



Янович Андрей Антонович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ ПУЧКАМИ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ГЕНЕРАЦИИ НАПРАВЛЕННЫХ ПОТОКОВ  
ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ НОВЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА  
УСКОРИТЕЛЯХ**

Специальность 01.04.20 –

Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Апробация диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель - канд. физ.-мат. наук, ведущий  
научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ,  
В.А. Маишеев

## Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения.

- **Во введении** обосновывается актуальность исследования, формулируются цели, научная новизна и практическая значимость работы, научные положения, выносимые на защиту; описывается личный вклад автора, а также кратко излагается содержание основных разделов диссертации.
- В **первой главе** рассмотрена фокусировка пучка заряженных частиц фокусирующими кристаллическими элементами первого и второго типа в экспериментах на канале 4а ускорителя У-70 ИФВЭ и в рамках коллаборации UA-9 ускорителя SPS CERN.
- Во **второй главе** рассмотрено объемное отражение релятивистских частиц в различных многополосных кристаллических структурах. Рассмотрена возможность коллимации пучка в области ТэВ-ных энергий (LHC и FCC) с помощью кратных отражений частиц в изогнутых кристаллах.
- В **третьей главе** рассмотрены генерация гамма-излучения при взаимодействии 7 ГэВ пучка электронов с мультикристаллической структурой в области отражения и возможность применения мультикристаллических структур для защиты септум-магнитов.
- В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы

Полный объем диссертации составляет **139** страниц текста с **68** рисунками и **2** таблицами. Список литературы содержит **114** наименований.

## Апробация диссертационной работы и публикации

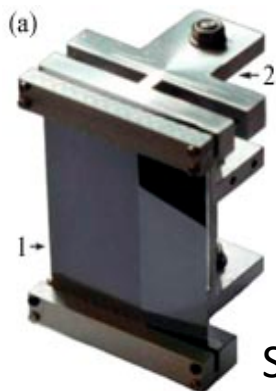
Материалы, которые легли в основу диссертации, докладывались на научных конференциях:

- Chesnokov Yu.A., ..., Yanovich A.A. // The 5th International Conference Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena (Channeling 2012): Alghero (SS), Italy. - 23-28 September 2012.
- Chesnokov Yu.A., ..., Yanovich A.A. // XI International Symposium Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures (RREPS-15): Saint Petersburg, Russia. - 6-11 September 2015.
- Maisheev V.A., ..., Yanovich A.A. // The 8th International Conference Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena (Channeling 2018): Ischia (NA), Italy. - 23-28 September 2018.
- Yanovich A.A. // XXVI Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2018): Protvino, Russia. - 1-5 October 2018.
- Velotti F.M., ..., Yanovich A.A. // International Particle Accelerator Conference (10th): Melbourne, Australia. - 19-24 May 2019.
- Chesnokov Yu.A., ..., Yanovich A.A. // XIII International Symposium "RREPS-19" Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures: Belgorod, Russia. - 16-20 September 2019.

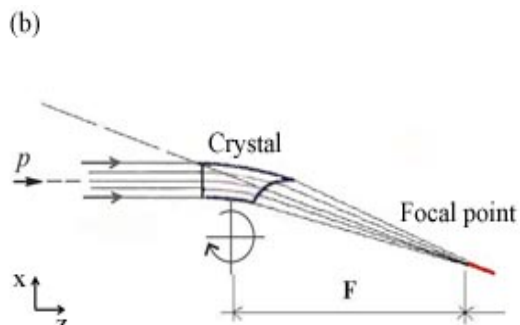
Представленные в диссертации результаты опубликованы в 11 печатных работах в журналах, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, в том числе **6 работ в Письма в ЖЭТФ**, **2 работы в Phys Rev Accel Beams** и **3 работы в Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B**.

# 1.1 Фокусировка из параллельного пучка в линейный фокус.

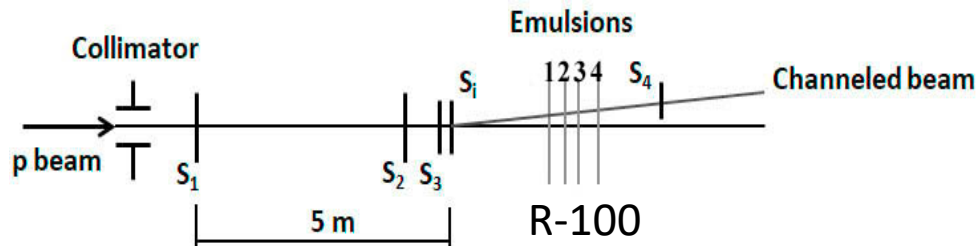
Опыты в НИЦ Курчатовский институт – ИФВЭ на ускорителе У-70 в Протвино



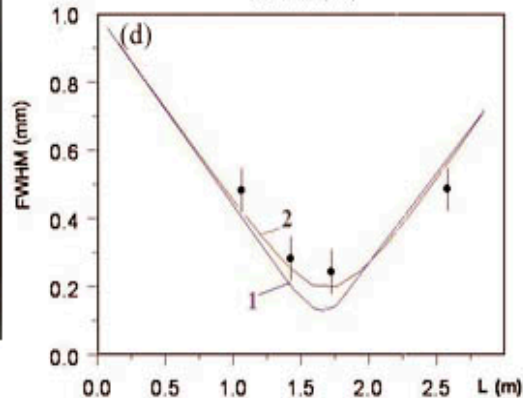
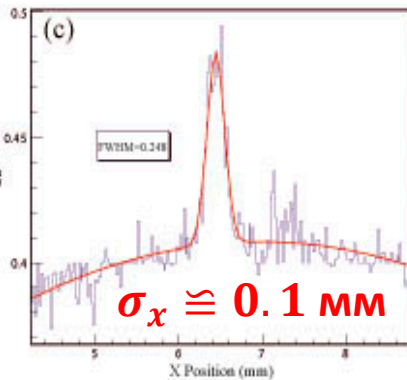
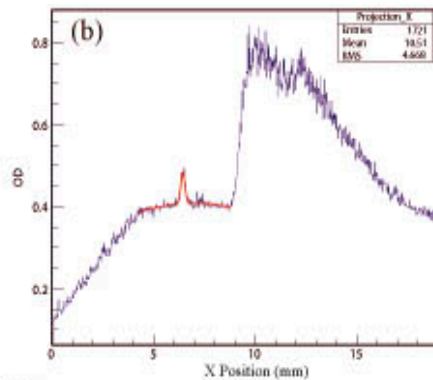
Si(111)



## Схема установки Кристалл



$l = 1,7 \text{ м}$

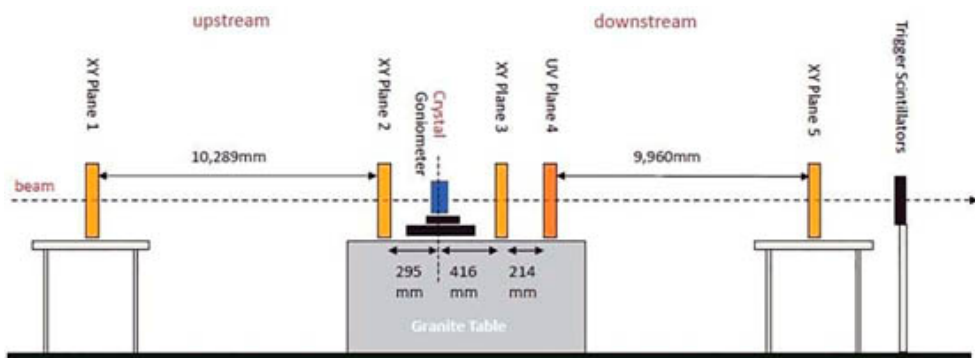


Размер пластины кристалла  $X \times Y \times Z = 2 \times 70 \times 20 \text{ мм}^3$ , Z от 20 до 40 мм. 50 ГэВ пучок протонов размером  $\sigma_x \cong 2 \text{ мм}$  и угловой расходимостью  $\sigma_\alpha \cong 0.1 \text{ мрад}$ .

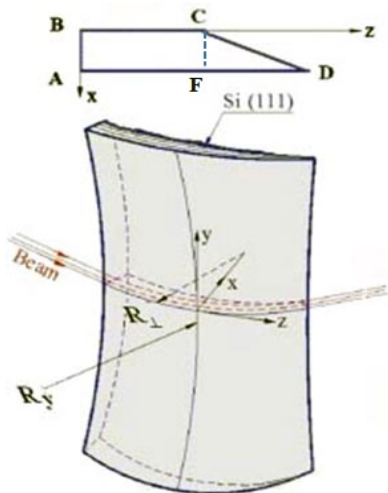
# 1.1 Фокусировка из параллельного пучка в линейный фокус.

## Опыты в CERN на ускорителе SPS

Схематический вид экспериментальной установки UA9 H8 ускорителя SPS



Каждая пара микростриповых детекторов измеряет две координаты X и Y с шагом считывания 60 мкм в обоих направлениях, с активной площадью  $3.8 \times 3.8 \text{ см}^2$

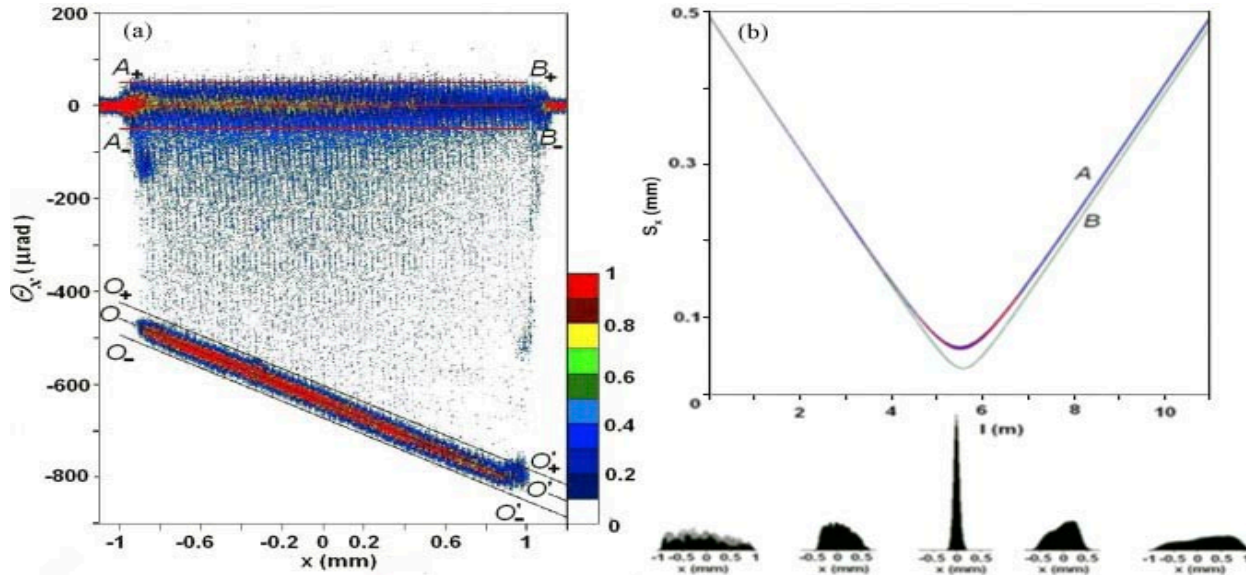


Размер пластины кристалла  $X \times Y \times Z = 2 \times 70 \times 30 \text{ мм}^3$ , Z от 30 до 50 мм.

Ширина **400 ГэВ/с пучка протонов** вдоль горизонтальной и вертикальной осей составляла несколько мм. Угловая расходимость падающего пучка в горизонтальной и в вертикальной плоскостях - около 10 мкрад. Точность гониометра 2 мкрад.

# 1.1 Фокусировка из параллельного пучка в линейный фокус.

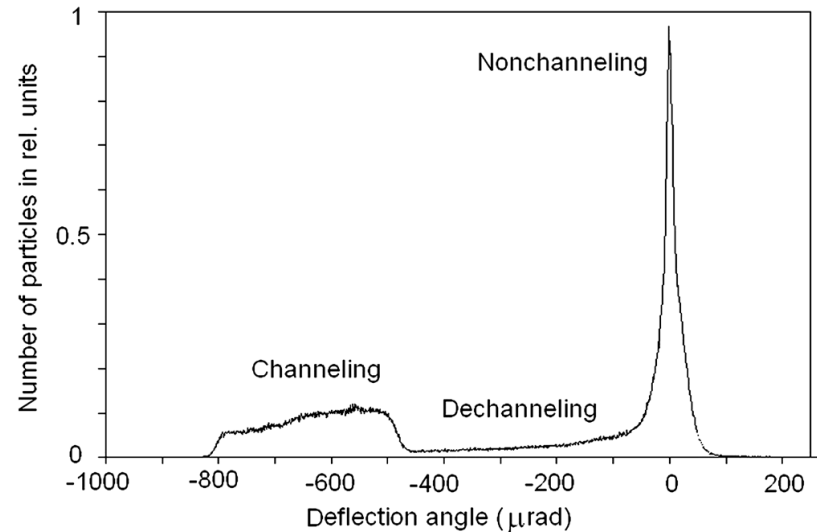
## Опыты в CERN на ускорителе SPS



$$s_x^2(l) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2(l)}{n} - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n x_i(l)}{n} \right]^2$$

$$x_i = x_i(0) + \phi_i l$$

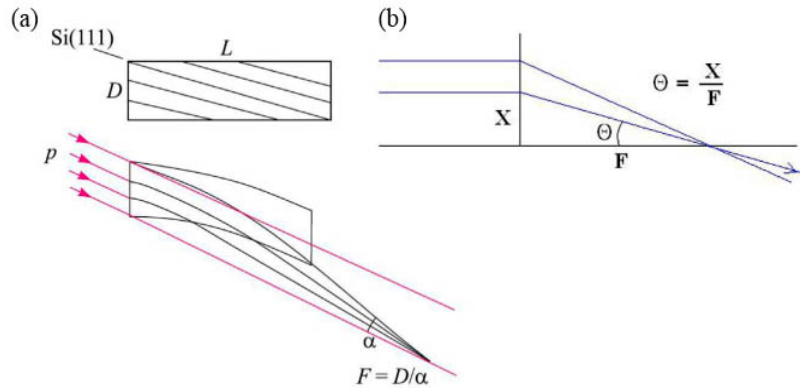
$L_f$	$L_f^*$	$s_x(0)$	$s_x(L_f)$	$s_x^*(L_f^*)$	$F$
5,503	5,509	0,492	0,0600	0,0602	8,2



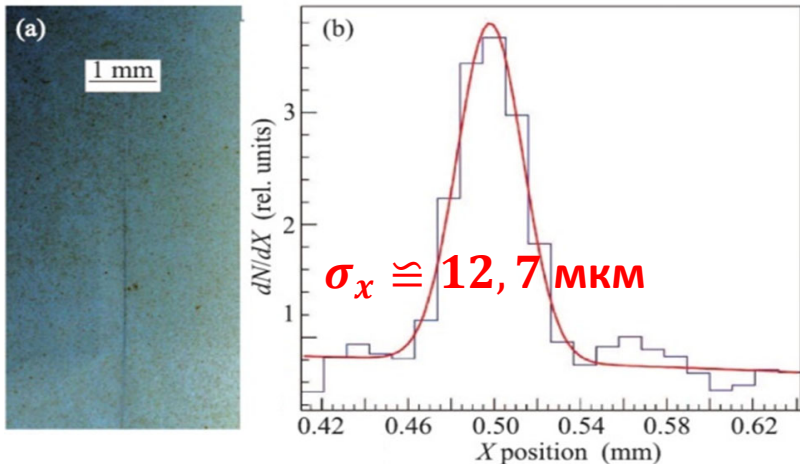
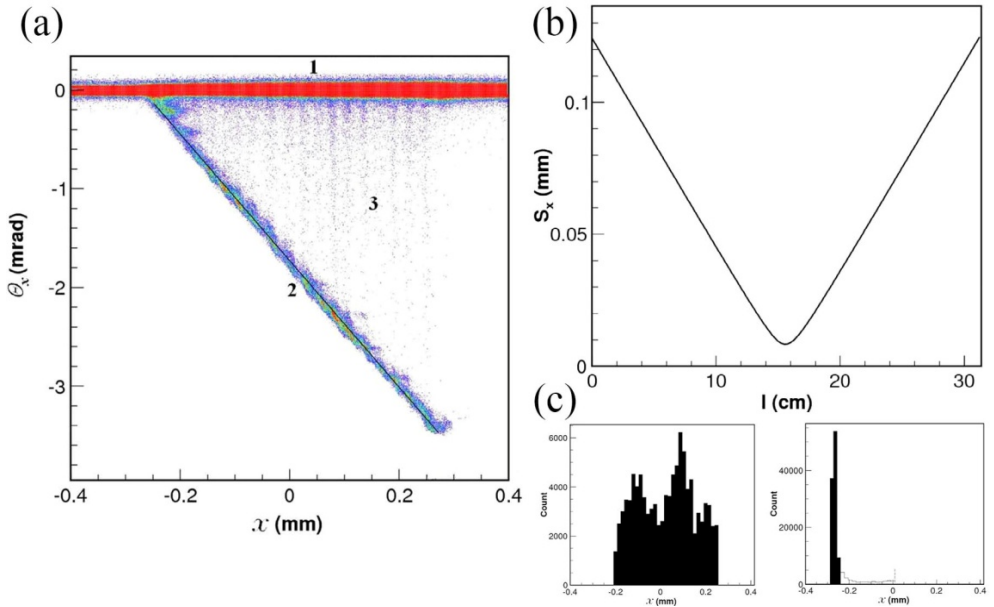
(-0.94 mm <math>x</math> <math>1.01</math> mm)



# 1.2 Фокусировка из параллельного пучка в линейный фокус на короткое расстояние

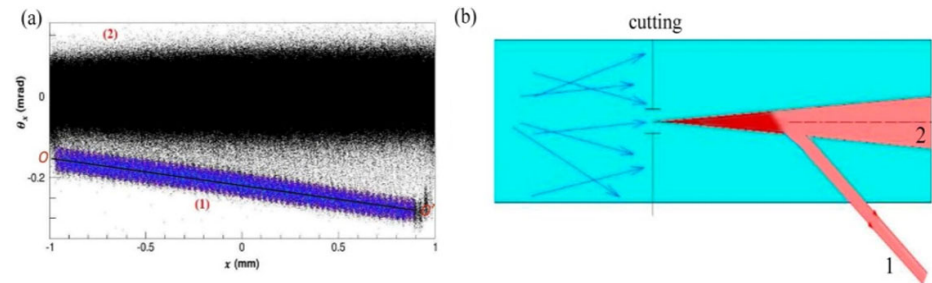
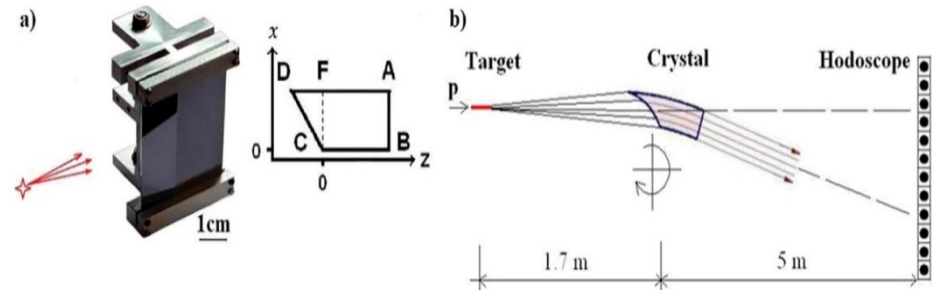


Пластина длиной  $L=10$  мм и толщиной  $D=500$  мкм, изогнута на угол 3 мрад. Расходимость 50 ГэВ протонного пучка  $\sigma_x \sim 0.1$  мрад, профиль пучка  $S_x \times S_y = 20 \times 20$  мм<sup>2</sup>



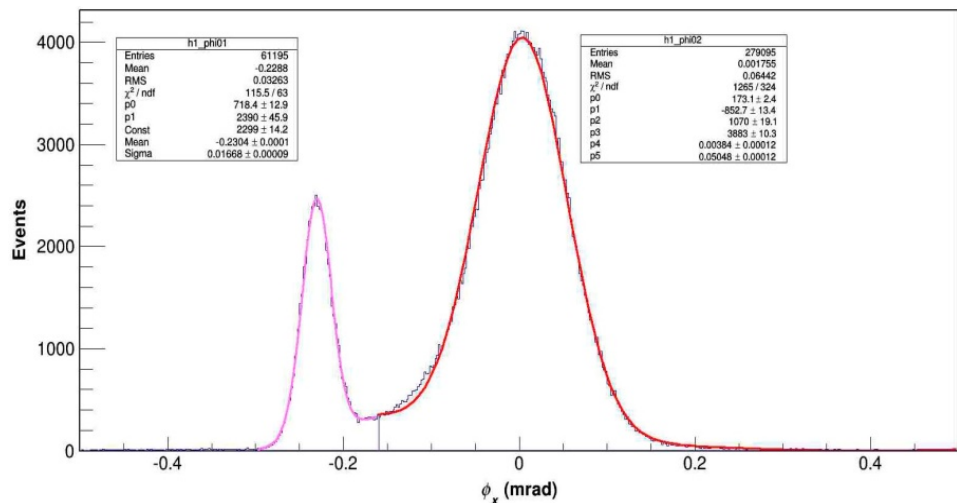
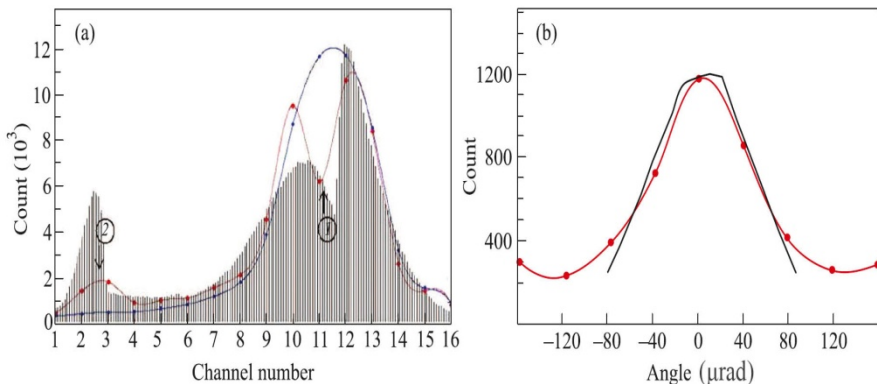
**180 ГэВ/с пучок положительных пионов.** Среднеквадратичное значение размера пучка в фокусе ( $L_f = 15,5$  см) составляет около **8 мкм** и около **125 мкм** вблизи кристалла, т.е. **коэфф. сжатия пучка ~15**. Около **10%** каналированных частиц от интенсивности падающего пучка и **18%** деканалированных частиц по сравнению с полностью отклоненными частицами

# 1.3 Фокусировка из точечного источника в параллельный пучок



Активная мишень в виде тонкой пластинки (толщиной 150 мкм) из тяжелого сцинтиллятора **CsI**. Пучок протонов **50 ГэВ** с величиной угловой расходимости  $\sigma_x = 0,36$  мрад.

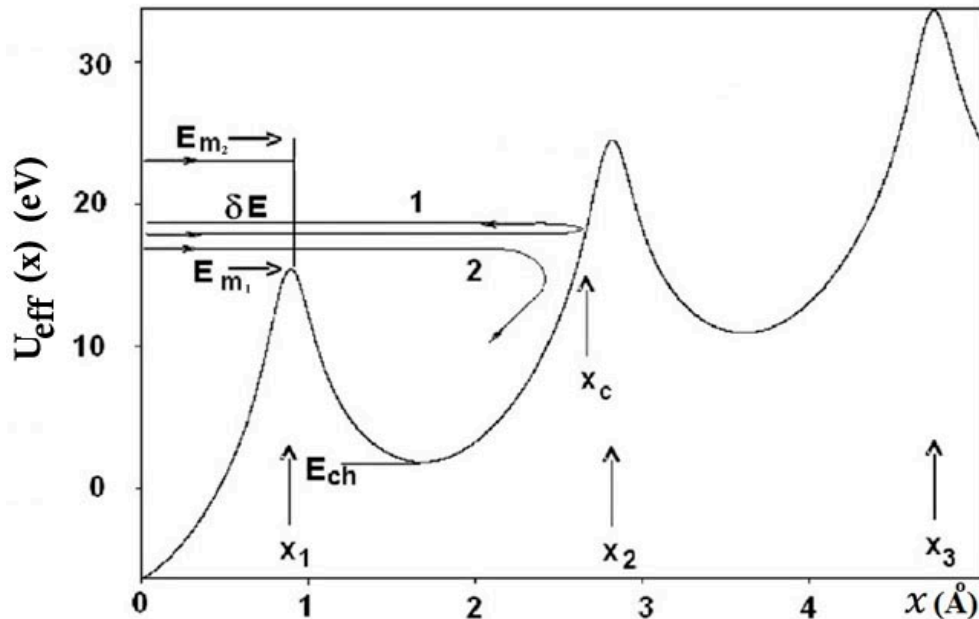
**180 ГэВ/с пучок положительных пионов** Установлена тонкая свинцовая мишень (длиной около 2 мм) вблизи первой трековой станции. Кристалл отклонил расходящийся пучок  $\sigma_{beam} = 50$  мкрад с эффективностью **22%**. ( $L_f = 12,5$  м,  $s_x = 0,2$  мм). Полный размер пучка 3 мм



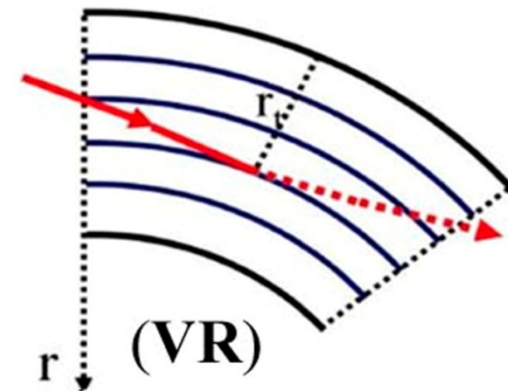


## 2.1 Описание процесса объемного отражения

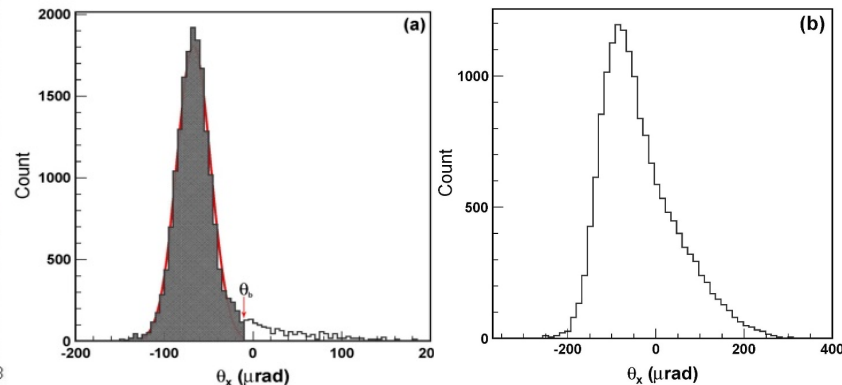
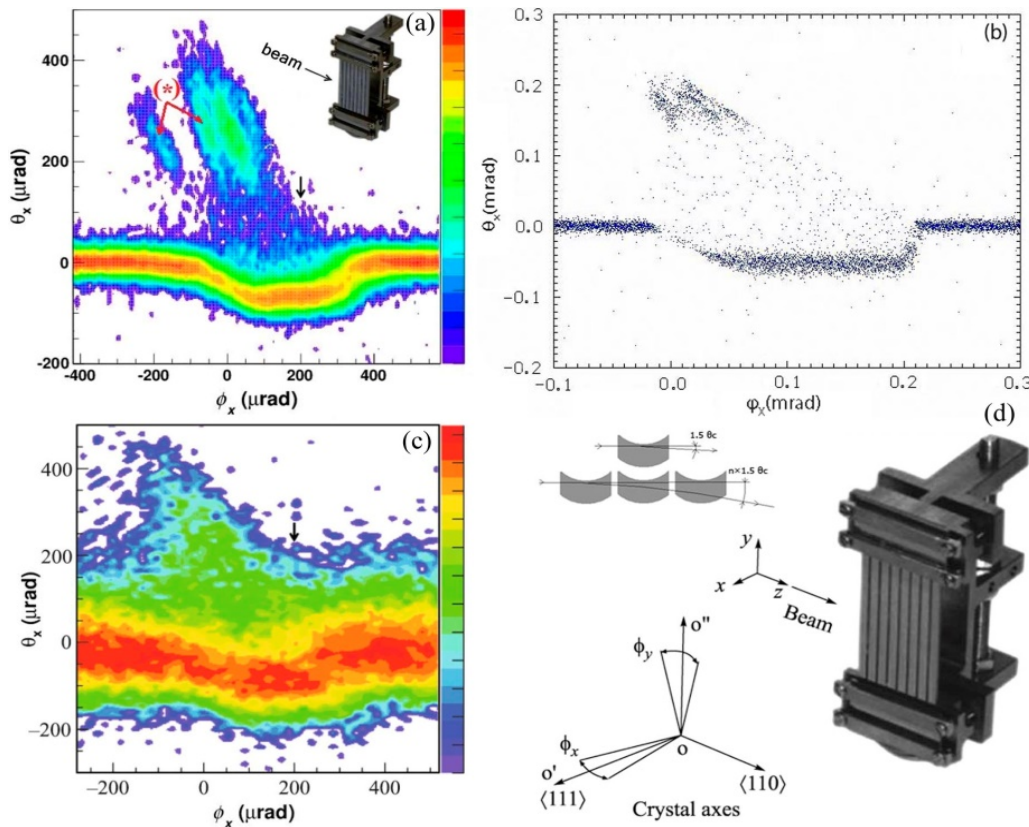
Размер области объемного отражения  $S_{vr} \sim R\theta_c$ ,  $\theta_c = \sqrt{\frac{2U_c}{pv}}$  – критический угол каналирования. Максимальный угол объемного отражения частиц от кристаллографических плоскостей для положительных частиц составляет  $\theta_{vr} \approx 1,5\theta_c$ , а для отрицательных частиц  $\theta_{vr} \approx 0,8\theta_c$ . Движение ультрарелятивистских частиц в изогнутом кристалле в плоскостном случае можно описать как **одномерное движение частицы в эффективном потенциале**  $\frac{E_0\beta^2v_x^2}{2c^2} + U_{eff} = E$ , где  $U_{eff} = U(x) + \frac{E_0\beta^2x}{R}$  – эффективный потенциал,  $U(x)$  – периодический плоский потенциал в прямом одиночном кристалле как функция координаты.



Объемное отражение



## 2.2 Эксперименты по отклонению протонов и отрицательных пионов с помощью отражения

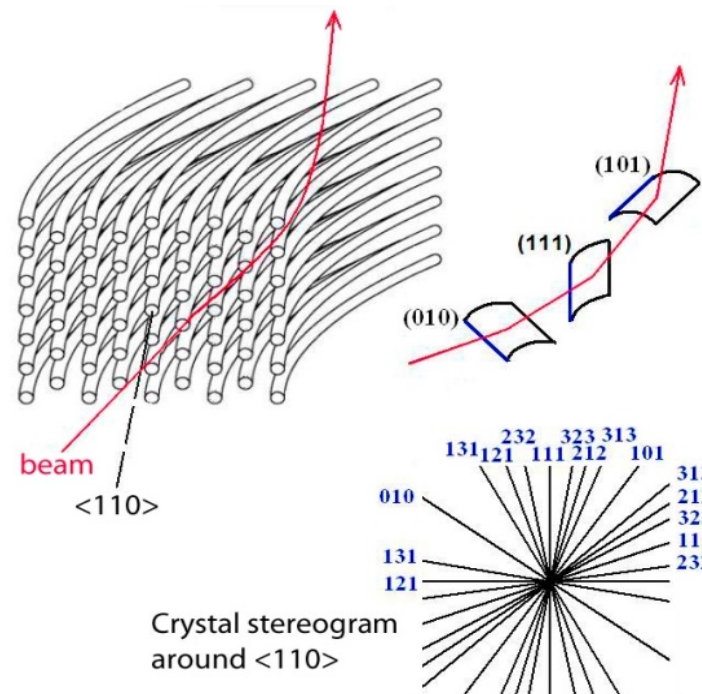
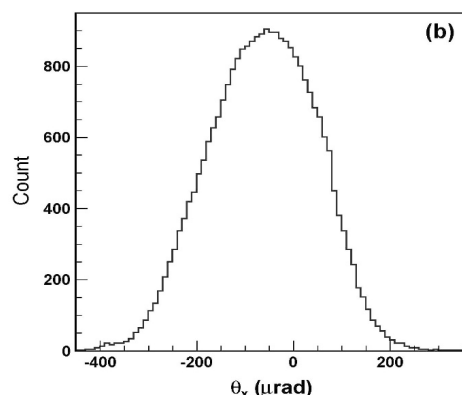
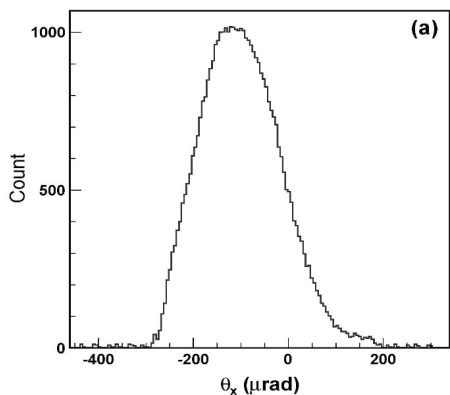
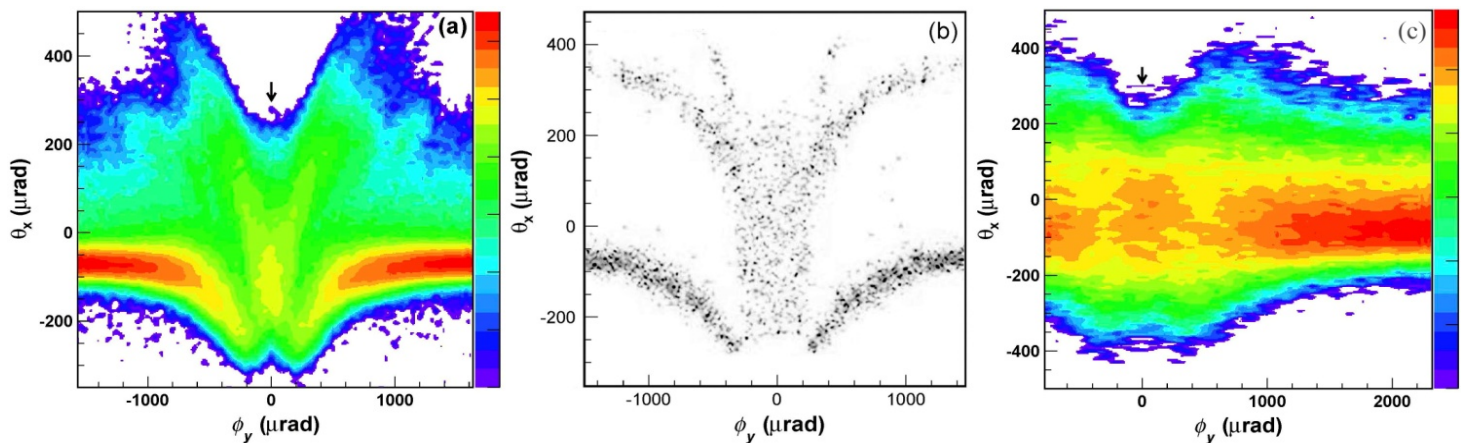


Поперечный изгиб для 8-полосного кристаллического устройства составил 0,28 мрад. Отдельные кристаллические полоски имеют ширину 2 мм вдоль пучка, 40 мм в длину и 0,9 мм в толщину поперек пучка.

Измеренные значения  $\langle \theta_{vr} \rangle$  составляют 80% от расчетных значений из-за разориентации двух полосок из восьми

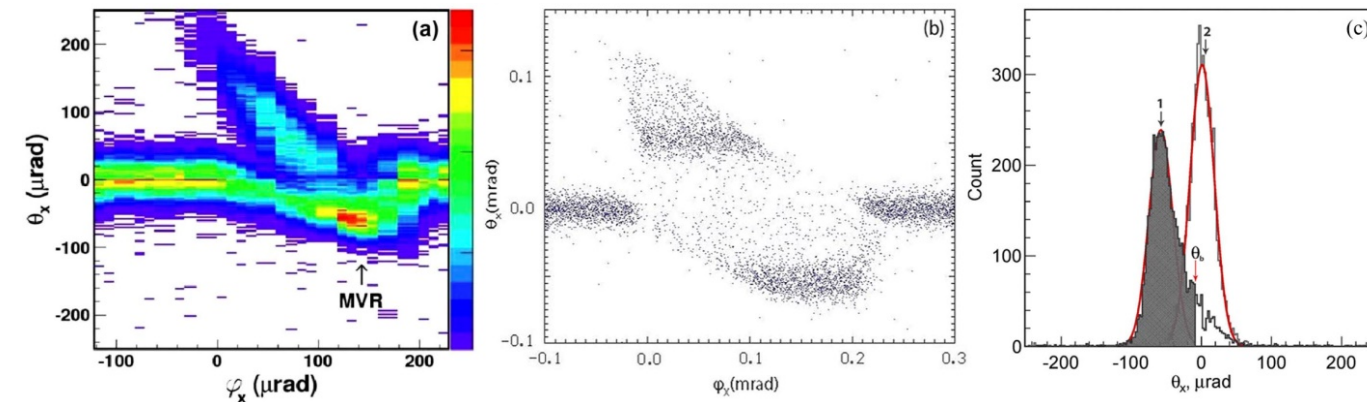
Пучок	$\langle \theta_{vr} \rangle$ , мкрад	RMS, мкрад	Эффективность ( $\vartheta_x < 0$ ), %
p, 400 ГэВ/с	68	16,5	94
$\pi^-$ , 150 ГэВ/с	78	38,4	71

## 2.2 Эксперименты по отклонению протонов и отрицательных пионов с помощью отражения



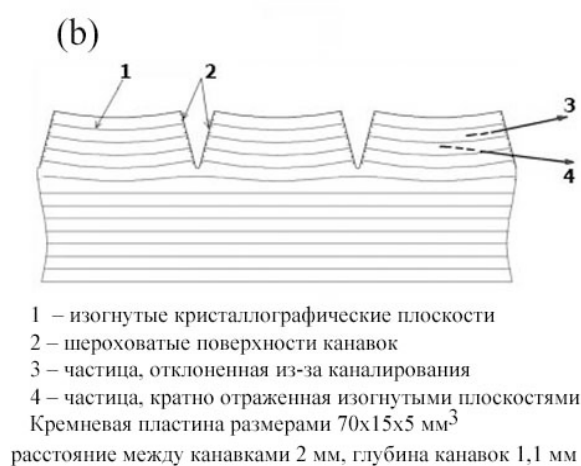
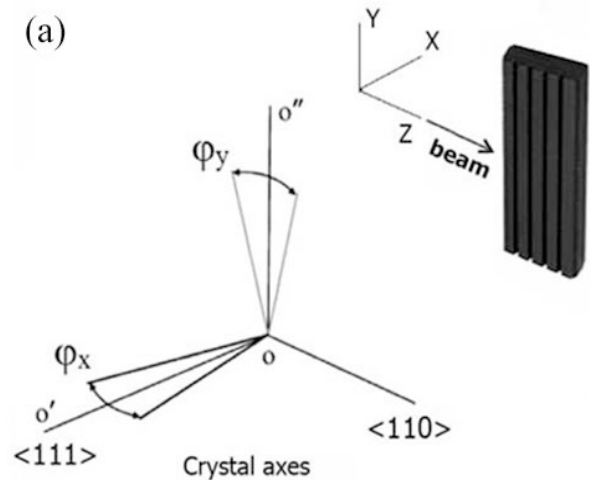
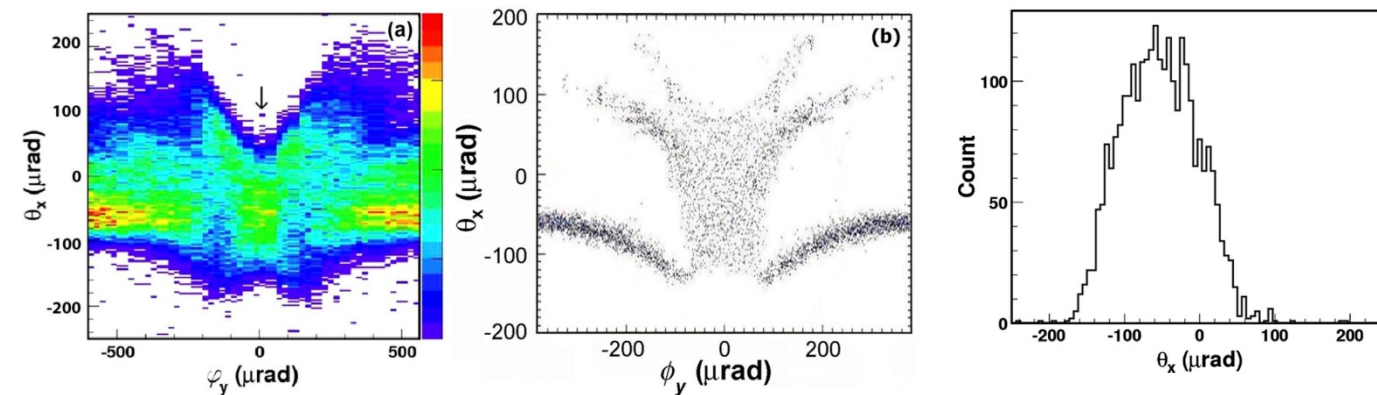
Пучок	$\langle \theta_{vr} \rangle$ , мкрад	RMS, мкрад	Эффективность ( $\vartheta_x < 0$ ), %
p, 400 ГэВ/c	102	79	88
$\pi^-$ , 150 ГэВ/c	64	106	70

## 2.3 Испытания устройств – отражателей для сверхвысоких энергий



Пучок 400 ГэВ/с протонов с угловой расходимостью 10 мкрад

Расчет:  $\theta_{mvr} = 5 \times 13 = 65$  мкрад



$\langle \theta_{vr} \rangle$ , мкрад	RMS, мкрад	Эффективность ( $\vartheta_x < 0$ ), %
60	17	90

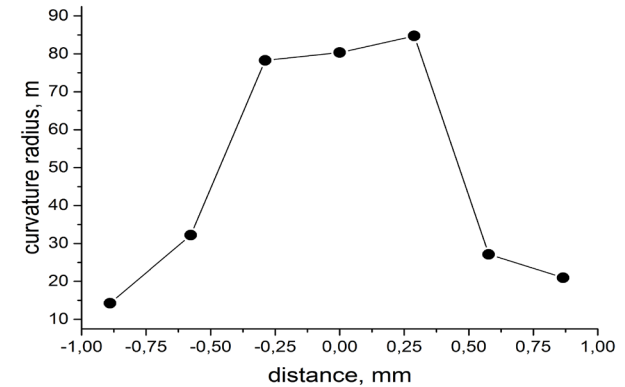
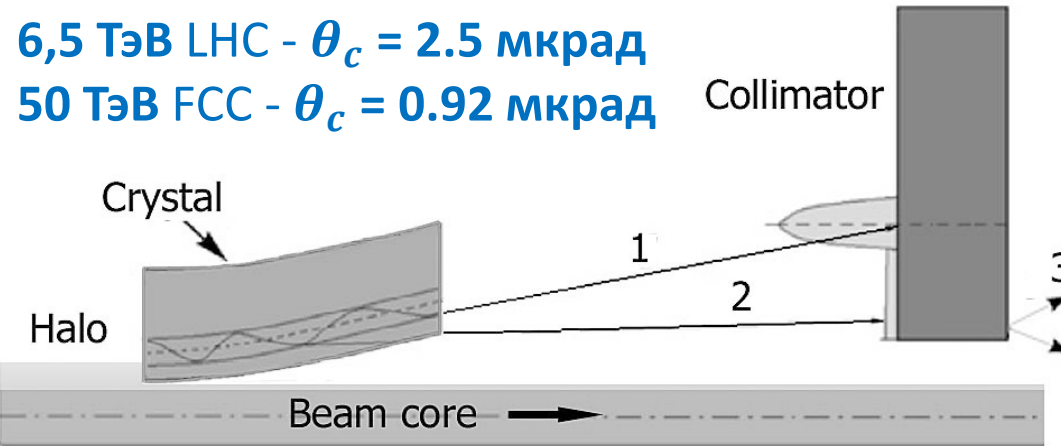
RMS, мкрад	Эффективность ( $\vartheta_x < 0$ ), %
50	85





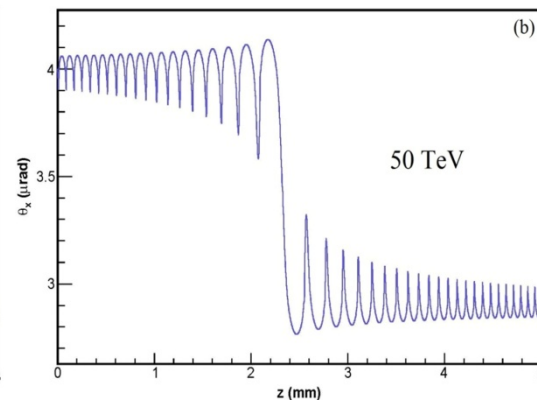
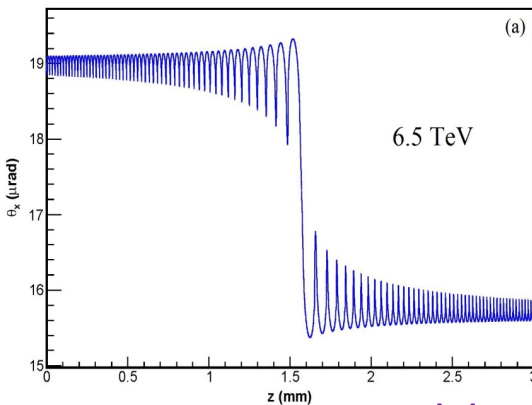
## 2.4 Возможность коллимации пучка в больших адронных коллайдерах с помощью отражений частиц в изогнутых кристаллах

6,5 ТэВ LHC -  $\theta_c = 2.5$  мкрад  
 50 ТэВ FCC -  $\theta_c = 0.92$  мкрад



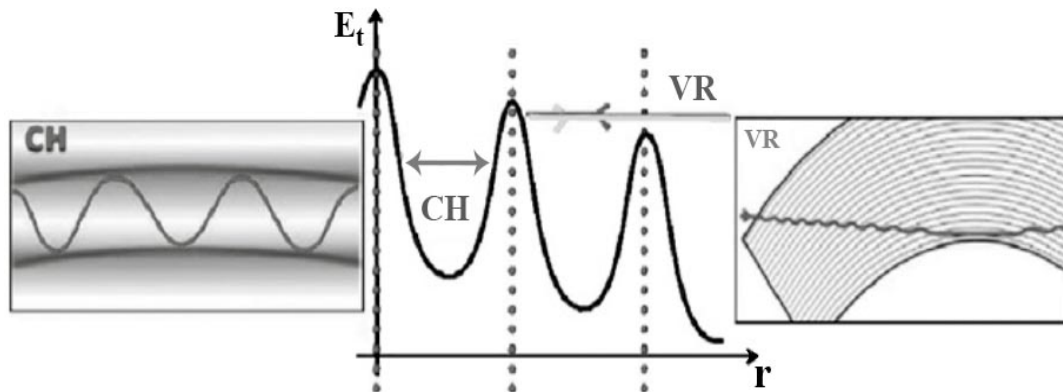
Радиус изгиба кристаллической полоски вдоль ее длины

Широкий рабочий диапазон по углам в пределах всего угла изгиба кристалла, около 30 мкрад для LHC и около 6 мкрад для FCC. Нет необходимости подстраивать кристалл по углу для каждого цикла накопления. Меньше требования к совершенству кристалла, так как отражение происходит в центре кристалла на малой длине порядка  $1, 2R \times \theta_c$ , доли миллиметра.



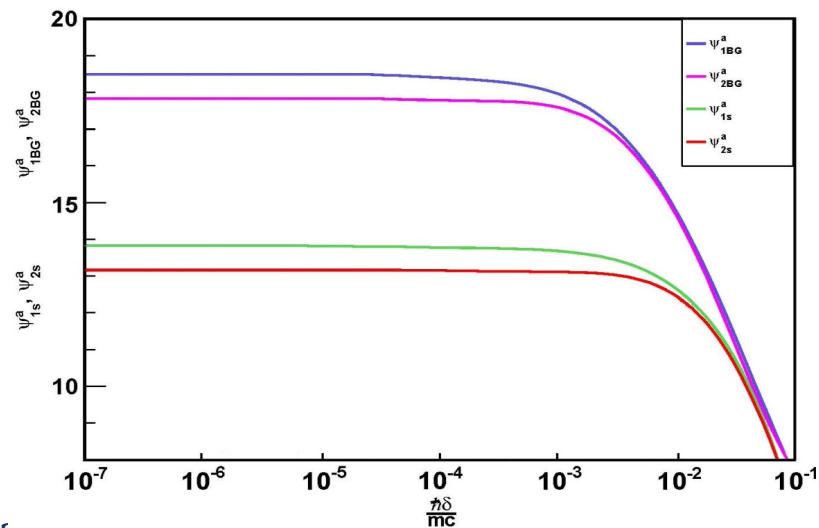
Расчетная эффективность кратного отражения на пяти изогнутых полосках составляет около **92%** для энергии **6,5 ТэВ** в LHC и **95%** для энергии **50 ТэВ** в FCC, а соответствующий угол отклонения равен **15 мкрад** и **5 мкрад**.

### 3.1.2 Излучение релятивистских частиц в кристаллах



Квазипериодическое движение:

$$x(t) = x_m \sin(\Omega t + \varphi_0)$$



Параметр мультипольности  $\rho = 2\gamma^2 \frac{\langle (v(t) - v_m)^2 \rangle}{c^2}$ . При  $\rho \ll 1$  (Когерентное тормозное излучение). При  $\rho \gg 1$  - соответствует магнитотормозному излучению; при  $\rho \sim 1$  - является промежуточным, когда один тип излучения преобразуется в другой

**Полное сечение тормозного излучения:**

$\frac{d\sigma}{dx} = \sigma_0 \left[ (1 + (1 - x)^2)(\psi_1 + \psi_{1s}^a) - \frac{2}{3}(1 - x)(\psi_2 + \psi_{2s}^a) \right]$ , где  $\sigma_0 = \alpha_{QED} Z^2 r_e^2$ ,  $\alpha_{QED} = 1/137.04$ ,  $r_e$  - классический радиус электрона,  $x = E_\gamma/E$  - отношение энергии испускаемого фотона  $E_\gamma$  к начальной энергии  $E$  электрона

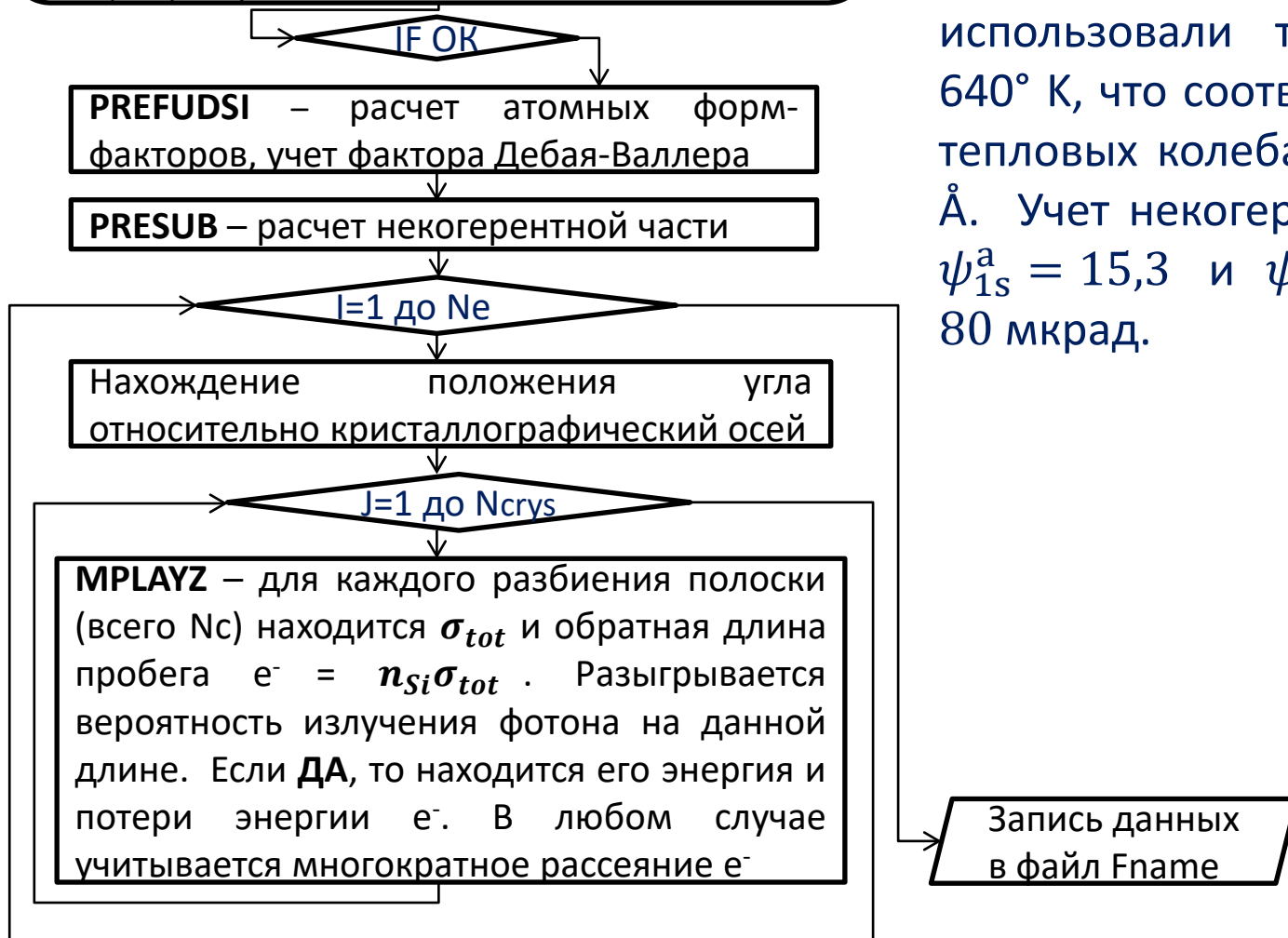
$$\psi_1 = 4 \frac{(2\pi)^2}{NV} \sum_{\mathbf{g}} |U(\mathbf{g})|^2 \frac{\delta g_\perp^2}{g_\parallel}, \quad \psi_2 = 24 \frac{(2\pi)^2}{NV} \sum_{\mathbf{g}} |U(\mathbf{g})|^2 \frac{\delta^2 g_\perp^2 (g_\parallel - \delta)}{g_\parallel^4}$$





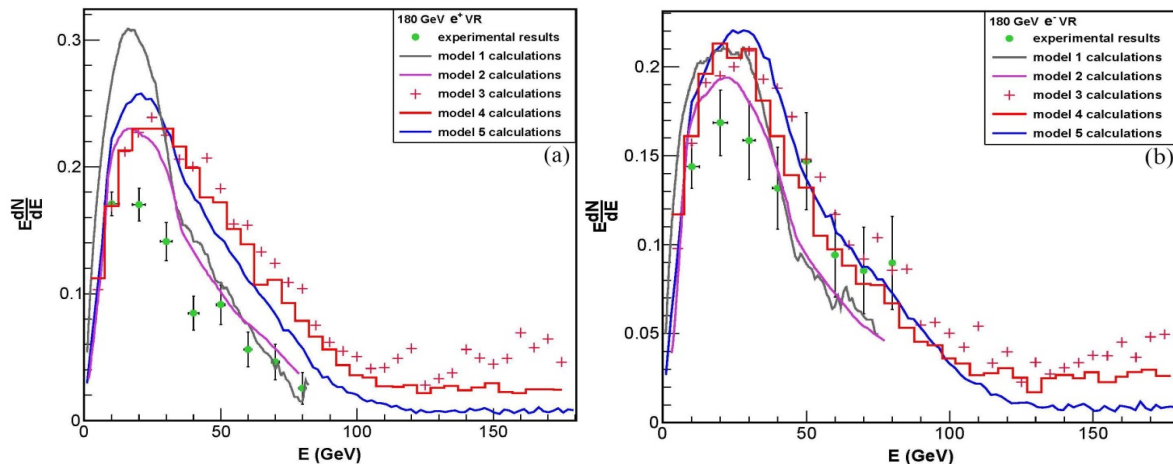
### 3.2 Особенности излучения 10 ГэВ электронами в области объемного отражения. Выбор модели для расчетов и его программная реализация

**Входные данные:**  $E_0$  – начальная энергия  $e^-$ ,  $\theta$  – угол входа  $e^-$ ,  $\theta_{\min}$  – min угол входа  $e^-$ ,  $\epsilon$  – min энергия излученного фотона, FName – имя файла, Ne – число разыгрываемых  $e^-$ , R – радиус изгиба полоски, D – толщина полоски, Nc – число разбиений полоски по толщине, Ncrys – число полосок



Потенциалы рассчитывались с учетом температурных осцилляций атомных центров в кристаллах. Для кристалла кремния мы использовали температуру Дебая  $640^\circ \text{ K}$ , что соответствует амплитуде тепловых колебаний равной  $0.0645 \text{ \AA}$ . Учет некогерентного излучения:  $\psi_{1s}^a = 15,3$  и  $\psi_{2s}^a = 14,3$ .  $\langle \theta_{vr} \rangle = 80 \text{ мкрад}$ .

## 3.2 Особенности излучения 10 ГэВ электронами в области объемного отражения. Выбор модели для расчетов и его программная реализация



Распределение потерь энергии  $e^+$  толщиной 0,84 мм (a) и  $e^-$  толщиной 0,93 мм в монокристаллах Si(111)

**Модель 1** – самый первый расчет, выполненный по теории Байера-Каткова без учета кратных излучений.

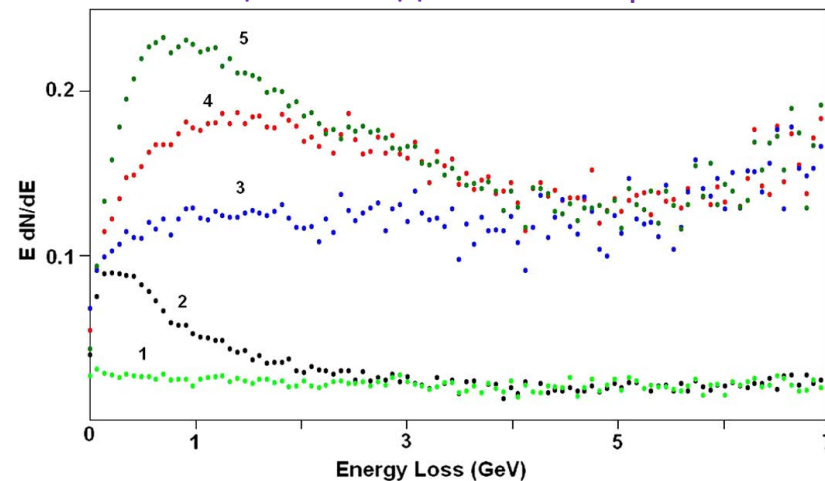
**Модель 2** – расчет с учетом вероятности излучения двух фотонов.

**Модель 3** – использование быстрого преобразования Фурье для упрощения формулы Байера-Каткова с учетом кратного излучения

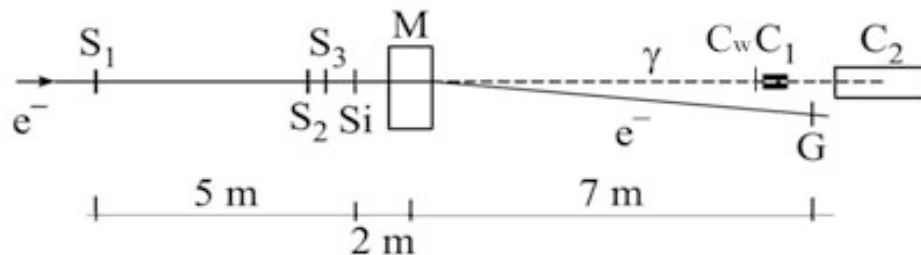
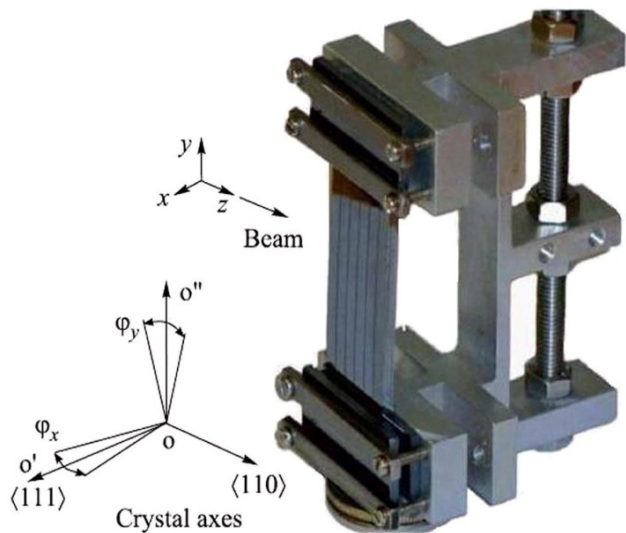
**Модель 4** - прямое интегрирование формулы Байера-Каткова

**Модель 5** – локальное использование теории КТИ с помощью метода Монте-Карла

Тип кристалла	Ориентация кристалла	Суммарные потери энергии, ГэВ
Изогнутый монокристалл длина 2,5 мм	Неориентированный (кривая 1)	0,158
	Плоскостная (кривая 2)	0,229
Изогнутый многополосный (6 полос) длина $6 \times 2,5 = 15$ мм	Неориентированный (кривая 3)	0,878
	Плоскостная (кривая 5)	1,148
Изогнутый монокристалл длина 15 мм	Плоскостная (кривая 4)	1,072



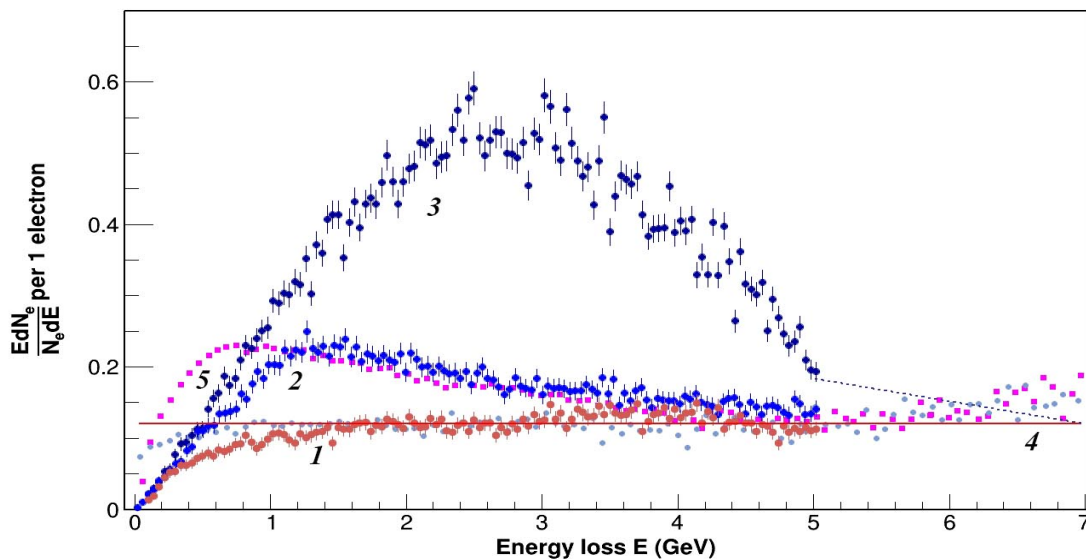
### 3.2.1 Генерация гамма-излучения при взаимодействии 7 ГэВ пучка электронов с мультикристаллической структурой



Угловая расходимость пучка  $\sigma_x \sim 0,5$ ,  $\sigma_y \sim 1$  мрад,  $S_3$  – сечение  $2 \times 30$  мм,  $C_w$  – 5 мм вольфрамовый конвертор, магнит  $M$  –  $B l = 0,33$  Тл  $\times$  м, calorиметры:  $C_1$  – 10 мм  $\times$  30 мм и длиной 7 мм,  $CeF_3$  ( $\rho = 6,16$  г/см<sup>3</sup>,  $X_0 = 1,68$  см),  $C_2$  – 20 см  $\times$  20 см и длиной  $20X_0$

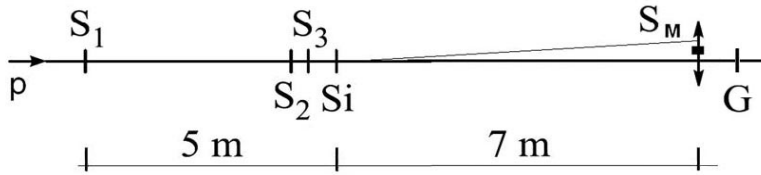
$S_i(111)$  – 6х2,5 мм вдоль пучка  
4-слоя по 0,5 мм поперек пучка

Ориентация кристалла	Средние потери энергии, ГэВ
Неориентированный (кривая 1)	$0,89 \pm 0,08$
Плоскостная (кривая 2)	$1,2 \pm 0,11$
Плоскостная (расчет)	1,148
Осевая (кривая 3)	$2,2 \pm 0,2$



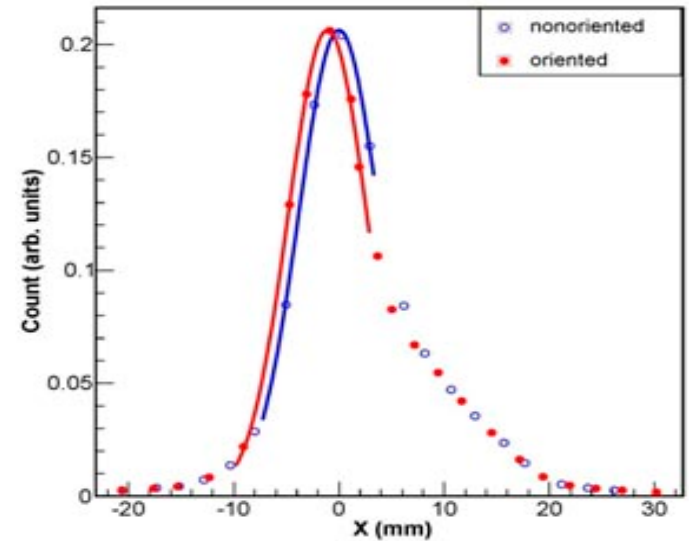


### 3.3 Применение мультикристаллических структур для защиты септум-магнитов

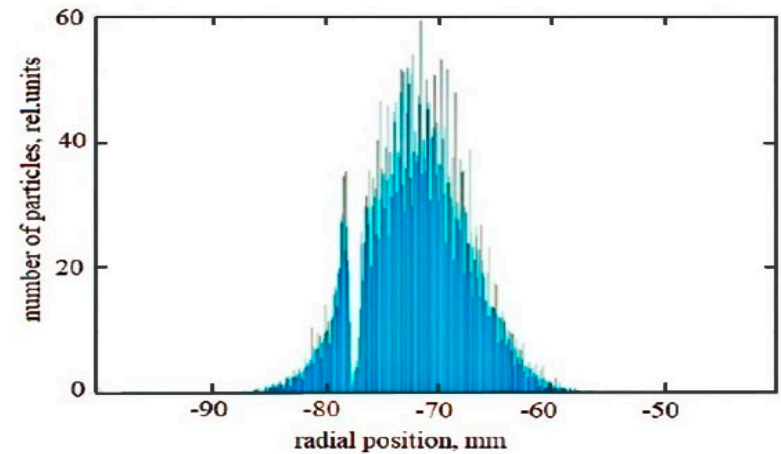


$S_1, S_2, S_3$  – телескоп сцинтилляционных счетчиков,  $S_M$  – сканирующий счетчик,  $Si$  – мультикристаллическое устройство,  $G$  – годоскоп

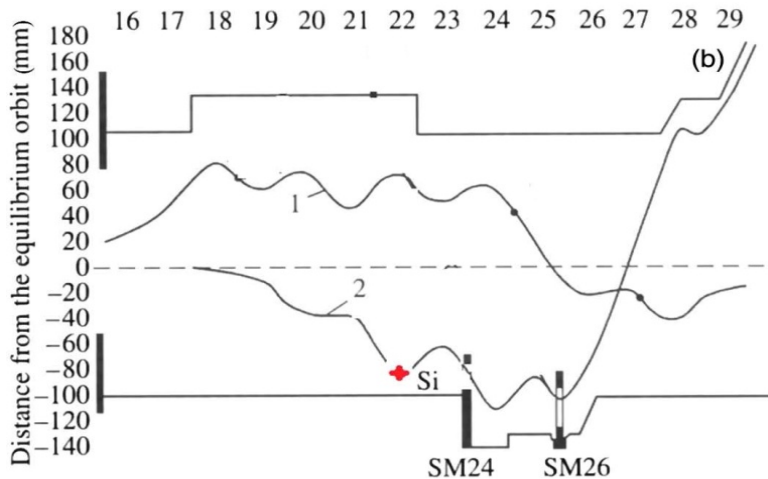
Угол отклонения пучка: эксперимент  $1,1 / 7000 = 0,16$  мрад, расчет  $6 \times 0,038 = 0,228$  мрад. Расчетный коэффициент «затенения» септума составил 60%



Горизонтальный профиль протонного пучка для двух ориентаций мультикристаллического устройства



Расчетный профиль выводимого пучка перед септумом



1 - circulating beam, 2 - extracted beam

Возможная схема «затенения» септум-магнита SM24 мультикристаллическим устройством (Si) в кольце ускорителя У-70

## Личное участие автора

- При непосредственном участии автора были поставлены и сформулированы цели и задачи диссертационной работы.
- Автор принимал активное участие в подготовке и проведению исследований на канале 4а ускорителя У-70 ИФВЭ. Программное обеспечение системы сбора данных и первичного анализа данных для этих исследований были созданы автором.
- В экспериментах на канале 4а ускорителя У-70 ИФВЭ и в рамках коллаборации UA-9 ускорителя SPS CERN автор принимал участия в наборе и обработке экспериментальных данных, а также проводил физический анализ данных.
- Личный вклад автора в научные работы, опубликованные по теме диссертации, отражен в содержании диссертации и в основных положениях, представленных к защите.

## Научная новизна результатов диссертационной работы

- Впервые был детально изучен фокусирующий эффект новой оптики основанный на двух типах изогнутых кристаллов. Экспериментально подтверждено, что используя обращенное направление движения частиц в фокусирующих кристаллах (фокусировка из точки в параллель), можно формировать направленные потоки вторичных частиц, генерируемых на нитевидных мишенях, без применения магнитной оптики.
- Впервые экспериментально проверена фокусировка пучка частиц высокой энергии кристаллическим устройством на расстоянии порядка 15 см.
- Впервые на вторичном пучке электронов с энергией 7 ГэВ на канале 4а У-70 проведено детальное исследование генерации высокоэнергетических фотонов на мультикристаллической структуре в режиме отражения
- Продемонстрирована возможность использования объемного отражения протонного пучка взаимодействующего с мультикристаллической структурой для защиты септум-магнитов в ускорителях.



## Научные положения, выносимые на защиту

- Результаты исследования новой фокусирующей оптики пучков на основе двух типов кристаллических устройств.
- Результаты исследования отклоняющей системы, состоящей из многополосного кристаллического устройства в режиме объемного отражения, для протонного пучка с импульсом 400 ГэВ/с и пучка отрицательных пионов с импульсом 150 ГэВ/с.
- Результаты испытания на выведенном пучке многополоскового устройства, разработанного в ИФВЭ для коллимации пучка в больших адронных коллайдерах.
- Модель расчета потерь энергии релятивистских электронов и позитронов на излучение в изогнутом монокристалле и мульткристалле.
- Результаты исследования генерации излучения высокоэнергетических фотонов, возникающего при прохождении пучка электронов с энергией 7 ГэВ через мульткристаллическую структуру в режиме объемного отражения.

## Публикации

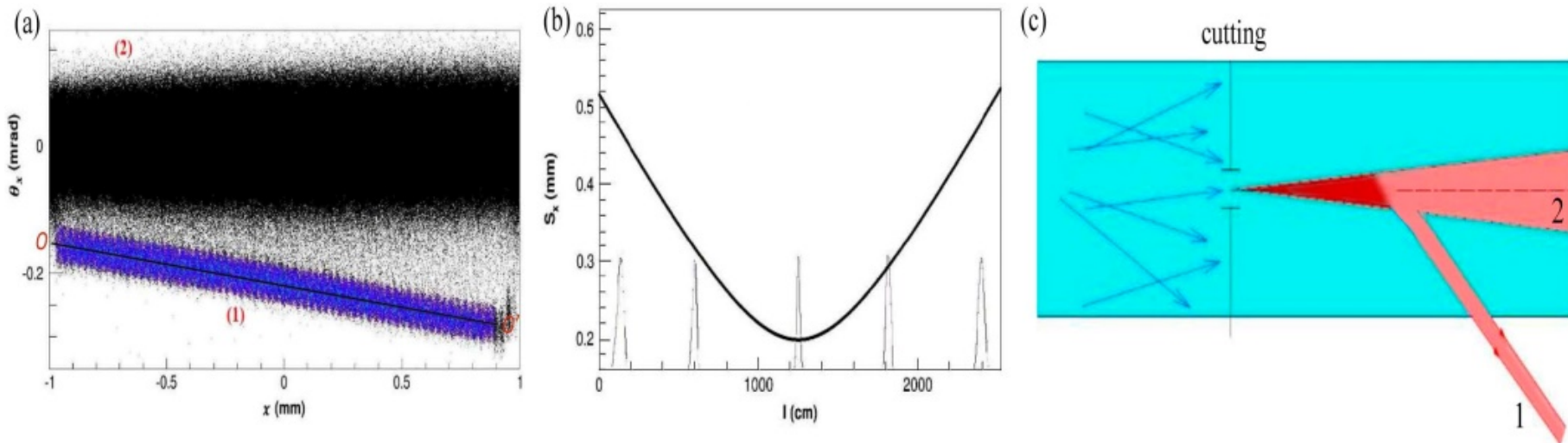
1. Афонин А.Г., Баранов В.И., Баранов В.Т., Бритвич Г.И., Янович А.А. [и др.] Исследование фокусировки пучка протонов с энергией 50 ГэВ с помощью нового кристаллического устройства // Письма в ЖЭТФ. – 2012. – Т. 96. – № 7. – Октябрь 2012. – С. 470-473.
2. Scandale W., Arduini G., Cerutti F., Yanovich A.A. [et al.] // Comprehensive study of beam focusing by crystal devices // Phys. Rev. Accel. Beams. – 2018 – Vol. 21. – No 1. - January 2018. – P. 014702.
3. Афонин А.Г., Баранов Е.В., Бритвич Г.И., Янович А.А. [и др.] Фокусировка пучка частиц высокой энергии на предельно коротком расстоянии // Письма в ЖЭТФ. – 2017. - Т. 105. - № 12. – Август 2017. - С. 727-729.
4. Scandale\_W., Arduini G., Cerutti F., Yanovich A.A. [et al.] Focusing of a particle beam by a crystal device with a short focal length // Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Res. B. – 2018. – Vol. 414. - January 2018. - Pp. 104-106.
5. Афонин А.Г., Бритвич Г.И., Бугорский А.П., Янович А.А. [и др.] Отклонение расходящегося пучка протонов с энергией 50 ГэВ с помощью фокусирующего кристаллического устройства // Письма в ЖЭТФ. – 2016. – Т. 104. - № 1. – Июль 2016. - С. 9-12.
6. Scandale W., Arduini G., Cerruti F., Yanovich A.A. [et al.] Focusing of 180 GeV/c pions from a point-like source into a parallel beam by a bent silicon crystal // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. – 2019. – Vol. 446. – May 2019. – Pp. 15-18.
7. Scandale W., Arduini G., Butcher M., Yanovich A.A. [et al.] Comparative results on the deflection of positively and negatively charged particles by multiple volume reflections in a multi-strip silicon deflector // Письма в ЖЭТФ. – 2015. – Т. 101. – № 10. – May 2015. – С. 755-760.
8. Scandale W., Arduini G., Butcher M., Yanovich A.A. [et al.] Deflection of high energy protons by multiple volume reflections in a modified multi-strip silicon deflector // Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Res. B. – 2014. - Vol. 338. – November 2014. – P.108-111.
9. Маишеев В.А., Сандомирский Ю.Е., Чесноков М.Ю., Чесноков Ю.А., Янович А.А., Язынин И.А. Использование отражения частиц в изогнутых кристаллах для коллимации пучка в больших адронных коллайдерах // Письма в ЖЭТФ. – 2020. – Т. 112. – № 1. – Июль 2020. – С. 3-8.
10. Афонин А.Г., Баранов В.Т., Бритвич Г.И., Бугорский А.П., Янович А.А. [и др.] Излучение фотонов при взаимодействии электронного пучка высокой энергии с последовательностью изогнутых монокристаллов // Письма в ЖЭТФ. – 2018. – Т. 107. - № 8. – Апрель 2018. – С. 477-480.
11. Afonin A.G., Barnov E.V., Britvich G.I., Chesnokov Yu.A., Yanovich A.A. [et al.] Implementation of multistrip crystals to protect the septum magnets and to generate gamma radiation // Phys. Rev. ST Accel. Beams. – 2019 - Vol. 22. – No 3. - March 2019. - P. 033001.

# Backups

## Актуальность темы

- Первые успешные эксперименты по отклонению протонных пучков выполненные в Дубне и ИФВЭ стимулировали исследования в этой области на коллайдерах RHIC, Tevatron, SPS и LHC.
- Фокусирующие устройства первого типа могут быть использованы на ускорителях для систем формирования выведенных пучков, а также для получения пучков вторичных частиц (в режиме обратной фокусировки) в ТЭВ-ной области энергии.
- Для измерения магнитных моментов короткоживущих частиц на LHC и FCC с использованием прецессии спина в изогнутом кристалле, а также для уменьшения размера пучка на линейном электронном коллайдере CLIC необходимо фокусировать пучки частиц на короткое расстояние, что может быть реализовано фокусирующими устройствами второго типа.
- Защита септум-магнита от радиации. Эта задача также важна для ускорителей в Fermilab, BNL, и J-PARC. Одним из способов решения является метод «затенения» перегородки септума мультикристаллической структурой в режиме объемного отражения. Кроме того, мультикристаллические структуры имеют перспективу использования на ускорителях для коллимации пучка и в качестве источника высокоэнергетических фотонов.

# 1.3 Фокусировка из точечного источника в параллельный пучок



Среднеквадратичный размер пучка в фокальной точке составляет 0,2 мм, а полный размер пучка в этой точке равен 3 мм. То есть кристалл обладает свойством селективной фокусировки. Из всех треков он отклонил только порцию частиц, вылетающих из узкой полоски.

## 2.1 Описание процесса объемного отражения

Угол отражения для заряженных частиц без возмущения многократным рассеянием на атомных ядрах

$$\alpha(E) = \frac{2c}{R} \int_{x_0}^{x_c} \left[ \frac{1}{\sqrt{\frac{2c^2}{E_0\beta^2} \left[ E - U(x) - \frac{E_0\beta^2 x}{R} \right]}} - \frac{1}{\sqrt{\frac{2c^2}{E_0\beta^2} \left[ E - U(x_c) - \frac{E_0\beta^2 x}{R} \right]}} \right] dx$$

Функция  $\alpha(E)$  является периодической с периодом  $\delta E = E_0\beta^2 d/R$ , где  $d$  – межплоскостное расстояние.

$$|x_0 - x_c| \approx |x_e - x_0| \approx \frac{l_0^2}{8R}$$

С ростом энергии угловой разброс, вызванный многократным рассеянием, падает быстрее, чем критический угол каналирования, что в итоге уменьшает вероятность объемного захвата и увеличивает вероятность отражения.



### 3.1.1 Основные особенности излучения релятивистских частиц

Излучение ультрарелятивистской частицы можно описать с помощью квантовой теории. Наиболее популярен **квазиклассический операторный метод** развитый **В.Н. Байером** и **В.М. Катковым**. Квантовый характер проявляется двояким образом: **1) существует координатная неопределенность** и **2) присутствует импульс отдачи**.

При излучении в магнитном поле энергия излученного фотона зависит от значения параметра  $\chi = \left(\frac{\hbar\omega_0}{\varepsilon}\right) \gamma^3 (v_t/c)$ . Для  $\chi \ll 1$  **отдача мала**, причем характерные частоты излучения  $\omega \sim \omega_0 \gamma^3$  (как **в классической теории**).

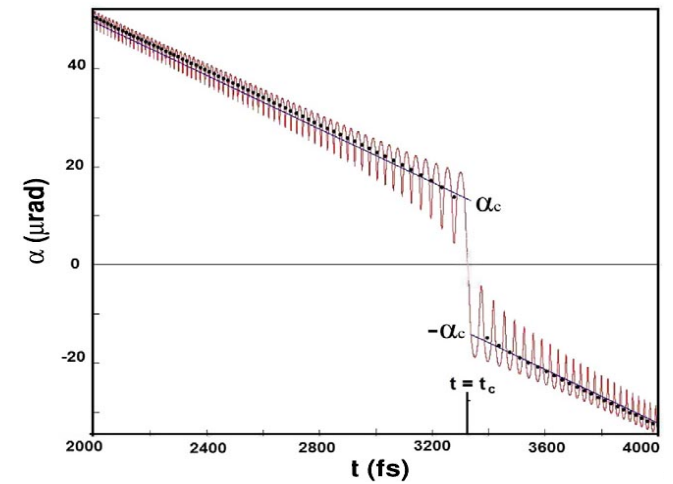
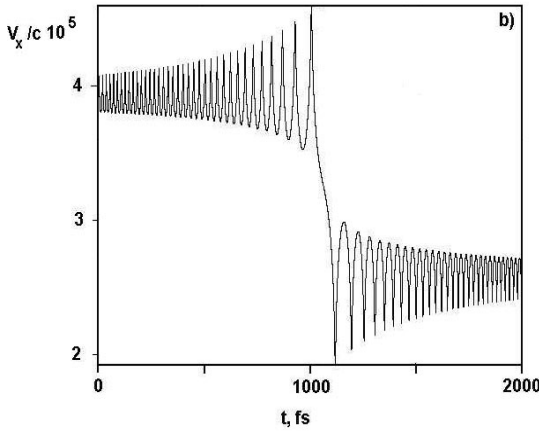
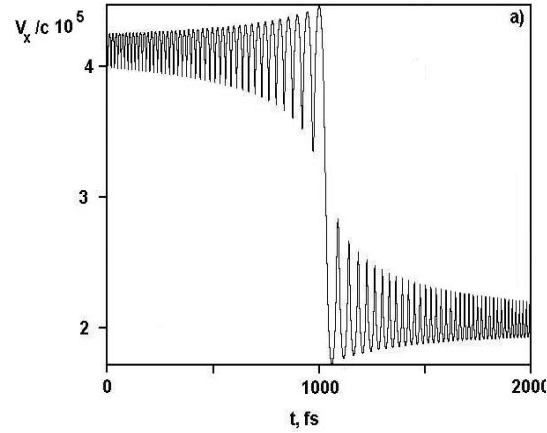
Электромагнитное поле в материальной среде описывается **диэлектрической функцией  $\varepsilon(\omega)$**  зависящей от частоты фотона. При движении ультрарелятивистской частицы в среде, это влияет только на излучение мягких по энергии фотонов. При генерации более жесткого излучения можно считать  **$\varepsilon(\omega) = 1$** .

**Длина формирования излучения, когда  $\varepsilon(\omega) = 1$ :  $l_f(\omega) = \frac{2\varepsilon\varepsilon'}{\omega m^2(1+\gamma^2 v^2)}$**  Для ультрарелятивистского случая угол  $\mathbf{v} \leq 1/\gamma$ , то  $l_f \simeq l_{f_0} = (2\varepsilon\varepsilon')/(\omega m^2)$

Излучение ультрарелятивистских частиц, вызванное продольной составляющей пренебрежимо мало ( $\sim 1/\gamma^2$ ) по сравнению с излучением, вызванным поперечной составляющей силы.

Потери энергии на излучение обратно пропорциональны квадрату массы частицы. Поэтому легкие частицы электроны и позитроны излучают большую энергию, чем тяжелые.

### 3.1.3 Излучение, сопровождающее процесс объемного отражения в изогнутых плоскостях монокристалла



Энергия частицы равна 200 ГэВ, толщина кристалла 0,06 см, радиус изгиба 10 м

Угол  $\alpha(t)$  между траекторией частицы и плоскостями кристалла

Первые расчеты излучения были выполнены с помощью **формулы Байера-Каткова**. В расчетах находилось энергетическое распределение потерь энергии позитрона или электрона на заранее выбранной толщине кристалла.

**Принцип локальной справедливости КТИ** для изогнутых кристаллов. Образование тормозного фотона происходит в основном на длине формирования. Если длина формирования достаточно мала, то угол электрона (позитрона) относительно кристаллографических осей на этой длине практически не изменится. Тогда можно считать, что теория КТИ справедлива на этом участке траектории. Математическая реализация:

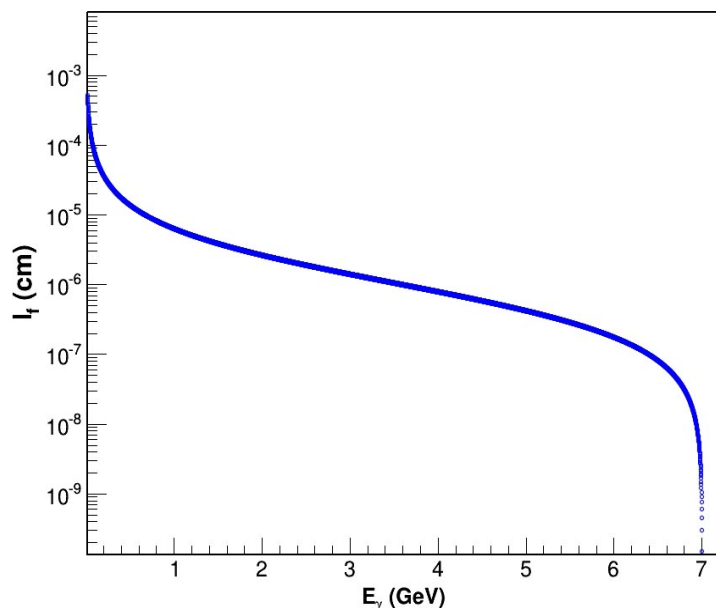
$$\frac{d\varepsilon_\gamma}{dE_q}(E_q) = R \int_{\theta_1}^{-\theta_{min}} \frac{dI}{dE_q}(\tilde{\theta}) d\tilde{\theta} + R \int_{\theta_{min}}^{\theta_2} \frac{dI}{dE_q}(\tilde{\theta}) d\tilde{\theta}, \text{ где } \theta_1 < -\theta_{min} \text{ и } \theta_2 > \theta_{min}$$

- углы входа и выхода соответственно,  $\frac{dI(\theta)}{dE_q}$  - интенсивность КТИ



## 3.2 Особенности излучения 10 ГэВ электронами в области объемного отражения. Выбор модели для расчетов и его программная реализация

Особенностью эксперимента является взаимодействие электронного пучка с достаточно протяженной мишенью по направлению пучка (15 мм), состоящей из 6 отдельных монокристаллов кремния. Выбран метод расчета потерь энергии в толстых кристаллах. В основу метода положен принцип справедливости теории КТИ на малых участках траектории.



Расчет  $l_f$  выполнен для электронов с энергией 7 GeV

Для использования такого метода расчета, должны быть выполнены следующие условия:

- 1) Радиус изгиба каждого кристалла должен быть достаточно большим, т. е. удовлетворять критерию  $k \approx \sqrt{\pi R/d\theta_b} \gg 1$ . Здесь  $R \approx 225$  см,  $d = 3,135$  Å,  $\theta_b \sim 0,5$  мрад (угол входа в кристалл). Тогда  $\sqrt{\pi R/d\theta_b} \approx 75$
- 2) Длина формирования излучения  $l_f$  должна быть значительно меньше, чем толщина каждого кристалла в направлении движения частицы. Здесь  $l_f = 0.00074$  см (0.3%) для  $E_\gamma > 10$  МэВ
- 3) Параметр  $\rho < 1$ . Для кремния в плоскостях (110) и (111) при  $E_e < 24$  ГэВ  $\rho$  не превышает 1

# Основные выводы диссертационной работы

- Экспериментальные результаты по фокусировке пучка кристаллическими устройствами первого типа (со скошенным торцом) показали, что благодаря модернизации технологии изготовления и конструктивных особенностей получены образцы с параметрами, близкими к теоретическому идеалу. Такие кристаллические устройства в режиме прямой фокусировки (из параллельного пучка в линейный фокус) могут использоваться в реальных системах формирования пучков выведенных частиц, а в режиме обратной фокусировки (из точки в параллельный источник) при энергиях пучков выше 100 ГэВ подходят для кристаллической системы транспортировки пучков.
- Экспериментально проверена фокусировка пучка частиц высокой энергии кристаллическим устройством второго типа на короткое расстояние порядка 15 см. Ожидается, что фокусное расстояние можно уменьшить до одного сантиметра при использовании более тонкой пластины (около 100 микрон). Такое кристаллическое устройство позволит реализовать предложенные идеи по измерению магнитных моментов короткоживущих частиц и по уменьшению размеров пучка в линейных электрон-позитронных коллайдерах.
- Экспериментальные результаты по отклонению положительных и отрицательных частиц многополосными кристаллическими устройствами в режиме кратного объемного отражения показали, что многополосные кристаллы первого типа можно использовать для коллимации пучка в ускорителях высоких энергий, а многополосные кристаллы второго типа для коллимации пучка сверхвысоких энергий. Эта особенно важно для пучков отрицательно заряженных частиц из-за их низкой эффективности каналирования.
- Создана программа расчета потерь энергии на излучение в изогнутом монокристалле и мульткристалле. Алгоритм программы использует новую модель, которая основана на идеи локальности КТИ с помощью Монте-Карло и позволяет учитывать многократное рассеяние электронов (позитронов) и кратность излучения фотонов. Расчеты, выполненные с использованием новой модели, достаточно хорошо согласуются с другими аналогичными расчетами в рамках различных моделей.
- В эксперименте по генерации излучения при взаимодействии электронного пучка с энергией 7 ГэВ с мульткристаллической структурой показан рост потерь энергии на излучение в 1,3 раза для плоскостной и в 2,5 раза для осевой ориентации мульткристаллической структуры по сравнению с неориентированным случаем. Таким образом, был продемонстрирован источник излучения высокоэнергетических фотонов, имеющий перспективы практического применения на ускорителях.
- Экспериментальные результаты по защите септум-магнита SM24 от радиации с использованием мульткристаллической структуры в режиме отражения показали, что мульткристаллическая структура должна хорошо «затенять» септум. Эта задача очень важна для ускорителей в CERN, Fermilab, BNL, и J-PARC.

## Цели диссертационной работы

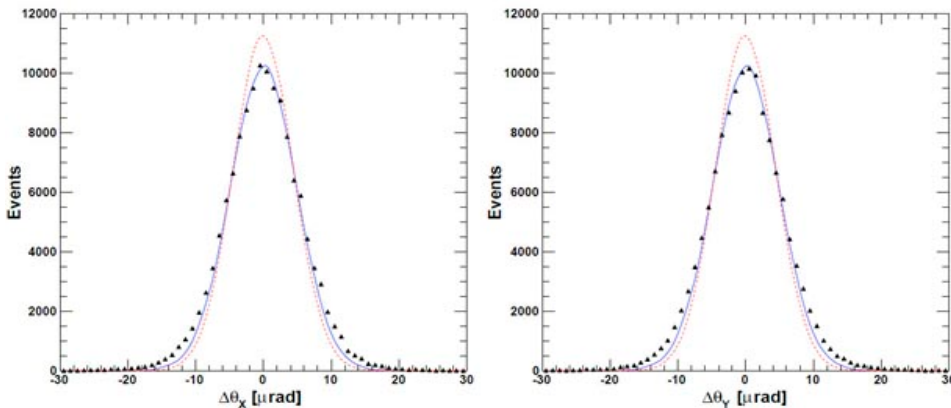
- Изучение возможностей новой оптики пучков заряженных частиц на основе кристаллических фокусирующих элементов.
- Исследование объемного отражения частиц в изогнутых кристаллах для высокоэффективного отклонения положительных и отрицательных частиц.
- Исследование нового явления генерации жестких фотонов на вторичном электронном пучке У-70.
- Исследование по защите выводного септума СМ-24 ускорителя У-70 от радиации.

## Практическая значимость результатов

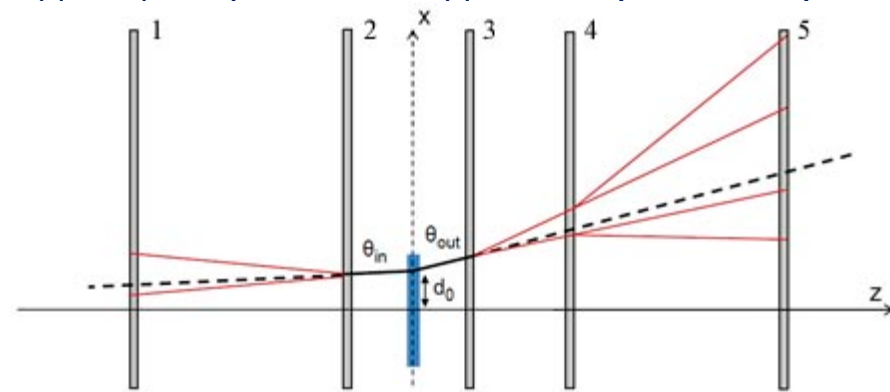
- Результаты анализа экспериментальных данных по новой оптике пучков позволили получить детальную информацию о качестве фокусировки. Было показано, что принцип линзы выполняется с высокой точностью. При энергии пучков выше 100 ГэВ фокусирующие элементы первого типа могут заменить дорогостоящие магнитооптические каналы.
- Экспериментальные результаты по отклонению протонного пучка с импульсом 400 ГэВ/с и пучка отрицательных пионов с импульсом 150 ГэВ/с, показывают возможность применения кратного объемного отражения частиц в многополосных кристаллах для коллимации пучка в ускорителях высоких энергий. Эта особенно важно для пучков отрицательно заряженных частиц из-за их низкой эффективности каналирования.

# Реконструкция трека и характеристики телескопа

Для каждого события требуется одно двумерное попадание в каждой плоскости, и к каждой проекции (x или y) применяются две подгонки по прямой линии между станциями 1 и 2 и между станциями 3, 4 и 5 с тремя параметрами  $\theta_{in}$ ,  $\theta_{out}$ ,  $d_0$  (представляющими входящий и исходящий углы и параметр поперечного прицеливания по цели при  $z = 0$ ), с направлением вдоль пучка. Корреляции ошибок между плоскостями из-за рассеяния включаются в матрицу ковариации подгонки, и к подобранным трекам применяется  $\chi^2$  – катинг (менее 10 на фитируемом треке). Полный трек восстанавливается, когда пара совпадающих треков попадает в ту же самую позицию на кристалле.



Угловое разрешение ( $\Delta\theta = \theta_{in} - \theta_{out}$ ) телескопа в проекциях x и y составляет  $\sigma(\Delta\theta) = 5,2$  мкрад. Разрешение входящего плеча телескопа  $\sim 2,8$  мкрад.



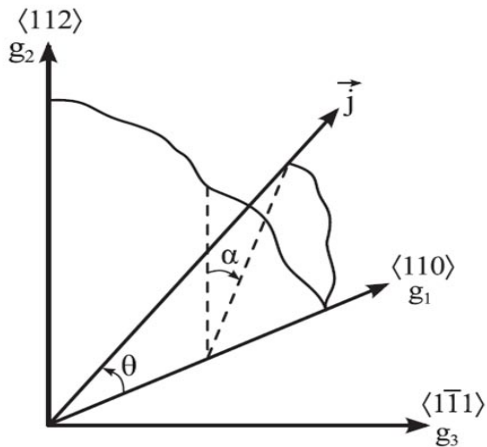
Метод подгонки трека. Проекции  $\theta_{in}$  и  $\theta_{out}$  показаны пунктирными черными линиями. Проекции угловых ошибок из-за многократного рассеяния обозначены сплошными красными линиями

Угловая ошибка на плоскость из-за рассеяния на веществе (640 мкм – Si, 60 мкм – Al) составляет 2,4 мкрад для пучка протонов 400 ГэВ/с. Среднее разрешение каждого детектора 6,9 мкм



### 3.1.2 Излучение релятивистских частиц в кристаллах

$\psi_1 = 4 \frac{(2\pi)^2}{NV} \sum_{\mathbf{g}} |U(\mathbf{g})|^2 \frac{\delta g_{\perp}^2}{g_{\parallel}}, \psi_2 = 24 \frac{(2\pi)^2}{NV} \sum_{\mathbf{g}} |U(\mathbf{g})|^2 \frac{\delta^2 g_{\perp}^2 (g_{\parallel} - \delta)}{g_{\parallel}^4}$ , где  $N$  - число атомов в фундаментальной ячейке структуры,  $V$  - объем фундаментальной ячейки,  $\delta$  - дельта функция,  $\mathbf{g}$  - вектор обратной решетки [см. 4],  $g_{\parallel}$  - проекция вектора  $\mathbf{g}$  в направлении движения частицы,  $g_{\perp}^2 = g^2 - g_{\parallel}^2$ . Значение передачи импульса  $\hbar\delta$  определяется как  $\hbar\delta = \frac{m^2 c^3}{2E} \frac{x}{1-x}$ . Суммирование в функциях  $\psi_1$  и  $\psi_2$  выполняется при условиях, что  $g_{\parallel} \geq \delta$ . Значение  $|U(\mathbf{g})|^2 = S(\mathbf{g})S^*(\mathbf{g})e^{-Ag^2 \frac{(1-F(g))^2}{g^4}}$ , где  $A$  - средний квадрат тепловых колебаний атома,  $F(g)$  - атомный форм-фактор.

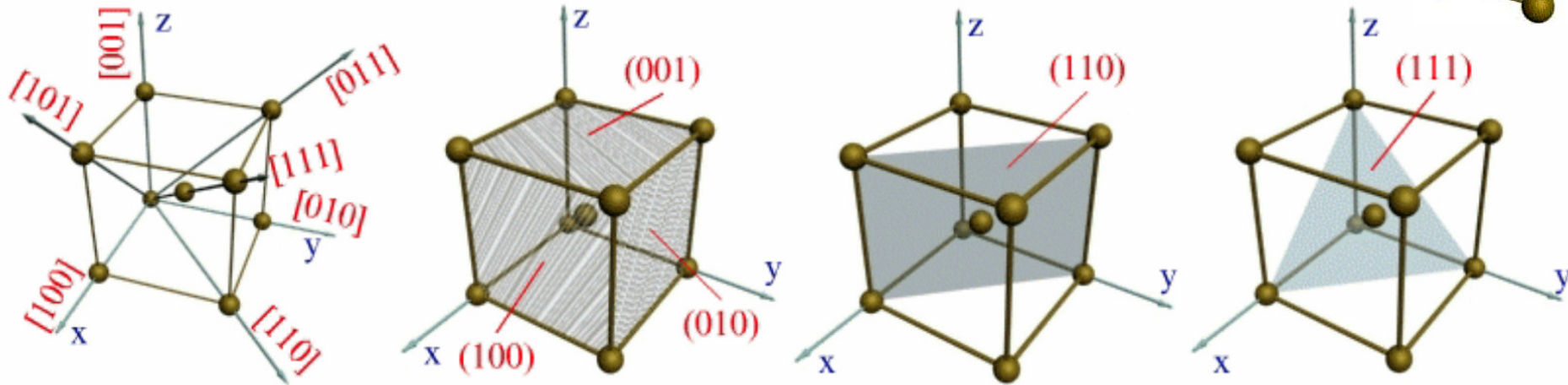
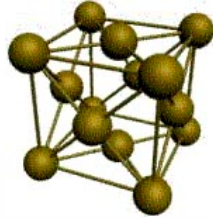


Движение частицы в системе, определяемой кристаллографическими осями кристалла

Когда испускаемый фотон в монокристалле распространяется под небольшим углом  $\theta \ll 1$ , то  $g_{\parallel} = G_1 n_1 + \theta(G_2 n_2 \cos\alpha + G_3 n_3 \sin\alpha)$ , где вектор  $\mathbf{g}$  представлен в виде базисных векторов обратной решетки, угол  $\alpha$  - это угол между плоскостями определяемыми векторами  $\mathbf{g}_1$  и  $\mathbf{g}_2$  и векторами  $\mathbf{g}_1$  и  $\mathbf{j}$  (где вектор  $\mathbf{j}$  задает направление движения частицы).

Когерентное сечение обратно пропорционально  $g_{\parallel}$  и наибольший вклад в сечение вносят узлы с  $\mathbf{n}_1 = \mathbf{0}$ . Другой важный случай, когда  $\theta \cos\alpha \gg \theta \sin\alpha$  и, аналогично, узлы с  $\mathbf{n}_2 = \mathbf{0}$  вносят наибольший вклад в когерентное сечение. Такой случай называется **плоскостным**, а частица движется под углом, равным  $\theta \sin\alpha$ , к плоскости, определяемой векторами  $\mathbf{g}_1$  и  $\mathbf{g}_2$ .

## Кристаллографические направления и плоскости



*Кристаллографические направления и плоскости в кристаллической решетке*

*Кристаллографические направления* - это характерные прямые линии, выходящие из точки отсчета, вдоль которых в кристаллической решетке располагаются атомы. Индексы направления  $Ox$  и параллельных ему направлений обозначаются  $[100]$ . Соответственно направления  $Oy$  и  $Oz$  обозначаются  $[010]$  и  $[001]$ . Кристаллографические направления вдоль диагоналей граней  $xOz$ ,  $xOy$  и  $yOz$  обозначают  $[101]$ ,  $[110]$  и  $[011]$ .

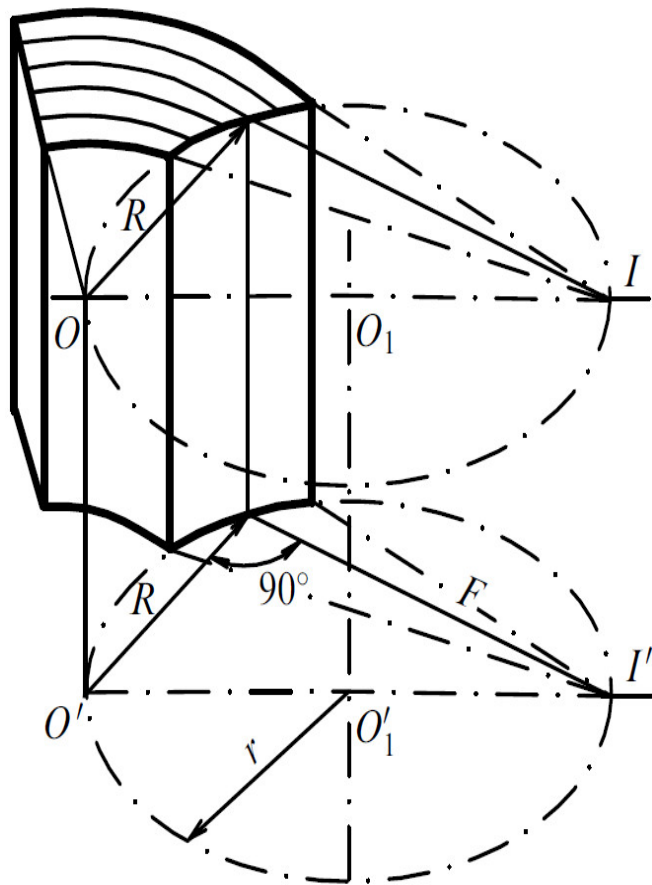
Для определения индекса кристаллографической плоскости необходимо вначале найти координаты ближайших точек ее пересечения с осями координат, проведенными из точки отсчета  $O$ . Затем взять обратные им величины и записать их в круглых скобках в обычной последовательности. Например, индексами плоскостей, параллельных плоскостям  $xOz$  и  $yOz$ , окажутся выражения  $(010)$  и  $(100)$

## Способ фокусировки слабо расходящегося пучка кристаллом

Предложен А.И. Смирновым (ПИЯФ) в середине 80-х годов.

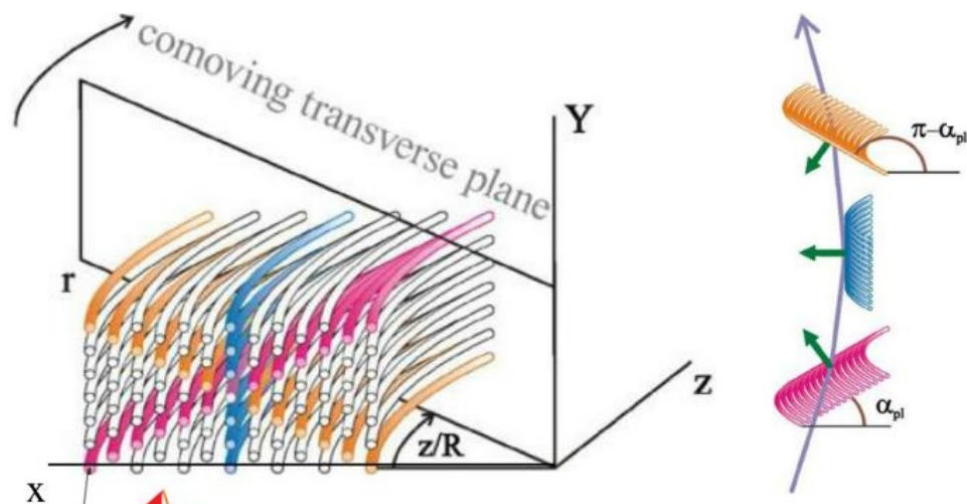
Фокусное расстояние  $F = \sqrt{4r^2 - R^2}$

Размер пучка в точке фокуса  $\Delta x = 2F\theta_c$

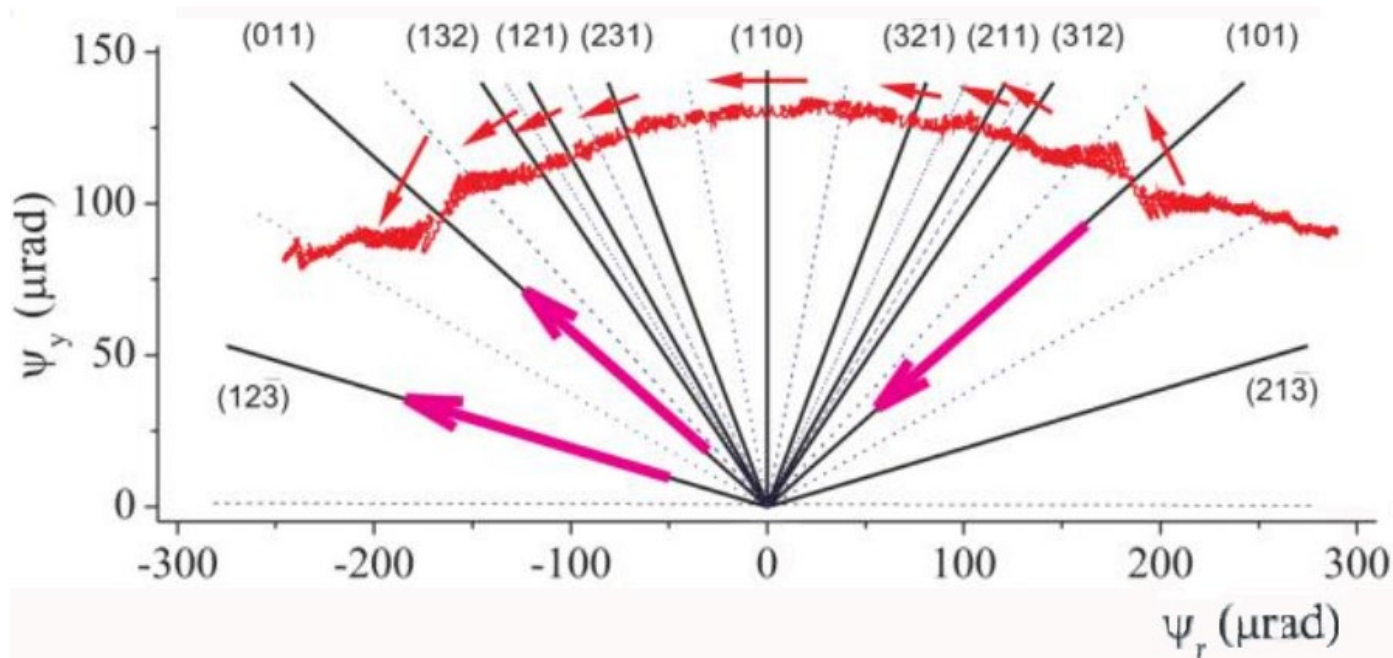
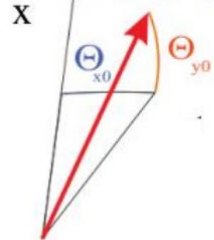


$OO'$  – линия на которой лежат центры кривизны кристаллографических плоскостей;  $O_1O'_1$  – ось цилиндра радиуса  $r$ , по которому обрабатывается торец кристалла;  $II'$  – линия фокуса, в которой сходятся касательные к изогнутым плоскостям

# Множественное объемное отражение в одном кристалле (MVR ОС)



Оси формируют много наклонных отражающих плоскостей



# Получение пучка вторичных частиц с помощью фокусирующих кристаллических элементов

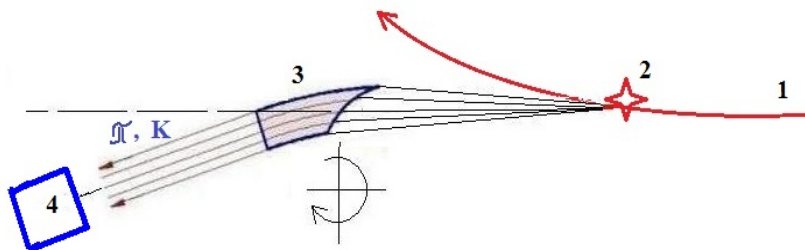


Схема получения пучка вторичных частиц: 1- циркулирующий протонный пучок, 2- внутренняя мишень, 3 – кристаллический фокусирующий элемент, 4- зона физической установки

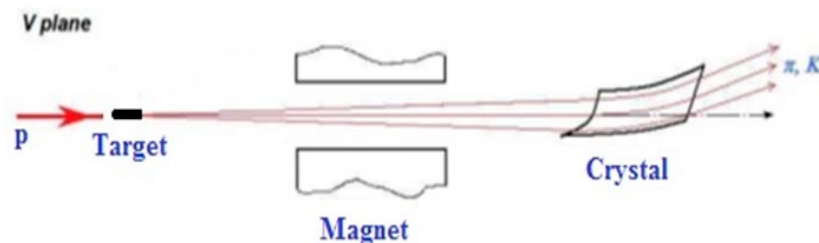
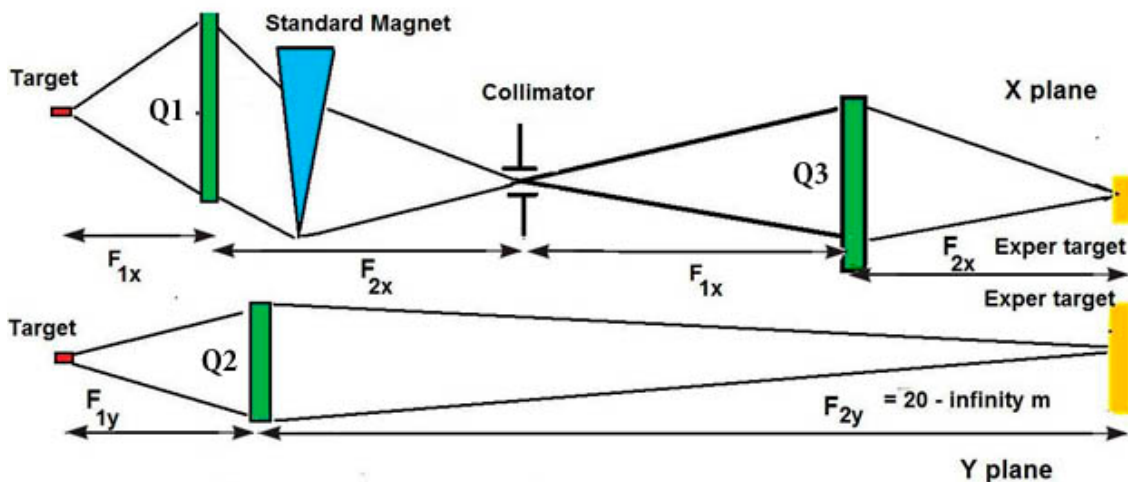


Схема формирования вторичного пучка с узким импульсным интервалом



Линза Q1 обеспечивает вывод частиц из мишени, установленной в вакуумной камере ускорителя, и фокусирует пучок на коллиматор. Линзы Q3, Q2 фокусируют пучок с коллиматора на экспериментальную мишень в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно

Схема транспортировки частиц для энергии LHC