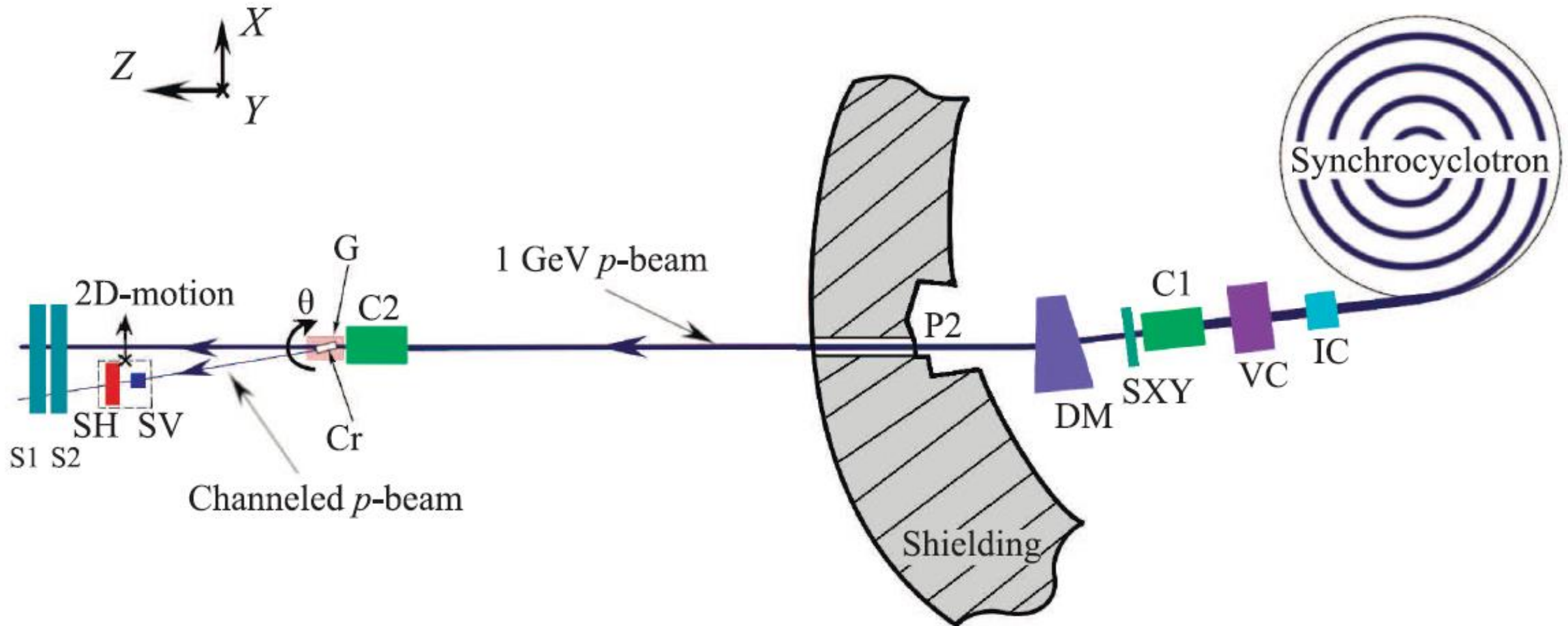
На начальном этапе была подготовлена серия кристаллов длиной в направлении пучка 1 миллиметр с изгибом 2-4 миллирадиан и выполнен успешный эксперимент, в котором наблюдается **отклонение протонов на угол 3 миллирадиана с эффективностью 30%**. Результат опубликован в статье:

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>

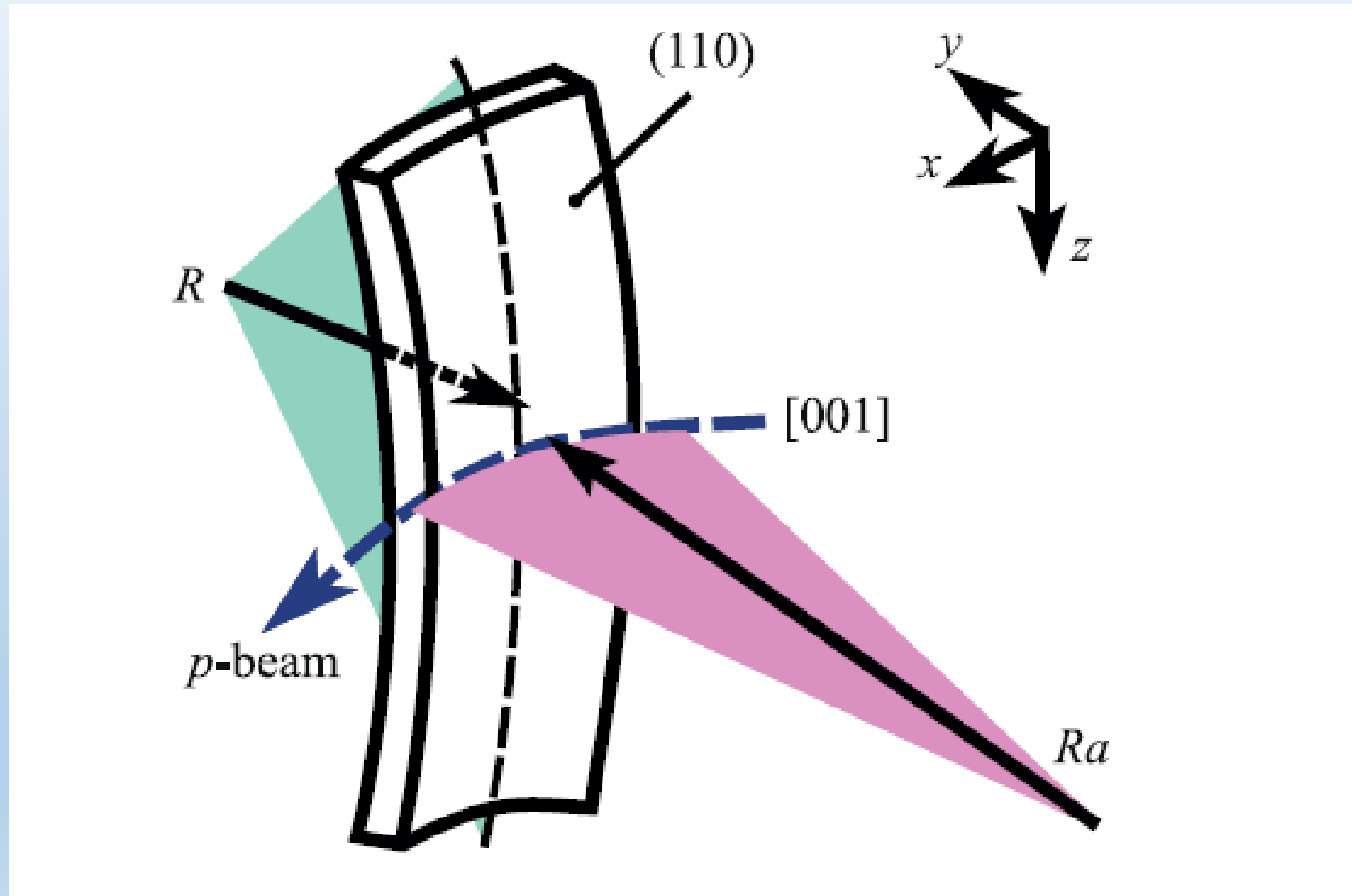
Синхроциклотрон ПИЯФ



Экспериментальная установка для исследования каналирования в изогнутых кристаллах на синхроциклотроне ПИЯФ

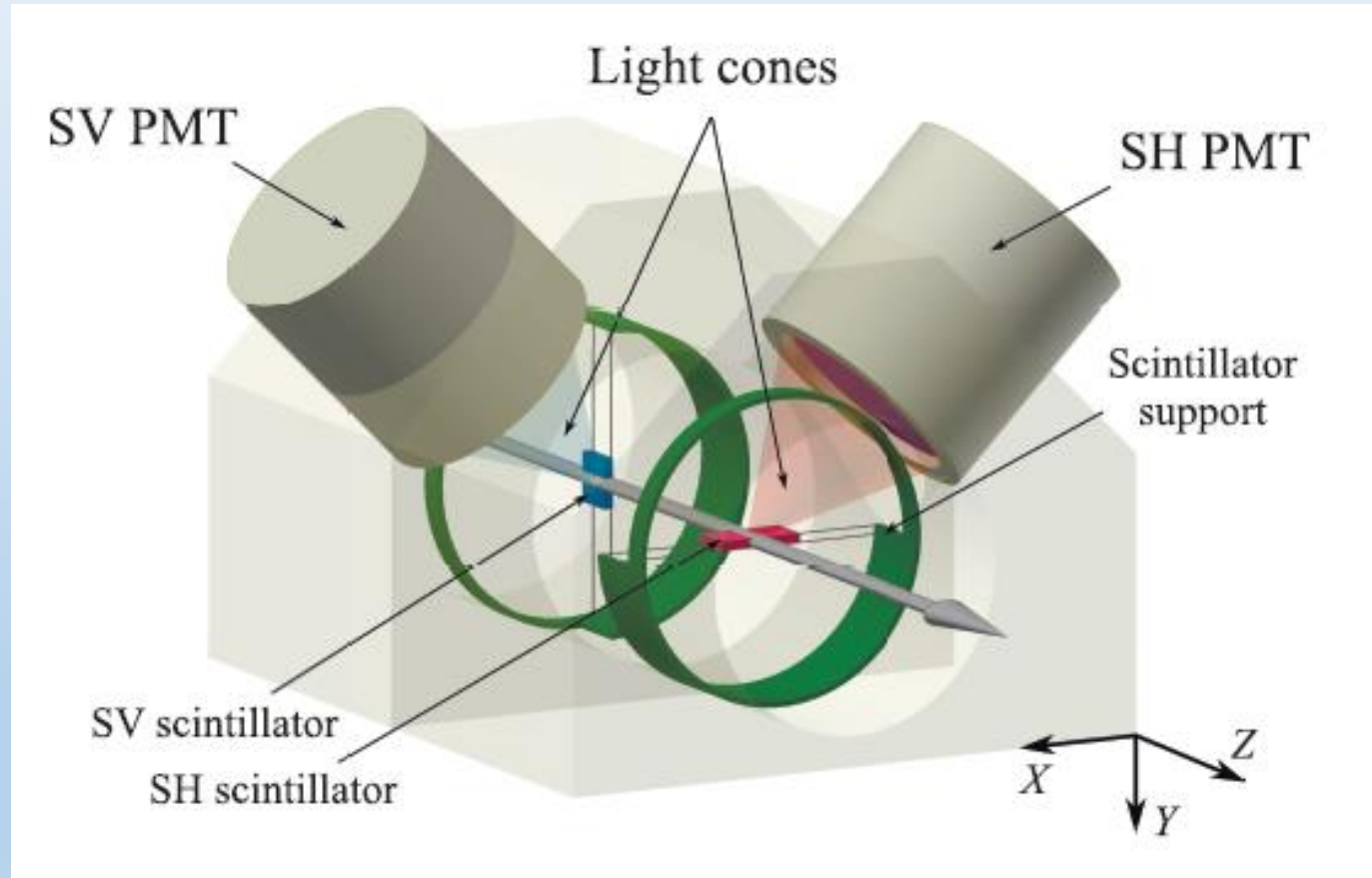


Кристалл и схема изгиба



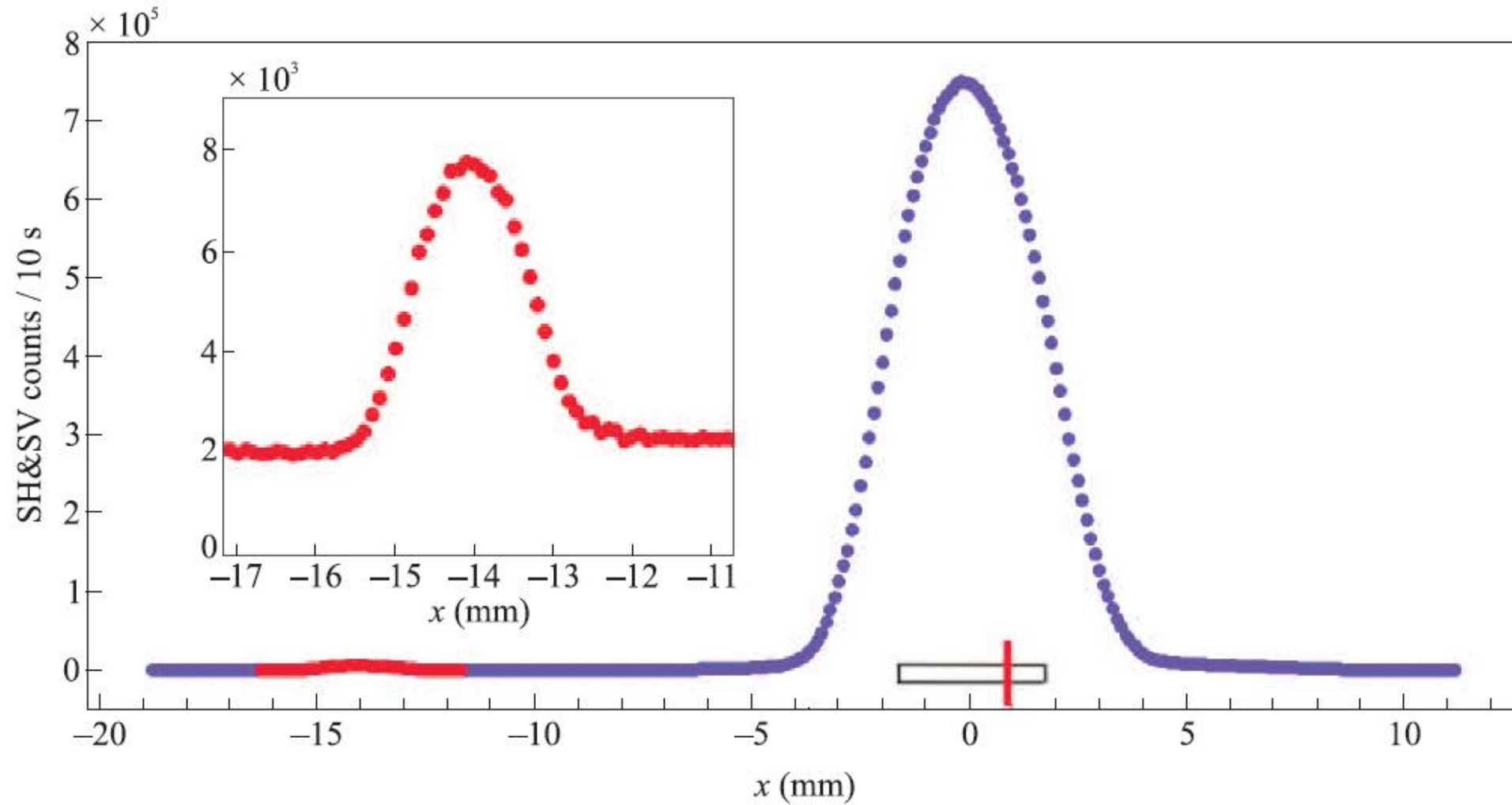
Размеры кристалла
0.1 x 1.0 x 30 мм³

Детектор - сцинтилляционный профилометр протонного пучка

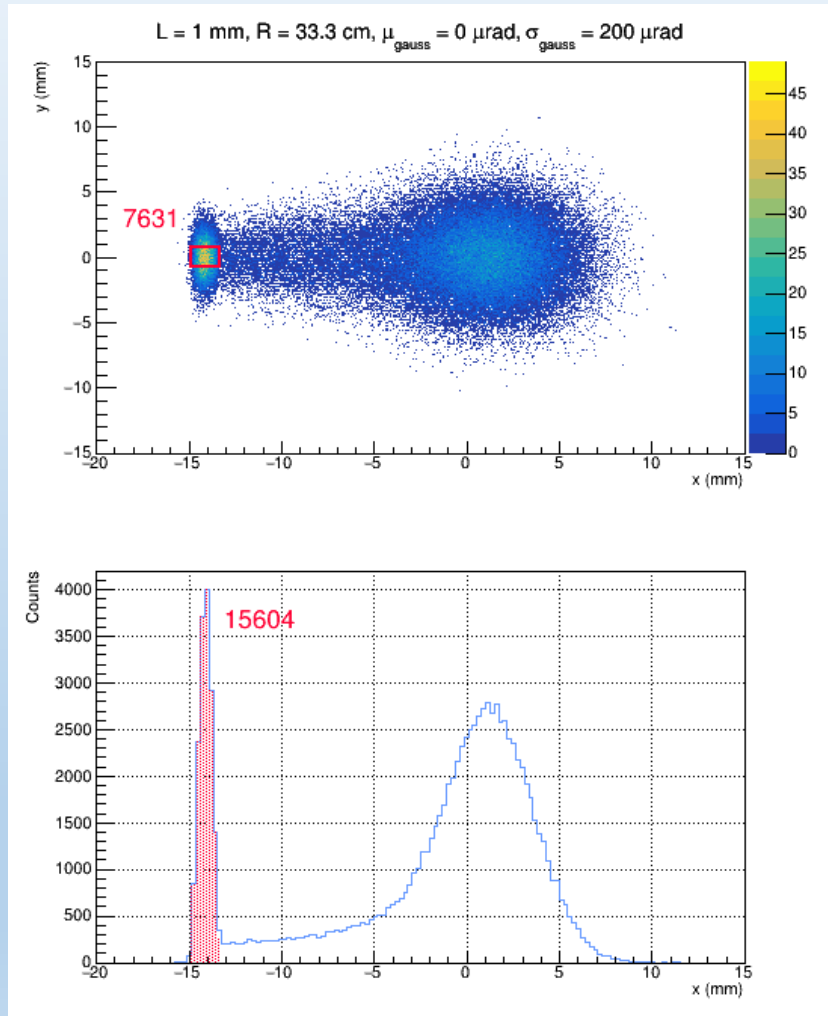


**Поперечные
размеры детектора
1.5 x 1.5 мм²**

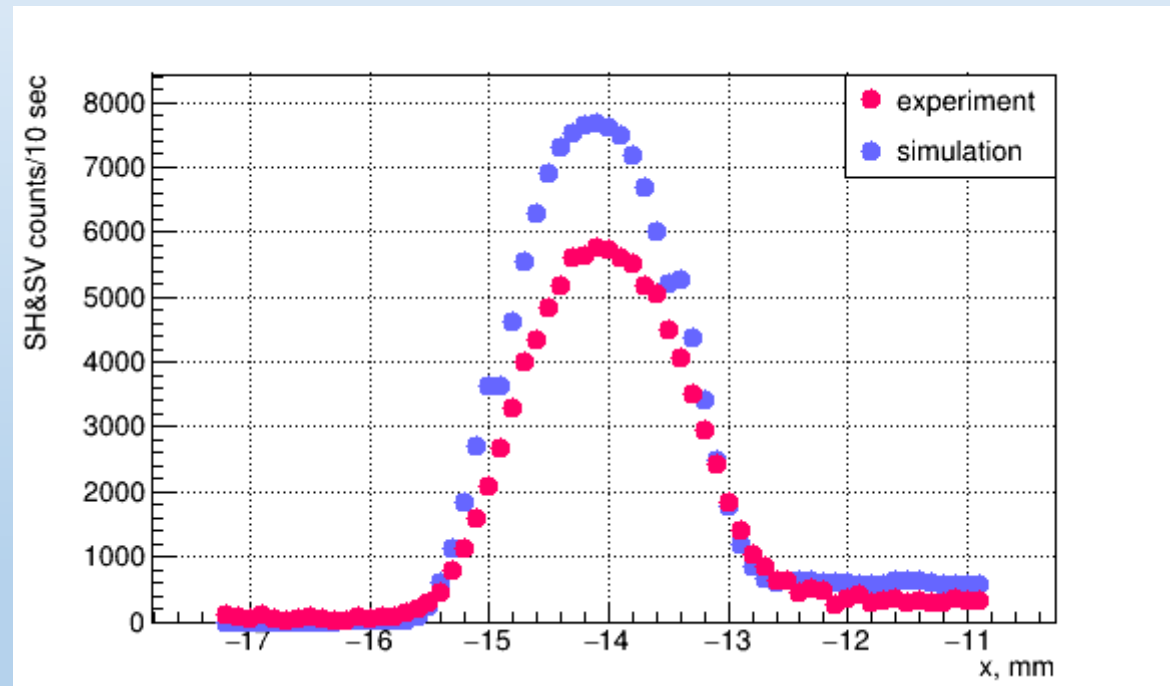
Результат первого эксперимента



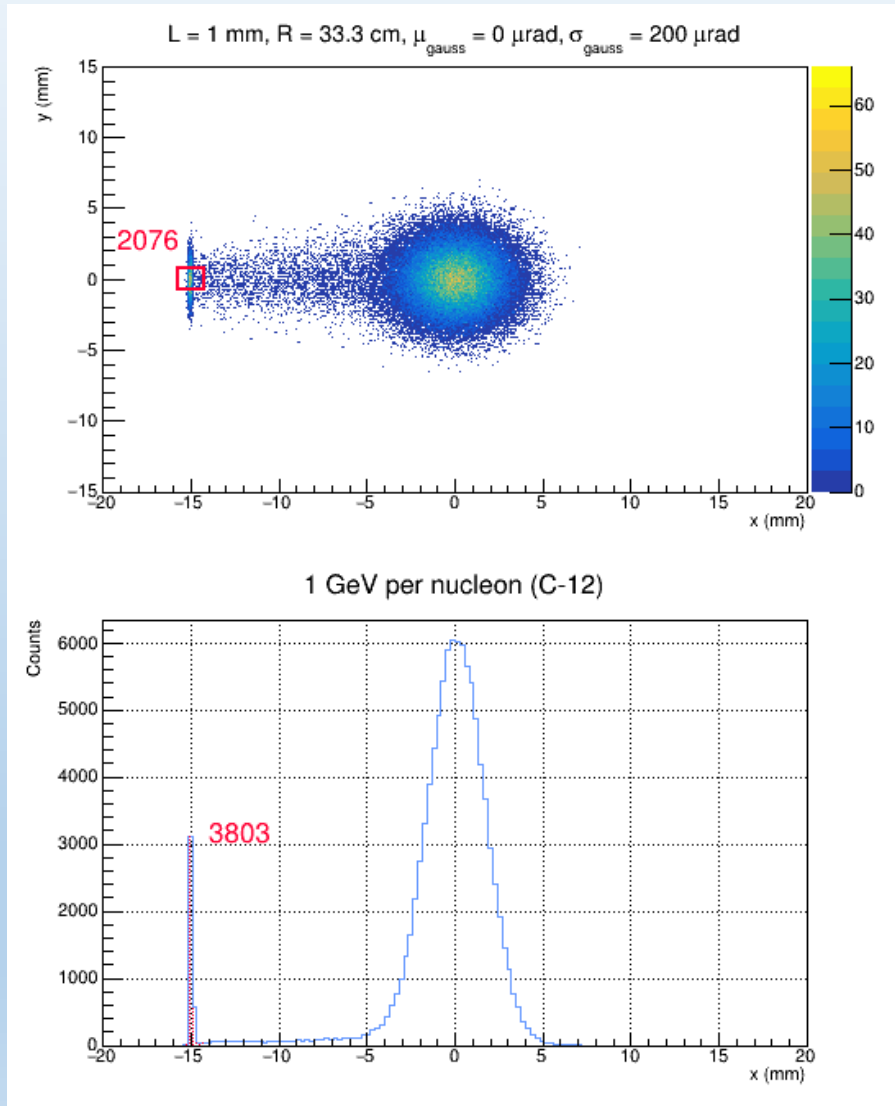
В 2024 разработана программа моделирования эксперимента



Удовлетворительное согласие измеренных профилей каналированного пучка с результатами моделирования



1 мм кристалл с изгибом 3 мрад, 1 ГэВ/нукл C¹²



Моделирование пучка ионов углерода, каналированного 1 мм кристаллом с изгибом 3 мрад

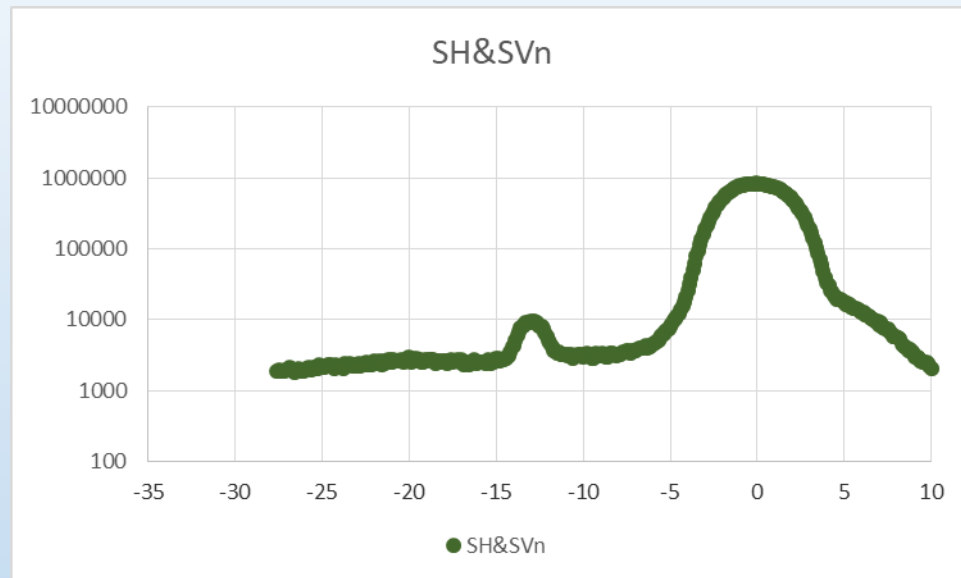
Новые экспериментальные исследования в 2024 году

Подготовлена 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:

- **увеличение угла отклонения частиц до 6.4 миллирадиан** с 3 мм кристаллом,
- **измерена длина деканализирования** 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 канализирования

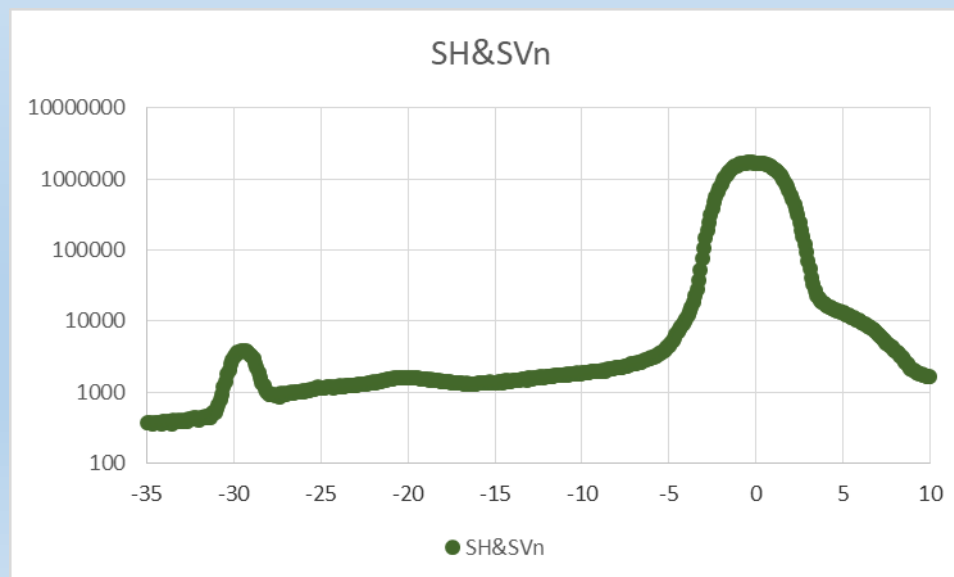
Отклоненные пучки с 1 мм и 3 мм кристаллами



Угол отклонения 3 мрад



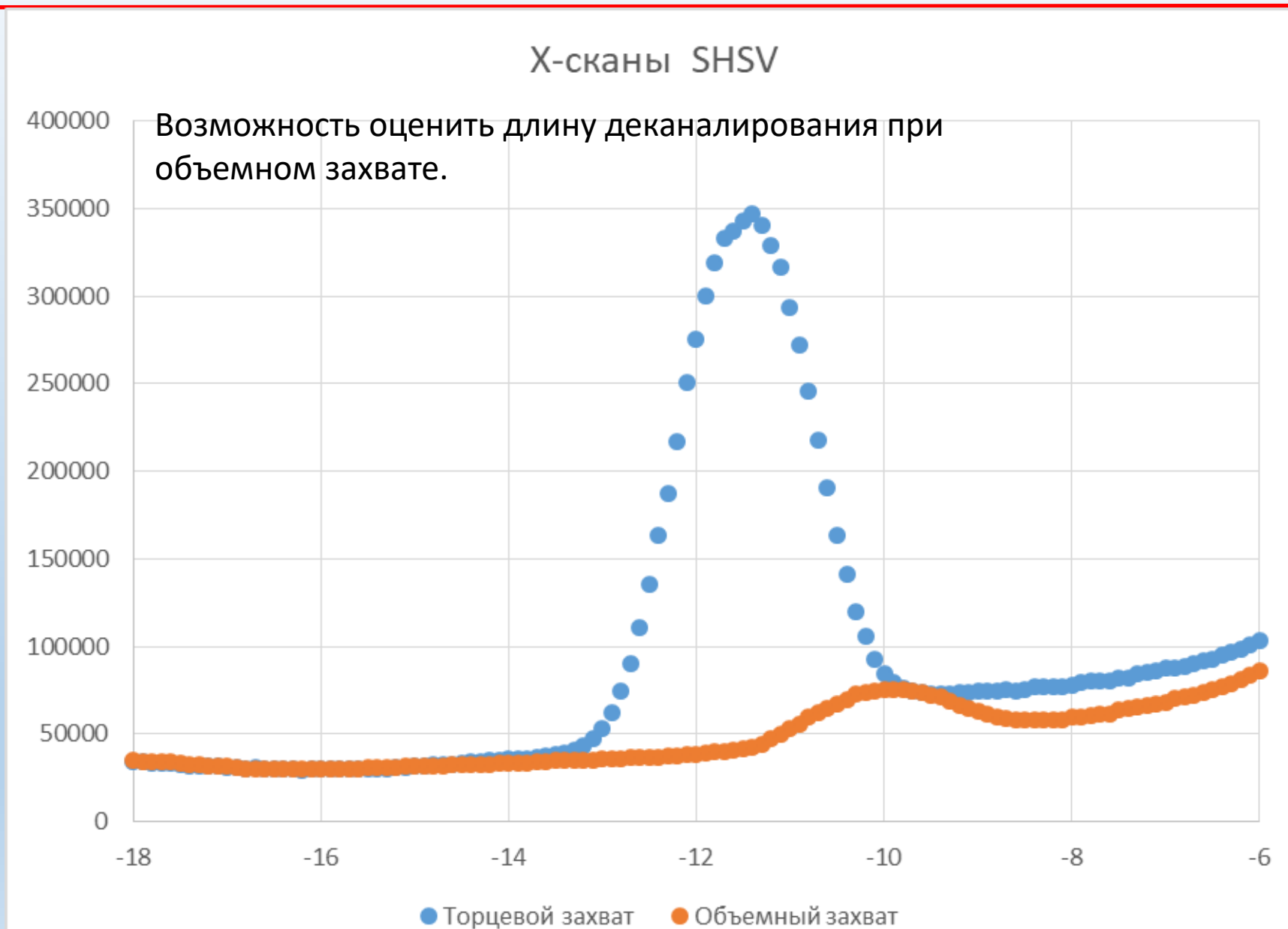
Длина деканализования
 1.6 ± 0.3 мм



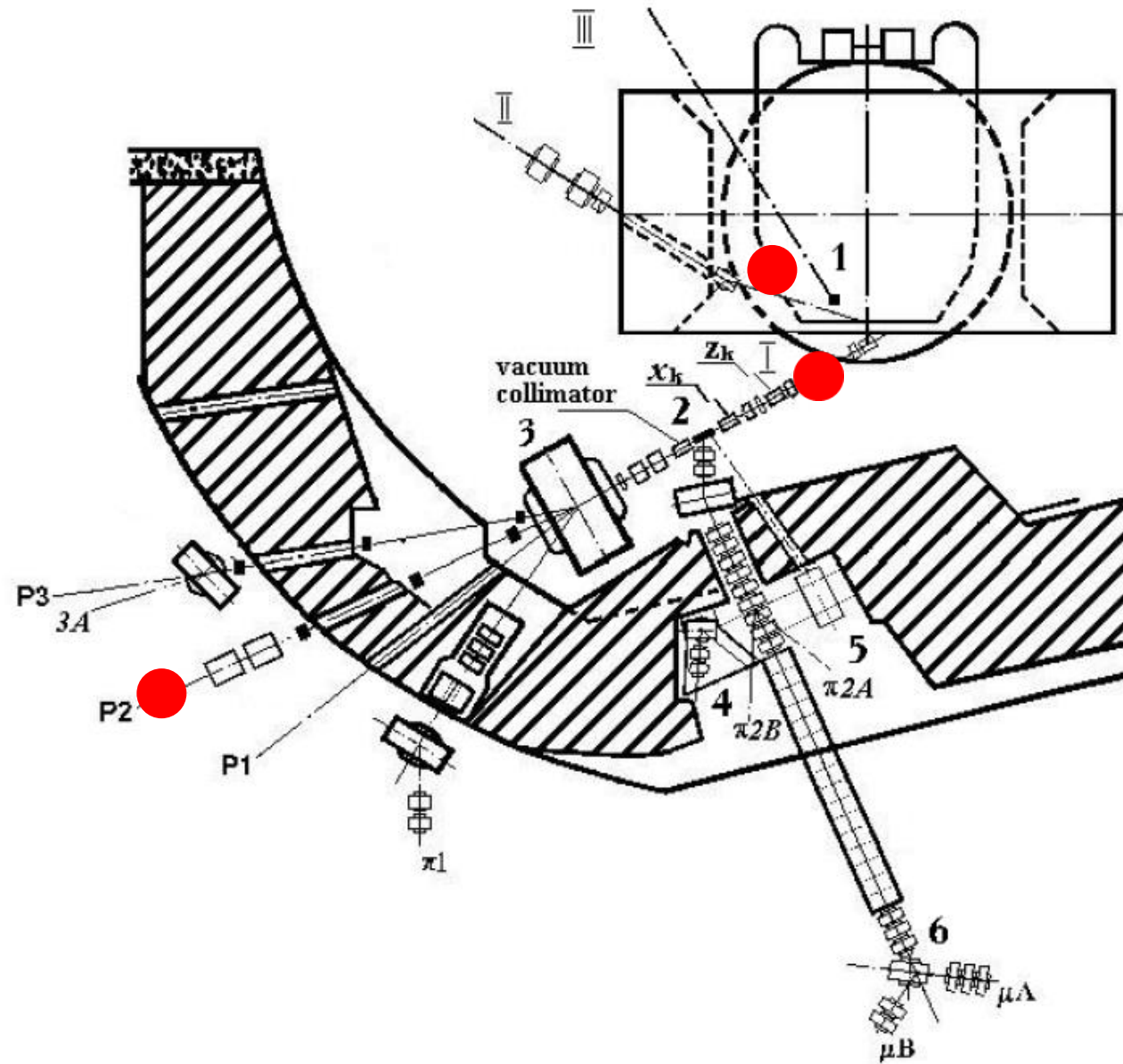
Угол отклонения 6.4 мрад



Отклоненные пучки при торцевом и объемном захвате



Планы дальнейших опытов с кристаллами



- Физика каналирования
- Расщепление интенсивного выведенного пучка
- Вывод пучка из камеры СЦ-1000

Спасибо за внимание!