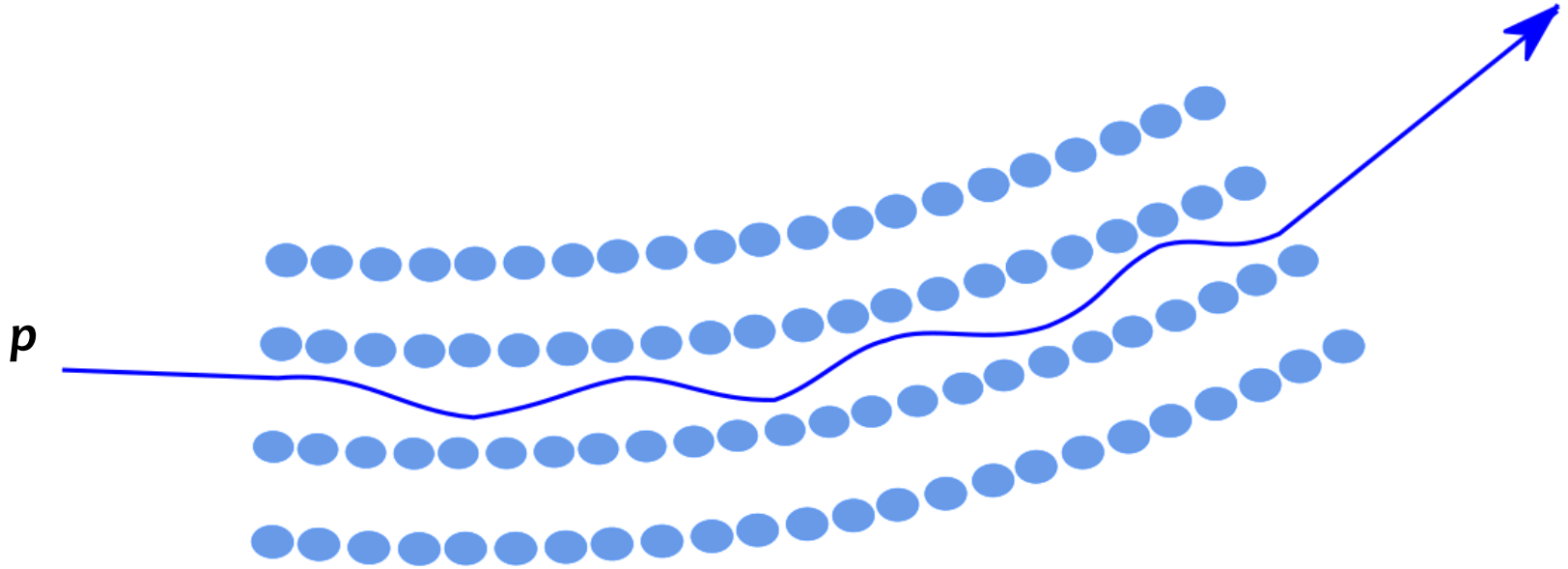
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
Петербургский институт ядерной физики
им. Б. П. Константинова

ЯДРО 2025

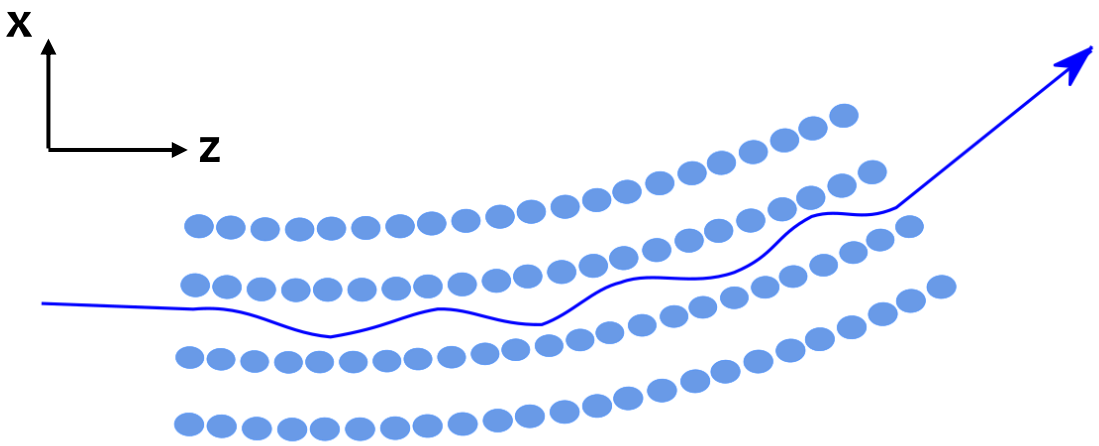


Каналирование протонов с энергией 200-1000 МэВ в изогнутых кристаллах кремния

Иванова П.Ю., Иванов Ю.М.

3 июля 2025

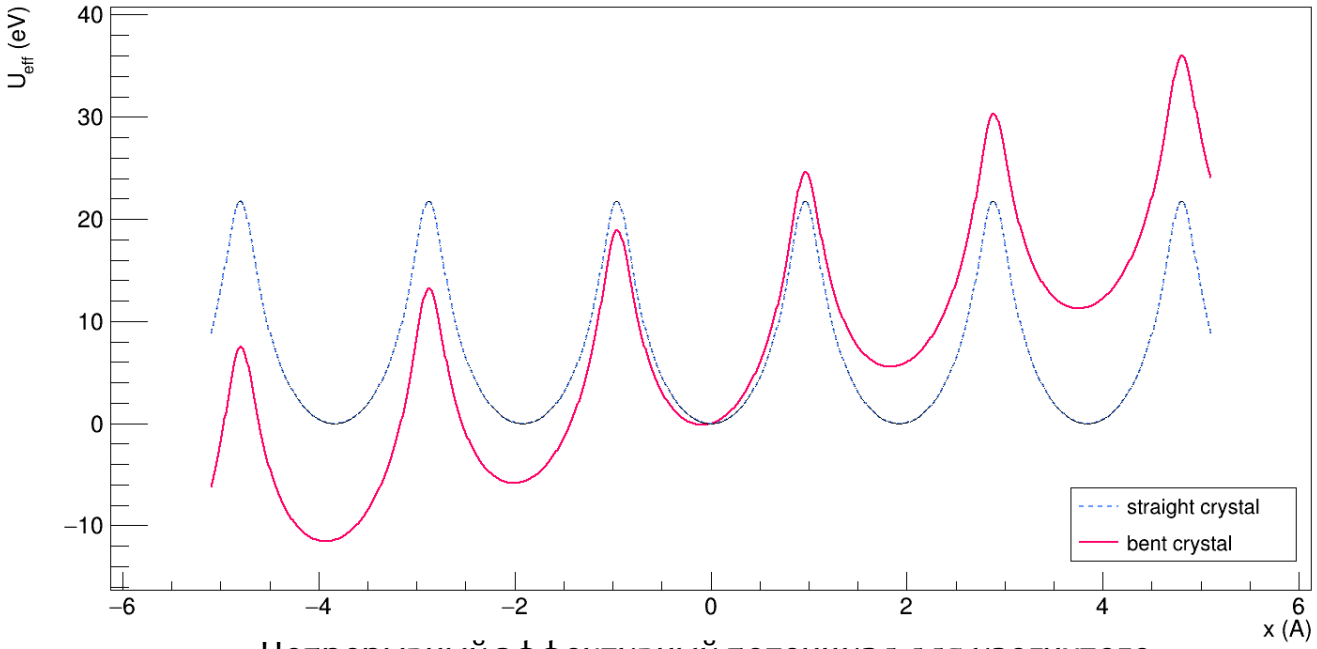
Ориентационные эффекты в кристалле



Поля атомных осей и плоскостей формируют потенциальные ямы, в которые частица может быть захвачена.

Движение частицы в изогнутом кристалле определяется эффективным межплоскостным потенциалом, учитывающим центробежный потенциал.

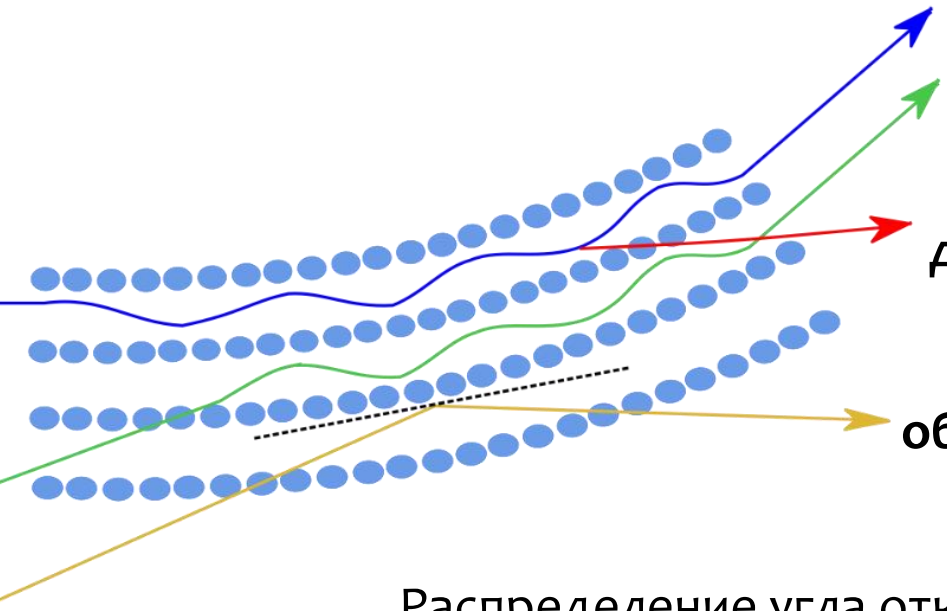
Последовательные столкновения заряженной частицы, падающей на кристалл под небольшим по отношению к кристаллографической оси или плоскости углом $\theta = \frac{p_x}{p_z}$, с атомами решетки скоррелированы, поэтому можно заменить потенциалы отдельных атомов на усредненный непрерывный потенциал.



Непрерывный эффективный потенциал для изогнутого кристалла, пунктиром – для прямого кристалла

Ориентационные эффекты в кристалле

Значение поперечной энергии частицы E_T определяет ее прохождение через кристалл

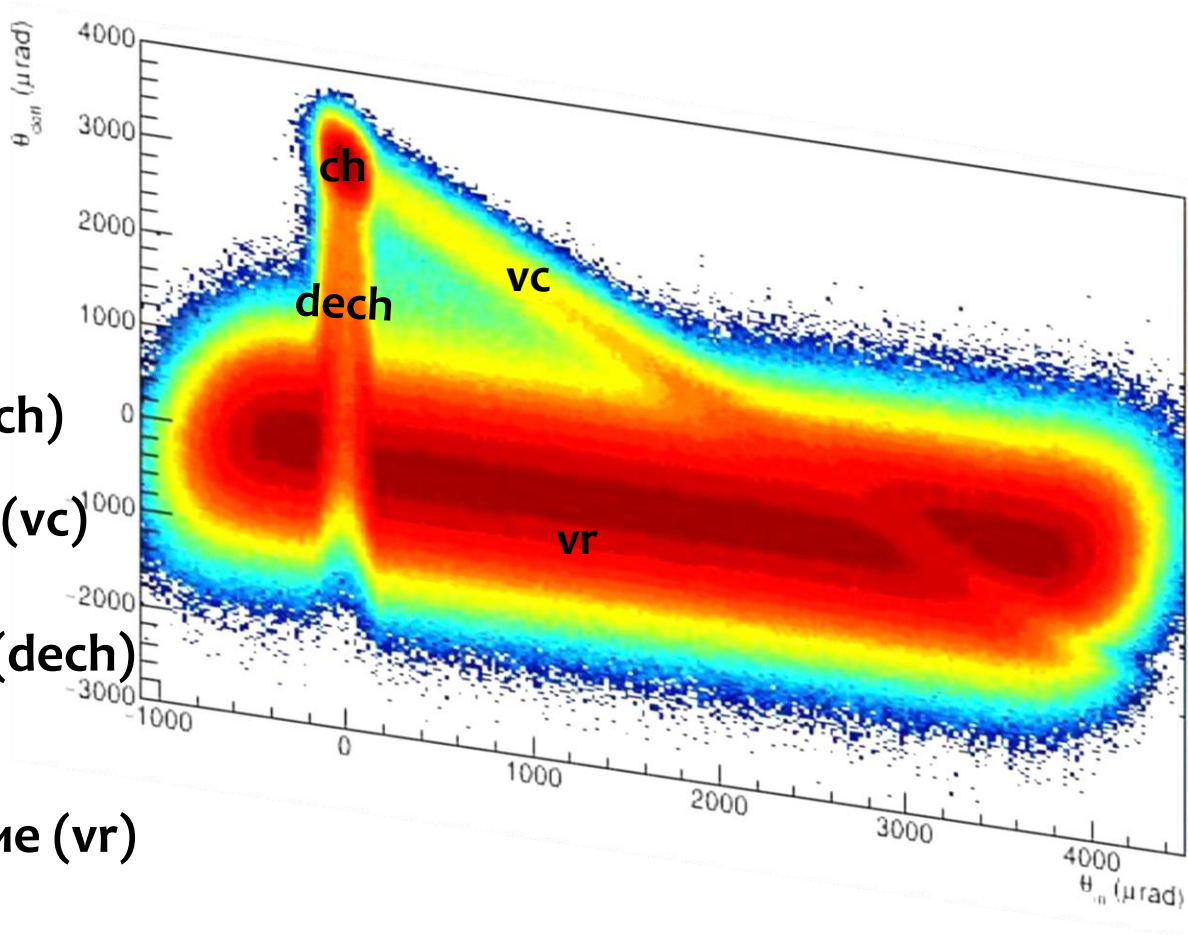


каналирование (ch)

объемный захват (vc)

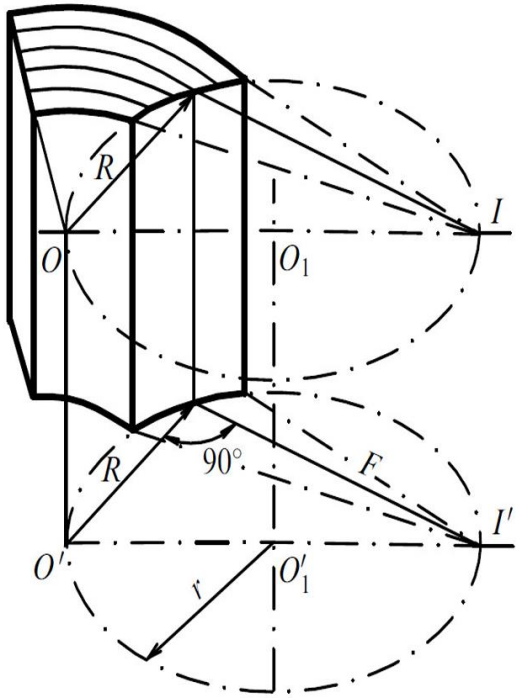
деканалирование (dech)

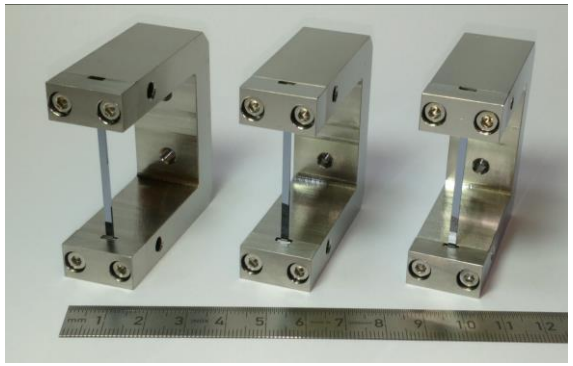
объемное отражение (vr)



Распределение угла отклонения частиц по их входному углу иллюстрирует четыре основных эффекта, возникающие при прохождении заряженной частицы через ориентированный изогнутый кристалл

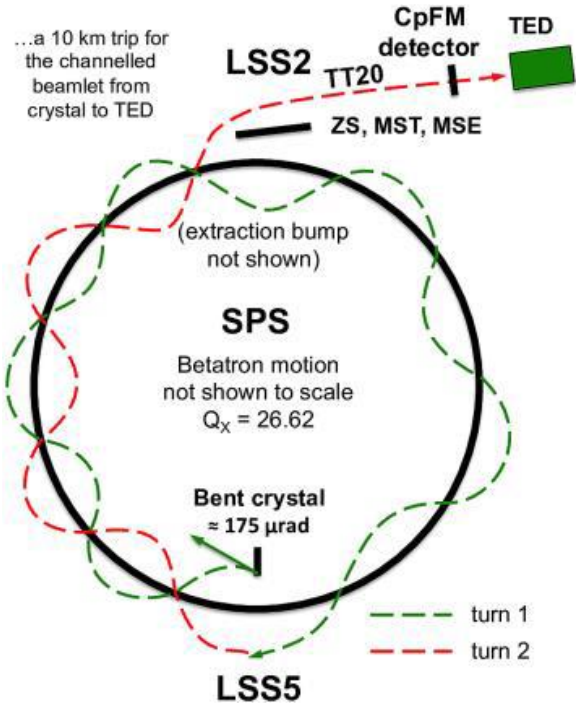
Метод формирования пучков заряженных частиц





кристаллические дефлекторы для LHC, разработанные в ПИЯФ

Исследования проводятся в ОИЯИ, ИФВЭ, ЦЕРН, Фермилаб, БНЛ



Вывод пучка SPS

- L.S. Esposito et al., Crystal for slow extraction loss-reduction of the SPS electrostatic septum, 2019

Коллимация пучка в LHC

- D. Mirarchi et al., Reducing Beam-Related Background on Forward Physics Detectors Using Crystal Collimation at the Large Hadron Collider, 2020

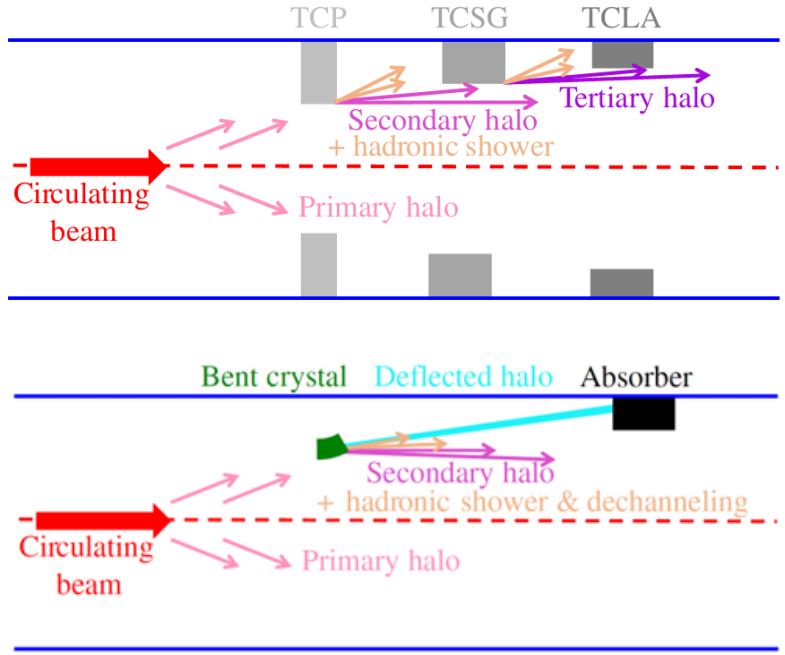
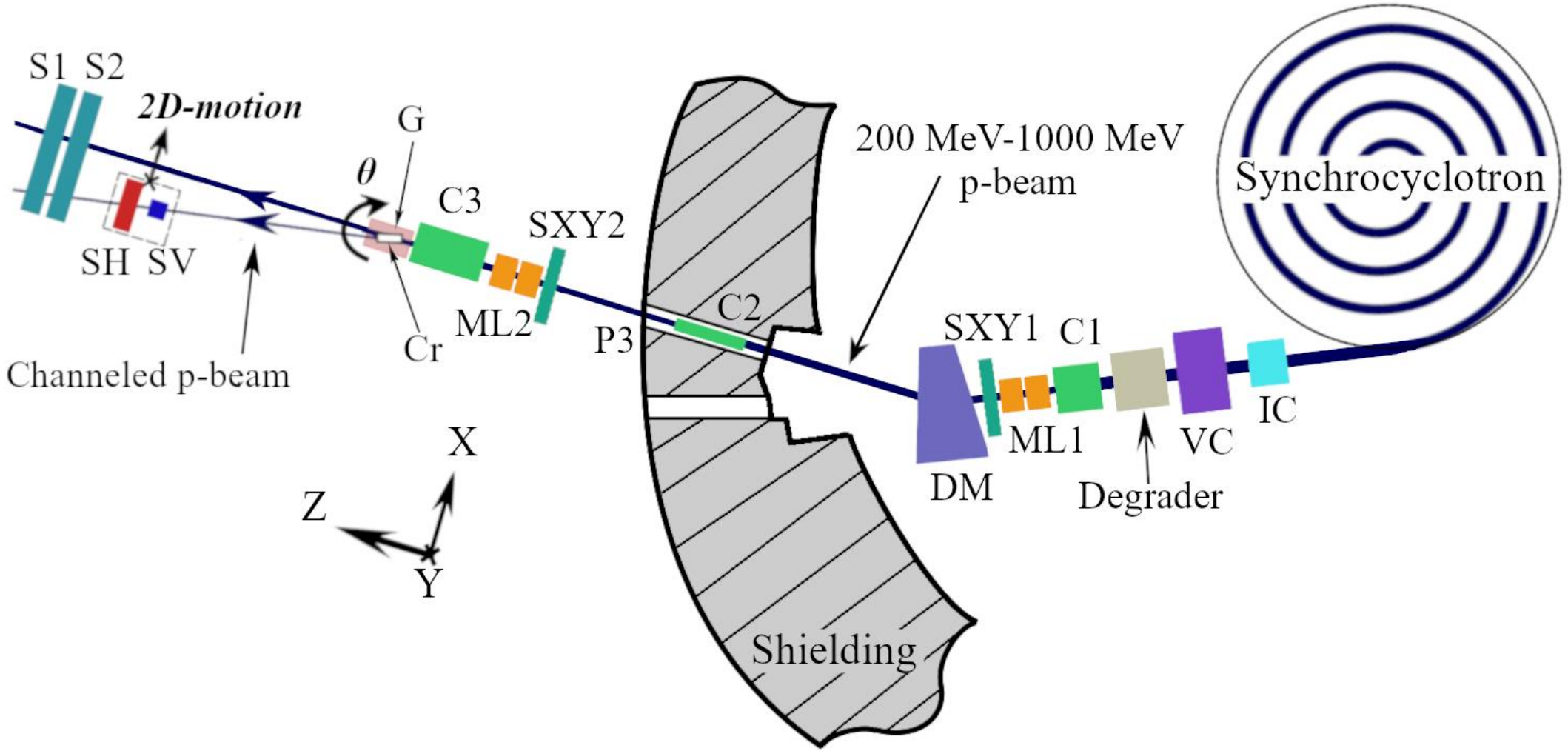
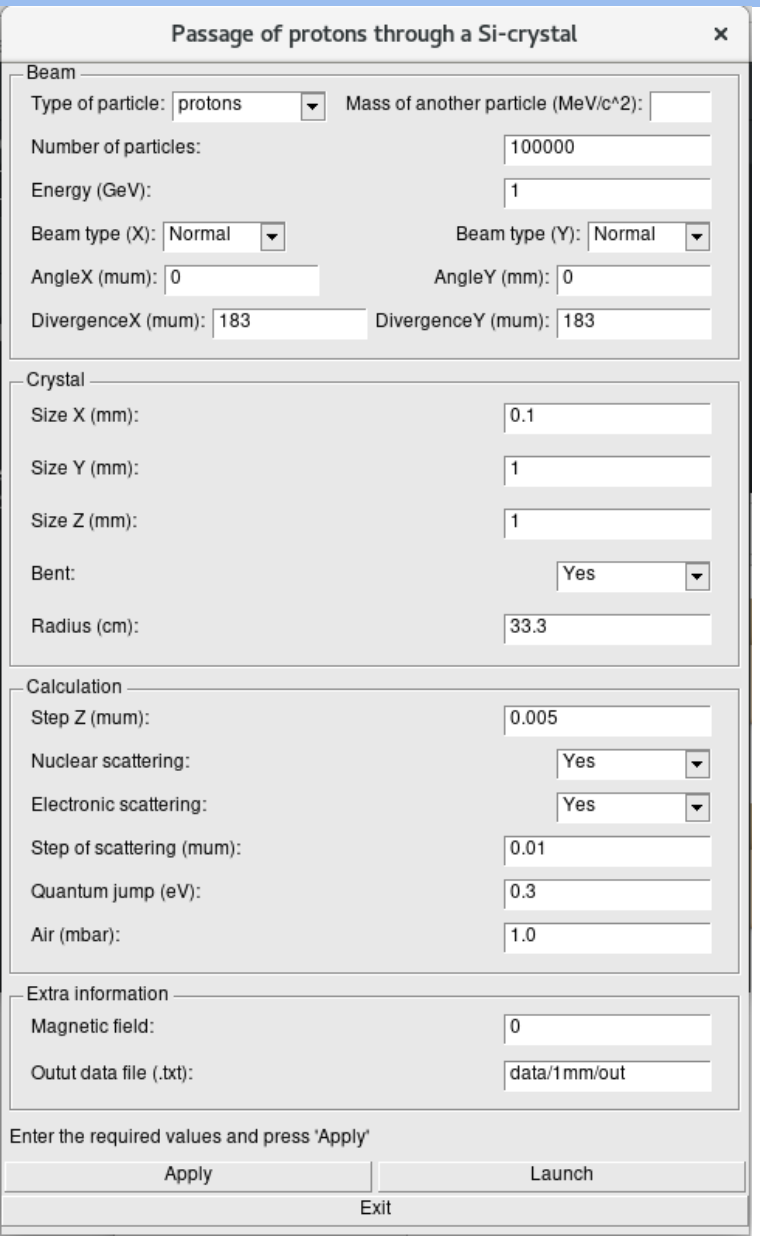


Схема эксперимента на пучках протонов 200 и 500 МэВ



Моделирование прохождения протонов через кристалл



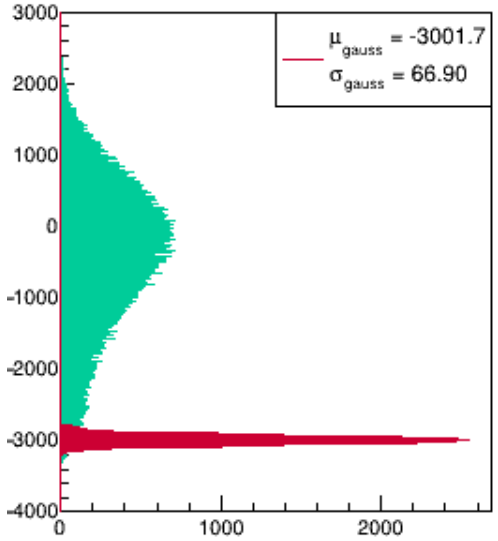
Результаты моделирования экспериментов, выполненных на синхроциклотроне ПИЯФ

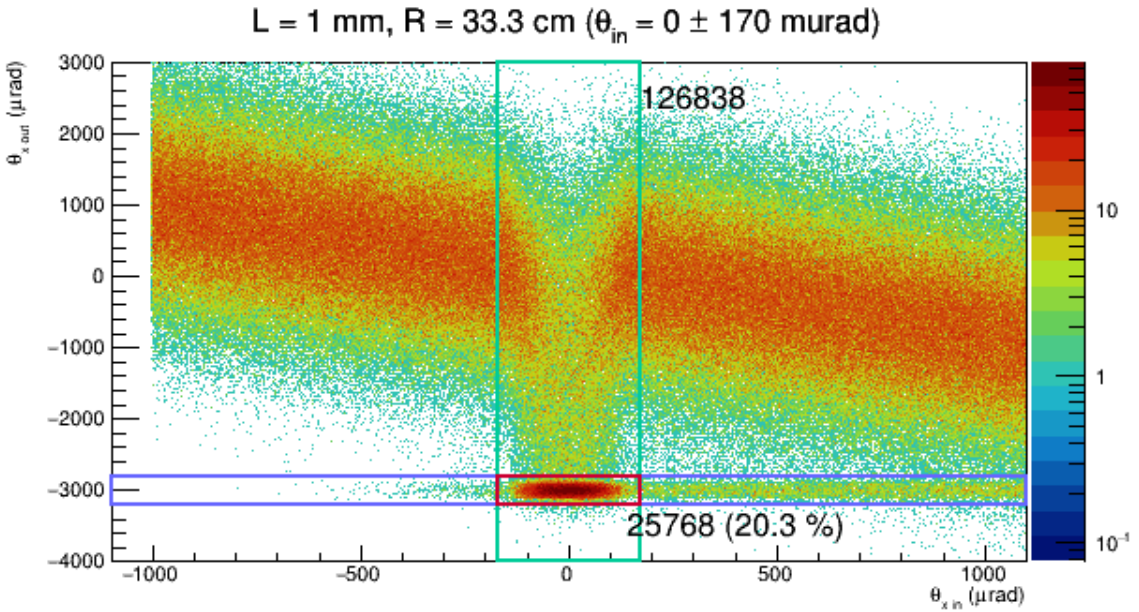
Отклонение протонов на **3 мрад**

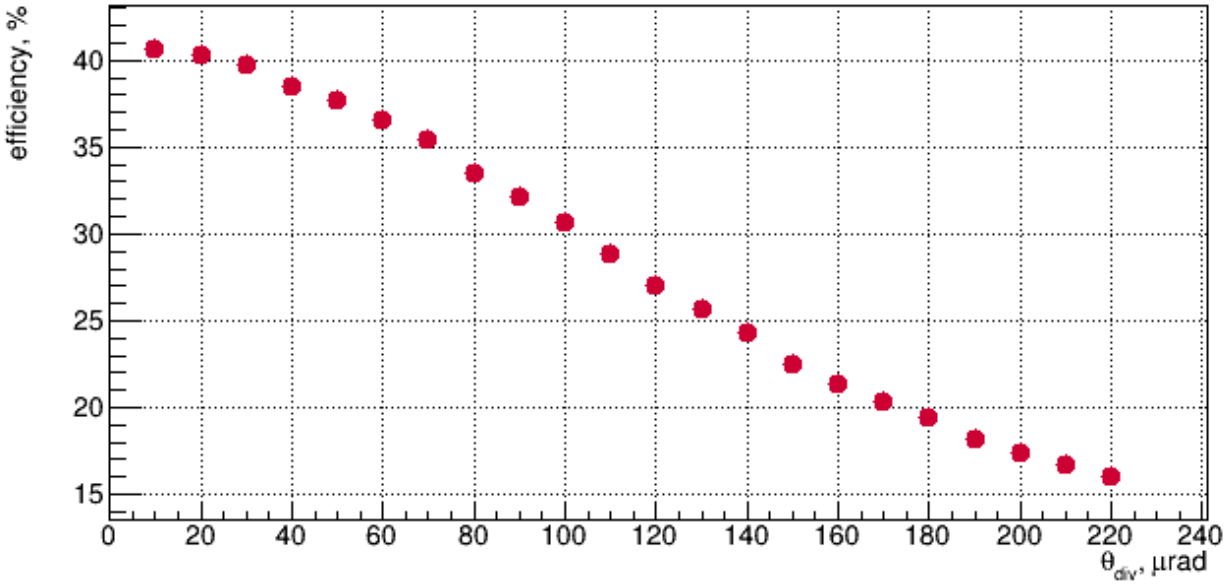
Параметры каналированного пучка

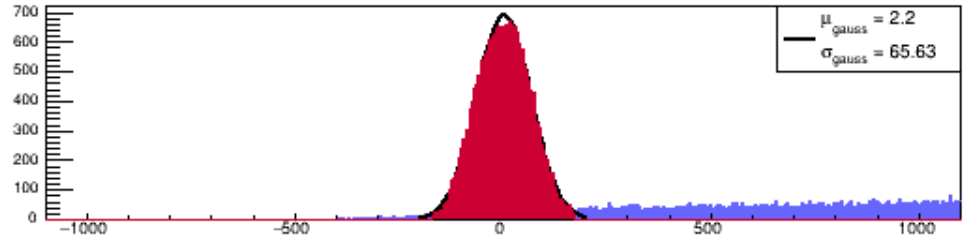
$\sigma_x \approx 70$ **мкрад (расчет)**

$\sigma_x \approx 80$ **мкрад (эксперимент)**



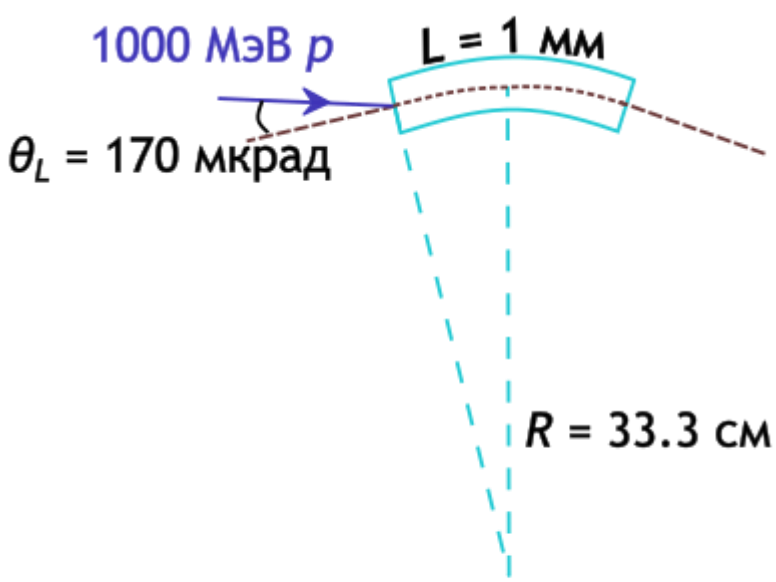






Оценка эффективности отклонения и горизонтальной расходимости каналированного пучка

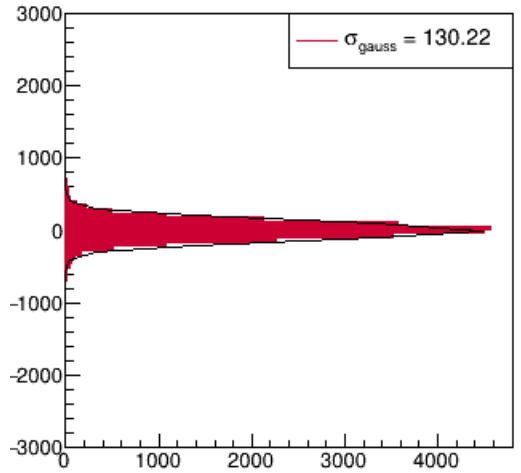
Результаты моделирования экспериментов, выполненных на синхроциклотроне ПИЯФ

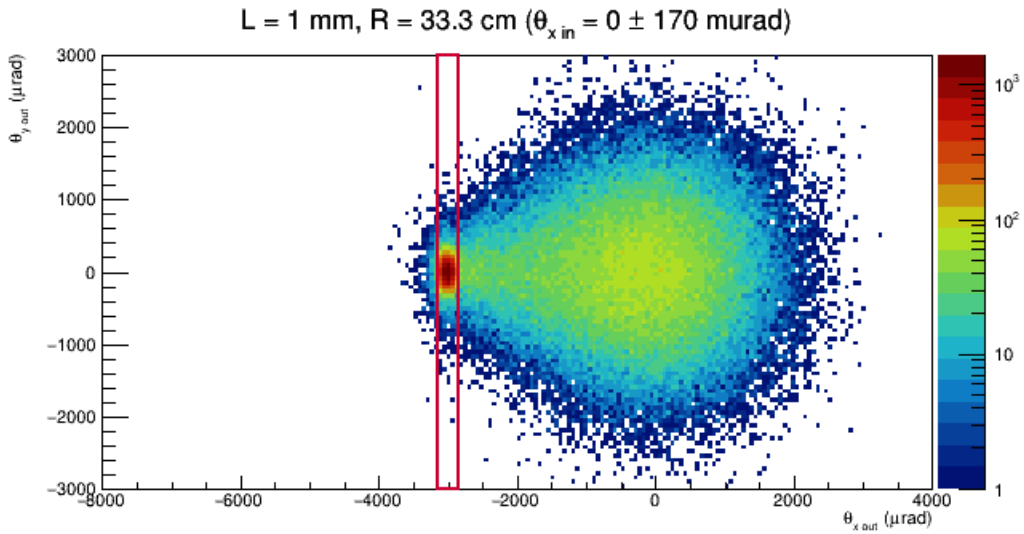


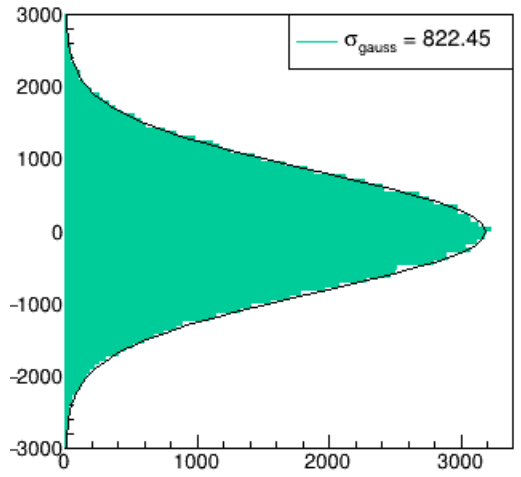
Параметры каналированного пучка

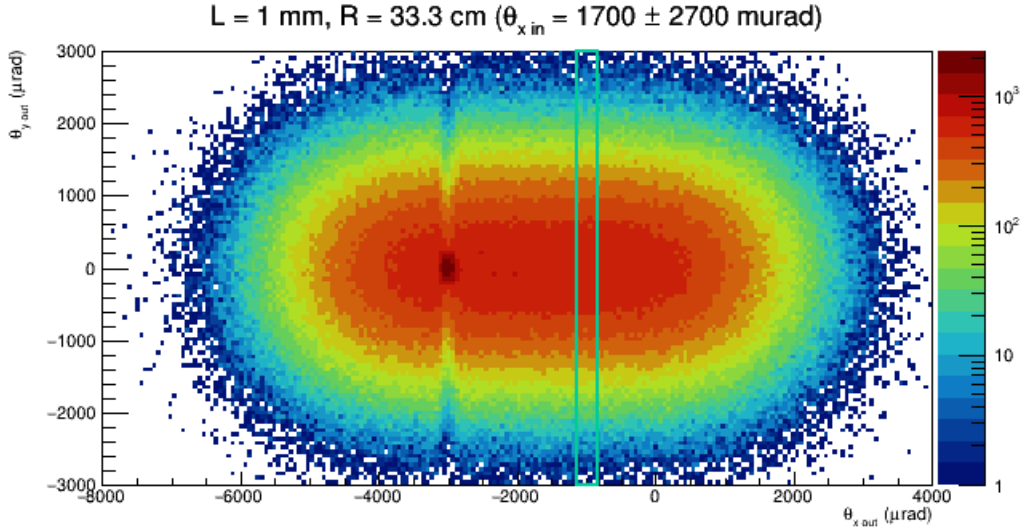
$\sigma_y \approx$ **130 мкрад (расчет)**

$\sigma_y \approx$ **120 мкрад (эксперимент)**



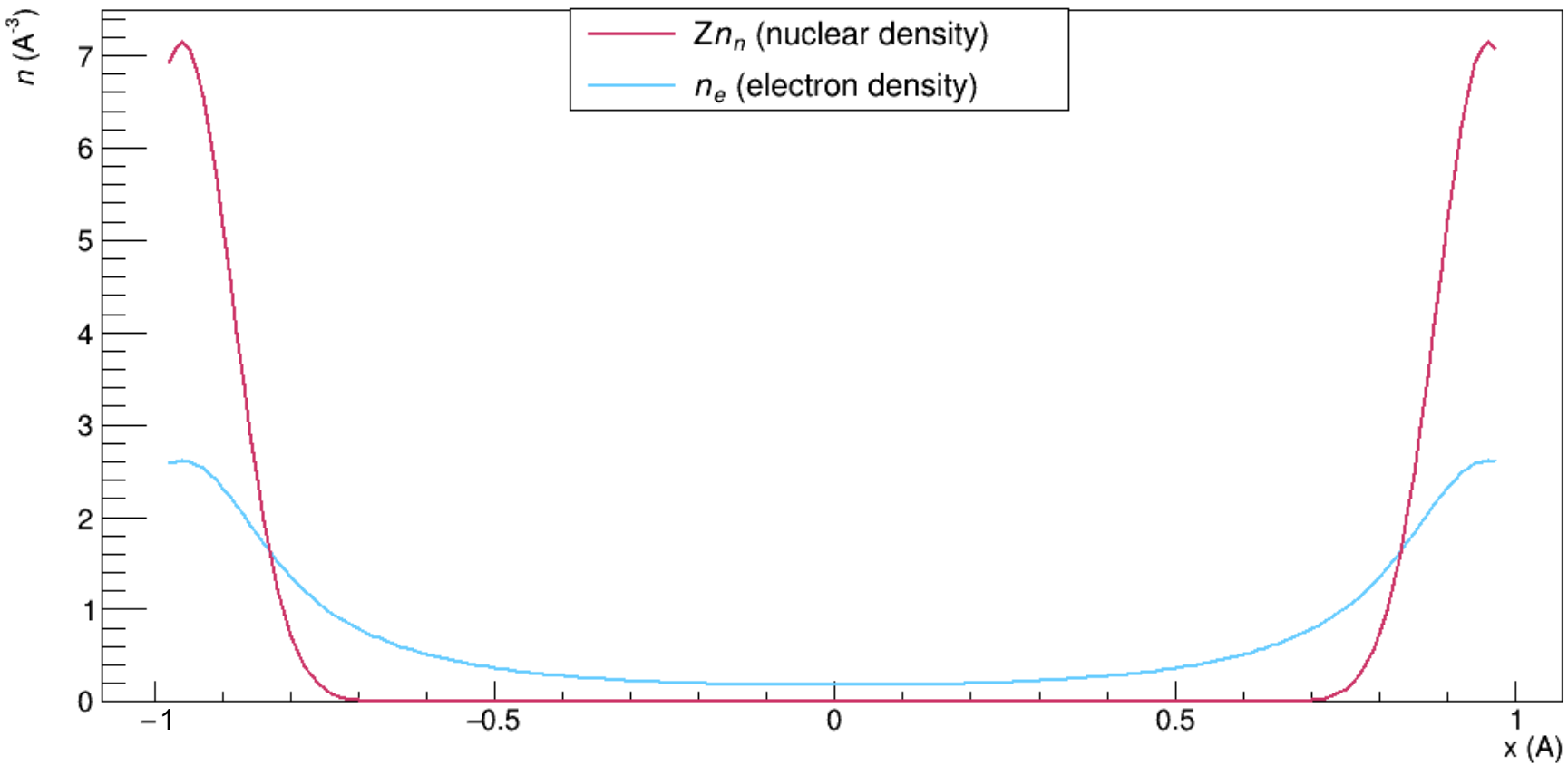






Вертикальная расходимость пучков каналированного и прошедшего неориентированный кристалл

Ядерная и электронная зарядовые плотности в канале



$$\left\langle (\delta\theta_s)^2 \right\rangle_n = \theta_{am}^2 \cdot \frac{Zn_n(x)}{ZN}$$

$$\left\langle \frac{(\delta\theta_s)^2}{\delta z} \right\rangle_e = \frac{m_e}{2p^2} \left(\frac{\delta E}{\delta z} \right)_{am} \frac{n_e(x)}{n_{am}}$$

$$\theta_{am} = \frac{13.6\ \text{МэВ} \cdot Z_i}{p\beta} \sqrt{\frac{\delta z}{L_r}} \left(1 + 0.038 \ln \left(\frac{\delta z \cdot {Z_i}^2}{L_r \beta^2} \right) \right)$$

Результаты моделирования

Энергия, Мэв	Длина кристалла, мм	Угол отклонения, мрад	Эффективность отклонения*, %	σ_x, мкрад	σ_y, мкрад	σ_{am}, мкрад
1000	1	3	20	70	130	790
1000	3	6	5	70	250	1440
1000	3	30	4	60	200	1440
500	0.5	5	20	85	155	990
200	0.5	5	15	140	350	2300

$\boldsymbol{\sigma_x}$, $\boldsymbol{\sigma_y}$ — угловая расходимость пучка каналированных частиц,

$\boldsymbol{\sigma_{am}}$ — угловая расходимость пучка после прохождения неориентированного кристалла

*Эффективность отклонения рассчитана для частиц, входной угол которых ≤ угла Линдхарда

Результаты моделирования

Энергия, Мэв	Длина кристалла, мм	Угол отклонения, мрад	Эффективность отклонения*, %	σ_x, мкрад	σ_y, мкрад	σ_{am}, мкрад
1000	1	3	20	70	130	790
1000	3	6	5	70	250	1440
1000	3	***30***	***4***	60	200	1440
500	0.5	5	20	85	155	990
200	0.5	5	15	140	350	2300

$\boldsymbol{\sigma_x}$, $\boldsymbol{\sigma_y}$ — угловая расходимость пучка каналированных частиц,

$\boldsymbol{\sigma_{am}}$ — угловая расходимость пучка после прохождения неориентированного кристалла

*Эффективность отклонения рассчитана для частиц, входной угол которых ≤ угла Линдхарда

Результаты моделирования

Энергия, Мэв	Длина кристалла, мм	Угол отклонения, мрад	Эффективность отклонения*, %	σ_x, мкрад	σ_y, мкрад	σ_{am}, мкрад
1000	1	3	20	70	130	790
1000	3	6	5	70	250	1440
1000	3	30	4	60	200	1440
500	0.5	**5**	**20**	85	155	990
200	0.5	**5**	**15**	140	350	2300

$\boldsymbol{\sigma_x}$, $\boldsymbol{\sigma_y}$ — угловая расходимость пучка каналированных частиц,

$\boldsymbol{\sigma_{am}}$ — угловая расходимость пучка после прохождения неориентированного кристалла

*Эффективность отклонения рассчитана для частиц, входной угол которых ≤ угла Линдхарда

Результаты моделирования

Энергия, Мэв	Длина кристалла, мм	Угол отклонения, мрад	Эффективность отклонения*, %	σ_x, мкрад	σ_y, мкрад	σ_{am}, мкрад
1000	1	3	20	70	130	790
1000	3	6	5	70	250	1440
1000	3	30	4	60	200	1440
500	0.5	5	20	85	155	990
200	0.5	5	15	140	350	2300

$$\frac{\sigma_{am}}{\sigma_y} \approx 6,5$$

σ_x, σ_y — угловая расходимость пучка каналированных частиц,

σ_{am} — угловая расходимость пучка после прохождения неориентированного кристалла

*Эффективность отклонения рассчитана для частиц, входной угол которых ≤ угла Линдхарда

Заключение

- Результаты экспериментов на синхроциклотроне ПИЯФ по отклонению протонов на угол до 6 мрад открывают возможность применения кристаллов как высокоэффективных дефлекторов в инфраструктуре ускорителя.
- Моделирование каналирования протонов с низкой энергией иллюстрирует потенциал использования кристаллов для формирования тестовых пучков.
- Вертикальные углы отклонения частиц в кристалле определяются только многократным рассеянием при близких столкновениях с ядрами атомов и электронами. Расходимость пучка каналированных частиц отличается примерно в 6 раз от значения, полученного при прохождении частиц через неориентированный кристалл. Эффект сохраняется с изменением как длины кристалла, так и уменьшением энергии до 200 МэВ.

Это соответствует результату, полученному для высоких энергий.

W. Scandale et al., Observation of strong reduction of multiple scattering for channeled particles in bent crystals, *Physics Letters B*, 804, 135396, 2020