



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-2013-83

На правах рукописи

СМИРНОВ
Александр Валентинович

**ДИНАМИКА ПУЧКОВ В ИОННЫХ НАКОПИТЕЛЯХ
ПРИ ОПРЕДЕЛЯЮЩЕМ ВЛИЯНИИ ПРОЦЕССОВ
РАССЕЯНИЯ**

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 2013

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КОРЧУГАНОВ
Владимир Николаевич

доктор физико-математических наук,
НИЦ "Курчатовский институт",
г. Москва

ШИРКОВ
Григорий Дмитриевич

доктор физико-математических наук,
Объединенный институт ядерных
исследований, г. Дубна Московской обл.

СЕНИЧЕВ
Юрий Валерьевич

доктор физико-математических наук,
Forschungszentrum Juelich GmbH,
г. Юлих, Германия

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:

Институт ядерной физики
им. Г. И. Будкера, г. Новосибирск

Защита диссертации состоится « _____ » _____ 2013 г. в
« _____ » часов на заседании диссертационного совета Д720.001.03 при
Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных
исследований.

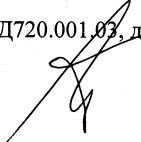
Адрес: 141980, г. Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д720.001.03, доктор

физико-математических наук, профессор


Ю. А. Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

С развитием ускорителей заряженных частиц появились задачи по формированию долговременной устойчивости циркулирующего ионного пучка. Данные вопросы стали особо актуальны при проектировании накопителей заряженных частиц, когда движение частиц в кольце является устойчивым в линейном приближении, а время жизни пучка определяется, в основном, длительными процессами, изменяющими шестимерный фазовой объем пучка.

На начальном этапе проектирования циклических ускорителей осуществляется разработка оптической структуры кольца, что позволяет получить устойчивое движение частиц, т.е. получить замкнутую орбиту. Для решения этой задачи применяются широко распространенные программные продукты, которые позволяют в линейном приближении получить основные параметры оптической структуры кольца и определить начальные параметры циркулирующего пучка.

На следующем этапе проводится исследование различного рода нелинейных неустойчивостей, приводящих к уменьшению времени жизни пучка. К ним относится анализ нелинейностей оптической структуры, ошибки в формировании магнитных и электрических полей, действующих на циркулирующий пучок. Далее, необходимо оценить динамическую апертуру ускорителя, ограничивающую свободное пространство для циркуляции пучка. Проводится исследование влияния эффектов пространственного заряда циркулирующего пучка, приводящее к сдвигу бетатронных колебаний и пересечению структурных резонансов, что тоже может приводить к гибели пучка. Для пучков высокой интенсивности очень важным вопросом является исследование динамического вакуума, когда, вследствие попадания перезаряженных частиц на стенки вакуумной камеры, происходит резкое ухудшение вакуума, что так же приводит к сокращению времени жизни пучка.

После того, как проведенные исследования позволяют получить устойчивое движение пучка, необходимо оценить время жизни пучка за счет медленных процессов, которые приводят к изменению эмиттанса пучка. Актуальность исследования основных процессов рассеяния пучка в ионных накопителях (внутрипучковое рассеяние, рассеяние на атомах остаточного газа и внутренней мишени) определяется тем, что увеличение эмиттанса изменяет во времени условия эксперимента, что необходимо учитывать при его планировании, а так же может приводить к потере частиц пучка на акцептансе накопителя.

При проектировании ускорителей заряженных частиц, как правило, стараются обеспечить необходимые вакуумные условия, чтобы влияние

рассеяния пучка на остаточном газе было незначительным. Однако, при некоторых условиях эксперимента, например, при маленькой энергии частиц, влияние рассеяния пучка на остаточном газе может оказаться определяющим.

Для получения максимальной светимости в экспериментах с внутренней мишенью необходимо увеличивать плотность вещества мишени, что так же приводит к снижению времени жизни пучка и уменьшению интегральной светимости. Для оптимизации параметров эксперимента важно учитывать геометрические параметры мишени, так как это приводит к изменению распределения частиц в пучке и варьированию эффективной светимости.

Другим способом повышения светимости эксперимента является повышение плотности циркулирующего пучка. Однако, наряду с усилением эффектов пространственного заряда пучка, заметную роль начинает играть внутripучковое рассеяние, которое представляет собой кулоновское рассеяние частиц друг на друге.

Данный процесс кулоновского рассеяния частиц является определяющим для пучков низкой интенсивности при сверхнизких температурах, когда возможно кристаллическое состояние циркулирующего пучка. Проблема получения кристаллических пучков особенно актуальна при достижении максимальной светимости в экспериментах с короткоживущими изотопами. Упорядоченное состояние циркулирующих частиц позволит достичь больших значений светимости в коллайдерах на встречных пучках даже для небольшого количества частиц.

Основные цели работы

Теоретическое и экспериментальное исследования динамики пучков заряженных частиц в ионных накопителях, при определяющем влиянии процессов рассеяния частиц пучка, таких как внутripучковое рассеяние, рассеяние на атомах остаточного газа и внутренней мишени. Теоретическое и экспериментальное исследования кристаллического состояния ионных пучков, формулировка условий для достижения упорядоченного состояния пучка.

Экспериментальное и численное исследования динамики пучков заряженных частиц в экспериментах с различными типами внутренних мишеней. Развитие методов моделирования взаимодействия пучка с веществом внутренних мишеней с учетом их геометрических факторов. Разработка новой численной модели «корпускулярной» мишени, которая позволяет точно оценивать взаимодействие частиц пучка с очень плотными частичками мишени в масштабах времени, значительно превышающих время их взаимодействия.

Разработка нового физико-математического метода моделирования динамики пучков в накопителях заряженных частиц под воздействием различных процессов, изменяющих шестимерный фазовый объем пучка, когда времена нагрева и охлаждения на несколько порядков больше времени обращения пучка в накопителе.

Исследование существующих и создание новых аналитических моделей внутripучкового рассеяния, оценка точности их применения в зависимости от методов вычисления. Создание алгоритма локальных взаимодействий для моделирования внутripучкового рассеяния при произвольном распределении частиц в пучке. Развитие теории внутripучкового рассеяния в области сверхнизких температур пучка и малой интенсивности частиц.

Личный вклад автора

Личное участие автора в работах, составляющих основу диссертации, является определяющим. Автор лично принимал активное участие в экспериментах с различными типами внутренних мишеней, представленных в работе, и выполнил анализ результатов с помощью теоретических и численных исследований. Данные исследования позволили описать ряд ранее полученных экспериментальных фактов и сформулировать условия для постановки новых экспериментов.

При его определяющем участии сформулированы условия достижения упорядоченного состояния пучков заряженных частиц, что позволило впервые получить упорядоченные протонные пучки на накопителе с электронным охлаждением. Лично автором разработаны новая аналитическая модель внутripучкового рассеяния и численный алгоритм на основе этой модели.

Он лично является ведущим автором программы BETACOOL для моделирования долговременных процессов в накопителях заряженных частиц. При его определяющем участии разработаны алгоритмы программы, использованные при получении результатов численного моделирования, представленных в работе.

Научная новизна

Впервые сформулированы условия для получения упорядоченных пучков, что позволило описать имеющиеся экспериментальные результаты и предсказать результаты новых экспериментов. На экспериментальной установке S-LSR в Университете г.Киото впервые получены упорядоченные протонные пучки.

Развита теория внутripучкового рассеяния в области низкой интенсивности и сверхнизких температур пучка. Проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса формирования кристаллических пучков. В ходе исследования впервые найдено

аномальное поведение продольной компоненты внутривпучкового рассеяния при сверхнизких температурах, что нашло хорошее согласие с имеющимися экспериментальными исследованиями.

Разработана новая численная модель плотной «корпускулярной» мишени, расположенной внутри накопителя, которая приводит к очень сильным потерям энергии частиц пучка. Данная модель впервые позволила точно воспроизвести динамику рассеяния частиц пучка при взаимодействии с атомами плотной мишени в масштабах времени, значительно превышающих время их взаимодействия. Для учета микроструктуры «корпускулярной» мишени впервые разработан алгоритм вычисления эффективной светимости, что позволило сформулировать дополнительные требования на геометрические параметры «корпускулярной» мишени с учетом предельных параметров детекторов.

Разработан новый физико-математический метод моделирования динамики частиц в циклических накопителях под воздействием долговременных процессов, когда скорости нагрева и охлаждения пучка велики, по сравнению со временем обращения пучка в накопителе. Данный метод включает в себя несколько алгоритмов расчета, которые используют различные способы описания динамики пучка, что позволяет проводить всесторонний анализ решаемых задач.

Для моделирования внутривпучкового рассеяния при произвольном распределении частиц пучка создана новая аналитическая модель. Алгоритм локальных взаимодействий, созданный на основе этой модели, получил хорошее подтверждение, в сравнении с экспериментальными данными. Данный алгоритм позволяет существенно расширить возможность моделирования динамики частиц при применении различных методов накопления и охлаждения пучков, приводящих к произвольному распределению частиц.

Практическая ценность работы

Развитие теории внутривпучкового рассеяния в области малых интенсивностей и низких температур пучка позволило описать ряд экспериментальных фактов, а так же сформулировать дополнительные условия для получения упорядоченных пучков. В итоге впервые получены упорядоченные протонные пучки на накопителе S-LSR (Япония). Использование упорядоченных пучков может существенно увеличить светимость в экспериментах со встречными пучками короткоживущих изотопов.

Проведен большой анализ экспериментальных данных, полученных на накопителях ESR (GSI, Германия) и COSY (FZJ, Германия) по рассеянию частиц циркулирующего пучка на атомах остаточного газа и на внутренних газовых мишенях, что позволило значительно улучшить понимание динамики пучка в этих экспериментах. Выполнено численное

моделирование и анализ экспериментов с внутренними мишенями в новых проектах FLAIR и PAX (FAIR, Германия), что позволило сформулировать дополнительные требования для экспериментов.

Для выбора параметров электронного охлаждения на накопителе HESR в проекте FAIR (GSI, Германия) разработаны аналитическая и численная модели «корпускулярной» мишени. Проведены численное и экспериментальное исследования взаимодействия пучка с плотной «корпускулярной» мишенью WASA на накопителе COSY (FZJ, Германия). Результаты моделирования показали хорошее согласие с экспериментальными данными. Для моделирования эффективной светимости в эксперименте PANDA (FAIR) создан специальный алгоритм, учитывающий микроструктуру светимости. Результаты моделирования позволили сформулировать дополнительные требования на параметры «корпускулярной» мишени.

Созданный физико-математический метод моделирования долговременных процессов динамики пучка нашел широкое применение в мировых научных центрах. На основе данного метода создан пакет прикладных программ BETACOOL, получивший широкое распространение и признание в научном мире, где использован как для объяснения большого количества экспериментальных фактов, так и проектирования новых ускорительных комплексов.

Созданная аналитическая модель внутривпучкового рассеяния и на ее основе алгоритм локальных взаимодействий для произвольного распределения частиц в пучке открывает новые возможности при моделировании динамики пучков, когда распределение пучка формируется сложными процессами. Разработанные модели внутривпучкового рассеяния использованы для моделирования динамики частиц и оптимизации работы ускорительного комплекса NICA (ОИЯИ, Дубна).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментального и численного исследований упорядоченного состояния протонных пучков на накопителях COSY (FZJ, Germany) и S-LSR (Kyoto University, Japan). Достижение упорядоченного состояния протонного пучка в экспериментах с электронным охлаждением на накопителе S-LSR.

2. Развитие теории внутривпучкового рассеяния в районе фазового перехода в кристаллическое состояние при сверхнизких температурах и малой интенсивности заряженных частиц, показавшее аномальное поведение продольной компоненты скорости нагрева. Формулировка зависимости продольного разброса по импульсам в пучке от количества циркулирующих частиц и условия по ограничению тока электронного пучка, когда возможно достижение упорядоченного состояния ионных пучков в накопителях с электронным охлаждением.

3. Результаты экспериментального и численного исследований процесса рассеяния пучков заряженных частиц в экспериментах с различными типами внутренних газовых мишеней на накопителях COSY (FZJ, Germany) и ESR (GSI, Germany). Численные модели процесса рассеяния заряженных частиц на атомах остаточного газа и газовых мишенях, используемые для анализа экспериментов с длительным временем обращения пучка в накопителе с учетом оптической структуры накопителя и геометрических параметров мишеней.

4. Результаты экспериментов и численного моделирования по взаимодействию пучков заряженных частиц с плотной «корпускулярной» (pellet) мишенью на накопителе COSY (FZJ, Germany). Численная модель «корпускулярной» мишени, которая позволяет точно оценивать взаимодействие частиц пучка с плотными частичками мишени в масштабах времени, значительно превышающих время взаимодействия. Аналитическая зависимость отношения эффективной светимости к пиковой и численный алгоритм вычисления эффективной светимости, учитывающий микроструктуру «корпускулярной» мишени и предельные параметры детекторов эксперимента PANDA (FAIR, Germany).

5. Новый физико-математический метод моделирования динамики пучков в ионных накопителях в случае, когда время развития процессов, действующих на пучок, на несколько порядков превосходит время обращения пучка в накопителе. Новый способ отображения суммарного эффекта активных процессов на проекциях фазового объема пучка, позволяющий описывать основные процессы рассеяния пучков с возможностью комбинирования нескольких алгоритмов моделирования динамики частиц.

6. Новая аналитическая модель внутривпучкового рассеяния для произвольного распределения частиц в пучке. Алгоритм локальных взаимодействий, разработанный на основе этой модели, и результаты его численного тестирования на основе имеющихся экспериментальных данных. Библиотека стандартных моделей внутривпучкового рассеяния, позволяющая производить исследование точности вычислений с помощью этих моделей.

Апробация работы

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на международных конференциях "Workshop on Beam Cooling and Related Topics" - COOL (Bad Honnef, Германия, 2001 г.; Yamanashi, Япония, 2003 г.; Galina, США, 2005 г.; Bad Kreuznach, Германия, 2007 г.; Lanzhou, КНР, 2009 г.; Алушта, Украина, 2011), "Particle Accelerator Conference" – PAC (Knoxville, США, 2005; Albuquerque, США, 2007; Vancouver, Канада, 2009), "European Particle Accelerator Conference" – EPAC (Lucerne, Швейцария, 2004; Edinburgh, Великобритания, 2006; Genoa, Италия, 2008),

“International Particle Accelerator Conference” – IPAC (Kyoto, Япония, 2010), “ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High- Intensity and High-Brightness Hadron Beams” – HB (Bensheim, Германия, 2004; Tsukuba, Япония, 2006; Morschach, Швейцария, 2010), “International Computational Accelerator Physics Conference” – ICAP (Санкт-Петербург, 2004), “International Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement” – CPOD (Upton, США, 2009), на Всероссийской конференция по ускорителям заряженных частиц – RuPAC (Обнинск, 2002; Дубна, 2004; Новосибирск, 2006; Звенигород, 2008; Протвино, 2010; Санкт-Петербург, 2012), а также обсуждались на научных семинарах Объединенного института ядерных исследований (г.Дубна), Института теоретической и экспериментальной физики (г.Москва), Института Ядерной Физики СО РАН (г.Новосибирск).

В период с 1999 по 2012 г.г. подготовлено порядка 30 отчетов для научных институтов, в которых выполнялись исследовательские работы с использованием программы BETACOOL: BNL (Upton, США), FNAL (Batavia, США), FZJ (Juelich, Германия), GANIL (Saclay, Франция), GSI (Darmstadt, Германия), RIKEN (Wako, Япония), ИТЭФ (Москва, Россия), Университет г.Киото (Япония), Университет г.Упсала (Швеция), MPI (Heidelberg, Германия). Результаты выполненных исследований представлялись на международных конференциях и на научных семинарах данных институтов.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Текст диссертации изложен на 190 страницах, включает 86 рисунков, 16 таблиц и список литературы из 179 наименований.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, дан краткий анализ проблем, решаемых в диссертации, и сформулированы цели исследований, вошедших в работу.

В первой главе обсуждаются основные процессы нагрева и методы охлаждения ионных пучков в циклических накопителях, когда характерные времена изменения шестимерного фазового объема пучка значительно превышают время обращения пучка в накопителе. Необходимость изучения таких процессов возникла в ходе развития ускорительной техники, когда стали вводиться в эксплуатацию накопители заряженных частиц, в которых движение пучка является устойчивым довольно значительное время.

В данной работе, в основном, рассматриваются долговременные процессы рассеяния на остаточном газе и на различных типах внутренних мишеней. При рассмотрении данных процессов используется общая теория рассеяния высокоэнергичных частиц пучка на веществе. Разница заключается в том, что рассеяние на остаточном газе распределено по всему накопителю, а внутренняя мишень сосредоточена в одной точке накопителя. В ходе выполнения работы решены вопросы моделирования рассеяния на мишени, когда необходимо учитывать реальное однократное столкновение частиц с материалом мишени при временах, значительно превышающих время обращения пучка в накопителе.

Заметная часть диссертационной работы посвящена исследованию процесса внутрипучкового рассеяния (ВПР), как при стандартных параметрах пучка в накопителе, так и при специфических условиях низкой интенсивности и температуры пучка. Все эти исследования позволили существенно развить теорию ВПР для параметров пучка, которые не могут быть описаны стандартной теорией ВПР. Были созданы модели ВПР для произвольного распределения пучка, исследовано anomальное поведение ВПР в области малых температур, что было подтверждено как численными расчетами, так и экспериментальными фактами.

В начале главы рассматриваются наиболее известные программные продукты, которые применяются при проектировании накопителей заряженных частиц. С их помощью осуществляются расчеты линейной оптики накопителя, учет нелинейных эффектов, динамических процессов, таких как динамическая апертура и динамический вакуум, влияние пространственного заряда ионного пучка и т.д.

Для моделирования долговременной устойчивости пучка существует несколько программных кодов, которые были применены для решения конкретных задач при долговременной динамике пучка. Программа BETACOOL является широко известной и наиболее универсальной программой для моделирования долговременных процессов. Она была использована для описания большого количества экспериментальных фактов на накопителях заряженных частиц по всему миру и для проектирования вновь создаваемых ускорительных комплексов.

Основными преимуществами программы BETACOOL являются: наличие хорошего графического интерфейса, что позволяет пользоваться программой не только авторам программы, но и другим специалистам в области ускорителей; наличие различных алгоритмов для расчета динамики пучка с возможностью их комбинирования при выполнении расчетов; библиотека программы включает наиболее характерные процессы нагрева и методы охлаждения пучков, что позволяет моделировать большинство задач в накопителях заряженных частиц для долговременных процессов.

Далее приводится описание основных алгоритмов программы. Алгоритм расчета характерных времен эволюции основных параметров пучка, был создан одним из первых в программе ВЕТАСОOL. В данном алгоритме предполагается, что пучок имеет гауссово распределение, и процесс моделирования осуществляется для среднеквадратичных параметров пучка: поперечных эмиттансов и продольного разброса по импульсам. Основным преимуществом данного алгоритма является высокая скорость вычислений, когда один шаг интегрирования может равняться миллионам оборотов пучка в накопителе.

Следующий алгоритм модельного пучка является некоторым аналогом метода Монте-Карло, но при этом является более простым в реализации, что упрощает написание программы и уменьшает время вычислений. Идея алгоритма заключается в том, что реальный пучок с большим количеством частиц заменяется на несколько тысяч модельных частиц с той же массой и зарядом, что и реальные частицы. В случае, когда необходимо учитывать коллективные эффекты, например, внутривпучковое рассеяние, предполагается, что распределение реальных частиц аналогично распределению модельных частиц. Используя полученное распределение, вычисляется воздействие на каждую модельную частицу. Основным преимуществом данного алгоритма перед алгоритмом вычисления характерных времен является возможность моделирования динамики пучка, если распределение частиц далеко от гауссова распределения.

Третий алгоритм трекинга осуществляет реальное движение частиц по оптической структуре накопителя. Данный алгоритм требует большого количества времени для выполнения вычислений. В связи с этим, он был использован, в основном, для моделирования кристаллических пучков. Для уменьшения затрат на вычисление кулоновских взаимодействий был использован метод молекулярной динамики, когда можно выбрать периодическое расположение частиц в продольном направлении в предположении, что в каждой ячейке частицы имеют одинаковое распределение.

Четвертый алгоритм предназначен для представления суммарного эффекта от процессов нагрева и охлаждения пучка на проекции шестимерного фазового объема пучка (Рис.6). На этой же проекции возможно отображать динамику параметров пучка и инварианты движения частиц, получаемых в ходе работы любого из предыдущих алгоритмов. Такой подход дает мощный инструмент для анализа процессов, происходящих в пучке.

В конце главы приводится описание методов охлаждения, реализованных в программе ВЕТАСОOL. Электронное и стохастическое методы охлаждения применяются в накопителях заряженных частиц в широких интервалах энергий и заряда циркулирующих частиц. Лазерное

охлаждение может быть использовано только для однозарядных ионов низкой энергии.

Для получения одномерных упорядоченных пучков на ряде накопителей было использовано электронное охлаждение. Однако, мощности электронного охлаждения не достаточно для получения многомерных кристаллов. Для получения кристаллов пока единственным кандидатом является лазерное охлаждение, позволяющее достичь наибольшей скорости охлаждения. Главным недостатком лазерного охлаждения является то, что при большой скорости охлаждения оно работает только в продольном направлении и не охлаждает в поперечном. Поперечное охлаждение при этом может осуществляться либо за счет обмена температурой между продольной и поперечной степенями свободы, вследствие внутривпучкового рассеяния, либо с использованием специальных оптических элементов, создающих связь между поперечной и продольной степенями свободы.

Во второй главе приведены экспериментальное и численное исследование взаимодействия пучка заряженных частиц с различными типами внутренних газовых мишеней. Для описания такого взаимодействия применяются различные численные модели мишеней. Гауссова модель предполагает, что пучок теряет энергию как целое, при взаимодействии с мишенью, т.е. продольное распределение пучка остается гауссовым. При этом происходит только смещение функции распределения и рост продольного разброса по импульсам. В поперечном направлении мишень рассматривает как бесконечно тонкая, т.е. частица получает определенный угол рассеяния при проходе через мишень.

Реальная модель учитывает каждый акт взаимодействия частицы с материалом мишени. При этом продольное распределение пучка становится несимметричным, что приводит к появлению хвостов распределения в продольном направлении. В поперечном направлении учитывается количество столкновений, которое испытывают частицы при проходе через мишень.

В зависимости от конструкции газовой мишени, приходится учитывать ее реальные геометрические размеры. В случае цилиндрической мишени, когда струя газа пересекает пучок сверху вниз, плотность мишени не одинакова в горизонтальном направлении и равна нулю, если пучок уходит из области мишени в горизонтальном направлении. Такая ситуация возможна, если точка мишени имеет горизонтальную дисперсию, а частицы пучка теряют достаточно много энергии при взаимодействии с мишенью.

Следует так же учитывать распределение частиц пучка в поперечном сечении. Для того, чтобы правильно оценить взаимодействие каждой частицы с цилиндрической мишенью, необходимо усреднить вероятность

ее нахождения по бетатронным колебаниям. Учет распределения плотности мишени и плотности вероятности частиц, совершающих бетатронные колебания, позволяет более точно оценить процесс взаимодействия пучка с мишенью.

Разработанные модели внутренних мишеней позволили описать эволюцию параметров ионных пучков в экспериментах на накопителях ESR (GSI, Германия), COSY (FZJ, Германия), ELISA (Aarhus University, Дания) и других экспериментов. При моделировании этих экспериментов так же учитывались процессы рассеяния на газе, внутривпучковое рассеяние, учет потери частиц за счет перезарядки ионов, потери на акцептансе накопителя и др.

На Рис.1 представлено сравнение экспериментальных данных, полученных на накопителе ESR с внутренней газовой мишенью, с результатами моделирования на программе BETACOOOL. Приведен рост продольного разброса по импульсам и поперечного эмиттанта при выключенной и включенной ксеноновой мишени. Размер мишени в моделировании был выбран 5 мм, а в качестве фитирующего параметра использовалась плотность мишени.

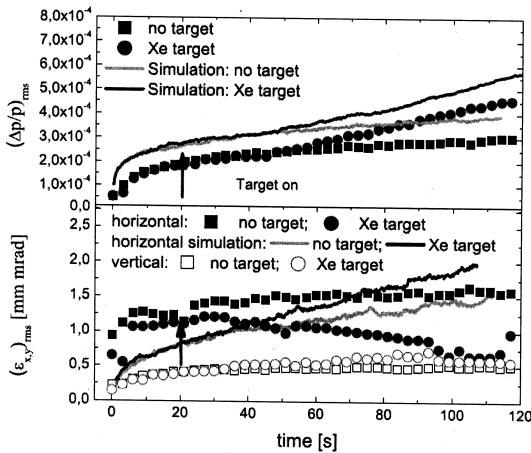


Рис.1. Сравнение эволюции продольного разброса и эмиттанта в эксперименте на ксеноновой мишени с результатами моделирования на BETACOOOL (эффективная плотность мишени 6.2×10^{11} атом/см²).

Созданные модели внутренних мишеней были использованы для расчетов экспериментов на новых проектах: проект PAX и FLAIR (FAIR, Германия). В некоторых проектах для подавления рассеяния на мишени

планируется применение электронного охлаждения, что так же было использовано при выполнении расчетов. Были сформулированы основные требования на параметры мишеней и оптику накопителей для достижения максимального эффекта при использовании метода электронного охлаждения.

В третьей главе представлены результаты по исследованию взаимодействия заряженных пучков с «корпускулярной» (pellet) мишенью, которая представляет собой поток замороженных частиц водорода. Такая конструкция мишени позволяет достичь средней плотности до $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$, что недостижимо для других типов мишеней. Использование подобной мишени планируется в эксперименте PANDA на накопителе HESR проекта FAIR (GSI, Германия).

Применение очень плотной мишени приводит к нескольким задачам, которые необходимо решить при планировании эксперимента. Во-первых, из-за взаимодействия пучка, с плотными корпускулами мишени заряженные частицы теряют большое количество энергии, что приводит к их гибели. Существующие в настоящее время методы охлаждения не позволяют компенсировать потерю энергии, поэтому для долговременной стабильности пучка планируется использовать высокочастотные резонаторы, которые осуществляют удержание частиц в продольном фазовом пространстве.

Второй задачей является то, что необходимо точно оценить взаимодействие частиц пучка с материалом мишени в масштабах времени, значительно превышающих время взаимодействия. Так, время пролета пучка через мишень составляет порядка 10^{-9} сек, а полное время эксперимента с «корпускулярной» мишенью планируется около 10^4 сек. Для этого, необходимо было разработать специальную численную модель мишени, которая бы правильно оценивала реальные столкновения частиц пучка с плотным веществом мишени, учитывающие как геометрические факторы мишени, так и полное время эксперимента.

При моделировании динамики пучка, как правило, используют среднюю плотность мишени, т.е. распределенную по всему объему потока корпускул. В случае однократного пролета корпускулы, эффективная плотность мишени вычисляется, исходя из позиции корпускулы внутри пучка. Очевидно, что для гауссова распределения максимум эффективной толщины соответствует позиции корпускулы в центре пучка. Для круглой корпускулы с радиусом r_p , расположенной в нулевой координате, ее длина вдоль траектории ионов с координатами (x, y) есть $2\sqrt{r_p^2 - x^2 - y^2}$.

Соответственно, для пучка с гауссовым распределением в обеих поперечных плоскостях может быть получена зависимость эффективной плотности от параметров пучка и мишени:

$$\rho_{eff,max} = \frac{\mathfrak{R}}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \int_{-r_p}^{r_p} \int_{-\sqrt{r_p^2-x^2}}^{\sqrt{r_p^2-x^2}} 2\sqrt{r_p^2-x^2-y^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) dy dx, \quad (1)$$

где $\mathfrak{R} = 4.26 \cdot 10^{22}$ атом/см³ есть плотность замороженного водорода, σ_x и σ_y – горизонтальный и вертикальный среднеквадратичный размеры пучка. Данная формула правильна для вычисления максимальной эффективной светимости, когда только одна корпускула пересекает пучок в каждый момент времени, т.е. вертикальный размер пучка существенно меньше, чем расстояние между корпускулами.

Эффективная плотность «корпускулярной» мишени для гауссова распределения ионов имеет следующий вид:

$$\rho_{eff,mean} = \frac{\langle \mathfrak{R} \rangle}{\sqrt{2}\pi\sigma_x} \int_{-r_f}^{r_f} 2\sqrt{r_f^2-x^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) dx. \quad (2)$$

Отношение между максимальной плотностью мишени (1) и эффективной (2) есть функция среднеквадратичного размера пучка ионов, и может быть использовано, как критерий для выбора оптимального эмиттанта для проведения эксперимента.

Такой подход был использован при выборе параметров системы электронного охлаждения накопителя HESR, которая позволяет подавить рост поперечного эмиттанта пучка из-за рассеяния на мишени. Однако для учета реального распределения во времени событий, полученных в эксперименте, необходимо учитывать особенности конструкции детекторов, когда пиковая светимость при одном взаимодействии пучка с корпускулой мишени может значительно превышать среднюю, что может привести к потере полезных событий из-за перегрузки детекторов.

Для решения поставленных задач необходимо было провести экспериментальные исследования на существующих установках и сравнить их с результатами численного моделирования, полученными на основе специально созданных алгоритмов.

Экспериментальные исследования по взаимодействию протонных пучков с «корпускулярной» мишенью были проведены на установке WASA накопителя COSY (FZJ, Германия) (Рис.2). В данных экспериментах не было возможности использовать систему электронного охлаждения, т.к. она используется только на энергии инжекции пучка. Однако, проведенные исследования позволили проверить основные алгоритмы программы BATACOOL, специально созданные для моделирования эксперимента PANDA.

Для решения первой задачи по компенсации больших потерь энергии частиц на корпускулах мишени в программе BATACOOL был реализован алгоритм движения модельных частиц в продольном фазовом

пространстве для произвольного распределения напряжений высокочастотных резонаторов. Правильность работы этого алгоритма была проверена как в сравнении с экспериментальными данными, так и в сравнении с результатами расчетов широко известной программы ESME (FNAL, США).

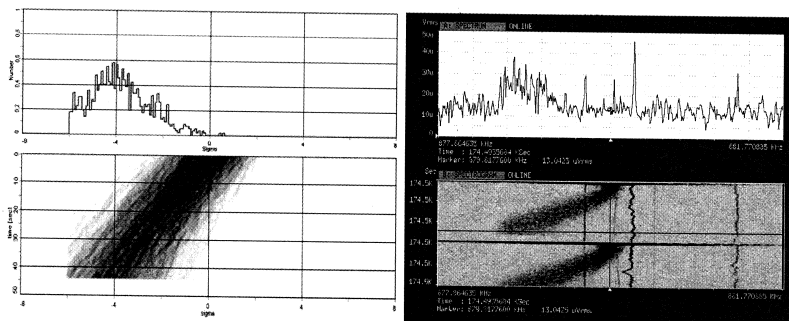


Рис.2. Сравнение моделирования (левые графики) с экспериментом (правые графики) на мишени WASA накопителя COSY (Германия). Нижние графики описывают эволюцию распределения продольного разброса по импульсам, а верхние показывают данное распределение в конце очередного цикла.

Для решения второй задачи был использован метод моделирования, когда вычисляется вероятность столкновения частицы с отдельной корпускулой мишени за один шаг интегрирования задачи, равный миллионам оборотов. Далее, количество полученных столкновений используется для расчета реального взаимодействия частицы с корпускулой. Такой подход позволил более правильно оценить потери энергии частиц, по сравнению с другими алгоритмами, которые просто используют среднюю плотность мишени.

Результаты моделирования по оценке эффективной светимости для различных типов детекторов представлены на Рис.3. Видно, что для вариантов исполнения детекторов, когда они не в состоянии принимать события при превышении их предела по пиковой светимости, эффективная светимость падает в несколько раз при выбранном изначально размере корпускул порядка 28 мкм (Рис.3 б,г).

Данные исследования позволили сформулировать дополнительные требования на параметры «корпускулярной» мишени и ограничения на параметры детекторов. Во-первых, необходимо стремиться к уменьшению размера корпускул до размера порядка 10 мкм, во-вторых, конструкция детекторов должна быть рассчитана на более высокое значение пиковой светимости, по сравнению со средней величиной в эксперименте.

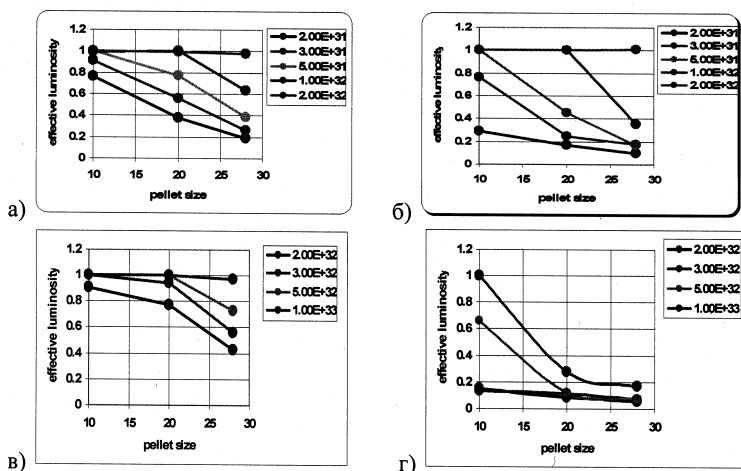


Рис.3. Эффективная светимость для различного типа ограничения детектора (в относительных единицах по отношению к средней): а) и в) детектор не может зарегистрировать событий больше, чем предел детектора, б) и г) детектор вообще не может регистрировать события, когда перегружен. Графики а) и б) приведены для режима эксперимента с высоким разрешением по энергии частиц, в) и г) с максимальной светимостью эксперимента. Различные кривые соответствуют различному пределу детекторов по величине пиковой светимости в единицах $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

В четвертой главе приведены основные положения стандартной теории внутрипучкового рассеяния (ВПР) в накопителях заряженных частиц. Развитая сегодня теория ВПР частиц в циклических накопителях основана на приближении бинарных столкновений. Эта модель справедлива вне зависимости от параметров накопителя и не требует дополнительных приближений, в зависимости от оптической структуры накопителя и значения кулоновского логарифма столкновений. В случае, когда время расчета не входит в задачу, эта модель дает наиболее точный результат. В соответствии с этой моделью, характерное время нагрева по трем степеням свободы ($u = x, y, z$) за счет ВПР для сгруппированного пучка выглядит как:

$$\frac{1}{\tau_u} = \frac{d \ln \epsilon_u}{dt} = \frac{N_b c_0 r_0^2 C_{Log}}{8\pi \beta^3 \gamma^4 \epsilon_x \epsilon_y \sigma_z \sigma_\delta} \frac{Z^4}{A^2} \langle H_u \rangle \quad (3)$$

где N_b – количество частиц в сгустке, c_0 – скорость света, r_0^2 – классический радиус иона, $\varepsilon_x \varepsilon_y \sigma_z$ – горизонтальный и вертикальный эмиттансы и продольный размер сгустка, β_γ – релятивистские факторы, функция H_u усредняется по оптическим элементам кольца и зависит от γ , продольного разброса σ_δ и оптических параметров кольца $\alpha_u \beta_u D_u D'_u$.

Понятие внутрипучкового рассеяния было введено Пивински (Piwinski) для протонных машин без каких-либо ограничений на величину температуры пучка, что делает возможным перенос энергии из продольной в поперечную, посредством столкновений. Позже, теорию ВПР расширил Мартини (Martini), введя изменения бетатронных функций и дисперсионной функции вдоль оптической структуры кольца. Другое приближение для внутрипучкового рассеяния, использующее матричный формализм рассеяния из квантовой электродинамики, использовали Бьёркен (Bjorken) и Мтингва (Mtingwa).

В диссертации представлено подробное исследование существующих моделей ВПР и дана оценка границ их применимости. Однако стандартная теория ВПР хорошо описывает лишь поведение пучков, в которых распределение в шестимерном фазовом объеме близко к гауссовому. Для моделирования динамики пучков, имеющих произвольное распределение, была разработана новая кинетическая модель локальных взаимодействий.

Изменение импульса модельной частицы после прохождения оптического элемента кольца длиной l_k рассчитывается в соответствии с уравнением Ланжевена:

$$P_i(t + \Delta t) = P_i(t) - K_i P_i(t) \Delta t \frac{l_k}{C} + \sqrt{\Delta t \frac{l_k}{C}} \sum_{j=1}^3 C_{i,j} \xi_j, \quad (4)$$

где Δt – шаг интегрирования, ξ_j есть случайные числа гауссового распределения с единичной дисперсией. Полное изменение импульса рассчитывается по всем оптическим элементам вдоль кольца периметром C . Коэффициенты $C_{i,k}$ связаны с компонентами тензора диффузии следующим образом:

$$\sum_{k=1}^3 C_{i,k} C_{j,k} = D_{i,j}. \quad (5)$$

Компоненты вектора сил и тензора диффузии рассчитываются в рамках модели Бьёркена-Мтингвы:

$$K_i = \frac{A}{\langle P_i^2 \rangle_0} \int_0^\infty d\lambda \frac{\lambda^{1/2}}{\sqrt{\det \Lambda}} \Lambda_{ii}^{-1}, \quad D_{i,j} = A \int_0^\infty d\lambda \frac{\lambda^{1/2}}{\sqrt{\det \Lambda}} (\delta_{ij} \text{Tr} \Lambda^{-1} - \Lambda_{ij}^{-1}). \quad (6)$$

где матрица $\Lambda = \Lambda + L$, I – единичная матрица, а матрица L вычисляется через среднеквадратичные параметры пучка и структурные функции накопителя, δ_{ij} есть символ Кронекера-Капелли.

Хотя время моделирования с помощью созданного алгоритма локальных взаимодействий значительно увеличивается, по сравнению со стандартными алгоритмами, разработанный алгоритм локальных взаимодействий открывает новые возможности при моделировании динамики пучков. Сравнение результатов моделирование с экспериментальными данными, полученными на накопителе RHIC (BNL, США), показало хорошее согласие и дало объяснение экспериментальным данным (Рис.4,5).

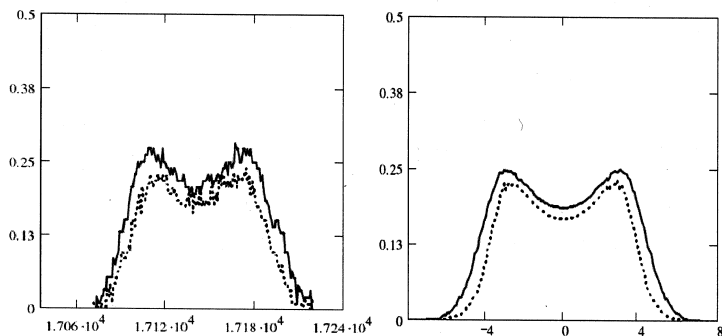


Рис.4. Эволюция продольного разброса по импульсам в экспериментах на накопителе RHIC. Сравнение экспериментальных данных (левый график) и расчетов с помощью модели локальных взаимодействий (правый график). Синяя кривая – начальное распределение, красная – распределение после 2-х часов циркуляции пучка.

Стандартные модели ВПР были использованы для моделирования динамики пучков в различных накопителях, в том числе в коллайдере проекта NICA. В коллайдере предполагается использовать интенсивные встречные пучки $^{238}\text{U}^{92+}$ для достижения высокого уровня светимости (примерно $10^{27} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$) в интервале энергий $1 \div 4.5$ ГэВ/н.

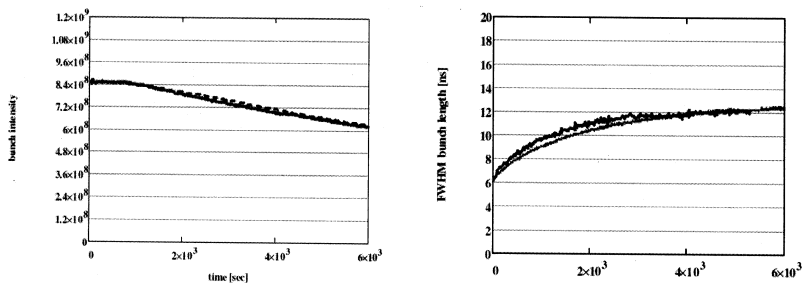


Рис.5. Эволюция количества частиц (левый график) и среднеквадратичной длины сгустка (правый график). Синяя кривая – эксперимент, красная – расчет с помощью модели локальных взаимодействий.

Без какого-либо охлаждения в течение эксперимента эмиттанс и длина сгустка растут, вследствие ВПР (Таблица 1). В этом случае, для обеспечения высокой средней светимости, пучки должны обновляться в коллайдере с интервалом 2 – 3 минуты (один сгусток за 4 – 5 с). При этом, средняя светимость, примерно в два раза ниже пиковой. Такой режим работы коллайдера вполне приемлем, однако он требует постоянной работы инжекционного комплекса.

Таблица 1. Параметры пучка в коллайдере NICA.

Периметр кольца, м	503.04		
Число сгустков	23		
Среднеквадратичная длина сгустка, м	0.6		
Бета-функция в точке встречи, м	0.35		
Акцептанс кольца	40 μ м мрад		
Продольный акцептанс, $\Delta p/p$	± 0.010		
Гамма критическая, γ_{tr}	7.091		
Энергия ионов, ГэВ/н	1.0	3.0	4.5
Число ионов в сгустке	$2.75 \cdot 10^8$	$2.4 \cdot 10^9$	$2.2 \cdot 10^9$
Среднекв. разброс по импульсу, 10^{-3}	0.62	1.25	1.65
Среднекв. эмиттанс пучка (гориз/верт), ненормализованный, μ -мм-мрад	1.1/ 1.01	1.1/ 0.89	1.1/ 0.76
Светимость, $10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$	$1.1 \cdot 10^{25}$	$1 \cdot 10^{27}$	$1 \cdot 10^{27}$
Характерные времена роста ВПР, сек	186	702	2540

Проведенные численные исследования показали необходимость использования в проекте NICA методов охлаждения пучков (электронного и стохастического) для подавления нагрева пучка, вследствие ВПР и

позволили сформулировать дополнительные требования к оптической структуре коллайдера.

В пятой главе продолжены исследования теории ВПР в области малых интенсивностей пучка и сверхнизких температур в системе отсчета пучка, когда стандартные теории не могут описать взаимодействие частиц. Изложена теория кристаллического состояния заряженных пучков в циклических накопителях и требования к оптической структуре накопителя, необходимые для их получения. Описан метод молекулярной динамики, который использован в программе BETACOOL для расчета кулоновского взаимодействия между частицами.

Приведены результаты экспериментов на различных накопителях, которые имели целью получение кристаллических пучков. Описаны экспериментальные результаты по получению кристаллического состояния ионов магния на накопителе S-LSR (Университет г.Киото) с помощью лазерного охлаждения. Предложены и проверены методики осуществления поперечного охлаждения при наличии только продольной силы трения лазерного охлаждения.

Развита теория упорядоченного состояния ионных пучков. Численные и экспериментальные исследования показали правильность ранее полученного И.Н.Мешковым критерия перехода пучка в упорядоченное состояние:

$$\Gamma_2 = \frac{Z^2 e^2}{T_{\parallel} \sigma_{\perp}} > \pi \quad (7)$$

где Ze – заряд иона, T_{\parallel} – продольная температура пучка, σ_{\perp} – поперечный размер пучка. Для учета влияния пространственного заряда электронного пучка на основе критерия Γ_2 был сформулирован дополнительный критерий, который описывает максимальное значение тока электронного пучка системы охлаждения, когда при заданном угле между осями ионного и электронного пучков Θ возможно достижение упорядоченного состояния ионного пучка:

$$I_e < I_0 \gamma \beta^2 \frac{a_e^2 r_i^{1/2}}{(\Theta \beta_x)^{5/2}}, \quad (8)$$

где $r_i = Z^2 e^2 / A m_p c^2$ классический радиус иона, m_p – масса протона, a_e – радиус электронного пучка, β_x – среднее значение бета функции в секции охлаждения, $I_0 = m_e c^3 / e = 17$ кА.

Было показано, что когда параметры охлажденного ионного пучка определяются равновесием между электронным охлаждением и ВПР, поперечный эмиттанс растет с количеством частиц как $N^{0.6}$, а продольный

разброс по импульсам как $N^{0.3}$. При наличии дополнительных эффектов (например, рассеяние на остаточном газе), определяющих равновесие с электронным охлаждением, возможно отклонение от этих зависимостей. При определенных условиях дополнительный нагрев ионного пучка мешает получению упорядоченных пучков, что было продемонстрировано в экспериментах на накопителе S-LSR.

Проведен всесторонний анализ поведения ВПР при низких температурах и интенсивностях пучка. Резкое уменьшение продольного разброса по импульсам при снижении числа циркулирующих частиц, наблюдаемое в большом количестве экспериментов, может быть объяснено, исходя из специфического поведения ВПР в области низких температур. Численное моделирование методом молекулярной динамики показывает, что скорость нагрева, вследствие ВПР, достигает своего максимума, когда выполняется условие для достижения кристаллического состояния ионного пучка. Такое поведение наблюдалось экспериментально на накопителе ESR (GSI, Германия).

Моделирование ВПР с помощью молекулярной динамики для упорядоченных пучков показывает anomalous поведение продольной компоненты (Рис.6а). Для параметров накопителя S-LSR канал с малым значением скорости нагрева для продольной компоненты появляется, начиная с количества частиц меньше 5×10^4 , что не описывается стандартными моделями ВПР (Рис.6б).

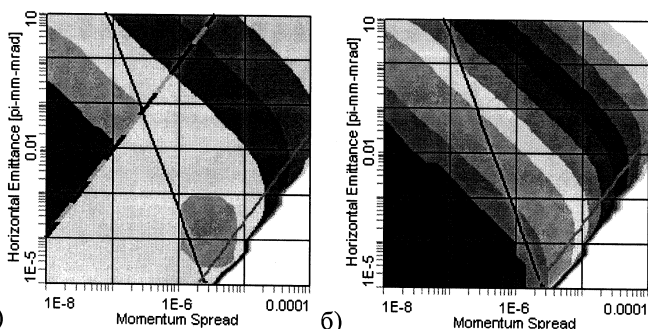


Рис.6. Продольные компоненты скорости нагрева на проекции фазового объема пучка, вследствие ВПР, для накопителя S-LSR. $N = 10^3$. Расчет с помощью (а) молекулярной динамики, (б) стандартной модели Мартини. Черная линия – критерий (7), разным цветом обозначены области одинакового нагрева, вследствие ВПР.

Исследование ВПР при низких температурах и интенсивностях пучка показало, что anomalous поведение продольной компоненты скорости нагрева возникает в области проекции фазового объема пучка, которое

может быть определено из разных углов наклона критерия упорядоченного состояний и линий, одинаковых скоростей нагрева, вследствие ВПР. Для поперечной компоненты скорости нагрева, вследствие ВПР, расчеты с помощью молекулярной динамики не показали какого-либо аномального поведения.

В шестой главе выполнен анализ экспериментальных данных по получению упорядоченных протонных пучков. С помощью развитой теории ВПР в области низких температур и интенсивностей пучка были предложены пути получения упорядоченных пучков для легких ионов.

Впервые аномально низкая температура протонного пучка была получена в экспериментах на накопителе НАП-М (ИЯФ, г.Новосибирск), что позволило сформулировать гипотезу кристаллического состояния такого пучка (В.В.Пархомчук). Все это послужило толчком для развития теории кристаллических пучков в накопителях заряженных частиц.

Для ответа на вопрос о достижении упорядоченного состояния (одномерного кристалла) на накопителе НАП-М было проведено численное моделирование с помощью метода молекулярной динамики. Моделирование показало, что упорядоченное состояние на накопителе НАП-М возможно для количества частиц менее 2×10^6 , хотя в экспериментах аномально низкая температура пучка достигалась при количестве частиц, начиная со значения 10^7 .

В экспериментах на НАП-М зависимость продольного разброса по импульсам имела линейную зависимость от количества частиц $\Delta p/p \approx N^{1.0}$, что так же указывает на невозможность получения упорядоченных протонных пучков на НАП-М. Другим важным критерием достижения упорядоченного состояния является существование фазового перехода, который заключается в резком уменьшении продольного разброса по импульсам, при снижении числа циркулирующих частиц, который так же не наблюдался в экспериментах на НАП-М.

Для получения упорядоченных протонных пучков была проведена серия экспериментов на накопителях COSY (FJZ, Германия) и S-LSR. Результаты экспериментов на COSY очень похожи на эксперименты на НАП-М, при этом $\Delta p/p \approx N^{0.5}$. Было показано, что минимальный продольный разброс по импульсам зависит от тока электронного пучка и не зависит от количества частиц, когда количество частиц становится меньше 10^5 (Рис.7). Это означает, что равновесное состояние протонного пучка определяется только параметрами электронного пучка и протонный пучок не достигает упорядоченного состояния.

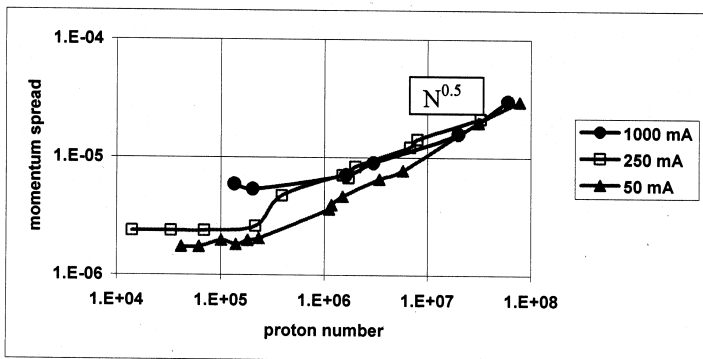


Рис.7. Зависимость продольного разброса по импульсам от количества частиц на накопителе COSY для различных значений электронного тока.

Подобные эксперименты были проведены на накопителе S-LSR, где вначале так же не удалось достичь упорядоченного состояния протонного пучка. В дальнейшем, на накопителе S-LSR, были проведены улучшения в работе накопителя и системы электронного охлаждения: оптимизированы положения ионного и электронного пучков; увеличена стабильность источника питания электронной пушки до значения меньше, чем 10^{-5} ; улучшена стабильность источников питания поворотных магнитов накопителя до значения меньше, чем 5×10^{-6} ; уменьшен фон шума при измерении продольного разброса по импульсам.

Все эти улучшения, в итоге, привели к тому, что в июле 2006 г. было получено резкое уменьшение продольного разброса по импульсам для количества частиц меньше 2000 (Рис.8), что хорошо согласовывалось с полученным критерием перехода в упорядоченное состояние (7). При этом, показатель степени, в зависимости продольного разброса по импульсам от количества частиц, уменьшился со значения $N^{0.38}$ до $N^{0.29}$. Численное моделирование так же показало возможность получения упорядоченного состояния при данных параметрах эксперимента. Данные результаты свидетельствовали, что впервые на накопителе S-LSR были получены упорядоченные протонные пучки.

В итоге проведенных исследований сформулированы необходимые условия для достижения упорядоченного состояния ионных пучков в накопителях с электронным охлаждением:

- Параметры пучка в процессе охлаждения должны достигнуть критерия перехода в упорядоченное состояние $\Gamma_2 = \pi$;
- Количество частиц должно быть меньше значения для перехода в структуру зиг-заг: $\lambda < 0.709$;

- Показатель степени, в зависимости продольного разброса от количества частиц $\Delta P/P \sim N^\alpha$, должен быть $\alpha < 0.3$;
- С уменьшением количества частиц должен наблюдаться фазовый переход, когда скачком уменьшаются продольный разброс по импульсам и/или поперечный размер пучка.

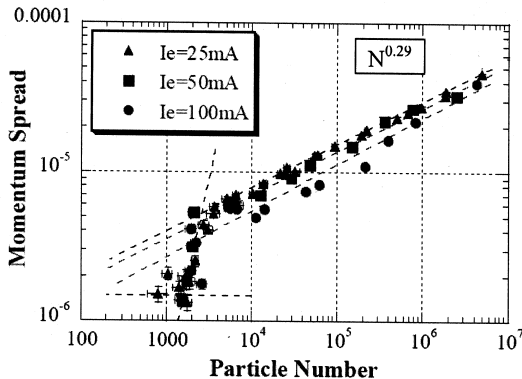


Рис. 8. Зависимость продольного разброса по импульсам от количества протонов для разных значений тока электронного охлаждения на накопителе S-LSR.

В Заключение приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Проведено всесторонне исследование упорядоченного состояния протонных пучков в накопителях заряженных частиц.

Выполнены теоретические и численные исследования возможности получения протонных пучков на различных накопителях заряженных частиц. Показано, что наблюдавшееся аномально низкое значение продольного разброса по импульсам протонного пучка на накопителе НАП-М (ИЯФ, г.Новосибирск), инициирующее многочисленные исследования данного феномена, не являлось упорядоченным состоянием протонного пучка.

Проведены эксперименты по получению упорядоченных протонных пучков на накопителе COSY (FZJ, Germany) и S-LSR (Kyoto University, Japan), позволившие определить необходимые требования к параметрам эксперимента.

На накопителе S-LSR впервые получены упорядоченные протонные пучки, что подтвердило предсказания развитой теории внутривпучкового

рассеяния в районе фазового перехода в кристаллическое состояние для сверхнизких температур и малой интенсивности пучка.

2. Проведено экспериментальное и численное моделирование процессов рассеяния пучков заряженных частиц в экспериментах с различными типами внутренних мишеней, как для существующих экспериментов, так и для вновь планируемых.

Проведены экспериментальные и численные исследования взаимодействия заряженных пучков с газовой мишенью на накопителях ESR (GSI, Германия) и COSY (FZJ, Германия), что позволило протестировать алгоритмы для моделирования процессов рассеяния и описать динамику пучков в этих экспериментах.

Численное моделирование экспериментов на накопителе ELISA (Aarhus University, Дания) позволило объяснить механизм потерь частиц в этих экспериментах и сформулировать дополнительные требования к параметрам электростатических накопителей ионов низкой энергии.

Данные исследования использованы для моделирования динамики пучка в экспериментах с внутренней мишенью на вновь проектируемом электростатическом ускорителе антипротонов низкой энергии USR (FLAIR, Германия), а так же в проекте PAX по получению поляризованных протонных пучков при взаимодействии с поляризованной газовой мишенью (FAIR, Германия).

3. Для описания экспериментов с внутренней «корпускулярной» мишенью впервые получено аналитическое выражение для вычисления эффективной плотности «корпускулярной» мишени и разработана численная модель мишени, которая позволяет точно оценивать взаимодействие частиц пучка с очень плотными частичками мишени в масштабах времени, значительно превышающих время взаимодействия.

Проведено экспериментальное исследование по взаимодействию пучка протонов с «корпускулярной» мишенью WASA на накопителе COSY (FZJ, Германия). Сравнение экспериментальных данных с расчетами показало хорошее согласие и позволило описать физику происходящих процессов.

Численное моделирование эксперимента с «корпускулярной» мишенью PANDA (FAIR, Германия) позволило выбрать параметры системы электронного охлаждения и ВЧ системы, формирующей продольную динамику пучка на накопителя HESR.

Специально для эксперимента PANDA получена аналитическая зависимость отношения эффективной светимости к пиковой, и разработан алгоритм вычисления эффективной светимости, учитывающий микроструктуру «корпускулярной» мишени и предельные параметры детекторов. Результаты данных исследований позволили сформулировать

дополнительные требования к параметрам «корпускулярной» мишени и ограничения на пиковую светимость детекторов.

4. Разработан новый физико-математический метод моделирования динамики пучков в накопителях заряженных частиц в условиях, когда время развития процессов, действующих на пучок, велико, по сравнению со временем обращения пучка в накопителе.

Разработаны и объединены в одном программном коде, получившем широкое распространение и признание во многих лабораториях мира, различные алгоритмы для расчета динамики частиц в накопителях, позволяющие одновременно оценивать и сравнивать параметры циркулирующих пучков при различных подходах в описание динамики частиц.

Способ описания процессов, действующих на пучок, в виде скоростей нагрева и охлаждения позволил впервые создать метод отображения суммарного эффекта активных процессов на проекции шестимерного фазового объема пучка.

Алгоритм модельного пучка позволил реализовать основную идею метода моделирования долговременных процессов в накопителях заряженных частиц, когда шаг интегрирования задачи во много раз больше времени обращения частиц в накопителе.

Алгоритм трекинга частиц по оптической структуре накопителя позволил построить новую аналитическую модель внутрипучкового рассеяния для произвольного распределения частиц и провести моделирование кристаллических пучков с учетом различных процессов нагрева и охлаждения.

5. Проведено детальное исследование стандартных моделей внутрипучкового рассеяния в накопителях заряженных частиц, развиты численные алгоритмы существующих моделей и создана новая аналитическая модель.

Исследованы особенности численного интегрирования существующих моделей внутрипучкового рассеяния и предложены способы улучшения точности их вычисления.

Разработана новая аналитическая модель внутрипучкового рассеяния и на ее основе создан алгоритм локальных взаимодействий для моделирования внутрипучкового рассеяния при произвольном распределении частиц в пучке. Сравнение численных результатов моделирования показало хорошее согласие с экспериментальными данными, ранее полученными на накопителе RHIC (BNL, США).

Проведено численное исследование внутрипучкового рассеяния для коллайдера проекта NICA (Дубна, ОИЯИ), что позволило определить дополнительные требования к оптической структуре и параметрам систем

электронного и стохастического охлаждения, которые предполагаются использовать для компенсации нагрева пучка, вследствие внутripучкового рассеяния.

6. Наличие нескольких алгоритмов моделирования пучка позволило провести подробный анализ глубокоохлажденных пучков низкой интенсивности.

Впервые применен метод молекулярной динамики для моделирования кристаллических пучков с применением существующих методов охлаждения, таких как лазерное и электронное. Проведенные исследования позволили сформулировать дополнительные требования к оптической структуре накопителя и к методам охлаждения для получения кристаллических пучков.

Проведены экспериментальные и численные исследования возможности получения кристаллических пучков на накопителе S-LSR (Университет г.Киото). Разработаны методы охлаждения пучков в поперечном направлении при использовании лазерного охлаждения.

Численные и экспериментальные исследования подтвердили правильность ранее полученного критерия (7) упорядоченного состояния (одномерного кристалла) ионного пучка. Впервые сформулирована и экспериментально исследована зависимость продольного разброса по импульсам от количества циркулирующих частиц, и получено условие по ограничению тока электронного пучка в системе охлаждения, когда возможно получение упорядоченных пучков в накопителях с электронным охлаждением. Сформулированы необходимые условия для достижения упорядоченного состояния ионных пучков в накопителях с электронным охлаждением.

Таким образом, развито новое направление в исследовании физики ионных накопителей, когда динамика пучка определяется процессами рассеяния, характерное время развития которых на несколько порядков превосходит время обращения пучка в накопителе. Развита теория внутripучкового рассеяния в районе фазового перехода в кристаллическое состояние при сверхнизких температурах и малой интенсивности ионных пучков, показавшая аномальное поведение продольной компоненты внутripучкового рассеяния при уменьшении количества частиц в накопителе.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 46 работах, из них 21 работа в рецензируемых научных журналах (зарубежных и российских, рекомендованных ВАК):

1. И.Н.Мешков, А.В.Смирнов, Е.М.Сыресин. Интенсивный электронный пучок в методе электронного охлаждения. Прикладная физика, 3 (2002) 8-24.
2. E. Syresin, N.Alekseev, V.Bykovsky, A. Smirnov et al. Project of TWAC electron cooler. Physica Scripta, 104, (2003) 160-163.
3. И.Н. Мешков, П.Р. Зенкевич, Н.Н. Алексеев, А.В. Смирнов и др. Перспективы применения электронного охлаждения в накопителе ионов ИТЭФ. Атомная энергия, 94 (2003).
4. В.Миттиг, П.Россель-Шома, А.Сидорин, А.Смирнов и др. Индивидуальная инжекция, охлаждение и группировка радиоактивных ионов в накопительном кольце. Атомная энергия, 94 (2003) 37-42.
5. И.Мешков, А.Сидорин, А.Смирнов, Е.Сыресин, И.Титкова, Б.Миттиг, П.Россель-Шома. Инжекция, охлаждение и накопление в кольце отдельных радиоактивных ионов. Атомная энергия, 94 (2003) 51-54.
6. И.Н.Мешков, А.В.Смирнов, Е.М.Сыресин, Г.В.Трубников, А.О.Сидорин. Кристаллические пучки в накопителях заряженных частиц. Письма в ЭЧАЯ, т. 1, № 3 (120), (2004) 32-38.
7. W. Mittig, P. Roussel-Chomaz, I.Meshkov, A. Smirnov, E. Syresin, A.Sidorin. Individual rare radioactive ion injection, cooling and storage in a ring. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, NIM A, 532, (2004) 262-270.
8. H. Tsutsui, T. Katayama, I. Meshkov, A. Sidorin, A. Smirnov, E. Syresin, D.Moehl. MD simulation of beam ordering. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, NIM A, 532 (2004) 371-375.
9. I.Meshkov, D.Moehl, T.Katayama, A.Smirnov et al. Numerical simulation of crystalline ion beams in storage ring. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, NIM A, 532 (2004) 376-381.
10. I. Meshkov, T. Katayama, A. Sidorin, A. Smirnov, E. Syresin, G. Trubnikov, H. Tsutsui. Simulation of crystalline beams in storage ring using molecular dynamics technique. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, NIM A, 558 (2006) 303-307.
11. I.N.Meshkov, A.O.Sidorin, I.A.Seleznev, A.V.Smirnov, E.V.Syresin, G.V.Trubnikov. BETACOOL program for simulation of beam dynamics in storage rings. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, NIM A, 558 (2006) 325-328.
12. И.Н.Мешков, Р.В.Пивин, А.О.Сидорин, А.В.Смирнов, Г.В.Трубников. Численное моделирование динамики частиц в накопителях с

- использованием программы BETACOOOL. Письма в ЭЧАЯ, т.3, №7 (136), (2006) 84-88.
13. A.V. Fedotov, B. Gålnander, V. N. Litvinenko, A. Smirnov et al. Experimental studies of the magnetized friction force. *Physical Review E*, 73, 066503 (2006) 9 p.
 14. T. Shirai, M. Ikegami, A. Noda, A. Smirnov, et al. One-Dimensional Beam Ordering of Protons in a Storage Ring. *Physical Review Letters*, 98, 204801 (2007) 4 p.
 15. D.Oeller, L. Barion, S. Barsov, A.Smirnov et al. Polarizing a stored proton beam by spin flip. *Physics Letters B*, 674, 4-5 (2009) 269-275.
 16. V.Gostishchev, C.Dimopoulou, A.Dolinskii, F.Nolden, M.Steck, A.Smirnov. Comparison of measurements and simulations of internal target effects in the ESR storage ring. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, NIM A*, 641 (2011) 12-18.
 17. С.А.Костромин, И.Н.Мешков, А.О.Сидорин, А.В.Смирнов и др. Применение методов охлаждения пучков в проекте NICA. Письма в ЭЧАЯ, т.9, №4-5(174-175), (2012) 537-562.
 18. Е.В.Ахманова, А.В.Иванов, А.Г.Кобец, А.В.Смирнов и др. Проект высоковольтной системы электронного охлаждения коллайдера NICA. Письма в ЭЧАЯ, т.9, №4-5(174-175), (2012) 597-603.
 19. M. Nakao, T. Hiromasa, H. Souda, A.Smirnov, et.al. Resonance coupling induced enhancement of indirect transverse cooling in a laser-cooled ion beam. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams* 15, 110102 (2012) 8 p.
 20. C. Welsch, A.Papash. O. Gorda, A.Smirnov et al. Ultra-low energy storage ring at FLAIR. *Hyperfine Interaction*, 213 (2012) 205–215.
 21. A.I.Papash, A.V.Smirnov, and C.P.Welsch. Nonlinear and long-term beam dynamics in low energy storage rings. *Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams* 16, 060101 (2013) 21 p.
 22. I.Meshkov, A.Sidorin, A.Smirnov, E.Syresin, T.Katayama. Ordered state of ion beams. Preprint RIKEN-AF-AC-34, Japan (2002).
 23. I.Meshkov, A.Sidorin, A.Smirnov, E.Syresin, T.Katayama, H.Tsitsui, D.Mohl. Simulation Study of Ordered Ion Beams. Preprint RIKEN-AF-AC-42, Japan (2003).
 24. I.N. Meshkov, A.V. Smirnov, E.M. Syresin. Intensive electron beam in electron cooling method. *Proceeding of SPIE*, 5025 (2003) 98-112.
 25. I.Meshkov, A.Smirnov, G.Trubnikov, R.Maier et al. Electron cooling application for luminosity preservation in an experiment with internal targets at COSY. Juel-4031, ISSN:0944-2952, Institute fur Kernphysik, Juelich, Germany (2003).

26. I. Meshkov, T. Katayama, A. Smirnov, E. Syresin et al. Ordered ion beam in storage rings. Proceeding of European Particle Accelerator Conference (EPAC 2004) Lucerne, Switzerland (2004) 2715-2717.
27. A.V. Fedotov, I. Ben-Zvi, Yu. Eidelman, A. Smirnov et al. IBS for Ion Distribution under Electron Cooling. Proceedings of Particle Accelerator Conference (PAC 2005), Oak Ridge National Laboratory, Knoxville, USA (2005) 4263-4265.
28. J.Dietrich, I.Meshkov, A.Sidorin, A.Smirnov, J.Stein. Studies of Beam Dynamics in Cooler Ring. Proceeding of International Workshop on Beam Cooling and Related Topics (COOL 2005), FNAL, Galena, USA, (2005) 154-158.
29. V. Gostishchev, C. Dimopoulou, K. Beckert, A. Smirnov et al. Internal Target Effects in the ESR Storage Ring with Cooling. Proceedings of European Particle Accelerator Conference (EPAC 2006), Edinburgh, UK (2006) 202-204.
30. A. Noda, S. Fujimoto, M. Ikegami, A. Smirnov et al. Ion Cooler Storage Ring S-LSR. Proceedings of European Particle Accelerator Conference (EPAC 2006), Edinburgh, UK, (2006) 237-239.
31. C.Welsch, A.Smirnov. Cooling Rates at Ultra-Low Energy Storage Rings as Calculated with BETACOOOL. Proceedings of European Particle Accelerator Conference (EPAC 2006), Edinburgh, UK (2006) 1633-1635.
32. T. Shirai, S. Fujimoto, M. Ikegami, A. Smirnov et al. Commissioning of Electron Beam Cooling at S-LSR. Proceeding of ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High Intensity and High Brightness Hadron Beams (HB 2006) KEK, Tsukuba, Japan, (2006) 247-249.
33. A. Kobets, I. Meshkov, A. Smirnov, A.Sidorin et al. Experiments on Proton Beam Ordering by Electron Cooling. IKP annual report, FZ Julich, Germany (2006) 128-129.
34. I. Meshkov, Yu. Korotaev, A. Smirnov, A.Sidorin et al. Electron Cooling of Proton Beam at COSY and S-LSR. Proceedings of Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2006), ИЯФ, Новосибирск, Россия (2006).
35. Meshkov, R.Pivin, A.Sidorin, A.Smirnov, G.Trubnikov. BETACOOOL code for simulation of long term beam dynamics in ion storage rings. Proceedings of Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'2006), ИЯФ, Новосибирск, Россия (2006).
36. A. Noda, T. Shirai, H. Souda, A. Smirnov et al. Experimental Approach to Ultra-Cold Ion Beam at S-LSR. Proceedings of Particle Accelerator Conference (PAC 2007) FNAL, Albuquerque, USA (2007) 2035-2037.
37. A. V. Smirnov, I. N. Meshkov, A. O. Sidorin, et al. Necessary Condition for Beam Ordering. Proceeding of Workshop on Beam Cooling and Related Topics. Bad Kreuznach, Germany (2007).

38. I.Meshkov, A.Sidorin, A.Smirnov, A.Noda et.al. Investigation of ordered proton beams at S-LSR. Preprint HIMAC-126, NIRS, Inage, Japan (2007).
39. A.Smirnov, A.Sidorin, D.Krestnikov, R.Pivin, D.Prasuhn, M.Wolke. Simulation of Pellet Target Experiments with BETACOOOL Code. Proceedings of Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2008) Zvenigorod, Russia (2008) 9-11.
40. T. Shirai, M. Ikegami, H. Souda, A. Smirnov et al. One-Dimensional Ordering of Protons by the Electron Cooling. Proceedings of European Particle Accelerator Conference (EPAC 2008), Genoa, Italy (2008) 3485-3487.
41. D. Krestnikov, A. Smirnov, A. Sidorin, I. Meshkov et al. Crystalline Beam Simulations. Proceedings of European Particle Accelerator Conference (EPAC 2008) Genoa, Italy, (2008) 1747-1749.
42. A.V. Smirnov, A.O. Sidorin, D.A. Krestnikov. Effective Luminosity Simulation for PANDA Experiment at FAIR. Proceeding of Workshop on Beam Cooling and Related Topics (COOL 2009), IMP, Lanzhou, China (2009) 127-129.
43. A. Noda, M. Nakao, H. Souda, A.V. Smirnov et al. Resent Approach to Crystalline Beam with Laser Cooling at ion Storage Ring, S-LSR. Proceedings of Particle Accelerator Conference (PAC 2009), Vancouver, Canada (2009) 3260-3262.
44. A.V. Fedotov, A. O. Sidorin, A. V. Smirnov. IBS for Non-Gaussian Distributions. Proceedigns of 46th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB2010), Morschach, Switzerland (2010) 62-66.
45. A.Papash, A.Smirnov, M.Siggel-King,C.Welsch. Long Term Beam Dynamics in Ultra-Low Energy Storage Rings. Proceedings of International Particle Accelerator Conference (IPAC2011), San Sebastián, Spain (2011) 2166-2168.
46. S.Kostromin, I.Meshkov, A.Sidorin, A.Smirnov, G.Trubnikov. Application of Cooling Methods to NICA projects. Proceedings of Workshop on Beam Cooling and Related Topics (COOL 2011), Alushta, Ukraine (2011) 25-30.

Получено 2 августа 2013 г.

**Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.**

Подписано в печать 7.08.2013.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,87. Уч.-изд. л. 2,25. Тираж 100 экз. Заказ № 58041.

**Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.**

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/