

На правах рукописи

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Протвино – 2021

Работа выполнена в НИЦ «Курчатовский институт» - Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова (г. Протвино).

Научный руководитель - канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» - Институт физики высоких энергий А.А. Логунова, В.А. Маишеев.

Официальные оппоненты:

А.С. Кубанкин, д-р физ.-мат. наук, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, НИУ «БелГУ», профессор;

А.А. Тищенко, канд. физ.-мат. наук, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», ведущий научный сотрудник Международной научно-исследовательской лаборатории «Излучение заряженных частиц».

Ведущая организация – «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва, Ленинские горы 1.

Защита диссертации состоится «___» _____ 2021 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при НИЦ «Курчатовский институт» - Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова по адресу: 142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, дом 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте

http://www.ihep.ru/files/yanovich_thesis.pdf

НИЦ «Курчатовский институт» - Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 201.004.01

д-р физ.-мат. наук

В.В. Мочалов

Общая характеристика работы

В настоящей диссертации рассмотрены исследования с новыми кристаллическими приборами, которые расширяют возможности их применения на ускорителях.

Актуальность темы диссертационной работы

Интерес к прохождению заряженных частиц через кристаллы возник более века назад, когда в экспериментах по дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке было доказано упорядоченное расположение атомов в кристалле. В 1912 году Штарк [*1] предположил, что некоторые направления в кристалле могут быть более прозрачными для заряженных частиц по сравнению с аморфными материалами, и предложил провести эксперименты с протонными пучками. Проверка этой идеи была выполнена лишь в начале 60-х годов, когда компьютерное моделирование подтвердило ее справедливость и сразу несколько экспериментов продемонстрировали аномально большие пробеги ионных пучков в кристаллах [*2]. Теоретическое объяснение эффекта каналирования заряженных частиц в кристаллах было сформулировано Линдхардом в 1964 году [*3]. Результаты исследований каналирования при низких энергиях (порядка несколько МэВ) были опубликованы в нескольких монографиях и обзорах.

Новый этап исследований каналирования заряженных частиц в кристаллах охватывает область высоких энергий. К этому времени в физике высоких энергий и ускорителей появилась необходимость новых решений по выводу пучков заряженных частиц из ускорителей и разводке пучков по физическим установкам. В 1976 году Э.Н. Цыгановом из Дубны (ОИЯИ) была теоретически обоснована возможность отклонения заряженных частиц с помощью изогнутых кристаллов [*4]. Эта идея была подтверждена в первых экспериментах, проведенных в Дубне в 1979 году совместной группой ученых из ОИЯИ и Лаборатории им. Ферми США.

С этого момента произошел стремительный рост публикаций и новых результатов, как в ИФВЭ, так и в мире. На всех крупнейших ускорителях мира до сих пор проводятся эксперименты по каналированию в изогнутых кристаллах. К серьезным достижениям можно отнести использование коротких кристаллов для

эффективного вывода пучка из ускорителя У-70 [*5, *6]. Этот успех стимулировал исследования коллимации пучка с помощью коротких кристаллов на коллайдерах RHIC, Tevatron, SPS и наконец, LHC. Для реализации коллимации на LHC был проведен большой объем предварительных исследований взаимодействия пучка с короткими изогнутыми кристаллами в рамках международной программы UA9. Результаты этих пятнадцатилетних исследований кратко описаны в обзорной статье [*7].

Новый интерес к применению кристаллов для этих целей появился в связи с открытием и исследованием эффекта объемного отражения. Использование объемного отражения имеет принципиальное преимущество перед каналированием, так как значительно расширяется область эффективной работы по угловому положению кристаллической мишени, уменьшается ее разогрев и оно менее чувствительно к знаку заряда частицы. Детальное изучение объемного отражения в изогнутых кристаллах привело к теоретическому предсказанию нового вида излучения, которое было подтверждено в нескольких экспериментах с позитронными и электронными пучками различной энергии. Исследование перспектив физики за пределами коллайдеров в CERN было начато в сентябре 2016 года. В 2017 году в CERN была создана рабочая группа по физике с фиксированными мишенями, которая изучает возможность повторного использования существующих детекторов, установленных на коллайдере, без существенного нарушения рабочих условий (с точки зрения яркости, фона, времени пучка и т. д.) для текущих экспериментов (ATLAS, CMS, ALICE, LHCb).

Разработанные нами фокусирующие элементы новой оптики основаны на двух типах изогнутых кристаллов и предназначены для выполнения различных задач в физике высоких энергии и ускорителей. В кристаллическом устройстве первого типа применяется идея фокусировки на скошенном торце (линейный срез), что также позволяет одновременно отклонять пучок положительно заряженных частиц. Второй тип кристаллического устройства обеспечивает фокусировку без поворота, но с очень небольшим фокусным расстоянием. 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. Формирование выведенных пучков используется во всех современных ускорительных комплексах с фиксированными мишенями для получения необходимых пространственных и временных распределений, а также

для повышения качества выведенных пучков (уменьшение поперечных эмиттансов и энергетического разброса). Перспективными задачами физики высоких энергий являются измерения магнитных моментов короткоживущих частиц на LHC и FCC с использованием прецессии спина в изогнутом кристалле, а также уменьшение размера пучка на линейном электронном коллайдере CLIC. Для решения этих задач необходимо фокусировать пучки частиц на короткое расстояние порядка 1 см, что может быть реализовано фокусирующими устройствами второго типа. Интенсивный медленный вывод протонного пучка с помощью септум-магнита увеличивает потери на один извлеченный протон и, соответственно, увеличивает радиационные нагрузки на перегородку септума, что может привести к выходу из строя септум-магнита. В CERN методы решения этой актуальной задачи рассматриваются в Рабочей группе по потерям и активации SPS (SLAWG). 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 [11]. Кроме того, мультикристаллические структуры имеют перспективу использования на ускорителях для коллимации пучка и в качестве источника высокоэнергетических фотонов.

Цели диссертационной работы

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

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 10 см.

Впервые на вторичном пучке электронов с энергией 7 ГэВ на канале 4а У-70 проведено детальное исследование потерь энергии электронов на излучение высокоэнергетических фотонов в мультикристаллической структуре в режиме отражения.

Продемонстрирована возможность использования объемного отражения протонного пучка взаимодействующего с мультикристаллической структурой для защиты септум-магнитов в ускорителях.

Достоверность результатов диссертационной работы

Представленные результаты диссертационной работы были основаны на анализе экспериментальных данных, которые получены с применением различных методик на экспериментальных установках в Протвино и CERN. Результаты экспериментов находятся в согласии с приведенными расчетами и подтверждены независимыми авторами. Все это свидетельствует об их достоверности.

Практическая значимость результатов диссертационной работы

Результаты анализа экспериментальных данных по новой оптике пучков позволили получить детальную информацию о качестве фокусировки. Было показано, что принцип линзы выполняется с высокой точностью (наблюдается линейная зависимость угла отклонения частицы от ее поперечной координаты в линзе). 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 низкой эффективности каналирования для таких частиц.

Научные положения, выносимые на защиту

- 1) Результаты исследования новой фокусирующей оптики пучков на основе двух типов кристаллических устройств.
- 2) 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.
- 3) Результаты испытания на выведенном пучке многополоскового устройства, разработанного в ИФВЭ для коллимации пучка в больших адронных коллайдерах.
- 4) Модель расчета потерь энергии релятивистских электронов и позитронов на излучение в изогнутом монокристалле и мульткристалле.
- 5) Результаты исследования генерации излучения высокоэнергетических фотонов, возникающего при прохождении пучка электронов с энергией 7 ГэВ через мульткристаллическую структуру в режиме объемного отражения.

Апробация диссертационной работы и публикации

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

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

6. 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, индексируемых в базах WoS, СКОПУС и РИНЦ, в том числе 6 работ в Письма в ЖЭТФ, 2 работы в Phys Rev Accel Beams и 3 работы в Nucl Instrum Methods B.

Личное участие автора

При активном 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 программы 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.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 139 страниц текста с 68 рисунками и 2 таблицами. Список литературы содержит 114 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследования по теме диссертации, формулируются цели, научная новизна и практическая значимость работы, описывается личный вклад автора, приводится список публикаций и докладов на конференциях, где были представлены основные результаты выполненных исследований, а также кратко излагается содержание основных разделов диссертации.

В первой главе рассмотрена фокусировка пучка заряженных частиц фокусирующими кристаллическими элементами первого и второго типа.

В первой части главы описаны эксперименты в Протвино на пучке протонов 50 ГэВ ускорителя У-70 и в CERN на пучке протонов 400 ГэВ ускорителя SPS по фокусировке из параллельного пучка в линейный фокус для кристаллов первого типа (со скошенным торцом). Для исследования фокусировки была изготовлена серия кристаллов данного типа. Новое кристаллическое устройство и схема фокусировки параллельного пучка в линейный фокус с помощью монокристалла показаны на рисунке 1.

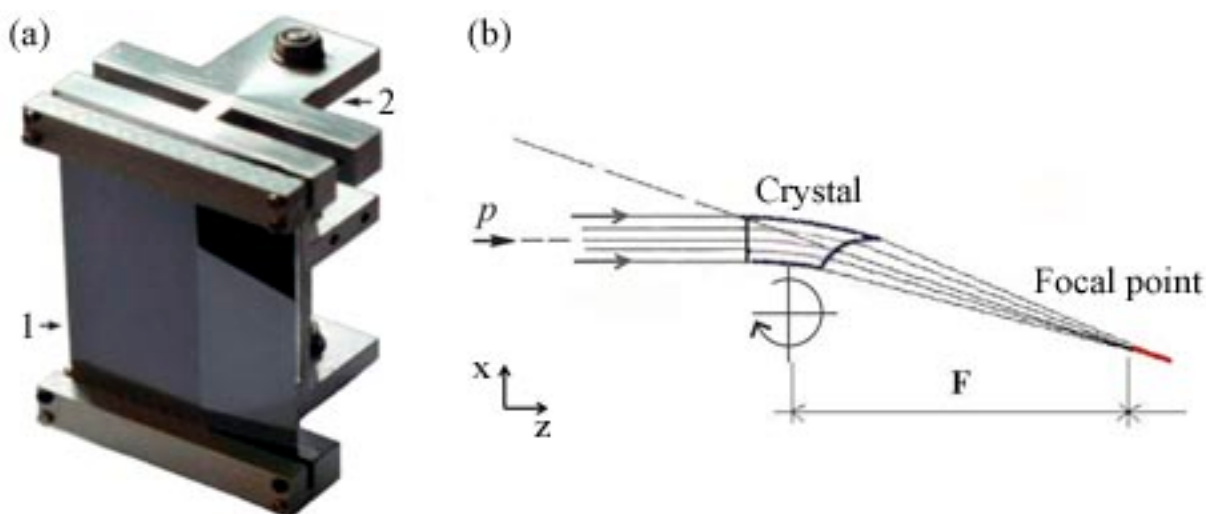


Рисунок 1 - Новое кристаллическое устройство первого типа (a) и схема фокусировки пучка с помощью такого монокристалла (b). Кристаллическое устройство состоит из изогнутой кремневой кристаллической пластины трапециевидальной формы (1), вырезанной вдоль кристаллографической плоскости (111) и металлического держателя (2) для изгиба пластины. Для линейного среза частицы, принятые в режиме каналирования, имеют разные углы поворота (при разных поперечных координатах) и фокусируются на некотором расстоянии от кристалла (b)

Эксперимент в Протвино проводился на канале 4а ускорителя У-70 в зоне установки Кристалл. Пучок размером $\sigma_x \cong 2$ мм с малой угловой расходимостью $\sigma_\alpha \cong 0.1$ мрад наводился на кристалл, расположенный в гониометре. Максимальные размеры пластины кристалла были равны $X \times Y \times Z = 2 \times 70 \times 40$ мм³ [1]. Выравнивание кристалла осуществлялось с помощью отражения лазерного луча от граней кристалла до меток, связанных с протонным пучком. Схема установки приведена на рисунке 2.

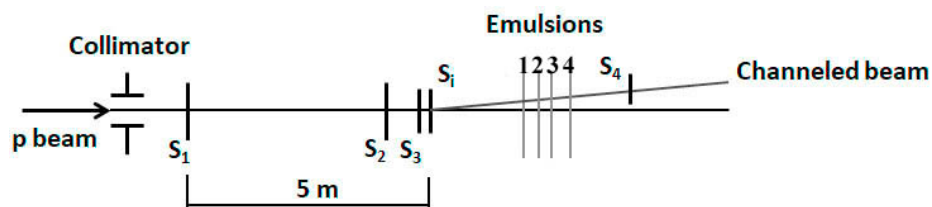


Рисунок 2 – Схема установки Кристалл. S_1, S_2, S_3, S_4 – сцинтилляционные счетчики, S_i – кристалл в гониометре, 1, 2, 3, 4 – эмульсионные пленки типа R-100

Интенсивность прямого пучка протонов измерялась сцинтилляционными счетчиками S_1 & S_2 в режиме совпадений, а отклоненного кристаллом пучка счетчиками S_3 & S_4 . Счетчик S_3 был смонтирован около торца кристалла и мог перемещаться вместе с ним в гониометре благодаря оптоволоконному соединению с ФЭУ. Счетчик S_4 находился вне зоны основного пучка. Четыре слоя эмульсии располагались на различном расстоянии от кристалла. Рисунок 3 иллюстрирует эффект фокусировки пучка от кристалла.

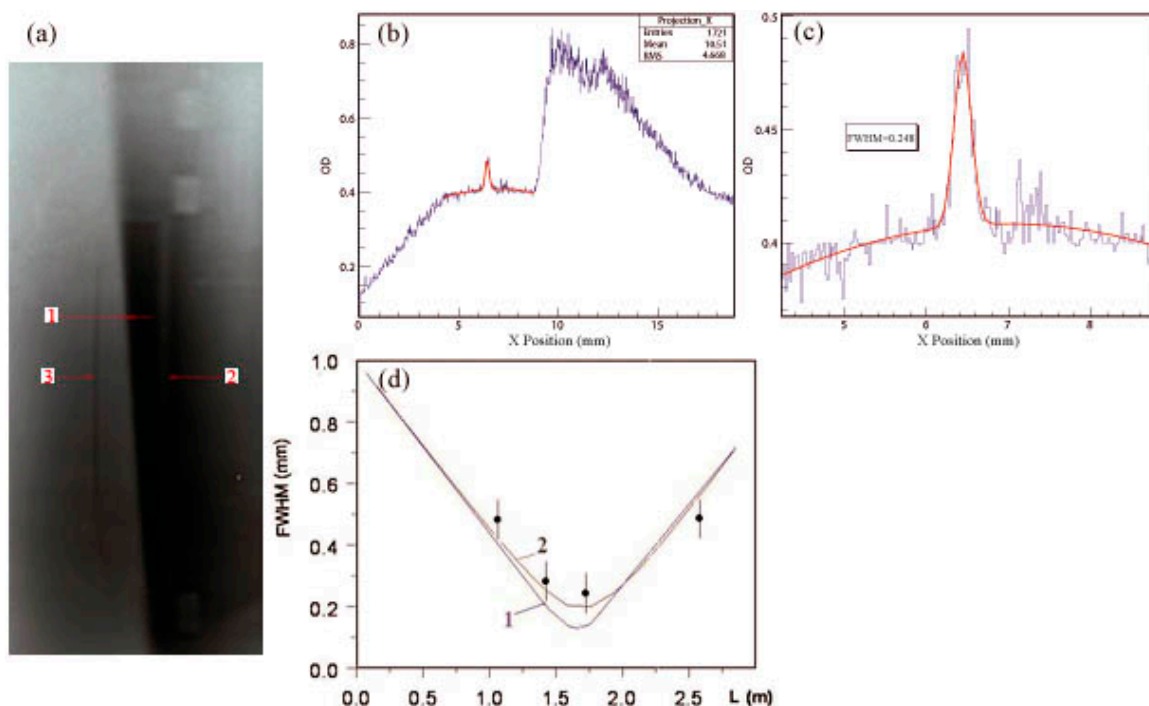


Рисунок 3 – Эффект фокусировки пучка от кристалла. Изображение пучка на эмульсии 3 вблизи фокуса на расстоянии $l_F = 1,7$ м от кристалла (а), 1 – граница коллиматора, 2 - отражение кристалла, 3 - сфокусированный пучок. Горизонтальный профиль всего пучка (b), где граница коллиматора в центре, тень от кристалла справа и сфокусированный пучок слева; профиль сфокусированного пучка (c) в фокусе, $\sigma_x \cong 0.1$ мм. Огибающая пучка (d) (размер пучка в зависимости от расстояния, отсчитываемого от кристалла). Точки – эксперимент. Кривая 1 – расчет для транспортировки частиц в вакууме. Кривая 2 - расчет для реальных условий с учетом рассеяния на воздухе и эмульсиях

Детальное исследование такого фокусирующего устройства с максимальными размерами кристалла $X \times Y \times Z = 2 \times 70 \times 50 \text{ мм}^3$ (см. рисунок 1) было проведено в CERN в канале транспортировки заряженных частиц Н8 ускорителя SPS. Схема экспериментальной установки UA9 Н8 представлена на рисунке 4. Пять пар кремниевых микростриповых детекторов использовались для измерения входящих и исходящих углов частиц с угловым разрешением в каждом плече около 3 мкрад. Каждая пара микростриповых детекторов измеряет две координаты X и Y с шагом считывания 60 мкм в обоих направлениях, с активной площадью $3.8 \times 3.8 \text{ см}^2$. В четвертой паре плоскости U и V повернуты относительно плоскостей X и Y на 45° градусов для разрешения неопределенности в нескольких исходящих треках в процессе реконструкции. Реконструкция треков подробно описана в работе [*8].

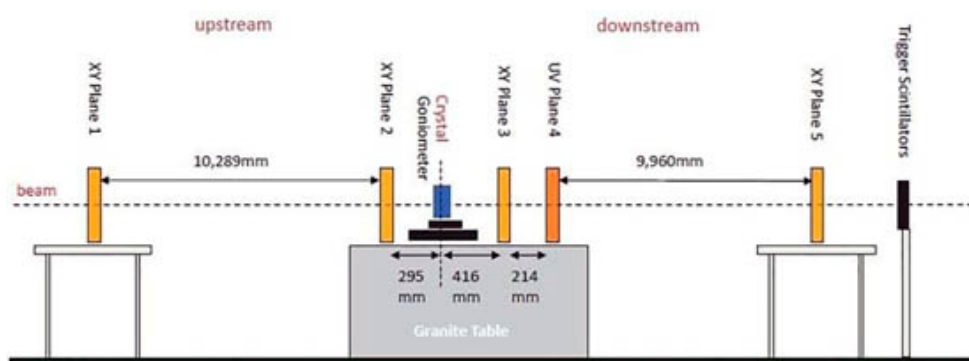


Рисунок 4 - Схематический вид экспериментальной установки UA9 Н8. XY Plane 1 - XY Plane 5 - пять пар микростриповых кремневых детекторов. Изогнутый кристалл установлен на гониометре между микростриповыми детекторами 2 и 3

Для каждого события требуется одно двумерное попадание в каждой плоскости, и к каждой проекции применяются две подгонки по прямой линии с тремя параметрами θ_{in} , θ_{out} , d_0 (представляющими падающий и исходящий углы и параметр поперечного прицеливания по цели), с направлением вдоль пучка. Множественные корреляции ошибок рассеяния включаются в матрицу ковариации подгонки, и к подобранным трекам применяется χ^2 - катинг. Полный трек восстанавливается, когда пара совпадающих треков попадает в ту же самую позицию на кристалле.

Детекторы снабжены системой, основанной на электронной цепочке считывания, разработанной для CMS Tracker, и упрощенной версией программного обеспечения для сбора данных, чтобы обеспечить работу практически без потерь времени при частотах запуска до 9 кГц. События

инициируются совпадением сигналов от пары пластических сцинтилляторов, расположенных после мультистриповых детекторов. Геометрические параметры падающего пучка измерялись с помощью телескопа-детектора. Ширина пучка вдоль горизонтальной и вертикальной осей составляла несколько миллиметров. Угловая расходимость падающего пучка в горизонтальной и в вертикальной плоскостях для протонного пучка составляла около 10 мкрад. На рисунке 5 приведены распределение горизонтального угла отклонения θ_x от поперечной горизонтальной координаты x и результаты реконструкции огибающей протонного пучка 400 ГэВ/с в зависимости от расстояния за кристаллом.

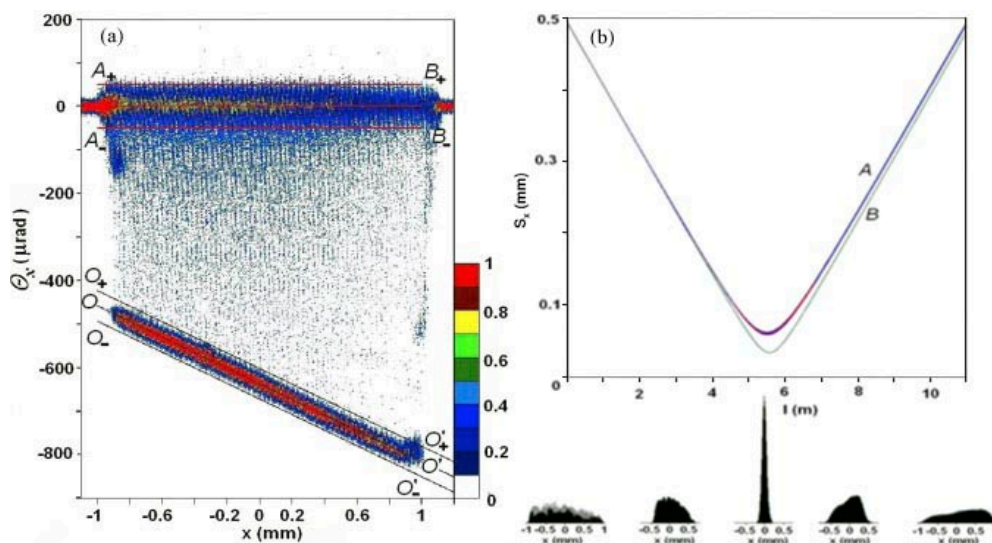


Рисунок 5 - Распределение горизонтального угла отклонения θ_x от поперечной горизонтальной координаты x (a) и результаты реконструкции огибающей протонного пучка 400 ГэВ/с в зависимости от расстояния за кристаллом (b)

На рисунке 5а наблюдается четкая линейная зависимость угла отклонения выходящих частиц от координаты. Линия OO' можно аппроксимировать линейной функцией: $\theta(x) = p_1x + p_0$, где значения коэффициентов $p_1 = -178,8 \pm 0,06$ мкрад, $p_0 = -636,5 \pm 0,03$ мкрад. Частицы, которые были захвачены в режим каналирования у входа в дефлектор и проходят через кристалл к выходу, лежат между двумя кривыми $O_+O'_+ = \theta(x) + \theta_0$ и $O_-O'_- = \theta(x) - \theta_0$. θ_0 можно оценить как $\theta_0 = 3\theta_c$. Для энергии падающего протона $E_0 = 400$ ГэВ, $\theta_c \approx 10,6$ мкрад [2]. Область между линиями A_+B_+ и A_-B_- соответствует неканализованным частицам, которые проходят через кристалл после рассеяния. Из-за разности траекторий неканализованных частиц плотность частиц уменьшается слева направо вдоль линий $A_+ B_+$ за счет многократного кулоновского рассеяния.

На рисунке 5b две линии, обозначенные *A*, синяя (экспериментальная огибающая) и красная (теоретическая огибающая) практически совпадают, наибольшее различие вблизи фокальной точки около 0,0025 мм. Линия *B* является предсказанием для случая, когда пучок распространяется в вакууме за кристаллом. В нижней части рисунка размещены профили пучка (слева направо) для $l = 0; L_f/2; L_f; 3L_f/2; 2L_f$ соответственно, где L_f – расстояние до фокальной точки в метрах. Среднеквадратичный размер исходного профиля пучка ($l = 0$) равен 0,492 мм, а в фокальной точке равен 0,0602 мм.

Таким образом, фокусирующие кристаллические устройства первого типа имеют хорошую линейность угла отклонения в зависимости от поперечной координаты, а коэффициент сжатия пучка по сравнению с размером пучка на входе составляет примерно 8,2.

Во второй части главы рассмотрена фокусировка пучка на короткое расстояние изогнутым кристаллом второго типа, в котором боковые грани повернуты относительно кристаллографических плоскостей на небольшой угол. Этот угол *Miscut* $\Lambda = \frac{D}{L}$, где D – толщина пластины, L – длина пластины вдоль направления пучка, так что кристаллографические плоскости совпадают с направлением диагонали пластины (см. рисунок 6). Измерения были проведены в Протвино на пучке протонов 50 ГэВ ускорителя У-70 и в CERN на пучке положительных пионов 180 ГэВ ускорителя SPS.

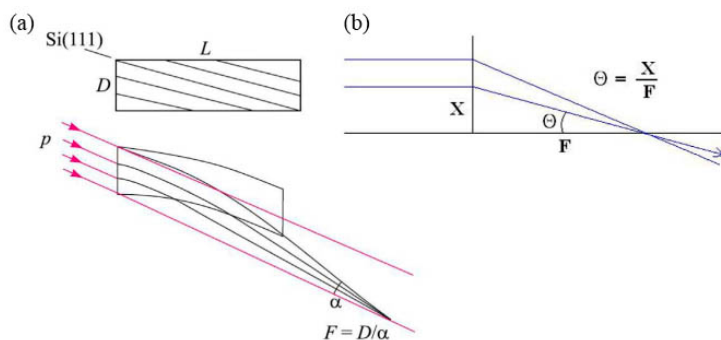


Рисунок 6 - Схема фокусировки пучка пластиной кремния, в которой кристаллографические плоскости совпадают с направлением диагонали в прямоугольном сечении (a) и принцип работы линзы в пучке (b)

Первое испытание кристаллического устройства второго типа было проведено в Протвино на канале 4а ускорителя У-70 ускорителя У-70 [3]. Для фокусировки пучка использовалась кремневая пластина толщиной 500 мкм и длиной 10 мм. Пластину разрезали так, чтобы ее боковые поверхности были повернуты на угол 3° градуса относительно кристаллографических плоскостей

(111). Пластина была равномерно изогнута на угол 3 мрад. Схема экспериментальной установки такая же, как показано на рисунке 2. Расходимость пучка составляла $\sigma_x \sim 0.1$ мрад. С помощью коллиматоров формировался профиль пучка с резкими границами размером $S_x \times S_y = 20 \times 20$ мм². Режим каналирования находился с помощью телескопа сцинтилляционных счетчиков. Эффект фокусировки был зарегистрирован с помощью полимерной радиохромной дозиметрической пленки GAFCHROMIC EBT3, которую сканировали на планшетном сканере EPSON EXPRESSION 10000 XL в пропускающем режиме, без цветокоррекции, с разрешением 2400 точек на дюйм. Абсолютную калибровку пленки проводили однократно с использованием сцинтилляционных счетчиков в режиме накопления статистики за несколько сотен циклов ускорителя. На рисунке 7 показаны результаты проведенных испытаний. Измеренный размер пучка в фокусе (расстояние от кристалла 17 см) равен 30 мкм на полувысоте. При идеальных условиях размер пучка в фокусе определяется величиной $F \times \theta_L \sim 10$ мкм. Измерить точно такую малую величину данным методом трудно, поскольку разрешение сканера находится на уровне 10 мкм. Поэтому наш измеренный профиль дает завышенную оценку реального размера сфокусированного пучка.

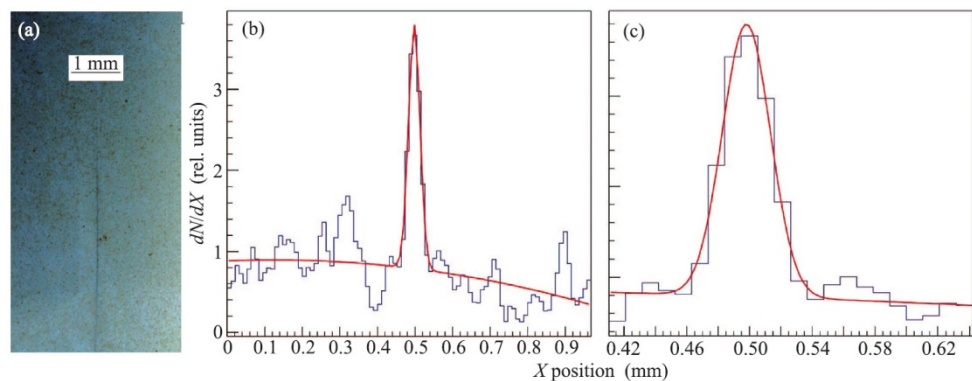


Рисунок 7 - Профиль сфокусированного пучка на ebt3 пленке. Увеличенное изображение на пленке в области фокусировки пучка (a), отсканированный профиль пучка с учетом калибровки пленки (b), то же что и в (b) только X в диапазоне от 0,41 мм до 0,64 мм

Подобное фокусирующее кристаллическое устройство было испытано в CERN на экспериментальной установке UA9, расположенной на внешней линии пучка H8, на ускорителе SPS. Для этого использовали такую же кремневую пластину, что и в испытаниях в Протвино. Пластины равномерно изогнули на угол 3.5 мрад. Схема экспериментальной установки такая же, как показано на рисунке

4. Угловая расходимость, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, падающего пучка составляла около 30 мкрад (RMS) [4]. Гониометр высокой точности допускал ориентацию фокусирующего кристалла в обеих ортогональных плоскостях с точностью до 2 мкрад. На рисунке 8 показаны распределение интенсивности пучка за кристаллом в зависимости от углов отклонения частиц θ_x и результаты реконструкции огибающей пучка положительных пионов с импульсом 180 ГэВ/с в зависимости от расстояния за кристаллом.

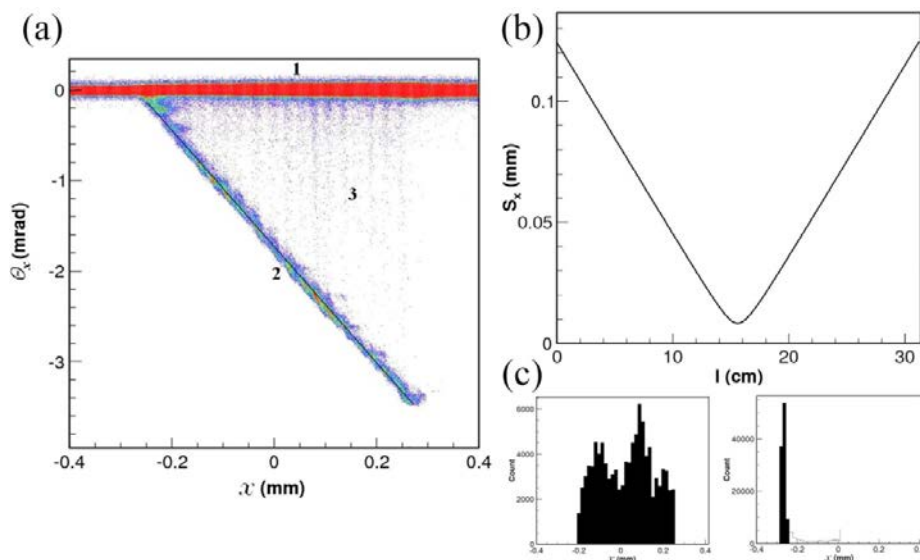


Рисунок 8 - Распределение интенсивности пучка за кристаллом в зависимости от углов отклонения частиц θ_x (a), восстановленная огибающей пучка положительных пионов с импульсом 180 ГэВ/с в зависимости от расстояния за кристаллом (b) и профили пучка вблизи кристалла ($l = 0$ см) и в фокальной точке ($L_f = 15,5$ см) (c). Область 1 соответствует неканализованным частицам, область 2 - каналированным частицам (около 10% от интенсивности падающего пучка), область 3 - деканализованным частицам (18% по сравнению с полностью отклоненными частицами). Черная прямая линия - центр распределения каналированных частиц, прошедших вдоль полной длины кристалла (a). Среднеквадратичное значение (RMS) размера пучка в фокусе составляет около 8 мкм и около 125 мкм вблизи кристалла (c)

Таким образом, для данного кристалла с коротким фокусным расстоянием порядка 15 см соблюдается принцип линзы, то есть имеется линейная зависимость угла отклонения частицы от ее поперечной координаты в линзе (см. рисунок 8a), а коэффициент сжатия пучка составляет примерно 15.

В конце первой главы рассмотрена фокусировка из точечного источника в параллельный пучок (обратная фокусировка) для кристаллических устройств первого типа. Измерения проведены в Протвино на пучке протонов 50 ГэВ и в

CERN на пучке положительных пионов 180 ГэВ. На рисунке 9 приведены кристаллическое устройство первого типа и схема его установки в эксперименте Кристалл. Пучок протонов умеренной интенсивности порядка 10^5 частиц/с выводился из ускорителя У-70 кристаллическим дефлектором. С помощью коллиматоров формировался профиль пучка с резкими границами $S_x \times S_y = 8 \times 10 \text{ мм}^2$ и расходимостью $\sigma_x = 0,2$ мрад. Для создания точечного источника расходящегося пучка протонов была установлена активная мишень в виде тонкой пластины (толщиной 150 мкм) из тяжелого сцинтиллятора *CsI*.

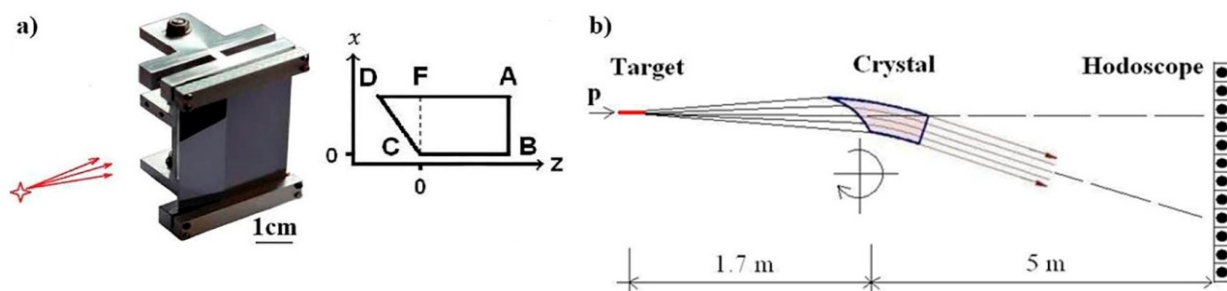


Рисунок 9 – Кристаллическое устройство первого типа (а) и схема эксперимента по обратной фокусировке на протонном пучке 50 ГэВ

На мишень попадала лишь малая доля пучка интенсивностью 2×10^3 частиц/с. Пучок протонов был распушен до необходимой величины угловой расходимости $\sigma_x = 0,36$ мрад (или $FWHM = 0,92$ мрад). Эффект фокусировки и последующего отклонения расходящегося пучка фиксировался сцинтилляционным годоскопом (с шагом 1,2 мм), включенным на совпадения со сцинтиллятором тонкой мишени [5]. Результаты испытаний представлены на рисунке 10а. Красные точки и красная линия показывают профиль пучка, прошедшего через ориентированный кристалл, синие точки и синяя линия – профиль пучка для разориентированного кристалла. На рисунке 10b точками и красной линией показана зависимость количества отклоненных на полный угол частиц от угла поворота кристалла в гониометре. Около 35 ± 5 % частиц, падающих на фокусирующую кромку кристалла, захватывались в режим каналирования (эта зона показана на рисунке 10а маркером 1), и около 14 ± 3 % частиц отклонялись затем на полный угол 1,8 мрад, соответствующий изгибу кристалла (эта зона показана на рисунке 10а маркером 2). Ширина ориентационной кривой $FWHM = 105$ мкрад. Эта узкая величина углового интервала, когда виден отклоненный пучок, соответствует геометрическим параметрам измерений, когда вращающийся кристалл «смотрит» на мишень.

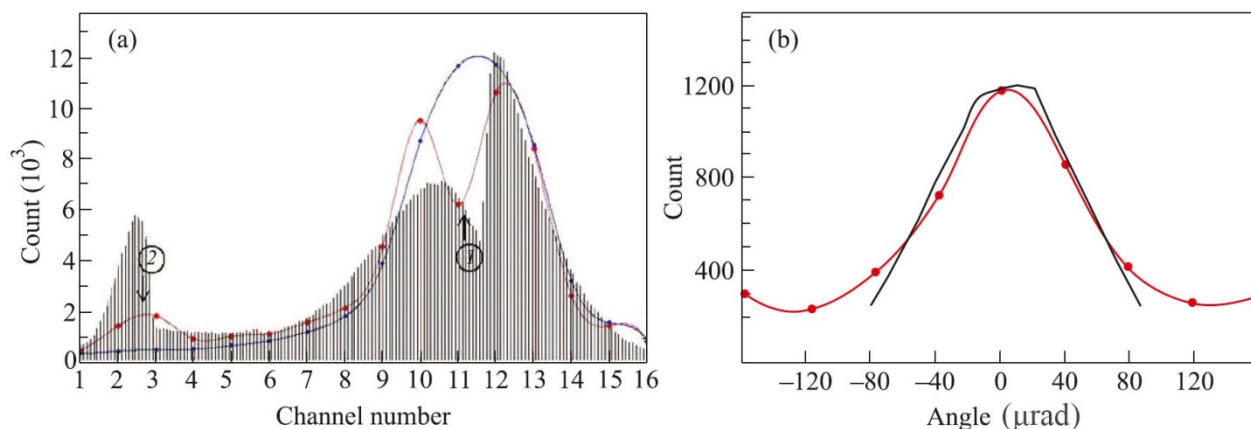


Рисунок 10 - Профили пучка для ориентированного и разориентированного кристалла (a), точки и линии – эксперимент, гистограмма – расчет для ориентированного кристалла. Ориентационная зависимость количества отклоненных кристаллом частиц (b) (величина пика, помеченная маркером 2 на рисунке 10a), точки и красная линия – эксперимент, черная линия – расчет

Более детальное исследование подобного фокусирующего кристаллического устройства было выполнено в CERN на экспериментальной установке UA9 расположенной в канале транспортировки заряженных частиц H8 ускорителя SPS [6]. Экспериментальная установка была такая же, как показано на рисунке 4. Установка UA9 позволяет отслеживать треки частиц, вылетающие из точечного источника, выбирая нужные события с помощью каттинга (см. рисунок 11c). Для увеличения расходимости пучка была установлена тонкая свинцовая мишень (длиной около 2 мм) вблизи первой трековой станции. Кристалл со скошенным торцом на входе имел фокусное расстояние 12,5 м. Размеры кристалла: $AD = 50$ мм, $BC = 30$ мм, $AB = 2$ мм (см. рисунок 9a), радиус изгиба R в горизонтальной плоскости составляет 160 м, а средний угол изгиба составляет 0,25 мрад. На рисунке 11 показана зависимость горизонтального угла отклонения частиц θ_x от поперечной координаты x , восстановленная огибающая пучка падающего на кристалл и схематическое изображение отбора событий с помощью каттинга. Среднеквадратичный размер пучка в фокальной точке l_f равен $s_x = 0,2$ мм, что соответствует естественному пределу на размер мишени: $\sigma_x = \theta_L \times F = 0,015 \times 12,5 = 0,19$ мм [*9]. 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. Для определения эффективности отклонения расходящегося пучка ($\sigma_{beam} = 50$ мкрад $\sim 4\theta_L$) кристаллом был наложен каттинг на координату x ($-0,2$ мм $< x < 0,2$ мм) в плоскости фокуса и отслежены все треки, выходящие из этой полоски в переднем

направлении (см. рисунок 11с). Доля отклоненных кристаллом частиц на полный угол (эффективность), составила примерно 22%.

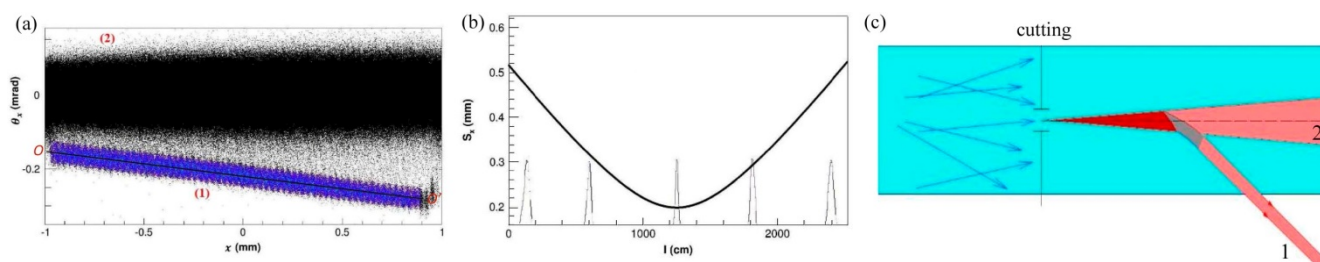


Рисунок 11 - Распределение горизонтального угла отклонения частиц θ_x от поперечной координаты x в позиции каналирования (а), восстановленная огибающая пучка пионов 180 ГэВ/с падающего на кристалл (b) и схематическое изображение отбора событий с помощью каттинга (с). Область синих точек (1) соответствует полностью отклоненным каналированными частицам, область черных точек (2) состоит из неканалированных и деканалированных частиц. Линия OO' соответствует центру распределения каналированных частиц, которые проходят вдоль полной длины кристалла (а). В нижней части рисунка (b) размещены профили пучка для $l = 145$, $l = 600$, $l_f = 1245$, $l = 1820$, $l = 2400$

Показано, что наблюдается строгая линейная зависимость угла отклонения выходящей частицы от ее поперечной координаты, что свидетельствует о качестве изготовления фокусирующего устройства. Также было отмечено, что скошенный торец на входе пучка в кристалл не вносит существенных дополнительных потерь в эффективность отклонения пучка кристаллом, а измеренная эффективность отклонения пучка составила примерно 22%.

Во **второй главе** рассмотрено объемное отражение релятивистских частиц в мульткристаллических структурах. Вначале описан процесс объемного отражения, приведены уравнения движения для плоскостного случая, среднего угла отражения и его среднеквадратичного отклонения. Показано, что расхождение расчетных и экспериментальных величин средних углов отражения для различных изогнутых монокристаллов кремния составляет менее 5%. Далее описаны измерения в CERN на ускорителе SPS по отклонению протонного пучка с импульсом 400 ГэВ/с и пучка отрицательных пионов с импульсом 150 ГэВ/с с использованием восьмиполосного кремневого дефлектора в режиме отражения. Конструкция восьмиполосного кристаллического устройства приведена на рисунке 12d. Отдельные кристаллические полоски имеют ширину 2 мм вдоль пучка, 40 мм в длину и 0,9 мм в толщину поперек пучка. Экспериментальная установка была такая же, как показано на рисунке 4. Двухмерные цветные гистограммы на рисунке 12а и 12с показывают распределение интенсивности

пучков 400 ГэВ/с протонов и 150 ГэВ/с отрицательных пионов соответственно, прошедших через кристалл в зависимости от углов отклонения частиц θ_x и углового положения гониометра ϕ_x . На рисунке 12b для данного кристаллического дефлектора представлен расчет методом Монте-Карло для 400 ГэВ/с протонов программой СКРЕПЕР [*10]. Максимальные отклонения частиц, видимые при $\theta_x > 0$ вблизи центральной области сканирования, происходят из-за каналирования. Два отдельных максимума интенсивности пучка, отмеченные символом (*), объясняются несоосностью кристаллов в последовательности. В угловой области $\theta_x < 0$, отклонения происходят из-за многократного объемного отражения частиц (MVR), пересекающих полную последовательность полосок. Средний угол отражения многополосного кристаллического устройства можно представить как $\langle \theta_{vrr} \rangle = \langle \alpha_{vrr} \rangle * n$, где $\langle \alpha_{vrr} \rangle$ – средний угол отражения для одного кристалла, n – число кристаллов в кристаллическом устройстве и $n \leq 10$. Дальнейшее увеличение количества кристаллов приводит к потере эффективности процесса из-за возрастания количества ядерных взаимодействий.

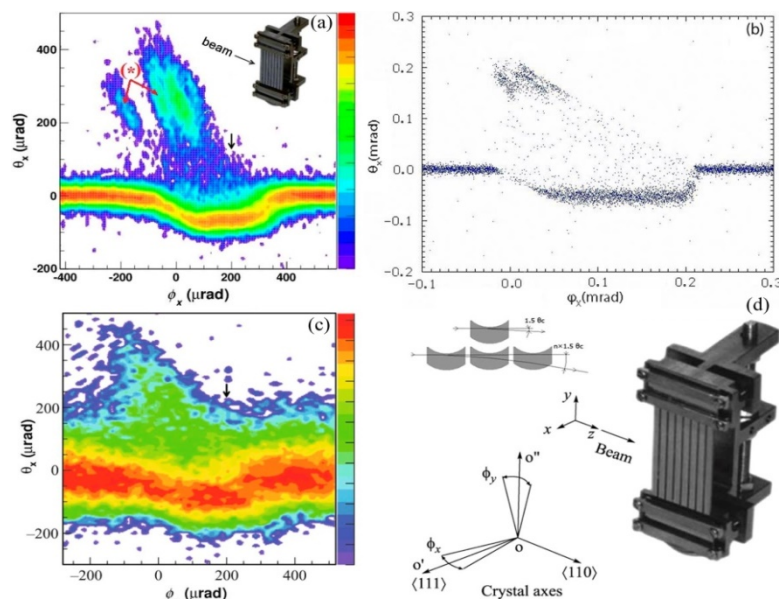


Рисунок 12 – Отклонение пучка кристаллическим дефлектором. Здесь ϕ_x – угол вращения кристалла относительно направления пучка, θ_x – угол отклонения налетающих частиц. Распределение интенсивности 400 ГэВ/с пучка протонов, прошедшего через кристаллический дефлектор (a) и расчет выполненный методом Монте-Карло с учетом разориентации отдельных полосок на величину 50 мкрад (b). Распределение интенсивности 150 ГэВ/с пучка отрицательных пионов, прошедших через кристаллический дефлектор в зависимости от углов отклонения пионов θ_x и углового положения гониометра ϕ_x (c), конструкция дефлектора, представляющая восьмиполосное кристаллическое устройство и схема его установки в гониометр (d)

На рисунке 13а и 13б приведены распределения протонов и отрицательных пионов в горизонтальных углах отклонения θ_x для фиксированного положения гониометра ($\varphi_x \sim 200$ мкрад), что соответствует плоскостному отражению. Эффективность одностороннего отклонения ($\theta_x < 0$) составила около 94% для положительных частиц и около 71% для отрицательных частиц. Эффективность отклонения, обусловленная MVR ($\theta_x < \theta_b$) для положительных частиц составила 92% (см. заштрихованную область рисунка 13а)

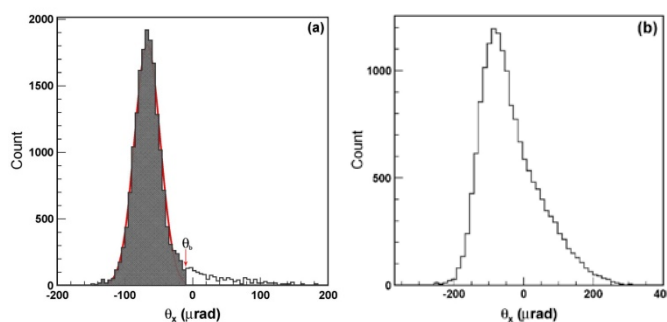


Рисунок 13 - Распределение горизонтального отклонения углов θ_x в условиях последовательных объемных отражений в восьмиполосном кристаллическом устройстве, отмеченных стрелками на рисунках 12а и 12с для протонов и отрицательных пионов соответственно. Значение угла $\theta_b = \langle \theta_{vr} \rangle + 3\sigma_{vr}$ определяет границу между объемно отраженной и неотраженной частью пучка

Значения среднего угла отражения $\langle \theta_{vr} \rangle$ и среднеквадратичного отклонения (RMS) для восьмиполосного кристаллического устройства в плоскостной ориентации составили: $\langle \theta_{vr} \rangle = 68$ мкрад, $RMS = 16,5$ мкрад для протонов 400 ГэВ/с и $\langle \theta_{vr} \rangle = 78$ мкрад, $RMS = 38,4$ мкрад для отрицательных пионов 150 ГэВ/с. Измеренные средние углы отражения составляют около 80% от расчетных значений, так как для рассматриваемой ориентации кристаллического устройства две полоски из восьми были разориентированы [7] (см. рисунок 12а).

На втором этапе исследования использовался метод увеличения угла отражения за счет осевых эффектов в кристаллах. В этом случае за счет вклада косых кристаллических плоскостей при ориентации кристалла вблизи кристаллографической оси возможно увеличения отклонения траектории частицы в $A_F \sim 3 - 5$ раза, где A_F – аксиальный фактор. Результаты сканирования относительно вертикального угла φ_y для пучков протонов 400 ГэВ/с и отрицательных пионов 150 ГэВ/с, а также расчет методом Монте-Карло программой СКРЕПЕР для 400 ГэВ/с протонов для данного кристаллического устройства представлены на рисунке 14. На рисунках 15а и 15б показаны распределения протонов и отрицательных пионов в горизонтальных углах

отклонения θ_x для случая, когда ориентация многополосного кристаллического устройства соответствует $\varphi_y = 0$. В этом случае ось пучка и кристаллографическая ось $\langle 110 \rangle$ находятся в одной плоскости (осевая ориентация).

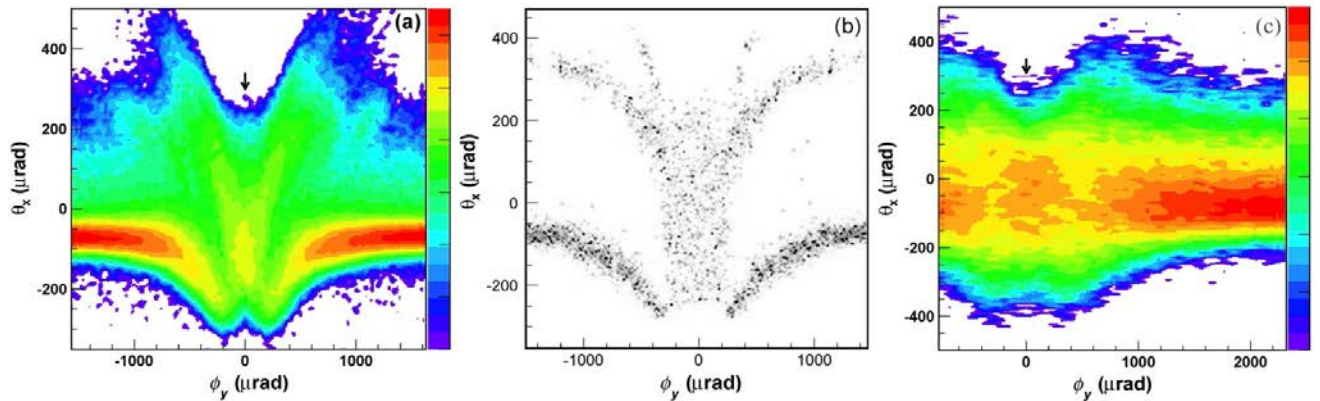


Рисунок 14 - Распределение интенсивности пучка, прошедшего через восьмиполосное кристаллическое устройство в зависимости от углов отклонения частиц θ_x для разных положений гониометра φ_y . Эксперимент для пучка протонов 400 ГэВ/с (a) и расчет методом Монте-Карло (b), эксперимент для пучка отрицательных пионов 150 ГэВ/с (c)

Значения среднего угла отражения $\langle \theta_{vr} \rangle$ и среднеквадратичного отклонения (RMS) для восьмиполосного кристаллического устройства в осевой ориентации составили: $\langle \theta_{vr} \rangle = 102$ мкрад, $RMS = 79$ мкрад для протонов 400 ГэВ/с и $\langle \theta_{vr} \rangle = 64$ мкрад, $RMS = 106$ мкрад для отрицательных пионов 150 ГэВ/с.

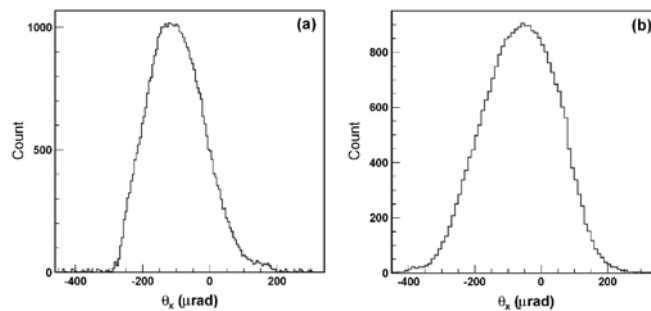


Рисунок 15 - Распределения частиц в горизонтальных углах отклонения θ_x для случая, когда ориентация восьмиполосного кристаллического устройства соответствует $\varphi_y = 0$ (показано стрелками на рисунках 14a и 14c) для протонов (a) и отрицательных пионов (b)

В результате было продемонстрировано, что многополосный дефлектор в осевой ориентации значительно увеличил угловую ширину пучка по сравнению с рассеянием в аморфном положении, а по сравнению с плоскостной ориентацией более чем в 4 раза для протонов и почти в 3 раза для отрицательных пионов. Эффективность одностороннего отклонения ($\theta_x < 0$) составила для протонов около 88% и для отрицательных пионов около 70%. Это очень важно для коллимации

пучка в ускорителях, особенно для отрицательных пучков, которые имеют низкую эффективность каналирования.

Далее представлено пятиполосное кристаллическое устройство другого типа, которое разработано для ТэВ-ных энергий и было испытано в CERN на пучке протонов с импульсом 400 ГэВ/с. Изгиб полосок пластины кристалла происходит за счет внутренних механических напряжений, вызванных канавками (эффект Тваймана), нанесенными с помощью фрезы треугольного профиля, а толстая плоская подложка обеспечивает высокую точность взаимной ориентации изогнутых полосок (см. рисунок 16b). Глубина треугольных канавок и расстояние между канавками определяют радиус изгиба кристалла и выбираются исходя из энергии протонного пучка. Изображение пятиполосного кристаллического устройства и схема его установки относительно пучка показано на рисунке 16а.

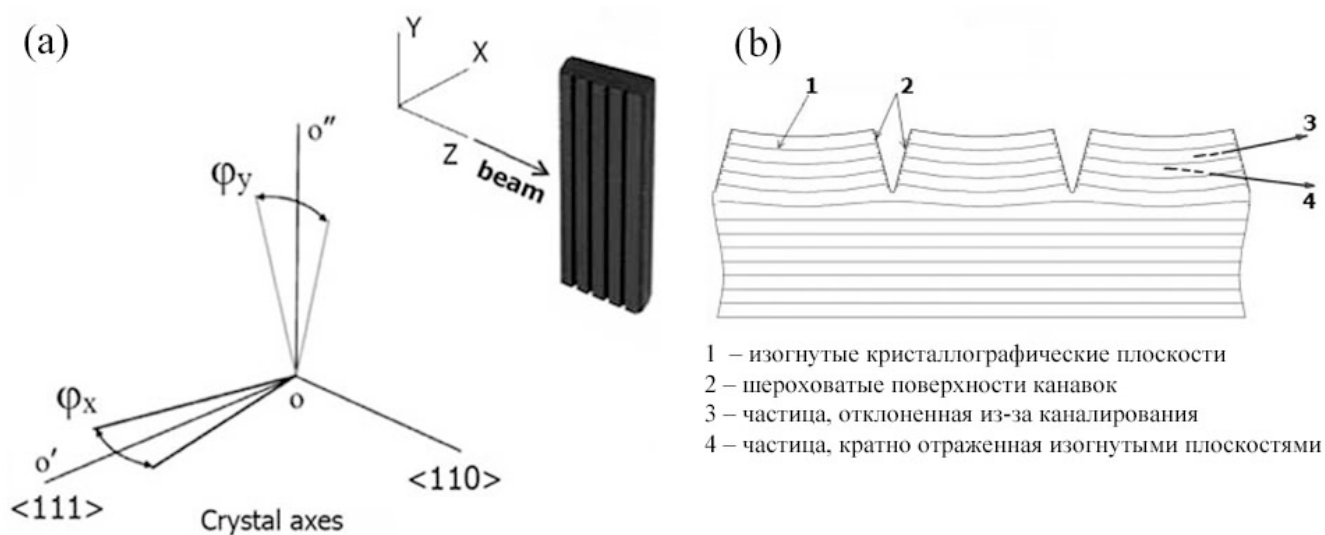


Рисунок 16 - Изображение пятиполосного кристаллического устройства и схема его установки относительно пучка (а), принципиальная схема многополосного кристаллического устройства, образованного периодическими канавками на поверхности толстой кристаллической пластинки (b)

Экспериментальная установка была такая же, как показано на рисунке 4. На первом этапе исследования проводилось сканирование горизонтальных углов ориентации кристаллического устройства φ_x (см. рисунок 16а) для нахождения плоскостной ориентации. Затем найденный угол φ_x фиксировали и проводили сканирование относительно вертикального угла φ_y (см. рисунок 16а) в области, близкой к кристаллографической оси [8]. На рисунке 17 представлены распределение интенсивности 400 ГэВ/с пучка протонов, прошедшего через кристаллическое устройство, в зависимости от углов отклонения частиц θ_x и углового положения гониометра φ_x , расчет методом Монте-Карло программой

СКРЕПЕР и распределение углов горизонтального отклонения в плоскостной и в аморфной ориентации кристаллического устройства. Эффективность одностороннего отклонения ($\theta_x < 0$) составила 90%. Эффективность отклонения, обусловленная MVR ($\theta_x < \theta_b$) составила 88% (см. заштрихованную область гистограммы 1). Максимальное положение MVR около 60 мкрад, что находится в соответствии с теоретическим предсказанием для этого пяти полосного дефлектора $\theta_{mvr} = 5\theta_{vr} = 5 \times 13 = 65$ мкрад [*11].

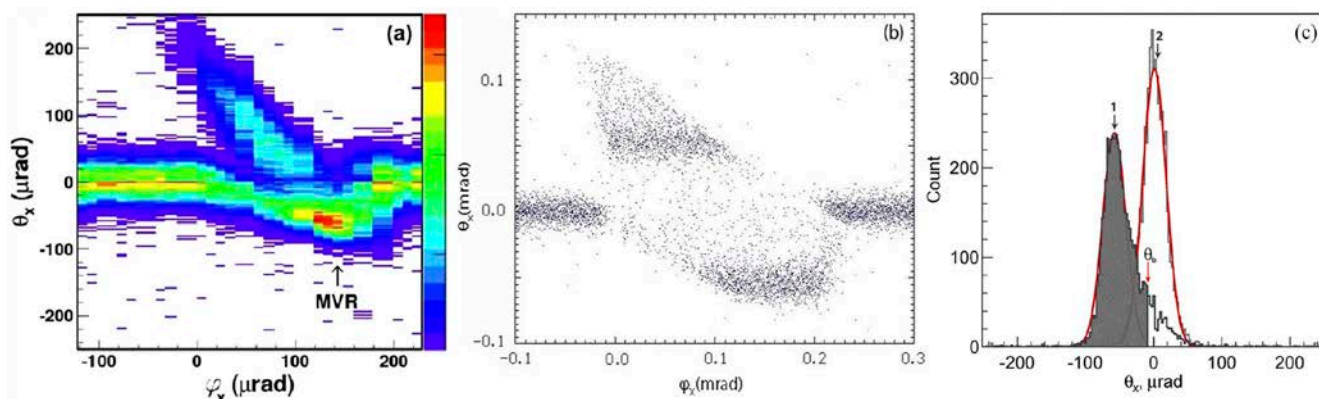


Рисунок 17 - Распределение интенсивности 400 ГэВ/с пучка протонов, прошедшего через кристаллическое устройство, в зависимости от углов отклонения частиц θ_x и углового положения гониометра φ_x . Стрелка показывает положение угла $\varphi_x \sim 140$ мкрад, для которого объемное отражение протонов реализуется во всех полосах (кратное отражение) (а). Расчет методом Монте-Карло (b). Распределение частиц в горизонтальных углах отклонения θ_x в кристаллическом устройстве. Гистограмма 1 для случая, показанного стрелкой на рисунке 17а. Значение угла $\theta_b = \langle \theta_{vr} \rangle + 3\sigma_{vr} = -7$ мкрад. Гистограмма 2 в случае многократного рассеяния частиц в кристаллическом дефлекторе, как в аморфной ориентации (с)

Результаты сканирования относительно вертикального угла φ_y , расчет методом Монте-Карло программой СКРЕПЕР для данного кристаллического устройства представлены на рисунке 18. Распределение углов отклонения протонов для разных положений гониометра показано на рисунке 19. Для ориентации кристаллического устройства, указанного стрелкой 1 (см. рисунок 18а), уширение пучка является максимальной. Среднеквадратичное значение (RMS) отклонения частиц составило 76 мкрад, что более чем в 4 раза больше, чем для аморфной ориентации. Для ориентации кристаллического дефлектора, указанного стрелкой 2, направление оси $\langle 110 \rangle$ совпадает с направлением пучка (осевая ориентация). Угловая ширина пучка (RMS отклонения частиц) в осевой ориентации кристаллического дефлектора составило 50 мкрад, что почти в 3 раза

больше, чем для случая кратного отражения в плоскостной ориентации, показанной на гистограмме 1 рисунка 17с.

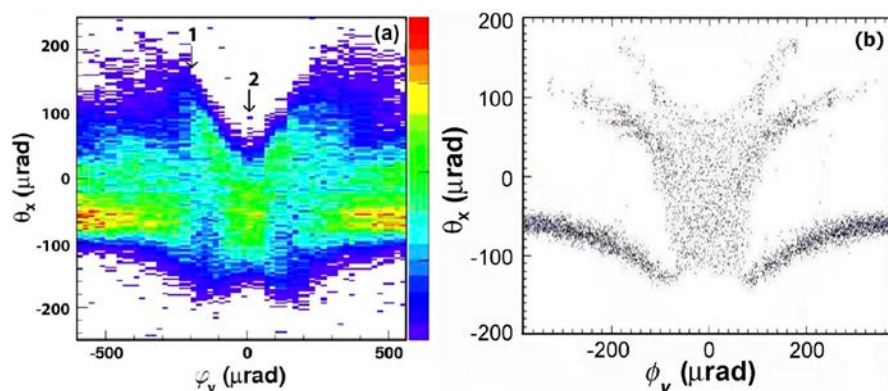


Рисунок 18 - Распределение интенсивности 400 ГэВ/с пучка протонов, прошедшего через пятиполосное кристаллическое устройство в зависимости от углов отклонения частиц θ_x для разных положений гониометра ϕ_y . Эксперимент (a), стрелки 1 и 2 находятся в положениях гониометра, для которых происходят различные механизмы отклонения частиц и расчет методом Монте-Карло (b)

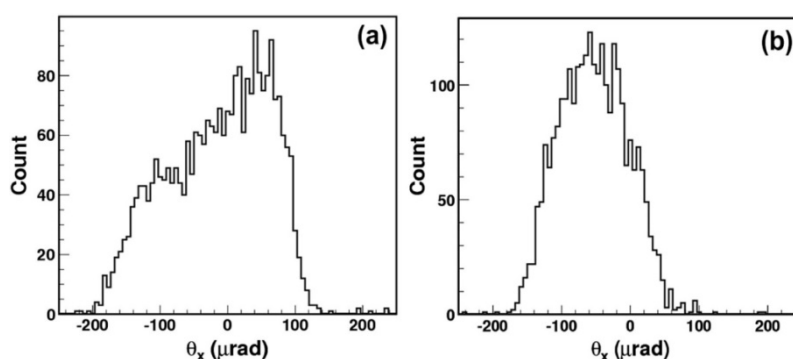


Рисунок 19 - Распределение частиц в горизонтальных углах отклонения θ_x для разных положений гониометра, указанных стрелками на рисунке 18а. Стрелка 1, когда кратное объемное отражение в кристаллическом устройстве реализовано в нескольких первых полосах и отклонение из-за каналирования в следующей полосе (a). Стрелка 2, когда кристаллографическая ось $\langle 110 \rangle$ выровнена с пучком (осевая ориентация) (b)

Показано, что имеется хорошее взаимное выравнивание отдельных изогнутых полос кристалла, а в осевой ориентации, благодаря кратным объемным отражениям в каждой полосе кристалла, угловая ширина пучка почти в 3 раза больше, чем в плоскостной ориентации. Такого типа многополосный дефлектор можно использовать в качестве первичного коллиматора в LHC и FCC [9], что подробно рассмотрено в конце этой главы.

В третьей главе показано применение мультикристаллических структур для генерации гамма-излучения и для защиты септум-магнитов. В первой части главы излагается теоретический аппарат необходимый для описания процесса

излучения фотонов при прохождении легких лептонов через кристалл. Рассмотрены основные особенности излучения релятивистских частиц, показано, что излучение можно описать, используя квазиклассический операторный метод, развитый В.Н. Байером и В.М. Катковым. Описано тормозное излучение в прямых кристаллах, для которого приведено уравнение полного сечения, учитывающее когерентный и некогерентный вклад тормозного излучения. Указано, что при энергиях несколько десятков и сотен ГэВ теория КТИ может нарушаться из-за увеличения угла при пересечении движущейся частицей плоскостей и осей кристалла. Подробно рассмотрено излучение сопровождающее процесс объемного отражения в изогнутых кристаллах. Показано, что поведение поперечной скорости вблизи критической точки при объемном отражении в монокристалле кремния меняется. Частица (позитрон или электрон) совершает аperiодическое колебательное движение в поперечной плоскости, причем амплитуда нарастает до критической точки и убывает после критической точки. Отмечено, что первые расчеты излучения при объемном отражении были сделаны с помощью формул Байера-Каткова, в которых вычислялось распределение потерь энергии позитрона или электрона на заранее выбранной толщине кристалла. Указаны причины создания более простой модели для расчетов энергетических спектров фотонов. Это связано с тем, что прямое интегрирование соотношений Байера-Каткова требует особого подхода для взятия многократных интегралов от быстро осциллирующих функций и требует большого компьютерного времени для выполнения расчетов. Представлена новая расчетная модель и ее математическая реализация, основанная на идее локальной справедливости КТИ, которая заключается в том, что образование (рождение) тормозного фотона происходит в основном на длине формирования и если эта длина мала, то угол электрона (позитрона) относительно кристаллографических осей на этой длине практически не меняется. Таким образом, теория КТИ справедлива на этом участке траектории.

Во второй части главы рассмотрены особенности излучения высокоэнергетичных фотонов 10 ГэВ электронами в области объемного отражения. Показано, что выбор электронного пучка был обусловлен тем, что 1) расчеты предсказывают более высокую эффективность генерации излучения и 2) электронный пучок позволяет однозначно интерпретировать полученные результаты, поскольку не дает при каналировании значительного излучения из-за быстрого деканалирования электронов. Отмечено, что особенностью

эксперимента является взаимодействие электронного пучка с достаточно протяженной мишенью по направлению пучка (15 мм), состоящей из 6 отдельных монокристаллов кремния. Ряд экспериментов в CERN были выполнены при толщинах кристалла от 1 мм и до нескольких мм и при энергии пучка значительно выше, чем в нашем эксперименте. Показано, что исходя из особенностей эксперимента, был выбран метод для расчета потерь энергии в толстом кристалле, в основу которого положен принцип справедливости КТИ на малых участках траектории. Для этого траекторию движения частицы в каждом кристалле разбивали на достаточно большое число отрезков (обычно это было 100), и вычисляли по формулам КТИ с помощью Монте-Карло вероятность излучения на каждом отрезке. Это позволяло вносить небольшие изменения в траекторию частицы из-за многократного рассеяния электронов, а также просто учитывать кратные процессы излучения фотонов. Отмечено несколько важных деталей этой модели. Потенциал рассчитывался для плоскости (111) с учетом температурных осцилляций атомных центров в кристаллах. Для кристалла кремния мы использовали температуру Дебая 640°K , что соответствует амплитуде тепловых колебаний равной 0.0645 \AA . Средний угол отражения был взят 80 мкрад . Для расчетов некогерентного излучения были использованы постоянные значения функций $\psi_{1s}^a = 15,3$ и $\psi_{2s}^a = 14,3$. Приведено сравнения расчетов выполненных в рамках различных моделей для эксперимента с энергией 180 ГэВ для позитронов и электронов, которые показывают несколько большую величину потерь энергии, чем представленные экспериментальные данные. Следует отметить, что эксперимент с 180 ГэВ позитронами и электронами был фактически первым при столь высокой энергии, что не исключает некоторых систематических ошибок при измерениях. Показано, что новые расчеты, выполненные методом Монте-Карло, достаточно хорошо согласуются с другими аналогичными расчетами в рамках различных моделей. Также по новой модели рассчитаны потери энергии на излучения для 7 ГэВ электронов при двух толщин монокристалла равных $2,5 \text{ мм}$ и 15 мм в плоскости (111) вдоль пучка для двух ориентаций кристалла (неориентированный и ориентированный). Далее рассмотрен эксперимент по генерации гамма излучения при взаимодействии 7 ГэВ пучка электронов с мульткристаллической структурой, который был проведен на вторичном пучке электронов в канале 4а ускорителя У-70. На рисунке 20а показан внешний вид и схема установки подготовленной мульткристаллической структуры. Устройство состоит из 24 изогнутых кристалла в форме изогнутых полосок. Полоски

вырезаны и изогнуты вдоль плоскости (111). Шесть полосок по 2.5 мм каждая установленных вдоль пучка усиливают эффект излучения. Необходимый поперечный размер обеспечивают 4 слоя полосок поперек пучка по 0.5 мм на каждый слой. Сэндвич из полосок использовали вследствие того, что толстые кристаллы кремния не могут изгибаться держателем до нужных углов. Схема эксперимента показана на рисунке 21b.

Сначала находили соотношение триггерных событий T_1/T_0 , которое определяет форму распределения потери энергии на излучение, где T_1 - совпадение телескопа счетчиков $S_1 \& S_2 \& S_3$ с калориметрами $C_1 \& C_2$, T_0 – телескоп счетчиков $S_1 \& S_2 \& S_3$. Потери энергии для каждого события T_1 определялись с помощью калориметра C_2 . Миниатюрный калориметр C_1 использовался для режекции фона и быстрой настройки плоскостной и осевой ориентации кристаллической мишени. Количество электронов прошедших кристаллическую мишень определяется триггером T_0 . Подробно эксперимент описан в работах [10, 11].

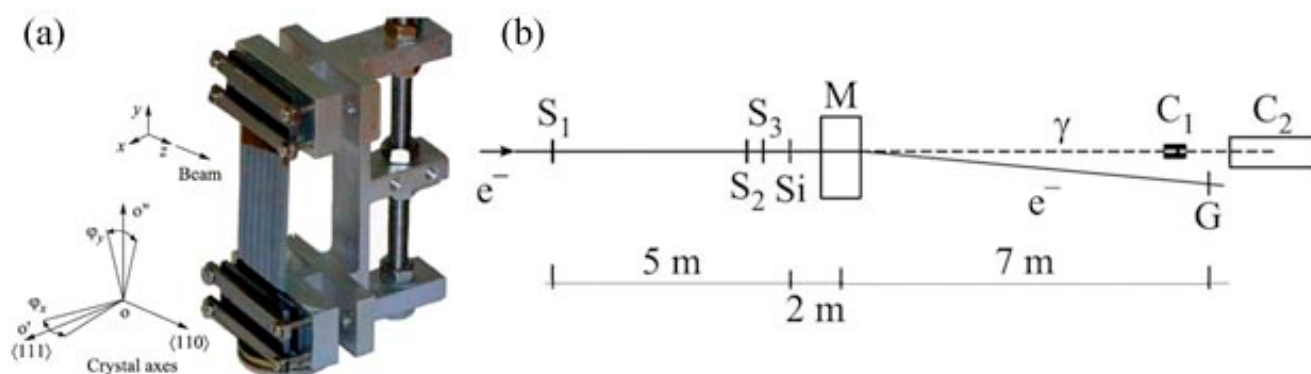


Рисунок 20- Внешний вид и установка относительно пучка многослойного кристаллического радиатора (a) и Схема установки «Кристалл» на канале 4а ускорителя У-70 (b). S_1, S_2, S_3 – сцинтилляционные счетчики, Si – кристаллическая сборка в гониометре, M – отклоняющий магнит, C_1, C_2 – калориметры для определения энергии генерируемых фотонов, G – годоскоп для определения поперечных координат электронов

Спектры фотонов, излучаемой энергии и потери энергии электронов были измерены для плоскостной ориентации, осевой ориентации и разориентированного состояния кристаллической мишени.

Полученные экспериментальные данные представлены в виде функции плотности вероятности на один электрон, прошедший через многополосковый кристалл. Эти результаты основаны на расчете потерь энергии излучения в разориентированном монокристалле. Так как форма экспериментальной кривой

для разориентированного кристалла хорошо согласуется с теоретическим расчетом, то принимая это во внимание, была найдена абсолютная шкала потерь энергии излучения. Показано, что средние потери энергии на излучение составили: $0,89 \pm 0,08$ ГэВ для неориентированного состояния, $1,2 \pm 0,11$ ГэВ для плоскостной ориентации и $2,2 \pm 0,2$ ГэВ для осевой ориентации мультикристаллической структуры (см. рисунок 21). Расчетное значение средних потерь энергии для шести полос в плоскостной ориентации равно $1,148$ ГэВ, что совпадает (в пределах ошибки) с измеренным значением равным $1,2$ ГэВ. На рисунке 21 представлены измеренные распределения потерь энергии электронов 7 ГэВ в многополосном кристаллическом устройстве.

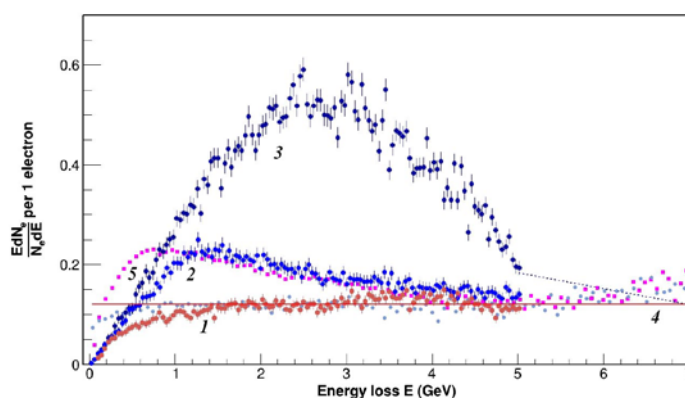


Рисунок 21 - Измеренные распределения потерь энергии электронов с энергией 7 ГэВ в многополосном кристаллическом устройстве. Кривые 1, 2 и 3 для случаев неориентированной, плоскостной и осевой ориентаций соответственно. Кривые 4 и 5 являются расчетом для случаев неориентированной и плоскостной ориентаций соответственно. Прямая красная линия – результат фитирования линейной функцией кривой 1

В итоге продемонстрирован рост потерь энергии на излучение для плоскостной и осевой ориентации кристалла по сравнению с неориентированным случаем.

В третьей части главы рассмотрена возможность использования мультикристаллических структур в режиме отражения частиц для защиты септум-магнитов от радиации. Этот вариант защиты был протестирован на протонном пучке с энергией 50 ГэВ на ускорителе У-70 для защиты септума СМ24 [11]. Выбранное мультикристаллическое устройство было таким же, как и в эксперименте по генерации гамма-излучения (см. рисунок 20а). Показано, что расчетное значение среднего угла отражения для 50 ГэВ протонного пучка для одной кремневой полосы $2,5$ мм в плоскости (111) равно 38 мкрад, а для шести

полос $6 \times 38 = 228$ мкрад. Получены распределения горизонтальных координат протонного пучка для разориентированного положения и в максимуме плоскостного объемного отражения мультикристаллического устройства. Разница между двумя центрами распределений составила 1,1 мм, что соответствует углу отклонения пучка $1,1 / 7000 = 0,16$ мрад и находится в удовлетворительном согласии с максимальным теоретическим значением этого угла 0,228 мрад. Проведены расчеты методом Монте-Карла для оценки «затенения» септума мультикристаллическим устройством. По нашим оценкам расчетный коэффициент «затенения» септума мультикристаллом составил 60%. Аналогичный эксперимент по «затенению» септума проводился в CERN на ускорителе SPS (коэффициент «затенения» 40%). В результате мультикристаллическое устройство должно хорошо «затенять» септум.

В **заключении** сформулированы основные выводы по результатам диссертационной работы.

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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 низкой эффективности каналирования таких частиц.

- 4) Создана программа расчета потерь энергии на излучение в изогнутом монокристалле и мультикристалле. 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.
- 5) В эксперименте по генерации излучения при взаимодействии электронного пучка с энергией 7 ГэВ с мультикристаллической структурой показан рост потерь энергии на излучение в 1,3 раза для плоскостной и в 2,5 раза для осевой ориентации мультикристаллической структуры по сравнению с неориентированным случаем. Таким образом, был продемонстрирован источник излучения высокоэнергетичных фотонов, имеющий перспективы практического применения на ускорителях.
- 6) Экспериментальные результаты по испытанию на пучке протонов 50 ГэВ кристаллического устройства в режиме отражения для защиты септум-магнита SM24 от радиации показали, что мультикристаллическая структура должна хорошо «затенять» септум. Эта задача очень важна для ускорителей в CERN, Fermilab, BNL, и J-PARC.

Список публикаций

1. Афонин А.Г., Баранов В.И., Баранов В.Т., Бритвич Г.И., ... Янович А.А. 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. 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. 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. Майшеев 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. 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. 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.

Список литературы

- *1. Stark J. Comment on the dispersion and absorption of β -rays and X-rays // Phys. Zs. – 1912. – Vol. 13. - Pp. 973-977.
- *2. Piercy G.R., Brown F., Davies J.A. and McCargo M. Experimental evidence for the increase of heavy ion ranges by channeling in crystalline structures // Phys. Rev. Lett. – 1963. – Vol. 10. – May 1963 – Pp. 399-400.
- *3. Линдхард Й. Влияние кристаллической решетки на движение быстрых заряженных частиц // УФН. – 1969. – Т. 99. – Октябрь 1969. – С. 249-296.

- *4. Tsyganov E.N. Estimates of cooling and bending processes for charged particle penetration through a monocrystal // Preprint, Fermilab. – 1976. – TM-684 – September 1976. – Pp. 1-7.
- *5. Афонин А.Г., Бирюков В.М., Гаврилушкин В.А., Гресь В.Н. [и др.] Новые результаты по изучению эффективного вывода протонов кристаллом из 70 ГэВ ускорителя ИФВЭ // Письма в ЖЭТФ. – 1998. – Т. 68. - № 7. – Октябрь 1998. – С. 544-548.
- *6. Afonin A.G., Baranov V.T., Biryukov V.M. [et al.] High-Efficiency Beam Extraction and Collimation Using Channeling in Very Short Bent Crystals // Phys. Rev. Lett. – 2001. – Vol. 87. - No 9. – August 2001 – P094802.
- *7. Scandale W., Taratin A.M. Channeling and volume reflection of high-energy charged particles in short bent crystals. Crystal assisted collimation of the accelerator beam halo // Phys. Rep. – 2019. – Vol. 815. – No 2. – June 2019. – Pp. 1-107.
- *8. Bayatian G. L. [et al.] CMS Physics: Technical Design Report Volume 1: Detector Performance and Software. // CERN-LHCC-2006-001. CMS-TDR-8-1. – 2006. – P. 521.
- *9. Maishev V.A., Chesnokov Yu.A., Chirkov P.N. Focusing of high energy particles with the help of bent single crystal // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. – 2015. – Vol. 355. – July 2015. – Pp. 360-364.
- *10. Degtyarev I.I., Liashenko O.A., Yazynin I.A. Applications of the Coupled SCRAPER-RTS&T Code in Radiation Therapy // EPAC 2000. – Vienna, 2000. – 7th European Particle Accelerator Conference. – 2000. – Pp. 2506-2508.
- *11. Maishev V.A. Volume reflection of ultrarelativistic particles in single crystals // Phys. Rev. ST Accel. Beams. – 2007. - Vol. 10. – No 8. – August 2007. – P. 084701.