

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»**

На правах рукописи
УДК 537.87; 621.384.6.01

**СЫТОВ
АЛЕКСЕЙ ИГОРЕВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПУЧКАМИ
ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПРИ ПОМОЩИ КРИСТАЛЛОВ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности
01.04.02 – Теоретическая физика

Минск 2018

Работа выполнена в Белорусском государственном университете

Научные руководители: **Тихомиров Виктор Васильевич**,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий лабораторией
ядерной оптики и космомикробиологии НИУ
«Институт ядерных проблем» БГУ

Официальные оппоненты: **Курочкин Юрий Андреевич**,
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий центром «Теоретическая
физика» Государственного научного
учреждения «Институт физики имени Б.И.
Степанова Национальной академии наук
Беларуси»

Кисель Василий Васильевич,
кандидат физико-математических наук,
доцент, доцент кафедры физики УО
"Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники"

Оппонирующая организация: Государственное научное учреждение
«Объединенный институт энергетических и
ядерных исследований – Сосны»

Защита состоится 25 июня 2018 г. в 15⁰⁰ на заседании Совета по защите
диссертаций Д 01.05.02 при Институте физики имени Б.И. Степанова НАН
Беларуси по адресу: 220072, г. Минск, пр. Независимости, 68, тел.: +375 17
2840441, e-mail: vyblyi@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке
имени Я.Коласа Национальной академии наук Беларуси

Автореферат разослан «25» мая 2018 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
кандидат физ.-мат. наук

Ю.П. Выблый

ВВЕДЕНИЕ

Когерентные эффекты взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, в частности, эффект каналирования, обладают широкими возможностями для различных областей физики. Очень сильные межплоскостные электромагнитные поля, приложенные с точностью до одного ангстрема, позволяют отклонять частицы с высокой эффективностью. Более того, подобные когерентные эффекты позволяют генерировать с помощью кристаллов рентгеновское и гамма-излучение и электрон-позитронные пары. Главное преимущество кристаллов – компактные размеры, низкая себестоимость и легкость в их установке и эксплуатации. Кристаллы позволяют управлять пучками различных энергий (от нескольких МэВ до десятков ТэВ) различных типов заряженных частиц (как протонов, так и мюонов, электронов, позитронов и др.).

Одни из основных применений кристаллов – система коллимации и вывод пучка заряженных частиц из ускорителя. В обоих случаях используется изогнутый кристалл, отклоняющий пучки заряженных частиц. Оба приложения уже показали свою эффективность на различных ускорителях и коллайдерах, включая Тэватрон и LHC.

Система коллимации необходима для защиты ускорительного оборудования и, в частности, сверхпроводящих магнитов от перегрева и радиационных повреждений, вызванных облучением заряженных частиц, достигших опасно высокой амплитуды бетатронных или синхротронных колебаний – гало пучка. Эта проблема особенно актуальна для проектов будущих адронных коллайдеров, таких как LHC с пучками более высокой светимости и энергии и Будущего кольцевого коллайдера (Future Circular Collider). Изогнутые кристаллы позволяют существенно снизить уровень облучения сверхпроводящих магнитов, что делает такой метод одним из наиболее эффективных вариантов системы коллимации для будущих проектов коллайдеров. Более того, выведенный с помощью кристалла пучок можно использовать для экспериментов на фиксированной мишени при рекордных энергиях. Такие эксперименты, в частности, планируются на LHC.

Другим применением кристаллов является генерация интенсивного рентгеновского и гамма-излучения, в частности, посредством когерентного магнитотормозного излучения, излучения при каналировании, излучения в периодически изогнутых кристаллах – кристаллических ондуляторах при прохождении через кристалл высокоэнергетичных электронов или позитронов. Основная область применений излучения в кристаллах – исследование структуры ядер и в перспективе – медицинская физика.

Основными ограничениями эффективности применения кристаллов является эффективность отклонения пучков, в частности эффективность каналирования и погрешность угловой ориентации, а также угловой аксептанс. Решение этих проблем путем развития новых, более эффективных методов управления пучками высоких энергий с помощью кристаллов является темой диссертационной работы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

В основу диссертации легли исследования, выполненные в 2011-2017 годах в соответствии с утверждёнными планами научных работ кафедры теоретической физики и астрофизики физического факультета Белорусского государственного университета.

Тема диссертации соответствует следующим приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. № 190): Многофункциональные материалы и технологии; Информатика и космические исследования; Междисциплинарные исследования.

Диссертационная работа выполнялась в рамках заданий:

- 2.3.01.1 «Разработка физических основ и теоретического описания системы коллимации Большого адронного коллайдера на основе изогнутых кристаллов» (№ гос. рег. 20111383), подпрограмма «Физика фундаментальных взаимодействий и плазма», ГПНИ «Конвергенция» (2011-2013 гг.);
- 2.3.04.2 «Разработка теории и методов управления движением и электромагнитным излучением частиц высоких энергий при помощи кристаллов» (№ гос. рег. 20140530), подпрограмма «Физика фундаментальных взаимодействий и плазма», ГПНИ «Конвергенция» (2014-2015 гг.);
- 2.3.02 «Разработка методов детектирования и управления пучками частиц высоких энергий и жесткого электромагнитного излучения при помощи ориентированных кристаллов», ГПНИ «Конвергенция-2020», подпрограмма 2 «Микромир, плазма и Вселенная», 2016-2020 гг. (№ гос. Рег. 20162277);

грантов Министерства образования Республики Беларусь для студентов, аспирантов, докторантов:

- НИР «Разработка системы коллимации Большого адронного коллайдера с использованием изогнутых кристаллов» (2012 г., № гос. рег. 20120930);
- НИР «Применение изогнутых кристаллов с разрывом кристаллической структуры для выведения протонного пучка из накопительного кольца ускорительного комплекса Национальной лаборатории имени Ферми (США)» (2013 г., № гос. рег. 20131040);
- НИР «Моделирование эксперимента по кристаллической коллимации на Большом адронном коллайдере 2015г. и применение кристаллического выреза для повышения эффективности коллимации» на 2014 г. (№ гос. рег. 20140778);
- Совместного гранта БРФФИ и Министерства образования Республики Беларусь для молодых ученых БРФФИ-Минобразование М-2014 НИР «Моделирование прохождения заряженных частиц через кристалл на

Большом адронном коллайдере с учетом реального распределения остовных и валентных электронов» (2014-2016 гг., № гос. рег. 20143432);
Гранта Международного центра теоретической физики им. А. Салама (ICTP, Триест, Италия) AF-06/17-04;

итальянских проектов, финансируемых INFN (Национальный институт ядерной физики, Италия) для проведения экспериментов на европейских ускорительных комплексах:

- INFN-CHANEL (эксперименты на ускорителях Микротрон МАМИ, Майнц, Германия; SPS H4, ЦЕРН, Франция);
- INFN-AXIAL (эксперименты на ускорителях Микротрон МАМИ, Майнц, Германия; SPS H4, ЦЕРН, Франция);

грантов итальянского суперкомпьютерного центра CINECA для работы на суперкомпьютерах по программе ISCRA: IsC41_MC-CIC (no. HP10CY2SUM), 2016 г., суперкомпьютеры Fermi, Galileo, Marconi; IsC50_MC-CIC2 (no. HP10CCINVJ), 2017 г., суперкомпьютер Marconi; IsC58_MC-CIC3 (no. HP10CXRN0X), 2018 г., суперкомпьютер Marconi;

европейских проектов HORIZON 2020:

- H2020, AIDA-2020 (GA no. 654168);
- H2020-MSCA-RISE-2015, PEARL (GA no. 690991).

Цель и задачи исследования

Цель работы – исследование когерентных эффектов взаимодействия заряженных частиц с изогнутыми кристаллами с целью повышения эффективности их применения для коллимации, вывода пучка из ускорителя и генерации рентгеновского и гамма-излучения.

Для достижения цели работы решались следующие **задачи**:

1. Разрабатывались теоретические модели и на их основе программа моделирования когерентных эффектов отклонения заряженных частиц в поле кристаллических осей или плоскостей.
2. Изучались процессы каналирования, деканалирования и объемного отражения электронов с энергией 855 МэВ в ультракоротких кристаллах кремния и германия толщиной 15 мкм, а именно – эффективность каналирования, длина деканалирования и угол объемного отражения в зависимости от радиуса кривизны кристалла.
3. Исследовались и оптимизировались различные когерентные эффекты отклонения протонов высоких энергий в изогнутом кристалле, такие как каналирование, объемное отражение, многократное объемное отражение в одном кристалле и цепочках кристаллов, а также эффект повышения эффективности каналирования с помощью кристаллического выреза.
4. Разрабатывалась система коллимации на основе кристаллов Будущего кольцевого коллайдера с применением указанных выше эффектов, изучалась эффективность коллимации в зависимости от выбора эффектов и параметров системы коллимации.
5. Изучались процессы колебаний положительно заряженных частиц в режиме каналирования в изогнутом кристалле, процесс деканалирования

этих частиц и преобразование колебаний в режиме каналирования в пики деканалирования в угловом распределении пучка, прошедшего через кристалл.

6. Изучались процессы колебаний положительно и отрицательно заряженных частиц при надбарьерном движении в условиях квазичанелирования в изогнутом кристалле и преобразование этих колебаний в пики квазичанелирования в угловом распределении пучка, прошедшего через кристалл.
7. Изучалось применение пиков квазичанелирования для измерения ориентации и радиуса кривизны изогнутого кристалла.

Объект исследования: изогнутые кристаллы кремния, германия и вольфрама.

Предмет исследования: когерентные эффекты взаимодействия заряженных частиц – протонов, электронов и позитронов с изогнутыми кристаллами.

Научная новизна

Впервые проведено теоретическое и экспериментальное исследование процесса каналирования, деканалирования и объемного отражения в зависимости от радиуса изгиба кристаллов кремния и германия для электронов при энергиях меньше ГэВ. При этом в случае кристалла кремния получена рекордная эффективность каналирования для отрицательных частиц – больше 35 %, а в случае германия это первое исследование процесса каналирования при энергиях меньше ГэВ. Впервые предложена двойная система коллимации с использованием когерентных эффектов в двух изогнутых кристаллах и разработан вариант такой системы для Будущего кольцевого коллайдера. Предсказаны новые эффекты – пики деканалирования и квазичанелирования, причем второй эффект впоследствии был обнаружен экспериментально. Предложен метод использования пиков квазичанелирования для быстрого и точного измерения ориентации и радиуса кривизны изогнутого кристалла.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработка модели и расчет на этой основе эффектов каналирования, деканалирования и объемного отражения электронов в ультракоротких изогнутых кристаллах, что позволило извлечь из экспериментальных данных значения длин деканалирования и эффективности каналирования, необходимые для разработки новых источников рентгеновского и гамма-излучения на основе изогнутых и периодически изогнутых кристаллов.
2. Разработка и оптимизация схемы коллимации пучков в ускорителях высоких энергий на основе новых эффектов многократного объемного отражения и увеличения вероятности каналирования в кристалле с вырезом, которые позволяют существенно повысить эффективность

защиты сверхпроводящих магнитов существующих и проектируемых адронных коллайдеров.

3. Теоретическое предсказание и расчет характеристик пиков деканалирования в угловом распределении прошедшего через изогнутый кристалл пучка заряженных частиц высоких энергий, регистрация которых позволит получать информацию о фазе колебаний частиц, движущихся в режиме каналирования.
4. Предсказание, численное моделирование и подготовка экспериментального обнаружения пиков квазиканалирования в угловом распределении пучка заряженных частиц высоких энергий, прошедшего через изогнутый кристалл, регистрация которых позволит осуществлять прецизионное ориентирование кристалла в целях коллимации и вывода пучков из ускорителя, а также генерации рентгеновского и гамма-излучения.

Личный вклад соискателя

Соискателем была разработана программа CRYSTAL для моделирования когерентных эффектов отклонения заряженных частиц в кристалле.

Соискатель провел теоретическое исследование и моделирование процессов каналирования, деканалирования и объемного отражения электронов с энергией 855 МэВ в кристаллах кремния и германия при различных значениях радиуса кривизны кристалла. Соискатель также принимал участие в экспериментальном исследовании этих процессов на микротроне МАМИ (Майнц, Германия), где самостоятельно выполнил анализ экспериментальных данных.

Соискателем было проведено теоретическое исследование, моделирование и оптимизация когерентных эффектов отклонения протонов при энергиях 7 и 50 ТэВ, предложена и разработана двойная система коллимации Будущего кольцевого коллайдера.

Соискатель предсказал теоретически и с помощью моделирования новые эффекты пиков деканалирования и квазиканалирования в угловом распределении пучка, прошедшего через изогнутый кристалл, построил теоретическую модель этих эффектов и сформулировал условия для их экспериментального обнаружения. В ходе сотрудничества с коллаборацией E-212, работающей на ускорительном комплексе SLAC, соискатель предложил интерпретацию экспериментальных данных и провел моделирование эксперимента по обнаружению пиков квазиканалирования при отклонении электронов и позитронов с энергией 20.35 ГэВ на ускорительном комплексе SLAC.

Апробация результатов диссертации

Изложенные в настоящей диссертации результаты исследований были представлены на двенадцати международных конференциях: 44th Intern. Tulinov Conf. on Physics of Charged Particles Interaction with crystals (27-29 мая

2014, Москва, Россия; 64th Intern. Conf. NUCLEUS 2014 (1-4 июля 2014, Минск, Беларусь); 6th Intern. Conf. “Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena – Channeling 2014” (6-10 октября 2014, Капри, Италия); the XIII-th International School-Conference “The actual problems of microworld physics” (27 июня – 7 августа 2015, Гомель, Беларусь); V Конгресс физиков Беларуси (28-30 октября 2015, Минск, Беларусь); "Problems in Physics of Fundamental Interactions – theory, phenomenology, experiment (ProFi-2015)" (19-20 ноября 2015, Гомель, Беларусь); The second Annual Meeting of the Future Circular Collider Study, FCCWEEK 2016 (11-15 апреля 2016, Рим, Италия); 5th International Conference "Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies" (ISMART 2016) (26-30 сентября 2016, Минск, Беларусь); 7th Intern. Conf. “Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena – Channeling 2016” (25-30 сентября 2016, Sirmione-Desenzano del Garda, Италия); The Third Annual Meeting of the Future Circular Collider Study “FCCWEEK 2017” (29 мая – 2 июня 2017, Берлин, Германия); The XII International Symposium «Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures» RREPS-17 (18-22 сентября 2017, DESY, Гамбург, Германия); The Workshop "Periodically Bent Crystals for Crystalline Undulators" and HORIZON 2020 RISE-PEARL Mid-Term Review Meeting (23-25 октября 2017, Феррара, Италия); на семинаре LHC Collimation Upgrade meeting (16 августа 2013, ЦЕРН, Франция), в выступлениях во время участия в летних стажировках Summer Internship on Physics of Accelerators and Related Technology for International Students (PARTI) (Национальная лаборатория имени Ферми, США, 25 июня – 31 августа 2012) и CERN Summer Student Program 2013 (1 июля – 23 августа 2013 ЦЕРН, Женева, Швейцария), в стажировках в университете г. Феррара (1 ноября 2014 – 31 октября 2015, 1 ноября 2015– 31 октября 2016, 1 ноября 2016 – 31 августа 2015), а также в стажировке в MBN Research Center (26 июня – 31 июля 2017, Франкфурт-на-Майне, Германия) в рамках участия в европейском проекте H2020-MSCA-RISE-2015, PEARL (GA no. 690991).

Опубликованность результатов диссертации

Результаты соискателя, полученные в соавторстве с другими членами научного коллектива, опубликованы в шести международных реферируемых журналах, а также в одном реферируемом журнале без соавторов составляют 21,1 авторский лист, из них в реферируемых изданиях – 17,4 авторского листа и 3,7 авторского листа – остальные публикации.

Структура и объем диссертации

Диссертация написана на русском языке, включает в себя оглавление, введение, общую характеристику работы, четыре главы (включая разделы и подразделы), заключение и библиографический список. Полный объем диссертации составляет 139 страниц, включая 52 рисунка на 47 страницах, 5 таблиц на 5 страницах.

Библиографический список включает 157 использованных источников на 13 страницах и 25 публикаций соискателя на 5 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертации представлен анализ современного современных достижений по теме диссертации, описаны основные применения изогнутых кристаллов в современной ускорительной физике, физике высоких энергий, сформулированы задачи исследования.

Глава 1 посвящена обзору когерентных эффектов, связанных с плоскостным и осевым каналированием. В частности, рассматривается движение в усредненном межплоскостном и межосевом потенциалах наряду с эффектами многократного и однократного рассеяния на ядрах и электронах. Обсуждаются эффекты деканалирования, объемного захвата и объемного отражения. Также описаны более сложные когерентные эффекты, такие как многократное объемное отражение в одном изогнутом кристалле.

В **разделе 1.1** сформулировано определение эффекта каналирования как эффекта проникновения заряженных частиц через монокристалл, параллельно его атомным осям или плоскостям. В связи с этим описывается идея Линдхарда о том, что каналирование и другие когерентные эффекты можно описать как взаимодействие с атомными плоскостями или осями как с единым целым.

Далее вводится усредненный плоскостной и осевой потенциалы для различных ориентаций кристаллической решетки на примере кремния и германия и записываются уравнения траектории в плоскостном и осевом случае в соответствующих потенциалах. В дополнение к этому вводится модель многократного и однократного кулоновского рассеяния, а также ядерного рассеяния, описывается процесс выбывания частиц из режима каналирования – процесс деканалирования.

В **разделе 1.2** рассматриваются особенности взаимодействия заряженных частиц с изогнутыми кристаллами, в частности, когерентные эффекты, характерные только для изогнутого кристалла, такие как объемное отражение, объемный захват, многократное объемное отражение и др. Описывается различие теоретической модели и вводятся уравнения траектории для изогнутого кристалла.

В **главе 2** в **разделе 2.1** описывается программа моделирования CRYSTAL [1,2], предназначенная для моделирования эффектов взаимодействия заряженных частиц (протоны, электроны, мюоны и их античастицы) с прямыми или изогнутыми монокристаллами с учетом рассеяния различного типа. Разработанная программа позволила успешно промоделировать [2, 3, 8] различные эксперименты по наблюдению когерентных эффектов в кристаллах на современных ускорителях, часть из которых описана в данной диссертационной работе. Программа содержит одномерные и двумерные модели, которые позволяют моделировать классические траектории заряженных частиц в поле атомных плоскостей или осей, соответственно. Допустимый диапазон энергий частиц программы CRYSTAL для хорошего согласия с экспериментом от 100 МэВ и выше для электронов и от МэВ и выше – для протонов.

В программе используется модель атомного потенциала Дойля-Тернера, хотя любой другой потенциал может быть реализован и введен в виде интерполяционных коэффициентов во входной файл без модификации самой программы. Кроме того, моделируется некогерентное кулоновское рассеяние как различные типы ядерного рассеяния – упругое, дифракционное и неупругое. Для решения проблемы оптимизации программа включает в себя процедуру варьирования начальных параметров. Для увеличения вычислительной мощности в программе реализована MPI парадигма для моделирования на суперкомпьютерах и кластерах. Параллелизация выполнена благодаря независимому расчету траекторий различных частиц.

Основным преимуществом программы CRYSTAL является моделирование из первых принципов, в том числе ранее не заданных в программе эффектов. Поэтому программа моделирования CRYSTAL может быть использована для предсказания новых, ранее неизвестных эффектов.

В разделе 2.2 исследуется каналирование, деканалирование и объемное отражение электронов с энергией 855 МэВ [3]. При этом подчеркивается, что случай отрицательно заряженных частиц мало исследован, особенно при энергиях порядка ГэВ. Его исследование стало возможным лишь недавно, благодаря реализации очень коротких изогнутых кристаллов кремния, сравнимых с характерной длиной проникновения, на которой происходит процесс деканалирования для большинства частиц – процесс деканалирования.

Исследование процессов каналирования, деканалирования и объемного отражения электронов с энергией 855 МэВ в кристаллах кремния и германия толщиной 15 мкм, изогнутых вдоль плоскостей (111), было проведено теоретически и экспериментально на Микротроне МАМІ, Майнц, Германия. Применение инновационного пьезохолдера позволило изменять кривизну кристалла прямо в вакуумной камере без изменения прочих условий эксперимента. Таким образом, были измерены и промоделированы с помощью программы CRYSTAL угловые распределения отклоненного пучка для различных значений радиуса кривизны и ориентации обоих кристаллов. Более того, получены зависимости эффективности каналирования и длины деканалирования, являющихся основным параметром для плоскостного каналирования, от значения радиуса кривизны изогнутого кристалла. Они приведены на рисунке 1 [3]. Такие зависимости получены впервые для случая электронов с энергией ниже ГэВ и абсолютно впервые – для кристалла германия.

Полученные результаты продемонстрировали максимальную эффективность каналирования около 40 % для кремния и 8 % для германия. Различие между этими двумя материалами может быть объяснено более высоким атомным номером германия, что приводит к более высокому вкладу кулоновского рассеяния, вызывая более сильное деканалирование. Это подтверждается измерением длины деканалирования, близкой по значению к длине кристалла для кремния, но в два раза короче для кристалла германия при наибольшем радиусе изгиба. В частности, использование кристалла

кремния длиной, сравнимой с длиной деканализирования, позволило обеспечить рекордный уровень эффективности каналирования электронного пучка. Более того, впервые продемонстрировано каналирование электронов с энергией около ГэВ в кристалле германия.

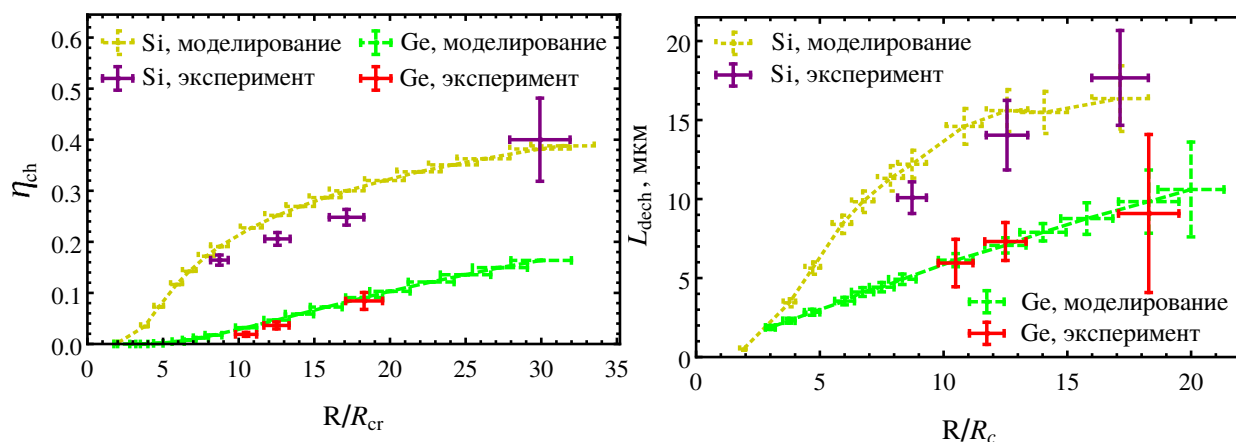


Рисунок 1. – Экспериментальные и промоделированные зависимости эффективности каналирования (слева) и длины деканализирования (справа) кристаллов кремния и германия от отношения радиуса изгиба кристалла к его критическому значению при оптимальной ориентации для эффекта каналирования.

Также было выявлено влияние первоначально неканализованных частиц на процессы деканализирования, что приводит к уменьшению длины деканализирования в случае, если толщина кристалла сравнима с длиной деканализирования.

Кроме этого была промоделирована и исследована теоретически и экспериментально зависимость отношения угла объемного отражения к углу Линдхарда от отношения радиуса кривизны кристалла к его критическому значению. Поскольку в эту зависимость не входит энергия частиц, данные результаты могут быть использованы и при других значениях энергии.

Представленные результаты, в частности, исследования эффективности каналирования и длины деканализирования, представляют интерес для разработки источников рентгеновского и гамма излучения в изогнутых и периодически изогнутых кристаллах, в том числе более тяжелых элементов. Более того, полученные результаты могут быть экстраполированы на случай более высоких энергий, например, для применений для коллимации электрон-позитронного коллайдера или вывода пучка из ускорителя.

В главе 3 исследуется применение когерентных эффектов в изогнутых кристаллах для будущих ускорительных проектов на примере Будущего кольцевого коллайдера [4-6, 9]. В данной главе рассматривается многократное объемное отражение в одном изогнутом кристалле и кристаллической цепочке. Изучается методика повышения эффективности каналирования с помощью узкого выреза, а также увеличения углового аксептанса каналирования посредством применения каналирования в наклонных плоскостях. Вводится теоретическая модель для оптимизации предложенных эффектов.

Предложена двойная система коллимации на основе кристаллов, и разработаны ее параметры на примере системы бетатронной коллимации Будущего кольцевого коллайдера [6]. Эта система основана на применении второго изогнутого кристалла для усиления угла отклонения неканализованных частиц, что позволяет предотвратить утечку этих частиц и их попадание на ускорительное оборудование, такое как сверхпроводящие магниты. Схема двойной системы коллимации Будущего кольцевого коллайдера изображена на рисунке 2 [6].

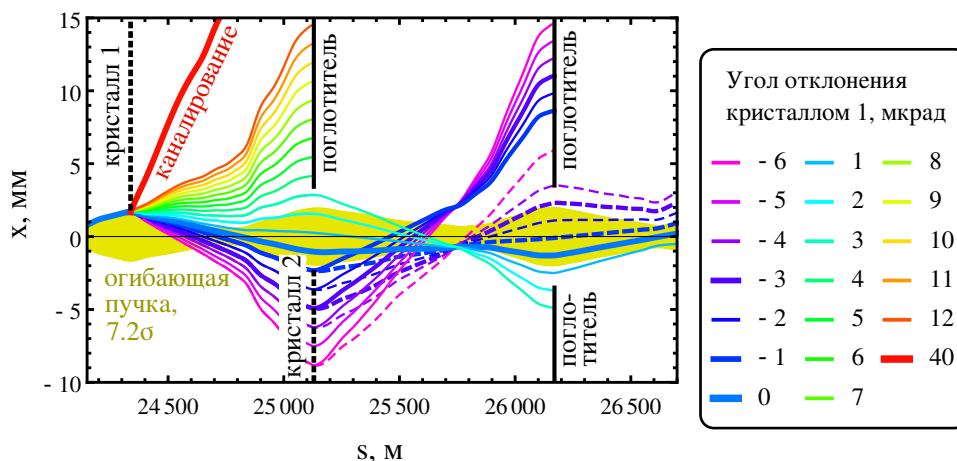


Рисунок 2. – Двойная кристаллическая система коллимации. Траектории пучка протонов с энергией 50 ТэВ промоделированы для разных углов отклонения кристаллом 1 в зоне бетатронной коллимации Будущего кольцевого коллайдера с учетом бетатронных колебаний. Кристалл 1, кристалл 2 и поглотители размещены в поперечной плоскости на $7,2\sigma$, 9σ и $12,6\sigma$ от центра пучка, соответственно. Частицы, прошедшие через кристалл 2 и отклоненные на угол -5 мкрад, изображены сплошными линиями, на нулевой угол – штрихованными.

Для второго кристалла были предложены эффекты многократного объемного отражения в одном изогнутом кристалле, объемное отражение в кристаллической цепочке, а также комбинация обоих эффектов. И хотя даже в этом случае существует фракция, отклоненная на небольшие углы, эта фракция значительно меньше, чем у первого кристалла.

Предложена теоретическая модель оптимизации геометрии и ориентации кристаллов. Она основана на зависимости отношения угла объемного отражения к углу Линдхарда от отношения радиуса изгиба к его критическому значению, как описано в [главе 2](#). По этой модели параметры цепочки изогнутых кристаллов были оптимизированы как для однократного, так и для многократного объемного отражения при фиксированном числе кристаллов и длине цепочки. Моделирование программой CRYSTAL, проведенное для различной длины и числа кристаллов в цепочке, позволяет выбрать оптимальное количество кристаллов для каждой длины.

Объемное отражение в цепочке кремниевых кристаллов обеспечивает для протонов с энергией 50 ТэВ более высокий угол отклонения, чем многократное объемное отражение в одном кристалле (12 мкрад и 8,3 мкрад,

соответственно, при общей длине цепочки 10 см). Однако их комбинация увеличивает этот угол до 16 мкрад. Кроме того, для этого требуется 3-4 кристалла, тогда как для объемного отражения на заданной длине необходимы 13 кристаллов в цепочке. Однако многократное объемное отражение в тяжелых кристаллах позволяет достичь еще более высоких углов отклонения, в частности, 23 мкрад для кристалла вольфрама [6].

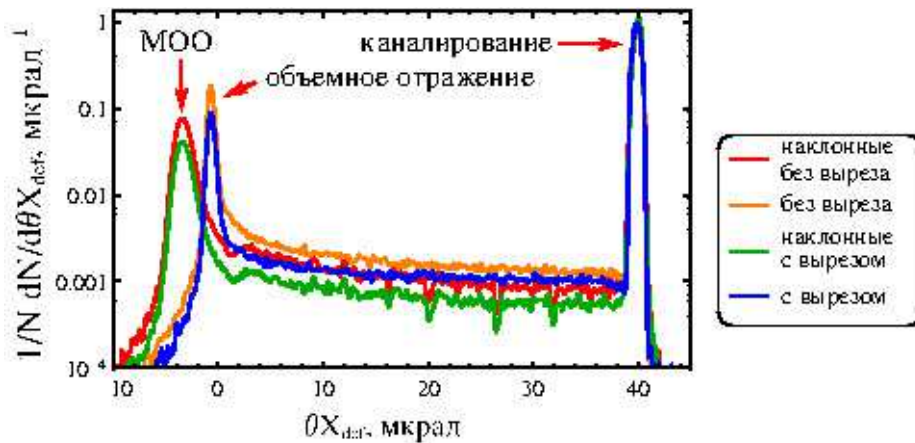


Рисунок 3. – Распределение угла отклонения протонов с энергией 50 ТэВ изогнутым кристаллом длиной 5 см с вырезом и без для плоскостного каналирования в вертикальных и наклонных плоскостях (110). Угол изгиба – 40 мкрад и 53,3 мкрад для вертикальных и наклонных плоскостей, соответственно.

Для первого кристалла в коллимационной системе на основе двойных кристаллов предложено каналирование в наклонных плоскостях. С одной стороны, оно в пять раз увеличивает угол отклонения неканализованных частиц посредством применения многократного объемного отражения вместо однократного. С другой стороны, это увеличивает угловой акцептанс и, следовательно, эффективность каналирования с 79 % до 80,5 %. Кроме того, было предложено применение кристаллического разреза, позволяющего повысить эффективность каналирования с 79 % до 80,5 % до 87,5 % и 89 % в вертикальных и наклонных плоскостях соответственно. Сравнение соответствующих угловых распределений отклоненных пучков приведены на рисунке 3 [6].

Двойная система коллимации на основе кристаллов [6], а также все эффекты отклонения частиц изогнутым кристаллом, перечисленные выше, позволяют перехватить приблизительно 99 % частиц только за одно прохождение зоны коллимации Будущего кольцевого коллайдера. Применение кристаллического разреза увеличивает эту фракцию до 99,9 %. Кроме того, высокие прицельные параметры падения частиц на поглотители предотвращают утечку на их границах. Поэтому предлагаемая схема коллимации потенциально применима на ускорителях и коллайдерах высоких энергий, в частности, на Будущем кольцевом коллайдере.

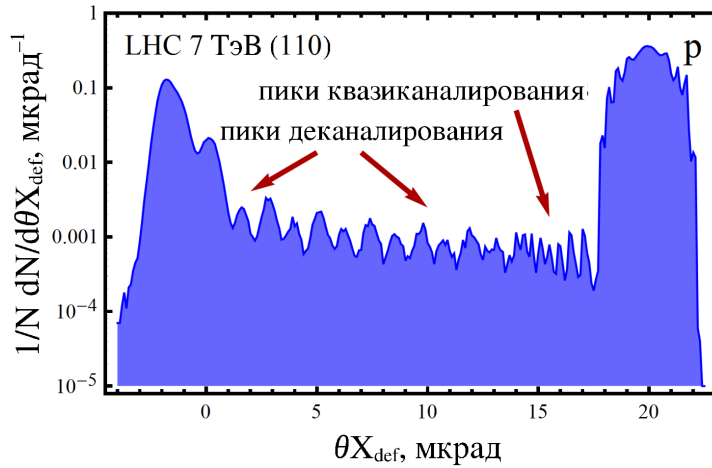


Рисунок 4. – Угловое распределение протонного пучка с энергией 7 ТэВ, прошедшего через кристалл кремния при ориентации каналирования вдоль плоскостей (110) при угловой расходимости пучка 0,5 мкрад, длине кристалла 2 мм и угле изгиба 20 мкрад.

Глава 4 посвящена процессу колебаний каналирующих и надбарьерных (квазиканалирующих) частиц и, в частности, способам их прямого экспериментального наблюдения, предсказанного в этой работе. Для их наблюдения предлагается использовать корреляции траекторий, преобразующиеся в последовательность пиков деканалирования [2, 7, 9] и квазиканалирования [7-9] в распределении углов отклонения, как показано на рисунке 4 [7].

Предложена теоретическая интерпретация обоих видов пиков [2, 7, 8]. Пики квазиканалирования появляются вблизи направления, при котором каналирующие частицы покидают кристалл. Они возникают из-за корреляций длин надбарьерных колебаний деканалированных частиц. Было получено уравнение для угловых положений пиков квазиканалирования:

$$\Delta\varphi_{qch} = \sqrt{\frac{2d_0}{R} + (\theta_b - \theta_{Xdefl})^2} - (\theta_b - \theta_{Xdefl}), \quad (1)$$

где d_0 – межплоскостное расстояние, R – радиус кривизны кристалла, θ_b – ориентация кристалла, θ_{Xdefl} – угловое положение пика.

Это уравнение демонстрирует независимость углового расстояния между пиками от знака заряда и энергии частиц.

Пики деканалирования могут наблюдаться во всем угловом диапазоне отклоненных частиц после взаимодействия с кристаллом, как показано на рисунке 4. Этот эффект возникает из корреляции деканалирования частиц, которые приближались к кристаллическим плоскостям, двигаясь в режиме каналирования, в одинаковых фазах. Поскольку фазовая корреляция для каналированных частиц сохраняется только для положительных частиц, пики деканалирования не могут наблюдаться для отрицательных зарядов. В то же время, поскольку как отрицательно, так и положительно заряженные частицы

могут испытывать надбарьерные колебания, эффект пиков квазиканализирования может наблюдаться для частиц обоих знаков.

Возможность наблюдать пики обоих типов ограничена некогерентным рассеянием частиц при надбарьерном движении. Иными словами, оба эффекта могут наблюдаться, если только среднеквадратичный угол некогерентного рассеяния в два раза меньше разницы угловых положений соседних пиков на угловом распределении. Угловое разрешение детекторов частиц имеет решающее значение для наблюдения пиков обоих типов. Однако низкая угловая расходимость падающего пучка необходима только для наблюдения пиков деканализирования.

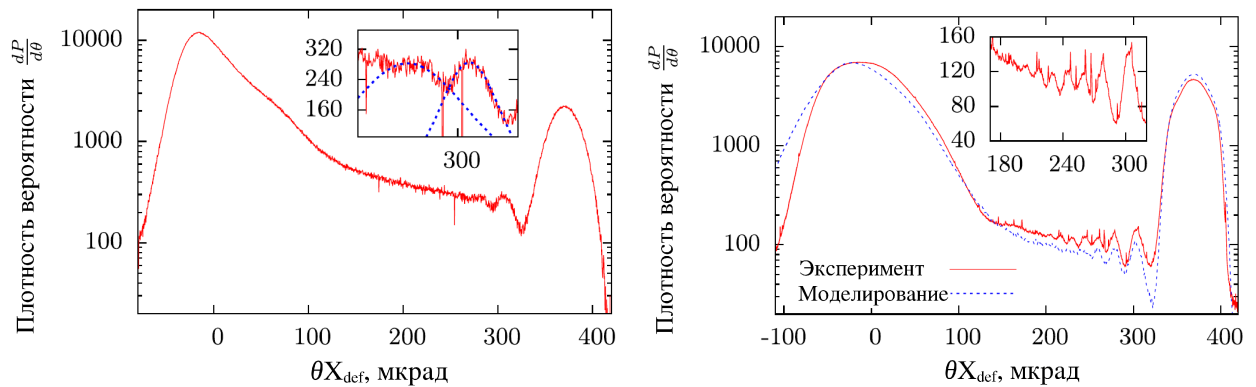


Рисунок 5. – Экспериментальное угловое распределение электронного (слева) и позитронного (справа) пучков с энергией 20.35 ГэВ, прошедших через кристалл кремния при ориентации каналирования вдоль плоскостей (111) при длине кристалла 60 мкм и радиусе изгиба 15 см. На обоих графиках также приведена область, где наблюдаются пики квазиканализирования в увеличенном масштабе. Штрихованная кривая обозначает результаты моделирования.

Предложены оптимальные условия для экспериментального наблюдения пиков, а именно – оптимальные значения толщины кристалла и угла изгиба (радиуса) на ускорителях SLAC, SPS, MAMI и LHC. Сравнение ориентации кристаллических плоскостей (110) и (111) выявило большее расстояние между пиками и более высокую эффективность каналирования в случае (111). Такая плоскость также предпочтительнее с точки зрения сильного изгиба тонких кристаллов для наблюдения предсказанных эффектов при энергиях SLAC и MAMI. Пики квазиканализирования экспериментально обнаружены на ускорительном комплексе SLAC как для электронов, так и для позитронов при энергии 20.35 ГэВ для изогнутых кристаллических плоскостей (111), как показано на рисунке 5 [8].

Для позитронов результаты проверены при помощи построенной теоретической модели с использованием фита зависимости угла пика квазиканализирования [8] от номера пика n :

$$\theta_{X_{def} n} = \theta_d - \sqrt{\frac{2d_0(n-1)}{R} + 2d_s/R}, \quad (2)$$

где d_s – плоскостное расстояние в меньшем канале (111). С помощью этого фита были рассчитаны значения угловой ориентации кристалла и его радиуса кривизны, согласующиеся с экспериментальными значениями в пределах экспериментальной неопределенности. На основании данного фита был предложен метод [8] измерения угловой ориентации и радиуса кривизны кристалла для его быстрой и точной юстировки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана компьютерная программа CRYSTAL для моделирования отклонения пучков заряженных частиц кристаллами, в частности, эффекта каналирования и объемного отражения.

Получена величина деканалирования и эффективность каналирования, а также угол объемного отражения в зависимости от величины радиуса кривизны кристаллов кремния и германия толщиной 15 мкм в хорошем согласии теории, моделирования и эксперимента. Продемонстрировано влияние первоначально неканализованных частиц на процесс деканалирования, что привело к уменьшению длины деканалирования в случае, когда толщина кристалла сравнима с длиной деканалирования [1-4].

2. Предложена теоретическая модель для оптимизации параметров геометрии кристалла, а также его ориентации по отношению к первоначальному направлению пучка для эффектов каналирования, объемного отражения и модификаций – каналирования в кристалле с вырезом и наклонных кристаллических плоскостях и многократного объемного отражения в одном кристалле и цепочке кристаллов, что позволило повысить эффективность каналирования примерно на 10 % для рассмотренных случаев и увеличить угол объемного отражения более чем на порядок. Предложена и разработана схема двойной системы коллимации для Будущего кольцевого коллайдера на основе когерентных эффектов, изученных в диссертационной работе. Такая система коллимации позволяет перехватывать большинство гало частиц – до 99,9 % только за одно прохождение зоны коллимации [4-6, 9].

3. Теоретически предсказан и промоделирован эффект образования пиков деканалирования в угловом распределении пучка, прошедшего через изогнутый кристалл. Этот эффект позволяет непосредственно наблюдать колебания частиц в условиях каналирования, которые преобразуются в последовательность равноотстоящих пиков в угловом распределении. Построена теоретическая модель эффекта, а также сформулированы экспериментальные условия для его наблюдения [2, 7].

4. Эффект пиков квазиканалирования в угловом распределении пучка предсказан теоретически, промоделирован и подтвержден экспериментально в эксперименте FACET ускорительного комплекса SLAC для электронов и позитронов с энергией 20,35 ГэВ. Этот эффект позволяет непосредственно

наблюдать колебания частиц в условиях квазиканалирования в изогнутом кристалле, которые преобразуются в последовательность неравноотстоящих пиков в угловом распределении. Кроме того, предложен и продемонстрирован экспериментально метод измерения ориентации и радиуса изгиба кристалла при помощи измерения угловых положений пиков с использованием только одного углового распределения отклоненного пучка [7-9].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы для разработки системы коллимации на основе изогнутых кристаллов высокой эффективности на современных и будущих ускорителях и коллайдерах, в частности, на Большом адронном коллайдере с пучками высокой светимости и энергии (High Luminosity Large Hadron Collider и High Energy Large Hadron Collider) и на Будущем кольцевом коллайдере на протонных пучках (proton-proton Future Circular Collider). Также результаты могут быть использованы для вывода пучка на основе изогнутых кристаллов из тех же ускорителей и коллайдеров для проведения экспериментов при высоких и сверхвысоких энергиях на фиксированной мишени. Полученные результаты могут быть также использованы для генерации рентгеновского и гамма-излучения в изогнутых и периодически изогнутых кристаллах для применений в ядерной и медицинской физике.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых научных журналах:

1. Сытов, А. И. Применение изогнутого кристалла для вывода протонного пучка из накопительного кольца / А. И. Сытов // Вестн. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2014. – № 2. – С. 48–52.
2. Sytov, A. I. CRYSTAL simulation code and modeling of coherent effects in a bent crystal at the LHC / A. I. Sytov, V. V. Tikhomirov // Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research. Sect. B, Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2015. – Vol. 355. – P. 383–386.
3. Steering of Sub-GeV electrons by ultrashort Si and Ge bent crystals / A. I. Sytov, L. Bandiera, De D. Salvador, A. Mazzolari, E. Bagli, A. Berra, S. Carturan, C. Durighello, G. Germogli, V. Guidi, P. Klag, W. Lauth, G. Maggioni, M. Prest, M. Romagnoni, V. V. Tikhomirov, E. Vallazza // Eur. Phys. J. C. – 2017. – Vol. 77. – iss. 12, № art. 901.
4. Tikhomirov, V. V. The miscut angle influence on the future LHC crystal based collimation system / V. V. Tikhomirov, A. I. Sytov // Problems of Atomic Science and Techn. – 2012. – Vol. 57, iss. 1. – P. 88–92.
5. Tikhomirov, V. V. Multiple volume reflection in one crystal as an origin of significant scattering intensity and radiation power increase / V. V. Tikhomirov, A.

Sytov // Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research. Sect. B, Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2013. – Vol. 309. – P. 109–114.

6. Sytov, A. I. Crystal collimator systems for high energy frontier / A. I. Sytov, V. V. Tikhomirov, A. S. Lobko // Phys. Rev. Accelerators Beams. – 2017. – Vol. 20, iss. 7. – № art. 071001.

7. Planar channeling and quasichanneling oscillations in a bent crystal / A. I. Sytov, V. Guidi, V. V. Tikhomirov, E. Bagli, L. Bandiera, G. Germogli, A. Mazzolari // Eur. Phys. J. C. – 2016. – Vol. 76, iss. 2. – № art. 77. – P. 1–15.

8. Observation of Quasichanneling Oscillations / T. N. Wistisen, T. N. Wistisen, R. E. Mikkelsen, U. I. Uggerhøj, U. Wienands, T. W. Markiewicz, S. Gessner, M. J. Hogan, R. J. Noble, R. Holtzapple, S. Tucker, V. Guidi, A. Mazzolari, E. Bagli, L. Bandiera, A. I. Sytov // Phys. Rev. Letters. – 2017. – Vol. 119, iss. 2. – № art. 024801.

Статьи в сборниках научных трудов и материалов международных конференций:

9. Сытов, А. И. Разработка теории и методов управления движением и электромагнитным излучением частиц высоких энергий при помощи кристаллов / А. И. Сытов, В. В. Тихомиров // Фундаментальные и прикладные физические исследования, 2010–2016 : сб. тр. / Белорус. гос. ун-т, Ин-т ядерных проблем ; под ред. С. А. Максименко. – Минск, 2016. – С. 27–44.

Тезисы докладов и материалы конференций:

10. Сытов, А. И. Сравнение эффективностей каналирования и многократного объемного отражения в одном кристалле для коллимации пучков сверхвысоких энергий / А. И. Сытов, В. В. Тихомиров // Тезисы докладов XLIV международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 27–29 мая 2014 г. / Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, Науч.-исслед. ин-т ядерной физики им. Д. В. Скобельцына. – М., 2014. – С. 5.

11. Sytov, A. I. To the influence of single scattering on nuclei on the efficiency of the future LHC crystal-based collimation system / A. I. Sytov, V. V. Tikhomirov // Fundamental problems of nuclear physics, atomic power engineering and nuclear technologies : 64th Intern. conf. "NUCLEUS-2014", Minsk, 1–4 July 2014 : abstract. – Minsk, 2014. – P. 200.

12. Sytov, A. I. Crystal simulation code and new coherent effects in bent crystal at the LHC / A. I. Sytov, V. V. Tikhomirov // Charged & Neutral particles channeling phenomena – channeling 2014 : 6th Intern. conf., Capri (Naples), Italy, 5–10 Oct. 2014 : abstract. – Capri, 2014. – P. 248.

13. On the fabrication and experiments with micrometric and nanometric silicon plates for channeling experiments / G. Germogli, V. Guidi, A. Sytov, V. Tikhomirov // Radiation from relativistic electrons in periodic structures (RREPS-

15) : XI Intern. symp., Saint Petersburg, Russia, 6–12 Sept. 2015 : abstract. – Saint Petersburg, 2015. – P. 28–32.

14. Сытов, А. И. Ионизационные потери заряженных частиц высоких энергий в кристалле и их влияние на эффективность коллимации на основе изогнутых кристаллов / А. И. Сытов, И. В. Сафронов // Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии ИСМАРТ 2014 : Четвертая междунар. конф., Минск, Беларусь, 12–16 окт. 2014 г. : тез. докл. / Ин-т ядерных проблем Белорус. гос. ун-та [и др.]. – Минск, 2014. – С. 126–127.

15. Tikhomirov, V. V. Crystal collimator systems for high energy frontier [Electronic resource] / V. V. Tikhomirov, A. S. Lobko, A. I. Sytov // 7th International conference FCC week 2016 (Rome, Italy, 11–15 Apr. 2016) : abstracts. – Mode of access: <https://indico.cern.ch/event/438866/contributions/1084949/>. – Date of access: 13.04.2016.

16. Quasichanneling oscillations in the deflection angle distribution in a bent crystal / A. Sytov, V. Guidi, V. Tikhomirov, E. Bagli, L. Bandiera // 7th International conference channeling 2016 – charged & neutral particles channeling phenomena, Sirmione – Desenzano-del-Garda, Italy, 25–30 Sept. 2016 : abstracts. – Desenzano-del-Garda, 2016. – 1 p.

17. Sytov, A. I. Double crystal-based collimation system for high-energy accelerators / A. Sytov, A. Lobko, V. Tikhomirov // 7th International conference channeling 2016 – charged & neutral particles channeling phenomena, Sirmione – Desenzano-del-Garda, Italy, 25–30 Sept. 2016 : abstracts. – Desenzano-del-Garda, 2016. – 1 p.

18. Tikhomirov, V. V. Ab-initio Monte Carlo simulations of relativistic particle scattering and radiation in oriented crystals. / V. V. Tikhomirov, A. I. Sytov // 7th International conference channeling 2016 – charged & neutral particles channeling phenomena, Sirmione – Desenzano-del-Garda, Italy, 25–30 Sept. 2016 : abstracts. – Desenzano-del-Garda, 2016. – 1 p.

19. Observation of independence of the nuclear de-channeling length on the particle charge sign / V. Guidi, E. Bagli, A. Mazzolari, L. Bandiera, A. I. Sytov // 7th International conference channeling 2016 – charged & neutral particles channeling phenomena, Sirmione – Desenzano-del-Garda, Italy, 25–30 Sept. 2016 : abstracts. – Desenzano-del-Garda, 2016. – 1 p.

20. Steering efficiency and dechanneling of a Sub-GeV Electron Beam as a Function of Curvature and Energy / D. de Salvador, A. Mazzolari, G. Germogli, L. Bandiera, A. Sytov // 7th International conference channeling 2016 – charged & neutral particles channeling phenomena, Sirmione – Desenzano-del-Garda, Italy, 25–30 Sept. 2016 : abstracts. – Desenzano-del-Garda, 2016. – 1 p.

21. Relaxation of axially confined 400 GeV/c protons to planar channeling in a bent crystal / L. Bandiera, A. Mazzolari, E. Bagli, G. Germogli, V. Guidi, A. Sytov, I. V. Kirillin, N. F. Shul'ga, A. Berra, D. Lietti, M. Prest, D. De Salvador, E. Vallazza // 7th International conference channeling 2016 – charged & neutral particles channeling phenomena, Sirmione – Desenzano-del-Garda, Italy, 25–30 Sept. 2016 : abstracts. – Desenzano-del-Garda, 2016. – 1 p.

22. Experimental study of coherent interaction at high-energy in the presence of crystalline defects / E. Bagli, V. Guidi, A. Carnera, E. Vallazza, A. Berra, D. Bolognini, D. Lietti, G. Maggioni, A. Mazzolari, L. Bandiera, G. Germogli, A. Sytov, D. De Salvador, N. Argiolas, M. Prest, M. Dr. Bazzan // 7th International conference channeling 2016 – charged & neutral particles channeling phenomena, Sirmione – Desenzano-del-Garda, Italy, 25–30 Sept. 2016 : abstracts. – Desenzano-del-Garda, 2016. – 1 p.

23. On the influence of the PWO crystal structure on the CMS ECAL performance / V. V. Tikhomirov, V. Haurylavets, M. Korjik, A. Lobko, V. Mechinsky, A. Sytov, V. Uglov // 7th International conference channeling 2016 – charged & neutral particles channeling phenomena, Sirmione – Desenzano-del-Garda, Italy, 25–30 Sept. 2016 : abstracts. – Desenzano-del-Garda, 2016. – 1 p.

24. Sytov, A. I. A way to observe channeling and quasichanneling oscillations in bent crystals / A. I. Sytov, V. V. Tikhomirov // 5th International conference "Engineering of scintillation materials and radiation technologies" (ISMART 2016), Minsk, Belarus, 26–30 Sept., 2016 : abstracts. – Minsk, 2016 – P. 118.

25. Sytov A. I. Simulation of the FCC-hh double crystal-based collimation system [Electronic resource] / A. I. Sytov, A. S.Lobko, V. V. Tikhomirov // 7th International conference FCC week 2017 (Berlin, Germany, 29 May–2 June 2017): abstracts. – Mode of access: <https://indico.cern.ch/event/556692/contributions/2567949/>. – Date of access: 31.05.2017.

РЕЗЮМЕ

Сытов Алексей Игоревич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПУЧКАМИ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПРИ ПОМОЩИ КРИСТАЛЛОВ

Ключевые слова: изогнутые кристаллы, когерентные эффекты, каналирование, деканалирования, объемное отражение, система коллимации на основе кристаллов, пики деканалирования, пики квазиканалирования, Будущий кольцевой коллайдер.

Объект исследования: изогнутые кристаллы кремния, германия и вольфрама.

Предмет исследования: когерентные эффекты взаимодействия заряженных частиц – протонов, электронов и позитронов с изогнутыми кристаллами.

Цель диссертационной работы: исследование когерентных эффектов взаимодействия заряженных частиц с изогнутыми кристаллами с целью повышения эффективности их применения для коллимации, вывода пучка из ускорителя и генерации рентгеновского и гамма-излучения.

Полученные результаты и их новизна. Впервые проведено теоретическое и экспериментальное исследование процесса каналирования, деканалирования и объемного отражения в зависимости от радиуса изгиба кристаллов кремния и германия для электронов при энергиях меньше ГэВ. При этом в случае кристалла кремния получена рекордная эффективность каналирования для отрицательных частиц – больше 35 %, а в случае германия это первое исследование процесса каналирования при энергиях меньше ГэВ. Проведено теоретическое исследование, моделирование и оптимизация когерентных эффектов отклонения заряженных частиц при высоких и сверхвысоких энергиях, для которых впервые предложена двойная система коллимации и разработан вариант такой системы для Будущего кольцевого коллайдера. Теоретически предсказаны и промоделированы новые эффекты – пики деканалирования и квазиканалирования, причем второй эффект впоследствии был обнаружен экспериментально. Предложен метод использования пиков квазиканалирования для быстрого и точного измерения ориентации и радиуса кривизны изогнутого кристалла.

Рекомендации по использованию. Полученные результаты могут быть использованы для системы коллимации на основе изогнутых кристаллов на ускорителях и коллайдерах, для вывода пучка из ускорителя и для разработки новых источников рентгеновского и гамма-излучения.

Область применения: физика высоких энергий, ускорительная физика, ядерная физика, медицинская физика.

РЭЗІЮМЕ

Сытаў Аляксей Ігаравіч

**ПАВЫШЭННЕ ЭФЕКТЫЎНАСЦІ КІРАВАННЯ ПУЧКАМІ ЧАСЦІНАК
ВЫСОКІХ ЭНЭРГІЙ ПРЫ ДАПАМОЗЕ КРЫШТАЛЯЎ**

Ключавыя словы: выгнутыя крышталі, кагерэнтныя эфекты, каналіраванне, дэканаліраванне, аб'ёмнае адбіццё, сістэма калімацыі на аснове крышталяў, пікі дэканаліравання, пікі квазіканаліравання, Будучы кальцавы калайдар.

Аб'ект даследавання: выгнутыя крышталі крэмнію, германію і вальфраму.

Прадмет даследавання: кагерэнтныя эфекты ўзаемадзеяння зараджаных часцінак – пратонаў, электронаў і пазітронаў з выгнутымі крышталямі.

Мэта дысертацыйнай работы: даследаванне кагерэнтных эфектаў узаемадзеяння зараджаных часцінак з выгнутымі крышталямі з мэтай павышэння эфектыўнасці іх ужывання для калімацыі, вываду пучка з паскаральніка і генерацыі рэнтгенаўскага і гама-выпраменьвання.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Упершыню праведзена тэарэтычнае і эксперыментальнае даследаванне працэсу каналіравання, дэканаліравання і аб'ёмнага адбіцця ў залежнасці ад радыуса выгібу крышталяў крэмнію і германію для электронаў пры энергіях менш за ГэВ. Пры гэтым у выпадку крышталя крэмнію атрымана рэкордная эфектыўнасць каналіравання для адмоўных часцінак – больш за 35 %, а ў выпадку германію гэта першае даследаванне працэсу каналавання пры энергіях менш за ГэВ. Праведзена тэарэтычнае даследаванне, мадэляванне і аптымізацыя кагерэнтных эфектаў адхілення зараджаных часцінак пры высокіх і звышвысокіх энергіях, для якіх упершыню прапанавана падвойная сістэма калімацыі і распрацаваны варыянт такой сістэмы для Будучага кальцавога калайдара. Тэарэтычна прадказаны і прамадэляваны новыя эфекты – пікі дэканаліравання і квазіканаліравання, прычым другі эфект пасля быў выяўлены эксперыментальна. Прапанаваны метады выкарыстання пікаў квазіканаліравання для хуткага і дакладнага вымярэння арыентацыі і радыусу крывізны выгнутага крышталя.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны для сістэмы калімацыі на аснове выгнутых крышталяў на паскаральніках і калайдарах, для вываду пучка з паскаральніка і для распрацоўкі новых крыніц рэнтгенаўскага і гама-выпраменьвання.

Вобласць прымянення: фізіка высокіх энергій, паскаральная фізіка, ядзерная фізіка, медычная фізіка

ABSTRACT

Sytov Alexei Igorevich

**INCREASE OF THE EFFICIENCY OF BEAM STEERING
OF HIGH ENERGY PARTICLES BY MEANS OF CRYSTALS**

Keywords: Bent crystals, coherent effects, channeling, dechanneling, volume reflection, crystal-based collimation system, dechanneling peaks, quasi-channeling peaks, Future Circular Collider.

Object of investigation: silicon, germanium and tungsten bent crystals.

Subject of investigation: coherent effects of the interaction of charged particles, namely protons, electrons and positrons with bent crystals.

Objective of the thesis: investigation of coherent effects of interaction of charged particles with bent crystals with the purpose of the increase of the efficiency of their application for collimation, beam extraction from an accelerator and generation of X-ray and gamma radiation.

Results obtained and their novelty. For the first time, a theoretical and experimental study of channeling, dechanneling, and volume reflection in dependence on the bending radius of silicon and germanium crystals for electrons at energies less than GeV was carried out. Herewith, in the case of a silicon crystal, a record channeling efficiency for negative particles of more than 35 % was obtained as well as in the case of germanium this was the first study of the channeling process at energies less than GeV. A theoretical study, simulation and optimization of coherent effects of deflection of charged particles at high and ultrahigh energies was carried out. For these effects a double collimation system was firstly proposed and a variant of such a system for the Future Circular Collider was developed. The new effects were been predicted theoretically and simulated, namely dechanneling and quasi-channeling peaks. The second effect was subsequently observed experimentally. A method for application of quasi-channeling peaks for a fast and accurate measurement of the alignment and radius of curvature of a bent crystal is proposed.

Recommendations for use. The results obtained can be used for a crystal-based collimation system at accelerators and colliders, for beam extraction from an accelerator, and for the development of new sources of x-ray and gamma radiation.

Application field: high-energy physics, accelerator physics, nuclear physics, medical physics.

Сытов Алексей Игоревич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПУЧКАМИ
ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПРИ ПОМОЩИ КРИСТАЛЛОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности

01.04.02 – Теоретическая физика

Подписано в печать . Формат .
Бумага офисная. Печать офсетная. Печ. л.
Учетн. изд. л. Тираж экз. Заказ №

ГНУ «Институт физики им. Б. И. Степанова
Национальной академии наук Беларуси»
220072, Минск, пр. Независимости, 68.
Отпечатано на ризографе ГНУ «Институт физики
им. Б. И. Степанова НАН Беларуси»