“Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии” (ИСМАРТ 2014)

12-16 Октября, 2014

ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В КРИСТАЛЛЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОЛЛИМАЦИИ НА ОСНОВЕ ИЗОГНУТЫХ КРИСТАЛЛОВ

А.И. Сытов, И.В. Сафронов

BSU *INP*

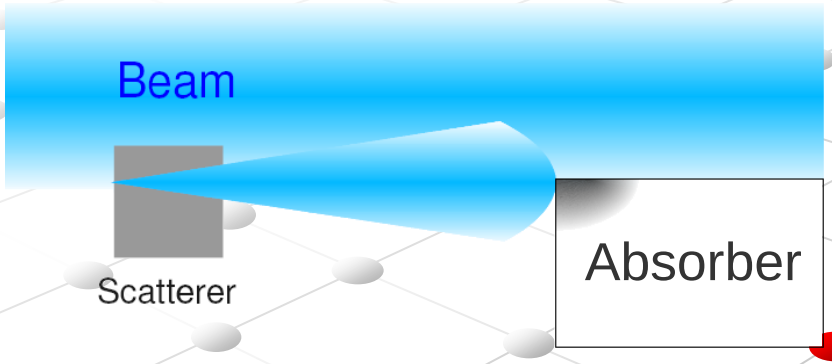
План

- Моделирование эффектов каналирования с помощью программы CRYSTAL.
  - Моделирование эксперимента H8 на SPS ЦЕРН.
  - Моделирование отклонения пучка протонов 7 ТэВ на БАКе.
  - Новые эффекты для каналирования: *пики деканалирования*, *ионизационные потери*, превышающие значение потерь в аморфном направлении для каналирующих частиц, обладающих критической амплитудой колебаний.

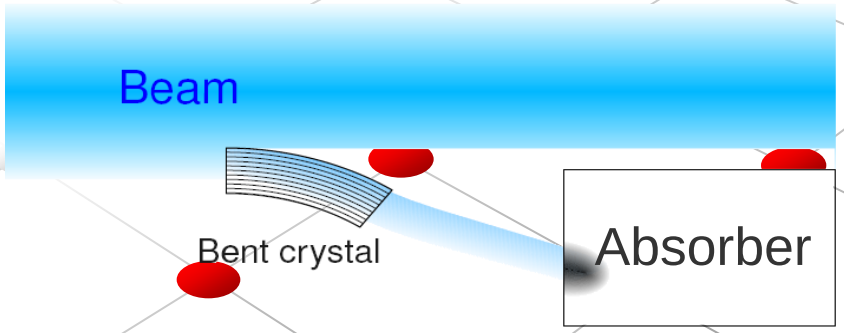
Система коллимации и эффект каналирования

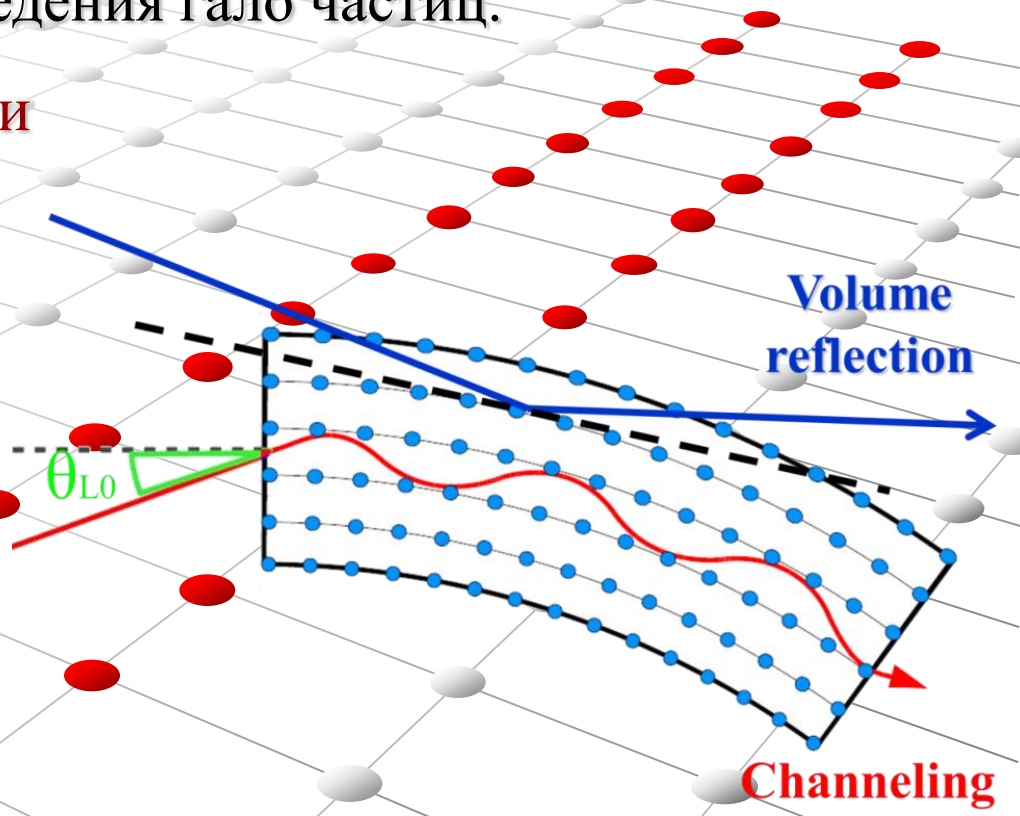
- Гало частицы высокоинтенсивных пучков БАК могут вызвать перегрев сверхпроводящих магнитов. Для их выведения из ускорителя необходимо использовать систему коллимации.
- Коллимация на основе изогнутых кристаллов может значительно увеличить эффективность выведения гало частиц.

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
- Геометрия кристалла (влет/вылет через боковую поверхность; угол мискат)

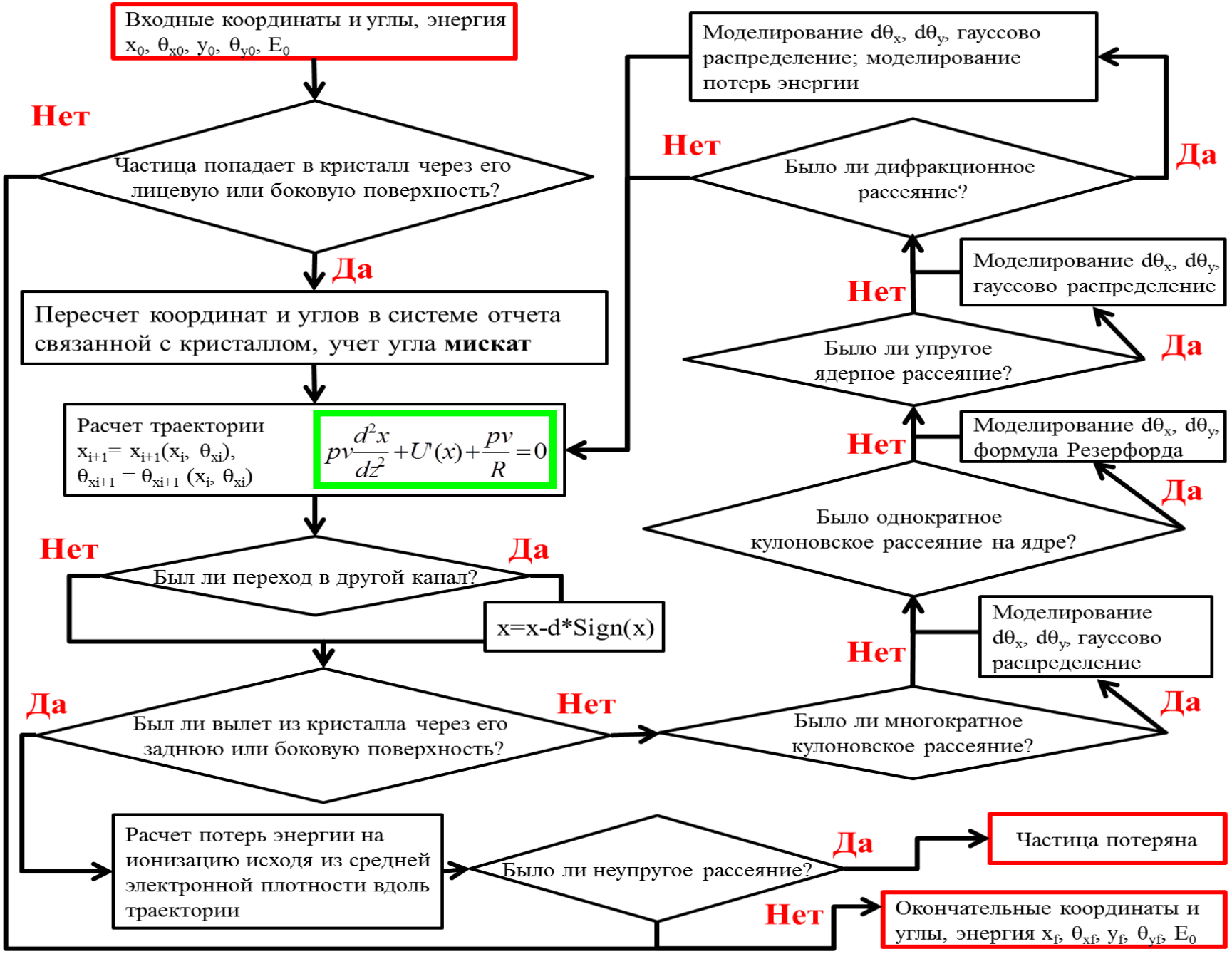
Сплайн интерполяция:

- Межплоскостного потенциала
- Межплоскостного поля
- Плотности ядер
- Плотности электронов

Преимущества:

- 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

*A.I. Sytov, Vestnik. Belarusian. Univ. Series 1 N2 (2014), 48-52, (in Russian).


Входные координаты и углы, энергия x_0, θ_{x0}, y_0, θ_{y0}, E_0
Нет
Частица попадает в кристалл через его лицевую или боковую поверхность?
Да
Пересчет координат и углов в системе отчета связанной с кристаллом, учет угла мискат
Расчет траектории $x_{i+1} = x_{i+1}(x_i, \theta_{xi})$, $\theta_{xi+1} = \theta_{xi+1}(x_i, \theta_{xi})$
$pv\frac{d^2x}{dz^2} + U'(x) + \frac{pv}{R} = 0$
Нет
Был ли переход в другой канал?
Да
x=x-d*Sign(x)
Да
Был ли вылет из кристалла через его заднюю или боковую поверхность?
Нет
Расчет потерь энергии на ионизацию исходя из средней электронной плотности вдоль траектории
Было ли неупругое рассеяние?
Да
Частица потеряна
Нет
Окончательные координаты и углы, энергия x_f, θ_{xf}, y_f, θ_{yf}, E_0
Нет
Было ли многократное кулоновское рассеяние?
Да
Моделирование $d\theta_x$, $d\theta_y$, гауссово распределение
Нет
Было однократное кулоновское рассеяние на ядре?
Да
Моделирование $d\theta_x$, $d\theta_y$, формула Резерфорда
Нет
Было ли упругое ядерное рассеяние?
Да
Моделирование $d\theta_x$, $d\theta_y$, гауссово распределение
Нет
Было ли дифракционное рассеяние?
Да
Моделирование $d\theta_x$, $d\theta_y$, гауссово распределение; моделирование потерь энергии

Моделирование отклонения протонов 400 ГэВ на SPS (H8STF45)*

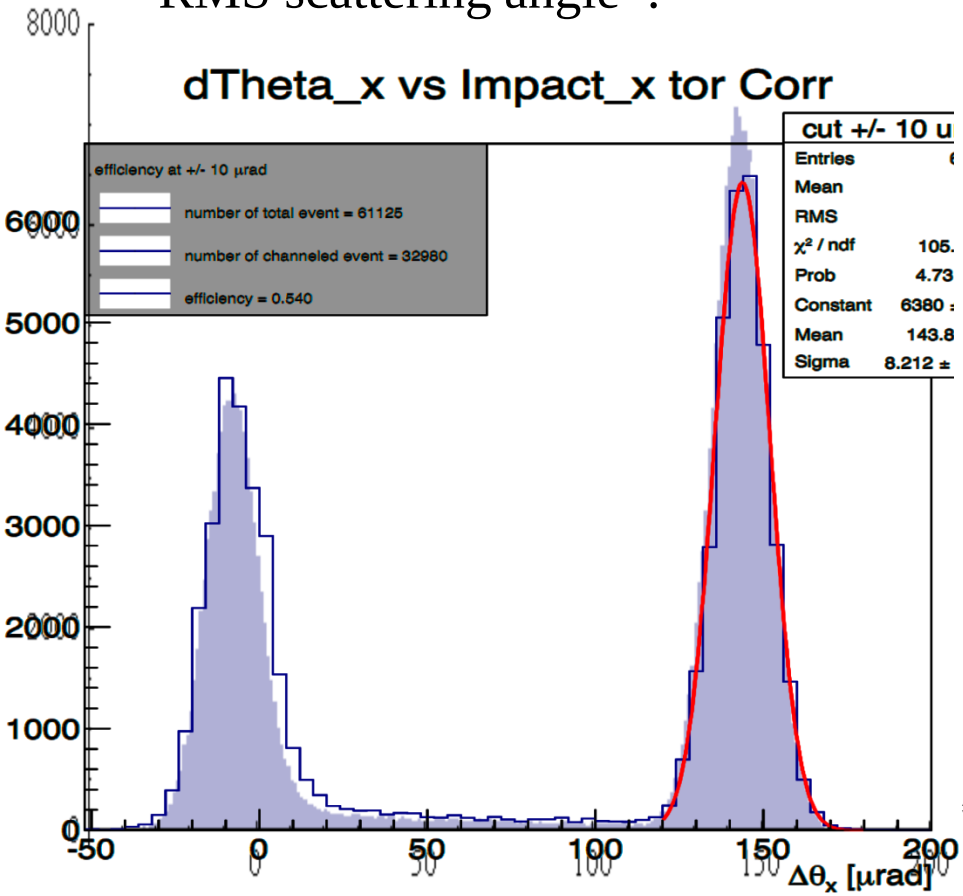
Параметры кристалла*

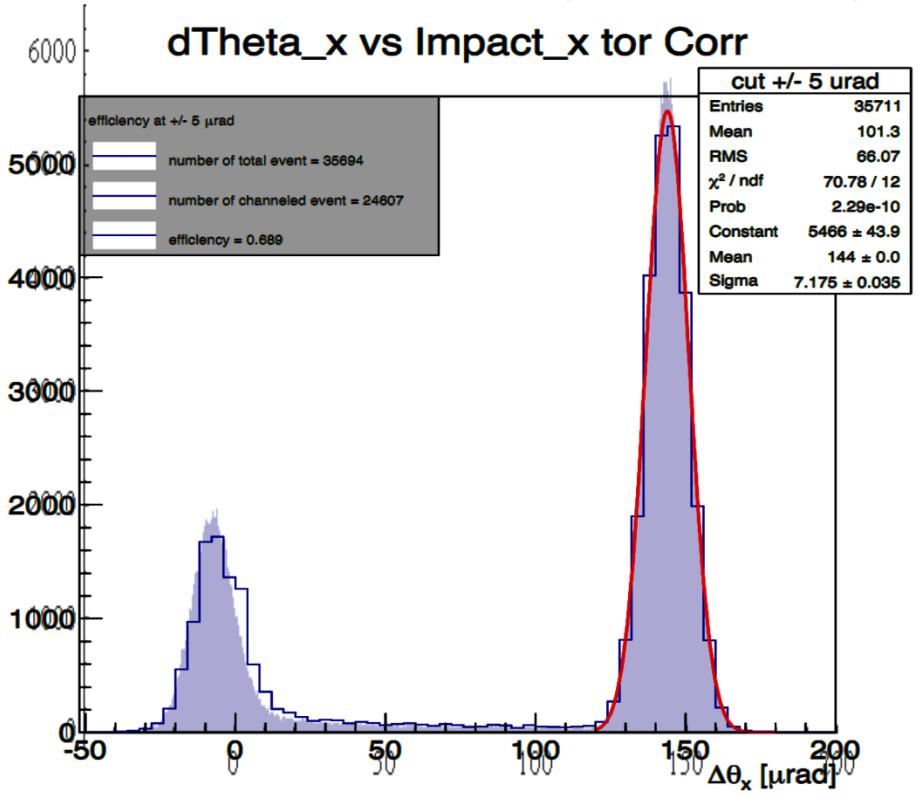
θ_b=143.78 μrad, θ_{tilt}=0 μrad,

Рассеяние в H8 пучке*,**

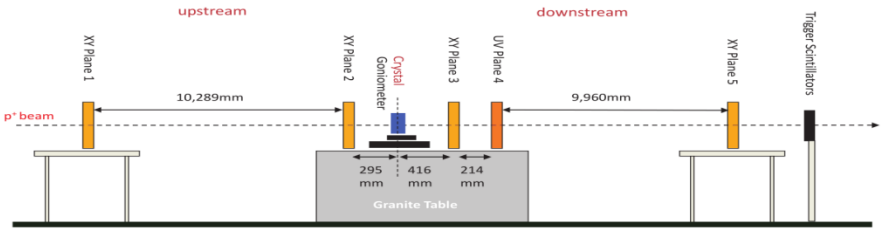
$\theta_{sc.in}$=4.45 μrad, $\theta_{sc.out}$=4.45 μrad,

$\theta_{sc}=\sqrt{\theta_{sc.in}^2+\theta_{sc.out}^2}$=6.29 μrad= RMS scattering angle*.





H8 beam line**



*R. Rossi et al.
H8 Single Pass Test Data Analysis (2014)
**M. Pesaresi et al. JINST 6 (2011) P04006.

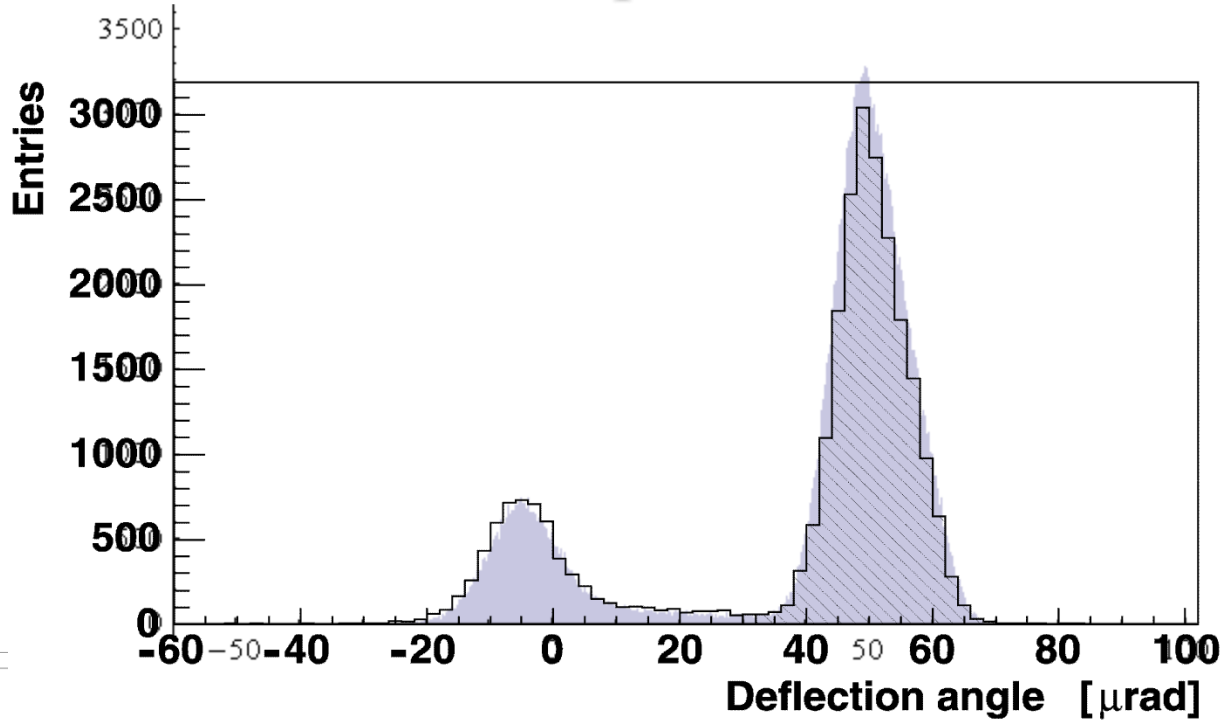
Моделирование 400 ГэВ отклонения протонов на SPS*

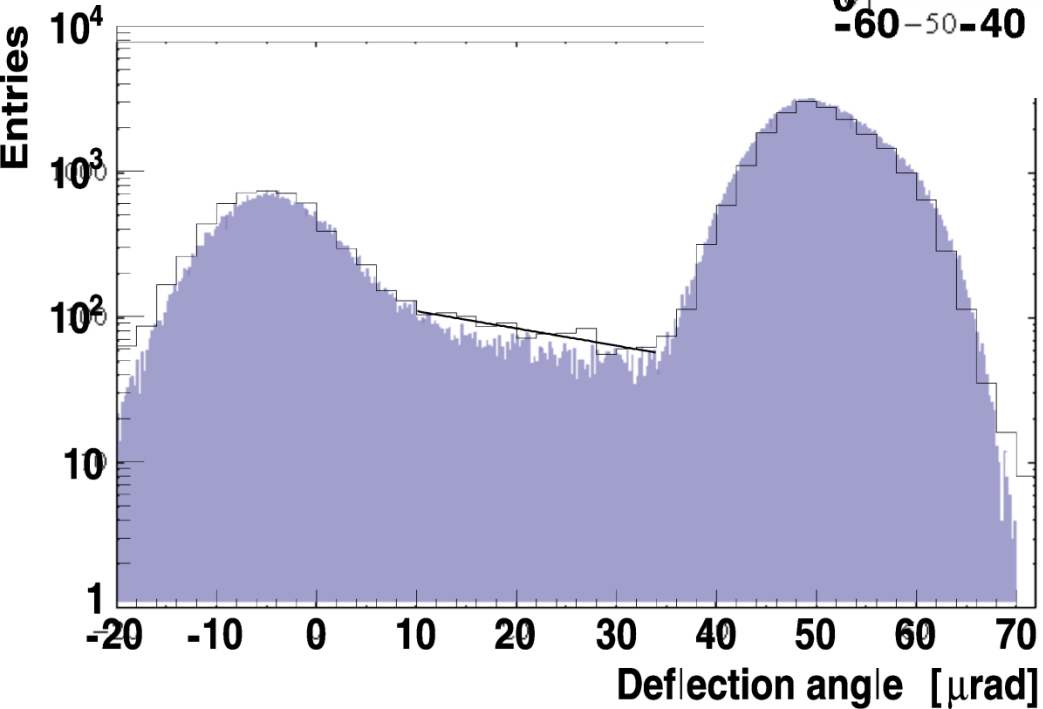
Параметры кристалла*

θ_b=48.5 μrad, θ_{tilt}=2.7 μrad,

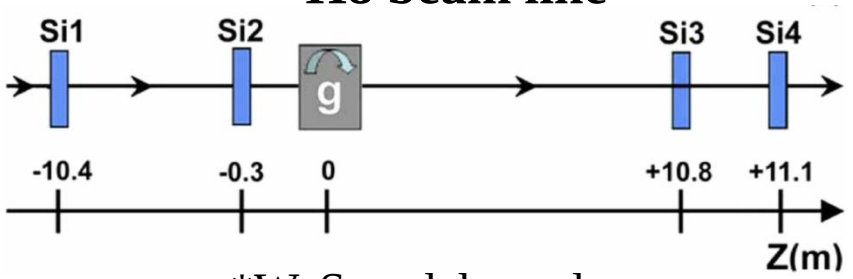
Рассеяние в H8 пучке*,**

$\theta_{sc.in}$=2.2 μrad, $\theta_{sc.out}$=2.2 μrad,
$\theta_{sc}=\sqrt{\theta_{sc.in}^2+\theta_{sc.out}^2}$=3 μrad*,**.





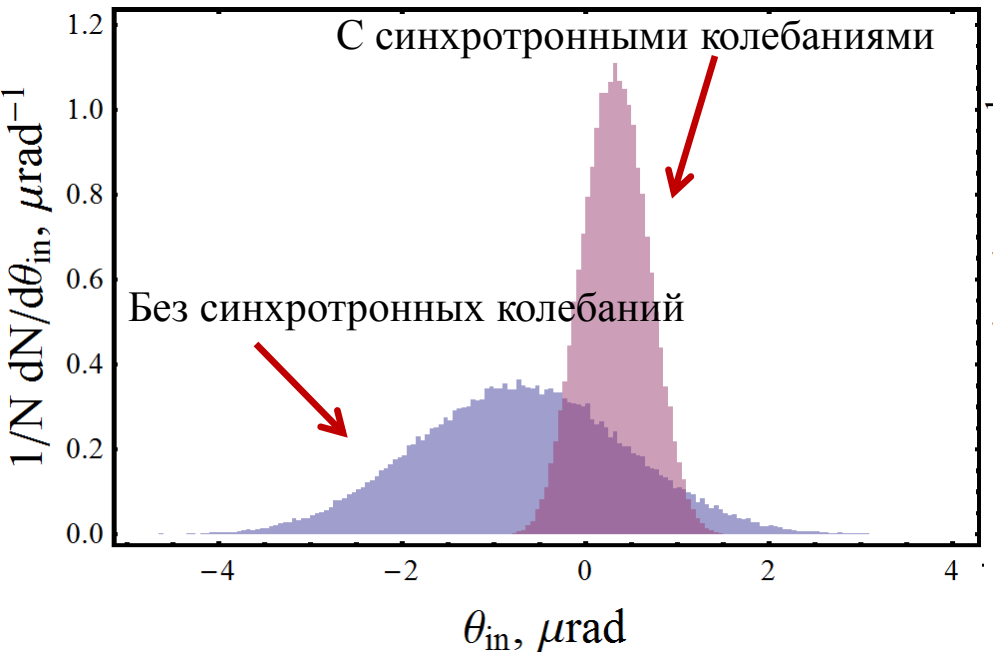
H8 beam line**



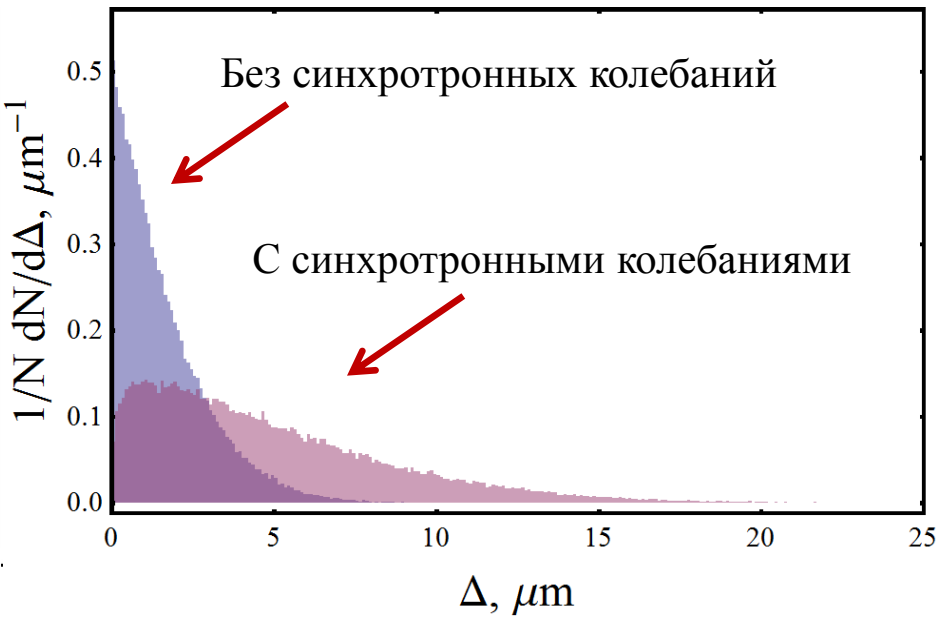
*W. Scandale et al.
Phys. Lett. B 680 (2009) 129–132
** W. Scandale et al.
PRL 101 (2008) 234801.

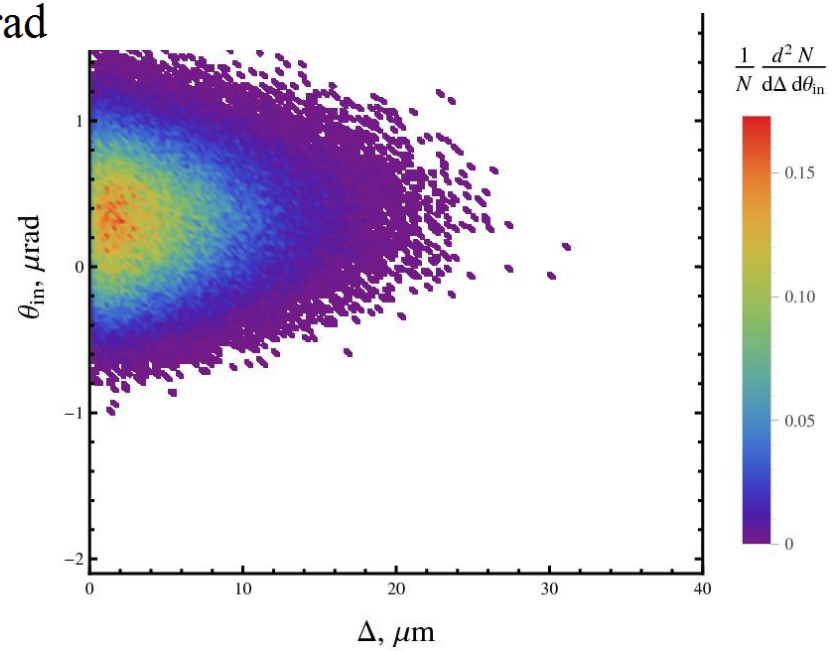
Моделирование отклонения пучка протонов 7 ТэВ на БАКе

Угловое распределение



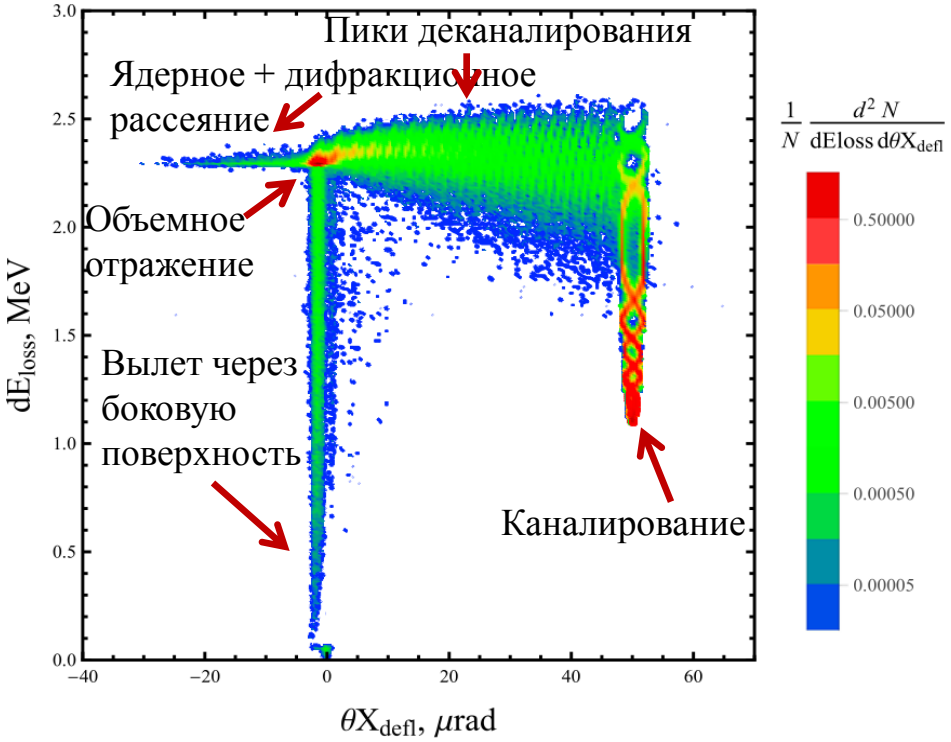
Распределение по прицельному параметру



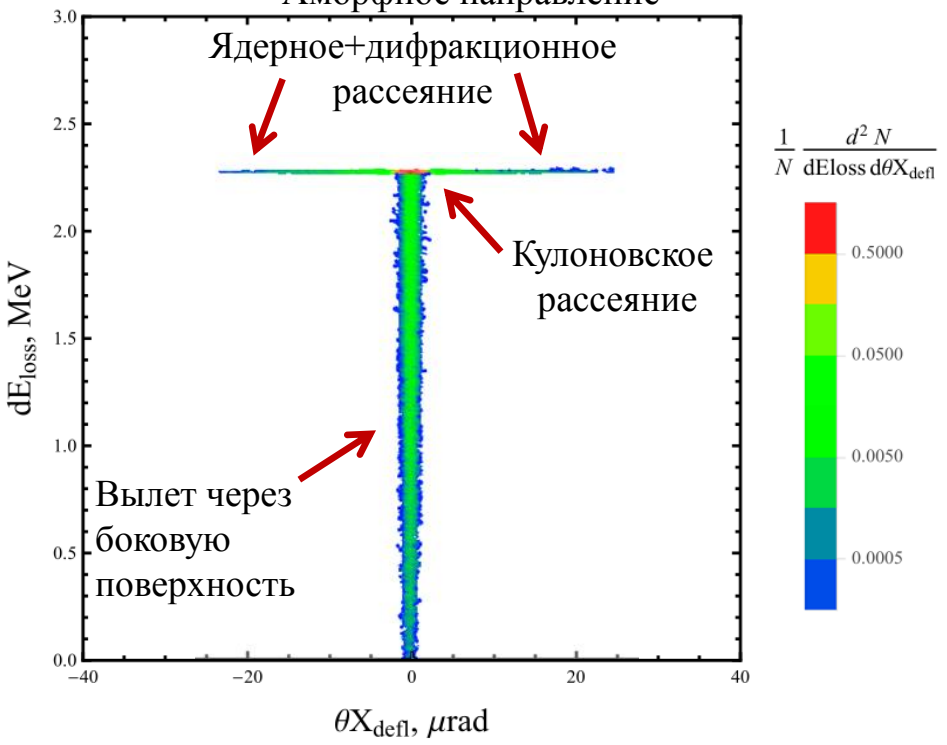


Ионизационные потери

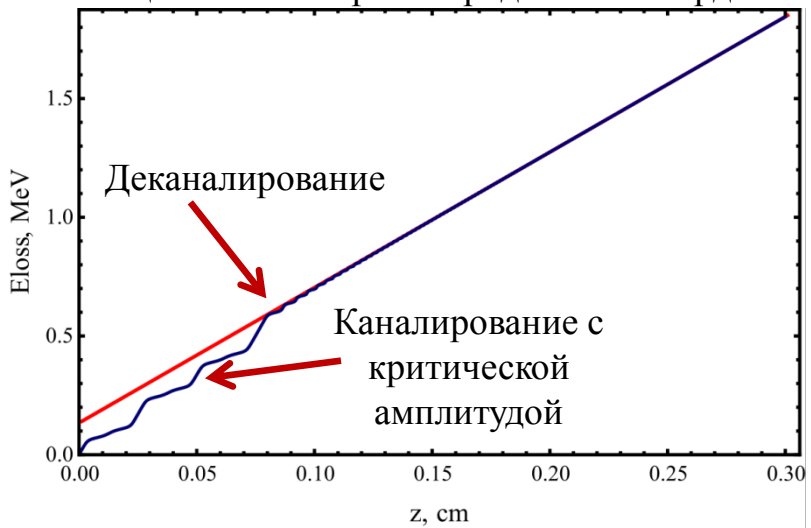
Направление каналирования



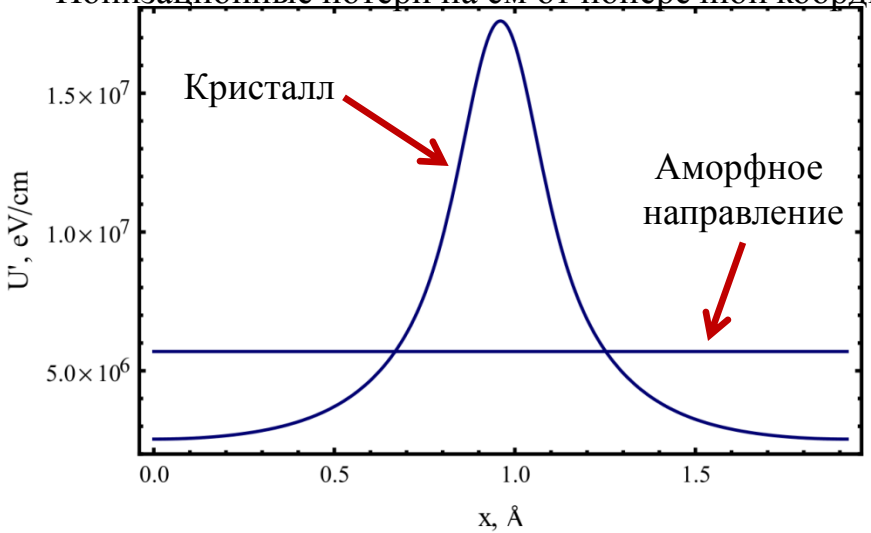
Аморфное направление



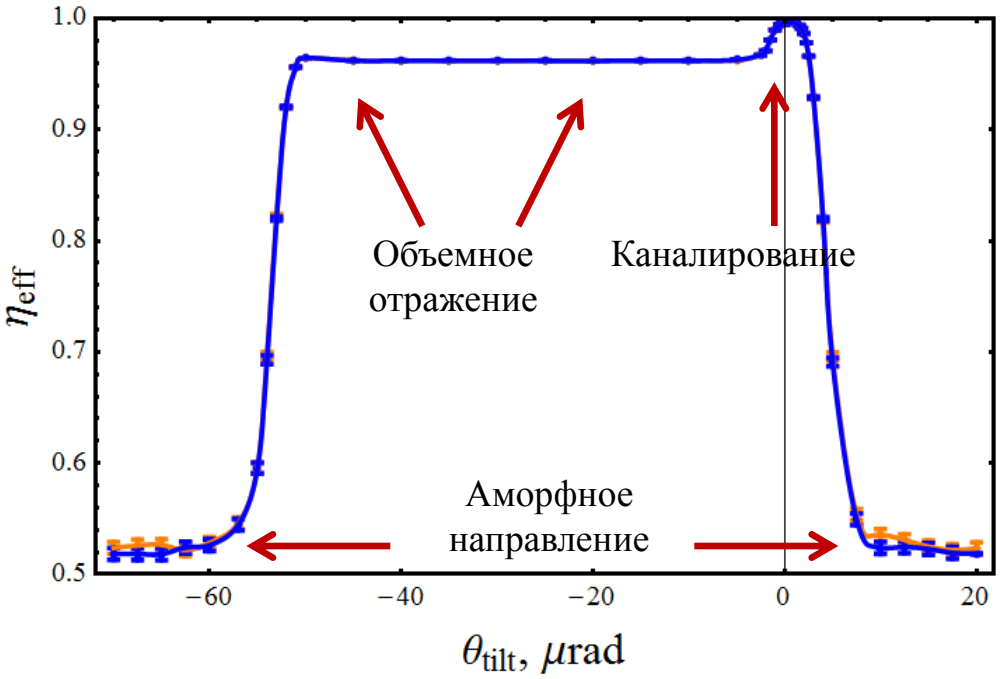
Ионизационные потери от продольной координаты

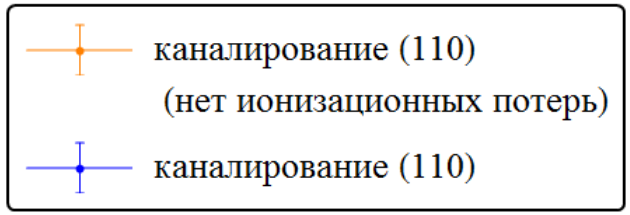


Ионизационные потери на см от поперечной координаты

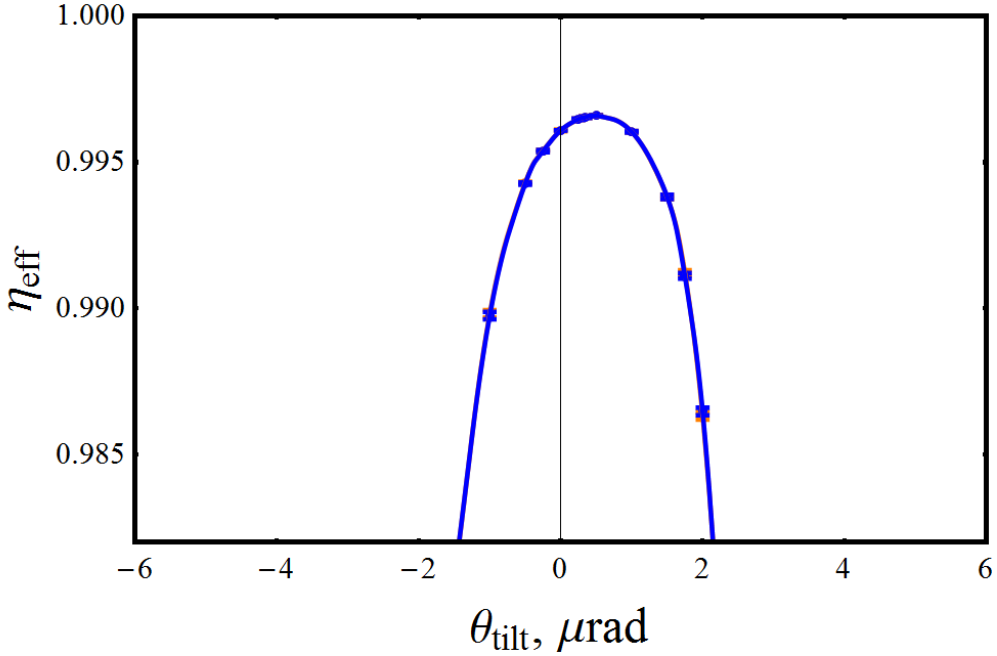


Эффективность коллимации ($1-\eta_{\text{inelastic loss}}$)

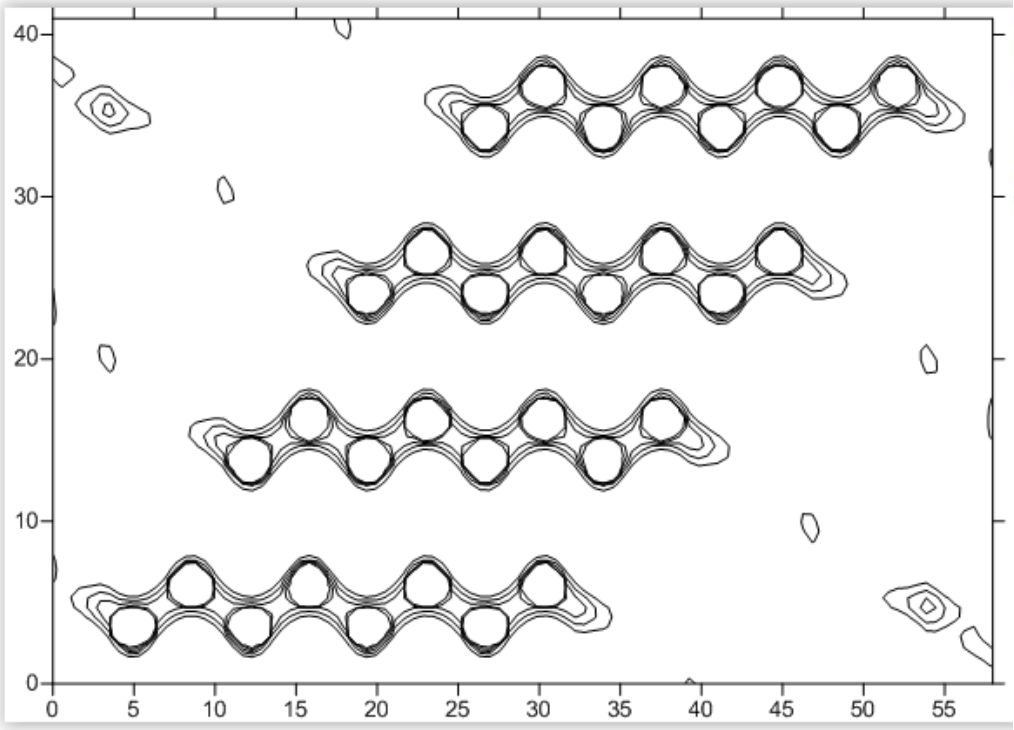


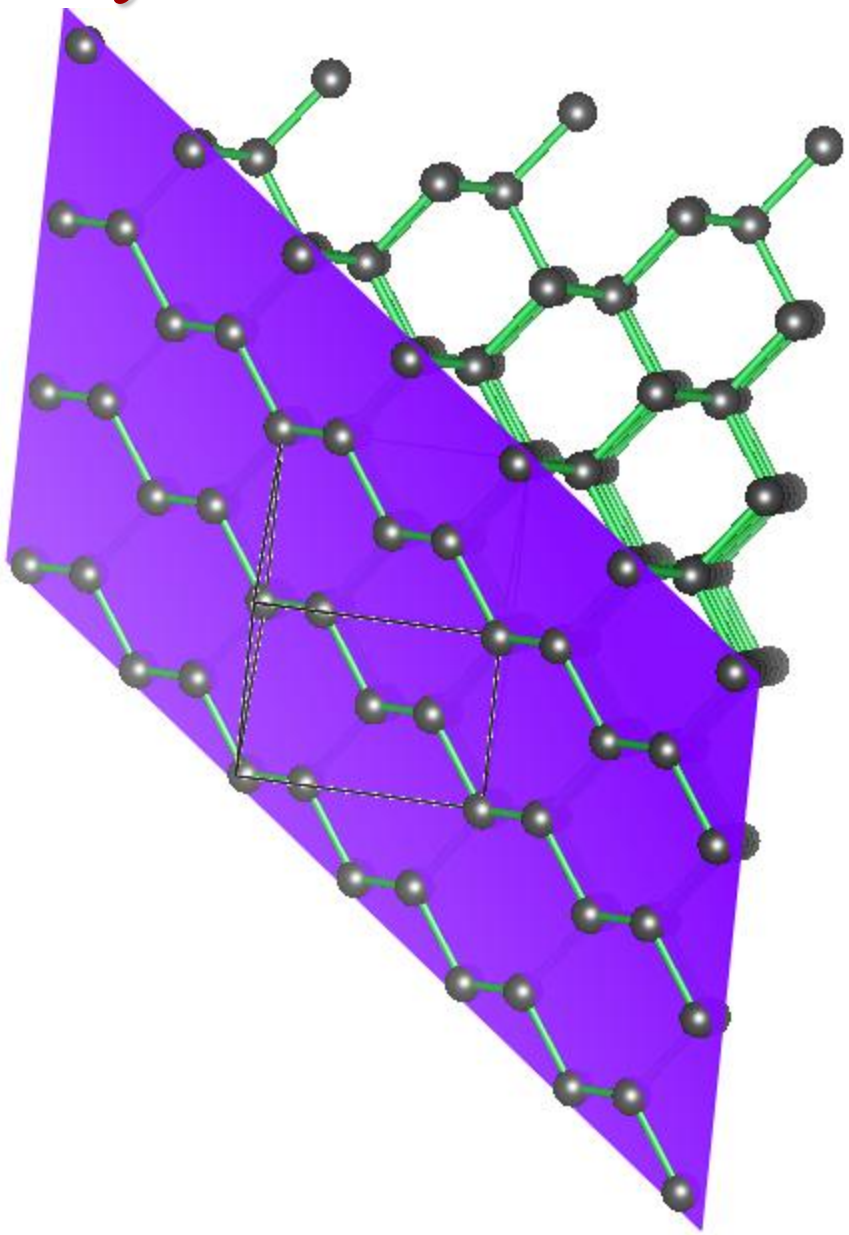


Статистика:
10^5-10^7 частиц



Моделирование с учетом…



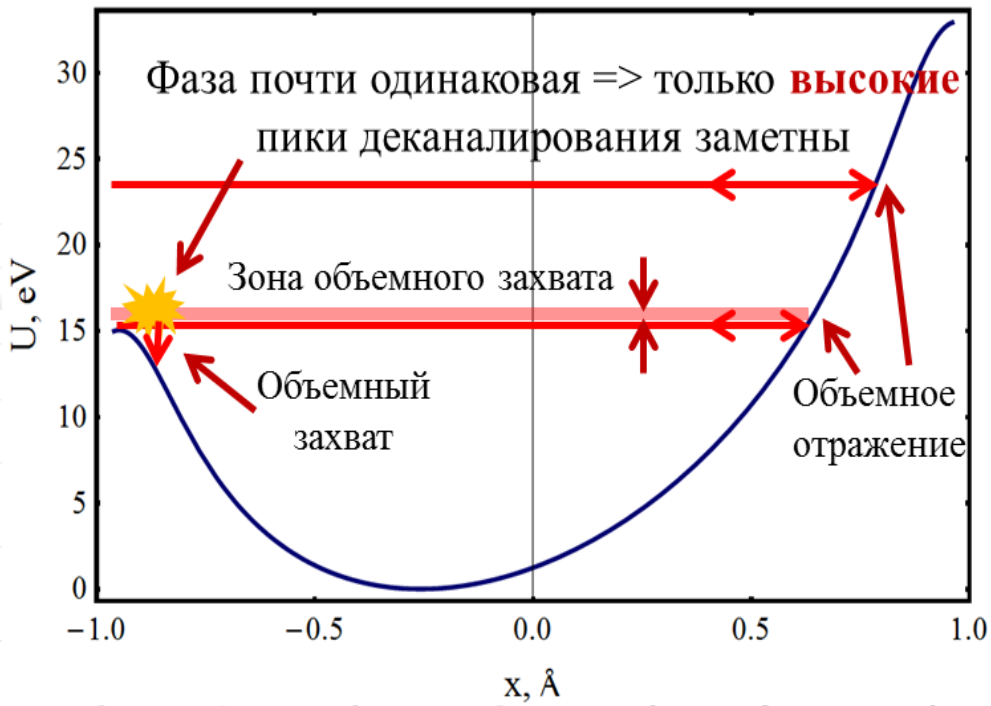


Выводы

- Предсказаны новые эффекты при моделировании для БАК: пики деканалирования и ионизационные потери выше аморфного уровня. Причина 1-го эффекта – очень сильная корреляция по фазе разных траекторий. Причина 2-го эффекта – высокая электронная плотность вдоль траектории частицы.



Спасибо за внимание!


Фаза почти одинаковая => только высокие
пики деканалирования заметны
Зона объемного захвата
Объемный
захват
Объемное
отражение
U, eV
x, Å
30
25
20
15
10
5
0
−1.0
−0.5
0.0
0.5
1.0