

АННОТАЦИЯ ПО ПРОЕКТУ

Государственный контракт № 02.740.11.0572 от «22» марта 2010 г.

Тема: «Исследование взаимодействий нуклонов, тяжелых и легких ионов в области релятивистских и низких энергий»

Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт - Петербургский государственный политехнический университет» (ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»), г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, КВАРК-ГЛЮОННАЯ ПЛАЗМА, ЭКСПЕРИМЕНТ RHENIX, МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ, АДРОН, МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КАСКАД АТОМНЫХ СОУДАРЕНИЙ, ИОННАЯ И КЛАСТЕРНАЯ БОМБАРДИРОВКА ТВЕРДЫХ ТЕЛ, РАДИАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ В СПЛАВАХ ЖЕЛЕЗА

1. Цель проекта

1) *Формулировка задачи /проблемы, на решение которой направлен реализованный проект.*

Изучение фундаментальных свойств ядерной материи в условиях экстремально высоких плотностей энергии, превышающих критическую плотность перехода в кварк-глюонную плазму и структуры, происхождения и эволюции барионной материи во Вселенной и получения ответов на ряд фундаментальных вопросов в физике сильных взаимодействий. Разработка модели взаимодействия пучков частиц и многоатомных кластеров с поверхностью твердых тел и наноматериалами.

2) *Формулировка цели реализованного проекта, места и роли проекта и его результатов в решении задачи/проблемы, сформулированной в п. 1.1 (2-3 предложения).*

Изучение свойств легких адронов, рождающихся в столкновениях протонов (p+p), ядер дейтерия и ядер золота (d+Au), ядер меди (Cu+Cu) и ядер золота (Au+Au) при максимальной энергии коллайдера RHIC 200 ГэВ. Исследование процессов легирования, радиационного повреждения и эрозии поверхности металлов и полупроводников, а также распыления и десорбции нанокластеров при ионной и кластерной бомбардировке в режиме преобладания упругого торможения. Изучение особенностей первичного дефектообразования и эволюции легирующих примесей, а также механизмов взаимодействия дислокаций с протяженными радиационными дефектами в модельных реакторных сплавах железа.

2. Основные результаты проекта

1) *Краткое описание основных полученных результатов (основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности).*

Получены новые уникальные экспериментальные данные для легких адронов, измеренных в адронных, фотонных ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $\eta \rightarrow \gamma\gamma$, $K_S^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$, $\eta' \rightarrow \eta \pi^+ \pi^-$, $\omega \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$, $\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$, $\phi \rightarrow K^+ K^-$) и ди-электронных ($\omega/\rho \rightarrow e^+ e^-$, $\phi \rightarrow e^+ e^-$) каналах распада в адронных и ядерных взаимодействиях при энергии 200 ГэВ:

- рТ спектры рождения в p+p, d+Au, Cu+Cu и Au+Au взаимодействиях;
- факторы ядерной модификации в d+Au, Cu+Cu и Au+Au взаимодействиях;
- спектральные свойства для легких векторных мезонов в d+Au и Au+Au взаимодействиях;

проведено сравнение полученных экспериментальных результатов с предсказаниями существующих теоретических моделей.

Изучены закономерности нелинейных и неаддитивных эффектов при распылении, первичном радиационном повреждении и эрозии поверхности под воздействием кластерной бомбардировки; получены следующие основные результаты:

- Получены коэффициенты и энергетические спектры распыления, установлена корреляция эффектов синергизма (т.е. неаддитивного возрастания коэффициента распыления с ростом размера налетающего кластера) с характеристиками столкновительной и пост-каскадной стадий эволюции каскада в приповерхностной области облучаемой мишени.
- Установлен механизм эжекции больших фрагментов облучаемого нанокластера за счёт эффекта отдачи; показано, что эжекция больших фрагментов может приводить к десорбции нанокластера, осаждённого на подложку при облучении кластерами в кэВ-ном диапазоне энергий.
- Проведено исследование механизмов десорбции нанокластеров при ионной и кластерной бомбардировке дискретных наноструктурных материалов, содержащих нанокластеры золота диаметром 6 нм. При этом установлено, что величина выхода десорбции определяется преобладающим механизмом, который зависит как от условий облучения, так и от типа подложки. Для легких подложек (Al) десорбция определяется эффектом отдачи, тогда как для тяжелых подложек (Au) преобладает абляционный механизм десорбции.
- Установлено, что при рассмотренных условиях облучения (преобладание упругого торможения) десорбция за счёт кластерного удара происходит эффективнее, чем за счёт удара одноатомного иона.
- Исследованы процессы радиационного воздействия на конструкционные реакторные материалы (сплавы железа).
- Установлена зависимость числа пар Френкеля, образованных в каскадах первично-выбитых атомов (ПВА), от температуры и концентрации примеси, исследована морфология и подвижность кластеров точечных дефектов, рожденных в каскадах ПВА.
- Проведён анализ перераспределения легирующих примесей в процессе развития каскада, изучены особенности сегрегации примеси в модельных сплавах Fe-Cr на протяженных дефектах различного типа.
- Установлены основные дислокационные реакции при взаимодействии винтовой дислокации и петель Франка в аустенитном сплаве Fe-Ni10-Cr20 под внешней нагрузкой.
- Получен набор механизмов взаимодействий и соответствующих им значений критического напряжения, необходимого для отрыва дислокации от препятствия.

2) Указание основных характеристик созданной научной продукции.

Инвариантные сечения рождения и факторы ядерной модификации легких векторных мезонов в $p+p$, $d+Au$ и $Au+Au$ взаимодействиях при энергии 200 ГэВ, калибровка основного трекового детектора эксперимента PHENIX – дрейфовых камер. Исследование спектральных свойств легких векторных мезонов в ди-электронном и адронных каналах распада с целью поиска признаков модификации, ожидаемых в случае восстановления киральной симметрии. Исследования каскадных процессов и процессов эрозии поверхности металлов и полупроводников, а также механизмов распыления и десорбции наноструктурных материалов, содержащих нанокластеры кремния и золота диаметром 2-8 нм, под воздействием ионной и кластерной бомбардировки в диапазоне энергий кэВ/атом (т.е. в режиме преобладания упругого торможения). Исследования характера первичного повреждения и эволюции легирующих элементов в облученных сплавах железа, содержащих протяженные дефекты.

3) Описание новизны научных решений.

На данный момент RHIC является единственным в мире коллайдером, позволяющим изучать взаимодействия тяжелых релятивистских ядер при энергии 200 ГэВ. Характерной особенностью таких столкновений является чрезвычайно высокая множественность рождающихся частиц ($dN/d\eta|_{\eta=0} \sim 1000$). В настоящее время не существует теоретических моделей для количественного описания процессов распыления кластерами и десорбции наночастиц. Единственным подходом к их теоретическому исследованию на атомарном уровне является метод классической молекулярной динамики (МД), который использован в настоящей работе. Новизна научных решений, полученных в рамках НИР, заключается в систематическом характере проведенного атомистического моделирования, что позволило выявить ряд новых закономерностей эрозии и распыления поверхности и механизмов десорбции нанокластеров при воздействии потоков кластерных частиц. Кроме того, впервые изучены на атомарном уровне механизмы взаимодействия дислокаций и легирующих примесей с протяженными дефектами в многокомпонентных сплавах железа.

4) Сопоставление с результатами аналогичных работ, определяющими мировой уровень.

Изучение взаимодействий тяжелых релятивистских ядер в эксперименте PHENIX требует использования детекторов уникальной конструкции, разработки оригинальных методик калибровки детекторов и анализа экспериментальных данных, не использовавшихся ранее. Все разработанные методики и результаты, полученные в рамках данной НИР, являются новыми. Взаимодействия тяжелых ядер при ультрарелятивистских энергиях также изучаются на коллайдере LHC в ЦЕРНе. Однако к настоящему времени ни одна из коллабораций, работающих на данном ускорителе, не смогла получить сравнимых по качеству с представленными в данной работе результатов для идентифицированных легких адронов.

Исходя из анализа имеющихся аналогичных работ, очевидно, что в настоящее время невозможно сформулировать универсальные законы, описывающие взаимодействие ускоренных кластерных ионов с поверхностью и механизмы десорбции наночастиц. Физические механизмы процессов взаимодействия легирующих элементов и дислокаций с протяженными дефектами в облученных многокомпонентных сплавах железа изучены слабо. Используемая в работе методика атомистического моделирования данных процессов полностью соответствует текущему мировому уровню в данной области исследований, а полученные в рамках НИР результаты являются новыми.

3. Назначение и область применения результатов проекта

1) Описание областей применения полученных результатов (области науки и техники; отрасли промышленности и социальной сферы, в которых могут или уже используются полученные результаты или созданная на их основе инновационная продукция)

Полученные экспериментальные результаты будут использоваться для развития теоретических моделей ядро-ядерных взаимодействий при сверхвысоких энергиях. Разработанные методики анализа экспериментальных данных успешно применяются при анализе экспериментальных данных, полученных на коллайдере LHC. Изучение закономерностей и механизмов эрозии поверхности и десорбции наночастиц может использоваться для оптимизации методов анализа и модификации наноструктурных материалов ускоренными ионными и кластерными пучками. Атомистическая модель, описывающая механизмы взаимодействия легирующих добавок и дислокаций с радиационными дефектами в облученных многокомпонентных модельных сплавах на основе Fe, позволит улучшить модели прогнозирования эволюции их механических

свойств и оптимизировать создание нового поколения радиационно-стойких материалов для ядерных энергетических установок.

2) Описание направлений практического внедрения полученных результатов или перспектив их использования;

Результаты измерений в р+р столкновениях, впервые полученные при энергии 200 ГэВ, могут использоваться для прямой проверки расчетов, выполненных в рамках пертурбативной квантовой хромодинамики, а также в качестве базовых для сравнения с более тяжелыми взаимодействующими системами. Разработанная методика измерения распадов легких адронов используется в коллаборации PHENIX и в коллаборациях на коллайдере LHC, в том числе в СПбГПУ, ПИЯФ РАН, ИТЭФ и в Курчатовском институте.

3) Оценка или прогноз влияния полученных результатов на развитие научно-технических и технологических направлений; разработка новых технических решений; на изменение структуры производства и потребления товаров и услуг в соответствующих секторах рынка и социальной сферы.

Полученные результаты использованы для разработки в соответствии с ФГОС 3 поколения новых рабочих программ дисциплин для основных образовательных программ подготовки бакалавров по направлению 011200.62 — «Физика», профиль подготовки «Физика атомного ядра и элементарных частиц» («Введение в специальность», «Семинар на иностранном языке», «Радиационная физика твердого тела», «Ядерная физика») и магистров по направлению 011200.68 — «Физика», магистерская программа «Физика ядра и элементарных частиц» («Физика высоких энергий», «Введение в стандартную модель элементарных частиц», «Введение в квантовую хромодинамику высоких энергий», «Введение в теорию ядерных реакций», «Физика реакторов», «Физика ядерных взаимодействий»), а также для модернизации курсов лекций, практических и лабораторных занятий по дисциплинам «Ядерная физика», «Радиационная физика твердого тела», «Специальный физический практикум», «Проект по ядерной физике», «Современные проблемы физики», «Физика высоких энергий», «Введение в теорию ядерных реакций», «Физика реакторов», «Физика ядерных взаимодействий», «Введение в квантовую хромодинамику высоких энергий», «Введение в стандартную модель элементарных частиц») для студентов 2, 4 курсов (бакалавриат) и 5, 6 курсов (магистратура) кафедры «Экспериментальная ядерная физика». Новые данные о свойствах КХД материи в экстремальных условиях, достигаемых в центральных столкновениях ультрарелятивистских ядер, позволят улучшить и углубить наше понимание природы и характера сильных взаимодействий, эволюции Вселенной.

4) Описание ожидаемых социально-экономических и др. эффектов от использования товаров и услуг, созданных на основе полученных результатов (повышение производительности труда, снижение материало- и энергоёмкости производства, уменьшение отрицательного техногенного воздействия на окружающую среду, снижение риска смертности, повышение качества жизни и т.п.).

Результаты, полученные в настоящем проекте и переработанные в научно-популярную форму могут стать основой развития интереса к физике атомного ядра и элементарных частиц и привлечения молодежи в высокотехнологические секторы экономики и науку.

5) Описание существующих или возможных форм коммерциализации полученных результатов: организация производства продукции и/или оказание услуг, в том числе с образованием нового юридического лица или без него; заключение лицензионных

договоров, заключение договоров уступки прав на РИД, либо указать: «Коммерциализация проектом не предусмотрена».

Коммерциализация проектом не предусмотрена

б) Описание видов новой и усовершенствованной продукции (услуги), которые могут быть созданы или уже созданы на основе полученных результатов интеллектуальной деятельности (РИД); указание предполагаемых или фактических рынков сбыта (с указанием сегмента, емкости и доли рынка и прогноза развития рынков сбыта на 5 лет), прогнозируемых или фактических объемов продаж на внутреннем и внешних рынках, предполагаемых сроков окупаемости.

Результаты, полученные в настоящем проекте уже использованы для разработки программы модернизации детекторных подсистем проекта PHENIX с целью расширения его возможностей, а также могут быть использованы при проектировании новых экспериментов, связанных с поиском и исследованием сверхплотного состояния вещества (например, проект CBM GSI, Германия).

4. Достижения молодых исследователей – участников Проекта

В проекте принимал участие молодой исследователь Котов Д.О., аспирант, магистр. При его непосредственном участии были измерены спектры рождения ϕ -мезонов в $p+p$, $d+Au$, $Cu+Cu$ и $Au+Au$ взаимодействиях при энергии 200 ГэВ в эксперименте ФЕНИКС. Данные результаты были получены впервые и вошли составной частью в его диссертационную работу «Рождение ϕ -мезонов в $p+p$, $d+Au$, $Cu+Cu$ и $Au+Au$ взаимодействиях при энергиях 62.4 и 200 ГэВ в эксперименте ФЕНИКС», успешно защищенную 20.10.2010 в Совете Д 212.229.29, по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

В проекте принимал участие молодой исследователь Иванищев Д.А., аспирант, магистр. При его непосредственном участии были измерены спектры рождения K_s^0 мезонов в $p+p$, $d+Au$, $Cu+Cu$ и $Au+Au$ взаимодействиях при энергии 200 ГэВ в эксперименте ФЕНИКС. Данные результаты были получены впервые и вошли составной частью в его диссертационную работу «Рождение нейтральных короткоживущих каонов в столкновениях ультрарелятивистских ядер при энергии 200 ГэВ», успешно защищенную 21.12.2011 в Совете Д 212.229.29, по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

В проекте принимал участие молодой исследователь Бакаев А.В., сначала студент, а затем аспирант, магистр. При его непосредственном участии были разработаны методы атомистического моделирования свойств облученных сплавов железа и исследованы механизмы взаимодействий дислокаций с протяженными дефектами в таких сплавах. Данные результаты были получены впервые и вошли составной частью в его диссертационную работу «Механизм взаимодействия радиационных дефектов с дислокациями в реакторных сталях на основе Fe-Ni-Cr», подготовленную для последующей защиты по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

В проекте принимал участие молодой исследователь Григорьев П.Ю., студент. При его непосредственном участии были разработаны методы атомистического моделирования воздействия пучков ионов и кластеров на поверхность кристаллов и наноматериалов, изучены механизмы десорбции наночастиц. Данные результаты были получены впервые и вошли составной частью в его магистерскую диссертацию «Модификация поверхности и структурные повреждения кристаллов и нанокластеров при бомбардировке ионными и кластерными пучками», успешно защищенную в 2012 г.

5. Опыт закрепления молодых исследователей – участников Проекта в области науки, образования и высоких технологий

2010 г. — Бакаев А.В. зачислен в аспирантуру (кафедра «Экспериментальная ядерная физика», СПбГПУ); Котов Д.О. принят на работу на должность ассистента кафедры «Экспериментальная ядерная физика», СПбГПУ.

2011 г. — Сафонов А.С. зачислен в аспирантуру (кафедра «Экспериментальная ядерная физика», СПбГПУ); Иванов А.Е. принят на работу на должность инженера 1-й категории кафедры «Экспериментальная ядерная физика», СПбГПУ.

2012 г. — Суетин Д.П., Григорьев П.Ю. поступают в аспирантуру (кафедра «Экспериментальная ядерная физика», СПбГПУ).

6. Перспективы развития исследований

1) Информация о том, насколько участие в ФЦП способствовало формированию новых исследовательских партнерств. Участвует ли НОЦ в проектах по 7-й рамочной Программе Евросоюза (с указанием названия проектов и перечня партнеров по ним).

Один из участников проекта (Журкин Е.Е.) принимал участие в проекте «PERFORM-60» по 7-й рамочной Программе Евросоюза в партнёрстве со Свободным Университетом Брюсселя (Бельгия).

2) Краткая информация о проектах НОЦ по аналогичной тематике.

1. «Поиск и экспериментальное исследование свойств плотной и горячей материи, образующейся в столкновениях тяжёлых релятивистских ядер при энергии 62.4 ГэВ»; 2010–2012 гг.; стоимость 3,6 млн. руб.; ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, мероприятие 1.2.1.

2. «Разработка методов нанесения и контроля отражающих покрытий на внутренние поверхности ловушек ультрахолодных нейтронов в составе экспериментального оборудования»; 2011 г.; стоимость 2,42 млн. руб.; Госконтракт с ФГБУ «ПИЯФ».

3. «Экспериментальное исследование сцинтилляционного детектора на основе LaBr₃:Ce для регистрации излучения с энергией менее 100 кэВ»; 2011 г.; стоимость 0,2 млн. руб.; Госконтракт с ФГБУ «ПИЯФ».

4. «Изучение новых необычных свойств кристаллических материалов нейтрон-ядерными методами с целью их дальнейшего использования в фундаментальных и прикладных исследованиях»; 2012 г.; стоимость 0,5 млн. руб.; Государственное задание Минобрнауки РФ.

3) Информация о том, сотрудничество с какими странами и исследовательскими центрами может способствовать наибольшей отдаче для развития в России технологий в области исследования, а также для выхода российской продукции на региональные и глобальные рынки.

Сотрудники НОЦ принимают участие в проектах PHENIX BNL, США; ALICE CERN, Швейцария; CBM GSI, Германия. Опыт работы и результаты, полученные при выполнении данных проектов может быть использован в России в образовательном процессе и научной деятельности (например при проектировании и создании таких отечественных проектов как NICA).


7. Сведения в табличном формате:

Сведения о публикациях, выпущенных в ходе исполнения Государственного контракта (Приложение 2 к аннотации
---	--------------------------

Сведения о диссертациях, подготовленных в ходе исполнения Государственного контракта	Приложение 3 к аннотации
Сведения о выступлениях на конференциях, проведенных в ходе исполнения Государственного контракта	Приложение 4 к аннотации
Сведения о внедрении результатов проекта в образовательный процесс, полученных в ходе исполнения Государственного контракта	Приложение 5 к аннотации
Сведения об исполнителях Государственного контракта (этапа проекта)	Приложение 6 к аннотации

Руководитель работ по проекту

Зав. кафедрой
«Экспериментальная ядерная физика»

 Я.А. Бердников

Руководитель организации-исполнителя:

Проректор по научной работе

 Д.Ю. Райчук

07 сентября
М.П.

