

TO THE INFLUENCE OF SINGLE SCATTERING ON NUCLEI ON THE EFFICIENCY OF THE FUTURE LHC CRYSTAL-BASED COLLIMATION SYSTEM

Nucleus 2014, July 1-4, Minsk

A.I. Sytov, V.V. Tikhomirov

**Research Institute for Nuclear Problems,
Belarusian State University**



BSU



INP

План доклада

- Система коллимации на основе изогнутых кристаллов на Большом адронном коллайдере.
- Программа CRYSTAL для моделирования траекторий частиц в монокристалле.
- Моделирование сильного однократного рассеяния протонов на ядрах.

Каналирование и система коллимации Большого адронного коллайдера

- Моделирование эффекта *каналирования* частиц в эксперименте на Большом адронном коллайдере и влияние сильного однократного рассеяния на ядрах.
- Применение метода *кристаллического выреза* для повышения эффективности каналирования.

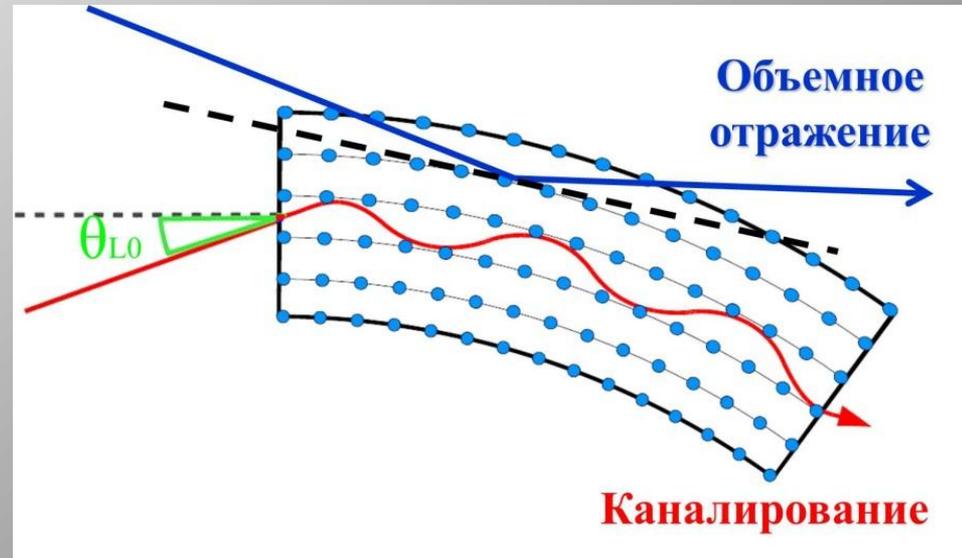
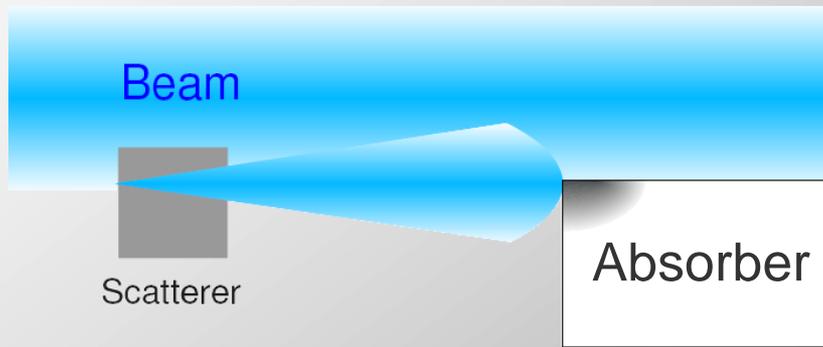
Многократное объемное отражение в одном кристалле и система коллимации Большого адронного коллайдера

- Эффект многократного объемного отражения в одном кристалле (*МОО*) и *комбинированное действие каналирования и многократного объемного отражения* и влияние сильного однократного рассеяния на ядрах.
- Сравнение эффективности различных эффектов и их модификаций.

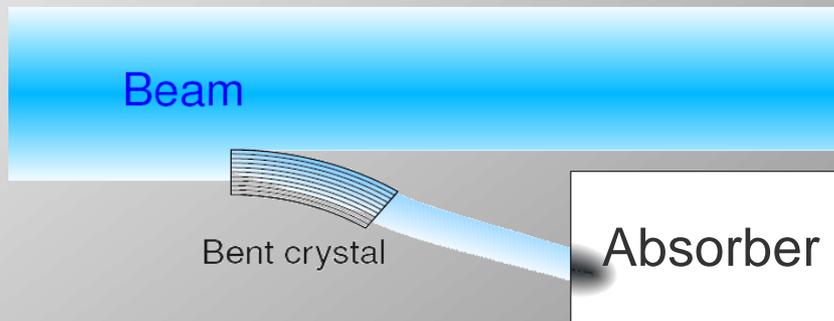
Система коллимации и эффект каналирования

- **Гало частицы** высокоинтенсивных пучков БАК могут вызвать перегрев сверхпроводящих магнитов. Для их выведения из ускорителя необходимо использовать **систему коллимации**.
- **Коллимация на основе изогнутых кристаллов** может значительно увеличить эффективность выведения гало частиц.

Нынешняя система коллимации



Новая система коллимации



Программа CRYSTAL*

Основная концепция – моделирование траекторий частиц в кристалле путем численного решения уравнения движения

Режимы работы:

- **1D** модель – движение частиц в межплоскостном потенциале
- **2D** модель – движение частиц в потенциале осей

Учет на каждом шаге моделирования физических процессов :

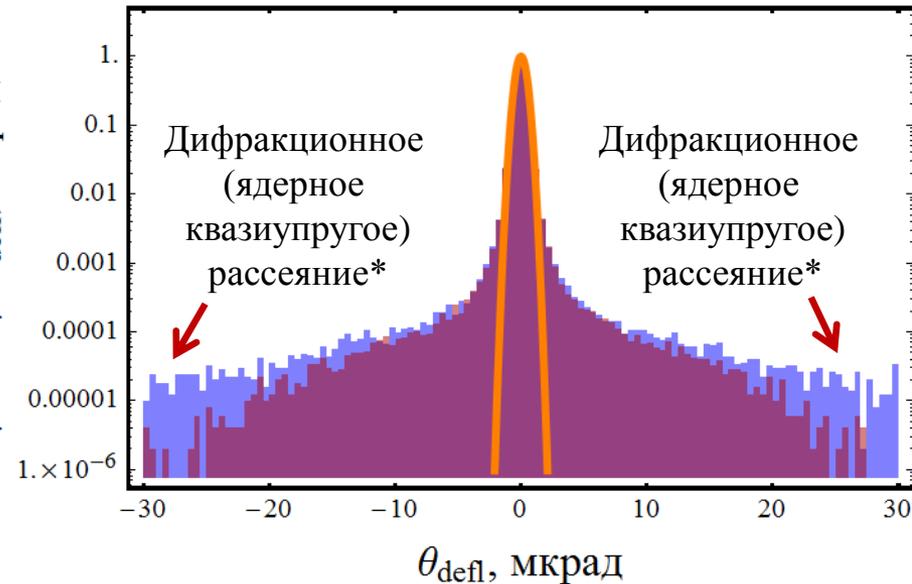
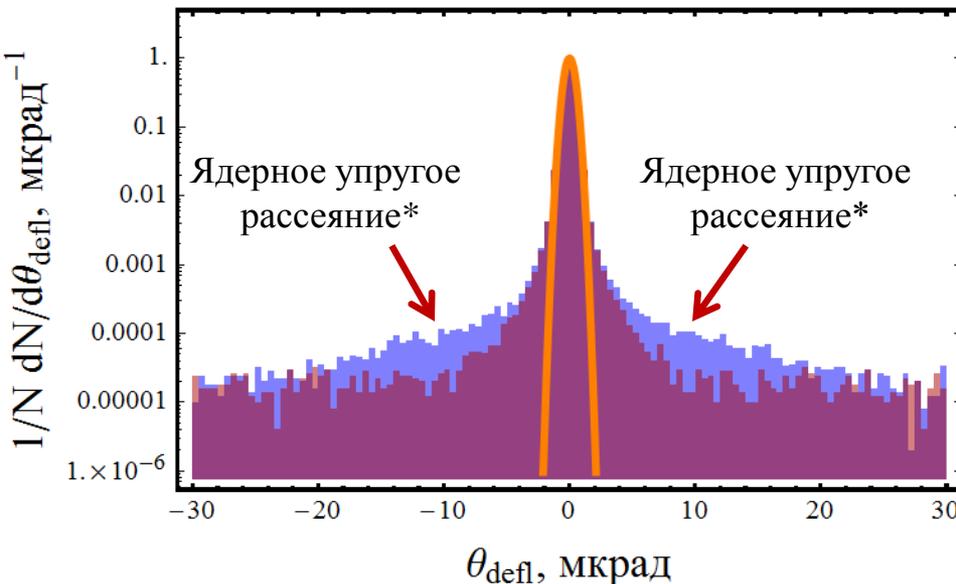
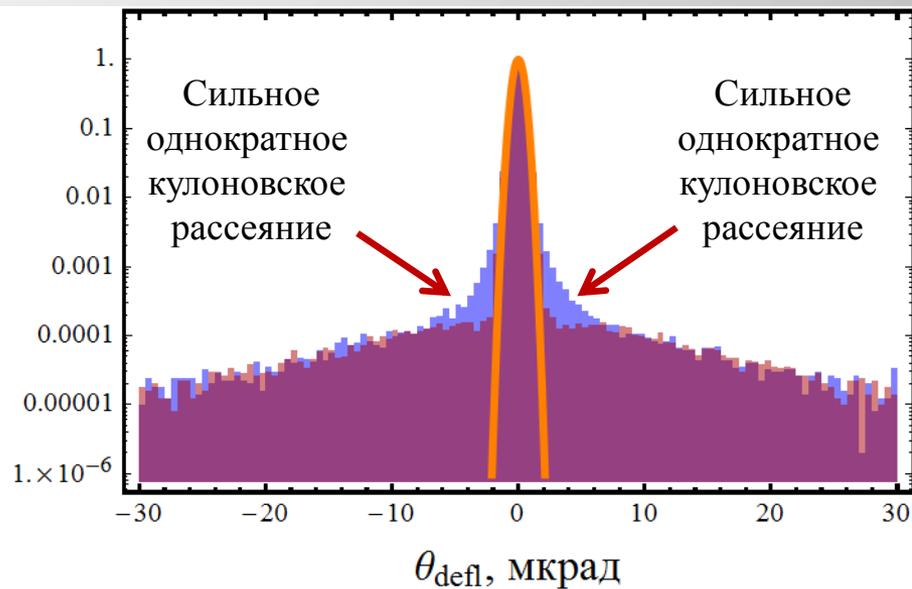
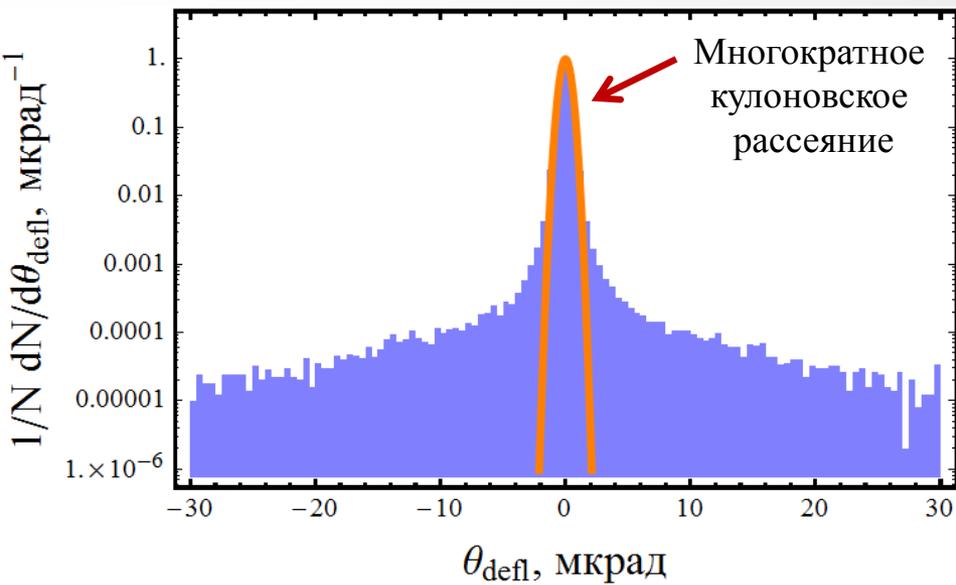
- Многократное и однократное кулоновское рассеяние на ядрах и электронах
- Ядерное рассеяние (упругое, неупругое, дифракционное)
- Ионизационные потери энергии
- Геометрия кристалла (влет/вылет через боковую поверхность; угол мискат)

Сплайн интерполяция: Преимущества:

- Межплоскостного потенциала
- Межплоскостного поля
- Плотности ядер
- Плотности электронов
- Не более 10 простейших мат. операций необходимо для воспроизведения интерполированных функций (в 1D модели) => **высокая скорость вычислений**
- Считывание интерполяционных коэффициентов из входных файлов => **универсальность алгоритма** для монокристаллов любого материала, и типа кристаллической решетки

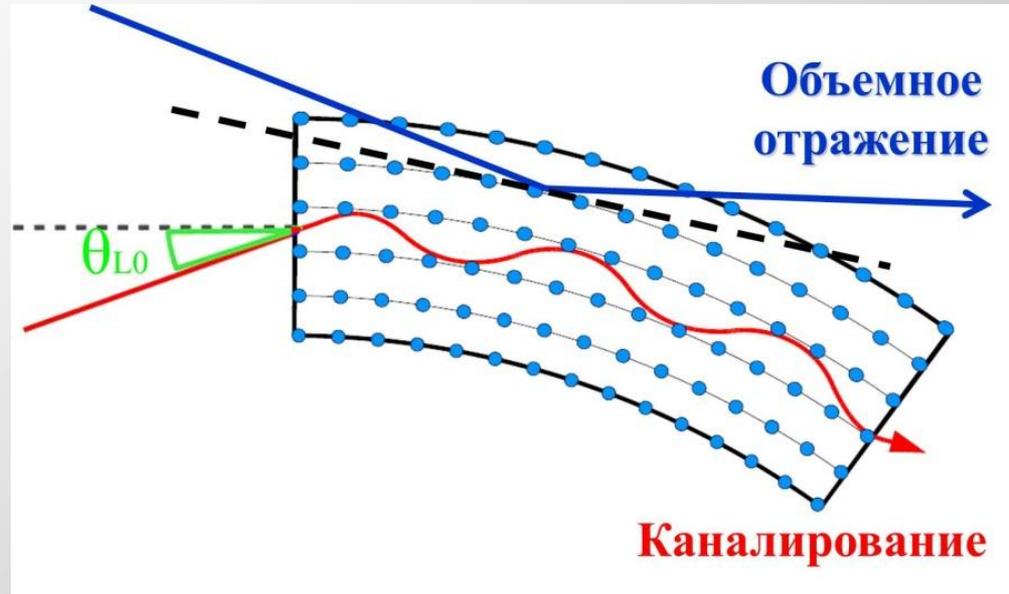
* А.И. Сытов. Применение изогнутого кристалла для вывода протонного пучка из накопительного кольца. Вестник БГУ, 2014, Сер. 1. №2., С. 48-52.

Рассеяние протонов энергией 7 ТэВ кристаллом Si длиной 5 мм.

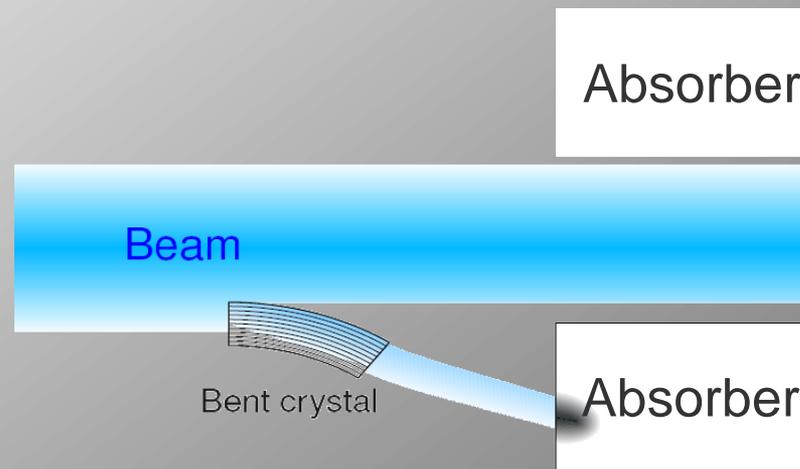


*A.I. Drozhdin et al. Beam loss and backgrounds in the CDF and DØ detectors due to nuclear elastic beam-gas scattering. FERMILAB-Conf-03/088, 3p.

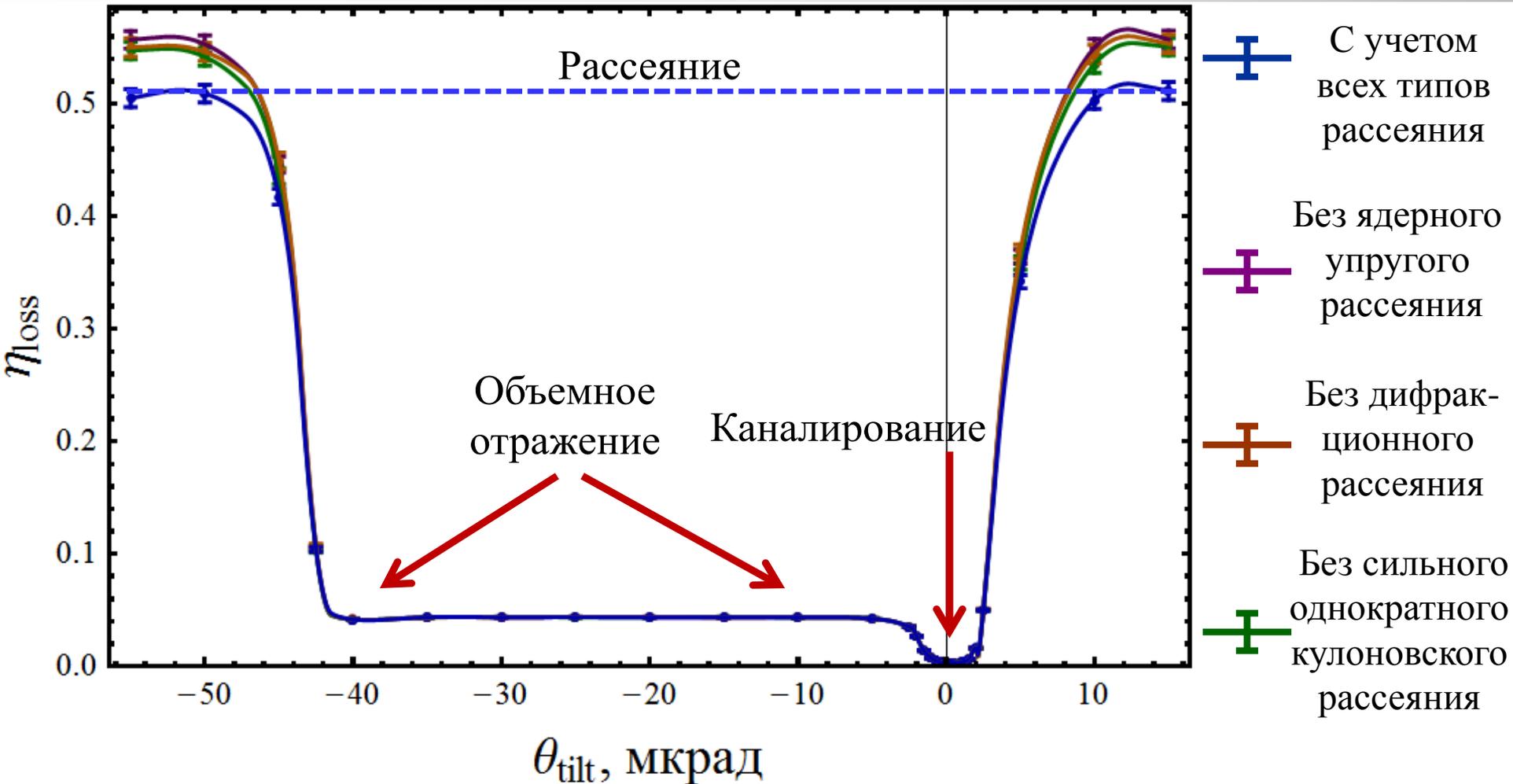
Каналирование и система коллимации Большого адронного коллайдера



Система коллимации

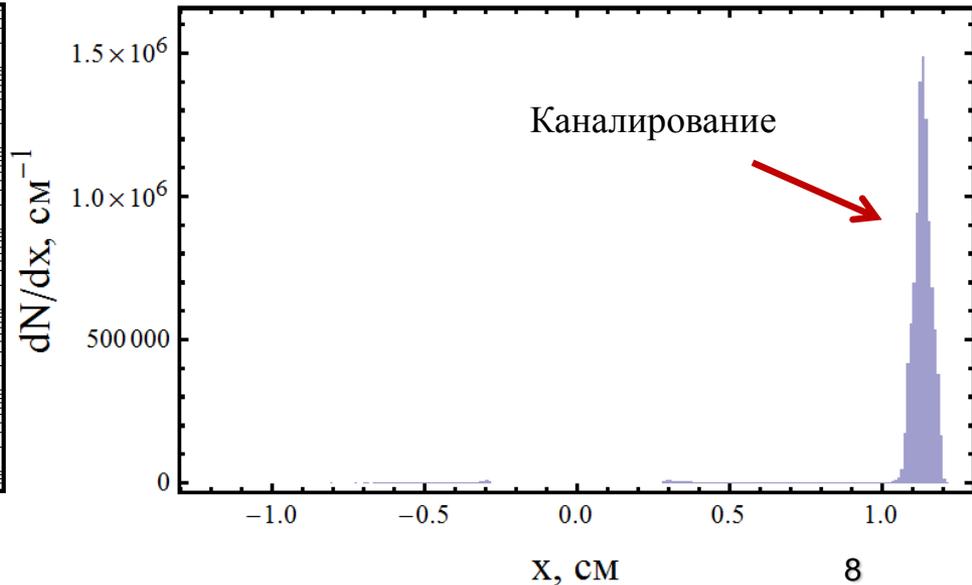
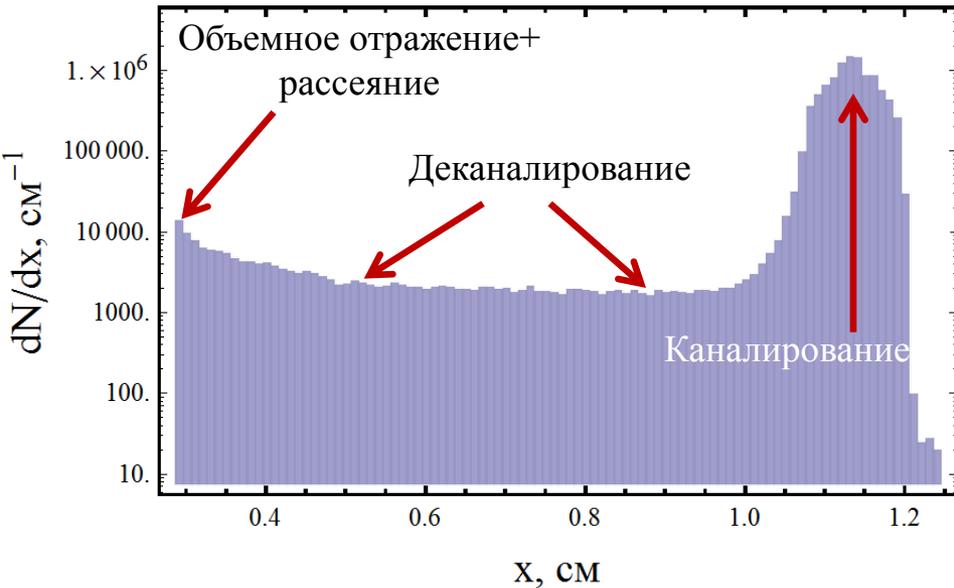
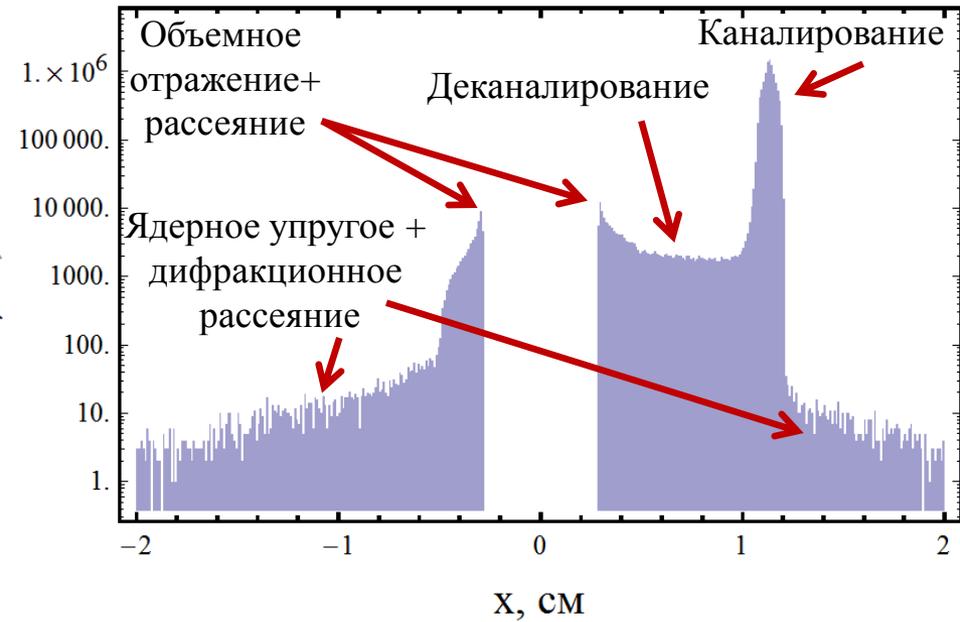
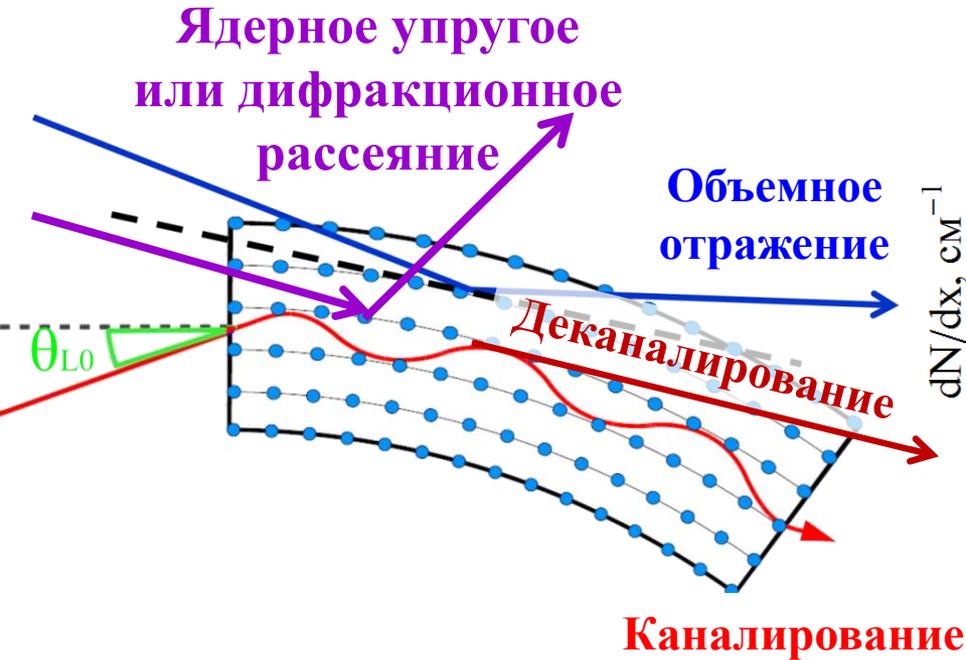


Доля неупругих потерь частиц в кристалле Si (110) в зависимости от его ориентации



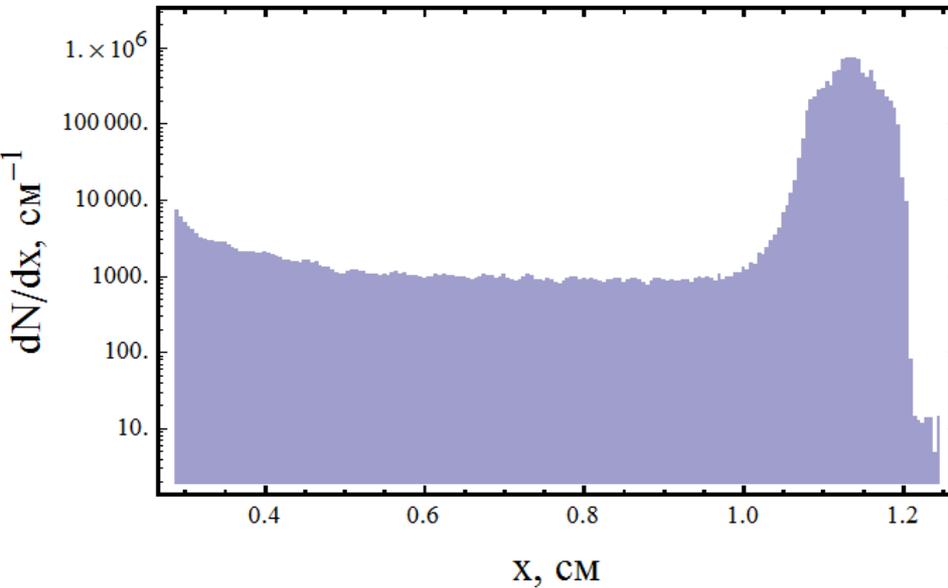
3 различные типа однократного рассеяния на ядрах вносят примерно одинаковый вклад в эффективность коллимации, существенный только при «аморфной» ориентации кристалла

Распределение частиц на коллиматоре, каналирование

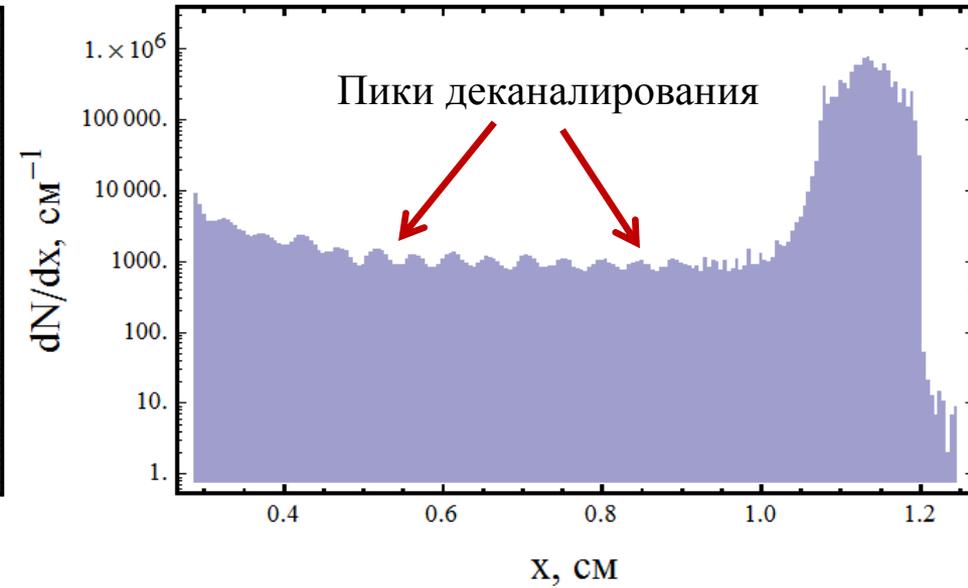


Пики деканализирования при 7 ТэВ

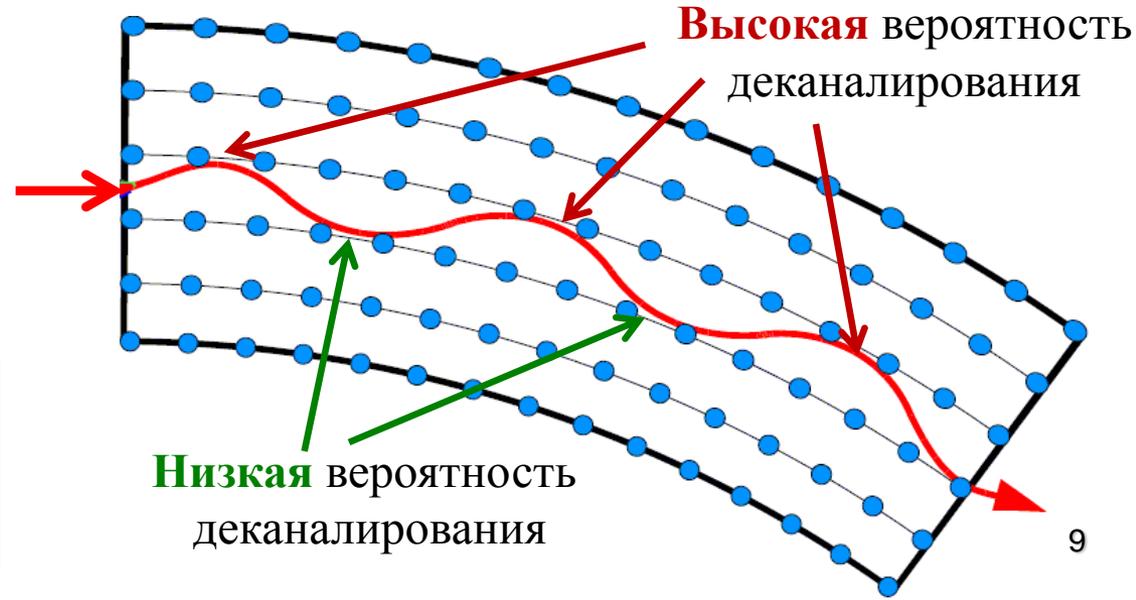
Кристалл: длина 5мм, радиус кривизны 125м
 $\theta_{sc} \approx 0,4$ мкрад $< \Delta\theta_{peaks} \approx 0,96$ мкрад



Кристалл: длина 3мм, радиус кривизны 75м
 $\theta_{sc} \approx 0,3$ мкрад $\ll \Delta\theta_{peaks} \approx 1,6$ мкрад



Причина возникновения пиков деканализирования: высокие корреляции по фазе траекторий частиц, находящихся в зоне деканализирования.



Повторные прохождения через кристалл дополнительно «размывают» пики

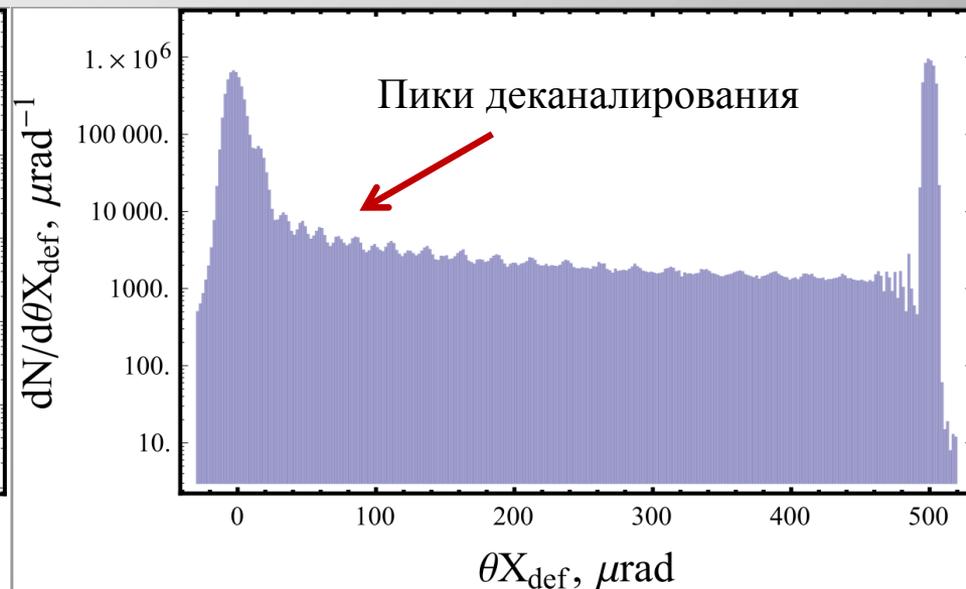
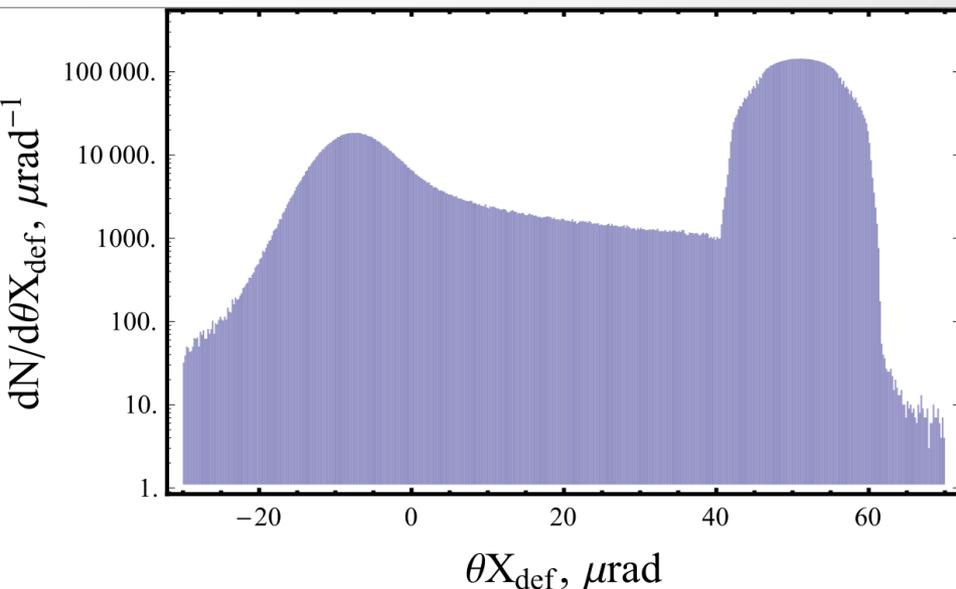
Пики деканализирования при 400 ГэВ

Кристалл: длина 1,94мм, радиус кривизны 38м*

$$\theta_{sc} \approx 4,9 \text{ мкрад} \gg \Delta\theta_{peaks} \approx 0,76 \text{ мкрад}$$

Кристалл: длина 1мм, радиус кривизны 2м

$$\theta_{sc} \approx 3,4 \text{ мкрад} \ll \Delta\theta_{peaks} \approx 14,4 \text{ мкрад}$$



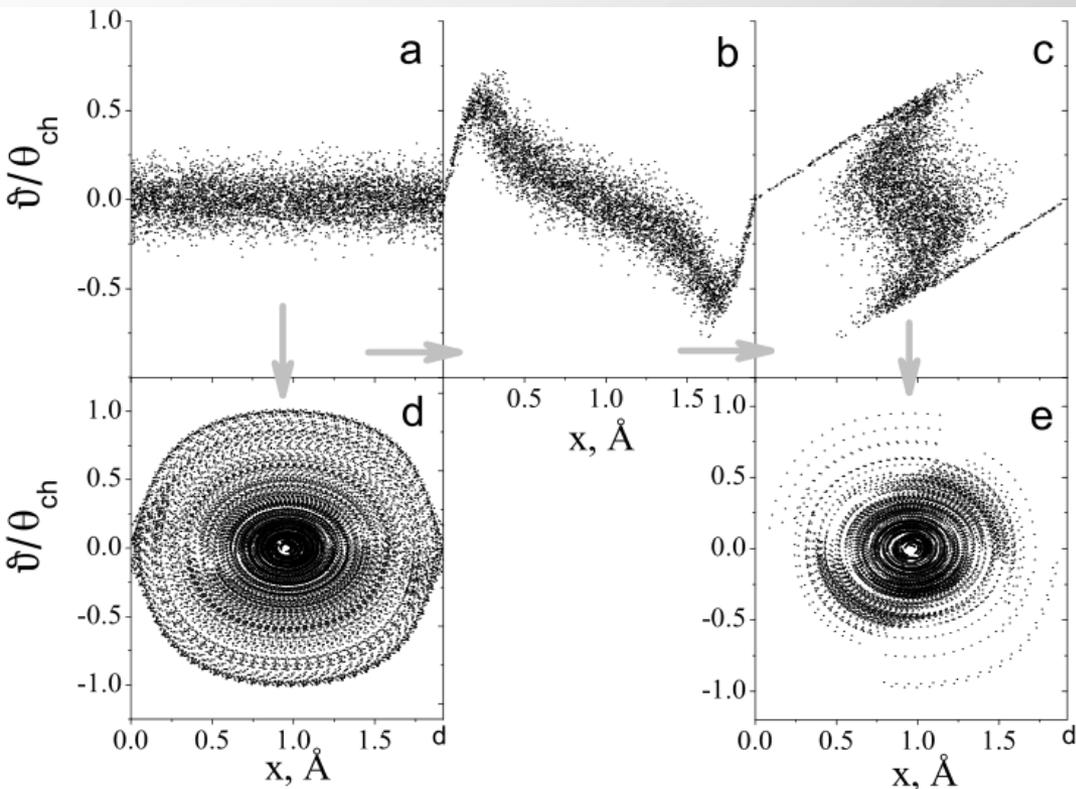
Пики деканализирования возникают при условии, что угловая полуширина пика значительно больше среднеквадратичного угла кулоновского рассеяния на кристалле.

* W. Scandale. Observation of nuclear dechanneling for high-energy protons in crystals. Phys. Lett. B, 2009, Vol. 680, P. 129-132.

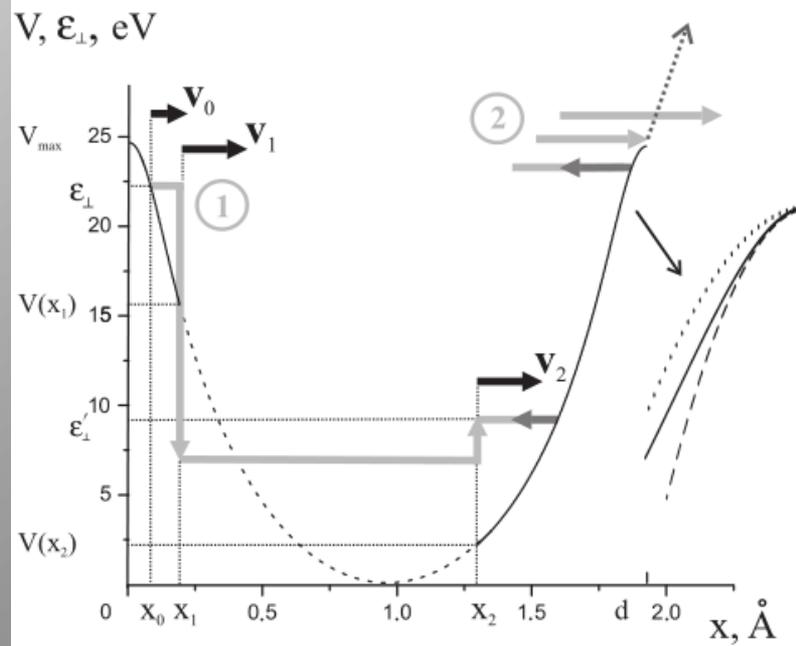
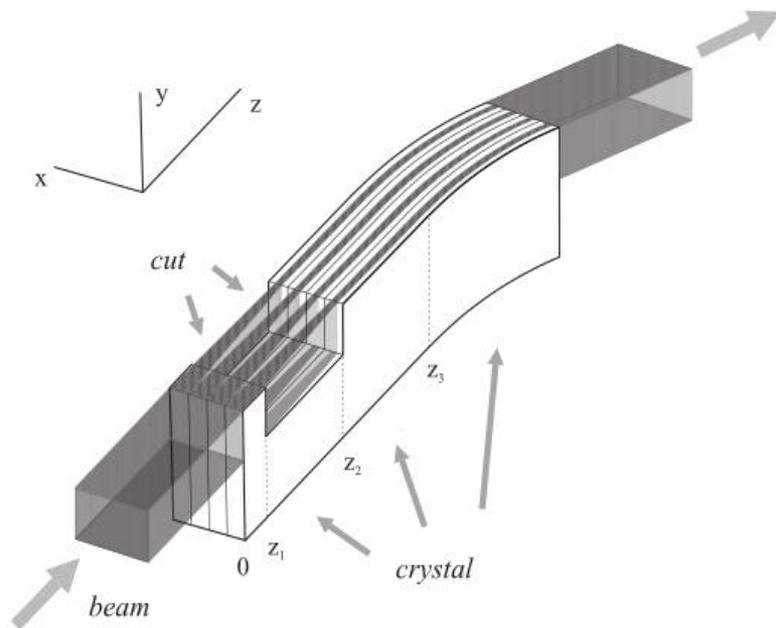
A technique to improve crystal channeling efficiency of charged particles

V.V. Tikhomirov

Research Institute for Nuclear Problems, Belarus State University,
Bobruiskaya 11, 220030 Minsk, Belarus
E-mail: vvtikh@mail.ru

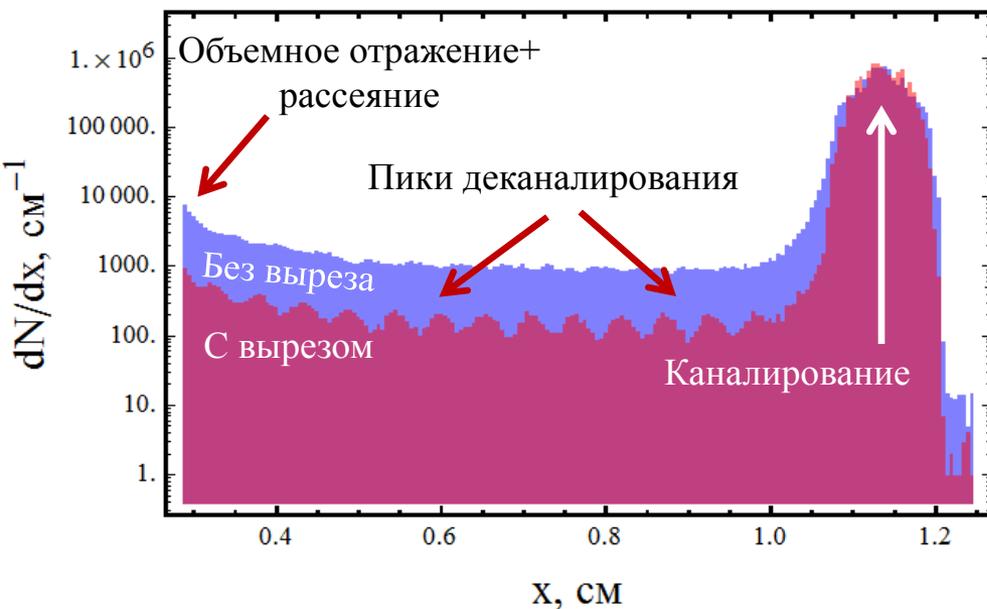


Фазовое пространство пучка а) $z = 0$, б) $z = z_1$,
в) $z = z_2$ and е) at $z = z_2 + \pi v_{||} / 2\omega$ (с вырезом) и
д) $z = z_1 + \pi v_{||} / \omega$ (без выреза)

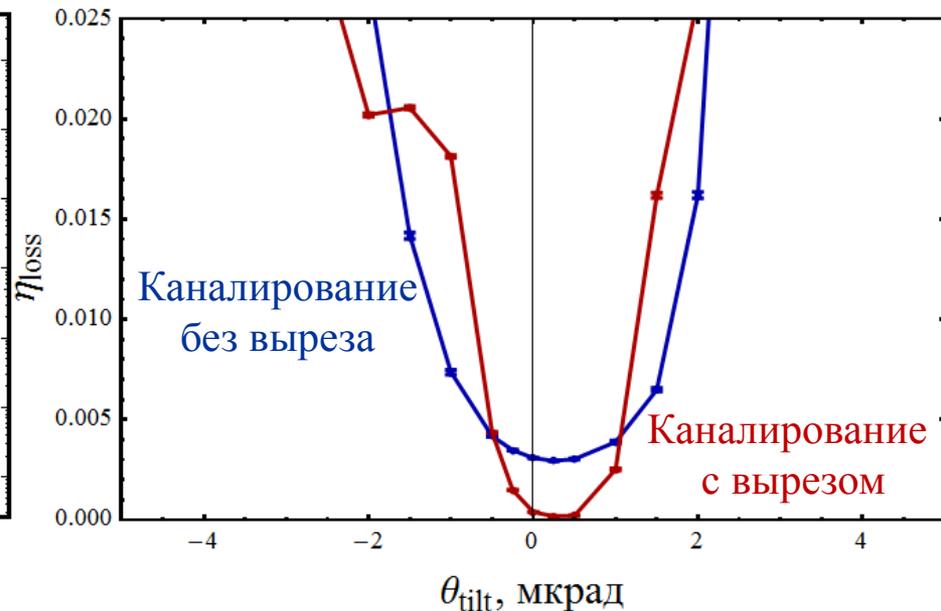


Метод кристаллического выреза для повышения эффективности каналирования до 98-99%

Распределение горизонтальных углов отклонения



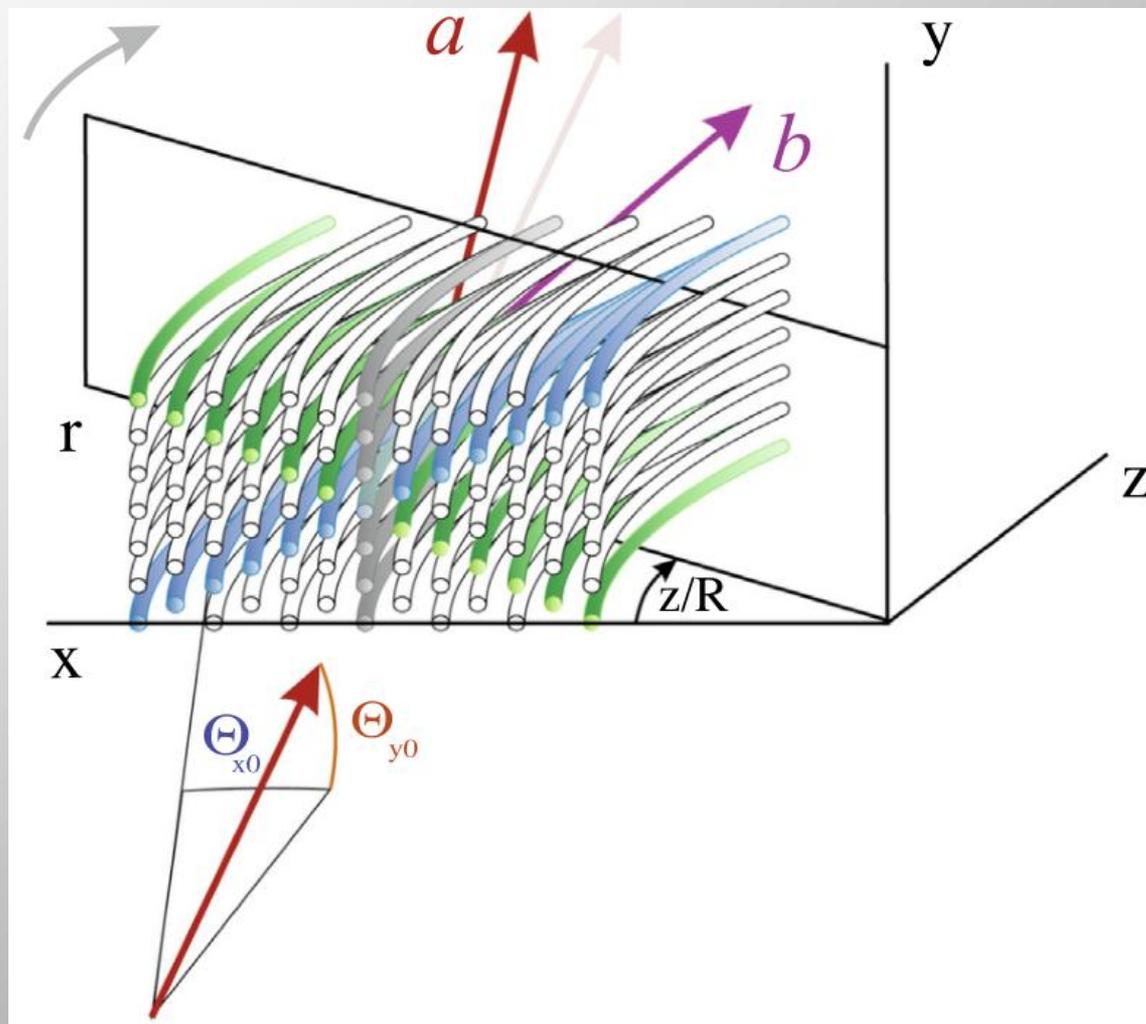
Распределение горизонтальных углов отклонения



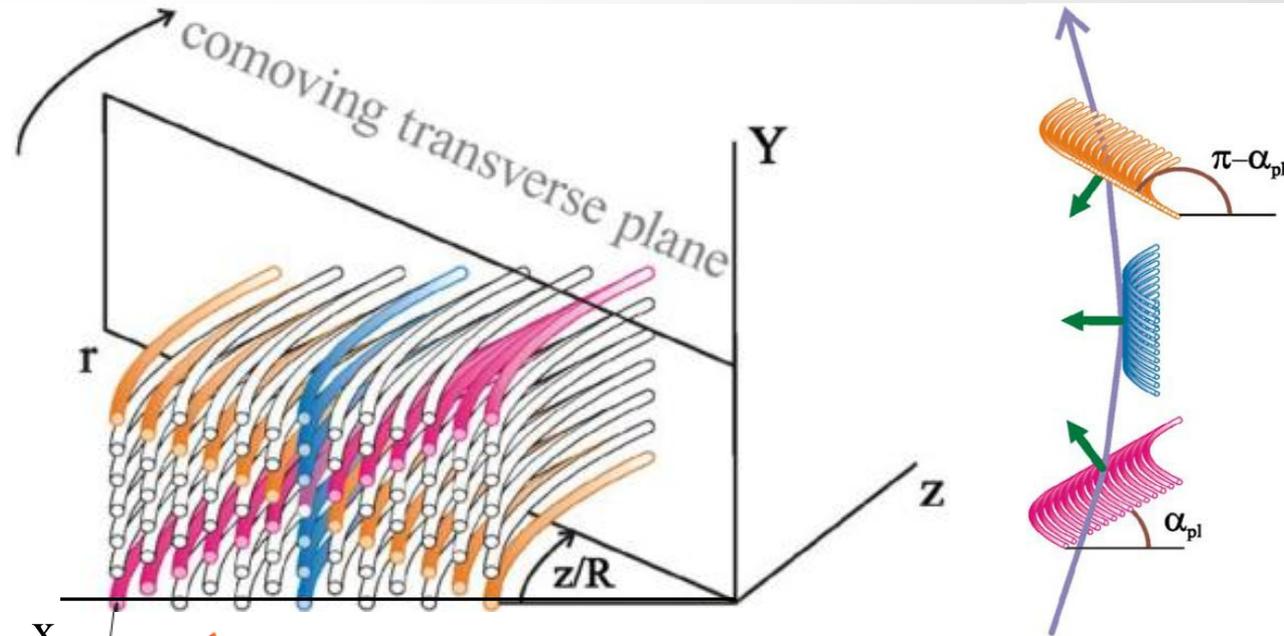
Эффективность каналирования при первом прохождении возрастает на **13.5%**!
Эффективность коллимации при идеальной ориентации достигает **99.98%**!
Количество неупругих ядерных реакций в кристалле уменьшается в **15 раз**!

Параметры выреза: $z_1=17\mu\text{м}$; $z_2=71\mu\text{м}$ на энергии БАК

Многократное объемное отражение в одном кристалле и система коллимации Большого адронного коллайдера

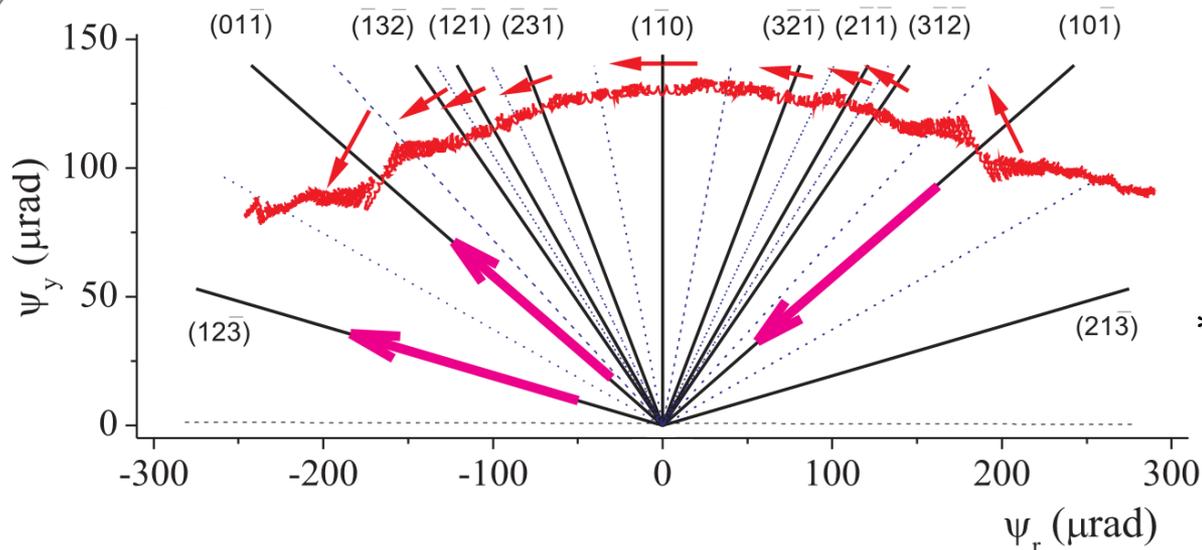


Многokrатное объемное отражение в одном кристалле*



Оси формируют
МНОГО
наклонных
отражающих
плоскостей

Эволюция углов частицы в плоскости y-r**



*V. Tikhomirov,
PLB 655 (2007) 217;
V. Guidi, A. Mazzolari
and V. Tikhomirov,
JAP 107 (2010) 114908
**V. Tikhomirov, A. Sytov,
NIMB 59353 (2013)

Collimation of the Circulating Beam in the U-70 Synchrotron by Means of the Reflection of Particles in Crystals with Axial Orientation

A. G. Afonin, V. T. Baranov, M. K. Bulgakov, I. S. Voinov, V. N. Gorlov, I. V. Ivanova,
D. M. Krylov, A. N. Lun'kov, V. A. Maisheev, S. F. Reshetnikov, D. A. Savin,
E. A. Syshchikov, V. I. Terekhov, Yu. A. Chesnokov,
P. N. Chirkov, and I. A. Yazynin

Institute for High Energy Physics, Protvino, Moscow region, 142281 Russia

Received January 18, 2011



A LETTERS JOURNAL EXPLORING
THE FRONTIERS OF PHYSICS

March 2011

EPL, 93 (2011) 56002

www.epljournal.org

doi: 10.1209/0295-5075/93/56002

Observation of multiple volume reflection by different planes in one bent silicon crystal for high-energy negative particles

W. SCANDALE¹, A. VOMIERO², E. BAGLI³, S. BARICORDI³, P. DALPIAZ³, M. FIORINI³, V. GUIDI³,
A. MAZZOLARI³, D. VINCENZI³, R. MILAN⁴, G. DELLA MEA⁵, E. VALLAZZA⁶, A. G. AFONIN⁷,
YU. A. CHESNOKOV⁷, V. A. MAISHEEV⁷, I. A. YAZYNIN⁷, A. D. KOVALENKO⁸, A. M. TARATIN^{8(a)},
A. S. DENISOV⁹, YU. A. GAVRIKOV⁹, YU. M. IVANOV⁹, L. P. LAPINA⁹, L. G. MALYARENKO⁹,
V. V. SKOROBOGATOV⁹, V. M. SUVOROV⁹, S. A. VAVILOV⁹, D. BOLOGNINI^{10,11}, S. HASAN^{10,11},
A. MATTERA^{10,11}, M. PREST^{10,11} and V. V. TIKHOMIROV¹²

Physics Letters B 682 (2009) 274–277

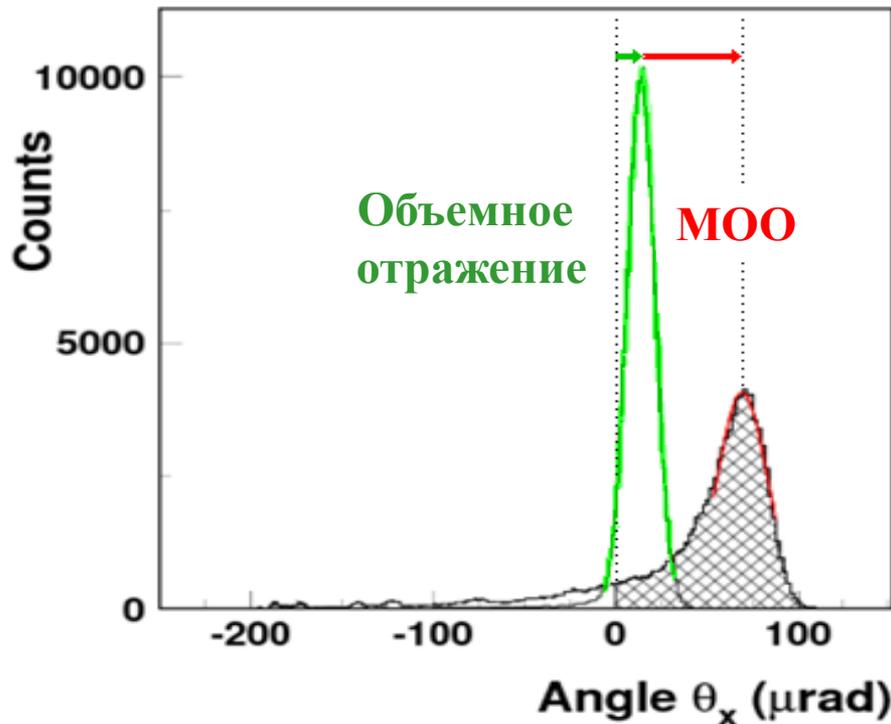
First observation of multiple volume reflection by different planes
in one bent silicon crystal for high-energy protons

W. Scandale^a, A. Vomiero^b, E. Bagli^c, S. Baricordi^c, P. Dalpiaz^c, M. Fiorini^c, V. Guidi^c, A. Mazzolari^c,
D. Vincenzi^c, R. Milan^d, Gianantonio Della Mea^e, E. Vallazza^f, A.G. Afonin^g, Yu.A. Chesnokov^g,
V.A. Maisheev^g, I.A. Yazynin^g, V.M. Golovatyuk^h, A.D. Kovalenko^h, A.M. Taratin^{h,*}, A.S. Denisovⁱ,
Yu.A. Gavrikovⁱ, Yu.M. Ivanovⁱ, L.P. Lapinaⁱ, L.G. Malyarenkoⁱ, V.V. Skorobogatovⁱ, V.M. Suvorovⁱ,
S.A. Vavilovⁱ, D. Bolognini^{j,k}, S. Hasan^{j,k}, A. Mattera^{j,k}, M. Prest^{j,k}, V.V. Tikhomirov^l

Применение МОО

Первое наблюдение МОО

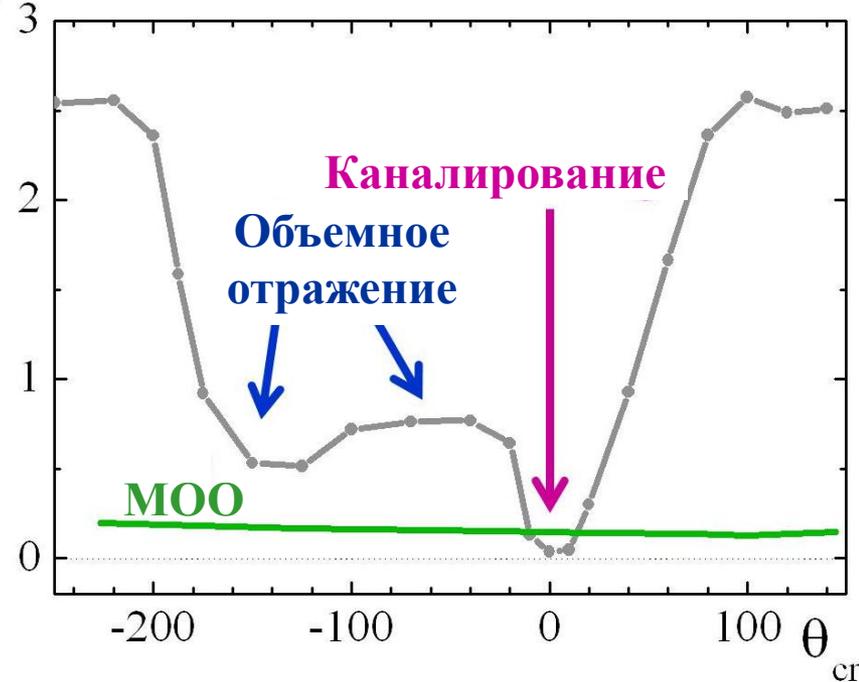
W. Scandale et al, PLB 682(2009)274



Многократное объемное

отражение в эксперименте UA9

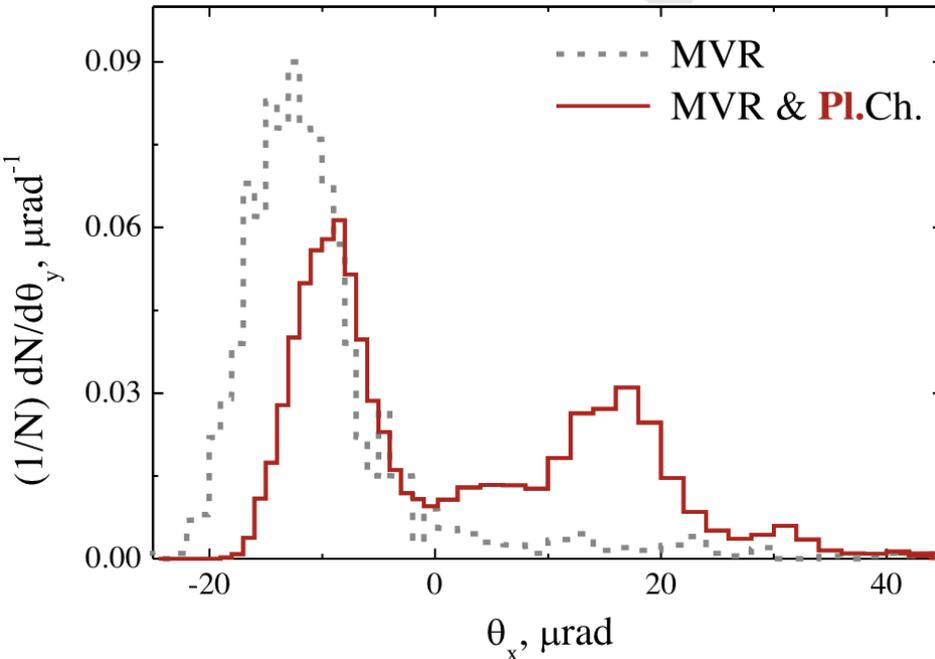
N_r/N , %



Многократное объемное отражение в одном кристалле увеличивает угол отклонения в **5 раз** по сравнению с обычным объемным отражением

Модификация многократного объемного отражения*

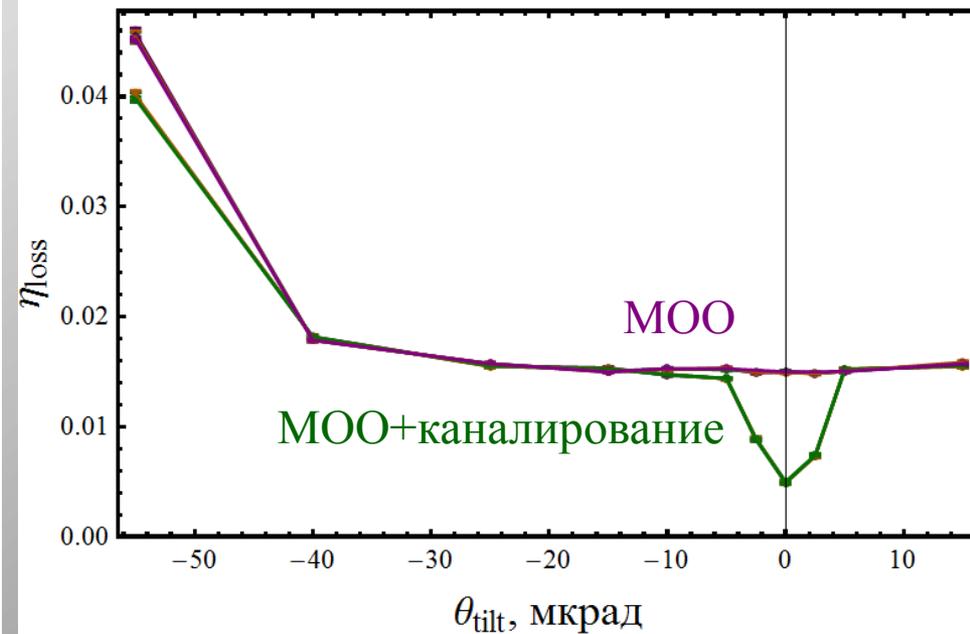
Угловые распределения отклонения протонов энергией 7 ТэВ на кристалле кремния в режимах *многократного объемного отражения* одном кристалле и *комбинированного действия многократного объемного отражения и каналирования*



Угол отклонения в **3-4 раза больше** в случае **комбинации 2 эффектов**; фракция пучка малой угловой расходимости будет отклоняться в режиме каналирования

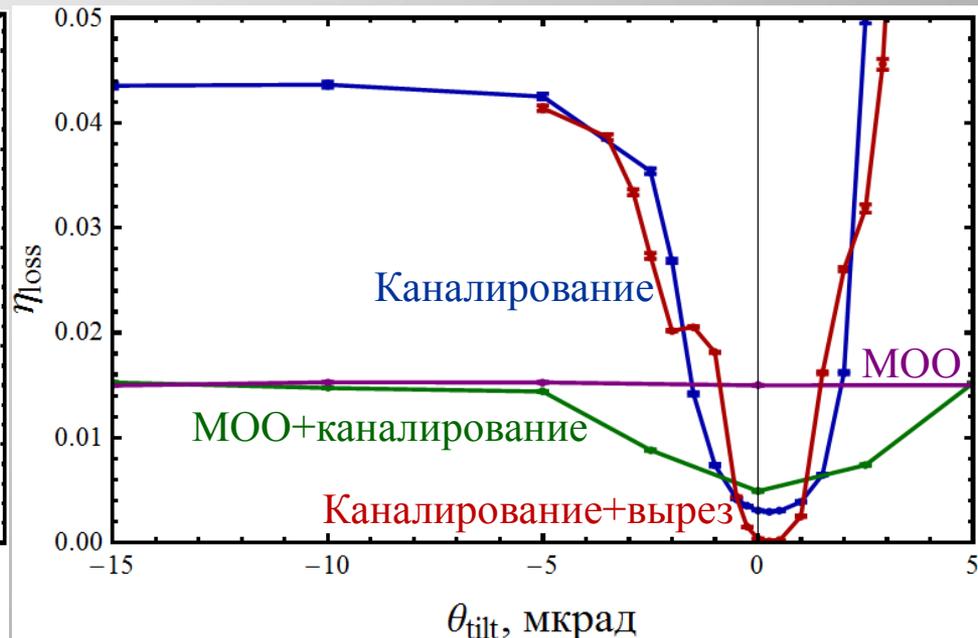
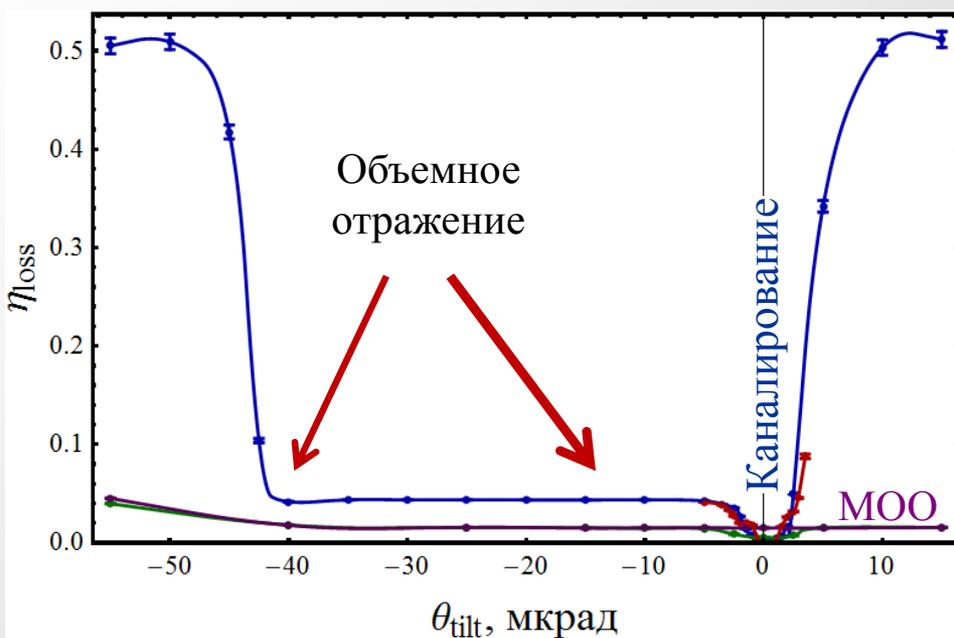
*V. Tikhomirov, A. Sytov, NIMB 59353 (2013)

Доля неупругих потерь частиц в кристалле кремния $\langle 111 \rangle$ в зависимости от его ориентации по отношению к пучку. При $\theta_{\text{tilt}}=0$ углы отклонения осей $\langle 111 \rangle$ кристалла $\theta_x = -30$ мкрад и $\theta_y = -12$ мкрад (МОО) и $\theta_y = -17.3$ мкрад (МОО+каналирование)



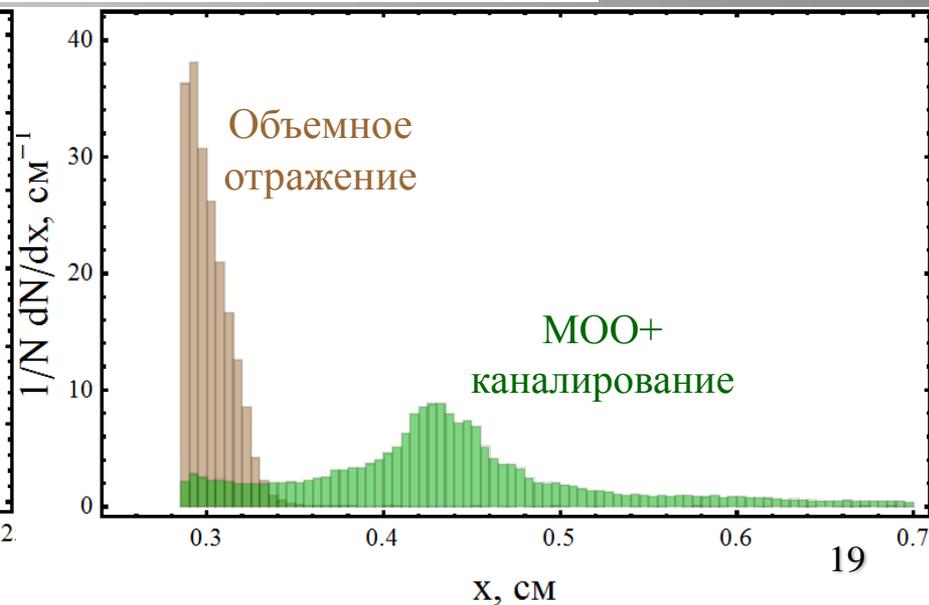
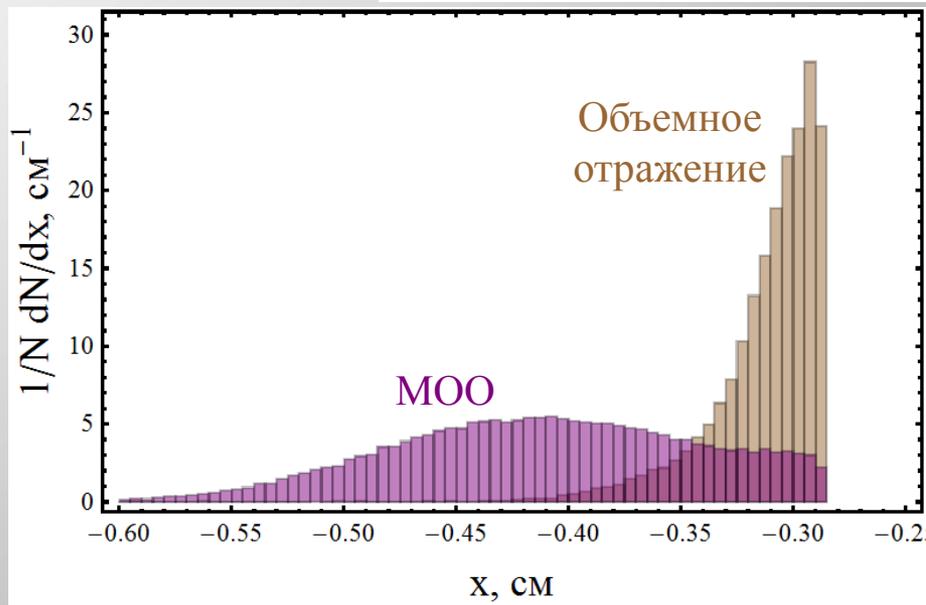
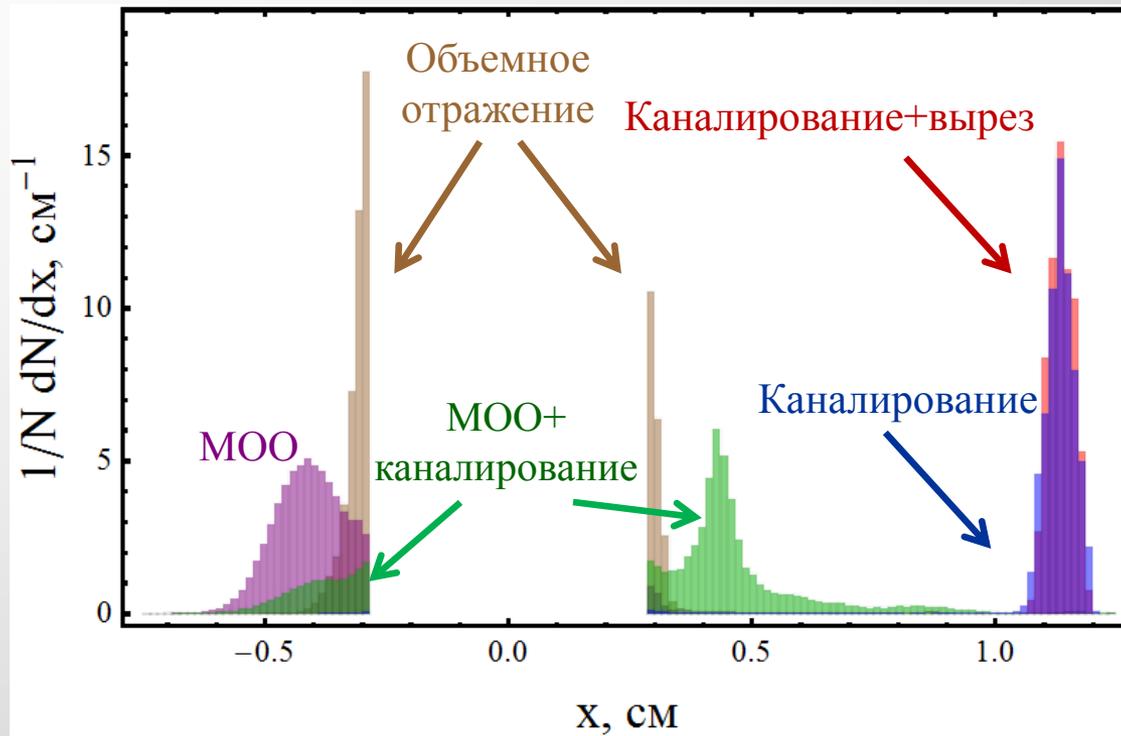
Сильное однократное рассеяние на ядрах практически не вносит вклада в эффективность коллимации

Доля неупругих потерь частиц в кристалле Si в зависимости от его ориентации для различных эффектов и их модификаций



- Вырез позволяет уменьшить потери частиц на порядок по сравнению с каналированием и достичь эффективности коллимации **99,98 %**.
- Комбинированное действие многократного объемного отражения и каналирования полезно в случае большей угловой расходимости пучка, падающего на кристалл, и не требует такой точности юстировки кристалла, как при обычном каналировании.

Распределение частиц на коллиматоре, различные эффекты



Выводы

- Сильное однократное рассеяние на ядрах оказывает заметное влияние только при «аморфной» ориентации кристалла.
- Предсказывается наблюдение пиков деканализирования на Большом адронном коллайдере.
- **Кристаллический вырез** позволяет значительно увеличить эффективность каналирования и снизить количество ядерных реакций в кристалле в **15** раз и увеличить эффективность коллимации до **99,98%**.
- При большей угловой расходимости наиболее эффективным является эффект **многократного объемного отражения в одном кристалле**, поскольку он позволяет отклонять большинство частиц на коллиматор за одно прохождение кристалла, а при повторном прохождении эффективность почти не меняется. Кроме этого эффективность слабо зависит от угловой расходимости, ориентации кристалла и наличия дефектов решетки, что упрощает процесс установки и увеличивает время эксплуатации кристалла.
- **Комбинированное действие каналирования и многократного объемного отражения** дополнительно усиливает эффективность коллимации.



БГУ



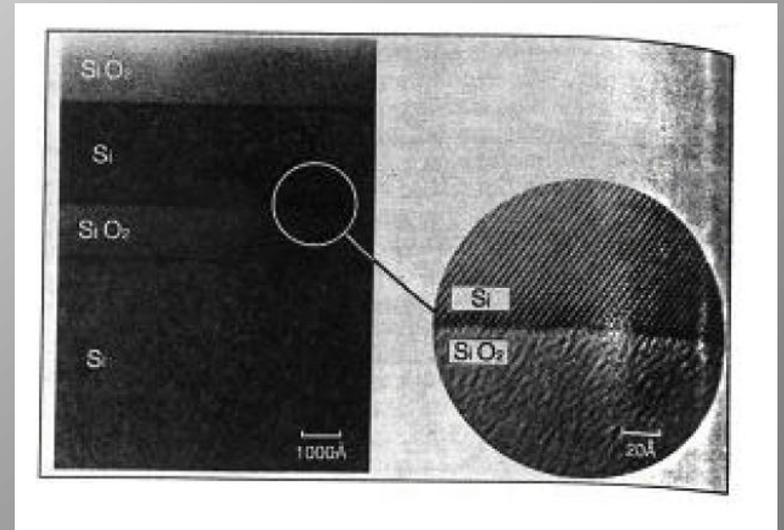
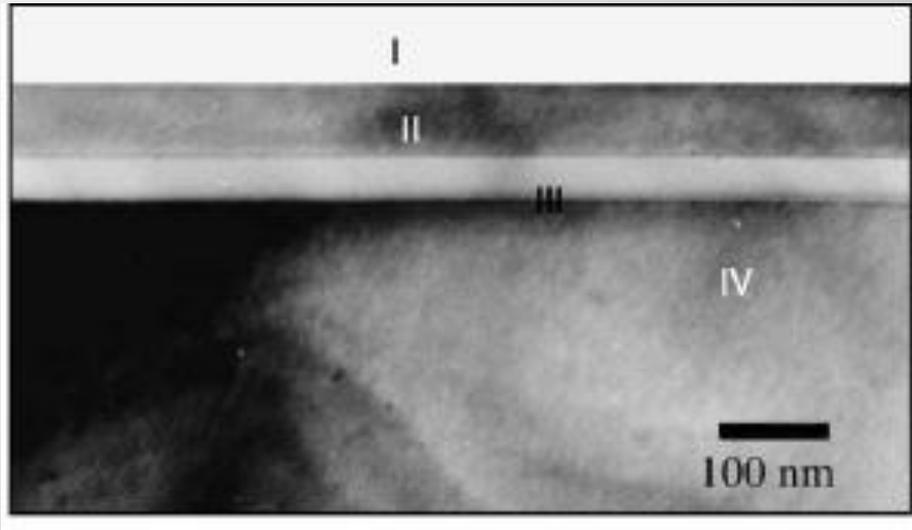
НИИ ЯП



*Дзякуй за ўвагу!
Спасибо за внимание!
Thank you for attention!*

Аморфный слой (SIMOX Buried Oxide Layer) может быть использован вместо кристаллического выреза*

Оптимальная толщина выреза на энергии 8 ГэВ \sim 1 мкм.
Технологически значительно проще создать аморфный
слой вместо выреза.

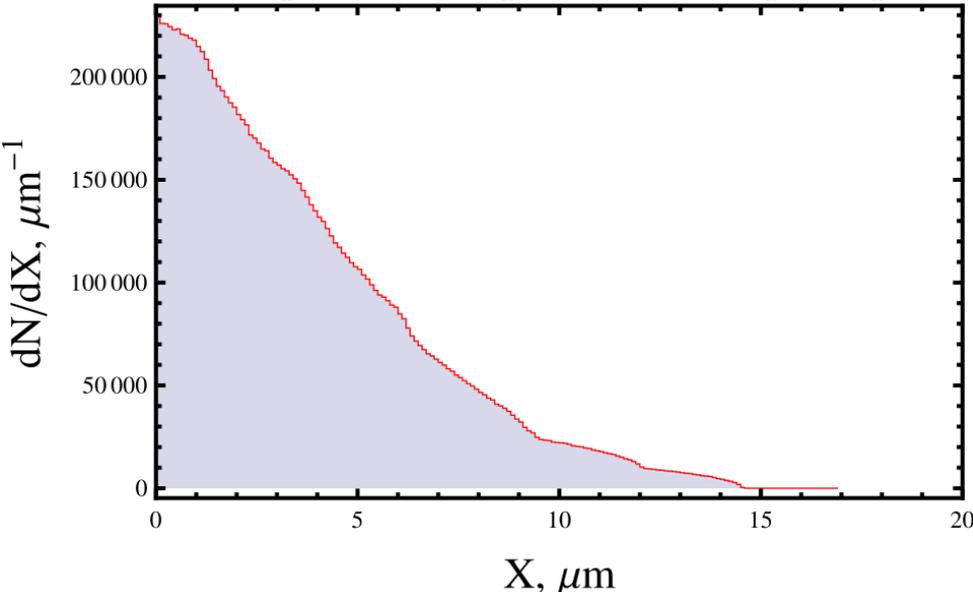


***V. Guidi, A. Mazzolari and V.V. Tikhomirov, J. Phys. D:
Appl. Phys. 42(2009) 165301**

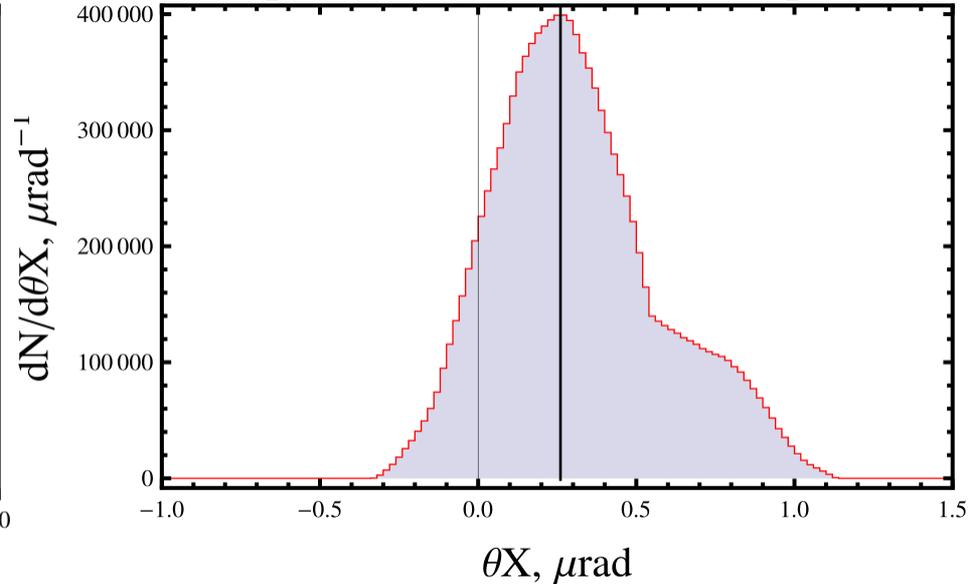
Входные параметры

- **Параметры кристалла:** длина кристалла $l_{cr}=5$ мм, угол изгиба $\theta_b=40$ мкрад, (каналирование);
- Идеальный кристалл без аморфного слоя, угла мискат, паразитного кручения, дислокаций, ...
- Входное распределение пучка протонов энергией 7 ТэВ на входе в кристалл было рассчитано для планируемого эксперимента на БАК при помощи программы SixTrack*.

Распределение прицельного параметра



Распределение угла падения на кристалл

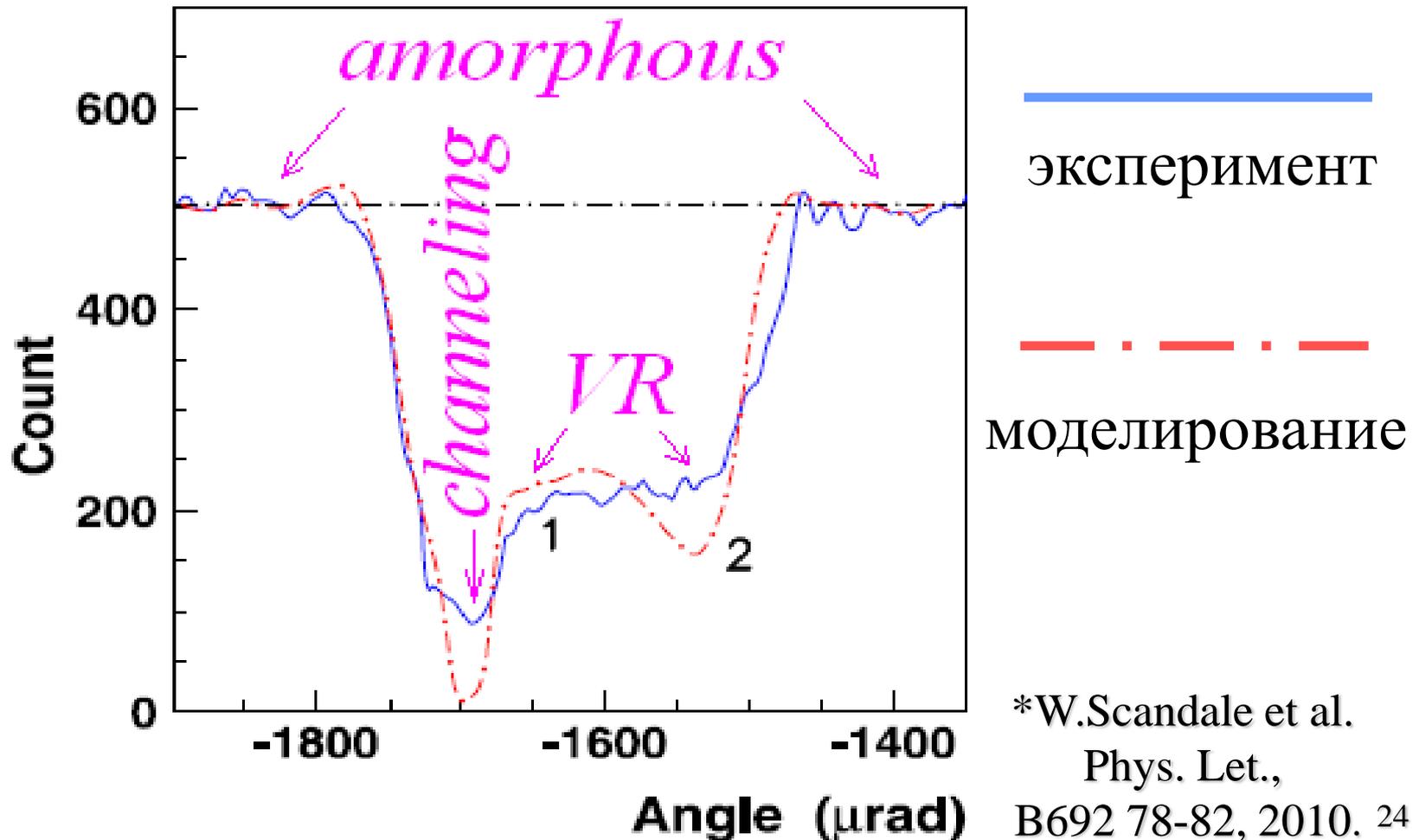


*Schmidt F. A new version of SixTrack with collimation and aperture interface / G. Robert-Demolaize, R. Assmann, S. Redaelli, F. Schmidt // Proc. of 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, USA, May 16-20, 2005. – P. 4084-4086.

Mirarchi D. Layouts for crystal collimation tests at the LHC / D. Mirarchi, S. Redaelli, W. Scandale, V. Previtali // Proc. of IPAC 2013, Shanghai, China, May 12-17, 2013. – MOPWO035.

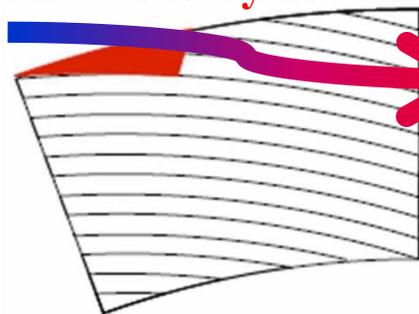
Эксперимент UA9 по кристаллической коллимации на ускорителе SPS (ЦЕРН)*

- Зависимость числа неупругих ядерных взаимодействий протонов в кристалле C1 от его ориентации:

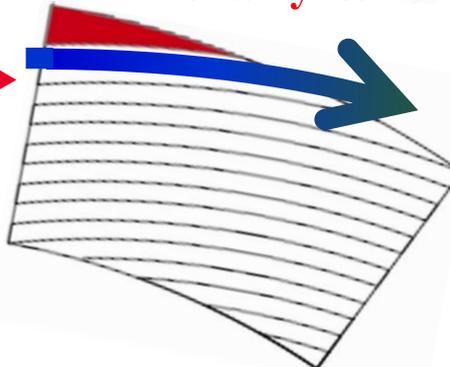


Проблема мискат угла

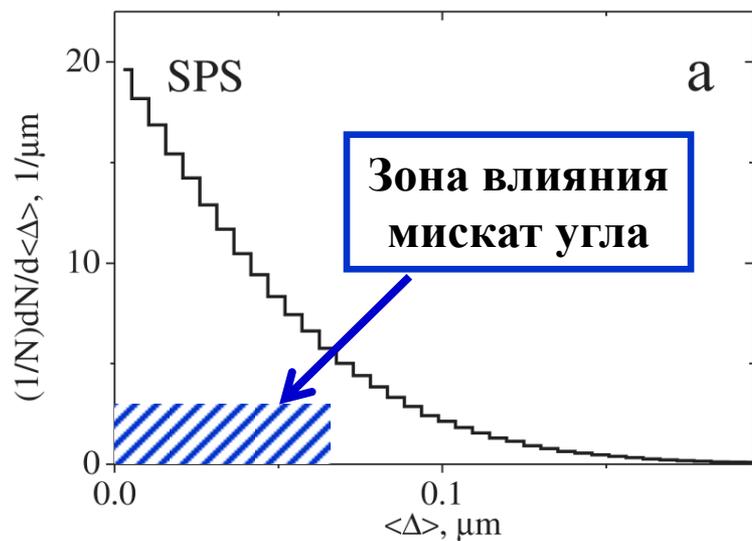
Положительный мискат угол



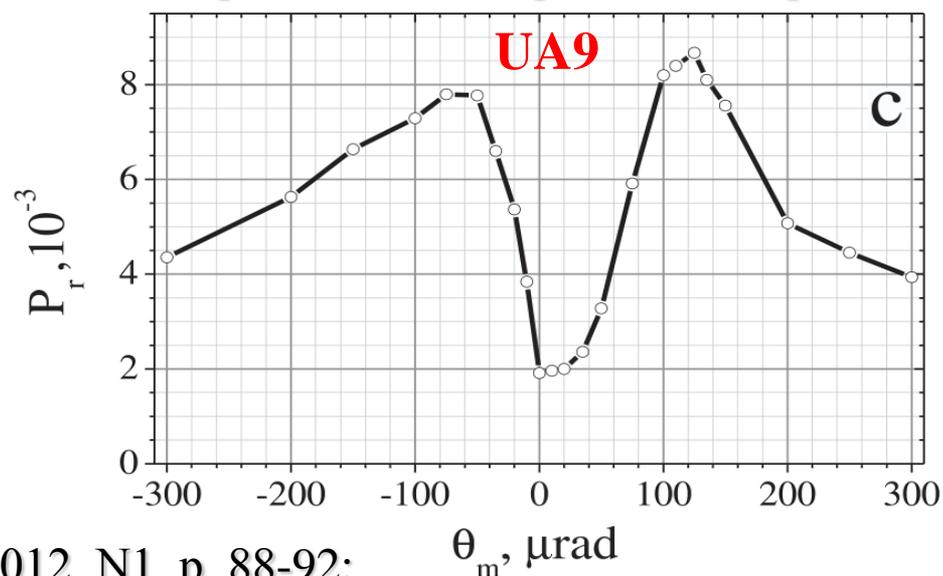
Отрицательный мискат угол



Распределение прицельного параметра падения на кристалл для UA9 (SPS)*



Вероятность ядерных реакций в кристаллическом коллиматоре по отношению к углу *miscut* при идеальной ориентации кристалла*



*V. Tikhomirov, A. Sytov, "VANT" (57), 2012, N1, p. 88-92;
V. Tikhomirov, A. Sytov. arXiv:1109.5051 [physics.acc-ph]

THE MISCUT ANGLE INFLUENCE ON THE FUTURE LHC CRYSTAL BASED COLLIMATION SYSTEM

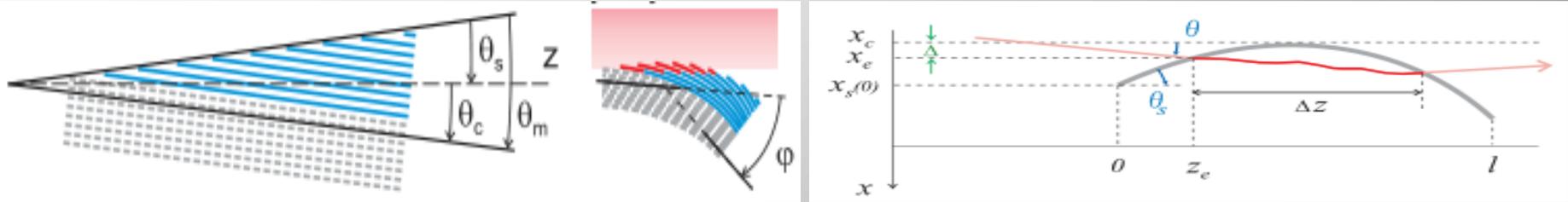
*V.V. Tikhomirov and A.I. Sytov**

Research Institute for Nuclear Problems, Belarus State University, 220030, Minsk, Belarus

(Received October 25, 2011)

PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2012, N 1.

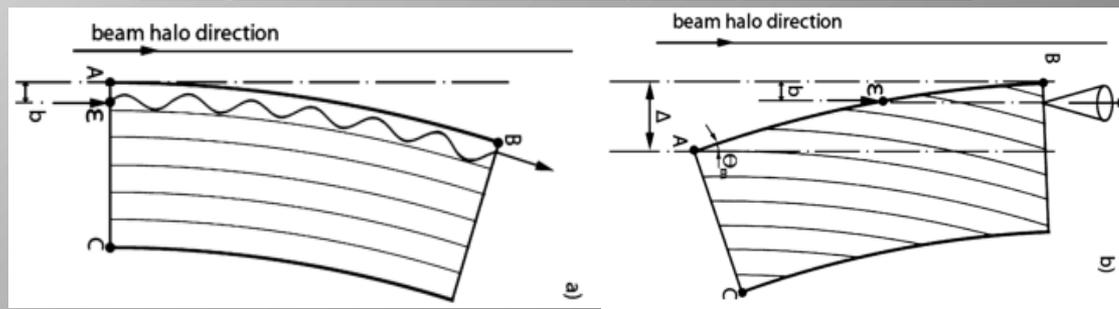
Series: Nuclear Physics Investigations (57), p. 88-92.



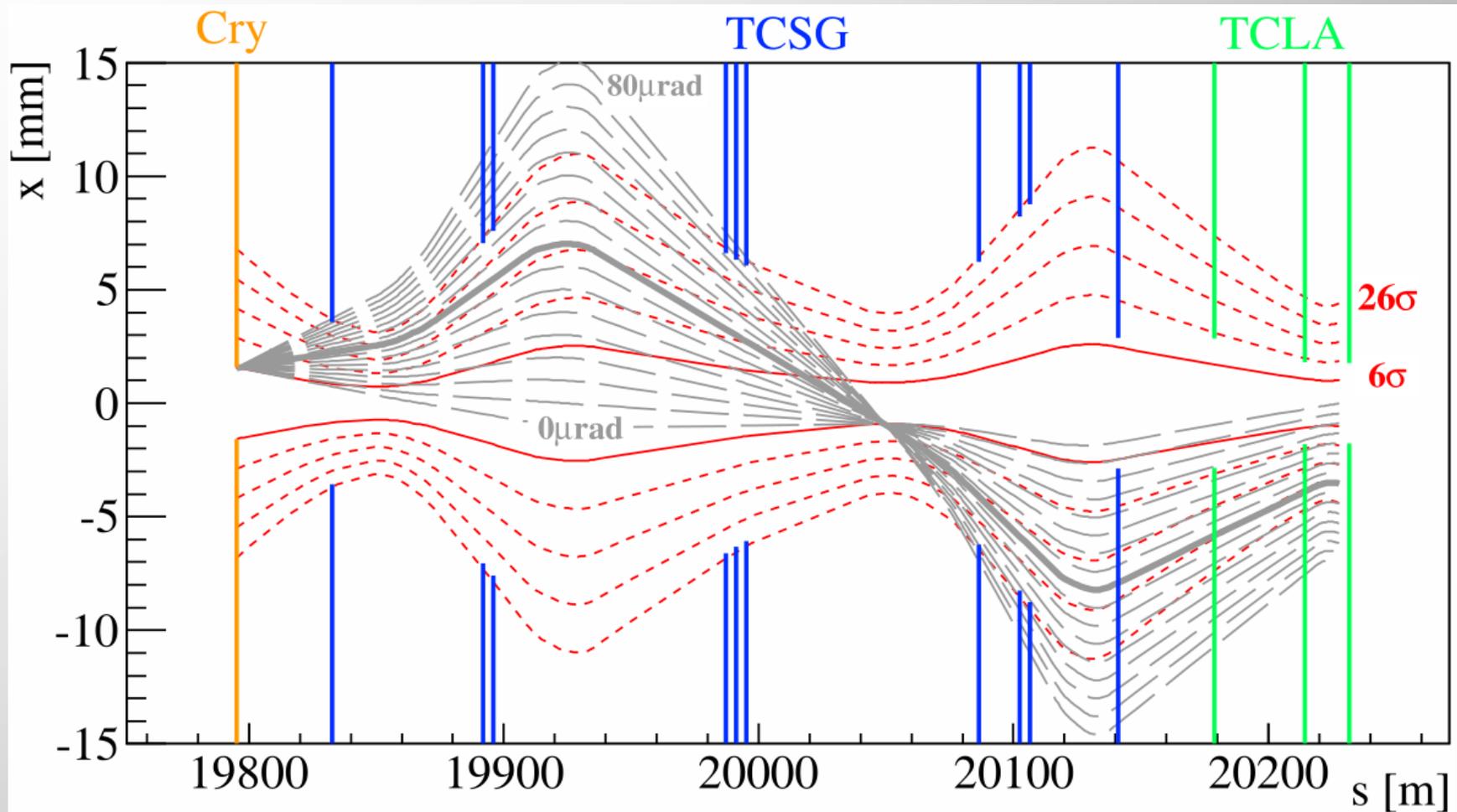
Strong reduction of the off-momentum halo in crystal assisted collimation of the SPS beam

W. Scandale^{a,b,e}, G. Arduini^a, R. Assmann^a, F. Cerutti^a, S. Gilardoni^a, E. Laface^a, R. Losito^a, A. Masi^a, E. Metral^a, D. Mirarchi^a, S. Montesano^a, V. Previtali^a, S. Redaelli^a, G. Valentino^a, P. Schoofs^a, G. Smirnov^a, E. Bagli^c, S. Baricordi^c, P. Dalpiaz^c, V. Guidi^c, A. Mazzolari^c, D. Vincenzi^c, S. Dabagov^d, F. Murtas^d, G. Claps^d, G. Cavoto^e, F. Iacoangeli^e, L. Ludovici^e, R. Santacesaria^e, P. Valente^e, F. Galluccio^f, A.G. Afonin^g, M.K. Bulgakov^g, Yu.A. Chesnokov^g, V.A. Maishev^g, I.A. Yazynin^g, A.D. Kovalenko^h, A.M. Taratin^{h,*}, V.V. Uzhinskiy^h, Yu.A. Gavrikovⁱ, Yu.M. Ivanovⁱ, L.P. Lapinaⁱ, V.V. Skorobogatovⁱ, W. Ferguson^j, J. Fulcher^j, G. Hall^j, M. Pesaresi^j, M. Raymond^j, A. Rose^j, M. Ryan^j, G. Robert-Demolaize^k, T. Markiewicz^l, M. Oriunno^l, U. Wienands^l

Physics Letters B 714 (2012) 231–236



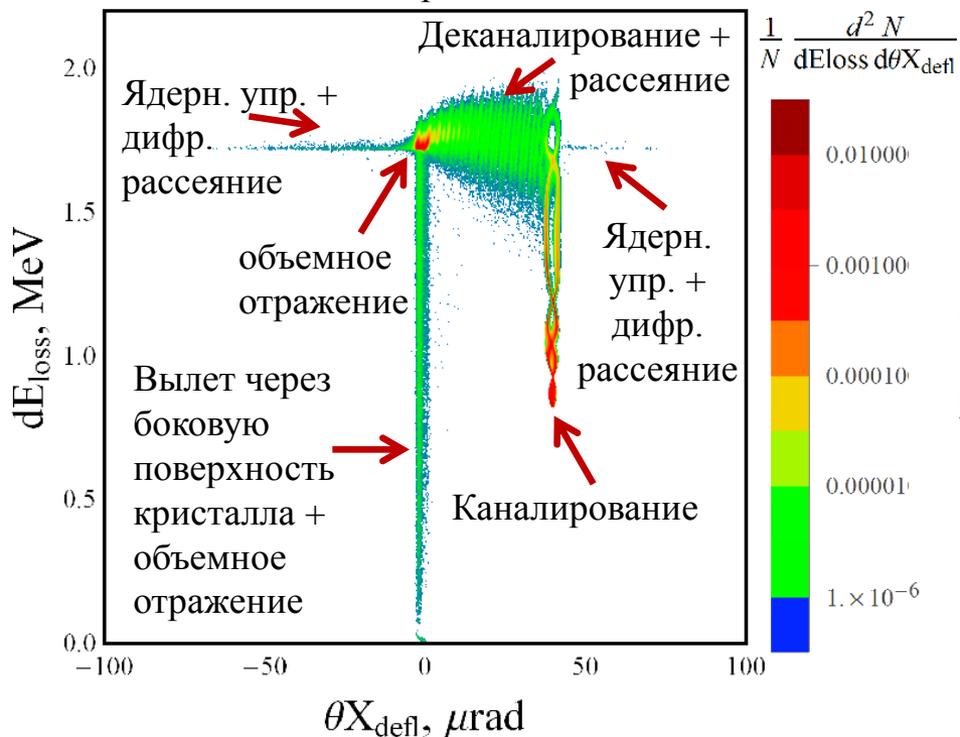
Возможная конфигурация эксперимента по коллимации на основе кристаллов на БАК*



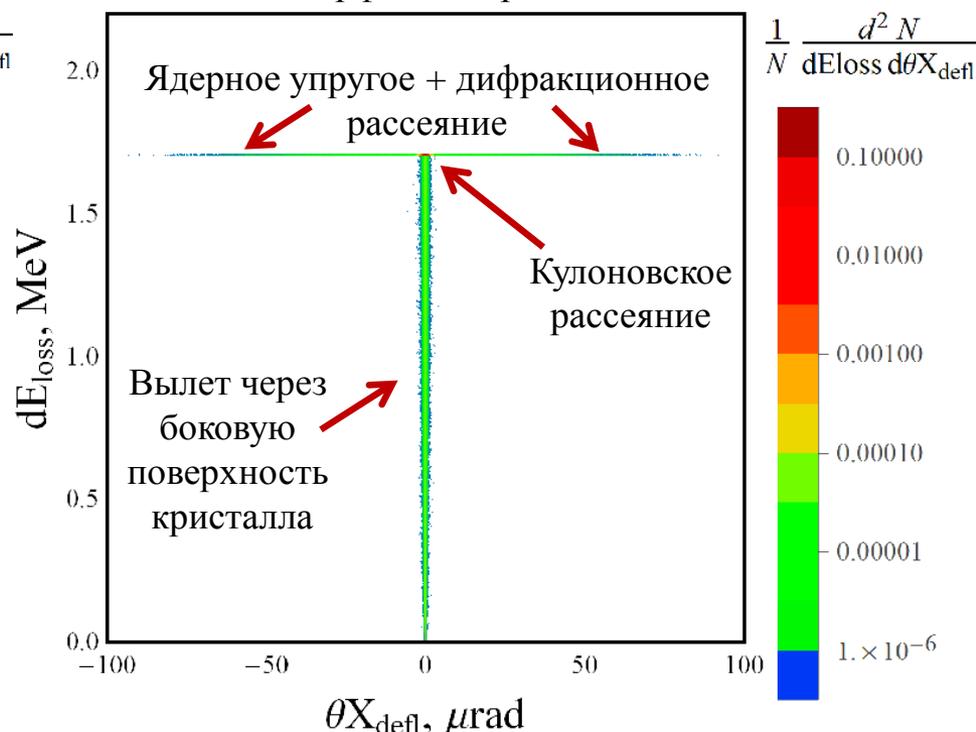
*D. Mirarchi, S. Redaelli, W. Scandale, V. Previtale, Proc. in IPAC 2013, MOPWO035.

Потери энергии частиц на ионизацию

Каналирование



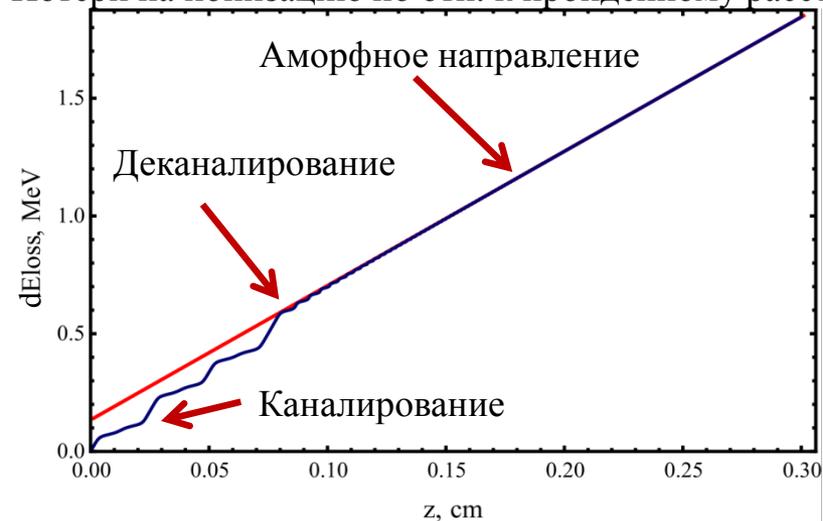
Аморфное направление



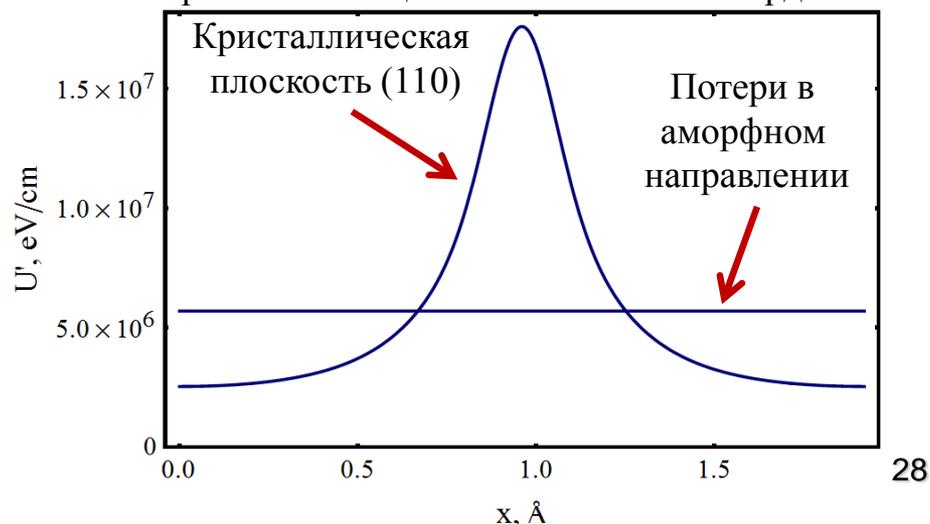
$\theta X_{\text{defl}}, \mu\text{rad}$

$\theta X_{\text{defl}}, \mu\text{rad}$

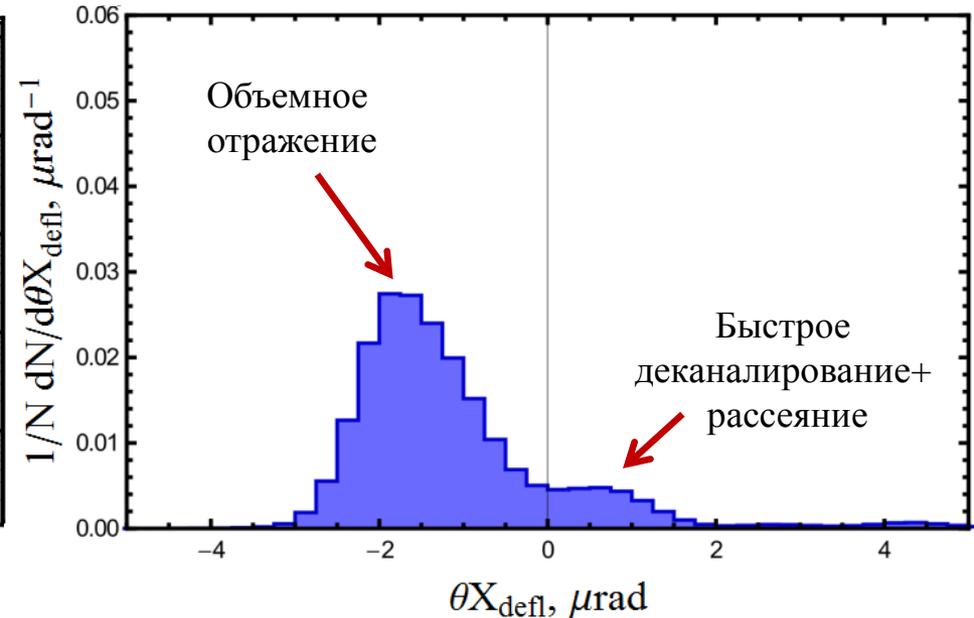
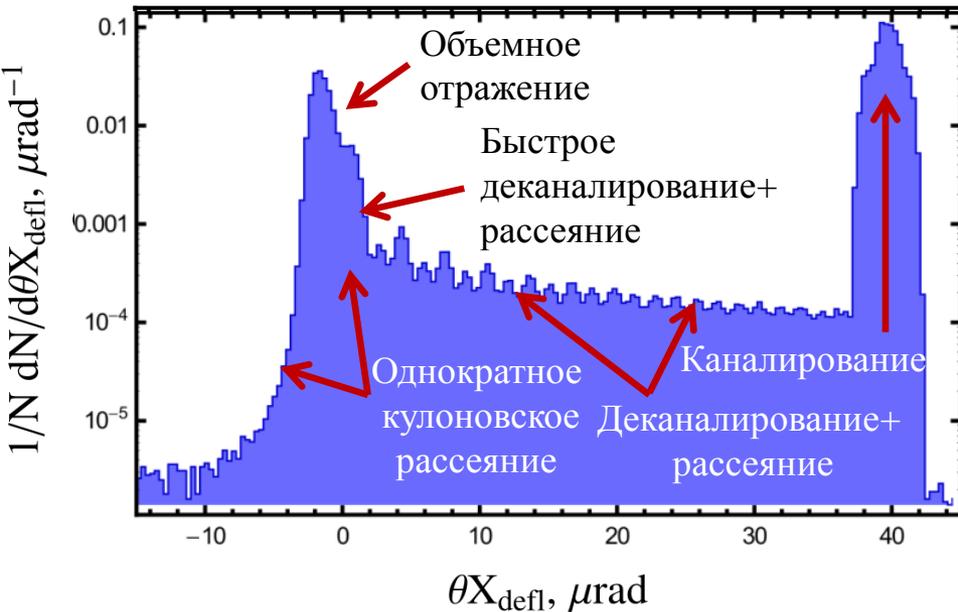
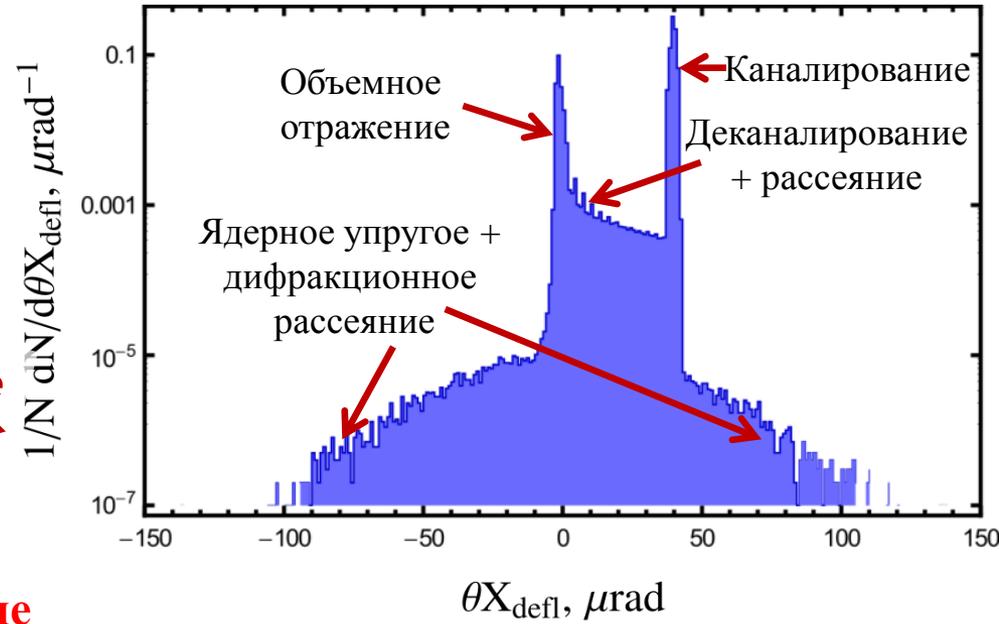
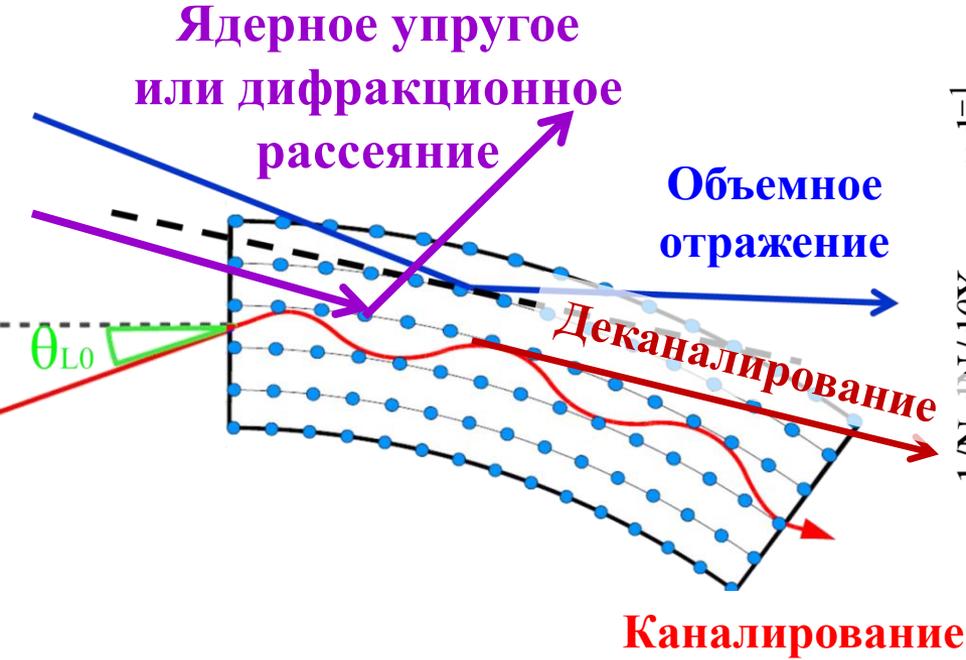
Потери на ионизацию по отн. к пройденному расстоянию



Потери на ионизацию на см по отн. к координате в канале

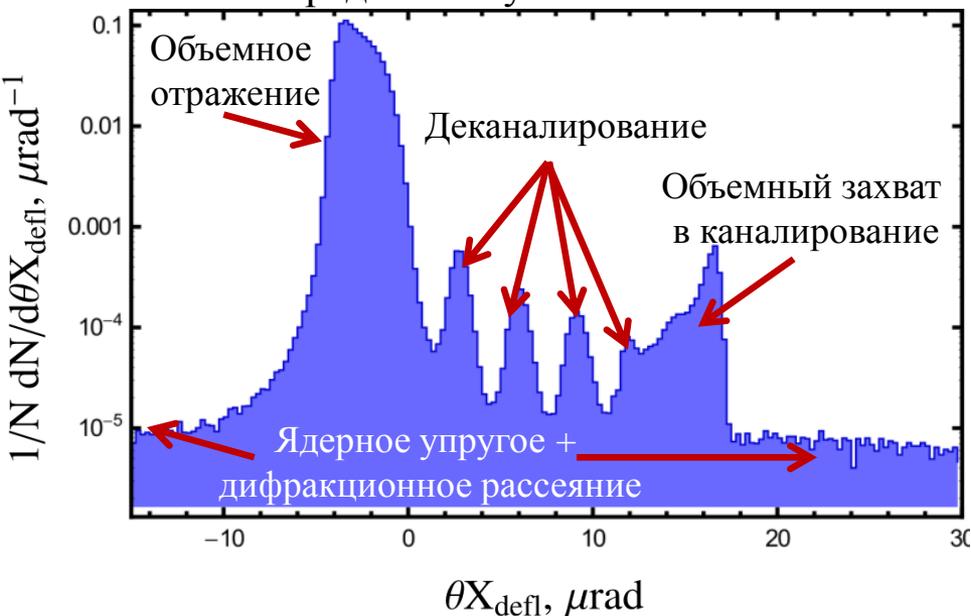


Отклонение частиц кристаллом, ориентация каналирования

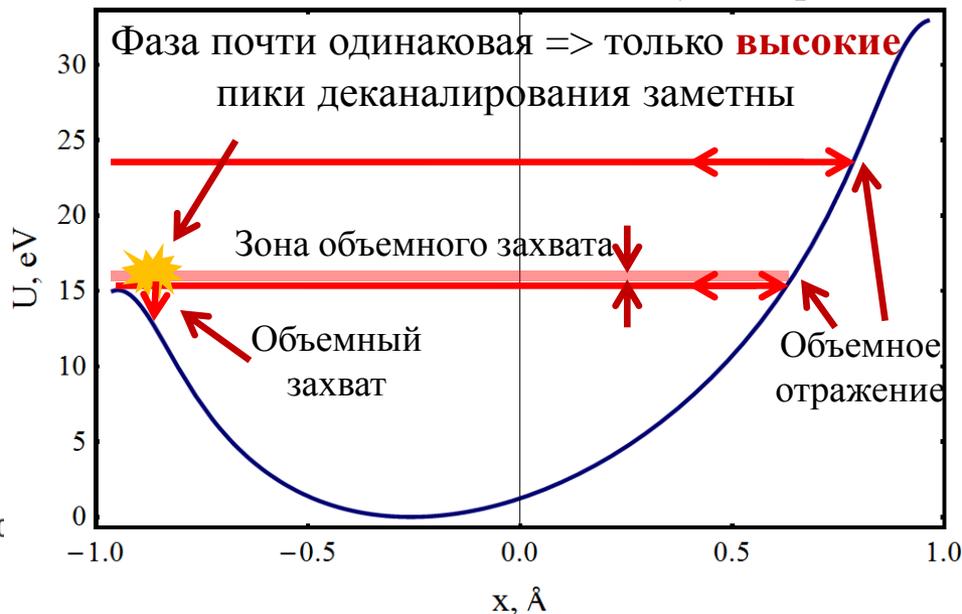


Ориентация объемного отражения: $-25\mu\text{рад}$

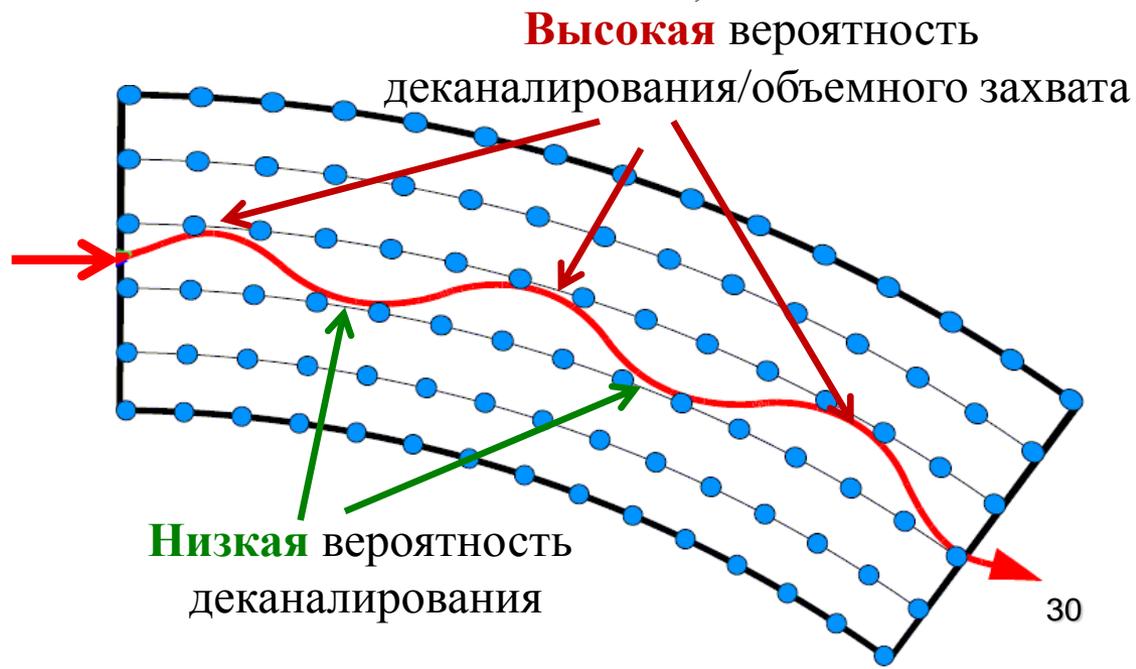
Распределение углов отклонения



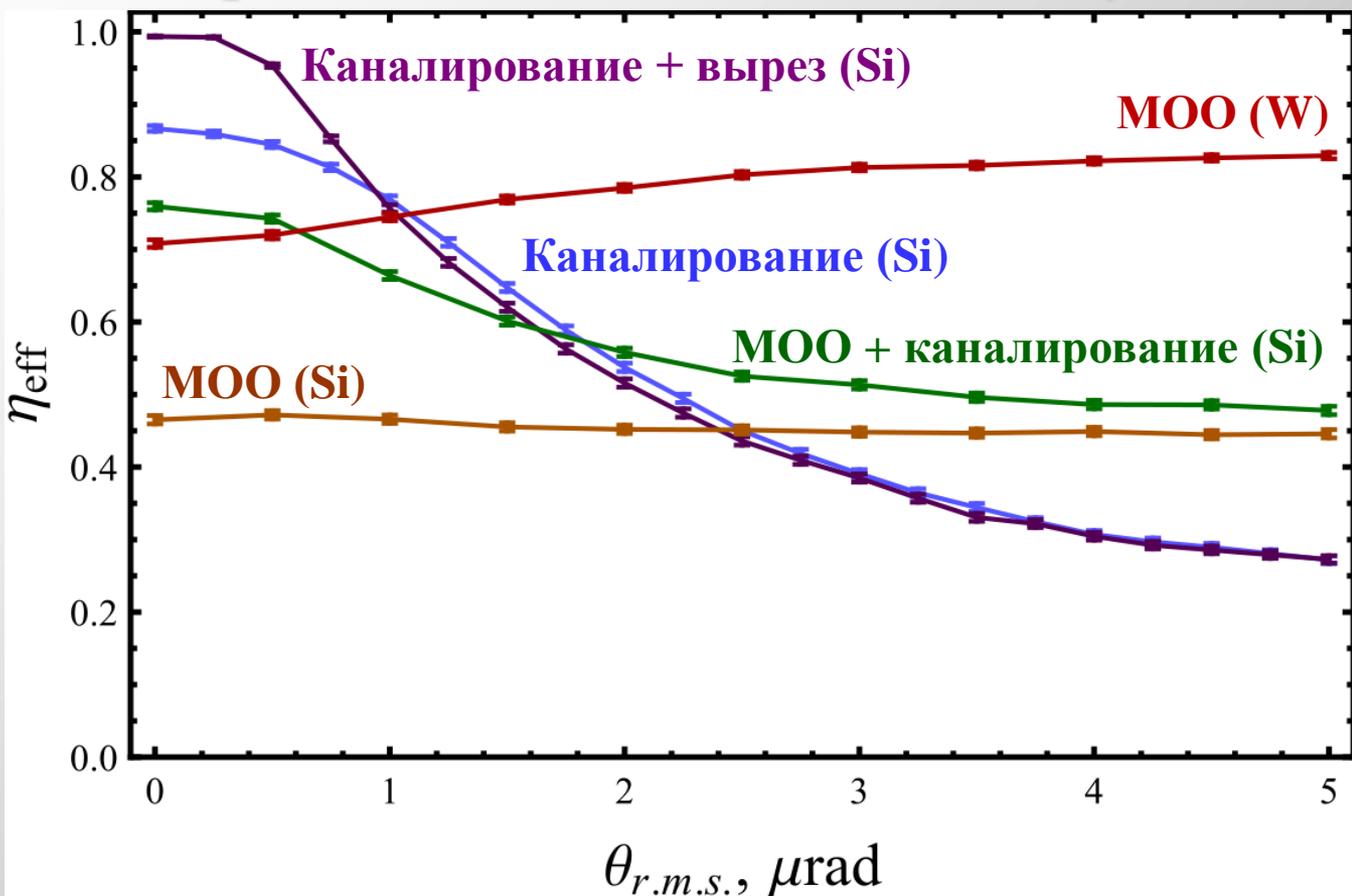
Межплоскостной потенциал в изогнутом кристалле



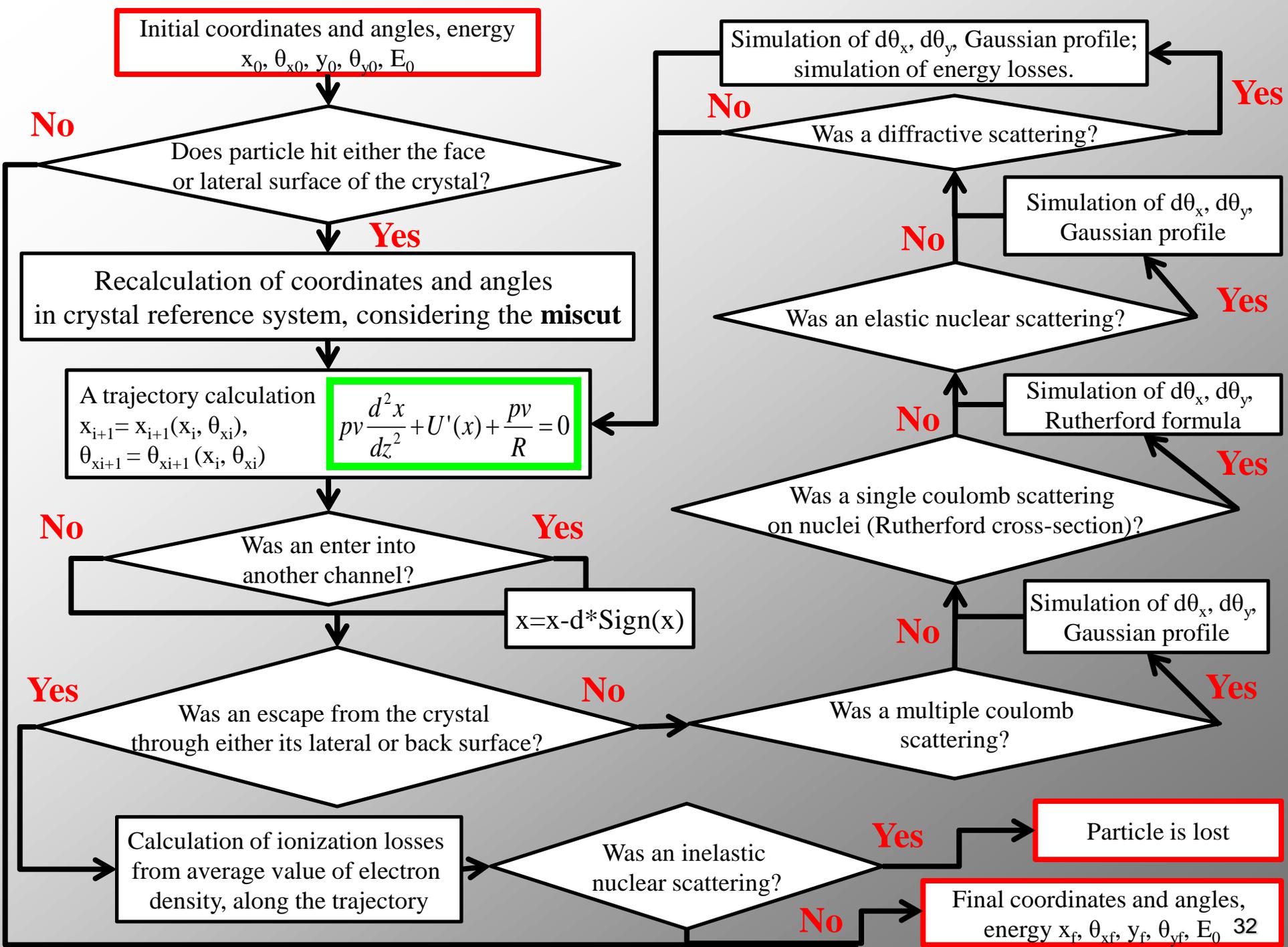
Причина возникновения **пигов деканалирования**: высокие корреляции по фазе траекторий частиц, находящихся в зоне деканалирования.



Эффективность отклонения частиц в зависимости от угловой расходимости падающего пучка на БАК

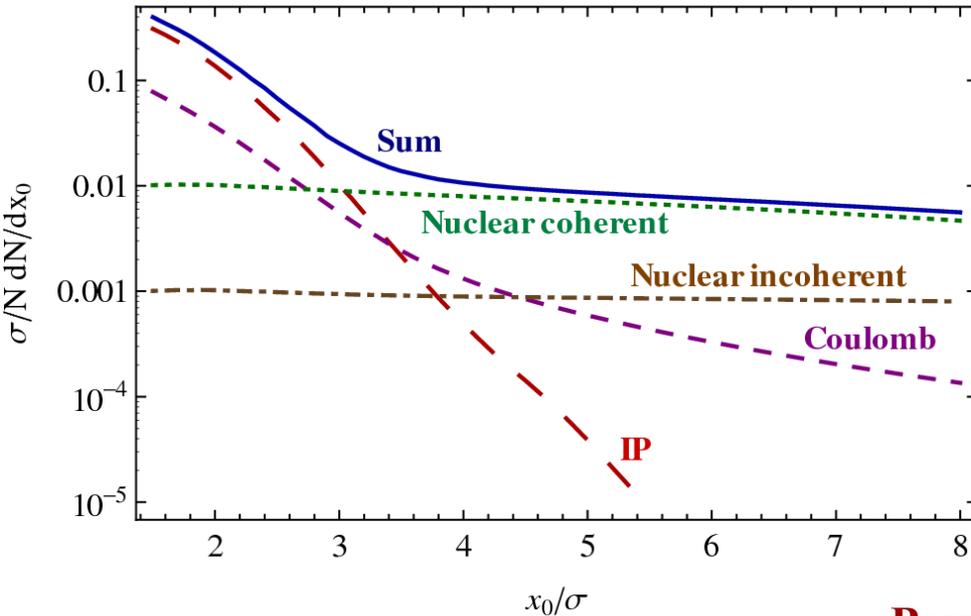


Эффективность отклонения – отношение числа частиц, отклонившихся на угол, превышающий 10 мкрад (этот угол достаточен для попадания частицы на коллиматор*), к общему числу частиц, прошедших через кристалл.

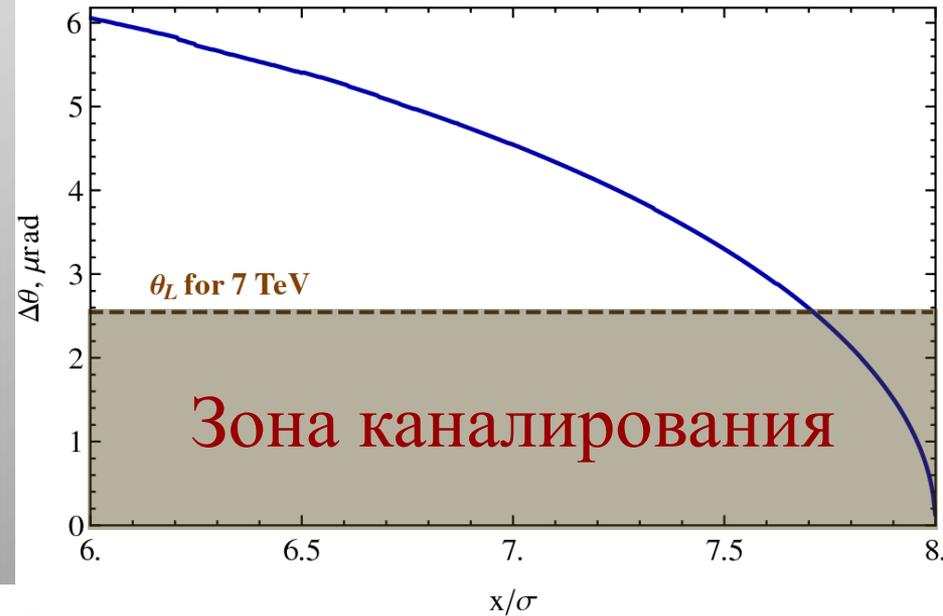


Прицельный параметр и угловая расходимость для применения каналирования на БАК*

Распределение гало протонного пучка энергией 7 ТэВ в БАК после сильного однократного рассеяния за счет различных эффектов. Поперечная координата выражена в единицах среднеквадратичного значения амплитуды бетатронных колебаний.



Среднеквадратичная угловая расходимость фракции гало пучка, попавшей в область коллимации за счет сильного однократного рассеяния, в зависимости от поперечной координаты падения на кристалл. Вторичный коллиматор расположен на 8σ .



Вывод:

Угловая расходимость фракции гало, попавшей в область коллимации за счет сильного неупругого рассеяния, значительно превышает критический угол захвата в режим каналирования. Поэтому, эффективность коллимации на БАК может значительно уменьшится.



БГУ



НИИ ЯП



*Дзякуй за ўвагу!
Спасибо за внимание!
Thank you for attention!*