



О выводе протонного пучка из камеры синхроциклотрона ПИЯФ с помощью изогнутого кристалла

Ю. М. Иванов (НИЦ КИ - ПИЯФ)

+ Д.А. Амерканов, С.А. Артамонов, Е.М. Иванов, П.Ю. Иванова, А.В. Илатовский

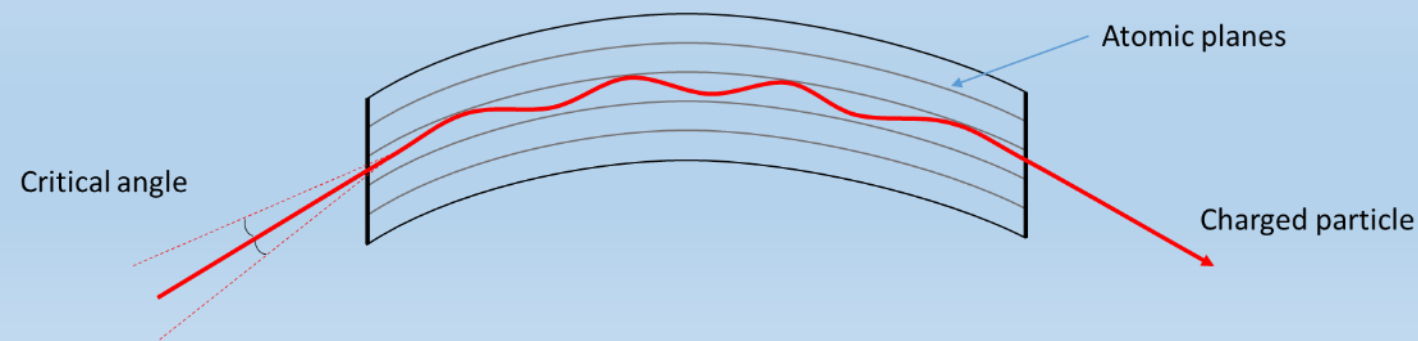
LXXV International Conference «NUCLEUS –2025», 1-6 July 2025, S-Petersburg

Каналирование частиц высоких энергий в изогнутом кристалле

- Идея – Э.Н. Цыганов, 1976

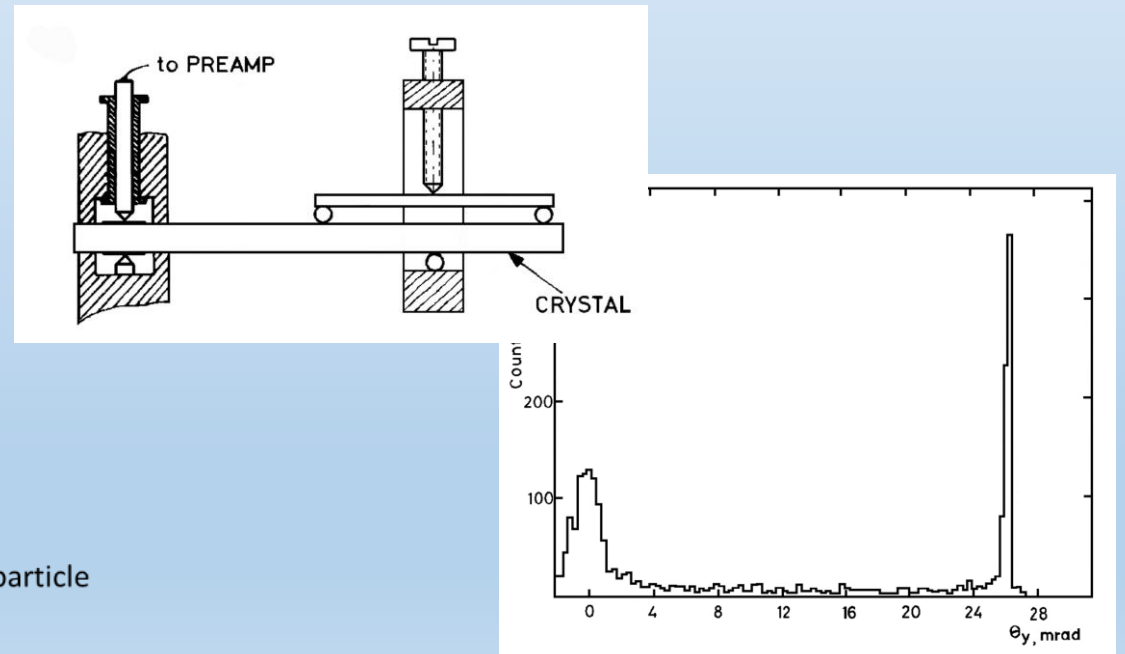
E.N.Tsyganov, **Some aspects of the mechanism of a charge particle penetration through a monocrystal**, Fermilab TM-682, 1976

“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



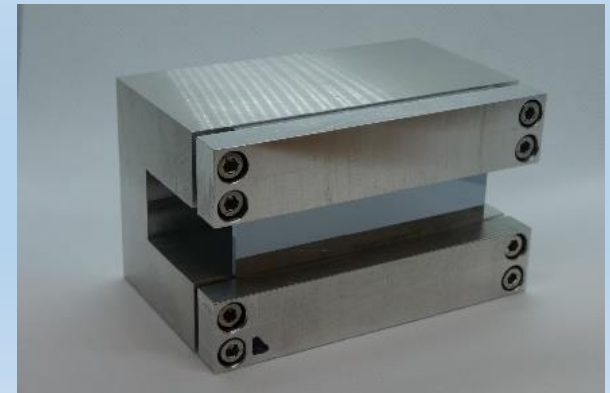
Разработки и исследования ПИЯФ для LHC

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>



Коллимация ионных пучков ЛНС изогнутыми кристаллами

PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS 28, 051001 (2025)

Crystal collimation of heavy-ion beams at the Large Hadron Collider

S. Redaelli^{1,*}, O. Aberle¹, A. Abramov¹, R. Bruce¹, R. Cai^{1,2}, M. Calviani¹,
M. D'Andrea¹, Q. Demassieux¹, K. Dewhurst¹, M. Di Castro¹, L. S. Esposito¹,
S. Gilardoni¹, P. D. Hermes¹, B. Lindström¹, A. Lechner¹, A. Masi¹, E. Matheson¹,
D. Mirarchi¹, J.-B. Potoine¹, G. Ricci¹, V. Rodin¹, R. Seidenbinder¹, S. Solis Paiva¹,
L. Bandiera³, V. Guidi³, A. Mazzolari³, M. Romagnoni³, M. Tamisari³,
Y. Gavrikov¹, and Y. Ivanov¹

¹CERN, European Organization for Nuclear Research, CH-1211 Geneva 23, Switzerland

²École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland

³Istituto Nazionale di fisica Nucleare, INFN, Sezione Ferrara, Italy



(Received 30 December 2024; accepted 21 February 2025; published 1 May 2025)

An important upgrade has been deployed for the collimation system of the Large Hadron Collider (LHC) for lead-ion beams that are already planned to reach their high-luminosity target intensity upgrade in the ongoing LHC Run 3 (2022–2026). While certain effects like e-cloud, beam-beam, impedance, injection, and dump protection are relaxed with ion beams, halo collimation becomes an increasing challenge, as the conventional multistage collimation system is about two orders of magnitude less efficient than that for proton beams. Ion fragments scattered out of the collimators in the betatron cleaning insertion risk quenching the cold dipole magnets downstream and may represent performance limitations. Planar channeling in bent crystals has been proven effective for high-energy heavy ions. A crystal collimation system was integrated into the LHC as a baseline solution for collimation in the High-Luminosity LHC

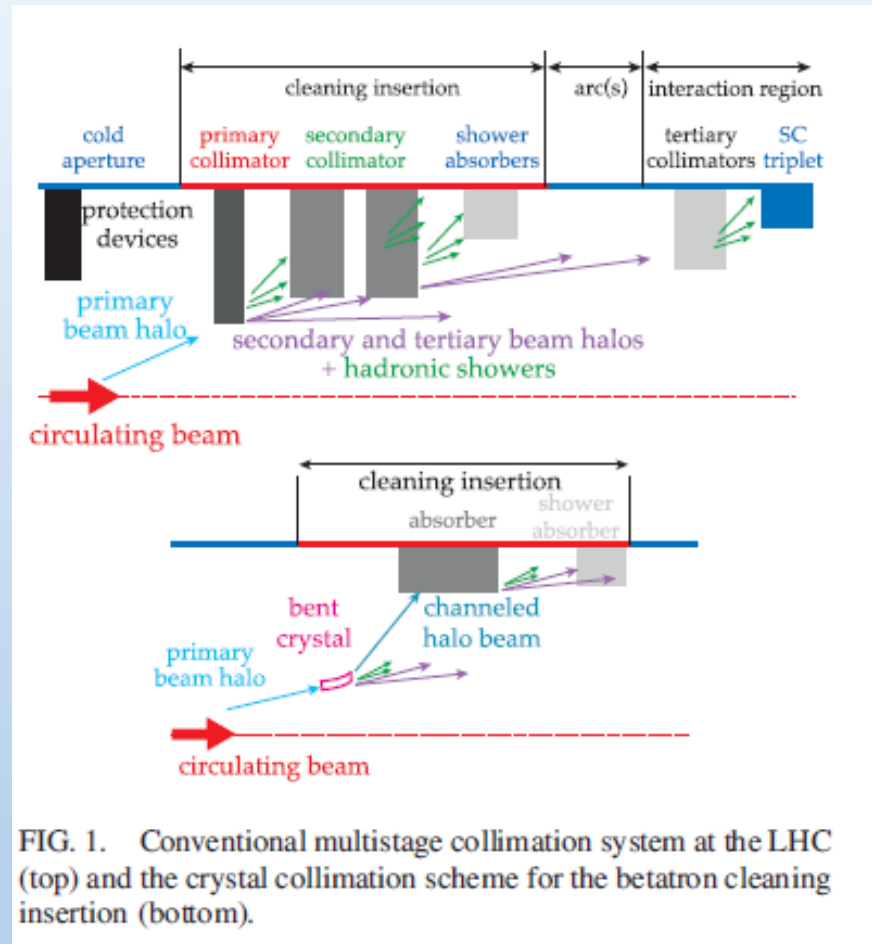
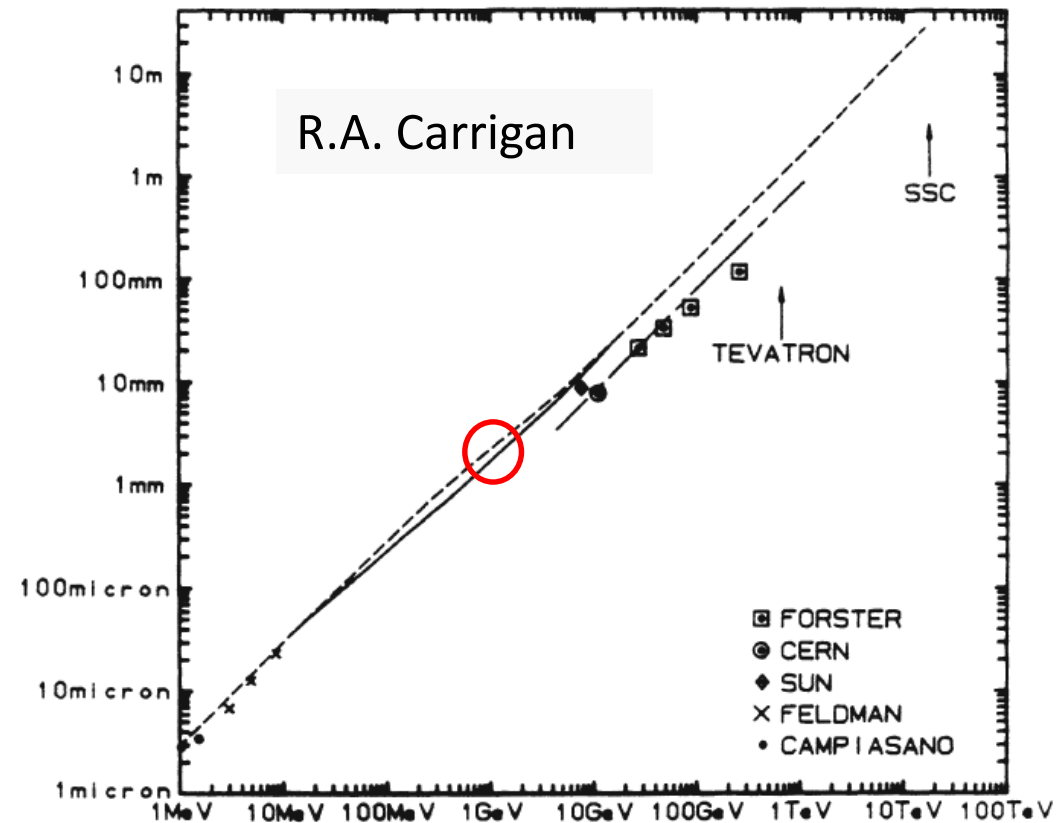


FIG. 1. Conventional multistage collimation system at the LHC (top) and the crystal collimation scheme for the betatron cleaning insertion (bottom).

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.

Синхроциклотрон ПИЯФ

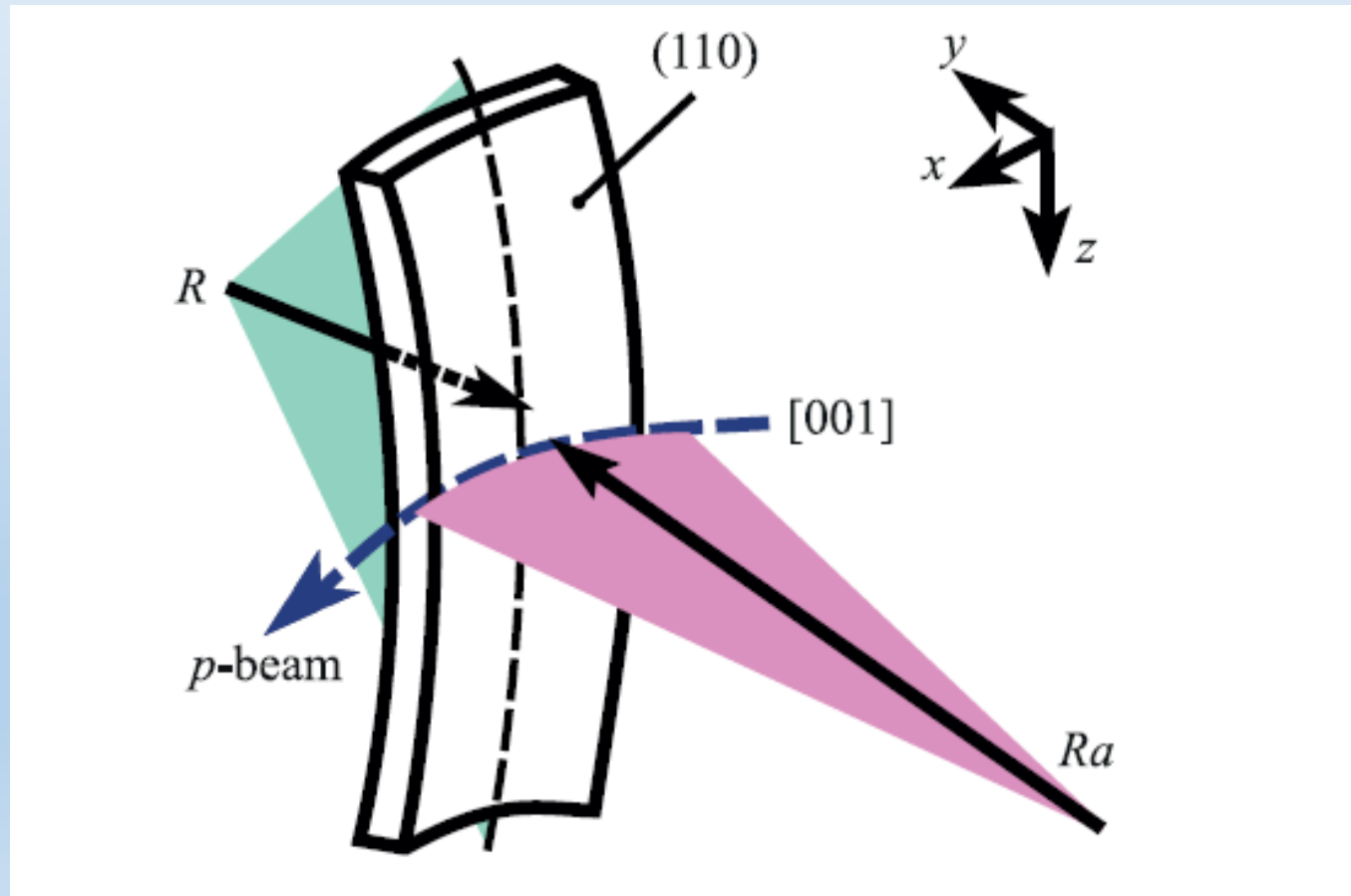


Основные параметры синхроциклотрона

Диаметр полюса магнита	6,85 м
Вес магнита	8000 Т
Диапазон частот	30÷13 МГц
Частота повторения	40÷60 Гц
Энергия выведенного пучка	1 ГэВ (const)
Интенсивность выведенного пучка	1 мкА
Интенсивность пучка внутри камеры	3 мкА (var)
Коэффициент вывода	30%
Коэффициент растяжки	85%

Изогнутый кристалл для 1 ГэВ протонов

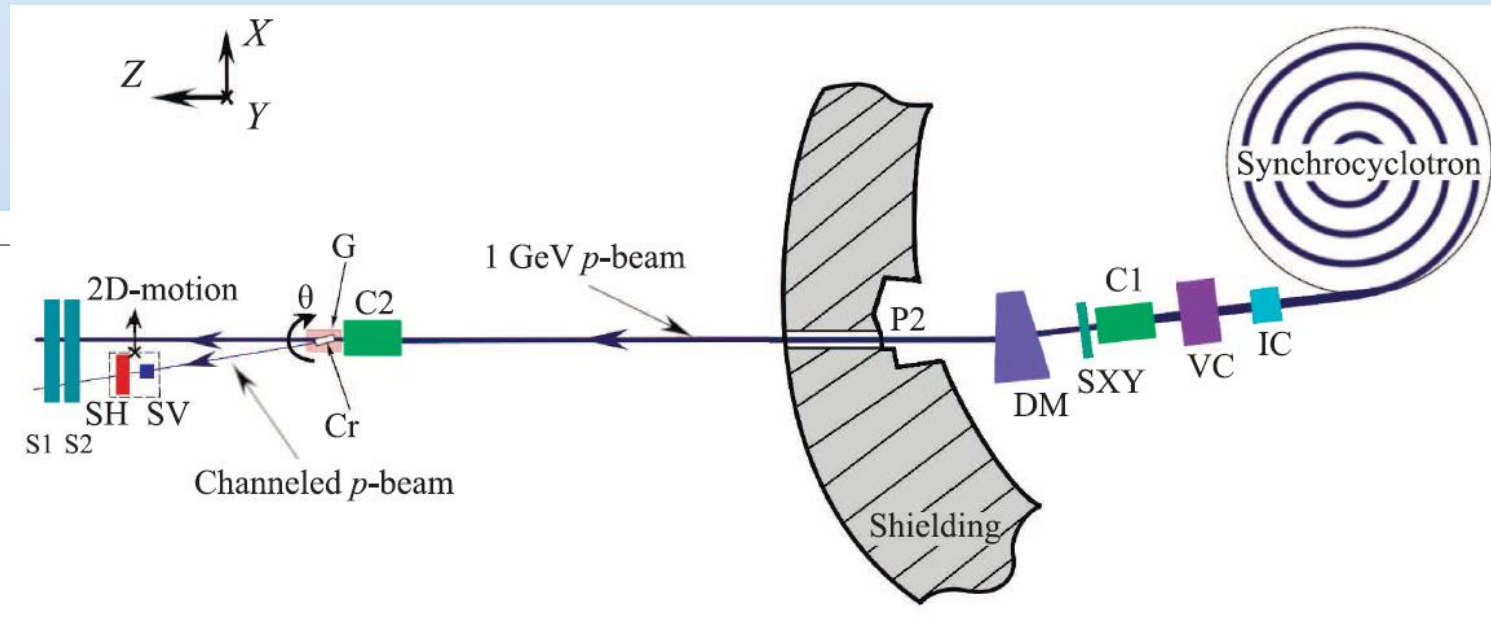
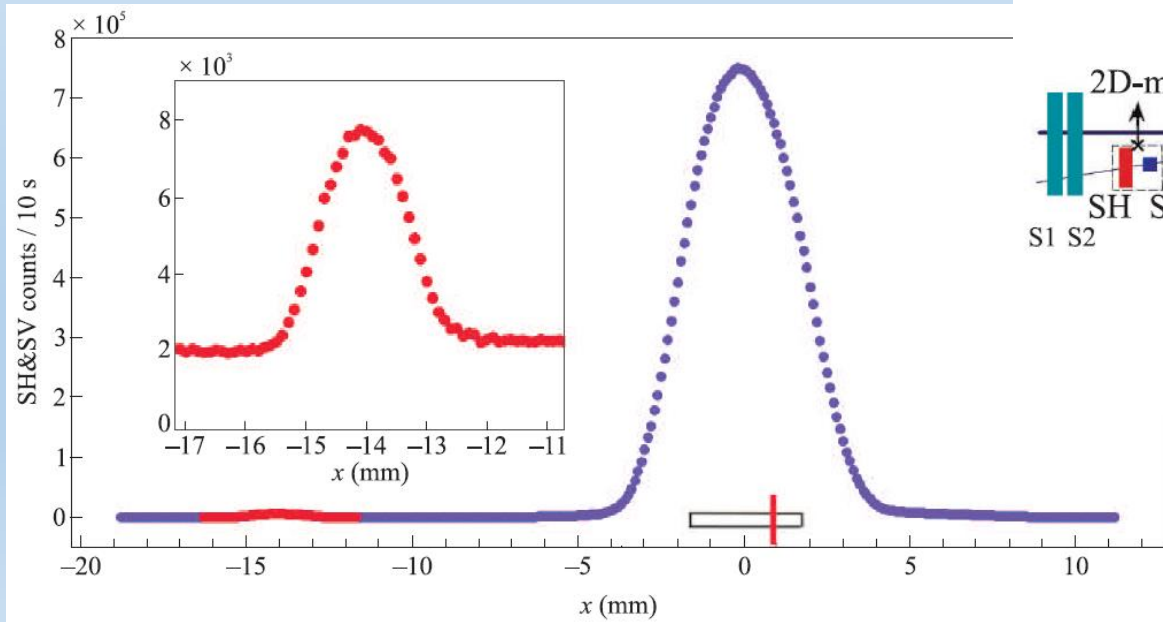
На начальном этапе была подготовлена серия кристаллов длиной в направлении пучка 1 миллиметр с изгибом 2-4 миллирадиан.



**Размеры кристалла
0.1 x 1.0 x 30 мм³**

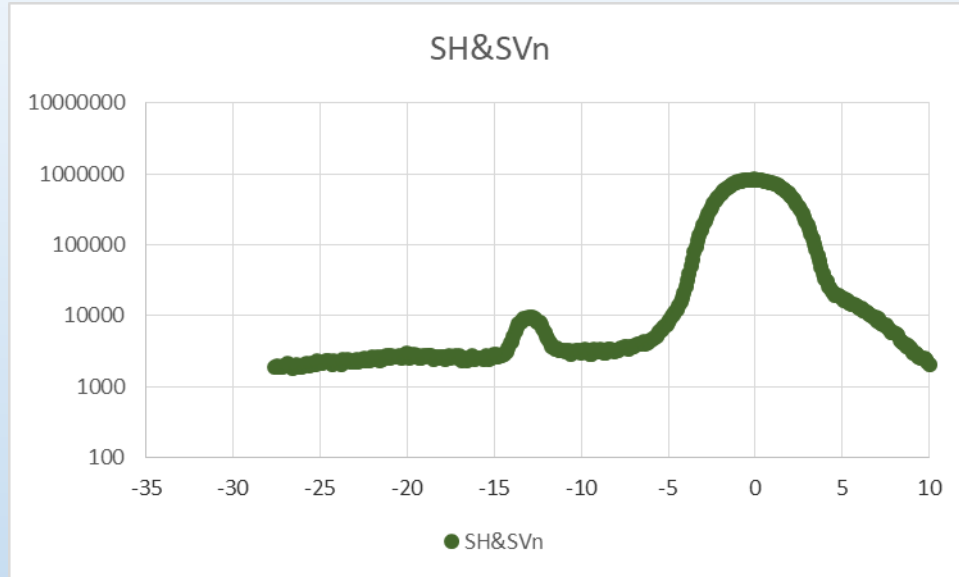
Эксперимент на синхроциклотроне ПИЯФ

Наблюдено **отклонение протонов на угол 3 миллирадиана с эффективностью 30%**: Д.А.Амерканов и др., [Эксперимент по высокоэффективному отклонению протонного пучка с энергией 1 ГэВ изогнутым кристаллом на синхроциклотроне ПИЯФ](#), Письма в ЖЭТФ, том 118, вып. 8, с. 551, **2023**

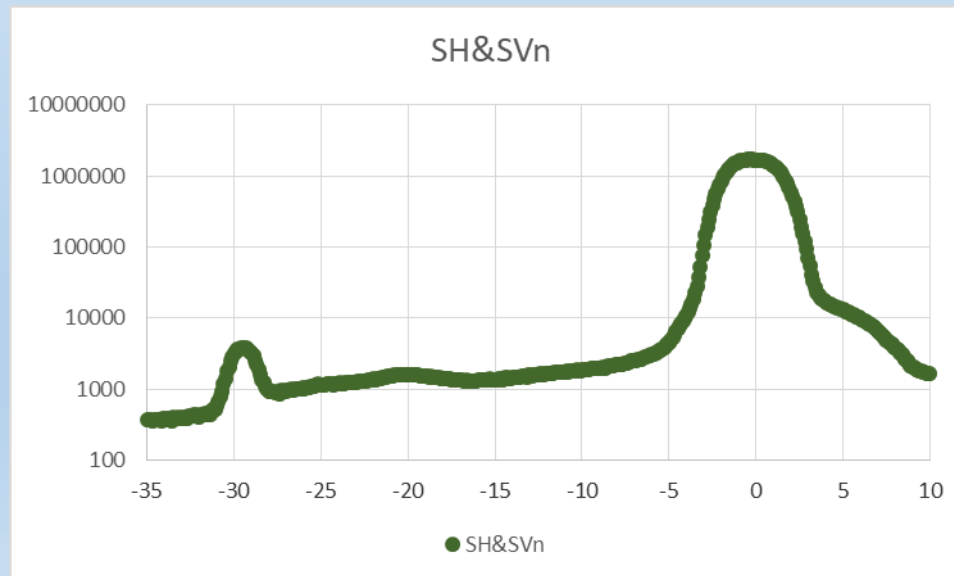


Исследования с 1 мм и 3 мм кристаллами в 2024 году

Длина деканализирования
 1.6 ± 0.3 мм



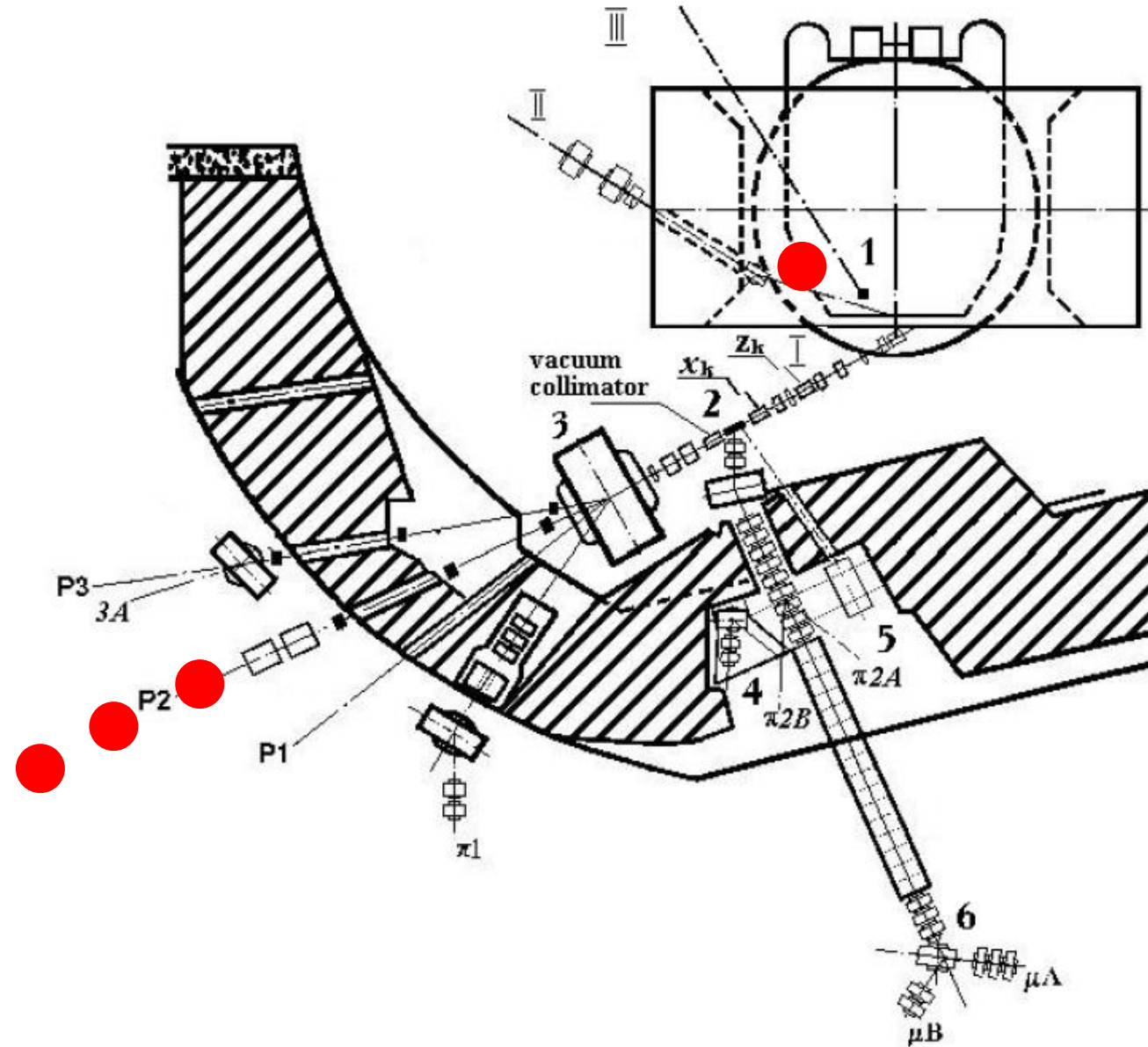
Угол отклонения 3 мрад



Угол отклонения 6.4 мрад

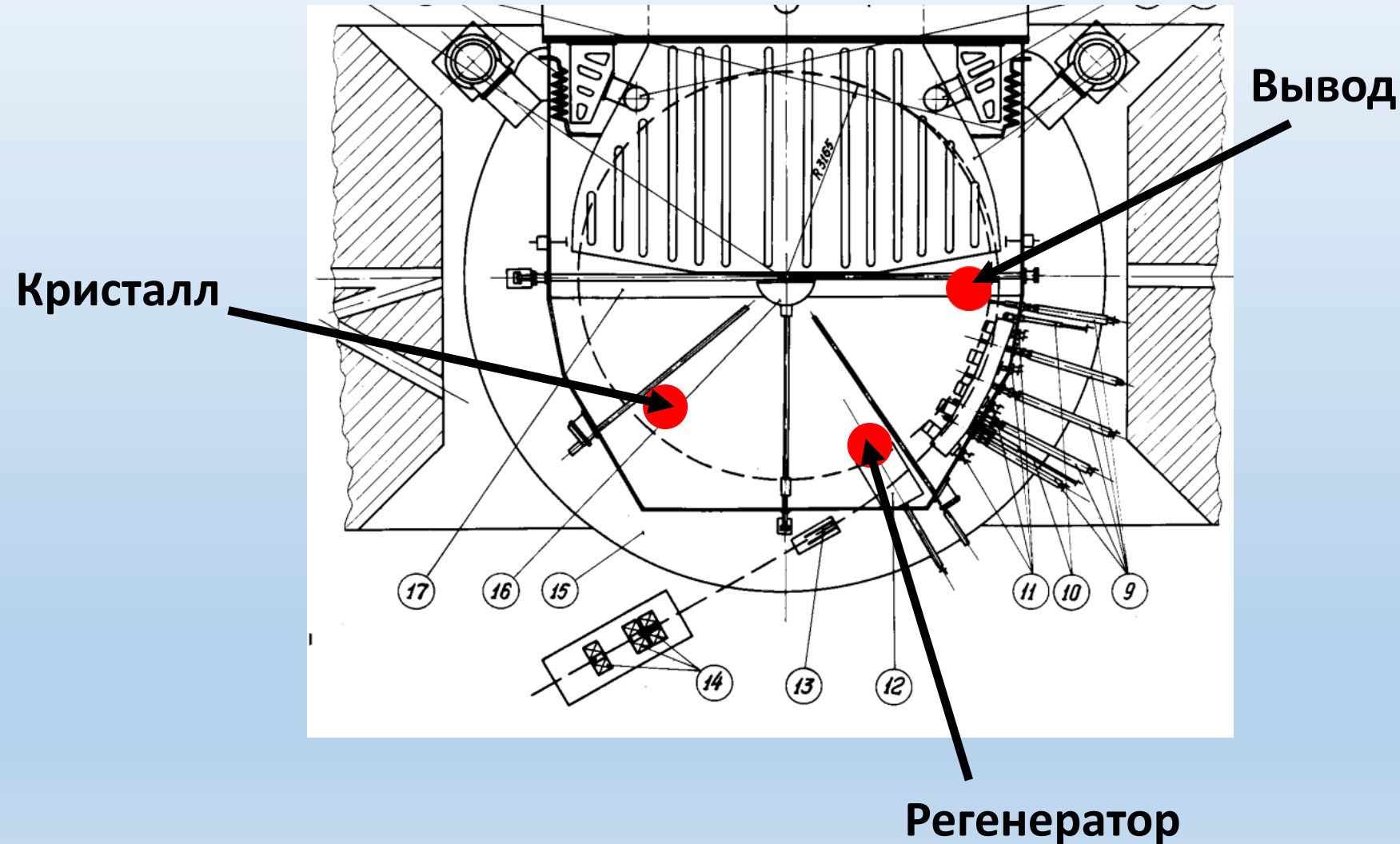


Возможные практические применения



- Расщепление выведенного пучка на несколько пучков
- Вывод пучка малой интенсивности из камеры СЦ-1000

Кристаллический вывод протонов из камеры СЦ-1000



- Режим хранения в камере 3×10^{11} p в течение 1-4 сек
- Вывод каналированных протонов без регенератора за один оборот
- Вывод каналированных протонов с регенератором за несколько оборотов

Результаты моделирования кристаллического вывода

Угол изгиба кристалла, мрад	Оборот на выводе	Радиус на выводе, см
35	10	330
40	6	329.5
50	3	330
60	2	332
70	1	330

- Положение кристалла R=309 см
- Положение магнитного канала вывода R=330 см
- Азимут вывода 10 градусов
- Азимут регенератора 62 градуса
- Азимут кристалла 114 градусов

Заключение

- **Подготовлена серия кристаллов** с различными длинами в направлении пучка и с изгибом до десятков миллирадиан. Образцы изучаются оптическими и рентгеновскими методами и на протонном пучке синхроциклотрона ПИЯФ.
- Предложено использовать изогнутый кристалл для вывода протонного пучка малой интенсивности из камеры синхроциклотрона ПИЯФ. **Изучаются практически осуществимые конфигурации кристаллического вывода.**
- Для простейшей конфигурации **выполнено моделирование** вывода в режиме хранения пучка. **Показана осуществимость** кристаллического вывода.

Спасибо за внимание!