



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ



Основные результаты научной деятельности 2015

Гатчина • 2016

Научные редакторы:

В. Л. Аксенов
С. В. Саранцева

Составители:

Г. Д. Алхазов
А. А. Воробьев
В. В. Воронин
А. Л. Коневега
Г. Ф. Михеев
В. Ю. Петров
С. Р. Фридман
Ю. П. Черненко

Ответственный за выпуск

С. И. Воробьев

Основные результаты научной деятельности 2015. –
Гатчина Ленинградской обл.: Издательство ФГБУ «ПИЯФ»
НИЦ «Курчатовский институт», 2016. – 140 с.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных результатов научных исследований ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт» за 2015 г. Помимо аннотации для каждого результата в сборнике приведены ссылки на статьи ведущих отечественных и зарубежных изданий, в которых работа описана детально и где можно подробно ознакомиться с ее содержанием.

ISBN 978-5-86763-377-6

© ПИЯФ НИЦ КИ, 2016

Оглавление

- 5** Введение
- 9** Научные отделения
- 27** Теоретическая и математическая физика
- 41** Исследования с использованием нейтронов, синхротронного излучения и мюонов
- 61** Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино
- 85** Молекулярная и радиационная биофизика
- 95** Ядерная медицина (производство изотопов, лучевая терапия, био- и нанотехнологии для медицины)
- 103** Физика ядерных реакторов и ускорителей
- 111** Прикладные исследования и разработки
- 119** Базовые установки
- 123** Научно-организационная деятельность



МОНГОЛ УЛАМЫН
ХАМГААГА

Введение

Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (далее Институт) – многопрофильный научный центр, ведущий фундаментальные и прикладные исследования в области физики элементарных частиц и высоких энергий, ядерной физики, физики конденсированного состояния, молекулярной и радиационной биофизики.

Научные работы сотрудников Института отмечены Ленинской и Государственными премиями, премиями Правительства РФ, академическими премиями. Три сотрудника избраны действительными членами, семь сотрудников – членами-корреспондентами Российской академии наук. В настоящее время в Институте работает 1 989 человек, из них 585 научных сотрудников, 72 доктора и 267 кандидатов наук. Один сотрудник является действительным членом, двое сотрудников – членами-корреспондентами Российской академии наук.

В составе Института функционирует пять научных отделений, объединенных общей инфраструктурой:

- теоретической физики;
- нейтронных исследований;
- физики высоких энергий;
- молекулярной и радиационной биофизики;
- перспективных разработок.

Программа научных исследований на долгосрочный и краткосрочный периоды изложена в Программе совместной деятельности НИЦ «Курчатовский институт» и в Программе Института по НИОКР согласно государственному заданию.

Как и другие институты, входящие в состав НИЦ «Курчатовский институт», Институт активно участвует в различных международных проектах, активно сотрудничает по основным направлениям своей деятельности с крупнейшими международными научными центрами.

В Институте работают и создаются базовые установки для физических исследований. Ядерный реактор ВВР-М, построенный в 1959 г., с 31 де-

кабря 2015 г. переведен в режим длительного останова в связи с окончанием лицензии на эксплуатацию и отсутствием средств на выполнение необходимых для лицензирования ремонтных работ. Протонный синхротрон, построенный в 1970 г., работал в 2015 г. 1 874 часа. Совместно с НИИЭФА им. Д. В. Ефремова проводились работы по подготовке и вводу в эксплуатацию циклотрона Ц-80, физический пуск которого был осуществлен 23 декабря 2014 г. В следующем году планируется вывод пучка и начало работ по физической программе.

2015 год стал важным этапом на пути создания Международного центра нейтронных исследований на базе реакторного комплекса ПИК (РК ПИК) – МЦНИ ПИК. После получения положительного заключения Главгосэкспертизы РФ и проведения необходимых мероприятий получено положительное заключение Ростехнадзора РФ по завершению строительства РК ПИК. В 2016 г. продолжатся работы по реализации инвестиционных проектов по модернизации и реконструкции инженерно-технических систем РК ПИК. Началась работа по наладке и адаптации семи станций, доставленных из Исследовательского центра Геестхахта (ФРГ). Министерство науки ФРГ выделило специальный грант на эти работы. Также в Гатчине состоялось первое заседание Международного консультативного комитета по нейтронным наукам НИЦ «Курчатовский институт», на котором были рассмотрены программа создания МЦНИ ПИК и концепция комплекса из 20 экспериментальных станций. Были определены составы шести международных экспертных групп по направлениям экспериментальных исследований. В течение года эти экспертные группы провели анализ предложений Института и сформировали предложения по их реализации. В следующем году эти работы продолжатся.

2015 год был насыщен событиями научной и общественной жизни. Так, 5–8 февраля проводилось первое празднование в Институте Дня российской



науки. В программе, подготовленной Советом молодых ученых и специалистов, были посещения школьников и занятия с ними, лекция члена Совета при Президенте РФ по науке и образованию, профессора СПбГУ Т. В. Черниговской «Мозг и свобода воли». Завершил праздник зимний бал.

В феврале и марте прошли мемориальные семинары к 85-летию первого директора Института члена-корреспондента АН СССР О. И. Сумбаева, основателей Отделения теоретической физики – члена-корреспондента АН СССР В. Н. Грибова и профессора В. М. Шехтера.

В 2015 г. Институт организовал 15 научных конференций. Среди них традиционные Зимние школы и Третья ежегодная международная конференция «Физика на Большом адронном коллайдере», которая собрала свыше 350 участников из 35 стран и имела большой успех.

Работы ученых Института были отмечены различными научными премиями, одна из них – премия Европейского физического общества 2015 г. академику Л. Н. Липатову и профессору Ю. Л. Докшицеру за выдающийся вклад в физику высоких энергий. Знаменитое уравнение Докшицера – Грибова – Липатова – Альтарелли – Паризи является основой описания процессов рассеяния частиц при высоких энергиях.

В конце 2015 г. проходили изменения в организационной структуре НИЦ «Курчатовский институт». Седьмого декабря Президент РФ В. В. Путин

подписал указ о назначении М. В. Ковальчука президентом НИЦ «Курчатовский институт» сроком на 5 лет с 31 декабря 2015 г. В институтах, входящих в состав НИЦ «Курчатовский институт», введены должности научного руководителя. В ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт» научным руководителем назначен член-корреспондент РАН В. Л. Аксенов, директором Института – профессор Д. Ю. Минкин.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных результатов научных исследований ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт» в 2015 г. Это описание предваряют обзоры руководителей научных отделений по основным направлениям деятельности. Также отражена структура отделений. Далее приведены аннотации работ, представление которых обсуждено и рекомендовано учеными советами отделений. Помимо аннотации для каждого результата в сборнике приведены ссылки на статьи ведущих отечественных и зарубежных изданий, в которых работа описана детально и где можно ознакомиться с ее полным содержанием.

Результаты работ сотрудников Института опубликованы в 565 статьях в ведущих российских и международных рецензируемых журналах и представлены на 139 российских и международных конференциях.

В заключительном разделе дана общая информация об Институте.



Директор ФГБУ «ПИАФ»
НИЦ «Курчатовский институт»
профессор Д. Ю. Минкин



Научный руководитель ФГБУ «ПИАФ»
НИЦ «Курчатовский институт»
член-корреспондент РАН В. Л. Аксенов

Физика высоких энергий

Молекулярная и радиационная биофизика

Нейтронные исследования

Перспективные разработки

Теоретическая физика



Научные отделения

- 10 Отделение теоретической физики
- 14 Отделение нейтронных исследований
- 17 Отделение физики высоких энергий
- 19 Отделение молекулярной и радиационной биофизики
- 23 Отделение перспективных разработок

Отделение теоретической физики

Отделение теоретической физики (ОТФ) – руководитель академик РАН Л. Н. Липатов – состоит из 7 секторов:

- теории электрослабых взаимодействий (заведующий д. ф.-м. н. Г. С. Данилов);
- теории сильных взаимодействий (заведующий д. ф.-м. н. В. Ю. Петров);
- квантовой теории поля (заведующий к. ф.-м. н. В. А. Кудрявцев);
- теоретической физики высоких энергий (и. о. заведующего д. ф.-м. н. В. Ю. Петров);
- теории конденсированного состояния (заведующий д. ф.-м. н. С. Л. Гинзбург);
- теоретической ядерной физики (заведующий д. ф.-м. н. М. Г. Рыскин);
- атомной физики (заведующий д. ф.-м. н. А. И. Михайлов)

и группы теории ядерных реакторов (руководитель к. ф.-м. н. М. С. Онегин).

В ОТФ работает 69 научных сотрудников, из них 28 докторов наук, 32 кандидата наук.



Л. Н. Липатов,
академик РАН,
руководитель
Отделения

Исследования, проводимые в ОТФ, охватывают большинство областей современной теоретической физики: от физики элементарных частиц и кванто-

вой теории поля до физики ядерных реакторов.

Рассеяние при высоких энергиях – традиционная тема исследований в ОТФ. В течение уже долгого времени работы сотрудники ОТФ определяют мировой уровень в данной области. В 2015 г. в работах Л. Н. Липатова и др. было продолжено исследование уравнения БФКЛ (Балицкий, Фадин, Кураев, Липатов), определяющего асимптотику амплитуд рассеяния при высоких энергиях. В частности, было определено поведение функции Грина померона для случая бегущей константы связи. Были найдены квазиклассические решения уравнений БФКЛ в теории с массивными глюонами, находящейся в хиггсовой фазе. Был выведен эффективный реджеонный лагранжиан, следующий из уравнения БФКЛ. Этот лагранжиан позволяет построить реджеонную теорию поля Грибова. Вычисления проведены как в теории

Янга – Миллса, так и в теории гравитации. Были выведены также соответствующие уравнения Эйлера – Лагранжа для эффективной теории.

ОТФ является также одним из мировых лидеров в области так называемой AdS/CFT-дуальности (анти-де Ситтер / конформная теория поля). Дуальность означает, что нетривиальная теория поля ($N = 4$ суперсимметричная теория Янга – Миллса) в четырехмерном пространстве-времени эквивалентна некоторой теории струны. Вероятно, обе теории являются точно решаемыми. С целью проверки точной решаемости теории Л. Н. Липатов предложил исследовать поведение $N = 4$ конформной теории при высоких энергиях. Благодаря высокой симметрии суперсимметричной теории здесь удастся продвинуться гораздо дальше, чем в обычных теориях поля, таких как квантовая хромодинамика (КХД). В 2015 г. траектория померона – ведущей сингулярности, определяющей поведение теории при высоких энергиях, – была вычислена как в пределе малой, так и большой константы связи (используя AdS/CFT-соответствие). В работе Н. А. Громова были найдены собственные значения уравнения БФКЛ методом алгебраической кривой. Аналогичный результат в КХД, известный на уровне только двух петель, потребовал 10 лет работы.

Между тем в указанной теории с $N = 4$, в принципе, можно получить и выражения для следующих петель, используя тот же самый метод. Другой

способ вычисления третьей петли был предложен в работе В. Н. Велижанина на основе его рекордных шестипетлевых вычислений аномальных размерностей. Полученные результаты, как можно надеяться, улучшат понимание поведения при высоких энергиях и в более реалистических теориях, таких как КХД.

Не так давно были предложены точные выражения для амплитуд рассеяния в мультиреджевской кинематике в $N = 4$ теории. Как было показано в 2014–2015 гг. в работах Л. Н. Липатова и др., эти выражения неправильны и должны быть исправлены с помощью некоего «одевающего» фактора, учитывающего вклад реджевских разрезов, которые обязаны присутствовать в теории наряду с вкладом реджевских полюсов. В 2015 г. полная структура реджевских сингулярностей была выяснена в $N = 4$ теории для амплитуд с семью концами.

Невылетание кварков остается наиболее интересным и все еще непроявленным явлением в КХД. Конфайнмент все еще недоступен для прямых исследований непосредственно в КХД, поэтому для его изучения приходится использовать более простые (имеющие более высокую симметрию) теории, такие как суперсимметричные (SUSY) теории Янга – Миллса. В работах А. В. Юнга эти теории изучаются на протяжении многих лет, и теперь механизм невылетания кварков в этих теориях полностью выяснен. Возможно, это не совсем то, что требуется для объяснения невылетания кварков в природе, однако благодаря этому механизму был открыт целый ряд новых интересных пертурбативных явлений. Одно из них, неизвестное ранее, получило название "instead-of-confinement mechanism". Удалось сделать определенные заключения о механизме невылетания кварков в наименее симметричной SUSY теории – $N = 1$ теории Янга – Миллса. Эта теория остается последней надеждой для понимания механизма конфайнмента, аналогичного тому, который наблюдается в природе.

В 2015 г. в работах А. В. Юнга и др. исследовались эффективные струнные теории, которые возникают в фазе невылетания кварков в суперсимметричных теориях. Было показано, что при определенных условиях соответствующая теория струны может быть критической в четырехмер-

ном пространстве-времени, а потому, вероятно, не содержит ультрафиолетовых расходимостей. Была разработана также теория струн конечной длины, что позволяет определить спектр низколежащих «адронов» в этих SUSY теориях.

В работах В. Н. Велижанина и др. был достигнут рекордный уровень точности пертурбативных вычислений в различных теориях. В 2015 г. были выполнены вычисления перенормировок константы связи хиггсовских бозонов в Стандартной модели (СМ) на уровне трех петель. Также были получены аномальные размерности операторов твиста 2 в $N = 4$ суперсимметричной теории с точностью шесть петель.

В 2015 г. коллаборация LHCb объявила об открытии двух пентакварковых резонансов на Большом адронном коллайдере (БАК). В работе М. И. Эйдеса, В. Ю. Петрова и М. В. Полякова была предложена интерпретация этих резонансов, согласно которой они представляют собой связанное состояние возбужденного состояния чармония и протона. Удивительным образом потенциал между этими двумя адронами можно вычислить из очень общих соображений, восходящих к КХД. Полученные положения резонанса и его ширины находятся в приемлемом согласии с данными эксперимента. Другая интерпретация открытых резонансов была предложена в серии работ В. В. Анисовича, А. В. Саранцева и др. Они исходили из дикварковой картины этих резонансов. Оказывается, что в такой модели массу пентакварков можно легко связать с массами также недавно открытых тетракварковых мезонов.

Теория барионных резонансов в пределе большого числа цветов была разработана в работах В. Ю. Петрова и др. В этой теории резонансы можно представлять как большое количество конституентных кварков в среднем поле мезонов, описываемых некоторым низкоэнергетическим эффективным лагранжианом. Показано, что все барионы с массами менее 2 ГэВ могут быть описаны посредством этой модели, причем в теории не возникает лишних состояний. Массы и ширины всех резонансов могут быть непосредственно вычислены и находятся в приемлемом согласии с экспериментом.

В работах М. Г. Рыскина с соавторами изучаются дифракционные и эксклюзивные процессы

при энергиях БАК. В 2015 г. были рассмотрены процессы эксклюзивного фоторождения чармониев и боттониев на БАК. Было вычислено также сечение рождения глюонов с очень малыми x . Опубликована большая статья, посвященная упругому рассеянию и дифракционной диссоциации при высоких энергиях в свете новых данных БАК.

В работах М. И. Эйдеса с соавторами достигнут очень высокий уровень точности (три петли и выше) для пертурбативных вычислений в квантовой электродинамике. Этот уровень точности необходим и востребован для описания современных экспериментальных данных. В 2015 г. были проведены и опубликованы вычисления поправки к сверхтонкому расщеплению в позитронии и мюонии. Точность вычисления была не менее трех петель.

Идеи, позволяющие объяснить происхождение иерархии масс кварков и свойства матрицы Кобаяши – Маскавы в СМ продолжают привлекать внимание теоретиков. В 2015 г. И. Т. Дятловым были опубликованы две работы, которые связывают эти проблемы с так называемой зеркальной симметрией. Было показано, что такая гипотеза позволяет без труда объяснить некоторые хорошо известные «чудеса» СМ. Был указан также механизм возможного спонтанного нарушения зеркальной симметрии.

Группа А. В. Саранцева продолжает работу по анализу свойств мезонов и барионов в различных реакциях на основе метода парциального волнового анализа. Результаты этой группы (так называемый Бонн-Гатчина анализ) уже стал одним из наиболее авторитетных в мире. Значительная часть официальных таблиц PDG (Particle Data Group) основывается на этом анализе. Важно, что большое количество данных из различных реакций анализируется на основе единого подхода и единым методом, причем данные различных экспериментов дополняют друг друга. Новые экспериментальные данные и новые адронные реакции были также рассмотрены в 2015 г.

Теории конденсированного состояния – существенная часть исследований, проводимых в ОТФ. В частности, теория магнетиков является традиционной областью интересов ОТФ. В 2015 г. в работах А. В. Сыромятникова с соавторами исследовалось влияние примесей на свойства магнетиков. Были

изучены спиральные магнетики с дефектными связями и фаза «бозе-стекла» в одномерном магнетике. Получен спектр синглетных возбуждений в антиферромагнетике Гейзенберга (АФГ) со спином $1/2$ на квадратной решетке. В работе было продемонстрировано появление аномально сильного затухания у части длинноволновых магнонов в кубическом АФГ при малых температурах.

Изучение элементарных магнитных возбуждений (магнонов) в магнетиках с нетривиальным магнетупорядоченным состоянием (скирмионной решеткой) проведено в работе Д. Н. Аристова с соавторами. Аналитически исследованы особенности спектра и волновых функций магнонов в магнетике с изолированным скирмионом. Вычислены поправки к спектру за счет взаимодействия магнонов. Проведен численный анализ спектра магнонов в гексагональной скирмионной решетке.

Нанопроволоки также являются традиционным объектом изучения в ОТФ. В 2015 г. в работах Д. Н. Аристова и др. рассматривался стык четырех квантовых проволок. Взаимодействие электронов учитывалось с помощью метода ренормгруппы. Методы ренормгруппы использовались также в работе В. Ю. Петрова и др., в которой кондактанс квантовой проволоки с примесью был вычислен на уровне четырех петель. В работах Д. Н. Аристова был рассмотрен общий случай перенормировки кондактанса между краевыми состояниями топологических изоляторов.

В работе А. Г. Яшенкина и др. изучалось явление спинового кулоновского увлечения в двумерном электронном газе при низких температурах. Полученный коэффициент спинового транссопротивления в диффузионном режиме оказался существенно большим, чем предсказано стандартной теорией.

Работы С. Л. Гинзбурга и Н. Е. Савицкой посвящены изучению лавинообразной динамики на сложных сетях. Было показано, что динамика на сети с меняющейся во времени структурой более стабильна в смысле возникновения катастрофических событий, чем на стационарной сети.

Значительная часть публикаций ОТФ в 2015 г. была связана с теорией атомов и молекул, а также традиционной ядерной физикой. Был рассмотрен электронный аналог знаменитого опыта Майкельсона – Морли. Предложенный эксперимент

позволил поднять точность современных ограничений на нарушение лоренцевой симметрии как минимум на два порядка. В работах А. И. Михайлова и др. вычислено аналитически сечение двойной ионизации гелиоподобных атомов высокоэнергичными фотонами. Влияние электронов внутренних оболочек на фотоионизацию внешних электронов было оценено в работе Е. Г. Друкарева и др. Были проведены также прецизионные вычисления свойств ряда атомов и молекул. Эти данные нужны для экспериментов по измерению электрического дипольного момента электрона.

Большое практическое значение имеют расчеты реактора ПИК, которые ведутся группой физики

реакторов ОТФ. Переход на новые твэлы требует расчетов новой равновесной кампании реактора ПИК. Был рассмотрен сценарий, в котором к штатным поглотителям добавляются выгорающие. Было показано, что загрузка 2,1 г гадолиния в выгорающий поглотитель позволяет выполнить все критерии ядерной безопасности и обеспечивает длительность кампании до 30 суток.

Сотрудниками ОТФ в 2015 г. опубликовано 96 статей в рецензируемых журналах (из них 88 – в зарубежных), издана 1 монография, сделано 35 докладов на российских и международных конференциях, защищены 2 кандидатские диссертации.

Отделение нейтронных исследований

Отделение нейтронных исследований (ОНИ) – руководитель д. ф.-м. н. А. И. Курбаков – состоит из 2 научных и 4 научно-технических отделов.

Отдел исследований конденсированного состояния (заведующий д. ф.-м. н. С. В. Григорьев) состоит из 4 лабораторий:

- физики неупорядоченного состояния (заведующий к. ф.-м. н. В. В. Рунов);
- нейтронных физико-химических исследований (заведующий д. ф.-м. н. В. Т. Лебедев);
- физики кристаллов (заведующий к. ф.-м. н. Ю. П. Черненко);
- исследования материалов (заведующий д. ф.-м. н. А. И. Курбаков)

и 2 групп:

- электромагнитных свойств конденсированных сред (руководитель к. ф.-м. н. О. В. Геращенко);
- радиационной физики твердого тела (руководитель д. ф.-м. н. С. П. Беляев).

Отдел нейтронной физики (заведующий д. ф.-м. н. А. П. Серебров) состоит из 4 лабораторий:

- физики нейтрона (заведующий д. ф.-м. н. А. П. Серебров);
- ядерной спектроскопии (заведующий д. ф.-м. н. И. А. Митропольский);
- молекулярных и атомных пучков (заведующий к. ф.-м. н. В. Ф. Ежов);
- рентгеновской и гамма-спектроскопии (заведующий д. ф.-м. н. В. В. Федоров)

и 2 групп:

- исследования слабых взаимодействий (руководитель к. ф.-м. н. А. Н. Пирожков);
- физики деления ядер (руководитель к. ф.-м. н. А. С. Воробьев).

Научно-технические отделы ОНИ:

- инженерного и технологического обеспечения экспериментов на реакторах (руководитель А. П. Булкин);
- автоматизации экспериментов на реакторах (руководитель к. т. н. В. А. Соловей);
- полупроводниковых ядерных детекторов (руководитель д. ф.-м. н. А. В. Дербин);
- эксплуатации нейтронных станций на реакторе ПИК (руководитель к. ф.-м. н. Е. В. Москвин).

В ОНИ работает 179 научных сотрудников, из них 16 докторов наук, 76 кандидатов наук.



А. И. Курбаков,
д. ф.-м. н.,
руководитель
Отделения

Основными направлениями деятельности ОНИ являются исследования в области физики ядра и элементарных частиц и физики конденсированного состояния.

В настоящее время в ПИЯФ НИЦ КИ создана и успешно работает полномасштабная модель источника ультрахолодных нейтронов для реактора ВВР-М, включающая в себя все необходимое криогенное и вакуумное оборудование. В ноябре 2015 г. на полномасштабной модели получен сверхтекучий гелий с темпера-

турой 1,3 К при тепловой нагрузке 15 Вт. Этот важнейший результат демонстрирует возможность реализации проекта на реакторе ВВР-М и возможности применения сверхтекучего гелия в атомных технологиях.

В 2015 г. в нейтринной лаборатории ПИЯФ-НИИАР на реакторе СМ-3 установлена модель детектора антинейтрино сотового типа с 16-ю секциями. Проведены измерения потока антинейтрино в зависимости от расстояния (R) от активной зоны реактора. Обнаружено отличие закона от $1/R^2$, которое, однако, пока рано интерпретировать как эффект нейтринных осцилляций, т. к. следует проверить возможный систематический эффект, связанный с недостаточностью реакторной защиты.

В 2015 г. коллаборация «Борексино», в которой участвуют сотрудники ОНИ, опубликовала данные по измерению потоков гео-нейтрино в На-

циональной лаборатории Гран-Сассо за 2 056 суток измерений. Используя вычисления ожидаемого потока гео-нейтрино из земной коры, впервые удалось надежно установить существование потока гео-нейтрино из мантии, что является важным фактом для определения строения Земли.

Сотрудниками Лаборатории низкофоновых измерений ПИЯФ НИЦ КИ и ИЯИ РАН в Баксанской нейтринной обсерватории проведен поиск аксионов с энергией 9,4 кэВ, излучаемых в M1-переходе ядер ^{83}Kr на Солнце. В результате установлено новое ограничение на константы связи аксиона с нуклонами и массу адронного аксиона: $m_A \leq 100$ эВ для 95 % у. д.

В Лаборатории ядерной спектроскопии развиваются методики элементного анализа геологических образцов и продуктов нефтепереработки. В 2015 г. выполнено исследование тагамитов и зювитов Карской астроблемы. Методом хроматографии и нейтронно-активационного анализа определено содержание Pt, Au, Ir, Re и еще 29 элементов на уровне до 10^{-8} %.

На нейтронном времяпролетном спектрометре ГНЕЙС, действующем на базе синхротрона СЦ-1000, были выполнены измерения угловых распределений осколков деления ^{235}U , ^{238}U и ^{232}Th в диапазоне энергии налетающих нейтронов 1–200 МэВ. Для нейтронов с энергиями выше 20 МэВ полученные данные являются наиболее полными и точными на сегодняшний день.

Методами линейного и нелинейного магнитного отклика и деполяризации нейтронов изучено магнито-электронное фазовое разделение в легированном кобальтите $\text{La}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{CoO}_3$. В результате обработки экспериментальных данных с использованием формализма Джилберта – Ландау – Лифшица дана подробная характеристика системы суперпарамагнитных кластеров, возникающей при фазовом разделении, и прослежено ее температурное поведение.

Проведено комплексное дифракционное исследование (нейтронная и синхротронная порошковая дифракция) квазидвумерного (2D) моноклинного соединения $\text{Na}_3\text{Co}_2\text{SbO}_6$. Показано, что магнитные катионы Co в кислородно-октаэдрических слоях образуют сотовые сетки, которые в состоянии антиферромагнитного типа взаимодействия между ближайшими соседями приводят к фру-

страции в магнитной подсистеме, сложному характеру магнитных обменов как внутри магнитных слоев, так и между ними, появлению необычных видов упорядочения магнитных моментов: суперпозиции коллинеарной АФМ (\mathbf{k}_1) в общем направлении с длиннопериодной синусоидальной (\mathbf{k}_2) компонентой вдоль короткой оси.

Впервые исследована радиационная стойкость фуллеренолов $\text{Gd}@C_{82}(\text{OH})_x$ в потоке быстрых нейтронов (флюенсы 10^{16} – 10^{19} н/см²). Показано, что фуллеренолы на порядок устойчивее фуллеренов C_{60} и комплексов $\text{Gd}@C_{82}$, что важно для биомедицинских применений фуллеренолов в качестве изотопных препаратов.

Методом малоуглового рассеяния нейтронов изучена надмолекулярная структура новых мембран водородных топливных элементов на основе фторсодержащих полимеров с короткими боковыми цепями, синтезированных вододисперсионным методом в Институте катализа им. Г. К. Борескова СО РАН.

Магнитные свойства «ядро – оболочка» наносистемы, где ядро – Fe_xO , а оболочка – Fe_3O_4 , были исследованы разными методами: нейтронной и рентгеновской дифракцией, мессбауэровской спектроскопией, электронной микроскопией, EELS, магнитометрией и др. для двух образцов: малых (10/2 нм для ядра и оболочки соответственно) и больших (21/9 нм). В случае малых частиц магнитный порядок в ядре не обнаружен, тогда как в крупных частицах в ядре наблюдалась антиферромагнитная структура, которая отличается от структуры в обычном оксиде FeO направлением спинов.

Нейтроннографические исследования системы твердых растворов $(\text{BiFeO}_3)_{1-x}(\text{PbTiO}_3)_x$ показали, что она является смесью двух наноразмерных фаз с разными кристаллическими структурами: ромбоэдрической и тетрагональной. Обнаруженное повышение температуры Нееля на несколько сотен градусов в тетрагональной фазе интерпретировано как «обменное подмагничивание» между частицами: фаза с большей температурой «подмагничивает» фазу с меньшей температурой. Показано, что в исследуемой системе наблюдается новый сценарий, когда «эффекты близости» в нестабильной наноструктурированной системе играют решающую роль в появлении необычных магнитных свойств.

Впервые изучена трехуровневая структура алмазных гидрогелей: частицы, ассоциированные через гидратные оболочки; линейные и разветвленные фрагменты (первая координационная сфера); цепи, формирующие ячейки сетки.

Методом фурье-анализа данных рассеяния рентгеновских лучей расшифровано строение аморфной металло-углеродной фазы пиролизатов дифталоцианинов ряда элементов (Y, La, Ce, Nd, Tb) и закономерности ее формирования в зависимости от температуры отжига, атомного номера и массы базового элемента.

В новом классе гранулярных сверхпроводников экспериментально подтверждена теория критического состояния в рамках низкополевой электродинамики джозефсоновской среды. Показана универсальность этой теоретической концепции.

Совместно с филиалом ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «НИИ космического приборостроения» на нейтронном испытательном стенде ИС НП/ГНЕИС были продолжены испытания радиационной стойкости электронной компонентной базы к нейтронам в широком интервале энергий 1–1 000 МэВ. В результате выполнения двух сеансов облучения были определены сечения возникновения одиночных сбоев для шести номиналов микросхем памяти типа SRAM.

Обоснованы новые критерии оптимизации съемок для целого класса приборов – нейтронных рефлектометров. Показано, что корректный выбор рабочей длины волны и других параметров пучка может в несколько раз увеличить светосилу рефлектометров. Для дополнительного увеличения светосилы рефлектометров предложены такие инновации, как нейтронно-оптический селектор скоростей, метод времяпролетных измерений с веерным пучком и малоугловой соллеровский коллиматор специальной конструкции.

В Центре данных подготовлены две монографии с компиляцией ядерных данных, опубликованные в Springer Verlag: "Nuclear Resonance Parameters" и "Excited Nuclear States". Созданы и зарегистрированы проблемно ориентированные базы данных по ядерной структуре и распадам и программы для работы с ними.

Сотрудниками ОНИ в 2015 г. опубликовано 77 статей в рецензируемых журналах (из них 34 – в зарубежных), издано 2 монографии, сделано 156 докладов на российских и международных конференциях, получено 3 патента и 5 свидетельств государственной регистрации специализированных программ и баз данных, защищены 2 кандидатские диссертации.

Отделение физики высоких энергий

Отделение физики высоких энергий (ОФВЭ) – руководитель член-корреспондент РАН А. А. Воробьев – состоит из 10 научных лабораторий:

- физики элементарных частиц (заведующий д. ф.-м. н. Г. Д. Алхазов);
- мезонной физики конденсированных сред (заведующий к. ф.-м. н. С. И. Воробьев);
- релятивистской ядерной физики (заведующий д. ф.-м. н. В. М. Самсонов);
- короткоживущих ядер (заведующий к. ф.-м. н. В. Н. Пантелеев);
- мезонной физики (заведующий д. ф.-м. н. В. В. Сумачев);
- малонуклонных систем (заведующий д. ф.-м. н. С. Л. Белостоцкий);
- кристаллооптики заряженных частиц (заведующий к. ф.-м. н. Ю. М. Иванов);
- адронной физики (заведующий к. ф.-м. н. О. Л. Федин);
- физики экзотических ядер (заведующий д. ф.-м. н. Ю. Н. Новиков);
- криогенной и сверхпроводящей техники (заведующий к. ф.-м. н. А. А. Васильев)

и 4 научно-технических отделов:

- радиоэлектроники (руководитель к. ф.-м. н. В. Л. Головцов);
- трековых детекторов (руководитель д. ф.-м. н. А. Г. Крившич);
- вычислительных систем (руководитель А. Е. Шевель);
- мюонных камер (руководитель В. С. Козлов).

В ОФВЭ работает 147 научных сотрудников, из них 14 докторов наук, 66 кандидатов наук.



А. А. Воробьев,

член-корреспондент РАН,
руководитель
Отделения

Деятельность ОФВЭ в основном сосредоточена на экспериментальных исследованиях в области физики элементарных частиц и ядерной фи-

зики, также проводятся исследования по физике твердого тела с использованием μ SR-метода. Как и в предшествующие годы, исследовательские работы проводились на установках ПИЯФ НИЦ КИ и ускорителях ведущих мировых ядерных центров.

Эксперименты, проводившиеся в 2015 г.

На синхротроне ПИЯФ НИЦ КИ:

- производство и изучение короткоживущих ядер на лазерном масс-спектрометрическом комплексе ИРИС;

– изучение поляризационных эффектов в квази-упругом рассеянии протонов на ядрах;

– изучение η -мезонов, образующихся при бомбардировке ядер π -мезонами;

– изучение магнитных свойств материалов μ SR-методом.

Кроме того, на протонном пучке с энергией 1 ГэВ создан специальный стенд для тестирования экспериментального оборудования.

В Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН):

– участие в экспериментах CMS, ATLAS, LHCb, ALICE на Большом адронном коллайдере (БАК);

– производство и изучение короткоживущих ядер на лазерном масс-спектрометрическом комплексе ISOLDE;

– изучение возможностей кристаллической коллимации пучков LHC (эксперимент UA9).

В Брукхейвенской национальной лаборатории (США):

– изучение физики релятивистских ядерных столкновений (эксперимент PHENIX).

На мезонной фабрике Института им. Пауля Шеррера (Швейцария):

- измерение скорости мюонного захвата в дейтерии (эксперимент MuSun).

На электронных ускорителях Университетов Бонна и Майнца (Германия):

- изучение ядерной структуры нуклонов в γ - p - и e - p -рассеянии.

Завершенные эксперименты с продолжающейся обработкой данных:

- HERMES и OLYMPUS в DESY, Германия (изучение спиновой структуры и формфакторов нуклонов);

- D0 в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми, США (физика протон-антипротонных столкновений на Тэватроне);

- ЭПЕКУР в ИТЭФ, Москва (поиск узких резонансов в π - p -рассеянии).

Новые проекты:

- подготовка к экспериментам R3B, MATS, PANDA, CBM на ускорительном комплексе FAIR (GSI, Германия);

- эксперимент Compton по изучению поляризуемости нуклонов на ускорителе MESA (Майнц, Германия);

- проект ИРИНА по получению и изучению короткоживущих ядер на высокопоточном нейтронном реакторе ПИК;

- проект РИЦ-80 по производству радиоизотопов для медицинских применений.

Одним из основных направлений деятельности ОФВЭ является участие в экспериментах на БАК: эксперименты CMS, ATLAS, LHCb и ALICE. ПИЯФ НИЦ КИ участвовал в этих экспериментах с начальных стадий проектирования и конструиро-

вания коллайдерных детекторов со значительным вкладом в создание различных подсистем этих детекторов. После запуска БАК физики и инженеры Отделения, наряду с другими участниками экспериментов, несут ответственность за нормальное функционирование детекторов и принимают участие в обработке экспериментальных данных.

Анализ полученных в Сеансе 1 (2010–2012 гг.) экспериментальных данных дал огромное количество новых результатов, наиболее значимым из которых явилось открытие бозона Хиггса. В 2015 г. было опубликовано более 150 работ. Авторский список этих публикаций включает 35 ученых из ОФВЭ. В сентябре 2015 г. в Санкт-Петербурге была проведена конференция LHCP, являющаяся основной ежегодной физической конференцией БАК, где были подведены итоги выполненных к этому времени исследований. В конференции, одним из основных организаторов которой был ПИЯФ НИЦ КИ, приняли участие около 400 ученых.

В 2015 г. большие усилия были сосредоточены на подготовке к Сеансу 2 на БАК. В частности, в рамках программы усовершенствования детектора CMS при активном участии специалистов ОФВЭ были изготовлены и введены в эксплуатацию 76 новых больших мюонных камер и 2500-канальная высоковольтная система для мюонного детектора CMS. Также была сформулирована программа дальнейших усовершенствований детекторов CMS, ATLAS, LHCb и ALICE вплоть до 2019 г. Отделение принимает активное участие в реализации этих проектов.

Сотрудниками ОФВЭ в 2015 г. опубликовано 194 научные работы в рецензируемых журналах (из них 187 – в зарубежных), сделано 45 докладов на российских и международных научных мероприятиях, защищена 1 кандидатская диссертация.

Отделение молекулярной и радиационной биофизики

Отделение молекулярной и радиационной биофизики (ОМРБ) – и. о. руководителя к. ф.-м. н. А. Л. Коневега – состоит из 14 лабораторий:

- биофизики макромолекул (заведующий к. ф.-м. н. В. В. Исаев-Иванов);
- генетики эукариот (заведующий д. б. н. В. Г. Королев);
- биосинтеза белка (заведующий к. ф.-м. н. А. Л. Коневега);
- молекулярной генетики (заведующий д. б. н. В. Н. Вербенко);
- биополимеров (заведующий д. ф.-м. н. А. Л. Тимковский);
- клеточной биологии (заведующий к. б. н. М. В. Филатов);
- молекулярной генетики человека (заведующий д. б. н. А. Л. Шварцман);
- энзимологии (заведующий к. б. н. А. А. Кульминская);
- экспериментальной и прикладной генетики (заведующий д. б. н. С. В. Саранцева);
- медицинской биофизики (заведующий д. б. н., профессор Л. А. Носкин);
- медицинской и биоорганической химии (заведующий к. х. н. Ф. М. Ибатуллин);
- протеомики (заведующий д. б. н. С. Н. Нарыжный);
- криоастробиологии (заведующий к. б. н. С. А. Булат);
- молекулярной и клеточной биофизики (и. о. заведующего к. ф.-м. н. Г. Н. Рычков) и научно-технического отдела биоэлектроники (руководитель А. П. Роганов).

В ОМРБ работает 122 научных сотрудника, из них 13 докторов наук, 62 кандидата наук.



А. Л. Коневега,
к. ф.-м. н.,
и. о. руководителя
Отделения

Исследования ОМРБ посвящены наиболее значительным разделам молекулярной биологии, биофизики, молекулярной и медицинской генетики.

В ОМРБ активно ведутся исследования макромолекулярных комплексов методами малоуглового нейтронного рассеяния и методами молекулярного моделирования (Лаборатория биофизики макромолекул).

В работе М. Г. Петухова и А. С. Афанасьевой рассмотрена проблема учета молекул воды при докинге. Для исследования возможного влияния структурной воды на эффективность современных алгоритмов докинга и конструирования лигандов в активных центрах белков (АЦ) был разработан метод поиска всех возможных конформаций структурной воды в АЦ белков – AquaBridge.

Анализ докинга небольших органических молекул в АЦ исследуемых белков показал значительное улучшение селективности докинга и повышение точности предсказания конформации лигандов в случае учета структурной воды в АЦ белка.

Метод реализован в виде утилиты AquaBridge, предназначенной для использования в коммерчески доступном программном пакете молекулярного моделирования ICM-Pro.

Традиционными для ОМРБ являются исследования молекулярных механизмов биосинтеза белка.

В 2015 г. группе исследователей из Германии и России, при активном участии российских ученых (Лаборатория биосинтеза белка), впервые удалось превзойти результаты, полученные рентгеновской кристаллографией. С помощью метода криоэлектронной микроскопии были получены пространственные структуры рибосомных комплексов с разрешением менее 3 Å. Новыми, оптимизированными методами получения функциональных рибосомных комплексов и способами сортировки микроизображений получена наиболее точная и полная модель бактериальной рибосомы в комплексе с элонгационным фактором EF-Tu, остановленная антибиотиком кирромицином в процессе

декодирования (чтения) мРНК. Впервые в мире получена структура рибосом, включающая структуры всех 35 модифицированных оснований рибосомальной РНК.

В работе П. С. Касацкого, А. Л. Коневеги обнаружен новый способ изменения субстратной специфичности ферментов из семейства дигидроуридинсинтаз.

Характерной особенностью молекул тРНК является наличие большого количества модифицированных нуклеотидов, возникающих в процессе созревания первичного транскрипта тРНК. Один из наиболее распространенных модифицированных нуклеозидов – дигидроуридин – образуется восстановлением двойной связи C5–C6 в молекуле уридина. Формирование дигидроуридина в тРНК катализируется ферментами, дигидроуридинсинтазами, которых в *Escherichia coli* обнаружено три вида (DusA, DusB и DusC). Рентгеноструктурный анализ комплексов дигидроуридинсинтаз из мезофильных и термофильных организмов с тРНК^{Phe} и тРНК^{Trp} показал, что подсемейства Dus, которые избирательно модифицируют уридин в различных положениях в тРНК, принимают идентичные конформации, но связывают соответствующие субстраты тРНК в разных ориентациях, которые отличаются поворотом на 160°. Так, изящная субстратная специфичность ферментов класса Dus контролируется относительно простым механизмом, предусматривающим переориентацию всей молекулы тРНК. Такое перепрограммирование ферментативной специфичности можно назвать уникальным эволюционным решением для изменения распознавания тРНК одной и той же упаковкой белка.

Также к числу наиболее значимых научных достижений ОМРБ можно отнести работу по изучению возможной связи болезни Паркинсона (БП) и лизосомных болезней накопления (Лаборатория медицинской генетики человека). В 2015 г. выполнено исследование по оценке корреляции уровня олигомерных форм белка альфа-синуклеина и активности лизосомного фермента глюкоцереброзидазы (GBA) у пациентов с болезнью Гоше. Наличие двух мутантных аллелей в гене *GBA* является причиной развития редкого наследственного заболевания, относящегося к классу лизосомных болезней накопления, – болезни

Гоше. Высокий риск развития БП у носителей мутаций в гене *GBA* показан во всех популяциях мира, в т. ч. в России, однако молекулярный механизм остается неизвестным. Измерение уровня олигомерного альфа-синуклеина в плазме крови и активность GBA показали, что мутации в гене *GBA*, приводящие к дисфункции лизосом, сопряжены с накоплением и олигомеризацией белка альфа-синуклеина, т. е. способствуют формированию именно тех форм белка, которые являются нейротоксичными и приводят к гибели нейронов при БП.

Эти данные проясняют механизм высокого риска развития БП у носителей мутаций в гене *GBA*, а также позволяют предложить для лечения GBA-ассоциированной БП использование фармакологических шаперонов GBA (например, амброксол, изофагомин) и подойти к лечению одной из форм паркинсонизма.

Обширная группа конформационных заболеваний человека, называемых амилоидозами, сопровождается образованием и накоплением в организме агрегатов (фибриллярных и олигомерных) амилоидных белков, обладающих токсическими свойствами. При этом агрегаты амилоидных белков имеют ряд физиологических функций и не всегда связаны с патологическими процессами. Белок мозга BASP1, являющийся критически важным для жизнедеятельности организма, способен образовывать олигомеры *in vitro* и фибриллоподобные агрегаты. В работе О. С. Витюка, Н. Я. Гильяно и В. В. Захарова (Лаборатория биополимеров) исследованием амилоидных свойств агрегатов белка BASP1 установлено, что N-концевой миристилированный пептид туг-BASP1(1-13) образует фибриллы амилоидной структуры *in vitro*, и олигомеры белка BASP1 обладают сходной с олигомерами амилоидных белков структурой. Зафиксированные на пресинаптической мембране нейронов мозга крысы нативные белковые комплексы белка BASP1 присутствуют в виде олигомеров. Полученные олигомеры BASP1 не токсичны для клеток PC12. Эти данные говорят о том, что олигомеры BASP1 представляют собой непатологическую функциональную форму данного белка в мозге, предполагаемой функцией которой является секвестрирование мембранного фосфатидилинозитол-4,5-дифосфата.

Традиционными для ОМРБ являются работы по гомологической репарации генома. Микроорганизм *Deinococcus radiodurans* выдерживает экстремальные дозы ионизирующей радиации благодаря эффективному механизму репарации ДНК, способному справиться с сотнями двунитевых разрывов. Белок RecA – центральное звено гомологичной рекомбинации у бактерий – является одним из ключевых компонентов рекомбинационной репарации и детально изучается в Лаборатории молекулярной генетики эукариот. Для репарации двунитевых разрывов ДНК необходимо взаимодействие RecA с ДНК и образование нуклеопротеинового комплекса, представляющего собой спиральный филамент. В эксперименте с одной молекулой DrRecA в работе Д. М. Байтина с помощью оптического пинцета измерялись механические свойства филамента, полученного при ассоциации DrRecA и EcRecA с длинной двунитевой ДНК фага λ .

DrRecA образует комплексы с двухцепочечной ДНК намного быстрее, обладает несколько меньшей длиной и большей гибкостью по сравнению с EcRecA. Кроме того, во время сборки филамента происходят множественные события нуклеации. Полученные наблюдения указывают на разное число разрывов в филаментах обоих белков, или разное количество кластеров. Такое различие механических свойств является результатом изменения соотношения между событиями нуклеации филамента на ДНК и фазой последующего роста.

В ОМРБ на протяжении многих лет ведутся работы по структурно-функциональной характеристике ферментов (Лаборатория энзимологии). В работе А. С. Борисовой определена пространственная структура целлобиогидролазы, секретруемой аскомицетом *Geotrichum candidum* (GcaCel7A). Показано, что исследованная целлюлаза обладает двухдоменной структурой и состоит из целлюлозосвязывающего модуля, пептидного линкера и каталитического домена, гомологичных мотивам широко используемой в биотехнологии целлобиогидролазы (ЦБГ) из *Hypocrea jecorina* (HjeCel7A). Оказалось, что GcaCel7A способна расщеплять целлюлозу «Авицел», демонстрируя повышенную устойчивость к ингибированию продуктом (целлобиозой). Анализ пяти кристаллических структур (двух для апофермента и трех

комплексов с различными тиоолигосахаридами) выявил конформационные различия петель, находящихся в области входа в полость связывания субстрата в активном центре фермента. В частности, установлено, что петля в районе тоннеля у субсайта –4 частично дестабилизирует его.

Никотинамидадениндинуклеотид (NAD) – важнейший кофактор окислительно-восстановительных реакций ключевых метаболических путей. NAD является субстратом для нескольких семейств регуляторных белков: деацетилаз, белков сиртуинов, АДФ-рибозилтрансфераз и поли-АДФ-рибозилполимераз, которые регулируют такие жизненно необходимые процессы, как экспрессия генов, репарация ДНК, апоптоз, секреция инсулина и многие другие. Нарушения регуляции NAD могут приводить к развитию таких серьезных патологий, как нейродегенеративные заболевания, диабет и рак.

Основным способом регуляции уровня NAD в клетках человека является биосинтез из поступающих с пищей предшественников – никотинамида (Nam) и никотиновой кислоты (NA) (витамин В3). Известно, что рибозид никотинамида (NR) и рибозид никотиновой кислоты (NAR) также являются эффективными предшественниками NAD, однако физиологическая роль данных нуклеозидов недостаточно изучена.

В работе А. П. Якимова и К. А. Шабалина установлено, что помимо поступления с пищей нуклеозиды NR и NAR могут образовываться внутри клеток. Показано, что цитозольные 5'-нуклеотидазы человека CN-II и CN-III дефосфорилируют мононуклеотиды NMN и NAMN с образованием соответствующих нуклеозидов NR и NAR *in vitro*. Более того, продемонстрировано, что синтезированный NAR выходит из клеток человека и выступает в роли предшественника для синтеза NAD в клетках, не способных метаболизировать Nam и NA.

В ОМРБ ведутся работы по созданию методов диагностики злокачественных опухолей – глиобластом (Лаборатория клеточной биологии). В работе В. А. Рыжова использовали конъюгат: суперпарамагнитных наночастиц (НЧ) на основе оксидов железа (SPIONs) с пришитыми к ним Hsp70-специфическими антителами (cmHsp70.1). Наночастицы обеспечивают в магнитно-резонансной томографии (МРТ) негативный контраст, что ис-

пользуется для диагностики опухолей в МРТ, а стресс-индуцибельный белок теплового шока Hsp70 экспрессируется на мембране агрессивных опухолевых клеток и способствует адресной доставке к ним. Это сочетание может обеспечить многообещающую стратегию для ранней диагностики и лечения глиом.

Эксперименты *in vitro* показали избирательное связывание таких конъюгатов с mHsp70 в различных типах опухолевых клеток (глиобластома C6, лейкемия K562, карцинома HeLa), а также зависимость связывания от дозы ионизирующей радиации. Использование таких НЧ приводит к значительному увеличению контраста МРТ высокого

разрешения. Анализ биораспределения НЧ у крыс, больных глиомой, по оригинальной методике, разработанной ОМРБ, проводился измерением второй гармоники нелинейного отклика в параллельном *постоянном* поле и показал семикратное увеличение отношения «опухоль – ткань» мозга для НЧ конъюгата по сравнению со SPION.

Сотрудниками ОМРБ в 2015 г. опубликовано более 60 работ в рецензируемых журналах, в т. ч. высокорейтинговых: Nature (IF = 41,5), PNAS (IF = 9,7), J. Biol. Chem. (IF = 4,6), Retrovirology (IF = 4,2), J. Comput. Chem. (IF = 3,6). Сделано более 40 докладов на международных конференциях, защищены 3 кандидатские диссертации.

Отделение перспективных разработок

Отделение перспективных разработок (ОПР) – руководитель к. ф.-м. н. В. Ф. Ежов – состоит из 3 лабораторий:

- голографических информационно-измерительных систем (заведующий д. ф.-м. н. Б. Г. Турухано);
- радиационной физики (заведующий д. ф.-м. н. Н. А. Иванов);
- квантовой химии (заведующий д. ф.-м. н. А. В. Титов)

и 2 отделов:

- ускорительного (заведующий к. т. н. Е. М. Иванов), в состав которого входит Лаборатория физики и техники ускорителей (заведующий к. ф.-м. н. С. А. Артамонов);
 - информационных технологий и автоматизации (заведующий д. т. н. Ю. Ф. Рябов), в состав которого входит Лаборатория информационно-вычислительных систем (заведующий с. н. с. С. Б. Олешко).
- В ОПР работает 35 научных сотрудников, из них 4 доктора наук, 18 кандидатов наук.



В. Ф. Ежов,
к. ф.-м. н.,
руководитель
Отделения

В ОПР сосредоточены базовые ускорительные установки Института. В первую очередь это уникальный по своим характеристикам синхротрон

на энергию 1 000 МэВ с током выведенного пучка 1 мкА, позволяющий проводить широкий круг научных и прикладных исследований в различных областях: от ядерной физики до медицины. Основными его отличительными чертами являются:

- высокоэффективная система вывода (30 %), что в пять раз превышает эффективность стандартной регенеративной системы;
- система временной растяжки выведенного протонного пучка, которая позволяет увеличить коэффициент временного заполнения пучка с 2 до 85 %.

Для ряда физических и прикладных исследований требуются пучки протонов других энергий. С этой целью на синхротроне ПИЯФ НИЦ КИ силами Ускорительного отдела (УО) созданы пучки протонов переменной энергии от 60 до 1 000 МэВ. Диаметр полученных

пучков ~ 30–80 мм, $\Delta p/p$ находится в диапазоне 1,3–14 %, а интенсивность изменяется в зоне 10^7 – 10^{12} с⁻¹.

Кроме основного протонного пучка из камеры синхротрона одновременно с основным выводится второй пучок «малой» интенсивности, около 1 % основного пучка. Пучок может использоваться как для физических, так и для прикладных целей, в частности для проведения протонной лучевой терапии, что позволяет значительно снизить стоимость облучения пациентов.

Для проведения научных исследований имеются вторичные пучки π^\pm - и μ^\pm -мезонов, получаемые на внешней мезонообразующей мишени.

В камере ускорителя в результате однообrotnого сброса протонного пучка на внутреннюю нейтронообразующую свинцовую мишень генерируется нейтронный пучок с энергией нейтронов от 10^{-2} эВ до 200 МэВ.

Совершенствование космической и авиационной техники в значительной степени связано с использованием элементов микро- и нанoeлектроники. Одним из основных условий их успешного использования является способность длительное время надежно функционировать в радиационных полях космического пространства и верхних слоев атмосферы. В настоящее время нормативные акты России и стандарты ведущих стран мира включают обязательные испытания радиационной стойкости современной радиоэлектрон-

ной аппаратуры, используемой в авиационной и космической технике, относительно воздействия различных видов излучения. В 2015 г. на синхроциклотроне ПИЯФ НИЦ КИ начал функционировать специализированный центр радиационных испытаний на протонах с энергией 60–1 000 МэВ, включающий два стенда с системами диагностики пучка, современными приборами дозиметрии, автоматизированной системой обработки результатов и современной инфраструктурой для пользователей.

В настоящее время стандарты ведущих стран мира предусматривают обязательные испытания радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры, используемой в авиационной и космической технике, относительно воздействия потоков нейтронов. Международный нормативный документ JEDEC STANDARD предписывает проводить испытания электронных компонент и радиоизделий в потоках нейтронов со спектром, который подобен атмосферному спектру нейтронов. На нейтронном источнике ГНЕЙС синхроциклотрона СЦ-1000 силами группы физики деления ядер ОНИ и УО ОПР в 2015 г. завершено создание подобного нейтронного источника. Высокая интенсивность нейтронного пучка позволяет проводить ускоренные испытания электроники – один час экспозиции изделия на пучке эквивалентен 100 годам пребывания в полете. Таким образом, в ПИЯФ НИЦ КИ с 2015 г. действует универсальный центр испытаний радиационной стойкости элементов электронной компонентной базы, в котором отныне возможно комплексное испытание радиоэлектроники как на пучках протонов переменной энергии, так и на пучках нейтронов со спектром, повторяющим спектр атмосферных нейтронов.

В ОПР силами УО ПИЯФ НИЦ КИ и НИИЭФА им. Д. В. Ефремова проводятся работы по запуску многоцелевого циклотронного комплекса на основе построенного изохронного циклотрона Ц-80 с переменной энергией протонов 40–80 МэВ и током до 150 мкА. Высокая энергия ускоренного пучка в сочетании с высокой интенсивностью позволит производить радиоизотопы и радиофармпрепараты высокого качества, недоступные для коммерческих циклотронов, в частности генераторные изотопы. Генераторные изо-

топы открывают путь для проведения позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) в отдаленных от циклотрона медицинских центрах. В проекте также предусмотрено развитие метода создания сверхчистых медицинских изотопов с помощью магнитного сепаратора.

Энергетический диапазон протонного пучка (60–70 МэВ) циклотрона Ц-80 позволяет создать единственный на сегодня в России офтальмологический центр для радиационной терапии раковых заболеваний глаза. Разработкой этого проекта давно занимается УО, а с недавнего времени и Лаборатория радиационной физики ОПР. В 2015 г. проведены расчеты по определению радиационного фона в зоне облучения при различных способах формирования протонного пучка. Расчеты показали, что радиационный фон в зале облучения оказывается в три раза меньше при формировании пучка с использованием коллиматоров по сравнению с традиционным способом. Кроме того, при формировании пучка с использованием коллиматоров упрощается система формирования пучка и уменьшается число магнитных элементов тракта транспортировки. При создании оборудования для кабинета офтальмологии и планирования облучений будет использован огромный опыт, накопленный в ИТЭФ НИЦ КИ, где до 2010 г. сеансы протонной терапии прошли около 1 400 пациентов.

Лаборатория голографических информационно-измерительных систем (ЛГИИС) ОПР является одним из мировых лидеров в области прецизионных измерений на масштабах нанометров. Для проведения этих исследований в ЛГИИС имеется современная уникальная подземная безвибрационная голографическая лаборатория. На базе этой лаборатории и уникальных стендов для синтеза линейных и радиальных голографических дифракционных решеток выпускается 14 наименований нанотехнологических устройств и приборов, среди которых: фотоэлектрические преобразователи линейных и угловых перемещений, длиномеры, двух-, трех-, четырех- и более координатно-измерительные машины, радиусомеры, плоскомеры, поворотные столы для измерения с разрешением 10 нм и сотых долей секунды. В 2015 г. впервые в мире в ЛГИИС создана линейная голографическая решетка длиной

1 300 мм и разрешением 1 нм. Работы ЛГИИС были отмечены на выставке «Армия-2015».

Отдел информационных технологий и автоматизации ОПП обеспечивает работу локальной вычислительной сети Института, включая вычислительный кластер, а также узла ГРИД-сети WLCG в ПИЯФ НИЦ КИ. В 2015 г. одним из основных направлений деятельности отдела стало создание центра обработки данных на реакторе ПИК (ЦОД ПИК). С вводом в эксплуатацию этого центра в 2017 г. вычислительные возможности для сотрудников ПИЯФ НИЦ КИ значительно возрастут. Сотрудники Лаборатории информационно-вычислительных систем принимают активное участие в проектах ATLAS и WLCG в ЦЕРН. В сферу их деятельности входят разработка и модификация программного обеспечения для систем хранения данных WLCG (GridFTP, DPM, SRM) с целью увеличения производительности передачи данных при условии сохранения совместимости с существующими клиентами и конфигурациями на ГРИД-сайтах, а также ввод в эксплуатацию и поддержка программных средств реконструкции событий для субдетекторов проекта ATLAS. Полученный опыт работы с самыми современными технологиями распределенных вычислений и обработки данных помогут в организации работы ЦОД ПИК.

Открытие подледникового озера Восток в Антарктиде стало последним географическим открытием XX в. Его исследование позволит получить уникальные данные о происхождении и эволюции форм жизни в экосистемах, которые характеризуются крайне высокой степенью олиготрофности (т. е. низкой концентрацией питательных веществ), а также экстремальными условиями. К ним относятся: ожидаемое чрезвычайно высокое содержание кислорода в воде (превышающее в 50–100 раз обычную для земных озер концентрацию), высокое давление – 350 бар, невозможность использования экосистемой солнечной энергии из-за крайне толстого слоя льда, покрывающего озеро. ПИЯФ НИЦ КИ является головной организацией по исследованию водной толщи озера. В этой программе активно участвуют сотрудники ОПП, ОМРБ и ОНИ. Перед Институтом стоит сложнейшая техническая задача по разработке такой технологии проникновения в толщу водной среды озера, при которой будет исключено его за-

грязнение буровой жидкостью, заполняющей скважину. Эта задача требует разработки уникальных устройств, регистрирующих гидрофизические, гидрохимические и микробиологические параметры в режиме онлайн, а также допускающих стерильный отбор проб воды и грунта в объемах, необходимых для проведения последующих лабораторных анализов.

В ПИЯФ НИЦ КИ изготовлено оборудование, предназначенное для исследования водной толщи озера Восток. До отправки этого оборудования в Антарктиду необходимо провести его глубоководные испытания. В 2015 г. испытание созданного оборудования было организовано на глубоководных местах Ладожского озера. Испытания прошли успешно.

Основным направлением развития работ Лаборатории квантовой химии ОПП является развитие методов расчета электронной структуры молекул, содержащих тяжелые элементы. Эта активность была стимулирована еще в начале 80-х гг. прошлого века необходимостью расчета *P*- и *CP*-нечетных эффектов в тяжелых двухатомных молекулах. Основой расчетов стал развиваемый лабораторией двухшаговый метод, который позволил разделить структуру расчета таких молекул на два последовательных расчета в валентной области и в области кора. К настоящему времени точность, достигнутая в этих расчетах, стала рекордной в мире. Сотрудники лаборатории не ограничились расчетами *P*- и *CP*-нечетных эффектов, они перешли к более сложным структурам. Разработка методов, алгоритмов и программных пакетов для прецизионного моделирования электронной структуры и свойств соединений тяжелых элементов позволила начать систематическое исследование свойств сверхтяжелых элементов, перейти к расчетам в твердофазных системах и провести исследование химических свойств синтезируемых в Дубне и Дармштадте сверхтяжелых элементов из «острова стабильности».

Сотрудниками ОПП в 2015 г. опубликовано 24 работы (и более 100 в соавторстве с учеными коллаборации ATLAS), сделано 27 докладов на российских и международных научных конференциях, получено 4 патента и защищена 1 кандидатская диссертация.



$$\Psi(k) = (k-r)^2 \exp(-\beta k) / (k-r) \exp(-\beta k)$$

$$k_1 = \sqrt{k_2^2 - r^2}$$

$$r = (\sqrt{1+x^2} - x) / (\sqrt{1+x^2} + x)$$

$$|k_1) = \int_{-a}^a |A|^2 dx / 2d$$

$$t \exp(ik_1 l) / [k_1 r^2 \exp(2ik_1 l)]$$

$$l = 2a + x$$

$$T = \int T(k) \cos \theta / \omega dk$$

$$k_1 = 2k_2 / (k_1 + k_2)$$

$$\phi = 2k_1 l$$

$$k_1 = 2k_2 / (k_1 + k_2)$$

$$T = \int T(k) \cos \theta / \omega dk$$

$$k_1 = 2k_2 / (k_1 + k_2)$$

$$k_1 = 2k_2 / (k_1 + k_2)$$

$$k_1 = 2k_2 / (k_1 + k_2)$$

$$k_1 = 2k_2 / (k_1 + k_2)$$

$$k_1 = 2k_2 / (k_1 + k_2)$$

Теоретическая и математическая физика

- 28 LHCb: пентакварки как связанные состояния протона и чармония
- 29 Резонансная модель для непертурбативных вкладов в распределения глюонов в адронах
- 30 Уравнения Эйлера – Лагранжа для квантовой хромодинамики и гравитации при высоких энергиях
- 32 Рождение тяжелых мезонов на Большом адронном коллайдере
- 33 Феноменология Стандартной модели в спонтанно-нарушенной зеркальной симметрии
- 34 Струны в неабелевых калибровочных теориях в четырехмерном пространстве-времени
- 35 Двойная ионизация гелиеподобных ионов при рассеянии высокоэнергетических фотонов
- 36 Дефекты в спиральных магнетиках со взаимодействием Дзялошинского – Мория
- 37 Магноны в ферромагнетике со скирмионом
- 38 Квантовая спиновая жидкость
- 39 Оценка возможности наработки изотопа ^{254}Es в реакторе ПИК

ЛНСб: пентакварки как связанные состояния протона и чармония

В. Ю. Петров, М. В. Поляков, М. И. Эйдес

Отделение теоретической физики ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Недавно открытый в ЛНСб пентакварк $P_c(4450)$ интерпретируется как связанное состояние чармония $\psi(2S)$ и нуклона (рис. 1). Тяжелый кваркониум представляет собой нейтральный объект малого (по сравнению с размером протона) размера и слабо взаимодействующий с ним. Он может легко проникнуть внутрь нуклона и образовать истинно пентакварковое состояние. В дипольном приближении взаимодействие чармония и нуклона происходит путем испускания двух хромозлектрических глюонов в бесцветном состоянии. Оно может быть вычислено теоретически. Эффективный потенциал взаимодействия – произведение хромозлектрической поляризуемости и локальной плотности глюонного тензора энергии-импульса внутри нуклона. Хромозлектрическая поляризуемость может быть надежно вычислена в пределе бесконечно тяжелых кварков, когда кваркониум может рассматриваться как чисто кулоновская система, которая растет пропорционально кубу радиуса кваркониума и потому много больше для возбужденных состояний. Для чармония $\psi(2S)$ притяжение может достигать нескольких сотен МэВ (рис. 2). Зависимость от расстояния дается распределением глюонной энергии в протоне. Оно может быть вычислено в пределе большого числа цветов, в приближении среднего поля.

Вычисленный потенциал имеет уровень с квантовыми числами $3/2^-$, который можно отождествить с пентакварком $P_c(4450)$. Ширина состояния приблизительно равна 12 МэВ и почти полностью обусловлена распадом на $J/\psi + p$. Второй (более широкий) пентакварк можно интерпретировать как связанное состояние χ_{c2} (3556) (который является $1P$ -состоянием чармония) и протона. Наблюдаемая

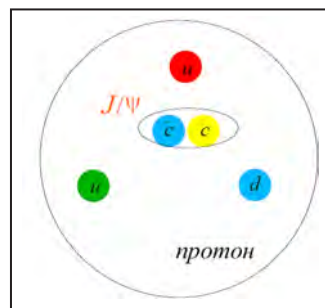


Рис. 1. Предполагаемая структура пентакварка

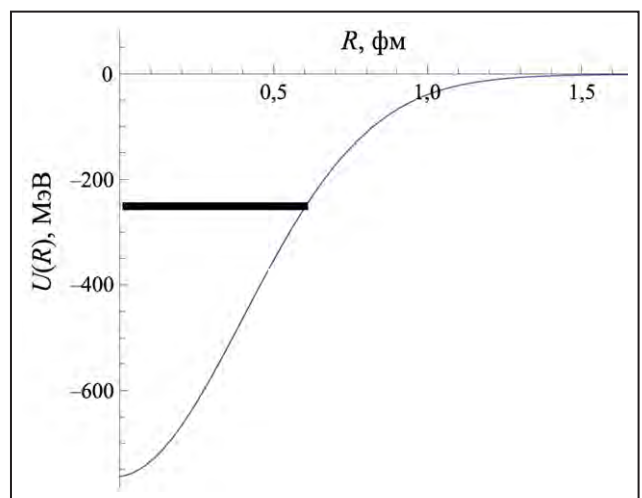


Рис. 2. Потенциал взаимодействия $U(R)$ как функция от расстояния R между протоном и чармонием

ширина пентакварка может объясняться тем, что в этой области есть несколько близких резонансов, которые не разрешаются на эксперименте.

Наблюдаемые пентакварки должны иметь партнеров с меньшими спинами и массами, отличающихся только сверхтонким расщеплением, которое можно оценить в ~ 10 – 15 МэВ. Также они должны быть членами $SU(3)$ -октетов. Массы прочих членов октета легко предсказать.

Резонансная модель для непертурбативных вкладов в распределения глюонов в адронах

С. И. Троян – Отделение теоретической физики
ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Б. И. Ермолаев – Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
F. Olness – Southern Methodist University

Описание адронных реакций при высоких энергиях требует использования квантовой хромодинамики (КХД) как в пертурбативной, так и в непертурбативной области. Это сильно усложняет задачу, т. к. непертурбативные характеристики КХД трудно, если вообще возможно, вычислить. Стандартный подход состоит в использовании КХД-факторизации и разделении пертурбативных и непертурбативных компонент, а затем в использовании свойств пертурбативных выражений для получения основных характеристик непертурбативной части.

Ранее изучались непертурбативные вклады, представленные как блок T на рис. 1, для упругих амплитуд рассеяния вперед (т. е. на нулевой угол рассеяния) кварков на адронах, как для случая поляризованных частиц, так и для неполяризованных. Оптическая теорема позволяла связать инвариантные амплитуды с распределением кварков в адронах.

В этой работе такой подход к анализу структуры адронов был распространен на случай изучения их глюонной компоненты (рис. 2). Общепринятый способ действий является чисто феноменологическим и состоит в конструировании непертурбативных вкладов подгонкой к данным эксперимента. Знание о характере поведения пертурбативной части амплитуд в инфракрасной и ультрафиолетовой областях было использовано для того, чтобы получить ограничения на непертурбативную часть из требования сходимости интеграла свертки обеих частей.

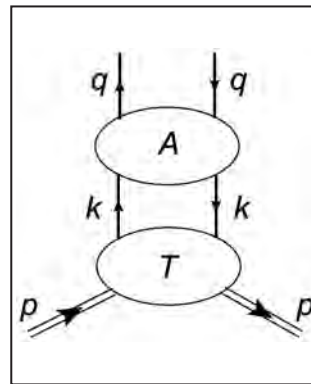


Рис. 1. Факторизация амплитуды упругого рассеяния кварка q на адроне p на пертурбативную A и непертурбативную T компоненты по кварковому промежуточному состоянию k

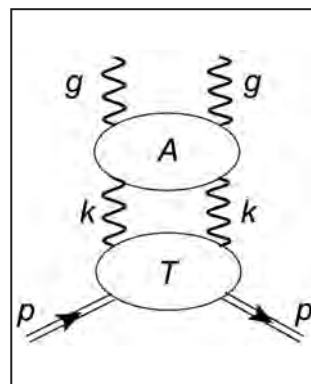


Рис. 2. Факторизация амплитуды упругого рассеяния глюона g на адроне p на пертурбативную A и непертурбативную T компоненты по глюонному промежуточному состоянию k

Также была предложена модель резонансной зависимости от энергии для рассмотренных амплитуд рассеяния и оценена применимость резонансных факторов как в области резонанса, так и за ее пределами. Начиная с базовой факторизации амплитуд были последовательно выведены ограничения на непертурбативную компоненту, которые необходимы как для обеспечения K_T -факторизации, так и для обеспечения коллинеарной факторизации.

Уравнения Эйлера – Лагранжа для квантовой хромодинамики и гравитации при высоких энергиях

Л. Н. Липатов

Отделение теоретической физики ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Замечательные свойства уравнений Балицкого, Фадины, Кураева и Липатова (БФКЛ) для волновых функций померона, оддерона и других связанных состояний реджезованных глюонов в синглетном и присоединенном представлениях цветовой группы связаны с их калибровочно-инвариантной формулировкой в терминах эффективных вершин и траектории реджезованного глюона. Эти величины могут быть вычислены с помощью фейнмановских диаграмм для эффективного действия, содержащего помимо обычных глюонных и кварковых полей также степени свободы, описывающие рождение и уничтожение реджезованных глюонов. Калибровочно-инвариантное уравнение Эйлера – Лагранжа для эффективной квантовой хромодинамики (КХД) дает возможность вычислять вершины реджеонных взаимодействий. В силу АдС-КТП-соответствия особенно простые результаты получаются для $N = 4$ суперсимметричной модели, в которой померон БФКЛ дуален реджезованному гравитону, поэтому рассматривается эффективное действие для высокоэнергетических процессов в гравитации. Кроме метрического тензора оно содержит поля, описывающие рождение и уничтожение реджезованных гравитонов. Уравнение Эйлера – Лагранжа для этого действия общеквариантно и позволяет найти взаимодействия реджезованных гравитонов.

Высокоэнергетическое эффективное действие в квантовой хромодинамике

Эффективное действие S_{eff} для процессов КХД при больших энергиях справедливо для кластера из кварков и глюонов, взаимодействующих

с реджезованными глюонами и имеющих быстрой у в некотором малом интервале. Кроме глюонного поля v_μ , представленного антиэрмитовской матрицей для группы $SU(N_c)$, вводятся также поля A^\pm , описывающие рождение и уничтожение реджезованных глюонов. Эти поля инвариантны по отношению к калибровочным преобразованиям с параметрами $\chi(x)$, убывающими при $x \rightarrow \infty$ и удовлетворяющими условию $\partial_\pm A^\pm = 0$. Индуцированный вклад в S_{eff} имеет вид

$$S_{ind} = Tr \int d^4x (V_+ \partial_\mu^2 A^+ + V_- \partial_\mu^2 A^-).$$

Токи $V_\pm = V_0 \pm V_3$ могут быть разложены в ряд теории возмущений:

$$\begin{aligned} V_\pm &= -\frac{\partial_\pm U(x^\pm)}{g}, \quad U(x^\pm) = \frac{1}{D_\pm} \partial_\pm = \\ &= 1 - \frac{g}{\partial_\pm} v_\pm + \frac{g}{\partial_\pm} v_\pm \frac{g}{\partial_\pm} v_\pm + \dots \end{aligned}$$

Матрицы $U(x^\pm)$ являются решениями уравнений $D_\pm U(x^\pm) = 0$. В рамках предписания, отвечающего главному значению в соответствующих сингулярных интегралах, они могут быть представлены в виде отношения вильсоновских P -экспонент:

$$\begin{aligned} U(x^\pm) &= P \frac{e^{-\frac{g}{4} \int_{-\infty}^{x^\pm} dx^\pm v_\pm}}{e^{-\frac{g}{4} \int_{x^\pm}^{\infty} dx^\pm v_\pm}} \equiv \\ &= \frac{e^{-\frac{g}{4} v_\pm(x^\pm) dx^\pm}}{e^{-\frac{g}{4} v_\pm(x^\pm) dx^\pm}} \frac{e^{-\frac{g}{4} v_\pm(x^\pm - dx^\pm) dx^\pm}}{e^{-\frac{g}{4} v_\pm(x^\pm + dx^\pm) dx^\pm}} \frac{e^{-\frac{g}{4} v_\pm(x^\pm - 2dx^\pm) dx^\pm}}{e^{-\frac{g}{4} v_\pm(x^\pm + 2dx^\pm) dx^\pm}} \dots \end{aligned}$$

В чистой глюодинамике соответствующие уравнения Эйлера – Лагранжа имеют вид

$$[D_\mu, G^{\mu\nu}]^\perp = 0, [D_\mu, G^{\mu\nu\pm}] = j_{ind}^\pm, \\ j_{ind}^\pm = U(x^\pm)(\partial_\sigma^2 A^\pm)U^\pm(x^\pm).$$

В частности, в квазиупругой кинематике, где $A^\pm = 0$, их решения V_\mp совпадают с A^\mp .

Высокоэнергетическое эффективное действие в гравитации

Согласно гипотезе Малдасены $N = 4$ суперсимметричная теория эквивалентна десятимерной модели суперструн в пространстве анти-де Ситтера. Здесь померон БФКЛ дуален реджезованному гравитону, и эффективная модель В. Н. Грибова для померонов эквивалентна теории взаимодействующих реджезованных гравитонов.

Общековариантное эффективное действие в высокоэнергетической гравитации формулируется для кластера обычных и реджезованных гравитонов, имеющих быстроты в некотором малом интервале. Помимо известного члена Эйнштейна – Гильберта это действие содержит индуцированный вклад

$$S_{ind} = -\frac{1}{2\kappa^2} \int d^4x \left(\frac{j_{++}}{2} \partial_\sigma^2 A^{++} + \frac{j_{--}}{2} \partial_\sigma^2 A^{--} \right),$$

где $A^{\pm\pm}$ (с $\partial_\pm A^{\pm\pm} = 0$) описывает рождение и уничтожение реджезованных гравитонов. Общая ковариантность определяет зависимость $j_{\pm\pm}$ от метрического тензора $g_{\mu\nu}$. Этот ток выражается через функцию ω^\mp , удовлетворяющую уравнению Гамильтона – Якоби:

$$j_{\pm\pm} = \partial_\pm \omega^\mp, g^{\rho\sigma}(\partial_\rho \omega^\mp)(\partial_\sigma \omega^\mp) = 0.$$

Его решение $\omega^\mp/2 = x^\mp - x^\mp(x^\pm, x^\perp)$ описывает световой фронт, представляющий собой плоскую волну при больших отрицательных или положительных временах. Оно может быть интерпретировано как координатное преобразование $x'(x)$ в систему с глобальным светоподобным временем x'^\mp , отвечающим заданному условию на метрику $g'^{\mp\mp} = 0$.

Уравнение Эйлера – Лагранжа для эффективного действия в гравитации имеет вид

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\theta_{\mu\nu}, \\ \theta_{\mu\nu} = \partial_\mu x'^\perp \partial_\nu x'^\perp \partial_\sigma^2 A^{++}(x') + \partial_\mu x''^\perp \partial_\nu x''^\perp \partial_\sigma^2 A^{--}(x''),$$

где $x'(x)$ и $x''(x)$ являются преобразованиями координат в системы отсчета с соответствующими условиями на метрику $g^{\mp\mp} = 0$. Его решения для $g^{\mu\nu}$ в квазиупругой кинематике, где $A^{\pm\pm} = 0$, могут быть выражены в виде общековариантных преобразований поля A^\pm .

С использованием уравнений Эйлера – Лагранжа можно построить эффективные вершины для взаимодействий произвольного числа реджезованных гравитонов в древесном приближении.

В случае нетривиальных начальных и конечных граничных условий имеются классические решения этих уравнений, позволяющие найти эффективные вершины испускания гравитонов в мультиреджевской кинематике рожденных частиц при высокоэнергетических столкновениях.

Рождение тяжелых мезонов на Большом адронном коллайдере

М. Г. Рыскин, В. А. Хозе, А. Г. Шуваев

Отделение теоретической физики ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Впервые вычислено сечение образования двух J/ψ -мезонов в эксклюзивном процессе $pp \rightarrow p + J/\psi + J/\psi + p$. Показано, что вклад однократного глюон-глюонного взаимодействия сильно превышает вклад двукратного партон-партонного рассеяния.

По сравнению с наивной оценкой сечение подавлено правилом отбора $J_z = 0$, характерным для эксклюзивных реакций. Полученные сечения и распределения по массе J/ψ -пары (рис. 1) согласуются с данными LHCb.

В силу теоремы Ландау – Янга $\chi(1^+)$ -мезон не может образоваться при соударении двух одинаковых глюонов, находящихся на массовой поверхности. Таким образом, в главном порядке теории возмущений ожидаемое сечение равно нулю. С другой стороны, наблюдаемое на опыте отношение сечений $\sigma[\chi(1^+)]/\sigma[\chi(2^+)]$ оказалось близким к единице, несмотря на то что $\chi(2^+)$ -мезон рождается уже в главном порядке теории возмущений.

Было рассмотрено образование $\chi(1^+)$ -мезона при соударениях трех глюонов: $g + (gg) \rightarrow \chi(1^+)$ (рис. 2). Показано, что благодаря высокой плотности глюонов при энергиях Большого адронного коллайдера сечение такого процесса сравнимо по величине с сечением рождения $\chi(2^+)$ -мезона при слиянии двух глюонов (т. е. в главном порядке теории возмущений).

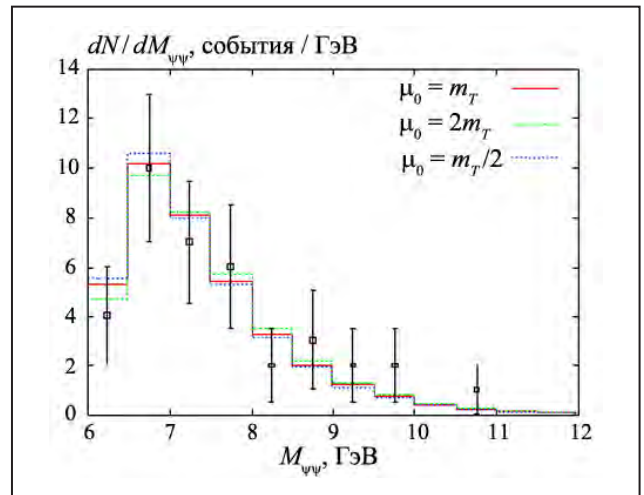


Рис. 1. Распределение по массам пары J/ψ -мезонов в эксклюзивном процессе $pp \rightarrow p + J/\psi + J/\psi + p$

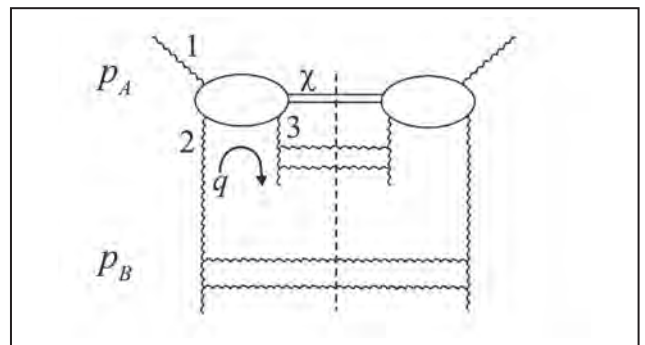


Рис. 2. Диаграмма, описывающая рождение $\chi(1^+)$ -мезона тремя глюонами

Феноменология Стандартной модели в спонтанно нарушенной зеркальной симметрии

И. Т. Дятлов

Отделение теоретической физики ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Начиная с открытия Ли и Янга попытки понимания явления несохранения четности, объяснения его парадоксов основываются на гипотезе зеркальной симметрии (ЗС). Система наблюдаемых состояний дополняется здесь аналогами, тождественными нормальным частицам по всем свойствам, кроме слабых взаимодействий, у которых левые киральные токи заменяются для новых объектов на правые. Отсутствие зеркальных частиц среди наблюдаемых вынуждает считать их очень тяжелыми.

Утверждается, что ЗС способна также быть гипотетической причиной ряда необъясненных наблюдаемых явлений Стандартной модели (СМ):

- иерархия элементов матриц слабого смешивания для кварков (матрица ККМ);
- исключительно малая масса нейтрино (развитие здесь известного *see-saw*-механизма);
- качественно иная (по сравнению с ККМ) структура матрицы смешивания лептонов;
- свойства лептонов свидетельствуют в ЗС-схеме о дираковской природе и инверсном спектре масс нейтрино.

Для появления этих свойств зеркальные фермионы действительно должны быть очень тяжелыми.

Спонтанное нарушение ЗС с образованием больших масс зеркальных частиц моделируется введением дополнительных скаляров в полной аналогии с нарушением слабой симметрии СМ. Главное отличие от СМ – необходимость для ЗС двух скаляров-изоспиноров. Первый можно отождествить с хиггсовским бозоном, второй представляет че-

тыре новых состояния с разными зарядами и неизвестными массами (подобие *K*-мезонов). Такая система, качественно воспроизводящая наблюдаемую СМ-феноменологию, проявляет важное свойство: несохранение пространственной четности *P* и зарядового сопряжения *C* происходит уже при разрушении самой ЗС. Но *CP*-несохранение означает, что модели нарушения ЗС изначально неинвариантны к обращению времени *T* (и одновременно по *CPT*-теореме еще раз к *C*). Неинвариантность «вперед – назад» должна присутствовать в исходном лагранжиане до и независимо от нарушения ЗС.

Наблюдаемая феноменология лептонов требует также обязательного присутствия слабых процессов со 100 %-ным несохранением полного лептонного числа. Они имеют место несмотря на дираковскую природу всех нейтрино в рассматриваемых моделях. Такие процессы происходят лишь с участием очень тяжелых (косвенное свидетельство феноменологии) зеркальных нейтрино, т. е. при высоких энергиях. Эти свойства создают в ЗС-системах возможность лептогенеза – механизма, ответственного за барион-лептонную асимметрию Вселенной.

Количественное обсуждение многих новых эффектов затрудняется здесь неустранимой пертурбативной связью наблюдаемого хиггсовского бозона *H* с зеркальными фермионами. В то же время связь *H* с частицами СМ нормальная, пертурбативная.

1. Дятлов И. Т. // ЯФ. 2015. Т. 78. С. 1015: arXiv:1508.07280 [hep-ph].

2. Дятлов И. Т. Феноменология СМ в спонтанно нарушенной зеркальной симметрии // ЯФ. 2015. В печати.

Струны в неабелевых калибровочных теориях в четырехмерном пространстве-времени

А. В. Юнг

Отделение теоретической физики ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

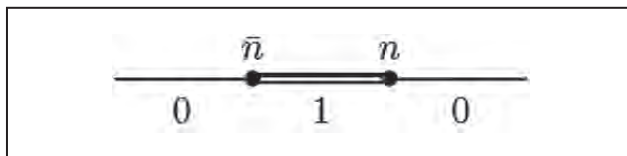
В классе неабелевых солитонных струн, возникающих в четырехмерных $N = 2$ суперсимметричных калибровочных теориях, найдена струна, которая ведет себя как критическая фундаментальная суперструна. Такой режим реализуется в $N = 2$ суперсимметричной квантовой хромодинамике (КХД) с калибровочной группой $U(2)$, четырьмя ароматами кварков и членом Фое – Илипоулоса. Неабелева струна в этой теории кроме четырех трансляционных нулевых мод имеет еще шесть ориентационно-дилатационных мод. Динамика ориентационных мод описывается взвешенной $CP(2,2)$ -моделью, определенной на некомпактном многообразии Калаби – Яу. Эта модель является конформно-инвариантной. Такой режим позволяет сделать неабелеву струну критической: шесть ориентационно-дилатационных мод комбинируются с четырьмя трансляционными модами и образуют десятимерное пространство, в котором движется суперструна.

Неабелевы струны возникают в широком классе четырехмерных калибровочных теорий с калибровочной группой $U(N)$ и ароматами кварков N_f . Четырехмерная теория предполагается компактифицированной на цилиндр с компактным измерением L .

Рассматривается эффективная двумерная теория для неабелевой струны, намотанной на этот цилиндр с периодическими граничными условиями. Динамика ориентационных мод описывается двумерной $CP(N - 1)$ -моделью. Эта модель решена в пределе больших N в несуперсимметричной и в $N = (2,2)$ суперсимметричной версиях.

Последняя модель возникает для 1/2-BPS струн в суперсимметричной КХД с $N_f = N$.

В пределе больших N обнаружен фазовый переход. При больших L в модели развивается массовая щель, и она находится в фазе Кулона (конфайнмента) с экспоненциально подавленными поправками, зависящими от L . Конфайнмент интерпретируется как расщепление между квазивакуумами $CP(N - 1)$ -модели. Двумерные кинки (они являются монополями четырехмерной теории), интерполирующие между истинным вакуумом и первым квазивакуумом, оказываются связанными струной с большим натяжением (рис.).



Конфайнмент кинков на струне

При малых L (при высокой температуре) теория находится в фазе деконфайнмента, и ориентационные моды струны дают вклад в люшеровский член. Он приобретает зависимость от ранга калибровочной группы четырехмерной теории.

В суперсимметричном случае решение при больших N дает одну-единственную фазу независимо от L . Модель имеет N вырожденных вакуумов, и дискретная Z_N -симметрия оказывается нарушенной. Массовая щель возникает при всех L . Более того, она не зависит от L , что является следствием голоморфности.

1. Shifman M., Yung A. // Phys. Lett. B. 2015. V. 750. P. 416–419: arXiv:1502.00683 [hep-th].

2. Monin S., Shifman M., Yung A. // Phys. Rev. D: Part. Fields. 2015. V. 92. No. 2. P. 025011: arXiv:1505.07797 [hep-th].

Двойная ионизация гелиеподобных ионов при рассеянии высокоэнергетических фотонов

А. И. Михайлов, А. В. Нефедов

Отделение теоретической физики ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Двойная ионизация электронов внутренних оболочек одним фотоном интенсивно исследуется в течение последних десятилетий. Поскольку налетающий фотон взаимодействует с каждым электроном отдельно, одновременное выбивание двух связанных электронов обусловлено исключительно межэлектронным взаимодействием. Атом гелия и гелиеподобные ионы представляют собой простейшие атомные мишени, на которых может происходить двойная ионизация. Рассмотрение таких мишеней позволяет тестировать качество описания межэлектронных корреляций в рамках различных теоретических подходов.

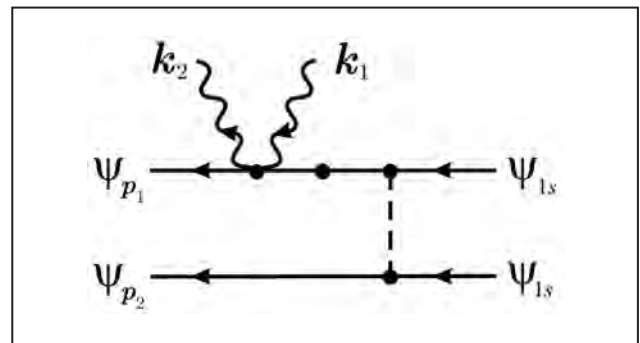
В работе использовалась нерелятивистская теория возмущений по электрон-электронному взаимодействию. В задаче есть два параметра, которые считаются малыми, а именно $1/Z \ll 1$ и $\alpha Z \ll 1$, где Z – зарядовое число и α – постоянная тонкой структуры. В качестве нулевого приближения использовался полный набор кулоновских волновых функций. Кулоновская функция Грина представляется в замкнутом виде без разложения по парциальным волнам. Характерный импульс K -электрона и его энергия связи в кулоновском поле ядра равны соответственно $\eta = m\alpha Z$ и $I = \eta^2 / (2m)$, где m – масса электрона ($\hbar = 1, c = 1$).

Атомная ионизация может происходить как при поглощении, так и при рассеянии фотонов. В том случае если энергия фотонов ω не слишком высока ($\omega \leq \eta$), фотопоглощение доминирует над комптоновским рассеянием. Однако если $\omega \geq \eta$, то эффект Комптона становится доминантным процессом.

В асимптотической области энергий, характеризующейся условием $I \ll \omega \ll m$, основной вклад в сечение процесса дает диаграмма (рис.), которая учитывает межэлектронное взаимодействие в начальном состоянии. Расчет был выполнен аналитически в первом порядке теории возмущений по межэлектронному взаимодействию. Для двухэлектронных мишеней, находящихся в основном состоянии, отношение сечений двойной ионизации σ^{++} к однократной σ^+ при комптоновском рассеянии имеет вид универсального скейлинга:

$$R_c = \sigma^{++} / \sigma^+ = 0,050Z^{-2}.$$

Данная формула находится в хорошем согласии с предыдущими расчетами, в частности для атома гелия ($Z = 2$). Поскольку $1/Z$ является формальным параметром разложения, то чем выше Z , тем точнее формула.



Фейнмановская диаграмма, описывающая комптоновскую ионизацию K -оболочки

Дефекты в спиральных магнетиках со взаимодействием Дзялошинского – Мория

А. В. Сизанов, А. В. Сыромятников, О. И. Утесов
Отделение теоретической физики ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Как известно, в кристаллах без центра инверсии возможно антисимметричное обменное взаимодействие между спинами: взаимодействие Дзялошинского – Мория (ВДМ). Конкуренция между ВДМ и симметричным обменным взаимодействием может приводить к образованию длиннопериодического спирального магнитного порядка.

В последнее время широко изучаются смешанные спиральные магнетики структуры B20. Большой интерес в них вызывает, в частности, вопрос о соотношении структурной и магнитной киральности, знаке ВДМ. Показано, что в $Mn_{1-x}Fe_xGe$ модуль спирального вектора \mathbf{q} зависит от концентрации легирующей примеси x , а магнитная киральность меняет знак (\mathbf{q} проходит через ноль) при $x \approx 0,75$. Это наблюдение вполне логично, т. к. чистые MnGe и FeGe являются кубическими спиральными B20-магнетиками с разными знаками спиновой киральности. Очевидно, что такое поведение является следствием того, что обменное взаимодействие и ВДМ изменяются вокруг легирующих примесей. При $x \ll 1$ или $x \approx 1$ такие вещества могут рассматриваться как системы с небольшой концентрацией дефектов. В то же время эти экспериментальные результаты интерпретировались феноменологическим изменением параметров в гамильтониане, описывающем чистые B20-магнетики.

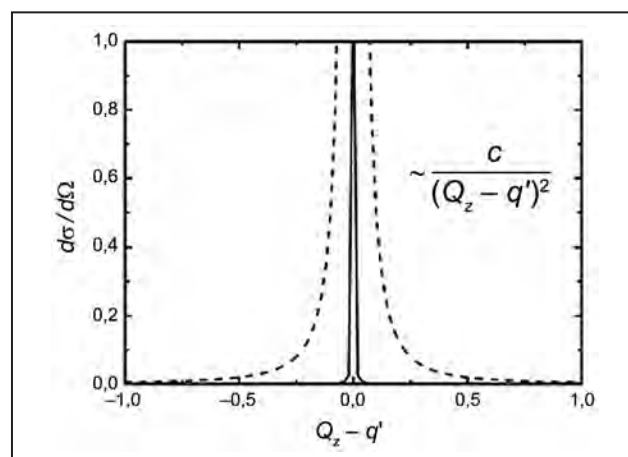
Для устранения этого недостатка было проведено теоретическое исследование спиральных магнетиков с ВДМ с небольшой концентрацией дефектов. Предполагалось, что как обменное взаимодействие, так и ВДМ изменяются на дефектных связях. Детально рассмотрены две модели: слоистые спиральные магнетики и кубические спиральные магнетики со структурой B20.

В обеих моделях получены качественно совпадающие результаты. Для систем с одной дефек-

ной связью показано, что возмущение спирального магнитного порядка вокруг нее описывается уравнением Пуассона для электрического диполя, а значения дополнительных поворотов спина спадают с расстоянием r как $1/r^2$.

При конечных концентрациях дефектов $c \ll 1$ обсуждаемые спиральные магнетики эквивалентны диэлектрикам со случайно распределенными диполями, которые приводят к конечной средней поляризации, пропорциональной концентрации дефектов. Эта поляризация соответствует поправке $\delta\mathbf{q} \propto c$ к модулю спирального вектора \mathbf{q} .

Анализ сечения упругого рассеяния показал, что в системах с дефектами магнитные брэгговские пики соответствуют переданным импульсам $\mathbf{Q} = \pm(\mathbf{q} + \delta\mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau}$, где $\boldsymbol{\tau}$ – векторы обратной решетки. Кроме того, было получено диффузное рассеяние со степенными сингулярностями в позициях магнитных брэгговских пиков (рис.). Также получены поправки к спектру магнонов, вызванных рассеянием на дефектах.



Диффузное рассеяние со степенными сингулярностями в позициях магнитных брэгговских пиков

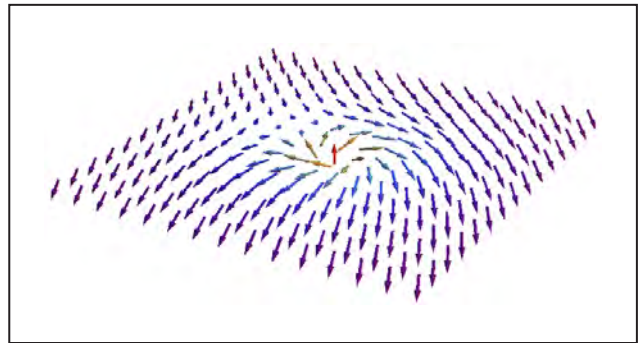
Магноны в ферромагнетике со скирмионом

Д. Н. Аристов, А. О. Сорокин

Отделение теоретической физики ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Были рассмотрены спин-волновые возбуждения (магноны) в гейзенберговском изотропном ферромагнетике, основное состояние в котором характеризуется наличием одиночного статического скирмиона. Известно, что классическая энергия такого состояния выше, чем обычного однородного состояния, и в отсутствие стабилизирующих взаимодействий состояние метастабильно. Проведен квазиклассический анализ задачи. Для этого рассмотрена модель спинов на решетке, использовано представление Дайсона – Малеева для локализованных спинов и найдено равновесное решение, соответствующее скирмиону. Это равновесное решение находится в непрерывном пределе как экстремальная конфигурация классического поля намагниченности, параметризуемого через эйлеровы углы вращения. Таким образом, в каждой точке пространства определяется свой локальный базис с выделенной осью квантования спина вдоль локальной намагниченности, как показано на рисунке.

Разложение гамильтониана по величине обратного спина, $1/S$, в порядке S^2 дает классическую энергию магнетика, а линейные по бозонам члены $\sim S^{3/2}$ отсутствуют в силу условия экстремума. Слагаемые $\sim S$ дают квантовый спектр задачи. В однородной ситуации элементарные возбуждения (магноны) описываются плоскими волнами с дисперсией $E = Dk^2$. Найдено, что в присутствии скирмиона магноны даются решениями уравне-



Скирмионная конфигурация спинов

ния Шредингера с центральным потенциалом типа квантовой ямы, с центром на месте скирмиона. Анализ спектра показывает, что связанных состояний в такой яме нет, но есть два нетривиальных решения с нулевой энергией. Эти так называемые нулевые моды отвечают симметрии скирмионного решения по отношению к трансляции и дилатации (т. е. сдвигу и растяжению). Третья нулевая мода формально соответствует нарушению конформной симметрии исходного действия. Аккуратный анализ показывает, что она соответствует также обычному спонтанному нарушению симметрии по отношению к вращениям в пространстве спинов. В случае скирмиона это нарушение должно определяться для бесконечно удаленной точки. Найдены поправки к гамильтониану по величине $1/S$, отвечающие взаимодействию магнонов.

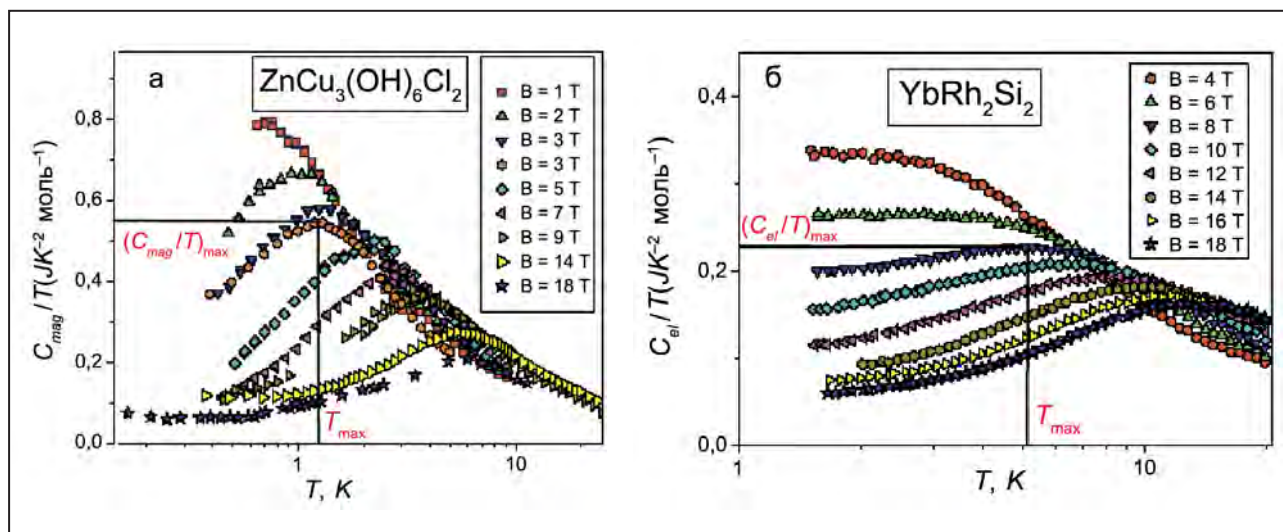
Квантовая спиновая жидкость

В. Р. Шагинян

Отделение теоретической физики ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Впервые показано, что гербертсмитит $\text{ZnCu}_3(\text{OH})_6\text{Cl}_2$ представляет новый тип сильно коррелированного электрического изолятора, обладающего свойствами металлов с тяжелыми фермионами за одним исключением: он не проводит электрический ток. Свойства этого изолятора определяются квантовой спиновой жидкостью, образовавшейся в результате спин-зарядового разделения электрона. Заряд электрона оказывается локализованным на атоме меди, а спин электрона приобретает подвижность и формирует квантовую спиновую жидкость, заполняющую ферми-сферу

и выполняющую функцию тяжелых фермионов. Именно эта жидкость, возникшая вследствие разделения спина и заряда, определяет свойства изоляторов нового типа. Вычисления термодинамических и транспортных свойств находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Например, теплоемкость $\text{ZnCu}_3(\text{OH})_6\text{Cl}_2$ при низких температурах пропорциональна температуре T и соответствует теплоемкости металлов с тяжелыми фермионами, как это показано на рисунке. Между тем теплоемкость обычного изолятора определяется фононами и пропорциональна T^3 .



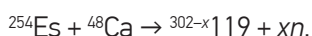
Теплоемкость C/T -сплавов с тяжелыми фермионами: поведение теплоемкости изолятора (а); теплоемкости проводника с тяжелыми фермионами (б). C/T измерена как функция температуры T при разных магнитных полях B , значения которых указаны на рисунках

Оценка возможности наработки изотопа ^{254}Es в реакторе ПИК

М. С. Онегин

Отделение теоретической физики ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Изотоп ^{254}Es в основном состоянии имеет период полураспада 256 суток и распадается с вероятностью, близкой к 100 %, испуская α -частицу. Поскольку этот изотоп имеет значительное время жизни, он может служить мишенью для синтеза сверхтяжелого ядра с атомным номером 119 в реакции



Ядра с атомными номерами 114–118 были впервые синтезированы в Дубне в реакции слияния с ядром ^{48}Ca элементов Рн, Ам, См, Вк и Сф. Оценки показывают, что для синтеза 119-го элемента мишень должна содержать порядка 1 мг Es. Были проведены расчеты с целью определения массы изотопа ^{254}Es , которую можно наработать в реакторе ПИК. Для наработки данного изотопа удобно использовать мишень, содержащую изотоп ^{252}Cf массой 100 мг. В реакторе ПИК мишень для наработки Es можно поместить в центр водной полости центрального экспериментального канала (ЦЭК), где имеется рекордная плотность потока нейтронов: полный поток – $8,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, тепловой – $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Вместе с тем, как показывают расчеты, изотоп ^{254}Es выгоднее нарабатывать в активной зоне реактора ПИК. Для этого в активной зоне реактора нужно предусмотреть специальные места для облучения с целью наработки изотопов, как это сделано в аналогичном высокопоточном реакторе SM-3 (НИИ атомных реакторов, Димитровград). В активной зоне реактора полная плотность потока нейтронов порядка $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, плотность потока тепловых нейтронов – $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, однако спектр нейтронов здесь значительно жестче, чем в ЦЭК, и поэтому скорости различных ядерных реакций существенно отличаются (рис.).

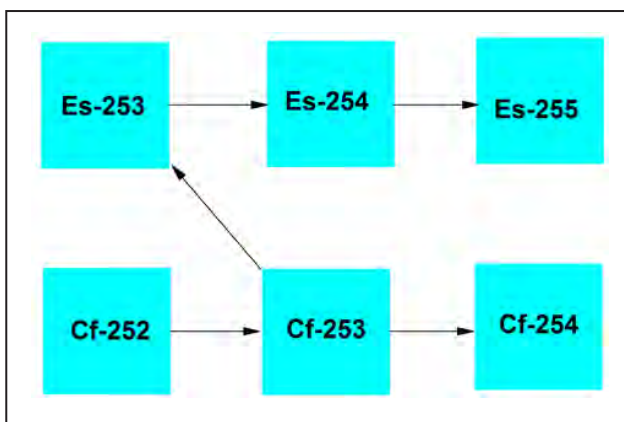
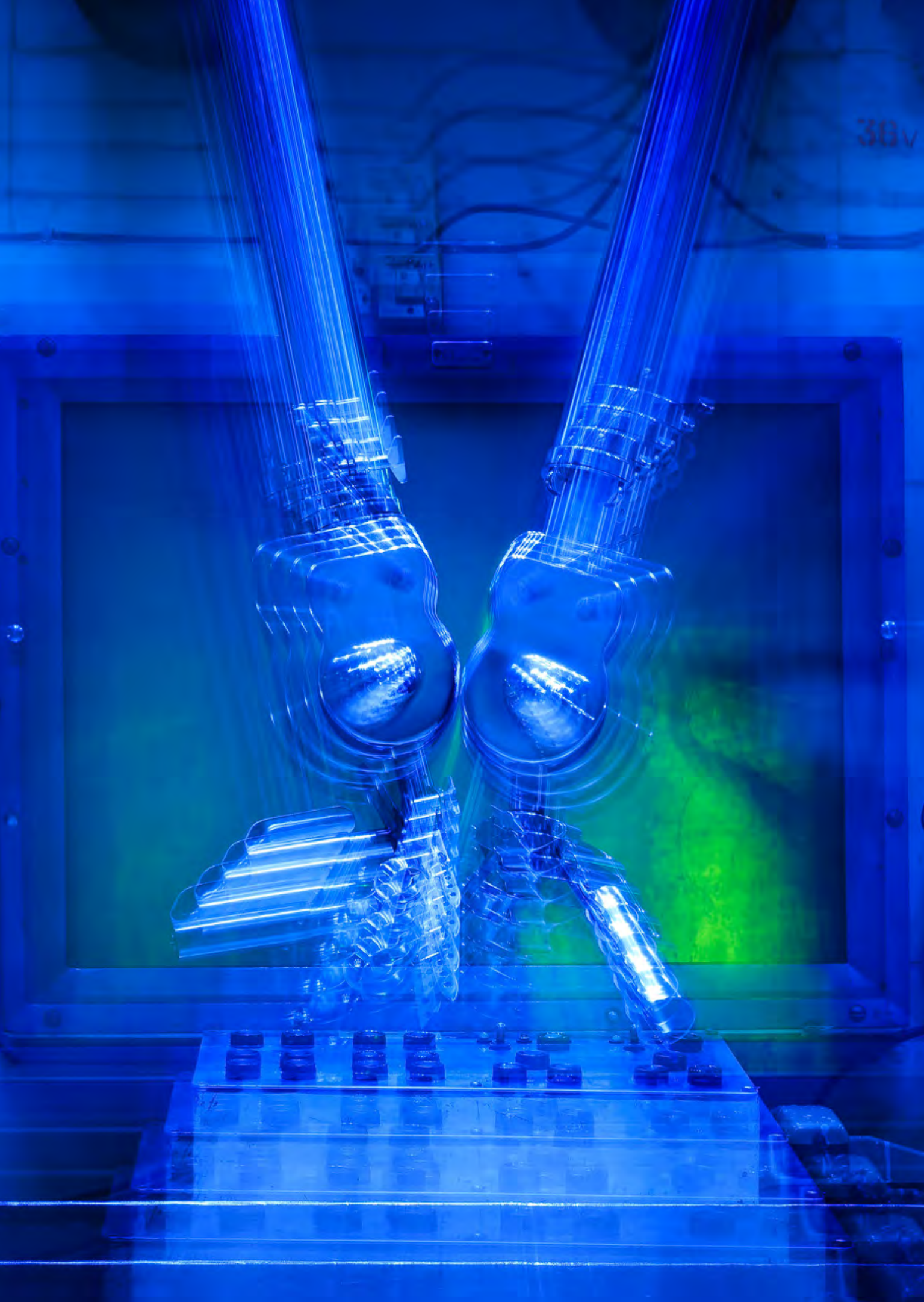


Схема превращения изотопов при наработке ^{254}Es

Точный расчет скорости наработки осложнен тем обстоятельством, что сечения многих важных реакций в приведенной схеме известны с существенной ошибкой, достигающей 60 %. Экспериментальные данные для реакции $^{253}\text{Es}(n, f)$ вообще отсутствуют, и в расчетах использовались теоретические оценки сечения этой реакции. Точность такой оценки невелика, и в расчетах погрешность сечения данной реакции принималась равной 400 %.

Были проведены вероятностные расчеты нарабатываемой массы изотопа ^{254}Es в ЦЭК и в активной зоне. По результатам расчета средняя масса нарабатываемого изотопа в ЦЭК равняется 2,4 $\mu\text{г}$, при этом с вероятностью 95 % в ЦЭК нарабатывается меньше чем 7,7 $\mu\text{г}$ изотопа. Для активной зоны средняя нарабатываемая масса равняется 37 $\mu\text{г}$, но не больше чем 107 $\mu\text{г}$ с вероятностью 95 %. Таким образом, изотоп ^{254}Es выгоднее нарабатывать (приблизительно в 15 раз) в активной зоне реактора ПИК, чем в ЦЭК. Следует отметить, что выигрыш несколько зависит от конструкции тепловыделяющей сборки реактора с полостью для облучения.



30V

Исследования с использованием нейтронов, синхротронного излучения и мюонов

- 42 Контроль взаимодействия Дзялошинского – Мория для инверсии киральной связи между структурой и магнетизмом в $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$
- 44 Спиновые волны в поляризованной магнитным полем фазе в геликоидальных магнетиках со взаимодействием Дзялошинского – Мория
- 45 Спиновая структура квазидвумерного сотообразного $\text{Na}_3\text{Co}_2\text{SbO}_6$ антимоната
- 46 Нейтронографическое исследование наноструктурированной системы твердых растворов-мультиферроиков $(\text{BiFeO}_3)_{1-x}(\text{PbTiO}_3)_x$
- 47 О причине разнообразия магнитных свойств наноструктурированных оксидов $\text{Fe}_x\text{O}/\text{Fe}_3\text{O}_4$
- 48 Температурное поведение суперпарамагнитных кластеров в монокристалле $\text{La}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{CoO}_3$ из данных по магнитному нелинейному отклику и деполяризации нейтронов
- 50 Структурные исследования нового типа протонпроводящих полимерных мембран
- 51 Нейтронная рефлектометрия: условия максимального заполнения Δq нейтронами
- 52 Исследование магнитных свойств феррожидкости с наночастицами CoFe_2O_4 с помощью μSR -метода
- 54 Критическое состояние и низкополевая электродинамика в новом классе гранулярных сверхпроводников
- 55 Угловые распределения и анизотропия осколков в делении ядер урана и тория нейтронами с энергией 1–200 МэВ
- 56 Разработка методик инструментального и радиохимического нейтронно-активационного определения Pt, Pd, Re, Ir, Au и других элементов в образцах тагамита и зювита, отобранных в районе Карской астроблемы
- 58 Источник ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия на реакторе ВВР-М

Контроль взаимодействия Дзялошинского – Мория для инверсии киральной связи между структурой и магнетизмом в $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$

*Е. В. Алтынбаев, С. В. Григорьев, В. А. Дядькин, Е. В. Москвин, Н. М. Чубова –
Отделение нейтронных исследований ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»
A. Heinemann, A. Schreyer, S.-A. Siegfried – Helmholtz Zentrum Geesthacht
Д. Чернышов – Swiss-Norwegian Beamlines at the European Synchrotron Radiation Facility
D. Menzel – Institut für Physik der Kondensierten Materie*

На примере монокристаллических образцов соединений $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ была разработана и апробирована методика контроля знака взаимодействия Дзялошинского – Мория (ДМ). Методом Чохральского были выращены монокристаллы соединений $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ со значениями параметра $x = 0,5; 0,6; 0,65; 0,7$ и $0,8$. Одинаковая кристаллографическая киральность образцов достигалась использованием каждого синтезированного монокристалла в качестве затравки для следующего.

Абсолютная структура определялась методом дифракции синхротронного излучения вблизи резонанса и последующего определения параметра Флака. Основой этого метода является анализ разностей интенсивностей фриделевских пар: $[I(h, k, l) - I(-h, -k, -l)]$. Эксперименты методом монокристаллической дифракции синхротронного излучения были проведены на установке BM01A Швейцарско-норвежских линий в центре ESRF (Гренобль, Франция). Результаты исследования показали, что все образцы обладают одинаковой структурной киральностью, $\Gamma_c = +1$.

Достаточно большой размер выращенных методом Чохральского образцов позволяет исследовать их методом малоугловой дифракции поляризованных нейтронов. Киральность спиновой спирали γ_m определяется при помощи анализа поляризации рассеянных нейтронов P_s в фиксированной точке обратного пространства $\mathbf{Q} = \mathbf{k}$:

$$P_s(\mathbf{k}) = \frac{I^*(\mathbf{k}) - I(\mathbf{k})}{I^*(\mathbf{k}) + I(\mathbf{k})} = \gamma_m P_0,$$

где I^* и I – интенсивности рассеянных нейтронов в случае, когда изначальная поляризация нейтронного пучка \mathbf{P}_0 сонаправлена и противоположна вектору переданного импульса \mathbf{Q} соответственно.

Измерения методом малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов (МУРПН) были выполнены на инструменте SANS-1 в центре Heinz Meier-Leibniz Zentrum. Карты МУРПН для образцов соединений MnSi и $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ с $x = 0,5; 0,6$ и $0,7$ при температуре $T \approx 3,5$ К показаны на рис. 1.

Рассеяние поляризованных нейтронов на реперном образце соединения приводит к появлению максимума интенсивности рассеянных нейтронов в правой части детектора (рис. 1а). Эксперименты на образцах соединений $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ с $x = 0,5$ (рис. 1б) и $x = 0,6$ (рис. 1в) показывают аналогичный результат. Таким образом, магнитная киральность этих образцов $\gamma_m = -1$. Следовательно, как видно из рис. 1г, магнитная киральность образца соединения $\text{Fe}_{0,3}\text{Co}_{0,7}\text{Si}$ $\gamma_m = +1$.

Величина волнового вектора магнитной спирали k была получена из карт МУРПН, снятых на различных образцах при низкой температуре, и построена на рис. 2а. Зависимость произведения структурной и магнитной киральностей для соединений $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ от параметра x представлена на рис. 2б. Величина волнового вектора $k \rightarrow 0$ при критическом значении параметра $x_c = 0,65$. Волновой вектор магнитной спирали k и константа ДМ D связаны выражением $k = SD/A$, где S – средний спиновый момент на одну элементарную ячейку, A – жесткость спиновых волн. Так как жесткость спиновых волн и величина спина меняются монотонно с изменением концентрации Co в соединении, обращение величины $k \rightarrow 0$ приводит к обращению в ноль постоянной $D \rightarrow 0$ при $x = x_c$. Зависимость величины произведения $\gamma_m \cdot \Gamma_c$ от параметра x имеет противоположные значения вокруг критической величины $x = x_c$. Это означает, что константа ДМ D не просто обращается в ноль при $x = x_c$, но также меняет свой знак.

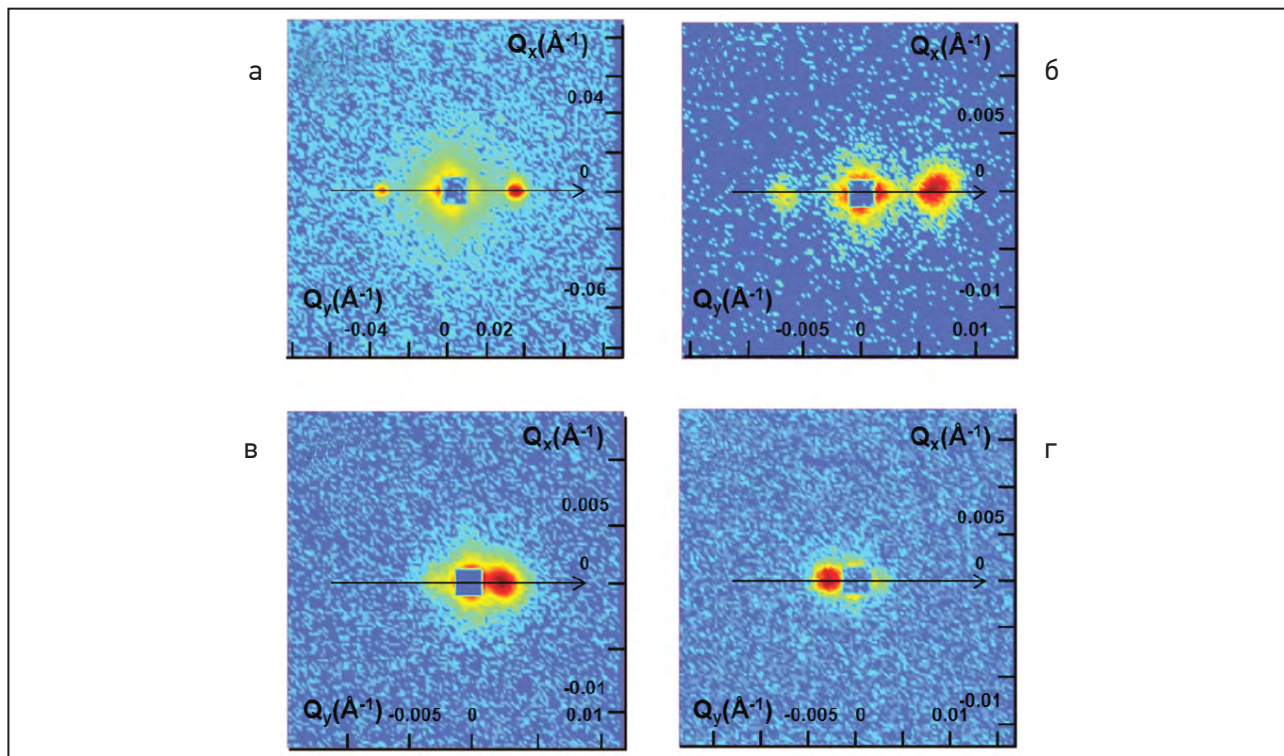


Рис. 1. Карты интенсивностей МУРПН, полученных от образцов соединений MnSi (а) и Fe_{1-x}Co_xSi с x = 0,5 (б); 0,6 (в) и 0,7 (г) при температуре T ≈ 3,5 К. Поляризация падающего пучка +P₀ сонаправлена внешнему магнитному полю

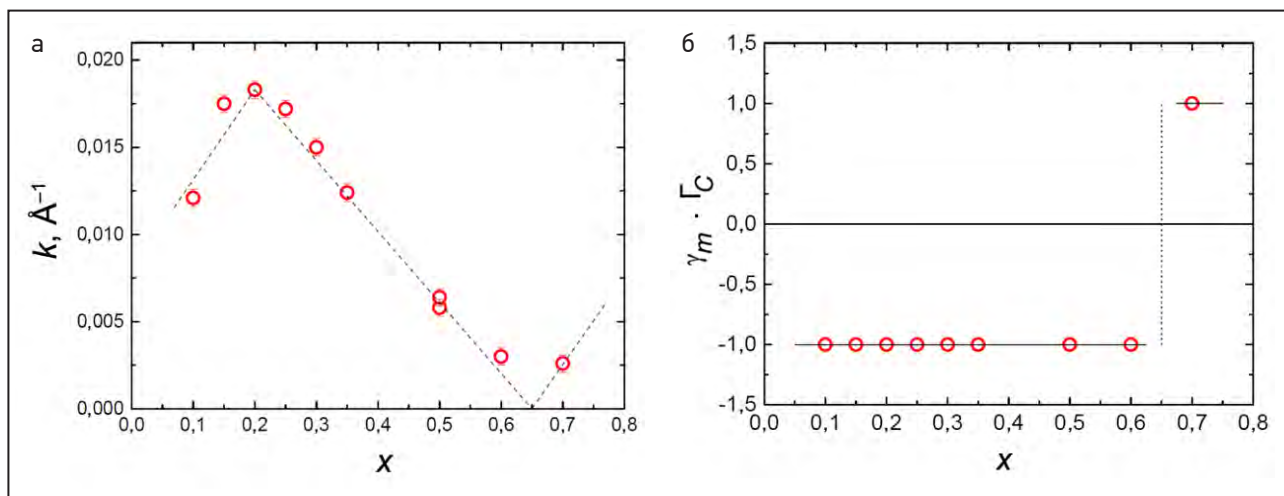


Рис. 2. Зависимость величины волнового вектора магнитной спирали k при температуре T ≈ 3,5 К (а) и произведения магнитной и структурной киральности γ_m · Γ_c (б) от концентрации Co в соединении Fe_{1-x}Co_xSi

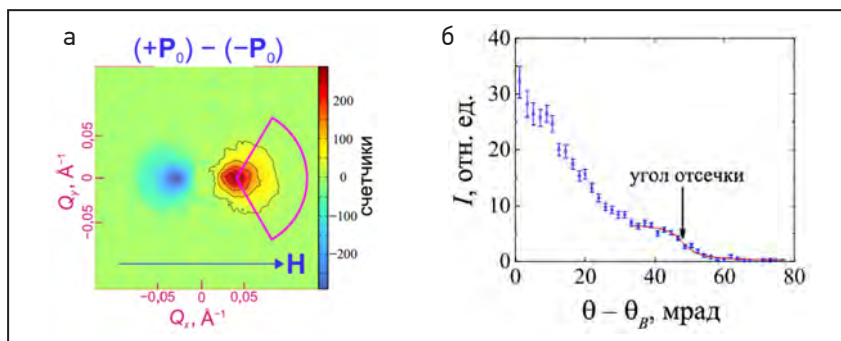
Спиновые волны в поляризованной магнитном поле фазе в геликоидальных магнетиках со взаимодействием Дзялошинского – Мория

Е. В. Алтынбаев, С. В. Григорьев, А. С. Суханов – Отделение нейтронных исследований
С. В. Малеев – Отделение теоретической физики
ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»
S.-A. Siegfried – Helmholtz Zentrum Geesthacht

Конкуренция между ферромагнитным обменным взаимодействием J и антисимметричным взаимодействием Дзялошинского – Мория (ДМ) D приводит к появлению геликоидальной магнитной структуры в соединениях типа B20. Внешнее магнитное поле H_{C2} требуется для преобразования структуры с волновым вектором $k_s = D/J$ в полностью поляризованное коллинеарное состояние (ФМ). Несмотря на параллельное упорядочение спинов, присутствие ДМ-взаимодействия приводит к киральности в законе дисперсии спиновых волн. ФМ-состояние ДМ-гелимагнетиков оказывается единственным примером системы с возбуждениями, которые описываются асимметричным законом дисперсии. Закон дисперсии может быть записан в этом случае следующим образом: $\varepsilon_{\mathbf{q}} = A(\mathbf{q} - \mathbf{k}_s)^2 + H - H_{C2}$, где A – жесткость спиновых волн.

Для того чтобы подтвердить основные особенности гелимагнетонного спектра в ФМ-состоянии, был применен метод малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов (МУРН). Для проведения исследований был выбран MnSi, наиболее известный представитель ДМ-гелимагнетиков. Было показано, что из-за асимметричности вышеописанного закона дисперсии сечение рассеяния содержит

поляризационно-зависимую часть. Следовательно, рассеяние на спиновых волнах в ФМ-состоянии гелимагнетиков может быть выделено путем вычитания одной из другой измеренных интенсивностей для различных поляризаций падающего нейтронного пучка: $I_{SW}(\theta) = I(\theta; +\mathbf{P}_0) - I(\theta; -\mathbf{P}_0)$. Пример поляризационно-зависимой части карты МУРН в поле $H > H_{C2}$ приведен на рис. 1а. Очевидно, что неупругое рассеяние нейтронов на магнонах появляется в основном вокруг брэгговского пика при углах рассеяния меньших, чем $\theta_0 = \hbar/(2m_n A)$, где m_n – масса нейтрона. Неупругое рассеяние интегрируется по переданной энергии в МУРН-эксперименте и регистрируется как диффузное рассеяние. Значение жесткости спиновых волн может быть найдено путем анализа этого диффузного рассеяния. Профиль интенсивности содержит характерный угол отсечки (рис. 1б). Угол отсечки зависит от приложенного поля: $\theta_c^2 = \theta_0^2 - \theta_0 H/E_i + \theta_B$, где E_i – энергия падающих нейтронов, θ_B – брэгговский угол, соответствующий периоду спирали в гелимагнитной фазе. Была исследована температурная зависимость A в диапазоне ниже $T_c = 30$ К. Полученные данные вписываются степенным законом $A(T) = A_0[1 - c(T/T_c)^z]$ со следующими параметрами: $A_0 = 0,054$ мэВ · Å², $c = 0,47$, $z = 1,8$.



Карта интенсивности МУРН, полученной от образцов соединения MnSi при $T = 15$ К и $H = 0,7$ Т. Показана поляризационно-зависимая часть рассеяния I_{SW} (а); профиль усредненной интенсивности, виден угол отсечки (б)

Спиновая структура квазидвумерного сотообразного $\text{Na}_3\text{Co}_2\text{SbO}_6$ антимоаната

А. И. Курбаков, М. Д. Кучугура, С. Ю. Подчерзевцев – Отделение нейтронных исследований ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»
 J. Rodriguez-Carvajal – Institut Laue-Langevin
 В. Б. Налбандян – Южный федеральный университет

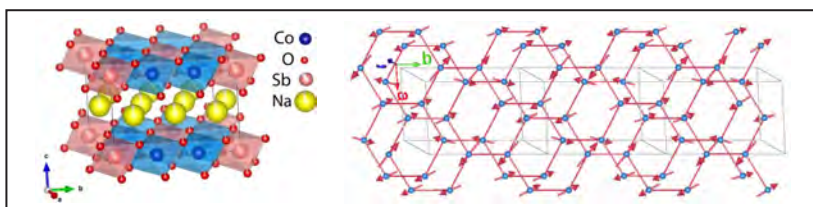
Представлено комплексное дифракционное исследование (нейтронная и синхротронная порошковая дифракция) квазидвумерного (2D) моноклинного соединения $\text{Na}_3\text{Co}_2\text{SbO}_6$ с сотообразной сверхструктурой катионных слоев. Новое поколение слоистых оксидов с сотообразными сверхструктурами в настоящее время является одним из самых интригующих семейств материалов с точки зрения их уникальных физических свойств, включая низкоразмерный магнетизм. Магнитные (и транспортные) свойства таких оксидов зависят от природы всех катионов и их электронного, спинового и орбитального состояний, определяемых кристаллографическим окружением.

Кристаллическая структура $\text{Na}_3\text{Co}_2\text{SbO}_6$ описана как структура сотообразного типа с моноклинной пространственной группой $C2/m$. Соединение базируется на структурных мотивах на основе сопряженных по ребрам кислородных октаэдрических слоев с низзаряженными относительно большими катионами d -элементов в центрах $2/3$ октаэдров. Упорядоченные смешанные слои, состоящие из магнитных Co^{2+} и немагнитных Sb^{5+} катионов внутри кислородных октаэдров чередуются со слоями Na (на рис. слева). Магнитные катионы в кислородно-октаэдрических слоях образуют сотовые сетки, которые в состоянии антиферромагнитного типа взаимодействия между ближайшими соседями могут привести к фрустрации в магнитной подсистеме, сложному характеру магнитных обменов как внутри

магнитных слоев, так и между ними, и появлению необычных видов упорядочения магнитных моментов, что на самом деле и наблюдалось в данном исследовании.

Появление дополнительных отражений, связанных с организацией антиферромагнитного упорядочения образца $\text{Na}_3\text{Co}_2\text{SbO}_6$ при T_N ниже 7 К, отчетливо видно на низкотемпературных порошковых нейтронограммах.

Магнитное упорядочение характеризуется наличием двух векторов распространения, один из них слегка несоразмерный. Наиболее интенсивные пики соответствуют $\mathbf{k}_1 = (1/2, 1/2, 0)$, и есть заметный пик, соответствующий $\mathbf{k}_2 = (0, 1/2 + \delta, 1/2)$ с $\delta \approx 0,011$, очень близкий к наиболее интенсивному пику, относящемуся к вектору \mathbf{k}_1 . Наличие двух независимых векторов распространения приводит к тому, что дифракционная картина в одиночку не дает полностью недвусмысленного описания спинового упорядочения, потому что фазовый фактор между соответствующими коэффициентами Фурье не доступен для эксперимента. Предполагая нулевую фазу между ними, можно предложить магнитную структуру, самую простую из возможных, которая полностью соответствует нашим нейтронным порошковым дифракционным экспериментальным данным. Эта спиновая структура образована суперпозицией коллинеарной АФМ (\mathbf{k}_1) в общем направлении с длиннопериодной синусоидальной (\mathbf{k}_2) компонентой вдоль a -оси (на рис. справа).



Представление слоистой кристаллической структуры в виде многогранников (слева) и модель спиновой структуры $\text{Na}_3\text{Co}_2\text{SbO}_6$ (справа)

Нейтроннографическое исследование наноструктурированной системы твердых растворов-мультиферроиков $(\text{BiFeO}_3)_{1-x}(\text{PbTiO}_3)_x$

*И. В. Голосовский – Отделение нейтронных исследований
ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»*

С. Б. Вахрушев – Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

J. L. García-Muñoz – Institut de Ciència de Materials de Barcelona

M. Brunelli – Institute Laue-Langevin

Z.-G. Ye, W.-M. Zhu – Simon Fraser University

V. Skumryev – Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats

Поиск и исследование материалов с новыми свойствами для практического применения являются важнейшей задачей физики конденсированного состояния. В этом отношении материалы с улучшенными сегнетоэлектрическими свойствами, которые к тому же обладают магнитным порядком, т. е. являются мультиферроиками, находятся в фокусе внимания. Поэтому не прекращаются попытки синтеза новых твердых растворов с целью организовать «нестабильность» в системе за счет «соединения» разных по кристаллической структуре сегнетоэлектриков.

Работа посвящена систематическому исследованию такой системы – $(\text{BiFeO}_3)_{1-x}(\text{PbTiO}_3)_x$. Соединение BiFeO_3 известно как единственный мультиферроик, у которого магнитный порядок и поляризация сосуществуют при комнатной температуре. Однако величина поляризации небольшая и заметно меньше теоретических предсказаний. Оказалось, что в системе твердых растворов $(\text{BiFeO}_3)_{1-x}(\text{PbTiO}_3)_x$ можно получить поляризацию, в несколько раз большую, чем в исходных соединениях. Образцы были синтезированы в Simon Fraser University, нейтроннографические исследования выполнены на дифрактометрах D20 и D2B Института им. Лауэ – Ланжевена. Получены следующие результаты.

1. Исследуемая система является смесью двух наноразмерных фаз: ромбоэдрической и тетрагональной. Средний размер наночастиц 20–50 нм,

причем соотношение Fe и Ti в двух фазах оказалось практически постоянным для всех образцов, различие только в относительном содержании фаз.

2. Магнитные моменты в BiFeO_3 -фазе, в отличие от исходного состава BiFeO_3 , отклоняются от базисной плоскости. Температурные зависимости компонент спинов вдоль гексагональной оси и в перпендикулярной плоскости разные, что приводит к спин-ориентационному переходу. Антиферромагнитный порядок в PbTiO_3 -фазе соответствует простой антиферромагнитной структуре. При низких температурах в этой фазе обнаружен слабый ферромагнитный момент, обусловленный «сломом» подрешеток.

3. Анализ результатов показывает сильную магнитную связь двух систем. Обнаруженные эффекты были интерпретированы как «обменное подмагничивание» между частицами с разным магнитным порядком: фаза с большей температурой Нееля «подмагничивает» фазу с меньшей температурой. Это неудивительно, принимая во внимание наноразмерный характер фаз, что предполагает сильно развитый интерфейс между наночастицами с разной магнитной структурой. Таким образом, система $(\text{BiFeO}_3)_{1-x}(\text{PbTiO}_3)_x$ демонстрирует новый сценарий, когда «эффекты близости» в нестабильной, наноструктурированной системе играют решающую роль в появлении необычных магнитных свойств.

О причине разнообразия магнитных свойств наноструктурированных оксидов $\text{Fe}_x\text{O}/\text{Fe}_3\text{O}_4$

*И. В. Голосовский – Отделение нейтронных исследований
ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»*

О. Л. Макарова – НИЦ «Курчатовский институт»

M. Estrader, S. Estradé, L. López-Conesa, F. Peiró – Universitat de Barcelona

L. Bergström, M. Estrader, G. Salazar-Alvarez – Stockholm University

A. López-Ortega – Università degli Studi di Firenze

J. Nogué – Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats

J. Nogué, A. G. Roca – Institut Català de Nanociència i Nanotecnologia

D. Tobia, E. Winkler, R. D. Zysler – Centro Atómico Bariloche

J. D. Ardisson, W. A. A. Macedo, M. Vasilakaki – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

*A. Morphis, K. N. Trohidou, M. Vasilakaki – Institute of Nanoscience and Nanotechnology,
NCSR “Demokritos”*

A. Gukasov, I. Mirebeau – Laboratoire Leon Brillouin

M. D. Baró – Universitat Autònoma de Barcelona

Проведено систематическое исследование наносистемы «ядро – оболочка» $\text{Fe}_x\text{O}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ с двумя характерными размерами: большие наночастицы – 21(1)/8,8(3) нм и малые наночастицы – 10,1(5)/2,0(2) нм, для ядра и оболочки соответственно. Это наибольшие и наименьшие размеры, известные в литературе для подобных систем. Показано, что сочетание различных факторов, а именно нестехиометрии, внутренних напряжений и размерных эффектов, влияет на широкий круг свойств, проявляемых оксидами переходных металлов на нануровне. Чтобы выявить эти эффекты, были выполнены исследования разными методиками, прежде всего дифракционными: рассеяние нейтронов и синхротронного излучения. Также использовались магнитные измерения, магнитный циркулярный дихроизм (XMCD), электронная микроскопия высокого разрешения в сочетании с EELS и новым методом – GPA-HRTEM.

Параметры наночастиц, полученные из дифракции, оказались очень близки к параметрам, полученным из электронной микроскопии. Дифракция не выявила заметных внутренних напряжений. Однако, как показали исследования методом геометрического фазового анализа, который дает возможность определить локальные внутренние напряжения кристаллической решетки из ТЕМ-микротографий высокого разрешения, внутренние напряжения все же присутствуют.

Нейтроннограмма малых наночастиц при комнатной температуре показывает магнитный вклад только от оболочки магнетита. Вкладов от ядра Fe_xO не обнаружено, т. е. упорядоченный магнитный момент в ядре очень мал, если он есть. При магнитном переходе кубический оксид FeO претерпевает ромбические искажения из-за магнито-стрикции. Поэтому были выполнены рентгеновские измерения при низких температурах. Отклонений от кубичности в пределах 0,1 градуса при 10 К не обнаружено, что согласуется с отсутствием магнитного упорядочения в ядре. По-видимому, большое число дефектов разрушает дальний магнитный порядок.

Для образца с большим ядром и оболочкой в нейтронографических экспериментах наблюдалось сильное магнитное отражение $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$ от ядра FeO , которое в обычном образце сильно подавлено. Это означает, что магнитные моменты отклоняются от направления [111], характерного для обычного оксида. Соотношение интенсивностей однозначно указывает, что момент в ядре направлен вдоль оси [110]. Из температурной зависимости интенсивности магнитного рефлекса следует, что температура Нееля (T_N) в ядре заметно выше, чем в обычном FeO , что можно интерпретировать как proximity effect, когда оболочка магнетита с большей T_N подмагничивает ядро с меньшей T_N .

Температурное поведение суперпарамагнитных кластеров в монокристалле $\text{La}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{CoO}_3$ из данных по магнитному нелинейному отклику и деполяризации нейтронов

А. В. Лазута – Отделение теоретической физики

В. В. Дериглазов, В. В. Рунов, В. П. Хавронин – Отделение нейтронных исследований

В. А. Рыжов – Отделение молекулярной и радиационной биофизики

ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Особенностью легированных кобальтитов является сложный характер магнито-электронного фазового разделения при достаточно низких температурах, которое является проявлением сильных электронных корреляций. Специфика $\text{La}_{0,85}\text{Sr}_{0,15}\text{CoO}_3$ состоит в том, что содержание Sr в нем близко к граничной концентрации $x_c = 0,17$, ниже которой кобальтит является диэлектриком, а выше – металлом. Ниже $T = 250$ К возникают спиновые поляроны, а ниже 65 К – состояние спинового стекла.

Измерение фазовых компонент $\text{Re}(\text{Im})M_2(H, T)$ 2-й гармоники нелинейного магнитного отклика на слабое ac -поле $h \cos 2\pi ft$ ($f = 15,7$ МГц) в параллельном ему постоянном поле H в интервале температур $96 < T < 213$ К показало, что с понижением температуры образуются ферромагнитные кластеры, дающие характерные сигналы с экстремумами в слабых полях, $H < 300$ Э, в обеих компонентах (рис. 1).

Ниже 140 К система кластеров проявляет суперпарамагнитное поведение. Эти сигналы были

обработаны по методу наименьших квадратов с использованием формализма Джилберта – Ландау – Лифшица в приближении одноосной анизотропии, дающего решение кинетического уравнения Фоккера – Планка, которое описывает такие системы. В результате были получены температурные зависимости ряда параметров, характеризующих магнитные и динамические свойства системы: средний магнитный момент кластеров, полная намагниченность насыщения, ширина распределения по объемам кластеров и характерная дипольная энергия кластерной системы, концентрация кластеров и среднее расстояние между ними, поле и энергия анизотропии, а также коэффициент затухания магнитного момента и диффузионное время релаксации. Измерение деполяризации нейтронов в том же температурном интервале позволило дополнительно определить средний размер кластера, объемную долю, занимаемую кластерной системой, средний магнитный момент магнитного иона в кластере и константу

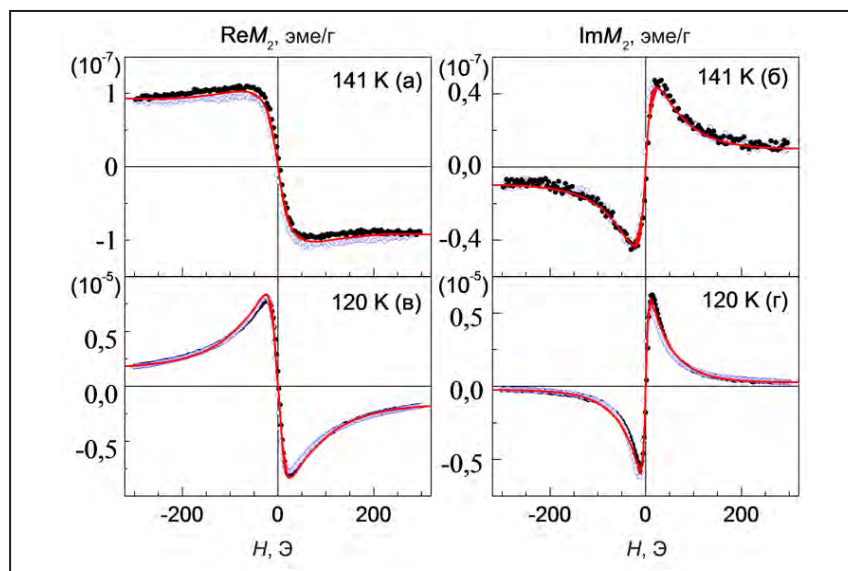


Рис. 1. Действительная и мнимая части отклика на 2-й гармонике как функции магнитного поля для двух характерных температур: 141 К (а, б) и 120 К (в, г). Сплошные линии – обработка по МНК

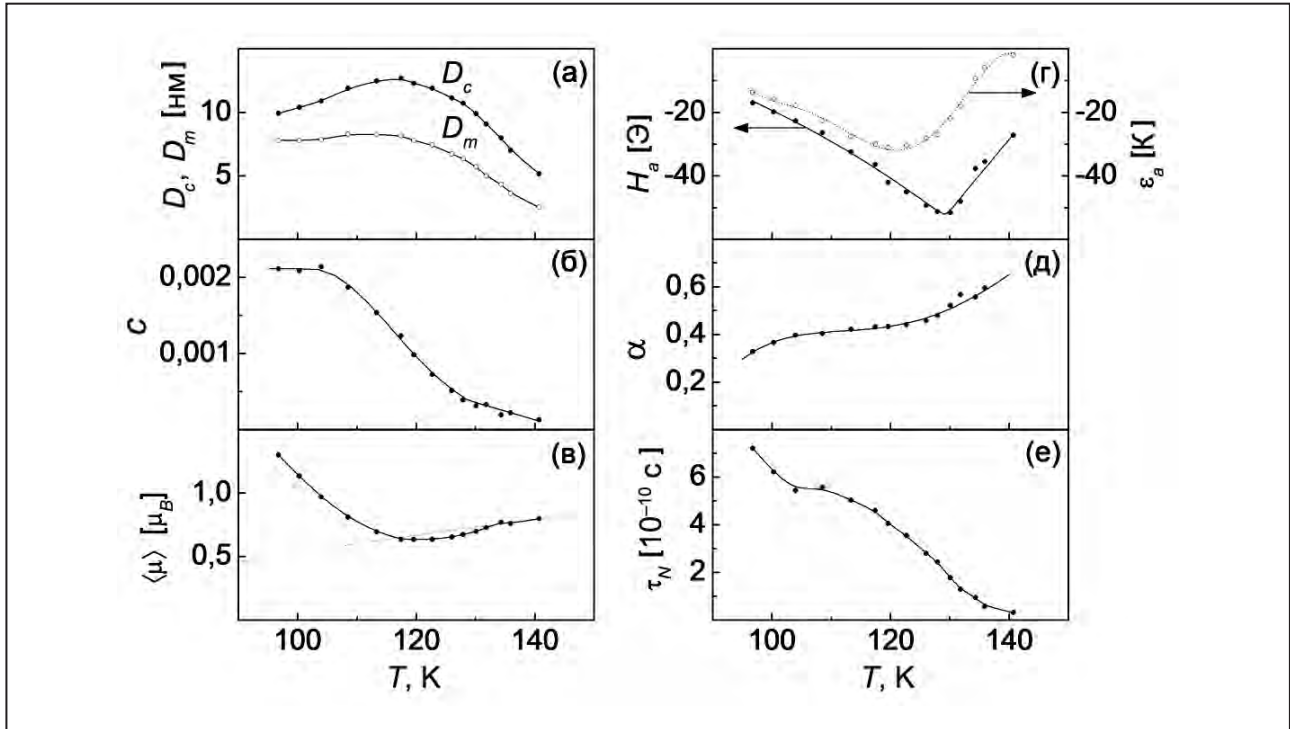


Рис. 2. Средний размер кластера D_c и размер в максимуме распределения D_m (а); объемная доля кластеров (б); средний магнитный момент магнитного иона в кластере, пунктирная линия – $\mu_0 \exp(-\Delta/T)$, $\mu_0 = 2,15$, $\Delta = 140$ К (в); поле H_a и энергия ϵ_a анизотропии (г); коэффициент затухания (д); диффузионное время релаксации (е). Сплошные линии – ориентиры

анизотропии. Температурные зависимости некоторых параметров представлены на рис. 2.

С понижением температуры развитие кластерной системы проходит в несколько этапов.

В области $140 < T < 213$ К кластеры и их магнитные моменты закреплены на магнитных неоднородностях, и их размер медленно растет с понижением температуры, не превышая нескольких нанометров.

При 140 К размер кластеров начинает существенно превышать размеры неоднородностей, магнитный момент становится порядка $10^2 \mu_B$, пиннинг магнитного момента нарушается, а время релаксации начинает расти, принимая значения, характерные для суперпарамагнитных частиц. Ионный магнитный момент следует активационному закону для Co^{3+} , так что концентрация дырок в кластерах лишь немногим больше, чем в матрице.

Ниже 130 К наступает стадия однородной нуклеации. Кластеры появляются во всем объеме, а их концентрация и размеры быстро нарастают,

увеличивая объемную долю и намагниченность насыщения кластерной системы.

Ниже 115 К кластеры перестают расти, а их объемная доля стабилизируется. Напротив, средний ионный магнитный момент начинает сильно возрастать вследствие начавшегося обогащения кластеров дырками.

Во всем диапазоне ниже 140 К ширина распределения кластеров по объемам уменьшается, характеризуя тенденцию к стабилизации кластерной системы. Коэффициент затухания магнитного момента монотонно убывает, а его значения порядка 0,1 указывают на существенную роль прецессии в тепловой релаксации магнитного момента.

Полученные параметры кластерной системы позволили восстановить ее вклад в линейный низкочастотный магнитный отклик. Сравнение с измеренной линейной восприимчивостью показало, что, несмотря на малую объемную долю кластерной подсистемы ($< 0,002$), она дает основной вклад в магнетизм ниже 120 К.

Структурные исследования нового типа протонопроводящих полимерных мембран

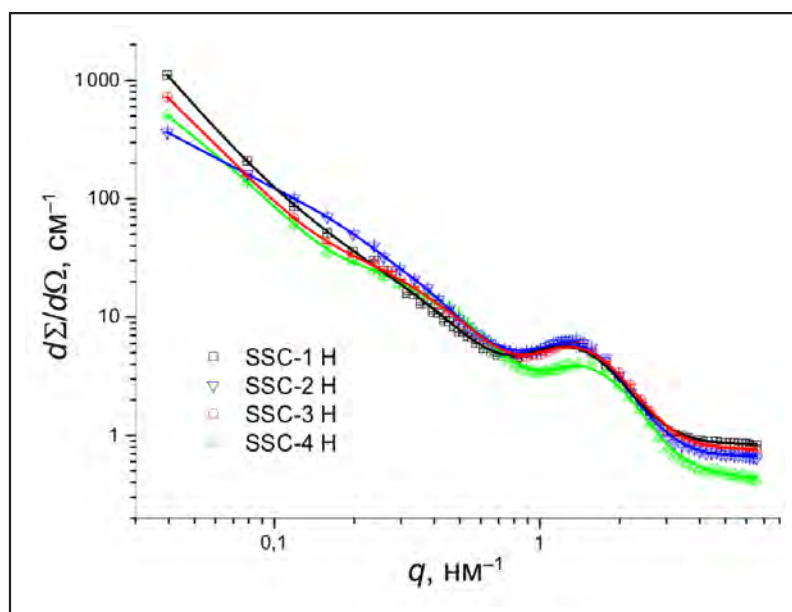
С. С. Иванчев, Ю. В. Кульвелис, В. Т. Лебедев – Отделение нейтронных исследований
ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»

С. С. Иванчев, В. С. Лихоманов, О. Н. Примаченко – Петербургский филиал
Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН

Д. Торок – Институт физики твердого тела и оптики,
Физический научно-исследовательский центр им. Вигнера АН Венгрии

Методом малоуглового рассеяния нейтронов изучена надмолекулярная структура нового типа полимерных мембран (рис.) для водородных топливных элементов, разработанных в Институте катализа СО РАН на основе фторсодержащих макромолекул с сульфогруппами и привитыми короткими боковыми цепями с использованием эффективного метода водоземulsionного синтеза. Перспективные для применений в водородной энергетике мембранные материалы превосходят по электрофизическим свойствам зарубежные аналоги (Nafion) благодаря своему химическому

строению и особенностям упаковки макромолекул, создающих устойчивые каналы проводимости для протонов. Результаты нейтронных экспериментов позволили связать структурные и функциональные свойства мембран на основе физического моделирования структуры мембран, обладающих системой линейных и разветвленных диффузионных каналов диаметром масштаба нанометра, имеющих стенки, покрытые SO_3H -группами, которые обеспечивают прыжковую проводимость протонов. Результаты опубликованы.



Сечения рассеяния образцов мембран, насыщенных H_2O , в зависимости от переданного импульса. Образцы SSC-1–4H различаются эквивалентной молекулярной массой, приходящейся на одну группу SO_3H в цепи (752; 804; 807; 1021). Кривые – функции аппроксимации согласно структурной модели

Нейтронная рефлектометрия: условия максимального заполнения Δq нейтронами

Н. К. Плешанов

Отделение нейтронных исследований ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Определена светосила рефлектометра как падающий на поверхность образца нейтронный поток при съемках с заданным разрешением Δq . Исходя из этого определения обоснованы новые критерии оптимизации целого класса приборов – нейтронных рефлектометров. Заполнение нейтронами интервала Δq вблизи определенного переданного импульса q зависит не только от яркости источника и пропускной способности тракта от источника до образца, но и от формирования пучка. Показано, что корректный выбор рабочей длины волны и других параметров пучка может в несколько раз увеличить светосилу рефлектометров.

До сих пор, явно или неявно, полагали, что светосила нейтронных рефлектометров максимальна на длине волны λ_{\max} , соответствующей максимуму спектральной плотности потока $A(\lambda)$. Анализ показал, что при использовании стандартной коллимационной системы из двух диафрагм светосила максимальна на длине волны λ_{opt} , на которой максимально произведение $A(\lambda)\lambda^3$. В частности, для пучка термализованных нейтронов переход от λ_{\max} к $\lambda_{\text{opt}} = \sqrt{5/2} \lambda_{\max}$ увеличивает светосилу рефлектометра в $e^{3/2} \cdot 2/5 \cong 1,79$ раза.

Далее, учет корреляции между расходимостью и шириной пучка при съемках в щелевой геометрии с двумя диафрагмами приводит к новому условию для параметров пучка, обеспечивающих максимум интенсивности при заданном разрешении Δq :

$$\Delta\theta/\theta = \sqrt{2}(\Delta\lambda/\lambda) = \sqrt{2/3}(\Delta q/q),$$

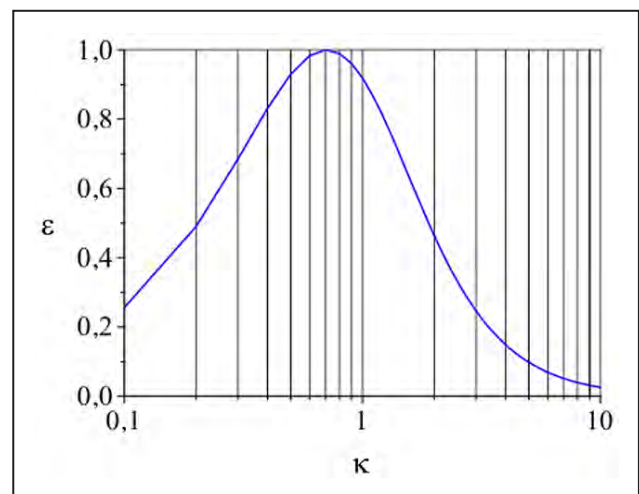
где θ и $\Delta\theta$ – угол скольжения и расходимость пучка, λ и $\Delta\lambda$ – средняя длина волны и степень монохроматичности пучка (при отсутствии упомянутой корреляции получают известное условие оптимальных съемок: $\Delta\theta/\theta = \Delta\lambda/\lambda$). Уменьшение светосилы

по сравнению с максимально возможной величиной дается формулой (см. также рис.)

$$\varepsilon = (3\sqrt{3}/2)\kappa(1 + \kappa^2)^{-3/2},$$

где $\kappa = (\Delta\lambda/\lambda)/(\Delta\theta/\theta)$.

Анализ существующих схем реализации нейтронной рефлектометрии показал, что переход к режиму оптимальных съемок может в несколько раз увеличить светосилу, в частности при использовании селекторов скоростей на основе аперийных многослоек. Для дополнительного увеличения светосилы рефлектометров предложены такие инновации, как метод времяпролетных измерений с веерным пучком, формируемым с помощью прерывателя специальной конструкции – барабанного прерывателя, и малоугловые соллеровские коллиматоры с поглощающими ловушками для нейтронов, отражаемых от стенок каналов.



Степень оптимальности съемок ε при одинаковом разрешении Δq в зависимости от κ для щелевой геометрии, реализованной с двумя диафрагмами. Ось κ отложена в логарифмическом масштабе

Исследование магнитных свойств феррожидкости с наночастицами CoFe_2O_4 с помощью μSR -метода

С. И. Воробьев, А. Л. Геталов, Е. Н. Комаров, С. А. Котов, Г. В. Щербаков –
Отделение физики высоких энергий ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

В последнее время развиваются технологии по созданию материалов с новыми свойствами, важными для практического применения. Среди них особое место занимают системы, в которых магнитные наночастицы распределены в немагнитной среде. В частности, таковыми являются феррожидкости – ультрастабилизированные суспензии однодоменных магнитных наночастиц (Fe_3O_4 , CoFe_2O_4 и др.) в жидкой среде.

Феррит кобальта, как известно, имеет температуру Кюри 793 К и самую высокую константу анизотропии среди ферритов. Магнитные свойства феррожидкостей ранее изучались различными методами, включая использование квантовых магнитометров (SQUID), рассеяние медленных нейтронов на малые углы и мессбауэровскую спектроскопию.

В данной работе на ускорителе ПИАФ НИЦ КИ СЦ-1000 были изучены образцы феррожидкости на основе H_2O с разной объемной концентрацией наночастиц CoFe_2O_4 (0,5 % и 3,0 %) со средним размером 8,5 нм. Эксперимент был выполнен на μSR -установке, расположенной на выходе канала поляризованных мюонов с импульсом 90 МэВ/с и поляризацией $P_\mu = 0,9$ (рис. 1).

Исследования образцов проводилось в области температур от 25 до 300 К. Экспериментальные временные спектры прецессии магнитного момента мюона во внешнем магнитном поле были описаны функцией

$$N(t) = N(0) \exp(-t/\tau_\mu) \cdot [1 + b \frac{P_0}{3} \exp(-\lambda t) \cos(\omega t + \varphi) + B],$$

где $\tau_\mu = 2,197$ мкс плюс время жизни μ -мезона; P_0 – начальная поляризация пучка; λ – скорость релаксации поляризации мюона; ω – частота

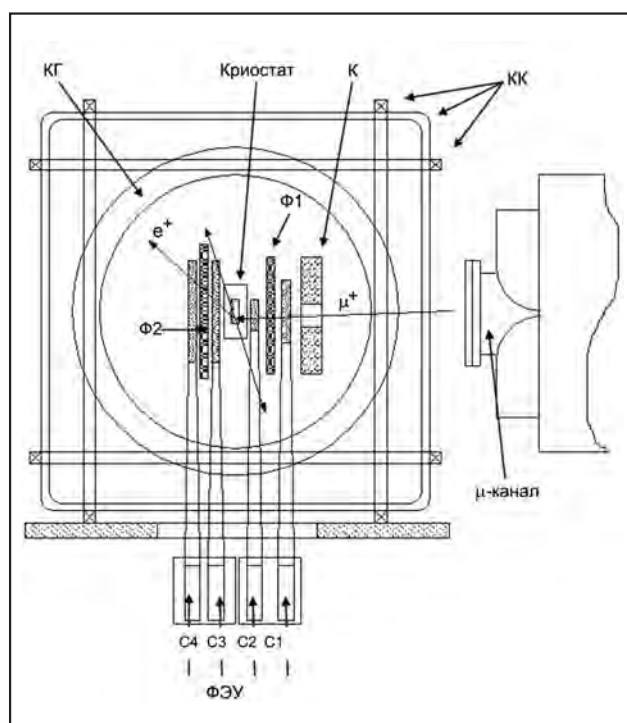


Рис. 1. Установка для μSR -экспериментов: КГ – кольца Гельмгольца; КК – компенсирующие катушки; К – коллиматор; Ф1 и Ф2 – фильтры 1 и 2; ФЭУ – фотоэлектронный умножитель; С1–С4 – сцинтилляционные счетчики

прецессии магнитного момента мюона; φ – начальная фаза; B – уровень фона; величина $b \approx 1$ определяется параметрами установки.

Параметры функции релаксации поляризации (α , ω , λ) найдены из обработки временных спектров. Для образца с концентрацией наночастиц 3 % их температурные зависимости представлены на рис. 2 для двух режимов охлаждения: во внешнем перпендикулярном магнитном поле (режим FC) и в нулевом магнитном поле (режим ZFC).

Как видно, амплитуда a меньше, чем амплитуда $a(\text{Cu}) = 0,308 \pm 0,003$, определенная из обработки данных, полученных на медном образце в поперечном магнитном поле $H = 525$ Гс. Этот факт, как известно, обусловлен быстрой потерей поляризации за счет образования мюония, эффект прецессии спина которого не может быть обнаружен при имеющемся временном разрешении 5 нс. Что касается асимметрии a , то в обоих образцах независимо от режима охлаждения доля мюонной фракции такая же, как и в чистой H_2O . Однако скорость релаксации поляризации λ и частота прецессии спина мюона ω для образца с концентрацией наночастиц 3 % сильно зависят от условий охлаждения образца (см. рис. 2) и значительно отличаются от аналогичных данных для H_2O .

В режиме охлаждения в нулевом магнитном поле (ZFC) магнитные моменты наночастиц ориентированы случайным образом, и это состояние сохраняется в процессе замораживания. В режиме охлаждения в магнитном поле (FC) магнитные моменты наночастиц выстраиваются (упорядочиваются), и поэтому в образце магнитное поле отличается от приложенного внешнего магнитного поля. В результате скорость релаксации поляризации λ и частота прецессии спина мюона ω в среде при разных режимах охлаждения различны. В режиме охлаждения в магнитном поле (FC) наночастицы создают в среде дополнительное магнитное поле. Используя среднюю разность частот $\Delta\omega$ по области температур 26–175 К для режимов FC и ZFC, было найдено, что в случае феррожидкости с концентрацией наночастиц 3 %, охлажденной во внешнем магнитном поле $H = 525$ Гс, наночастицы создают в среде дополнительное магнитное поле $4,7 \pm 0,2$ Гс.

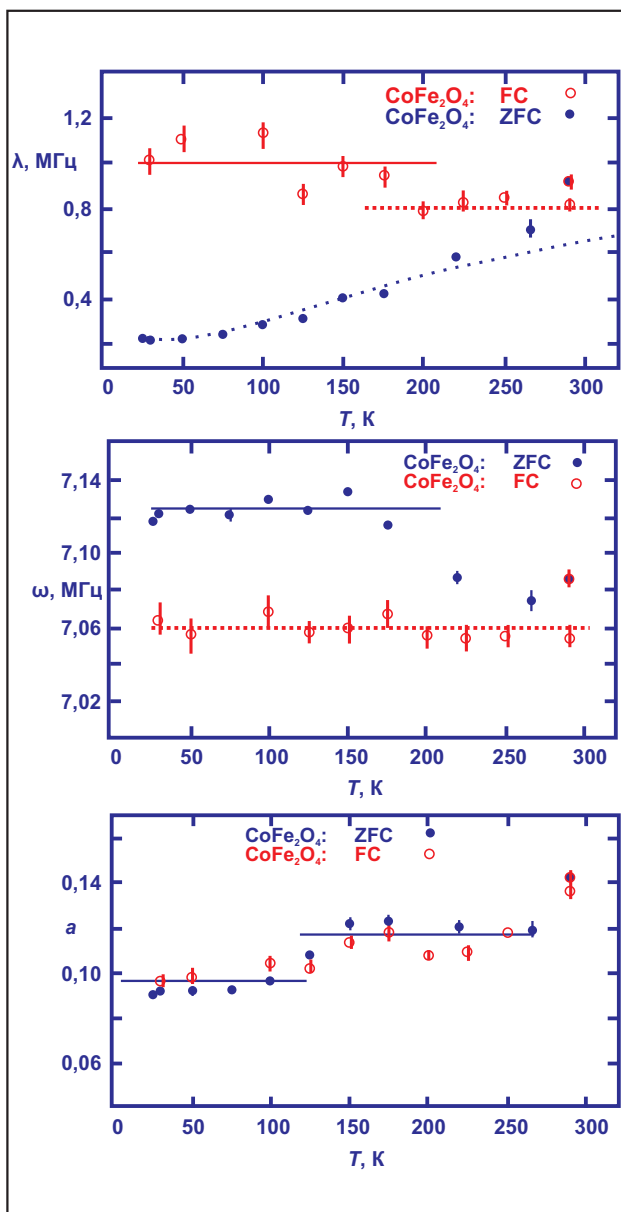


Рис. 2. Температурная зависимость асимметрии a , частоты прецессии ω и скорости релаксации λ в образце с концентрацией наночастиц 3 % ($H = 525$ Гс)

Критическое состояние и низкополевая электродинамика в новом классе гранулярных сверхпроводников

*А. В. Алдущенко, О. В. Геращенко, И. С. Окунев – Отделение нейтронных исследований
ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»*

*В. А. Ломоносов, Л. В. Махнач, А. Л. Холмецкий – Белорусский государственный университет
М. Машлан – Palacky University*

Т. Ярман – Okan University

Как известно, сверхпроводящие оксипниктиды 1111-типа ($\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$) характеризуются очень большой величиной H_{c2} , $\sim 1-10 \cdot 10^5$ Э, и, соответственно, весьма малой длиной когерентности $\xi \sim 10$ Å. В этом случае даже малый дефект в материале будет играть роль джозефсоновского контакта. Такие системы, известные как джозефсоновская среда, ведут себя аналогично обычным сверхпроводникам второго рода, в которых роль верхнего критического поля играет величина $H_g \sim \Phi_0/a^2 \sim 10-100$ Э, где a – размер гранулы. Параметр Гинзбурга – Ландау $\kappa \gg 1$, размер вихря есть $\lambda_J \sim (\Phi_0/\mu_{\text{eff}}H_{c1})^{1/2} \gg a$.

Очевидно, что в таких неоднородных системах имеется сильный пиннинг вихрей, приводящий к нелинейным и необратимым эффектам, которые можно описать в рамках концепции критического состояния Бина. В этой концепции сила магнитного давления уравнивается силой пиннинга $\alpha(h)$, а неоднородное магнитное поле $h(r)$ в сверхпроводнике удовлетворяет уравнению критического состояния

$$\left| \frac{dh(r)}{dr} \right| = 4\pi j_c(H), \quad j_c(h) = \frac{\alpha(h)}{h},$$

где $j_c(h)$ – плотность критического тока, определяемая экспериментально.

Другим источником информации о динамике магнитного потока являются электрические транспортные свойства сверхпроводника. Как известно, в сверхпроводнике второго рода, находящемся в постоянном магнитном поле, приложенном перпендикулярно току, при пропускании электрического тока $j > j_c$ возникает электрическое поле:

$$E(j) = \rho_{FF}(H, T)(j - j_c(H, T)).$$

Исследование вольт-амперных характеристик позволяет независимым образом определить температурную и полевую зависимости сопротивления сверхпроводника в режиме течения потока ρ_{FF} и плотность критического тока $j_c(H, T)$, согласовать между собой результаты магнитных и электрических измерений.

В данной работе на одних и тех же образцах двумя взаимодополняющими методами (анализом высших гармоник нелинейной намагниченности и измерением вольт-амперных характеристик) экспериментально изучено проникновение слабого магнитного поля в поликристаллический сверхпроводник $\text{LaO}_{0,85}\text{F}_{0,15}\text{FeAs}$. Определены зависимости сопротивления и критического тока от магнитного поля и температуры, найдены характеристические параметры материала. Обнаружено, что исследованный сверхпроводник представляет собой типичный гранулярный сверхпроводник второго рода, нелинейные магнитные и электрические свойства которого описываются низкополевой электродинамикой джозефсоновской среды. Тем самым на новом классе поликристаллических сверхпроводников экспериментально подтверждена универсальность концепции низкополевой электродинамики. Таким образом, температурную и полевую зависимости критического тока можно представить в виде

$$j_c(H, T) = j_0 \frac{H_0}{|H| + H_0} \left(\frac{T_c - T}{T_c} \right)^2,$$

где $j_0 = 20$ А/см², $H_0 = 90$ Э, $T_c = 21,5$ К.

Угловые распределения и анизотропия осколков в делении ядер урана и тория нейтронами с энергией 1–200 МэВ

А. С. Воробьев, А. М. Гагарский, О. А. Щербаков – Отделение нейтронных исследований
 Л. А. Ваишнене – Отделение физики высоких энергий
 ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»
 А. Л. Барabanов – НИЦ «Курчатовский институт»

Экспериментальные данные по угловым распределениям и анизотропии осколков деления, индуцированного нейтронами с энергией 1–200 МэВ, как и данные по нейтронным сечениям деления, необходимы для развития теоретических моделей процесса деления на нейтронах промежуточных и высоких энергий, а также для практических расчетов, прежде всего в ядерной энергетике нового поколения. В 2015 г. на нейтронном времяпролетном спектрометре ГНЕИС были выполнены измерения угловых распределений осколков деления ^{235}U , ^{238}U и ^{232}Th в диапазоне энергии налетающих нейтронов 1–200 МэВ. Регистрация осколков деления производилась с помощью позиционно-чувствительного детектора с двумя многопроволочными пропорциональными счетчиками, расположенного на пролетной базе 36 м. Отбор событий с электродов каждого счетчика

(катод и пара X, Y-анодов) и их оцифровка производились с использованием восьмиканальной системы регистрации на базе FLASH-АЦП (рис. 1). Угловые распределения осколков деления, измеренные в диапазоне углов $0,3 < \cos \theta < 1$, фитировались функцией $W(\theta) \sim 1 + A_2 \cdot P_2(\cos \theta)$, где θ – угол между осью нейтронного пучка и вектором момента осколков деления, $P_2(\cos \theta)$ – полином Лежандра 2-й степени. По результатам фита вычислялась анизотропия $W(0^\circ) / W(90^\circ)$. Данные по анизотропии для ядра ^{232}Th приведены на рис. 2 вместе с данными других авторов. Данные для ^{232}Th в диапазоне 1–200 МэВ, измеренные в ПИАФ НИЦ КИ, являются наиболее полными и точными. Аналогичные результаты получены для ^{235}U и ^{238}U . В настоящее время производится теоретический анализ экспериментальных данных для ^{235}U , ^{238}U и ^{232}Th и начаты измерения на ядре ^{233}U .

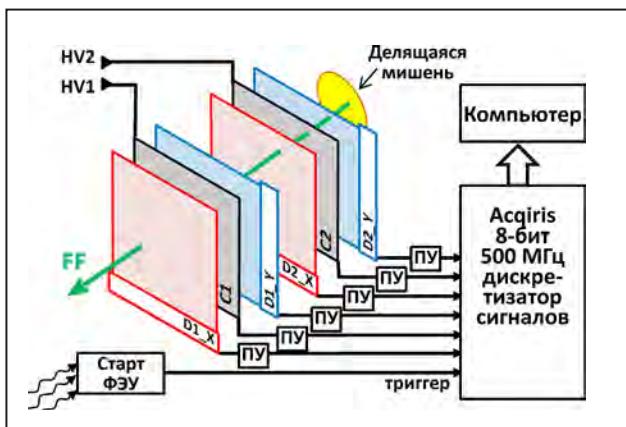


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

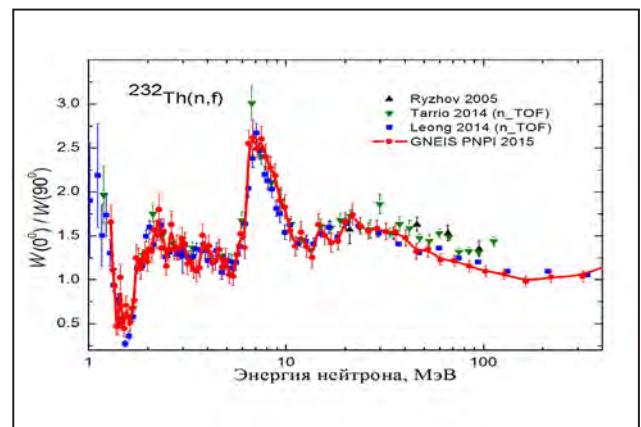


Рис. 2. Анизотропия осколков деления ^{232}Th

1. Vorobyev A. S., Gagarski A. M., Shcherbakov O. A., Vaishnene L. A., Barabanov A. L. // Book of Abstracts on the XXIII Int. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Dubna, Russia, May 25–29, 2015. JINR, E3-2015-29. P. 39.
2. Vorobyev A. S., Gagarski A. M., Shcherbakov O. A., Vaishnene L. A., Barabanov A. L. // JETP Lett. 2015. V. 102. No. 4. P. 203.

Разработка методик инструментального и радиохимического нейтронно-активационного определения Pt, Pd, Re, Ir, Au и других элементов в образцах тагамита и зювита, отобранных в районе Карской астроблемы

*В. Г. Зиновьев, А. И. Егоров, Ю. Е. Логинов, И. А. Митропольский,
И. С. Окунев, С. Л. Сахаров, П. А. Сушков, Т. М. Тюкавина, Г. И. Шуляк
Отделение нейтронных исследований ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»*

Астроблема – кратер, возникший в результате падения большого метеорита на поверхность Земли. Экстремальные условия возникновения астроблемы – высокая температура (15 000 °С) и высокое давление ($5 \cdot 10^6$ атм), создаваемые ударной волной, – приводят к образованию породы (тагамит) уникального геологического состава. В перегретом расплаве происходит выделение (ликвационное обособление) и гравитационная аккумуляция (минерализация) соединений тяжелых элементов, элементов платиновой группы (ЭПГ), редкоземельных элементов (РЗЭ) в виде сульфидов, сульфоарсенидов, оксидов или сплавов этих элементов в виде микроскопических вкраплений. Карская астроблема (Ямало-Ненецкий автономный округ) диаметром 60 км является очень интересным объектом для исследования в силу ее доступности и малой изученности. До последнего времени минеральный и элементный состав тагамитов Карской астроблемы не был изучен. Совместно с компанией ЗАО «Поляргео» начаты работы по отбору образцов породы Карской астроблемы для оценки степени гравитационного аккумулярования ЭПГ, РЗЭ, Ag, Au, Ni, Co, Cr и других элементов в нижних слоях расплава (тагамит) исходных пород Пай-Хойской мишени (зювит).

Для исследования состава и оценки степени аккумулярования Pt, Au, ЭПГ и РЗЭ в образцах тагамита и зювита были разработаны методики инструментального и радиохимического нейтронно-активационного анализов (ИНАА, РХНАА). Инструментальная методика позволила определить массовое содержание С 28 элементов с пределами обнаружения (ПО) в диапазоне

от 10^{-4} до 10^{-8} % и погрешностью измерения 3–20 %. Результаты данного анализа приведены в табл. 1.

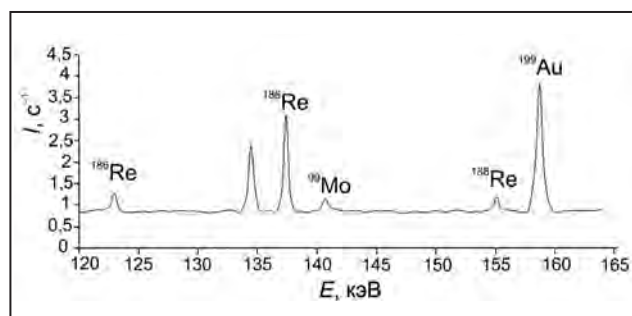
Для определения Pt и улучшения пределов обнаружения Au, Re, Pd и Ir в образцах было проведено их радиохимическое выделение из образца. Пики полного поглощения ^{199}Au , ^{186}Re , ^{188}Re и ^{99}Mo в спектре гамма-излучения анализируемого образца в растворе 0,2 М HCl, пропущенном через ионообменную хроматографическую колонку с сильноокислым катионитом Purolite C100 в H^+ -форме, представлены на рис.

Химические выходы Au, Pt, Re, Pd и Ir в данной хроматографической системе, определенными методом «введено – найдено», близки к 100 %. Так, при объеме элюента 5 мл и элюата 25 мл для Au, Pt и Ir выходы получились равными 88,6; 88,8 и 100 % соответственно, а у Re и Pd химический выход составил 95,9 и 96,7 % соответственно. Установлено, что объем элюата 40–50 мл обеспечивает практически полное выделение этих элементов из образца. Результаты определения содержания Pt, Re, Ir и Au в образцах породы из Карской астроблемы, полученные с помощью РХНАА, приведены в табл. 2.

Установлено, что катионообменная хроматографическая система Purolite C100 в H^+ -форме 0,2 М HCl может быть использована для отделения Pt, Re, Ir, Pd и Au от большого количества благородных металлов. Пределы обнаружения радиохимической методики по определению Pt, Re, Ir, Au и Pd лежат в пределах от $n \cdot 10^{-9}$ до $n \cdot 10^{-4}$ % с погрешностью измерения 3–25 %.

Таблица 1. Результаты ИНАА элементного состава пород Карской астроблемы

Элемент	Изотоп	Зювит 1057 C, масс. %	Зювит 1004 C, масс. %	Тагамит 3000 C, масс. %	ПО, масс. %
Na	²⁴ Na	$1,24 \pm 5,47 \cdot 10^{-4}$	$2,51 \pm 1,53 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \pm 7,85 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-6}$
K	⁴² K	$1,9 \pm 9,61 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \pm 2,58 \cdot 10^{-2}$	$1,71 \pm 1,27 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Rb	⁸⁶ Rb	$6,01 \cdot 10^{-3} \pm 1,19 \cdot 10^{-3}$	$4,90 \cdot 10^{-3} \pm 7,96 \cdot 10^{-4}$	–	$5 \cdot 10^{-4}$
Cs	¹³⁴ Cs	$1,22 \cdot 10^{-4} \pm 1,46 \cdot 10^{-5}$	$6,13 \cdot 10^{-4} \pm 1,58 \cdot 10^{-5}$	$4,03 \cdot 10^{-4} \pm 3,74 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Sr	⁸⁵ Sr	$2,90 \cdot 10^{-2} \pm 1,16 \cdot 10^{-3}$	$2,02 \cdot 10^{-2} \pm 2,15 \cdot 10^{-3}$	$3,35 \cdot 10^{-2} \pm 2,33 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Ba	¹³¹ Ba	$7,24 \cdot 10^{-2} \pm 1,86 \cdot 10^{-3}$	$5,01 \cdot 10^{-2} \pm 2,94 \cdot 10^{-3}$	$6,00 \cdot 10^{-2} \pm 3,21 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Sc	⁴⁶ Sc	$3,29 \cdot 10^{-4} \pm 1,40 \cdot 10^{-6}$	$1,71 \cdot 10^{-3} \pm 3,39 \cdot 10^{-6}$	$2,15 \cdot 10^{-3} \pm 3,65 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Cr	⁵¹ Cr	$2,19 \cdot 10^{-3} \pm 3,89 \cdot 10^{-5}$	$3,19 \cdot 10^{-2} \pm 1,36 \cdot 10^{-4}$	$2,23 \cdot 10^{-2} \pm 1,16 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Fe	⁵⁹ Fe	$7,55 \cdot 10^{-1} \pm 1,78 \cdot 10^{-2}$	$5,51 \pm 5,04 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \pm 4,20 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-8}$
Co	⁶⁰ Co	$6,02 \cdot 10^{-4} \pm 8,38 \cdot 10^{-6}$	$2,01 \cdot 10^{-3} \pm 1,63 \cdot 10^{-5}$	$2,74 \cdot 10^{-3} \pm 1,82 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-8}$
Ni	⁵⁸ Ni	$2,00 \cdot 10^{-3} \pm 6,68 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-2} \pm 1,62 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-2} \pm 1,73 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Zn	⁶⁵ Zn	$2,67 \cdot 10^{-2} \pm 2,83 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-2} \pm 1,60 \cdot 10^{-3}$	–	$1 \cdot 10^{-4}$
Zr	⁹⁷ Zr	$2,00 \cdot 10^{-2} \pm 7,96 \cdot 10^{-4}$	–	$1,16 \cdot 10^{-2} \pm 2,43 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Lu	¹⁷⁷ Lu	$2,09 \cdot 10^{-5} \pm 1,19 \cdot 10^{-6}$	$3,72 \cdot 10^{-5} \pm 2,19 \cdot 10^{-6}$	$4,77 \cdot 10^{-5} \pm 2,29 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Hf	¹⁸¹ Hf	$9,15 \cdot 10^{-4} \pm 1,60 \cdot 10^{-5}$	$3,36 \cdot 10^{-4} \pm 2,29 \cdot 10^{-5}$	$5,11 \cdot 10^{-4} \pm 1,46 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$
Ta	¹⁸² Ta	$2,96 \cdot 10^{-5} \pm 3,13 \cdot 10^{-6}$	$6,92 \cdot 10^{-5} \pm 5,12 \cdot 10^{-6}$	$6,93 \cdot 10^{-5} \pm 6,16 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$
La	¹⁴⁰ La	$1,37 \cdot 10^{-3} \pm 3,78 \cdot 10^{-5}$	$1,80 \cdot 10^{-3} \pm 4,85 \cdot 10^{-5}$	$2,33 \cdot 10^{-3} \pm 4,95 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Ce	¹⁴¹ Ce	$2,85 \cdot 10^{-3} \pm 2,35 \cdot 10^{-5}$	$4,75 \cdot 10^{-3} \pm 3,70 \cdot 10^{-5}$	$5,04 \cdot 10^{-3} \pm 3,52 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-7}$
Nd	¹⁴⁷ Nd	$1,30 \cdot 10^{-3} \pm 1,41 \cdot 10^{-4}$	$2,03 \cdot 10^{-3} \pm 2,31 \cdot 10^{-4}$	$2,50 \cdot 10^{-3} \pm 4,28 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Eu	¹⁵⁴ Eu	$6,66 \cdot 10^{-5} \pm 3,95 \cdot 10^{-6}$	$1,38 \cdot 10^{-4} \pm 6,51 \cdot 10^{-6}$	$1,47 \cdot 10^{-4} \pm 1,05 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-7}$
Gd	¹⁵³ Gd	$1,89 \cdot 10^{-4} \pm 3,32 \cdot 10^{-5}$	–	$5,79 \cdot 10^{-4} \pm 5,55 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Tb	¹⁶⁰ Tb	$8,62 \cdot 10^{-5} \pm 2,92 \cdot 10^{-6}$	$7,06 \cdot 10^{-5} \pm 4,33 \cdot 10^{-6}$	$9,73 \cdot 10^{-5} \pm 5,82 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-7}$
Yb	¹⁷⁷ Yb	$5,17 \cdot 10^{-4} \pm 2,03 \cdot 10^{-5}$	$2,12 \cdot 10^{-4} \pm 1,66 \cdot 10^{-5}$	$2,44 \cdot 10^{-4} \pm 1,41 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Th	²³³ Th	$3,23 \cdot 10^{-4} \pm 2,68 \cdot 10^{-5}$	$4,44 \cdot 10^{-4} \pm 6,17 \cdot 10^{-5}$	$7,81 \cdot 10^{-4} \pm 4,58 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-6}$
U	²³⁹ U	$1,56 \cdot 10^{-4} \pm 1,36 \cdot 10^{-5}$	$2,11 \cdot 10^{-4} \pm 1,61 \cdot 10^{-5}$	$3,37 \cdot 10^{-4} \pm 1,76 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$
As	⁷⁶ As	$6,12 \cdot 10^{-4} \pm 5,34 \cdot 10^{-6}$	$8,57 \cdot 10^{-4} \pm 9,17 \cdot 10^{-6}$	$1,12 \cdot 10^{-3} \pm 7,00 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$
Br	⁸² Br	–	$3,73 \cdot 10^{-4} \pm 3,24 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-4} \pm 1,72 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-7}$
Sb	¹²⁴ Sb	$5,95 \cdot 10^{-5} \pm 2,47 \cdot 10^{-6}$	$4,84 \cdot 10^{-5} \pm 4,26 \cdot 10^{-6}$	$7,88 \cdot 10^{-5} \pm 4,80 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$



Пики полного поглощения ¹⁹⁹Au, ¹⁸⁶Re, ¹⁸⁸Re и ⁹⁹Mo в спектре гамма-излучения анализируемого образца

Таблица 2. Содержание Pt, Re, Au (масс. %) в образцах породы Карской астроблемы

Образец	Pt	Re	Ir	Au
Зювит 1057	$3,1 \cdot 10^{-6} \pm 1,2 \cdot 10^{-6}$	$3,1 \cdot 10^{-5} \pm 5,5 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-7} \pm 8 \cdot 10^{-8}$	$7,5 \cdot 10^{-9} \pm 1,9 \cdot 10^{-9}$
Зювит 1004	$9,7 \cdot 10^{-6} \pm 2,1 \cdot 10^{-6}$	–	$7,8 \cdot 10^{-8} \pm 2 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-6} \pm 1,4 \cdot 10^{-8}$
Тагамит 3000	–	$4,6 \cdot 10^{-5} \pm 3,8 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-8} \pm 6,3 \cdot 10^{-9}$	$9,2 \cdot 10^{-6} \pm 1,6 \cdot 10^{-7}$

Источник ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия на реакторе ВВР-М

*С. А. Иванов, В. А. Лямкин, Д. В. Прудников, А. П. Серебров, А. К. Фомин,
А. Г. Харитонов, М. Е. Чайковский, А. В. Чечкин*

Отделение нейтронных исследований ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

В настоящее время в ПИАФ НИЦ КИ разработан проект источника ультрахолодных нейтронов (УХН) для реактора ВВР-М. Проект основан на использовании сверхтекучего гелия при производстве УХН. Источник УХН должен располагаться в тепловой колонне вблизи активной зоны реактора. Задача поддержания гелия в сверхтекучем состоянии при температуре 1,0–1,5 К в условиях реакторного облучения является исключительно сложной, т. к.

тепловая нагрузка будет составлять 15–20 Вт. Это очень большая мощность для данного уровня температур. В связи с необходимостью проверки возможности решения такой экстремальной задачи была создана полномасштабная модель источника, которая включает в себя все необходимое криогенное и вакуумное оборудование, а также криостат источника УХН. На полномасштабной модели получен сверхтекучий гелий (рис. 1).

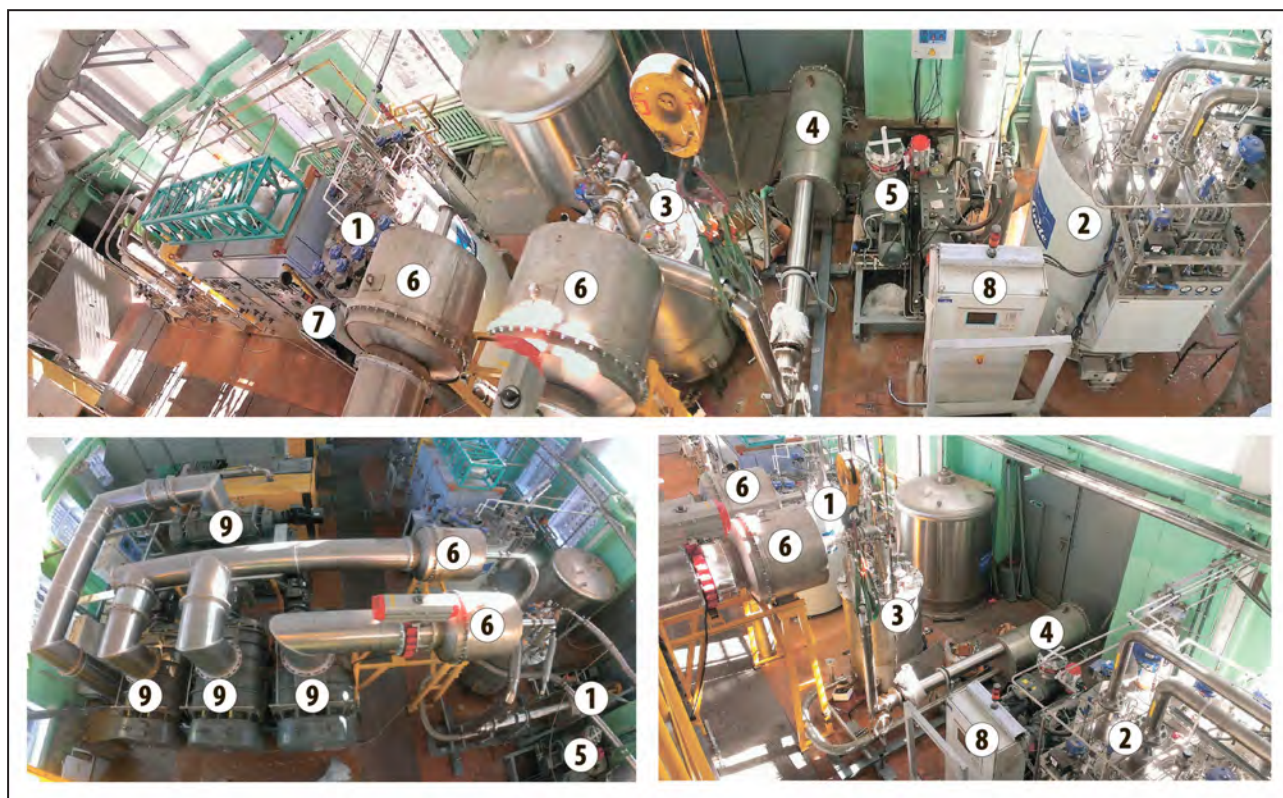


Рис. 1. Полномасштабная модель источника УХН на реакторе ВВР-М:

1 – гелиевый охладитель L-280 (98 л/ч); 2 – гелиевый рефрижератор TCF-50 (3 000 Вт); 3 – гелиевый криостат ($T = 1,08$ К); 4 – модель источника УХН; 5 – вакуумный насос изотопной откачки; 6 – нагреватели паров гелия; 7 – шкаф управления гелиевым охладителем L-280; 8 – шкаф управления гелиевым рефрижератором TCF-50; 9 – вакуумные насосы откачки EDWARDS HV30000

После проведенных практических экспериментов на технологическом комплексе источника УХН были получены следующие результаты: 1) обеспечена бесперебойная работа всего технологического комплекса источника УХН с поддержанием рабочей температуры и уровня гелия в ванне модели источника УХН; 2) получена температура ТИСТ = 1,08 К без тепловой нагрузки; 3) получена температура ТИСТ = 1,29 К при тепловой нагрузке на имитаторе Р = 15 Вт. Это важнейший результат, который демонстрирует возможность реализации проекта источника УХН на реакторе ВВР-М и возможности применения сверхтекучего гелия в атомных технологиях.

Казалось бы, легко предположить, что в дальнейшем на высокопоточном реакторе ПИК можно получить еще большую плотность УХН. Однако детальное рассмотрение показывает, что это не так. Реактор ПИК хорош для тепловых и холодных нейтронов, но для УХН лучше реактор ВВР-М благодаря наличию тепловой колонны. Нами были проведены сравнительные расчеты двух проектов: для реактора ВВР-М и для реактора ПИК. Расчеты

показывают, что в ловушке ЭДМ-спектрометра можно получить плотность УХН $1,3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ на источнике УХН в тепловой колонне реактора ВВР-М, а на реакторе ПИК на выведенном пучке – $1,3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. Поэтому источник УХН в тепловой колонне реактора ВВР-М является в 10 раз более эффективным (рис. 2).

Разница состоит в том, что на реакторе ПИК источник УХН на основе сверхтекучего гелия может располагаться только на выведенном нейтронном пучке. Но переход на схему источника УХН на выведенном пучке на реакторе ПИК сразу приводит к потере исходной плотности нейтронного потока пропорционально телесному углу пучка по отношению к 4π (приблизительно на 4 порядка величины).

Реализация проекта источника УХН со сверхтекучим гелием на реакторе ВВР-М позволит сделать в России лучший в мире источник УХН с интенсивностью приблизительно в 100 раз больше, чем сейчас на лучшем источнике УХН в международном нейтронном центре на реакторе Института им. Лауэ – Ланжевена в Гренобле.

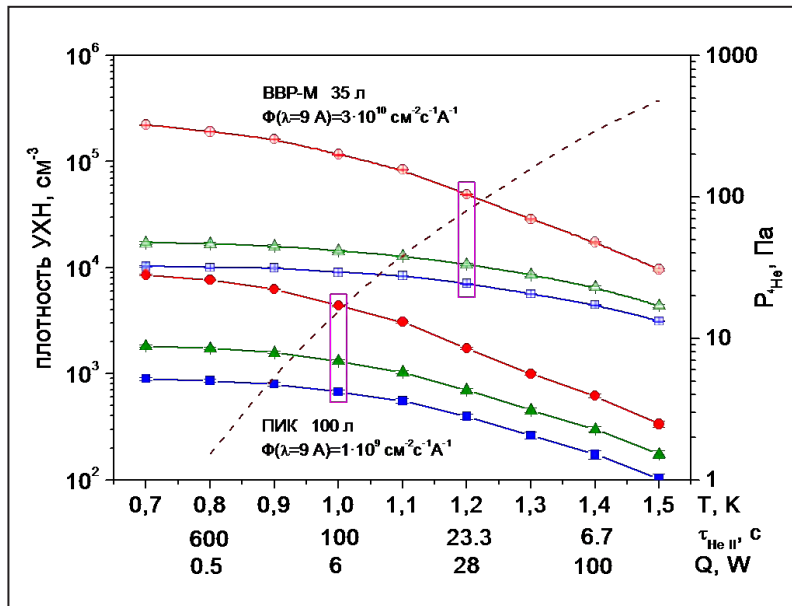


Рис. 2. Сравнение плотностей УХН в различных ловушках для проектов источника УХН на реакторе ВВР-М и реакторе ПИК: ● – в закрытой камере источника; ▲ – в ловушке объемом 35 л; ■ – в ловушке объемом 350 л. Пунктирная линия – зависимость давления насыщенных паров гелия от температуры. По оси абсцисс кроме температуры отложены: время жизни нейтрона в сверхтекучем гелии и мощность, которую можно удалить при этой температуре для фиксированной скорости откачки

1. Серебров А. П. // УФН. 2015. Т. 185. № 11. С. 1179–1201.
 2. Серебров А. П., Фомин А. К., Харитонов А. Г. и др. // Вестник СПбГУ. 2015. Сер. 4. Т. 2 (60). Вып. 1. С. 27–41.
 3. Serebrov A. P., Fomin A. K. // Tech. Phys. 2015. V. 60. P. 1238.



Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино

- 62 Обнаружение пентакварка в эксперименте LHCb
- 63 Совместное измерение массы бозона Хиггса в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере
- 64 Поиск солнечных аксионов, излучаемых в M1-переходе ядра ^{83}Kr
- 65 Измерение элемента $|V_{ub}|$ матрицы кваркового смешивания
- 66 Эксперимент HERMES и структура спина барионов
- 67 Структура поляризации в реакции $p + {}^{40}\text{Ca} \rightarrow p' + X$ при энергии 1 ГэВ
- 68 Высокоточное измерение дифференциального сечения упругого пион-нуклонного рассеяния
- 69 Дальние корреляции во взаимодействиях легких и тяжелых ядер при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ
- 71 Прямое прецизионное измерение разности масс ^{163}Ho – ^{163}Dy в ионной ловушке
- 72 Проверка *CPT*-инвариантности в легких ядерных системах
- 74 Изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов и электромагнитные моменты нейтронно-дефицитных изотопов висмута
- 76 Новые данные по регистрации гео-нейтрино в эксперименте «Борексино»
- 77 Создание нейтринной лаборатории для проведения эксперимента по поиску стерильного нейтрино на реакторе SM-3
- 79 Наблюдение каналирования пучков Большого адронного коллайдера в изогнутых кристаллах в эксперименте UA9
- 81 Получение молекулярного водорода с высокой ядерной поляризацией
- 82 Неинвазивный метод восстановления рабочих параметров газоразрядных детекторов частиц при работе в высокоинтенсивных радиационных полях

Обнаружение пентакварка в эксперименте LHCb

Коллаборация LHCb

Г. Д. Алхазов, Н. Ф. Бондарь, А. А. Воробьев, А. А. Дзюба, О. Е. Маев, Н. Р. Сагидова, Ю. А. Щеглов –
Отделение физики высоких энергий ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Известно, что кварки образуют барионы (три валентных кварка) и мезоны (пары «кварк – антикварк»). Существование других бесцветных комбинаций, например тетракварка ($qq\bar{q}\bar{q}$) или пентакварка ($qqqq\bar{q}$), не запрещено, однако на сегодняшний день найдено только одно состояние $Z(4430)^+$, возможно, состоящее из четырех кварков (тетракварк). Большим достижением коллаборации LHCb в 2015 г. стало открытие пентакварка – частицы, состоящей из четырех кварков и одного антикварка. Изучался распад Λ_b^0 -гиперона (частицы, состоящей из udb -кварков) на протон (uud), K^- -мезон ($s\bar{u}$) и J/ψ -мезон ($c\bar{c}$). В ходе первого сеанса работы Большого адронного коллайдера было зарегистрировано примерно 26 000 событий, соответствующих этому распаду. Ожидалось, что основной вклад в распад $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$ вносят процессы с образованием промежуточных возбужденных Λ -резонансов типа $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda^* (\rightarrow p K^-)$. Вместе с тем данные свидетельствуют также о наличии канала распада $\Lambda_b^0 \rightarrow K^- P_c^+ (\rightarrow p J/\psi)$, когда на первой стадии вместе с K^- -мезоном образуется новая тяжелая частица P_c^+ , которая вскоре распадается на протон и J/ψ -мезон (рис. 1).

Для прояснения вопроса, может ли интерференция между различными Λ -резонансами, рождающимися в промежуточном состоянии, породить подобные структуры, был проведен многомерный пособытийный амплитудный анализ экспериментальных данных, который показал, что для удовлетворительного описания необходимо включить два новых состояния с массой $4380 \pm 8 \pm 29$ и $4449,8 \pm 1,7 \pm 2,5$ МэВ. Ширины этих пентакварковых состояний составляют $205 \pm 18 \pm 86$ и $39 \pm 5 \pm 19$ МэВ соответственно (рис. 2).

Статистическая значимость сигналов составляет 9 и 12 стандартных отклонений соответственно.

Амплитудный анализ показал, что эти два состояния имеют противоположные четности. Получены также ограничения на возможные значения спинов обнаруженных пентакварков.

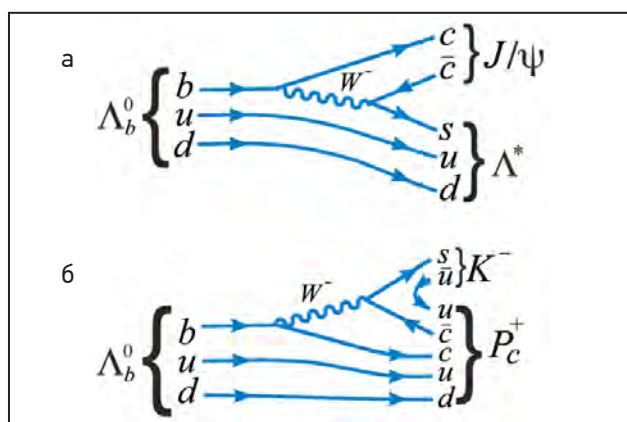


Рис. 1. Диаграммы Фейнмана, соответствующие распадам $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda^* (\rightarrow p K^-)$ (а); $\Lambda_b^0 \rightarrow K^- P_c^+ (\rightarrow p J/\psi)$ (б)

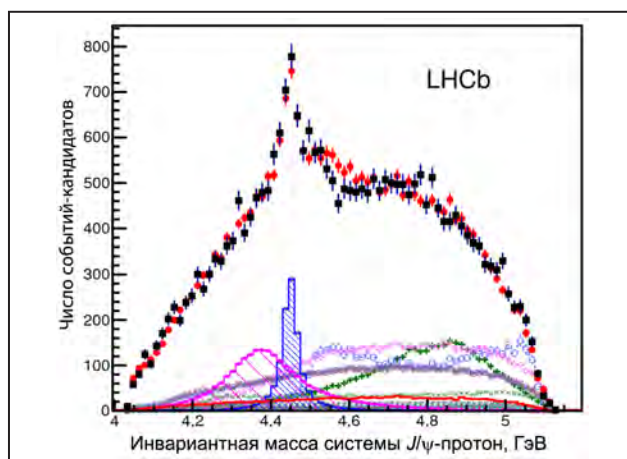


Рис. 2. Спектр инвариантной массы системы (pJ/ψ). Черные точки соответствуют экспериментальным данным, красные – результату амплитудного анализа распада $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$. Вклад пентакварковых состояний показан заштрихованными гистограммами

Совместное измерение массы бозона Хиггса в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере

В. Т. Грачев, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев, В. М. Соловьев, О. Л. Федин, В. А. Щегельский (коллораация ATLAS); С. А. Вавилов, А. А. Воробьев, В. Л. Головцов, Ю. М. Иванов, В. Т. Ким, Е. В. Кузнецова, П. М. Левченко, В. А. Мурзин, В. А. Орешкин, И. Б. Смирнов, В. В. Сулимов, Л. Н. Уваров (коллораация CMS) – Отделение физики высоких энергий ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Основным результатом экспериментов ATLAS и CMS на данный момент является открытие в 2012 г. бозона Хиггса с массой ~ 125 ГэВ – скалярного кванта фундаментального поля вакуума, который отвечает за спонтанное нарушение симметрии электрослабых взаимодействий и происхождение масс элементарных частиц Стандартной модели (СМ). Основной параметр бозона Хиггса СМ – величина его массы. В 2015 г. эксперименты ATLAS и CMS впервые представили результаты совместных измерений массы бозона Хиггса на основе данных 2010–2012 гг. В ATLAS и CMS бозон Хиггса наблюдается теперь во всех основных бозонных и фермионных каналах распадов СМ. Для определения его массы использовались наиболее экспериментально значимые моды распадов на бозоны: на два фотона ($H \rightarrow \gamma\gamma$) и на два Z-бозона ($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$), где $l = \mu, e$ (рис. 1).

Измеренная масса оказалась равной $125,09 \pm 0,21$ (стат.) $\pm 0,11$ (сист.) ГэВ. Совместимость интенсивности сигналов $\mu = \sigma Br / (\sigma Br)_{СМ}$ показана на рис. 2, где видно согласие эксперимента с предсказанием СМ.

Таким образом, новые результаты, полученные в совместных измерениях экспериментов ATLAS и CMS в пределах имеющихся неопределенностей, еще лучше согласуются с ожидаемыми свойствами бозона Хиггса СМ, чем в отдельных измерениях соответствующих экспериментов.

Важную роль в обнаружении бозона Хиггса и определении его свойств сыграли торцевой мюонный детектор CMS (система EMU) и центральный трекер ATLAS – детектор переходного излучения (система TRT), в разработку и создание которых весомый вклад внес ПИАФ НИЦ КИ.

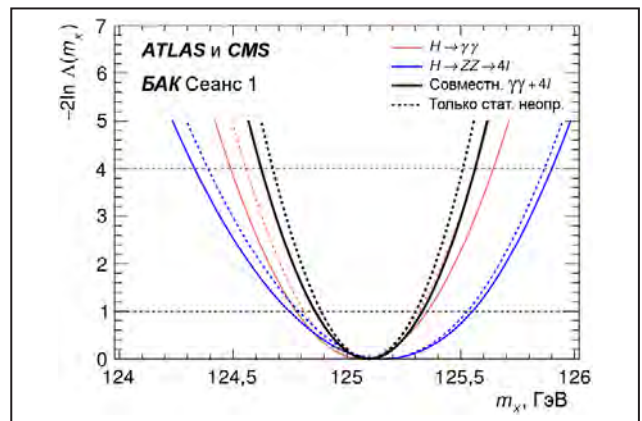


Рис. 1. Функция правдоподобия $-2\log(\Delta m_H)$ как функция массы бозона Хиггса СМ в совместном анализе данных ATLAS и CMS по основным каналам распада $H \rightarrow \gamma\gamma$ (синяя кривая) и $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ (красная кривая), суммарная (черная кривая). Штриховые кривые – результаты анализа, учитывающие только статистические неопределенности с зафиксированными наилучшими величинами параметров, отвечающих за систематические погрешности

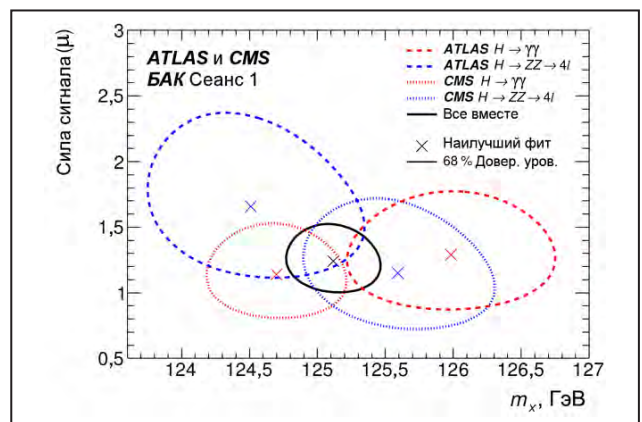


Рис. 2. Интенсивность сигнала $\mu = \sigma Br / (\sigma Br)_{СМ}$ как функция массы бозона Хиггса СМ: штриховые кривые – области анализа экспериментов ATLAS и CMS по соответствующим каналам с доверительным уровнем 68 %; сплошная кривая – область суммарного анализа; крестики – величины, соответствующие наилучшему описанию данных в каждой области

Поиск солнечных аксионов, излучаемых в М1-переходе ядра ^{83}Kr

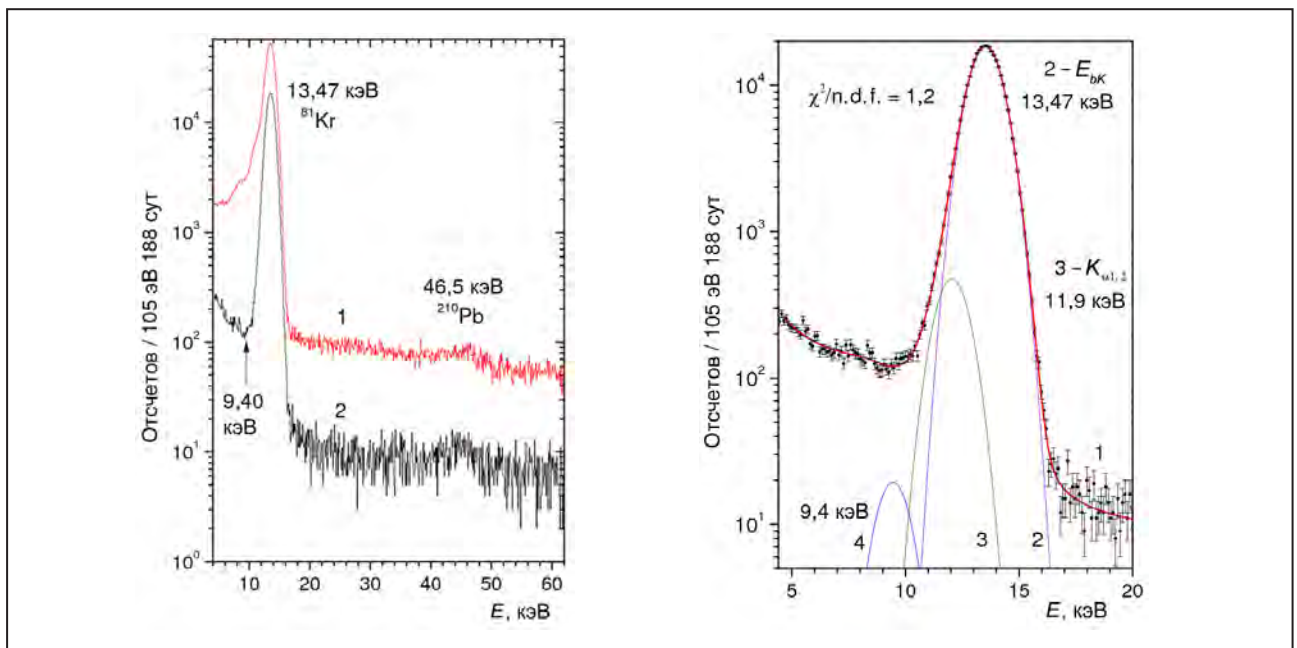
А. В. Дербин

Отделение нейтронных исследований ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Аксион – гипотетическая частица, введенная в теорию для решения проблемы отсутствия CP -нарушения в сильных взаимодействиях и являющаяся признанным кандидатом на роль частицы темной материи. Если аксион существует, Солнце должно быть мощным источником этих частиц.

Сотрудниками ПИАФ НИЦ КИ и ИЯИ РАН проведен поиск аксионов с энергией 9,4 кэВ, излучаемых в М1-переходе ядер ^{83}Kr на Солнце, с помощью реакции резонансного поглощения: $A + ^{83}\text{Kr} \rightarrow ^{83}\text{Kr}^* \rightarrow ^{83}\text{Kr} + \gamma (9,4 \text{ кэВ})$. Для регистрации γ -квантов и электронов, возникающих в результате

разрядки ядерного уровня, использовалась пропорциональная газовая камера, заполненная криптоном и размещенная в низкофоновой установке в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. В результате установлено новое ограничение на изоскалярную и изовекторную константы связи аксиона с нуклонами: $|g_{\text{AN}}^3 - g_{\text{AN}}^0| \leq 1,29 \cdot 10^{-6}$. В модели адронного аксиона данное ограничение приводит к новому верхнему пределу на массу аксиона: $m_A \leq 100 \text{ эВ}$ (95 % у. д.).



Спектры Kr-камеры, измеренные за 188,3 суток (слева): 1 – все зарегистрированные сигналы; 2 – после отбора по времени нарастания сигнала и отношению амплитуд первичного и вторичного импульсов. Результаты фитирования (справа): 1 – спектр центральной области камеры; 2, 3 – гауссовы функции, описывающие пики характеристического рентгеновского излучения Wг и Kr; 4 – искомый аксионный пик с энергией 9,4 кэВ с интенсивностью, соответствующей верхнему пределу на число резонансных поглощений

1. Гаврилюк Ю. М. ..., Дербин А. В., Драчнев И. С., Муратова В. Н. ..., Семенов Д. А. ..., Унжаков Е. В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101. С. 739.

2. Gavriluk Yu. M. ..., Derbin A. V. ..., Muratova V. N. ..., Semenov D. A. ..., Unzhakov E. V. // Phys. Part. Nucl. 2015. V. 46. P. 152.

Измерение элемента $|V_{ub}|$ матрицы кваркового смешивания

Коллаборация LHCb

Г. Д. Алхазов, Н. Ф. Бондарь, А. А. Воробьев, А. А. Дзюба, О. Е. Маев, Н. Р. Сагидова, Ю. А. Щеглов – Отделение физики высоких энергий ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

В Стандартной модели физики элементарных частиц кварковые переходы с изменением аромата происходят под действием слабого взаимодействия, которое осуществляется за счет испускания W^\pm -бозонов. При этом с калибровочными бозонами взаимодействуют суперпозиции кварковых состояний, поэтому в выражения для амплитуд таких переходов входят элементы матрицы кваркового смешивания Кабиббо – Кобаяши – Маскава (ККМ-матрицы). Элемент, определяющий вероятности превращения b -кварка в u -кварк $|V_{ub}|$, является наименьшим среди всех элементов ККМ-матрицы и экспериментально измерен с наибольшей погрешностью. Более того, результаты двух классов измерений этой величины (инклюзивного и эксклюзивного), выполненных ранее в рамках экспериментов Belle и BaBar, расходятся между собой более чем на три стандартных отклонения.

В 2015 г. в эксперименте LHCb на Большом адронном коллайдере был использован новый эксклюзивный метод измерения $|V_{ub}|$, основанный на измерении вероятности впервые зарегистрированного распада $\Lambda_b^0 \rightarrow p\mu\bar{\nu}_\mu$ (рис. 1).

Детектирование этого канала распада оказалось возможным благодаря высокой светимости, достигнутой в LHCb. Из-за кинематических особенностей распада события группируются в области больших инвариантных масс системы «протон – мюон» (рис. 2), и становится возможным отделение интересующего процесса от фоновых.

Опираясь на теоретические вычисления эффектов сильного взаимодействия, а также на результаты измерений $|V_{cb}|$ элемента ККМ-матрицы, удалось получить абсолютное значение величины $|V_{ub}|$:

$$|V_{ub}| = (3,27 \pm 0,15_{\text{exp}} \pm 0,16_{\text{LQCD}} \pm 0,06_{V_{cb}}) \cdot 10^{-3}.$$

Полученный результат совпадает с эксклюзивными измерениями $|V_{ub}|$. Эти измерения противоречат ранее выдвинутой гипотезе, объясняющей расхождение результатов эксклюзивных и инклюзивных измерений привлечением гипотетических частиц «новой» физики. Полученное значение $|V_{ub}|$ окажет влияние на результаты совместного анализа элементов ККМ-матрицы, значения которых связаны между собой соотношениями унитарности.

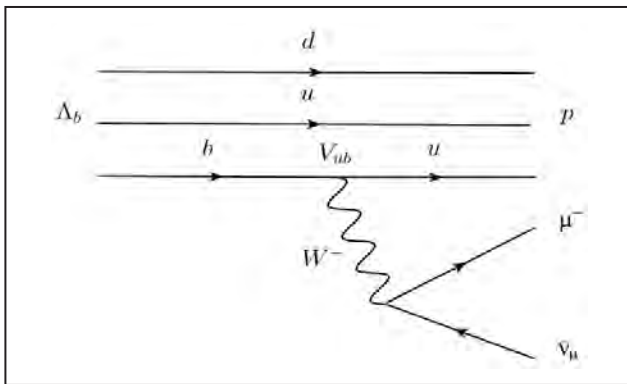


Рис. 1. Диаграмма Фейнмана, соответствующая распаду $\Lambda_b^0 \rightarrow p\mu\bar{\nu}_\mu$

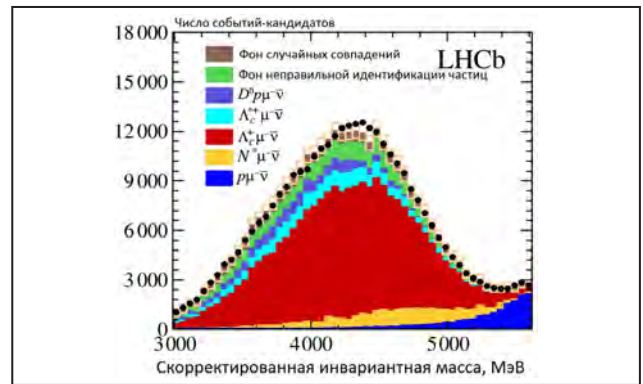


Рис. 2. Инвариантная масса системы «протон – мюон», скорректированная с учетом направления вылета Λ_b^0 -бариона. Различными цветами показаны вклады исследуемого и фоновых процессов

Эксперимент HERMES и структура спина барионов

Коллаборация HERMES

С. Л. Белостоцкий, Д. О. Веретенников, В. В. Вихров, Г. Е. Гаврилов, А. А. Изотов,
А. Ю. Киселев, А. Г. Крившич, С. И. Манаенков, О. В. Миклухо, Ю. Г. Нарышкин –
Отделение физики высоких энергий ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Ранее проведенные измерения Европейской мюонной коллаборации (EMC) показали, что, вопреки ожиданиям, лишь малая часть спина протона (нейтрона) связана с кварками. Этот удивительный результат, так называемый спиновый кризис, послужил основным мотивом эксперимента HERMES на ускорителе HERA в Гамбурге, который проводился в период с 1994 по 2006 г. В эксперименте изучалось глубоко неупругое инклюзивное рассеяние (DIS) поляризованных позитронов (электронов) с энергией 27,6 ГэВ на поляризованных протонах или нейтронах. В качестве мишеней использовался газ поляризованных атомов Н, D или ^3He . Как следует из анализа полученных в эксперименте спиновых структурных функций, суммарный вклад кварков в спин нуклона (синглетный аксиальный заряд) оказался равным $\sigma_0 = \Delta\Sigma = 0,330 \pm 0,025_{\text{exp}} \pm 0,028_{\text{theor}}$. При этом «странное море» (странные кварки) оказалось поляризованным противоположно спину протона: $\Delta q_S = -0,085 \pm 0,008_{\text{exp}} \pm 0,009_{\text{theor}}$. Из данных эксперимента HERMES по асимметрии в полуинклюзивных процессах (SIDIS) с рождением π - и K -мезонов была получена величина $\Delta\Sigma = 0,347 \pm 0,024_{\text{exp}} \pm 0,066_{\text{theor}}$, близкая к инклюзивному результату. Был также измерен вклад

интегральной поляризации глюонов в спин протона: $\Delta g/g = 0,071 \pm 0,034$.

Исходя из величины $\Delta\Sigma$ для протона и используя SU(6)-симметрию, можно сосчитать вклады поляризаций u -, d -, s -кварков в спин любого члена барионного октета со спином 1/2. В частности, для Λ -гиперона было получено $\Delta u/u = \Delta d/d = -0,16$, $\Delta s/s = 0,64$. С другой стороны, является общепринятым, что вклад легких кварков в спин Λ пренебрежимо мал, что подтверждается расчетами на решетках. В ходе эксперимента HERMES была измерена передача спина Λ -гиперону D_{Lz}^{Λ} в DIS. Полученное интегральное значение $D_{Lz}^{\Lambda} = 0,074 \pm 0,039$ совместимо с нулем, что подтверждает «классический» (второй) вариант спиновой структуры Λ -гиперона.

Эксперимент HERMES внес также вклад в изучение эффектов так называемого поперечного спина – функций фрагментации Коллинза – Сиверса, в исследование обобщенных партонных распределений, восстановление спин-зависящих амплитуд в рождении векторных мезонов и пр. Хотя набор данных закончен, их обработка, анализ и публикация статей продолжают. ПИАФ НИЦ КИ внес большой вклад в эксперимент HERMES на всех его этапах.

1. HERMES Collaboration // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75. Iss. 12. P. 600.
2. HERMES Collaboration // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75. Iss. 8. P. 361.
3. HERMES Collaboration // Phys. Rev. D. 2015. V. 91. No. 5. P. 057101.

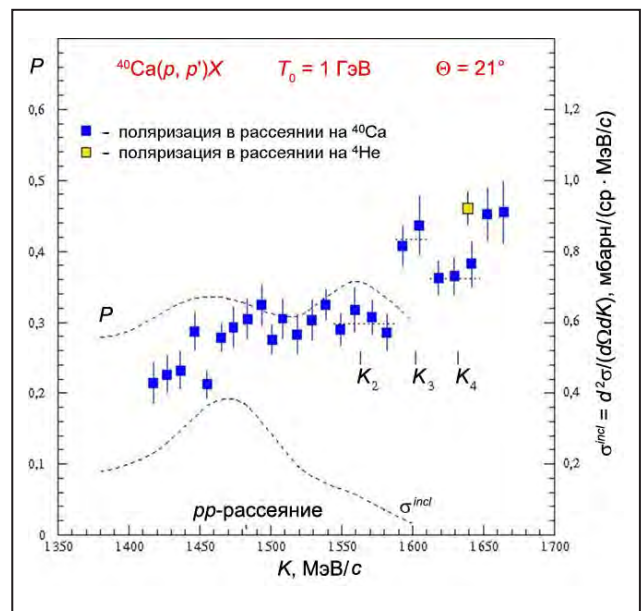
Структура поляризации в реакции $p + {}^{40}\text{Ca} \rightarrow p' + X$ при энергии 1 ГэВ

Г. М. Амальский, В. А. Андреев, Г. Е. Гаврилов, А. А. Жданов, А. А. Изотов, А. Ю. Киселев, Н. Г. Козленко, П. В. Кравченко, М. П. Левченко, О. В. Миклухо, Д. В. Новинский, А. Н. Прокофьев, С. И. Труш, А. В. Шведчиков
 Отделение физики высоких энергий ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

На протонном пучке синхроциклотрона ПИАФ НИЦ КИ измерена поляризация (P) в инклюзивной реакции как функция импульса рассеянного протона (K). Измерения проводились с помощью прецизионного магнитного спектрометра, оснащенного поляриметром на пропорциональных камерах. Измеренная поляризация обнаруживает заметный рост при $K > 1590$ МэВ/с (рис.), который трудно интерпретировать в терминах рассеяния на отдельных нуклонах ядра. Вклад этого механизма в данной кинематической области мал, т. к. импульс ядерного нуклона, необходимый для такого рассеяния, оказывается больше импульса Ферми ($K_F \approx 250$ МэВ/с). Скорее наблюдаемую структуру в поляризационных данных можно объяснить квазиупругим рассеянием на группах нуклонов (малонуклонных кластерах, или корреляциях) в ядре ${}^{40}\text{Ca}$.

Отрезками пунктирных линий на рисунке отмечены интервалы по K , в которых значения P объединяются в группы, соответствующие рассеянию на легких кластерах. K_2 , K_3 и K_4 соответствуют импульсам протонов, упруго рассеянных на нуклонных корреляциях ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$. Ширина отмеченных выше интервалов по K обусловлена движением кластеров. Поляризацию в рассеянии на четырехнуклонном кластере можно сравнить с имеющимися в литературе данными по упругому рассеянию на ядре ${}^4\text{He}$. Она оказывается

несколько меньше поляризации в свободном рассеянии, что связано, по-видимому, с модификацией протон-нуклонного взаимодействия в ядре ${}^{40}\text{Ca}$, обусловленной модификацией нуклонного спинора Дирака в ядерной среде.



Штриховые кривые – результат расчета поляризации P и дифференциального сечения σ^{incl} в рамках импульсного приближения с искаженными волнами с учетом модификации нуклонного спинора Дирака в ядерной среде. Кинематика реакции: при $K > 1500$ МэВ/с переданный ядру импульс Q практически не меняется и равен 600 МэВ/с ($Q > 2 K_p$)

Высокоточное измерение дифференциального сечения упругого пион-нуклонного рассеяния

Коллаборация ЭПЕКУР

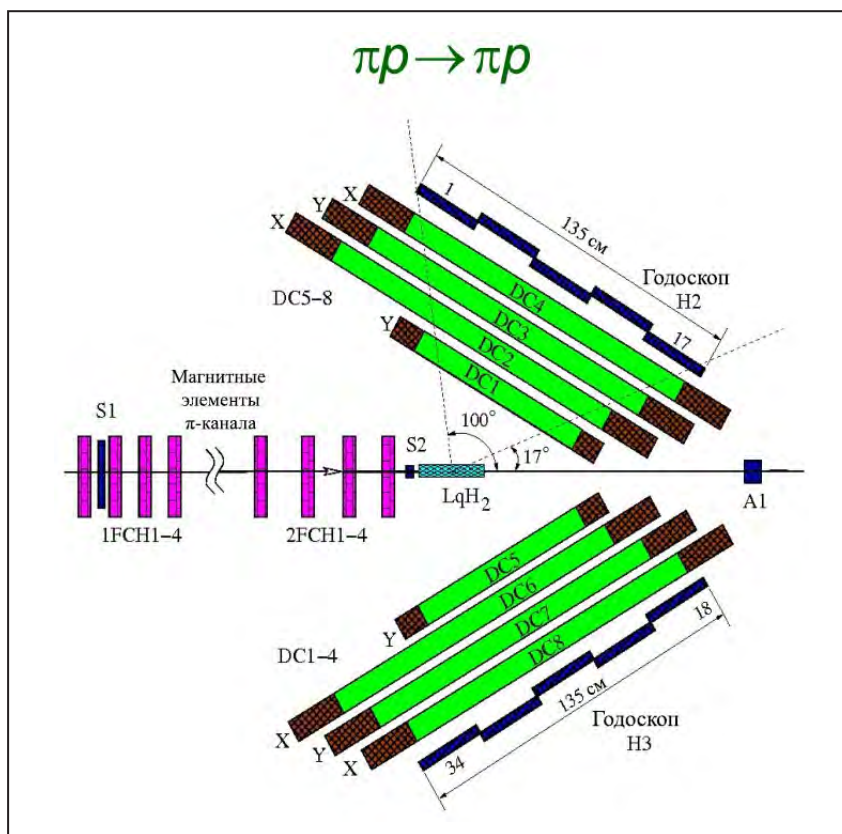
В. А. Андреев, В. В. Голубев, А. Б. Гриднев, Н. Г. Козленко, В. С. Козлов, А. Г. Крившич,
Д. В. Новинский, В. В. Сумачев, В. И. Тараканов, В. Ю. Траутман, Е. А. Филимонов –
Отделение физики высоких энергий ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Дифференциальное сечение упругого рассеяния положительных и отрицательных пионов на протонах в интервале импульсов 800–1 200 МэВ/с измерено с высокой точностью с использованием установки ЭПЕКУР на пионном пучке ускорителя ИТЭФ. Суммарная систематическая ошибка не превысила 2,6 %. Получено около 10 тыс. новых экспериментальных точек.

Экспериментальные данные свидетельствуют о двух узких резонансных структурах при энергиях

$W \approx 1,686$ и $W \approx 1,720$ ГэВ. Предварительный анализ показывает, что эти структуры можно описать двумя узкими (с шириной ~ 25 МэВ) резонансами. Точность полученных данных позволяет определить их как S_{11} - и P_{11} -резонансы соответственно.

Отметим, что резонанс $P_{11}(1,720)$ наблюдается впервые и является хорошим кандидатом в пентакварки.



Установка для измерения дифференциального сечения упругого пион-нуклонного рассеяния:
1FCH1-4, 2FCH1-4 – пропорциональные камеры с шагом 1 мм в первом фокусе и перед мишенью соответственно;
LqH₂ – жидководородная мишень;
DC1–DC8 – модули дрейфовых камер;
S1, S2, A1 – сцинтилляционные счетчики триггера;
H2, H3 – счетчики годоскопа

Дальние корреляции во взаимодействиях легких и тяжелых ядер при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ

Коллаборация PHENIX

В. В. Баублис, Д. А. Иванищев, Б. Г. Комков, Д. О. Котов, Л. М. Коченда, В. Г. Рябов, Ю. Г. Рябов, В. М. Самсонов, А. В. Ханзадеев, А. Е. Шевель –

Отделение физики высоких энергий ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Коллаборация PHENIX, в которой НИЦ КИ представлен группами сотрудников из ПИАФ НИЦ КИ, НИЦ КИ и ИФВЭ, обнаружила в столкновениях ультрарелятивистских легких и тяжелых ионов intriguing корреляцию между двумя активно исследуемыми в последнее время эффектами – значительным коллективным потоком адронов и двугорбой структурой (double-ridge structure) в событиях с высокой множественностью рождающихся частиц. Оба эти явления ранее наблюдались в ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ядер на Релятивистском ионном коллайдере (РИК) и Большом адронном коллайдере (БАК).

Обнаружение эллиптических потоков ядерного вещества, возникших на ранней стадии столкновения ультрарелятивистских тяжелых ядер, стало одним из ключевых признаков формирования в таких столкновениях нового состояния материи – кварк-глюонной плазмы, обладающей свойствами почти идеальной сильно взаимодействующей жидкости с исключительно низким значением отношения сдвиговой вязкости к энтропии. Двугорбая структура, свидетельствующая о значительных азимутальных корреляциях между адронами с малыми поперечными импульсами, разделенными по псевдобыстроте на несколько единиц, также успешно объяснялась коллективными гидродинамическими потоками, обусловленными значительными градиентами давления в горячей плотной партонной среде в зоне максимального перекрытия взаимодействующих тяжелых ядер.

Интерес к изучению взаимодействий легких и тяжелых ядер, характеризующихся высокой множественностью рождающихся частиц, связан с недавним наблюдением в экспериментах на БАК в протон-ядерных столкновениях азимутальных

корреляций (рис. 1), аналогичных корреляциям, ранее обнаруженным в столкновении тяжелых ядер.

Такое сходство может указывать на их общую гидродинамическую природу. С целью систематического исследования данного явления в эксперименте PHENIX на РИК подобные корреляции были изучены в $^3\text{He} + \text{Au}$ -взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. В этих столкновениях реализуется различная геометрия начального состояния, в частности обусловленная треугольной конфигурацией нуклонов в ^3He . Если обнаруженные корреляции действительно связаны с развитием коллективного потока, то они должны быть чувствительны к начальной геометрии взаимодействующей системы и должны приводить к возникновению эллиптического и триангулярного потоков адронов.

Пример азимутальных корреляций, измеренных в эксперименте PHENIX для заряженных частиц, разделенных по быстроте $\Delta\eta \approx 3$, в наиболее

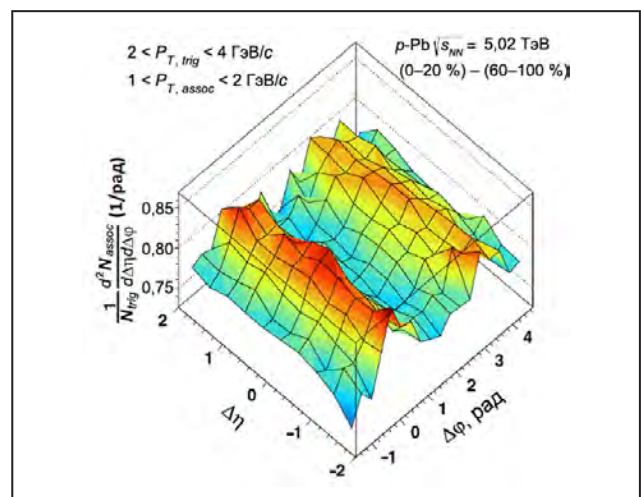


Рис. 1. Двугорбая структура, обнаруженная в эксперименте ALICE на БАК в протон-ядерном взаимодействии

центральных ${}^3\text{He} + \text{Au}$ -взаимодействиях, показан на рис. 2.

Измеренная корреляционная функция раскладывается в ряд Фурье:

$$C(\Delta\phi, p_T) = 1 + \sum_{n=1}^4 2c_n(p_T) \cos(n\Delta\phi),$$

где $\Delta\phi$ – разность азимутальных углов двух частиц. В центральных ${}^3\text{He} + \text{Au}$ -столкновениях наблюдается ярко выраженный пик выхода пар при $\Delta\phi \approx 0$, обусловленный квадрупольной анизотропией (ее вклад показан красной штриховой линией).

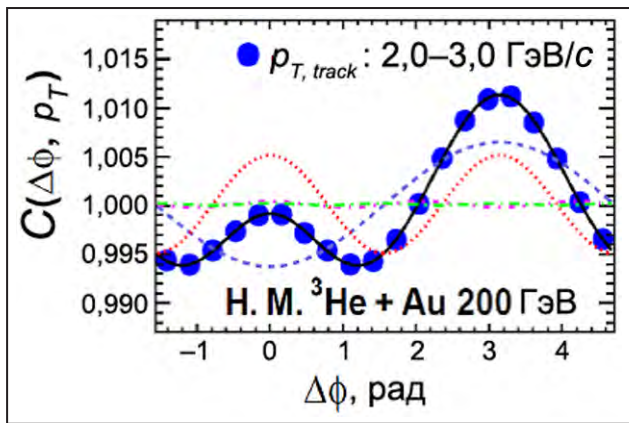


Рис. 2. Азимутальные корреляции, измеренные в 5 % наиболее центральных ${}^3\text{He} + \text{Au}$ -взаимодействиях: синие точки – экспериментальные данные; синяя пунктирная линия – дипольная компонента; красная штриховая линия – квадрупольная компонента

Азимутальная анизотропия рождающихся частиц может быть описана коэффициентами v_n в разложении Фурье

$$dN/d\phi = N_0 \{1 + \sum_{n=1} 2v_n \cos(n(\phi - \Psi_n))\},$$

где n – порядок гармоники; ϕ – азимутальный угол частицы; Ψ_n – азимутальный угол соответствующей

плоскости реакции. Величины эллиптического (v_2) и триангулярного (v_3) потоков, измеренные для инклюзивных заряженных адронов в области малых быстрот, $|\eta| < 0,35$, показаны на рис. 3.

Полученные результаты указывают на наличие дальних корреляций между заряженными адронами в наиболее центральных ${}^3\text{He} + \text{Au}$ -взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Заметный триангулярный поток отражает влияние треугольной симметрии зоны взаимодействия, обусловленной структурой ${}^3\text{He}$. Измеренные величины коллективных потоков удается описать только с привлечением моделей, предполагающих гидродинамическое расширение взаимодействующей системы, что может рассматриваться как свидетельство образования сгустков кварк-глюонной плазмы со свойствами почти идеальной жидкости в малых объемах с радиусом порядка радиуса ${}^3\text{He}$ при центральном взаимодействии ультрарелятивистских ядер ${}^3\text{He}$ и Au.

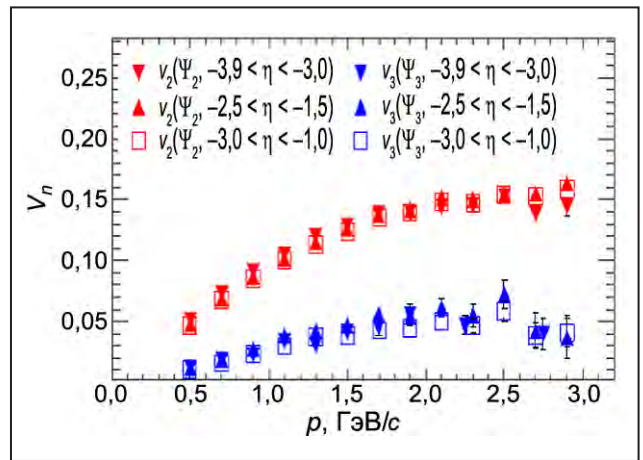


Рис. 3. Эллиптический и триангулярный потоки v_2 и v_3 , измеренные для заряженных адронов в наиболее центральных ${}^3\text{He} + \text{Au}$ -взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ

Прямое прецизионное измерение разности масс ^{163}Ho – ^{163}Dy в ионной ловушке

Коллаборации SHIPTRAP и TRIGATRAP

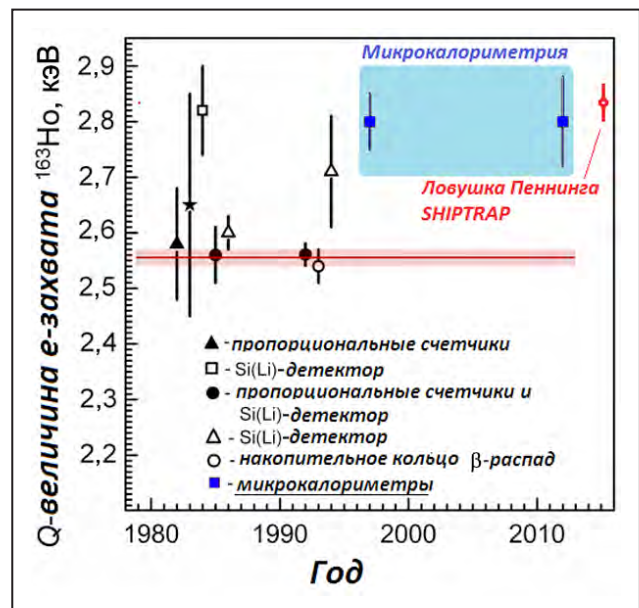
С. А. Елисеев, Ю. Н. Новиков, П. Е. Филянин, С. В. Ченмарев –

Отделение физики высоких энергий ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Нуклид ^{163}Ho обладает наименьшей энергией, выделяемой в процессе захвата основным состоянием ядра орбитального электрона, поэтому этот нуклид является наилучшим кандидатом для определения массы нейтрино. На сегодняшний день предел на массу нейтрино составляет 225 эВ, тогда как на массу антинейтрино он равен ~ 2 эВ. Значительный прогресс масс-спектрометрии с использованием ионных ловушек и метода криогенной микрокалориметрии позволил предложить программу определения массы нейтрино измерением болометрического спектра атомной разрядки с использованием опорного прецизионного значения энергии распада Q_{EC} , которая, в свою очередь, может быть независимо получена методом масс-спектрометрии. Эта идея находит воплощение в реализации проекта ECHo-1. Однако первые пилотные болометрические измерения Q_{EC} показали значительное расхождение (более 7σ) с литературными данными, полученными различными методами и оцененными как 2,56 (2) кэВ (рис.). Для устранения этого разногласия были проведены прямые измерения разности масс ^{163}Ho – ^{163}Dy на ионной ловушке SHIPTRAP (Дармштадт, Германия). Предварительно коллаборация провела работу по производству нуклида ^{163}Ho на реакторе ILL (Гренобль, Франция), его выделению и тщательной химической очистке с последующей масс-сепарацией и изготовлением мишени для пробных измерений на ионной ловушке TRIGATRAP (Майнц, Германия).

Измерения резонансной частоты обращения ионов в электромагнитном поле ловушки SHIPTRAP, напрямую связанной с массой иона,

проводились новым методом фазового отображения радиального движения иона на позиционно-чувствительный детектор на основе микроканальной пластины. Результат измерения дал значение 2 833 (35) эВ, что хорошо согласуется с величиной 2 800 (60) эВ, полученной криогенной микрокалориметрией. Этот результат следует рассматривать как подтверждение возможности определения массы нейтрино. Он открывает путь к ее определению на уровне 1 эВ и ниже, что потребует использования более интенсивного источника ^{163}Ho , большей статистики и запуска новой пятитандемной ионной ловушки PENTATRAP в рамках проекта ECHo-2.



Сравнение нового результата SHIPTRAP с предыдущими данными

1. Gastaldo L. et al. // Low Temp. Phys. 2014. V. 176. P. 876.
2. Schneider F. et al. // Eur. Phys. J. A. 2015. V. 51. P. 89.
3. Eliseev S. et al. // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. P. 062501.

Проверка CPT -инвариантности в легких ядерных системах

Коллаборация ALICE

М. Б. Жалов, В. В. Иванов, Е. Л. Крышень, М. В. Малаев, В. Н. Никулин,

В. Г. Рябов, Ю. Г. Рябов, В. М. Самсонов, А. В. Ханзадеев –

Отделение физики высоких энергий ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Одна из наиболее фундаментальных симметрий в квантовой теории поля, сформулированная в виде теоремы CPT , гласит, что все физические законы инвариантны при одновременном обращении времени (T), сопряжении заряда (C) и инверсии пространства (P). Прямым следствием CPT -теоремы является равенство масс частиц и античастиц. К настоящему времени это равенство в секторе бозонов проверено в слабых взаимодействиях с беспрецедентной точностью $\delta M(K^0\bar{K}^0) \leq 5 \cdot 10^{-19}$ измерением распадов нейтральных каонов в эксперименте KLOE. Наиболее прецизионным тестом CPT -инвариантности в барионном секторе Стандартной модели (СМ) является экспериментально измеренное отношение R масс и зарядов для протонов и антипротонов: $R = m_{\bar{p}}Z_{\bar{p}}/m_pZ_p = -0,999999999839$ (90). Отметим, что это отношение на $1,8\sigma$ отличается от значения $R = -1,0$ в СМ, и коллаборацией ATRAP запланированы измерения величины R с более высокой точностью.

В 2015 г. коллаборация ALICE, в которой НИЦ КИ представлен группами сотрудников из ПИАФ НИЦ КИ, НИЦ КИ, ИФВЭ и ИТЭФ, опубликовала в журнале Nature Physics результаты измерения выхода ядер D , ${}^3\text{He}$, \bar{D} , $\bar{{}^3\text{He}}$ в столкновениях ядер свинца при $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ ТэВ. Особенность детектора ALICE позволяет не только надежно идентифицировать треки ядер и антиядер (рис. 1), но и измерить длину трека, время пролета частицы и параметр жесткости (отношение импульса к заряду) ее траектории движения в магнитном поле, а следовательно, определить массы легких ядер и антиядер в предположении сохранения их зарядов.

В результате показано, что разности отношений масс ядер к их заряду согласуются с нулем

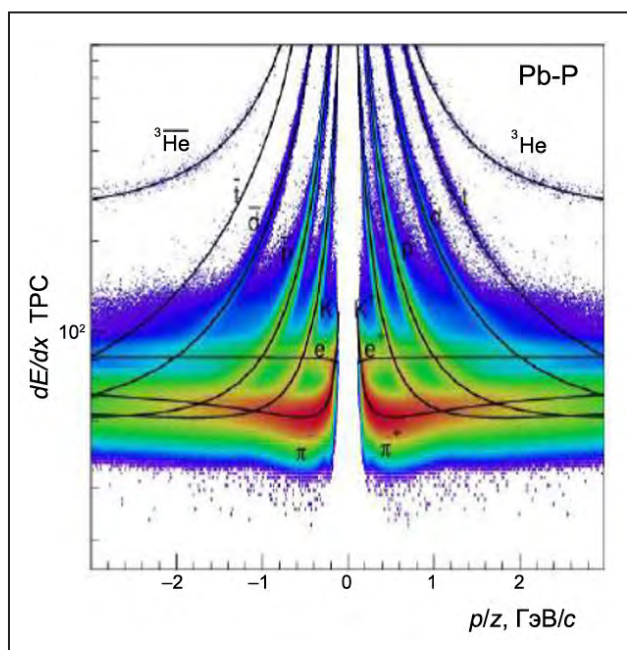


Рис. 1. Идентификация ядер и антиядер по энергетическим потерям в детекторе ALICE

в пределах неопределенности измерений на уровне $3 \cdot 10^{-4}$ для системы $D-\bar{D}$ и $3 \cdot 10^{-3}$ для ядер ${}^3\text{He}-\bar{{}^3\text{He}}$ (рис. 2, слева).

С полученными значениями масс ядер и антиядер были также вычислены энергии связи этих систем с использованием для масс нуклонов и антинуклонов значений, рекомендованных CODATA. Разность энергий связи ядер и антиядер совместима с нулем в пределах экспериментальной неопределенности (рис. 2, справа). Для ядер ${}^3\text{He}-\bar{{}^3\text{He}}$ такая оценка получена впервые. Этот результат свидетельствует о том, что с точностью до экспериментальных неопределенностей эффективные ядерные силы, ответственные за формирование основного состояния легких ядер и антиядер, не нарушают CPT -инвариантность.

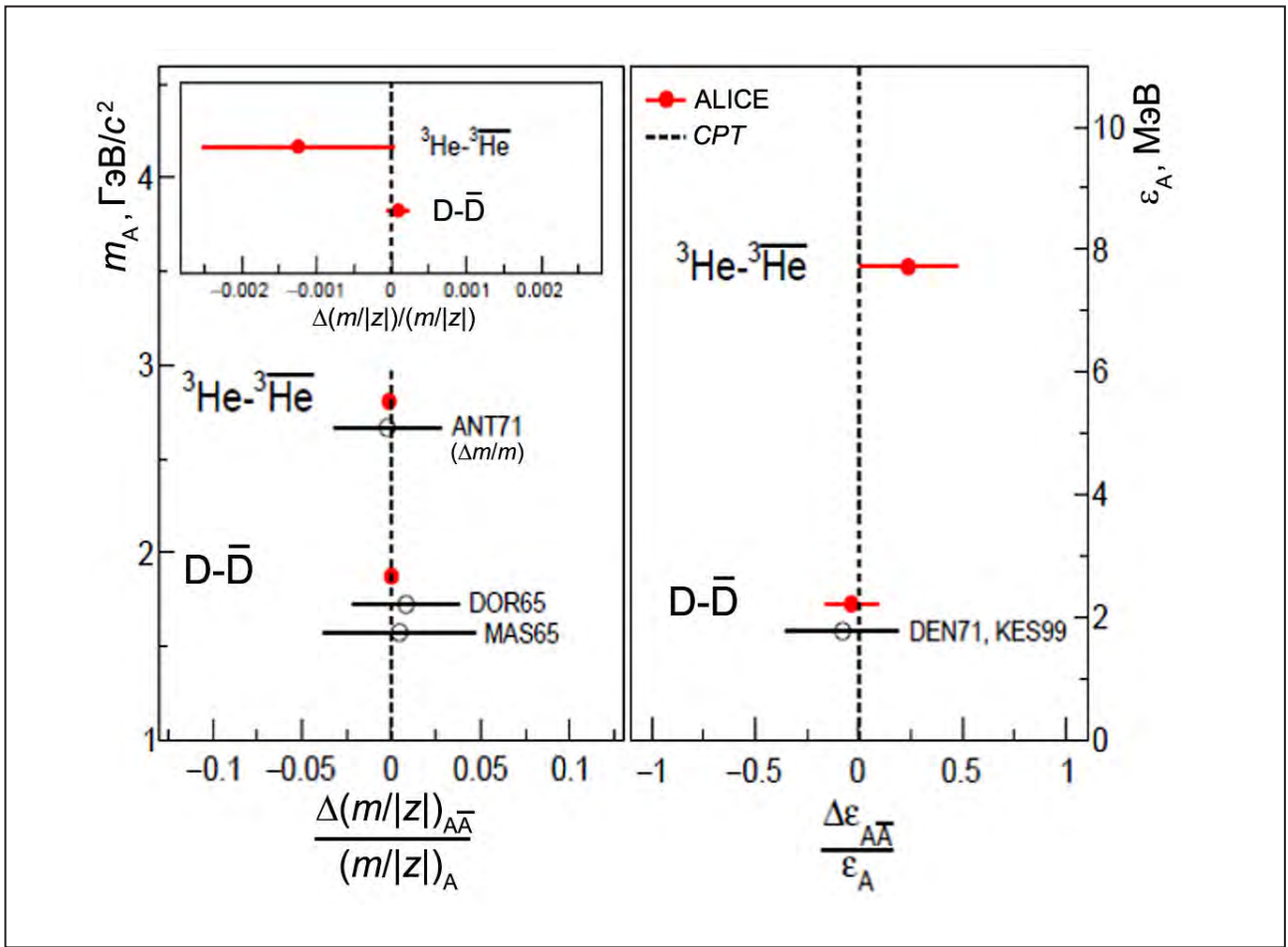


Рис. 2. Измеренная разница: отношений массы к заряду ядер и антиядер (слева); энергий связи ядер и антиядер (справа)

Важно подчеркнуть, что тест *CPT*-инвариантности в легких ядерных системах не входил в число приоритетных задач эксперимента ALICE, нацеленного на исследование механизмов формирования и свойств кварк-глюонной среды, создаваемой в центральных столкновениях ультрарелятивистских ядер на Большом адронном коллайдере (БАК). Представленные выше результаты получены исключительно благодаря уникальным

возможностям детектора ALICE и БАК. Это позволяет рассчитывать, что анализ данных, накопленных в 2015–2017 гг. при повышенной светимости и более высокой энергии столкновений, позволит не только существенно улучшить уже имеющиеся оценки, но и с рекордно высокой точностью измерить разность масс ядер и антиядер ${}^4\text{He}$ и оценить ограничения на нарушение *CPT*-инвариантности в связанных четырехнуклонных системах.

Изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов и электромагнитные моменты нейтронно-дефицитных изотопов висмута

Эксперименты ISOLDE (ЦЕРН) и ИРИС (ПИЯФ НИЦ КИ)

А. Е. Барзах, Л. Х. Батист, Ю. М. Волков, В. С. Иванов, П. Л. Молканов,

Ф. В. Мороз, С. Ю. Орлов, В. Н. Пантелеев, М. Д. Селиверстов, Д. В. Федоров –

Отделение физики высоких энергий ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Теоретическое описание эффектов изменения формы и сосуществования форм атомных ядер в настоящее время является одним из основных вызовов для теории ядра. Нейтронно-дефицитные изотопы в области $Z = 82$ демонстрируют ярчайшие проявления эффектов эволюции и сосуществования форм ядер. В то время как для изотопической цепочки Hg ($Z = 80$) наблюдается резкое изменение формы ядер у соседних изотопов при $N < 106$ (четно-нечетный эффект), для ядер Po ($Z = 84$) имеет место постепенный рост деформации при $N < 113$. В то же время нейтронно-дефицитные ядра Pb и Tl ($Z = 82, 81$) остаются сферическими вплоть до $N = 104$ (середина нейтронной оболочки) и даже при меньшем числе нейтронов. Исследования нейтронно-дефицитных изотопов Bi ($Z = 83$) играют важную роль для понимания явлений эволюции и сосуществования форм ядер в данной области нуклидной карты. Установлено, что помимо близких к сферическим основным состояниям у изотопов Bi имеются деформированные возбужденные состояния с нечетным протоном на $\pi i_{13/2}^-$ и $\pi s_{1/2}^-$ оболочках. Изотопические изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов, получаемые методом лазерно-атомной спектроскопии, дают модельно независимую информацию о деформации основных и изомерных ядерных состояний. До сих пор подобные измерения для Bi были проведены только для $A = 202-213$, т. е. для $N > 119$, тогда как для соседней изотопической цепочки Po изменения ядерной структуры начинаются только при $N < 112$. Продолжение лазерно-спектроскопических исследований Bi в направлении к середине нейтронной оболочки ($N = 104$), где ожидается максимальная нестабильность формы ядра, и было основной задачей данной работы.

Значения магнитных моментов различных ядерных состояний изотопов Bi в сравнении с магнитными моментами соседних изотопов / изомеров Tl с теми же значениями ядерных спинов представлены на рис. 1. Новые данные по магнитным моментам достаточно хорошо согласуются с изотопическим трендом, установленным ранее для более тяжелых ядер с тем же спином. В то же время магнитные моменты изотопов висмута близки к соответствующим значениям для ядер таллия. Важно отметить, что ядерные состояния с одинаковым спином в Tl и Bi имеют различную природу: состояние $\pi h_{9/2}$ «нормальное» для Bi и «внедренное» ($1p-2h$) для ядер Tl, $\pi s_{1/2}^-$ – «внедренное» ($2p-1h$) для Bi и «нормальное» для Tl. Таким образом, измеренные магнитные моменты Bi подтверждают низкую чувствительность μ к «нормальному» или «внедренному» характеру ядерных состояний. Сравнение относительных изменений зарядовых радиусов (ОИЗР) четно-нейтронных изотопов Bi с ОИЗР четно-нейтронных изотопов Pb представлено на рис. 2а. Изотопическая цепочка Bi демонстрирует поведение, аналогичное Pb до $N = 110$ и заметно отклоняется от него при $N < 110$. Ранее было показано, что ОИЗР изотопов Tl повторяют поведение Pb даже при $N < 104$, тогда как ОИЗР изотопов Po демонстрируют заметное отклонение от этого (сферического) тренда при $N < 113$, объясняемое ростом ядерной деформации. При этом для нечетно-нейтронных изотопов Bi отклонений от сферического тренда не наблюдается (рис. 2б). Полученные для изотопов Bi результаты показывают, что изменение деформации у четно-нейтронных изотопов Bi носит «промежуточный» (относительно ${}_{82}\text{Pb}$ и ${}_{84}\text{Po}$) характер. Таким образом, эволюция формы ядер для изотопических

цепочек Bi и Tl различна, хотя данные цепочки «зеркальны» относительно протонной оболочки $Z = 82$. Обнаружено также, что у «внедренных»

изомерных состояний $^{197, 195, 193}\text{Bi}$ ($l = 1/2$) зарядовый радиус (деформация) больше, чем у соответствующих основных состояний (рис. 2а).

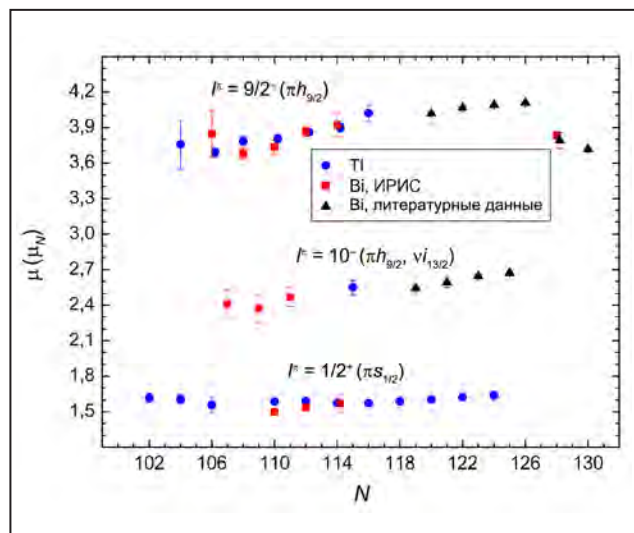


Рис. 1. Магнитные моменты изотопов / изомеров Bi и Tl: квадраты – Bi, измерения на ИРИС; треугольники – Bi, литературные данные; кружки – Tl

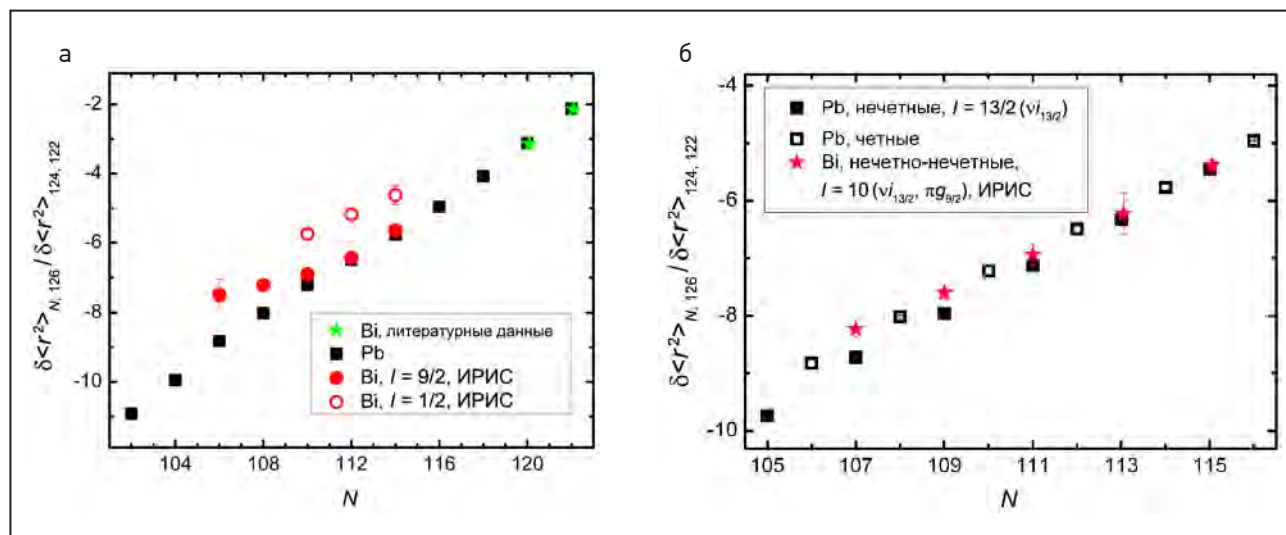


Рис. 2. а) Относительные изменения зарядовых радиусов для четно-нейтронных изотопов Bi и Pb: квадраты – четные изотопы Pb; кружки – основные состояния нечетных изотопов Bi ($l = 9/2$); полые кружки – изомеры нечетных изотопов Bi ($l = 1/2$). б) Относительные изменения зарядовых радиусов для нечетно-нейтронных изомеров Bi и Pb: звездочки – изомеры Bi ($l = 10$) с конфигурацией $(\nu i_{13/2}, \pi h_{9/2})$; квадраты – нечетно-нейтронные изомеры Pb ($l = 13/2$) с конфигурацией $\nu i_{13/2}$; полые квадраты – четно-нейтронные изотопы Pb

1. Seliverstov M. D. et al. // Phys. Rev. C. 2014. V. 89. P. 034323.
 2. Barzakh A. E., Batist L. Kh., Fedorov D. V., Ivanov V. S., Molkanov P. L., Moroz F. V., Orlov S. Yu., Panteleev V. N., Seliverstov M. D., Volkov Yu. M. // AIP Conf. Proc. 2015. V. 1681. P. 030011.

Новые данные по регистрации гео-нейтрино в эксперименте «Борексино»

А. В. Дербин

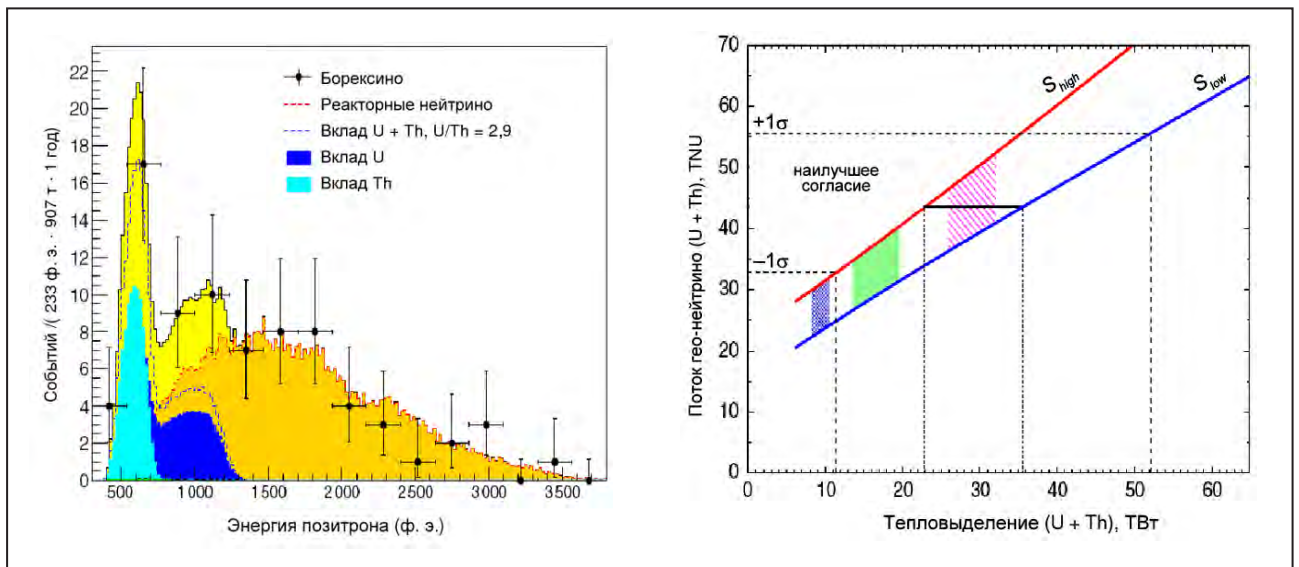
Отделение нейтронных исследований ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Гео-нейтрино – это электронные антинейтрино, возникающие в результате β -распадов в урановом и ториевом семействах внутри Земли. Для регистрации антинейтрино используется реакция обратного β -распада $\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$. Два последовательных события от позитрона и захвата нейтрона во временном окне, определяемом временем жизни нейтрона (250 мкс) в сцинтилляторе, позволяют надежно выделить данную реакцию. Основные преимущества детектора солнечных нейтрино «Борексино» заключаются в низком уровне фона, связанном с реакторными антинейтрино, естественной радиоактивностью и мюонами.

В 2015 г. коллаборация «Борексино» опубликовала данные по измерению потоков гео-нейтрино в Национальной лаборатории Гран-Сассо

за 2 056 суток измерений. Общее число зарегистрированных антинейтрино составляет 77 событий, из которых 24 события вызваны гео-нейтрино. Используя вычисления ожидаемого потока гео-нейтрино из земной коры, впервые удалось надежно установить существование потока гео-нейтрино из мантии, что является важным фактом для определения строения Земли. Число реакторных нейтрино (53), зарегистрированных на рекордно далеком расстоянии от реакторов (более 500 км), находится в согласии с осцилляционным решением.

Результаты получены при активном участии российских ученых из ПИАФ НИЦ КИ, ОИЯИ, НИЦ КИ и НИИЯФ МГУ.



Спектр 77 событий, вызванных антинейтрино: светло- и темно-синие области – нейтрино из Th- и U-семейств соответственно; красная линия – вклад реакторных нейтрино (слева). Зависимость скорости счета гео-нейтрино S (в единицах TNU = 1 событие на 10^{32} протонов в год) от тепловой мощности H , выделяемой в Земле, для различных моделей (показано цветом); наиболее вероятное значение S , полученное в эксперименте, соответствует тепловыделению H в интервале 23–36 ТВт, что следует сравнить с тепловой мощностью Земли $H = 47 \pm 2$ ТВт (справа)

Создание нейтринной лаборатории для проведения эксперимента по поиску стерильного нейтрино на реакторе СМ-3

О. М. Жеребцов, М. Е. Зайцев, В. Г. Зиновьев, В. Г. Ивочкин, Л. Н. Матросов, М. Ю. Матросова, Р. М. Самойлов, А. П. Серебров, В. А. Соловей, А. К. Фомин, М. Е. Чайковский, А. В. Черный – Отделение нейтронных исследований

В. Л. Головцов, Н. В. Грузинский, П. В. Неустроев – Отделение физики высоких энергий ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

В. И. Алешин, В. П. Мартемьянов, В. Г. Тарасенков, В. Г. Циноев – НИЦ «Курчатовский институт»

В. В. Афанасьев, М. О. Громов, А. Л. Изжутов, С. В. Павлов, А. Л. Петелин, Д. К. Рязанов, С. А. Сазонтов – ОАО «ГНЦ НИИ атомных реакторов»

В связи с вопросом о возможности существования стерильного нейтрино на реакторе СМ-3 создана нейтринная лаборатория для поиска осцилляций реакторных антинейтрино. Прототип нейтринного детектора с объемом сцинтиллятора 400 л перемещается в нейтринном канале на расстоянии 6–11 м от активной зоны реактора (рис. 1). Проведены измерения фоновых условий. Показано, что основную проблему эксперимента составляет фон космического излучения.

Космический фон зависит от расстояния от активной зоны реактора из-за структуры распределения бетонных масс здания. Кроме того, космический фон изменяется со временем из-за колебания атмосферного давления и температуры нижних слоев атмосферы.

Использование активной защиты позволяет подавить коррелированный фон космического излучения только на 66 %. Это часть космического фона, связанная с мюонами. Она может



Рис. 1. Общий вид пассивной защиты нейтринного детектора на реакторе СМ-3 снаружи (слева) и изнутри (справа)

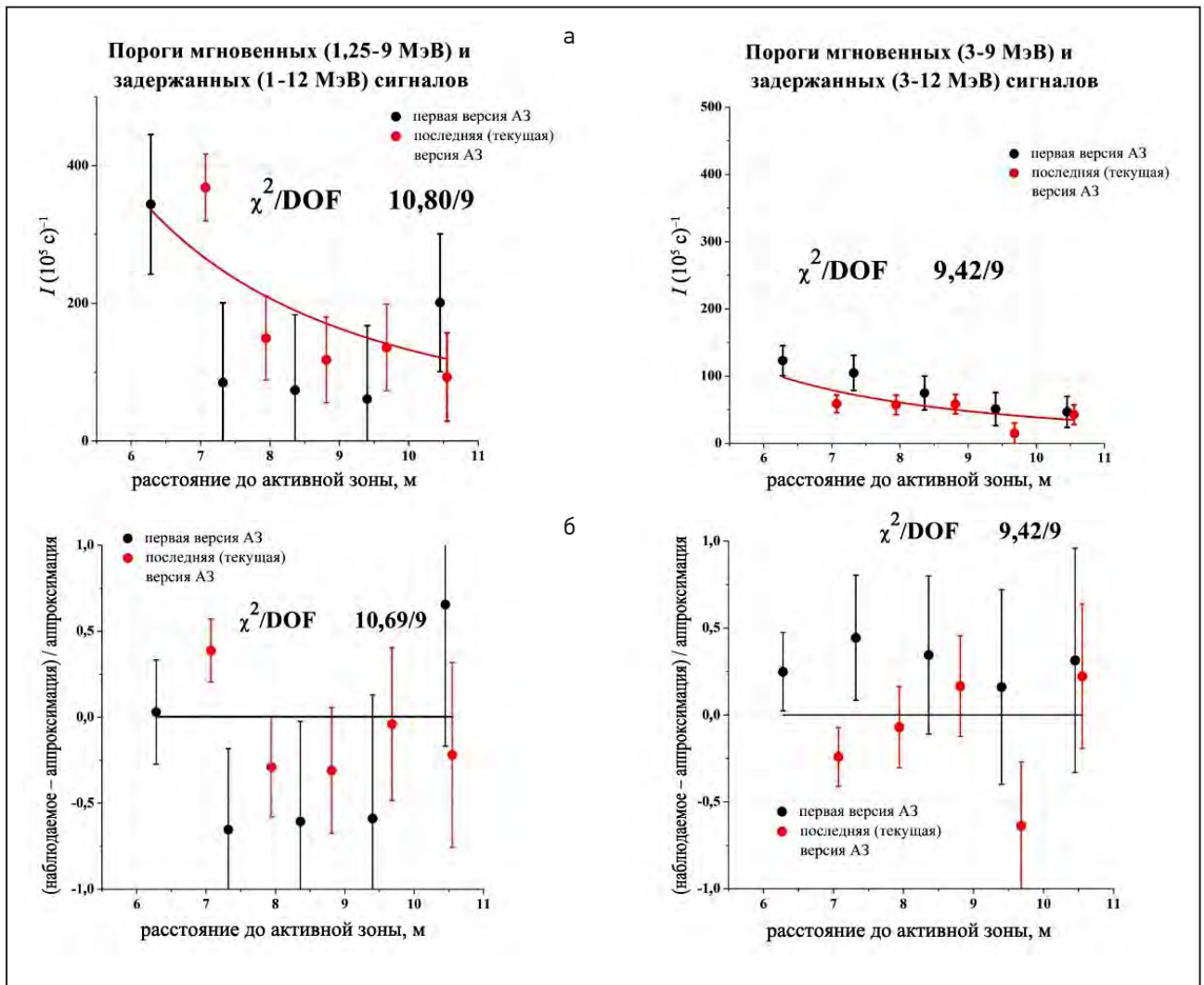


Рис. 2. а) Слева – зависимость разности скорости счета коррелированных событий (реактор включен – реактор выключен) от расстояния до активной зоны реактора для мгновенных сигналов в энергетическом окне 1,25–9 МэВ и для задержанных сигналов 1–12 МэВ; справа – то же для энергетических интервалов 3–9 и 3–12 МэВ. б) Обработка этих же данных на отклонение от закона $1/R^2$

контролироваться активной защитой. Нейтронная компонента практически не контролируется активной защитой, поэтому требуется использовать метод разделения сигналов от протонов отдачи и позитронов по форме импульса.

Проведены пробные измерения зависимости потока реакторных антинейтрино от расстояния до активной зоны реактора. После исследований космического фона были реализованы измерения

потока антинейтрино от реактора СМ-3 и его зависимость от расстояния. Разность измерений коррелированных сигналов в зависимости от расстояния с включенным и выключенным реактором представлена на рис. 2а, обработка этих же данных на отклонение от закона $1/R^2$ – на рис. 2б. Пока статистической точности с моделью детектора недостаточно для каких-либо выводов. Требуется увеличение объема детектора на порядок величины.

1. Серебров А. П. // УФН. 2015. Т. 185. С. 1179.

2. Serebrov A. P., Ivochkin V. G., Samoylov R. M. et al. // JETP. 2015. V. 121. P. 578.

3. Serebrov A. P., Ivochkin V. G., Samoylov R. M. et al. // Technic. Phys. 2015. V. 60. P. 1863.

Наблюдение каналирования пучков Большого адронного коллайдера в изогнутых кристаллах в эксперименте UA9

Коллаборация UA9

Ю. А. Гавриков, А. С. Денисов, Ю. М. Иванов, Л. П. Лапина, Л. Г. Маляренко, В. В. Скоробогатов –
Отделение физики высоких энергий ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Одним из направлений сотрудничества ПИАФ НИЦ КИ с ЦЕРН является эксперимент UA9. Основная задача эксперимента заключается в разработке и исследовании системы кристаллической коллимации пучков Большого адронного коллайдера (БАК) в рамках программы повышения светимости БАК. С российской стороны в эксперименте участвуют группы из ПИАФ НИЦ КИ, ИФВЭ и ОИЯИ. На протяжении последних 10 лет исследования, проведенные на синхротронном ПИАФ НИЦ КИ и на ускорителе SPS в ЦЕРН, продемонстрировали перспективность использования кристаллов в коллимационных системах адронных коллайдеров высоких энергий. Было показано, что используемые в качестве первичных коллиматоров изогнутые кремниевые кристаллы в режиме каналирования могут существенно уменьшить гало пучка, снижая радиационную нагрузку в критических зонах ускорительного кольца. При этом значительно возрастает поглощающая эффективность вторичных коллиматоров, поскольку частицы гало пучка уводятся от края коллиматора (рис. 1). Основываясь на результатах этих исследований, руководство ускорителя БАК приняло

решение о проведении испытаний непосредственно в кольце коллайдера.

В 2013–2014 гг. в кольце БАК были установлены два высокоточных гониометра, оснащенных изогнутыми кремниевыми кристаллами, изготовленными ПИАФ НИЦ КИ и Национальным институтом ядерной физики (INFN, Италия) (рис. 2). В 2015 г. на пучках БАК были проведены первые опыты. Исследования с протонами проводились при энергии 450 ГэВ и максимальной энергии 6,5 ТэВ, а также с ионами – при энергии 450 ГэВ. Обнаружено, что во всех случаях, в т. ч. при максимальной энергии БАК 6,5 ТэВ, при оптимальном выстраивании кристалла относительно пучка в нем происходит существенное уменьшение количества неупругих ядерных взаимодействий (рис. 3), что свидетельствует о сильном эффекте каналирования частиц. Таким образом, впервые было продемонстрировано каналирование частиц столь высокой энергии и подтверждена возможность кристаллической коллимации пучков в БАК. Измерения проводились при пониженной интенсивности пучка. Тесты при более высокой интенсивности находятся в стадии подготовки.

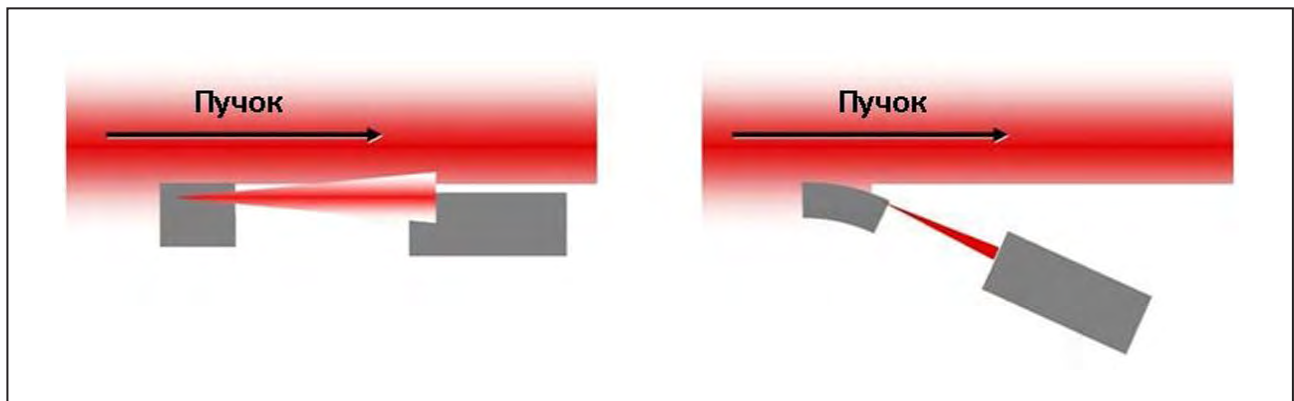


Рис. 1. Схемы классической (слева) и кристаллической (справа) коллимаций пучков заряженных частиц

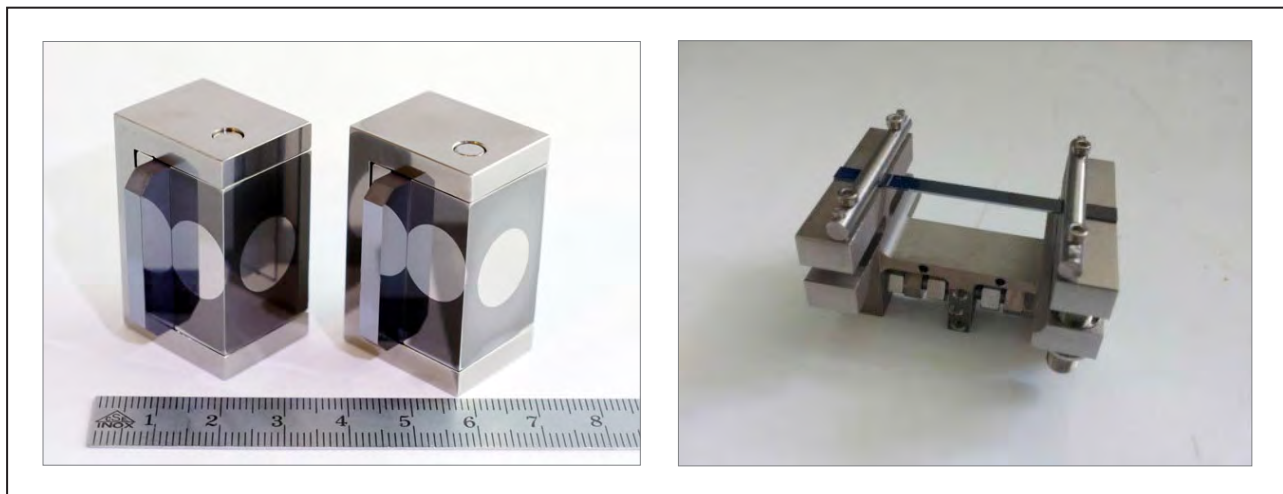


Рис. 2. Изогнутые кристаллы для БАК, разработанные в ПИЯФ НИЦ КИ (слева) и INFN (справа)

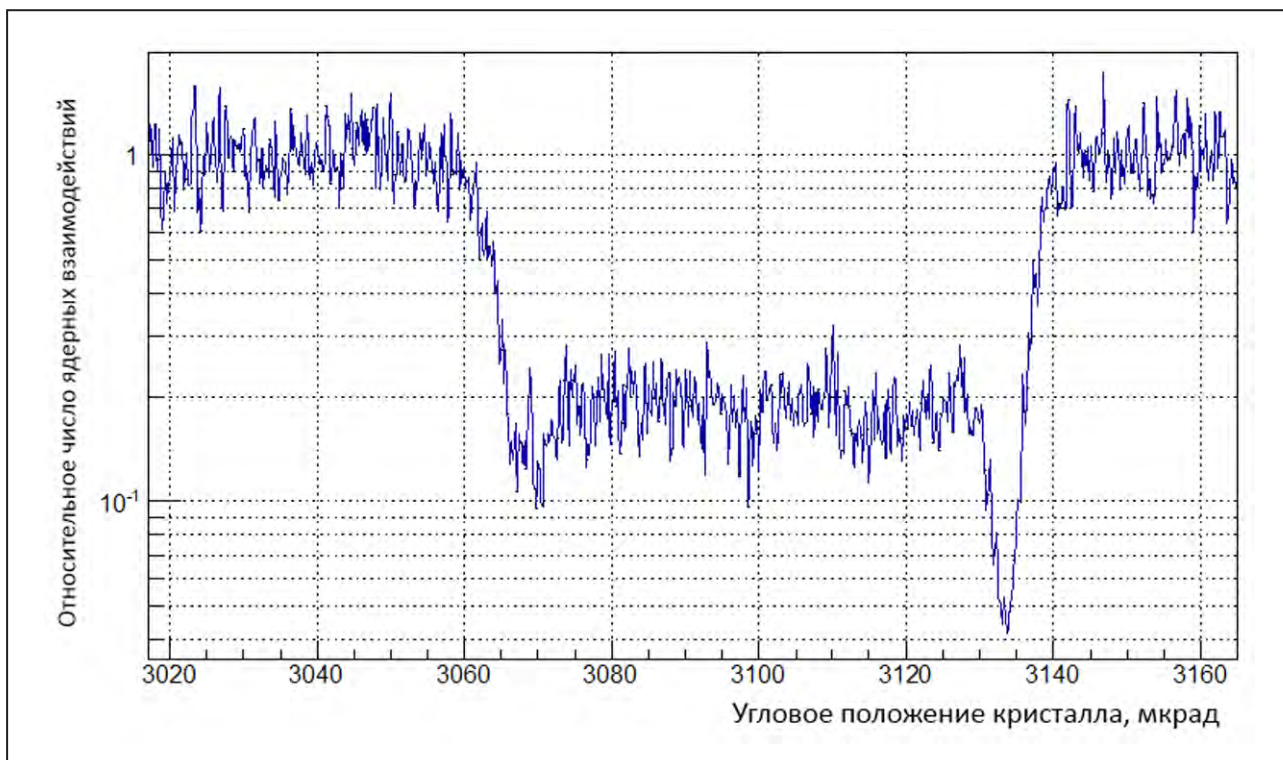


Рис. 3. Зависимость числа ядерных взаимодействий в кристалле от его углового положения при энергии налетающих протонов 6,5 ТэВ

1. *CERN Bulletin*. <http://cds.cern.ch/journal/CERNBulletin/2015/49>
2. *UA9 Collaboration*. Observation of Proton Channeling in the Crystal Assisted Collimation Set-Up for LHC. Submitted to *Phys. Lett. B*.

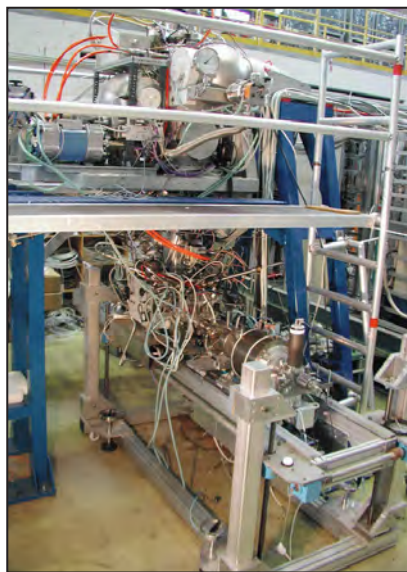
Получение молекулярного водорода с высокой ядерной поляризацией

Коллаборация CELGAS

А. А. Васильев, К. Ю. Григорьев, Л. М. Коченда, П. А. Кравцов, В. А. Трофимов –
Отделение физики высоких энергий ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»
Р. Энгельс – Исследовательский центр Юлиха

Поляризованные пучки заряженных частиц и поляризованные мишени являются важной частью экспериментов в ядерной физике. Внутренние газовые водородные и дейтериевые мишени с ядерной поляризацией широко используются в экспериментах на ускорителях частиц высокой энергии (HERMES DESY, COSY FZ-Jülich). В этих экспериментах создается пучок поляризованных атомов водорода или дейтерия с высокой степенью поляризации. Дальнейшей задачей, не решенной пока удовлетворительно, является накопление поляризованных атомов и удержание поляризации во времени. Проблема связана с тем, что на поверхности накопительной ячейки достаточно быстро происходит рекомбинация атомов водорода в молекулы со значительной потерей поляризации.

В 2001 г. в ПИАФ НИЦ КИ начались исследования возможности сохранения ядерной поляризации в молекулярном водороде (дейтерии), образовавшемся в процессе рекомбинации атомарного поляризованного водорода (дейтерия). Была создана установка (рис.), позволяющая проводить рекомбинацию поляризованных атомов на различных поверхностях (Au, Si, органические поверхности и др.) в широком диапазоне температур (45–200 К) и магнитных полях до 1 Тл. Для измерения поляризации молекулярный водород ионизовался электронным ударом, и молекулярные ионы выводились в систему поляриметрии. Однородное магнитное поле создавалось сверхпроводящими магнитами при гелиевых температурах. Дальнейшие измерения проводились в Институте ядерной физики Исследовательского центра Юлиха с использованием поляриметра и источника поляризованных



Экспериментальная установка для создания и исследования поляризованных молекул (COSY FZ-Jülich)

атомов. Была разработана уникальная методика измерения ядерной поляризации молекулярного водорода с использованием поляриметра на лэмбовском сдвиге. Ранее получить поляризацию больше 50 % в сильных магнитных полях не удавалось, независимо от типа поверхности. В установке, созданной в ПИАФ НИЦ КИ, поверхности, на которых проводилась рекомбинация, помещались в окружение криогенных адсорбционных насосов при температуре жидкого гелия. Такая конфигурация гарантировала отсутствие остатков воды на исследуемой поверхности. Впервые на накопительной ячейке, покрытой полиперфторэтиленом (Fomblin), при рекомбинации поляризованных атомов водорода была получена 97 %-ная поляризация молекулярного водорода. Таким образом, доказана принципиальная возможность получения поляризованного молекулярного водорода с высокой степенью поляризации.

1. Engels R. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. P. 103505.

2. Engels R. et al. // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. P. 113007.

Неинвазивный метод восстановления рабочих параметров газоразрядных детекторов частиц при работе в высокоинтенсивных радиационных полях

*В. А. Андреев, Г. Е. Гаврилов, А. Г. Крившич, Д. А. Майсузенко, А. А. Фетисов, Н. Ю. Швецова
Отделение физики высоких энергий ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»*

Изучение опыта старения газоразрядных детекторов во многих современных физических экспериментах показало, что основной причиной их деградации являются кремниевые соединения, попадающие в рабочие газовые смеси. Источником кремния в рабочем объеме обычно являются материалы конструкций, элементы системы газового обеспечения или стеклопластиковые электроды.

Если кремниевых соединений в газовом объеме нет, то при накоплении детектором заряда более $1 \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-1}$ проявляется другой механизм старения – распухание. Радикалы кислорода из газоразрядной плазмы окисляют вольфрам – материал, из которого изготавливается анодная проволока. Золотое покрытие проволоки растрескивается, и окислы вольфрама (WO_x) выступают на поверхность через образовавшиеся трещины.

Оба типа старения приводят к увеличению диаметра анода и, как следствие, к падению коэффициента газового усиления (КГУ) и уменьшению амплитуды сигнала. Универсального решения проблемы старения не найдено, поэтому большую практическую ценность представляет собой возможность неинвазивного восстановления составившегося детектора, т. е. нет необходимости разбирать его для ремонта.

Разработанный в ОФВЭ ПИАФ НИЦ КИ метод очистки поверхности анодной проволоки от соединений кремния или вольфрама базируется на плазмохимических реакциях травления, применяемых в микроэлектронике. Травление образованных происходит в плазме газового разряда смеси $80 \% \text{CF}_4 + 20 \% \text{CO}_2$ у поверхности проволоки, к которой приложен отрицательный потенциал. Основой процесса являются реакции между активными радикалами фтора и соединениями кремния или вольфрама в газовом разряде у проволоки.

Результатом этих реакций является образование летучих соединений, которые удаляются из объема детектора потоком газа. В процессе восстановления поврежденная зона облучается источником ^{55}Fe . Рентгеновские фотоны с энергией 6 кэВ поддерживают ионизацию в плазме газового разряда и обеспечивают десорбцию продуктов травления.

Изучение плазмохимического травления образований кремния и вольфрама проводилось с использованием пропорциональных счетчиков типа straw. Диаметр анодной проволоки в straw составлял 50 мкм , а диаметр катода полиамидной трубки с углеродным напылением – 4 мм . При старении счетчики straw с рабочей газовой смесью $60 \% \text{Ar} + 30 \% \text{CO}_2 + 10 \% \text{CF}_4$ облучались β -источником ^{90}Sr с интегральной интенсивностью 15 МГц .

Для проверки применимости неинвазивного метода два счетчика straw (Straw-1 и Straw-2) трижды были состарены с рабочей газовой смесью, специально загрязненной кремнием (падение амплитуды составляло до 35%), а затем каждый раз успешно восстановлены. Спектры рентгенофлуоресцентного анализа (ХЕМ) поверхности проволочек с кремниевыми образованиями до восстановления и после очистки приведены на рис. 1 *слева*. Зависимости газового усиления от заряда, накопленного на единицу длины анодной проволоки, показаны на рис. 1 *справа*.

Для достижения эффекта распухания анодной проволоки во время облучения счетчиков использовалась чистая газовая система, исключая появление каких-либо загрязнителей в рабочем объеме детекторов. Были проделаны две серии измерений, в которых два счетчика многократно старились и восстанавливались с помощью

описанного метода. Со Straw-1 проведены четыре цикла «старение – восстановление» до падения амплитуды сигнала на ~ 3 %, Straw-2 трижды старелся до падения амплитуды на ~ 6 % и каждый раз успешно восстанавливался. Результаты тестов и ХЕМ-анализ поверхности состаренной и восстановленной проволочек приведены на рис. 2.

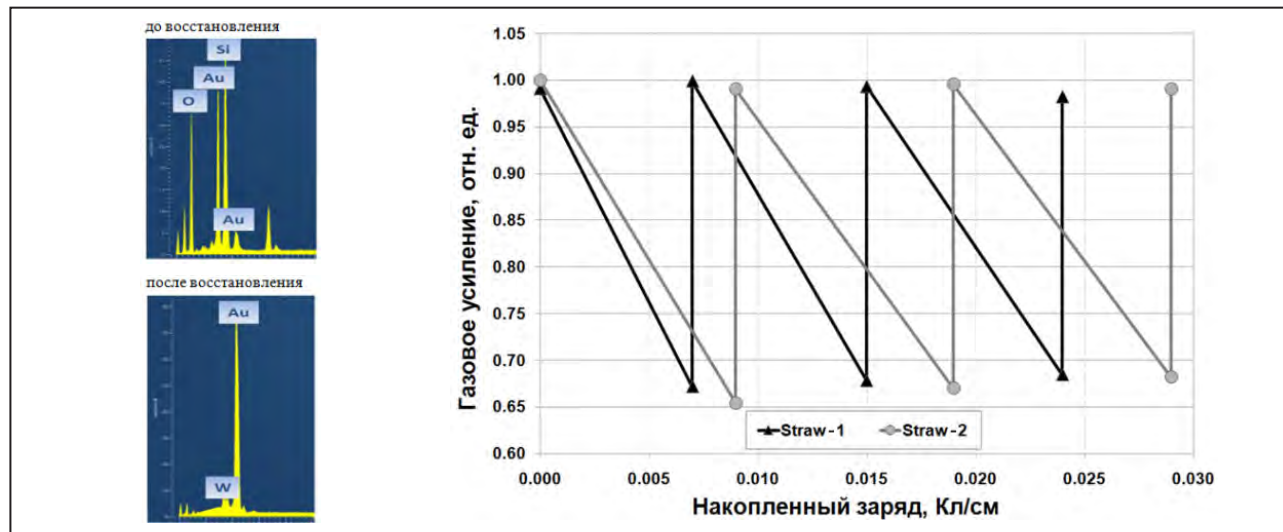


Рис. 1. Слева – результаты ХЕМ-анализа поверхностей анодных проволочек: состаренной в 60 % Ag + 30 % CO₂ + 10 % CF₄ (сверху); трижды состаренной и трижды очищенной путем травления в смеси 80 % CF₄ + 20 % CO₂ от соединений кремния (снизу). Справа – зависимость газового усиления от накопленного заряда при многократном восстановлении двух счетчиков straw: наклонные линии – изменение КГУ в счетчиках в процессе старения; вертикальные линии – восстановление КГУ в результате применения неинвазивного метода

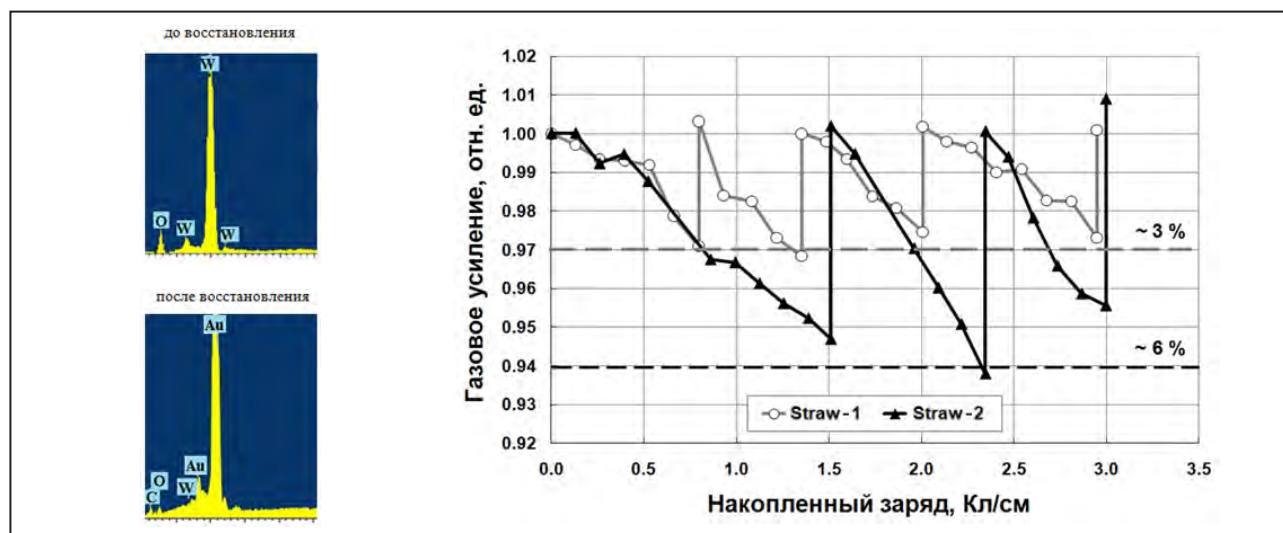
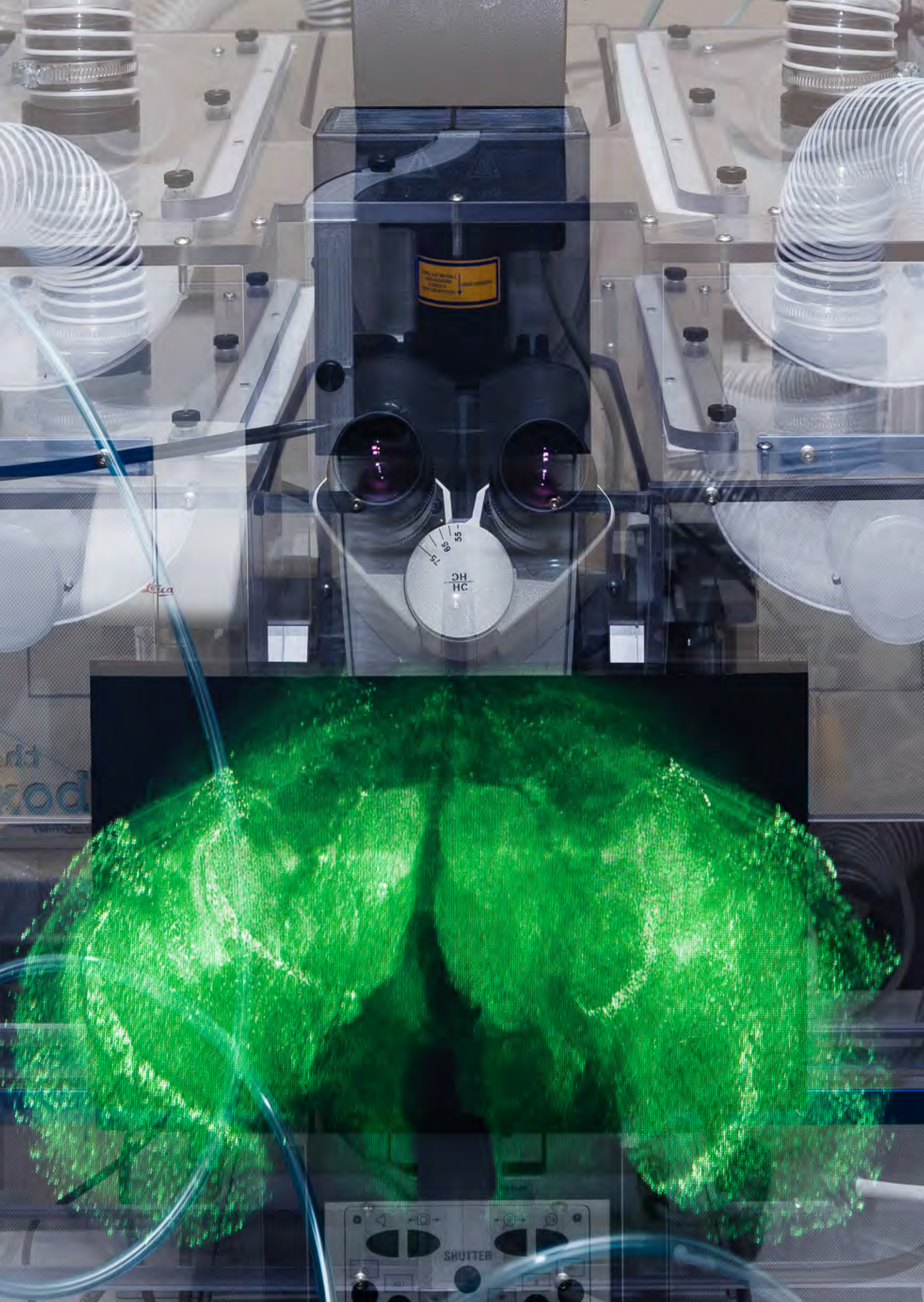


Рис. 2. Слева – результаты ХЕМ-анализа поверхностей анодных проволочек: состаренной из-за распухания в смеси 60 % Ag + 30 % CO₂ + 10 % CF₄ (сверху); трижды состаренной и трижды очищенной путем травления в смеси 80 % CF₄ + 20 % CO₂ от соединений вольфрама (снизу). Справа – зависимость газового усиления от накопленного заряда на единицу длины проволочки при многократном старении – восстановлении двух счетчиков, Straw-1 и Straw-2



Bitte nicht berühren!
Bitte nicht berühren!
Bitte nicht berühren!

Leica

75 80 85
DH
HC

SHUTTER

Молекулярная и радиационная биофизика

- 86 Структура бактериальной рибосомы с разрешением менее 3 Å, полученная методом криоэлектронной микроскопии
- 87 Секвенирование, биохимические свойства, кристаллическая структура и молекулярная динамика целлобиогидролазы Cel7A из *Geotrichum candidum* 3C
- 88 BASP1 – белок аксонных окончаний, образующий амилоидоподобные олигомеры
- 89 Исследование филамента RecA *Deinococcus radiodurans* в одномолекулярном эксперименте при помощи оптического захвата
- 90 Специфичность дигидроуридинсинтаз, определяющаяся переориентацией тРНК
- 91 AquaBridge – новый метод для систематического поиска молекул структурной воды в активных центрах белков
- 92 Ионизирующая радиация улучшает глиомаспецифическое связывание суперпарамагнитных наночастиц на основе оксида железа с пришитыми моноклональными антителами cmHsp70.1 (SPION–cmHsp70.1)

Структура бактериальной рибосомы с разрешением менее 3 Å, полученная методом криоэлектронной микроскопии

А. Л. Коневега

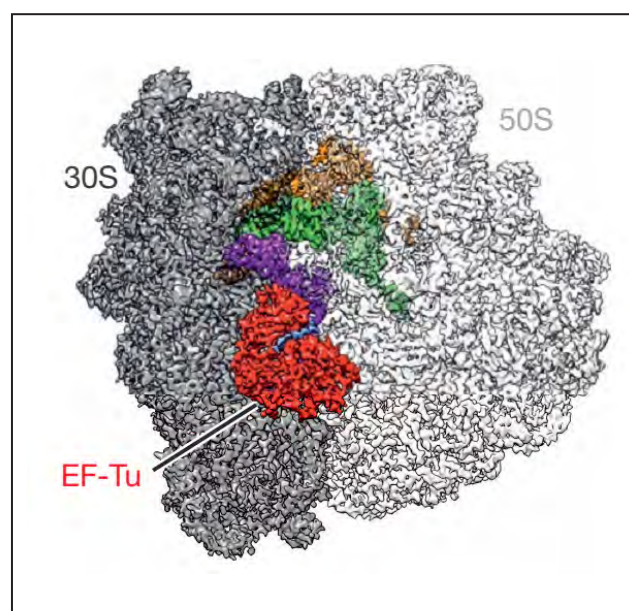
Отделение молекулярной и радиационной биофизики
ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Рибосома – это сложный макромолекулярный комплекс, состоящий из нескольких десятков молекул белков и рибонуклеиновых кислот. В клетках всех живых организмов рибосомы осуществляют важнейшую функцию – синтез белковых молекул согласно генетической информации, записанной в матричной РНК (мРНК). Расшифровка пространственной структуры рибосом была признана важнейшим результатом и отмечена Нобелевской премией по химии 2009 г.

Бактериальные рибосомы являются мишенью для действия более 50 % используемых в терапии антибиотиков – специфических ингибиторов биосинтеза белка. В связи с появлением бактериальных штаммов, обладающих устойчивостью к существующим антибиотикам и представляющих угрозу национальной (и мировой) безопасности в сфере здравоохранения и здоровья нации, изучение рибосом является одной из важнейших задач современной биомедицины.

В 2015 г. группе исследователей из Германии и России впервые удалось превзойти результаты, полученные рентгеновской кристаллографией. С помощью метода криоэлектронной микроскопии были получены пространственные структуры рибосомных комплексов с разрешением менее 3 Å. Используя новые, оптимизированные методы получения функциональных рибосомных комплексов и способы сортировки микроизображений,

исследователи получили наиболее точную и полную модель бактериальной рибосомы в комплексе с элонгационным фактором EF-Tu, остановленную антибиотиком кирромицином в процессе декодирования (чтения) мРНК (рис.). Впервые в мире получена структура рибосом, включающая структуры всех 35 модифицированных оснований рибосомальной РНК.



Структура комплекса рибосомы (серый) с белковым фактором EF-Tu (красный), антибиотиком кирромицином (голубой), Phe-tRNA^{Phe} в A/T-состоянии (фиолетовый), fMet-tRNA^{fMet} в P-сайте (зеленый) и tRNA^{fMet} в E-сайте (оранжевый)

Секвенирование, биохимические свойства, кристаллическая структура и молекулярная динамика целлюбиогидролазы Cel7A из *Geotrichum candidum* ЗС

К. С. Бобров, А. С. Борисова, Ф. М. Ибатуллин, А. А. Кульминская, Е. В. Энейская – Отделение молекулярной и радиационной биофизики ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»
 А. С. Борисова, У. Салеев, М. Сандгарен, Й. Сталберг – Шведский университет сельскохозяйственных наук; С. Йана, К. М. Пэйн – Университет Кентукки
 А. Логачев, Д. Е. Полев – Санкт-Петербургский государственный университет
 А. Л. Липидус – Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет РАН
 А. А. Кульминская – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аскомицет *Geotrichum candidum* – универсальный эффективный гриб распада, участвующий, например, в биодegradации компакт-дисков. В частности, штамм ЗС гидролизует фильтровальную бумагу и хлопок более эффективно, чем несколько известных препаратов промышленных ферментов. Гликозид-гидролазы из семейства 7 (целлюбиогидролазы) – основные составляющие промышленных коктейлей целлюлаз, используемых в конверсии целлюлозной биомассы. Представлена комплексная характеристика целлюбиогидролазы, секретируемой аскомицетом *G. candidum* (GsaCel7A). Двудоменная целлюлаза состоит из целлюлозосвязывающего модуля (Cellulose Binding Module – CBM), относящегося к семейству 1 CBM, пептидного линкера и каталитического домена, аминокислотная последовательность которого идентична на 64 % широко используемой в биотехнологии целлюбиогидролазе из *Hydrocrea jecorina* (HjeCel7A). GsaCel7A способна расщеплять целлюлозу «Авицел», демонстрируя повышенную устойчивость к ингибированию

продуктом, но более низкий температурный оптимум по сравнению с HjeCel7A (50 °C против 60–65 °C соответственно).

Анализ пяти кристаллических структур (с комплексами с различными тиоолигосахаридами и без них) выявил конформационные различия петель, находящихся в области входа в полость связывания субстрата в активном центре фермента, включая форму с частичной дестабилизацией в районе тоннеля у субсайта –4 (рис. 1, 2).

Сравнительный анализ структур GsaCel7A продемонстрировал большую гибкость петель, чем у петель, обнаруженных в структурах HjeCel7A, что предполагалось из разницы последовательностей аминокислотных остатков этих белков. Результаты исследований молекулярной динамики флуктуаций GsaCel7A позволяют предположить более высокий уровень процессивности субстрата и низкую вероятность инициирования эндопроцесса гидролиза целлюлозы (также это происходит и у фермента HjeCel7A).

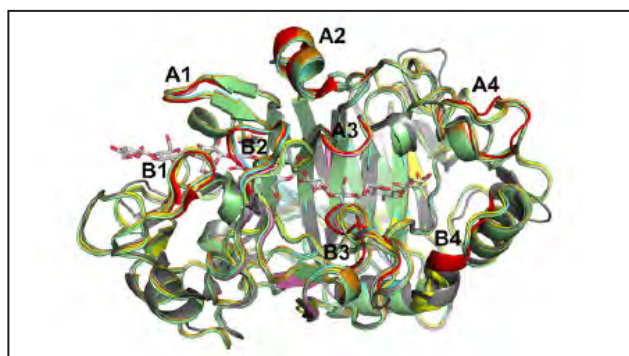


Рис. 1. Сопоставление пяти кристаллических структур GsaCel7A с комплексом HjeCel7A с целлюлозоолигомером (PDB 4C4C)

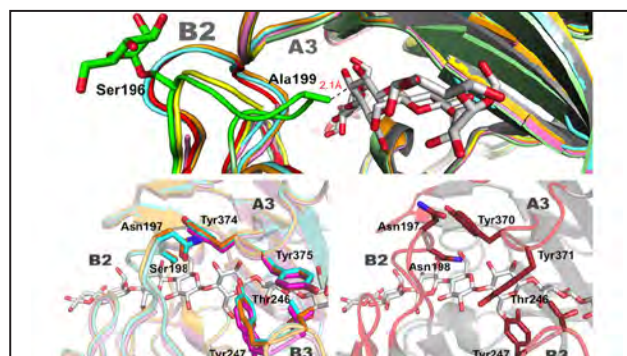


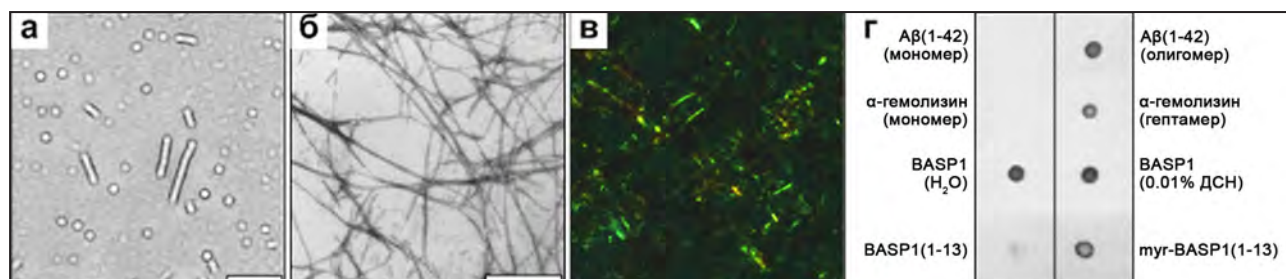
Рис. 2. Конформации и взаимодействие основных петель B2, закрывающих целлюлозосвязывающий тоннель для белков GsaCel7A и HjeCel7A

BASP1 – белок аксонных окончаний, образующий амилоидоподобные олигомеры

О. С. Витюк, Н. Я. Гильяно, В. В. Захаров
Отделение молекулярной и радиационной биофизики
ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Обширная группа конформационных заболеваний человека, называемых амилоидозами, сопровождается образованием и накоплением в организме агрегатов (фибриллярных и олигомерных) амилоидных белков, обладающих токсическими свойствами. С другой стороны, было показано, что агрегаты амилоидных белков обладают рядом физиологических функций. Амилоидоподобные агрегаты, не связанные с патологическими процессами, довольно широко распространены в природе. Белок мозга BASP1, являющийся критически важным для жизнедеятельности организма, способен образовывать олигомеры *in vitro* в присутствии кислых фосфолипидных мембран или додецилсульфата натрия и фибриллоподобные агрегаты (рис. а). Были исследованы амилоидные свойства агрегатов белка BASP1, а также вопрос об их токсичности и присутствии на пресинаптической мембране нейронов мозга крысы. *N*-концевой миристилированный пептид myr-BASP1(1–13), определенный как участок, ответственный за агрегацию белка,

легко образует фибриллы амилоидной структуры *in vitro* (рис. б). Это было подтверждено появлением двулучепреломления у красителя конго красного (рис. в) и усилением флуоресценции Тиофлавина Т при их взаимодействии с фибриллами пептида. С помощью метода дот-блотов с применением конформационно-специфических антител к амилоидным олигомерам (тип А11) показано, что олигомеры BASP1 обладают сходной структурой с олигомерами амилоидных белков (рис. г). С помощью сшивки глутаровым альдегидом удалось зафиксировать нативные белковые комплексы на пресинаптической мембране нейронов мозга крысы и продемонстрировать присутствие на ней белка BASP1 в виде олигомеров. Олигомеры BASP1 не проявляют токсичности по отношению к клеткам PC12. Полученные данные говорят о том, что олигомеры BASP1 представляют собой непатологическую функциональную форму данного белка в мозге, предполагаемой функцией которой является секвестрирование мембранного фосфатидилинозитол-4,5-дифосфата.



Электронная микрофотография олигомеров и фибриллоподобных агрегатов белка BASP1, масштабная шкала 100 нм (а).
Электронная микрофотография фибрилл пептида myr-BASP1(1–13), масштабная шкала 500 нм (б).
Двулучепреломление конго красного в присутствии фибрилл myr-BASP1(1–13) (в).
Взаимодействие конформационно-специфических антител А11 с мономерами и олигомерами белков на дот-блоте (г)

Исследование филамента RecA *Deinococcus radiodurans* в одномолекулярном эксперименте при помощи оптического захвата

Д. М. Байтин – Отделение молекулярной и радиационной биофизики
ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

А. А. Алексеев, А. Д. Ведяйкин, О. Д. Ковалева, Н. Е. Морозова,

Г. Е. Побегалов, А. В. Сабанцев, М. А. Ходорковский, Г. А. Череватенко –

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Микроорганизм *Deinococcus radiodurans* способен выдерживать экстремальные дозы ионизирующей радиации благодаря эффективному механизму репарации ДНК, способному справиться с сотнями двунитовых разрывов. Белок RecA – центральное звено гомологичной рекомбинации у бактерий – является одним из ключевых компонентов рекомбинационной репарации. Для репарации двунитовых разрывов ДНК необходимы взаимодействие RecA с ДНК и образование нуклеопротеинового комплекса, представляющего собой спиральный филамент. Белок RecA из *Escherichia coli* (EcRecA) и его взаимодействие с ДНК интенсивно исследуются с помощью различных подходов, включая одномолекулярную технику, тогда как RecA из *D. radiodurans* (DrRecA) изучен гораздо меньше. Проведено исследование ассоциации DrRecA к длинной двунитовой ДНК фага λ в одномолекулярном эксперименте с помощью оптического пинцета и измерение механических свойств полученного филамента при физиологическом значении pH. DrRecA образует комплексы с двухцепочечной ДНК намного быстрее при условии, что филамент DrRecA проявляет несколько меньшую

длину и большую гибкость по сравнению с EcRecA. Нелинейные участки кривой на графике ассоциации к ДНК белков DrRecA и EcRecA указывают на то, что во время сборки филамента происходят множественные события нуклеации. Так, например, в случае с DrRecA сборка филамента на некоторых участках кривой была примерно в пять раз быстрее, чем в случае EcRecA. Кроме того, относительное увеличение контурной длины ДНК в случае DrRecA было воспроизводимо меньше по сравнению с EcRecA: $45,8 \pm 0,5 \%$ и $48,3 \pm 1,2 \%$ соответственно. В случае с филаментом EcRecA определены значения зависимости длины ДНК от ее натяжения $P = 960 \pm 120$ нм. Анализ филамента DrRecA выявил заметно более низкие значения персистентной длины, $P = 690 \pm 90$ нм, по сравнению с EcRecA. Полученные наблюдения указывают на присутствие разного числа разрывов в филаментах обоих белков или разного количества кластеров. Такое различие является результатом изменения в соотношении между событиями нуклеации филамента на ДНК и фазой последующего роста, или элонгацией.

Специфичность дигидроуридинсинтаз, определяющаяся переориентацией тРНК

П. С. Касацкий, А. Л. Коневега

Отделение молекулярной и радиационной биофизики

ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Характерной особенностью молекул тРНК является наличие большого количества модифицированных нуклеотидов. Все модификации нуклеотидов тРНК являются посттранскрипционными, возникающими в процессе созревания первичного транскрипта тРНК. Один из наиболее распространенных модифицированных нуклеотидов – дигидроуридин – образуется восстановлением двойной связи C5–C6 в молекуле уридина. Дигидроуридины расположены в определенных положениях D-петли тРНК и играют существенную роль в регуляции конформационной жесткости молекулы тРНК. Формирование дигидроуридина в тРНК катализируется классом ферментов, известных как дигидроуридинсинтазы. В *Escherichia coli* обнаружены три фермента класса дигидроуридинсинтаз (DusA, DusB и DusC).

Повышенный уровень дигидроуридинирования тРНК в эукариотических клетках ассоциирован с развитием некоторых видов рака, в т. ч. немелкоклеточного рака легких. Таким образом, для разработки потенциальных противоопухолевых препаратов, действующих на модифицирующие ферменты, необходимо детальное изучение молекулярного механизма действия дигидроуридинсинтаз.

Изучение молекулярного механизма функционирования дигидроуридинсинтаз проводилось с использованием как структурных методов (рентгеновская кристаллография), так и функциональных исследований, включая биохимические и биофизические методы, применяемые группой

исследователей из России, Великобритании и Германии.

Поскольку каталитический центр всех ферментов Dus строго консервативен, возникает вопрос, как одна и та же упаковка белка может перепрограммироваться таким образом, чтобы гарантировать взаимодействие нуклеотидов, расположенных в пространственно разнесенных участках молекулы тРНК, с одним и тем же каталитически активным центром. Рентгеноструктурный анализ комплексов дигидроуридинсинтаз с тРНК^{Phe} и тРНК^{Trp} неожиданно показал, что подсемейства Dus, которые избирательно модифицируют U16 или U20 в тРНК, принимают идентичные конформации, но связывают соответствующие субстраты тРНК в совершенно разных ориентациях, которые отличаются на 160°. Ориентация тРНК, по-видимому, определяется наличием специфичных кластеров аминокислот и различиями в форме положительно заряженных тРНК-связывающих поверхностей белка. Дополнительное позиционирование тРНК обусловлено различиями в C-терминальных распознающих доменах. Таким образом, изящная субстратная специфичность ферментов класса Dus контролируется относительно простым механизмом, предусматривающим переориентацию всей молекулы тРНК. Такое перепрограммирование ферментативной специфичности можно назвать уникальным эволюционным решением для изменения распознавания тРНК одной и той же упаковкой белка.

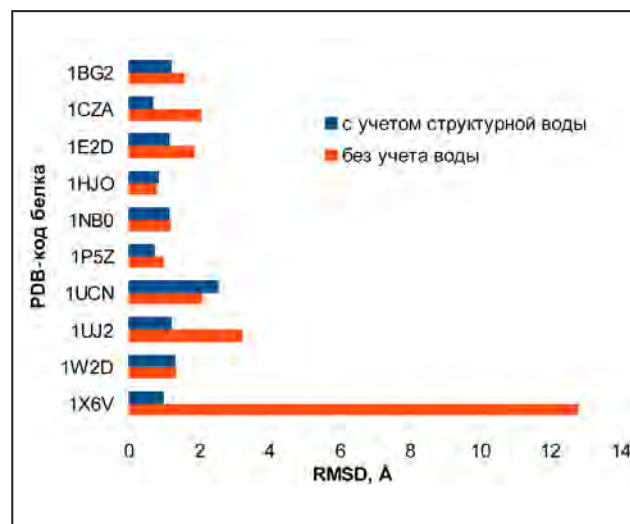
AquaBridge – новый метод для систематического поиска молекул структурной воды в активных центрах белков

А. С. Афанасьева, М. Г. Петухов – Отделение молекулярной и радиационной биофизики
ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»
С. А. Измайлов – Санкт-Петербургский государственный университет
М. Ю. Григорьев – Университет Поля Сабатье

Глобулярные белки обычно функционируют в водном окружении, и поэтому вода играет определяющую роль не только в поддержании стабильности свернутых биологически активных форм этих белков, но и часто непосредственно участвует в катализируемых этими белками химических реакциях, например реакциях гидролиза АТФ – основного энергетического источника для жизнедеятельности клетки. В частности, довольно часто молекулы воды наблюдаются в активных центрах белков в их кристаллических формах, причем как в случае отсутствия, так и в случае присутствия лигандов. Из-за сложности учета этого явления при конструировании и докинге лигандов стандартной является сложившаяся практика удаления всей структурной воды из кристаллографических данных белков. Имеются основания предполагать, что в силу различных технических причин в кристаллографических данных даже высокого разрешения структурная вода представлена не полностью.

Для того чтобы прояснить этот вопрос, а также исследовать возможное влияние учета структурной воды на эффективность современных алгоритмов докинга и конструирования лигандов в активных центрах белков, был разработан новый метод поиска всех возможных конформаций структурной воды в активных центрах (АЦ) белков – AquaBridge. Метод был реализован в виде утилиты AquaBridge, предназначенной для использования в коммерчески доступном программном пакете молекулярного моделирования ICM-Pro.

Эффективность работы процедуры была исследована различными методами, в т. ч. с помощью моделирования молекулярной динамики нескольких белковых систем из составленного репрезентативного набора, а также на примере докинга небольших лигандов в АЦ белков. Анализ эффективности докинга небольших органических молекул в АЦ исследуемых белков свидетельствует о значительном улучшении селективности алгоритма докинга и повышении точности предсказания конформации лигандов в случае учета структурной воды в АЦ белка (рис).



Значения среднеквадратичного отклонения (RMSD) для результатов докинга АТФ и их экспериментальных конформаций в АЦ репрезентативного набора АТФ-связывающих белков

Ионизирующая радиация улучшает глиомаспецифическое связывание суперпарамагнитных наночастиц на основе оксида железа с пришитыми моноклональными антителами cmHsp70.1 (SPION–cmHsp70.1)

В. А. Рыжов – Отделение молекулярной и радиационной биофизики
ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Я. Ю. Марченко, Б. П. Николаев, Л. Ю. Яковлева – ГосНИИ особо чистых биопрепаратов ФМБА России

М. А. Пар, В. И. Ролих – Санкт-Петербургский государственный университет

Г. Милхофф, М. А. Шевцов – Технический университет Мюнхена

А. Л. Михрина – Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова РАН

А. В. Добродумов – Институт высокомолекулярных соединений РАН

И. Питкин – Университет Пенсильвании

Известно, что стресс-индуцибельный белок теплового шока Hsp70 (72 кДа) экспрессируется на мембране агрессивных опухолевых клеток, включая чистые глиомы, но отсутствует на соответствующих нормальных клетках. Мембранный Hsp70 (mHsp70) быстро встраивается в опухолевые клетки, и связывание с ним может обеспечить многообещающую стратегию для ранней диагностики и лечения. Суперпарамагнитные наночастицы (НЧ) на основе оксидов железа (SPIONs) обеспечивают в магнитно-резонансной томографии (МРТ) негативный контраст, что используется для диагностики опухолей. В данном случае использовался конъюгат SPIONs-НЧ с пришитыми к нему Hsp70-специфическими антителами (cmHsp70.1) для исследования его адресной доставки в опухоль до и после облучения ионизирующей радиацией.

Эксперименты *in vitro* показали избирательное связывание SPION–cmHsp70.1 со свободным mHsp70 в различных типах опухолевых клеток (глиобластома C6, лейкемия K562, карцинома HeLa), зависящее от дозы. МРТ (11Т) высокого разрешения показала на T_2 -взвешенных изображениях накопление конъюгата в C6-модели глиомы (рис. 1), что привело к почти двукратному падению величин T_2^* по сравнению со SPIONs. Анализ биораспределения проводился путем измерений

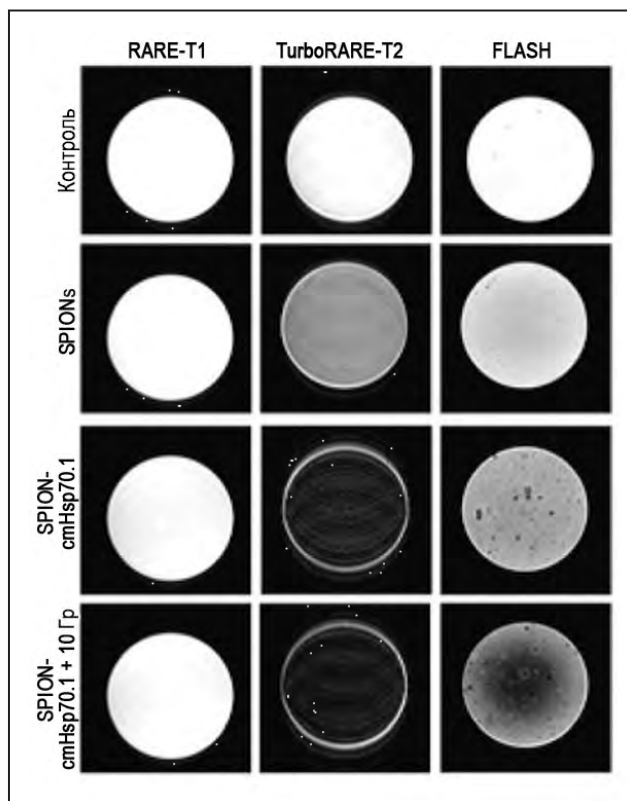


Рис. 1. T_1 -, T_2 -взвешенные и FLASH (градиент-эхо) МР-сканы клеток глиобластомы C6 в 0,1 %-ном агарозном геле. Изображения были получены для контроля клеток, инкубированных с конъюгатом SPIONs и SPION–cmHsp70.1, в последнем случае также для облученных клеток (10 Гр)

второй гармоники нелинейного отклика на слабое ac магнитное поле в параллельном ему dc поле H ($NLR-M_2$) и показал семикратное увеличение отношения «опухоль/ткань» мозга для НЧ-конъюгата в сравнении со SPIONs у крыс, больных глиомой (рис. 2). Это отношение возросло еще в четыре раза после облучения больных крыс однократной

дозой (10 Гр). Увеличение накопления конъюгата в опухоли, благодаря радиосенсибилизации, доказывает важность применения радиотерапии вместе с Hsp70-связывающими агентами в антиопухолевой диагностике и/или в терапевтическом лечении опухоли мозга. Получены также данные по биораспределению конъюгата в других тканях и органах.

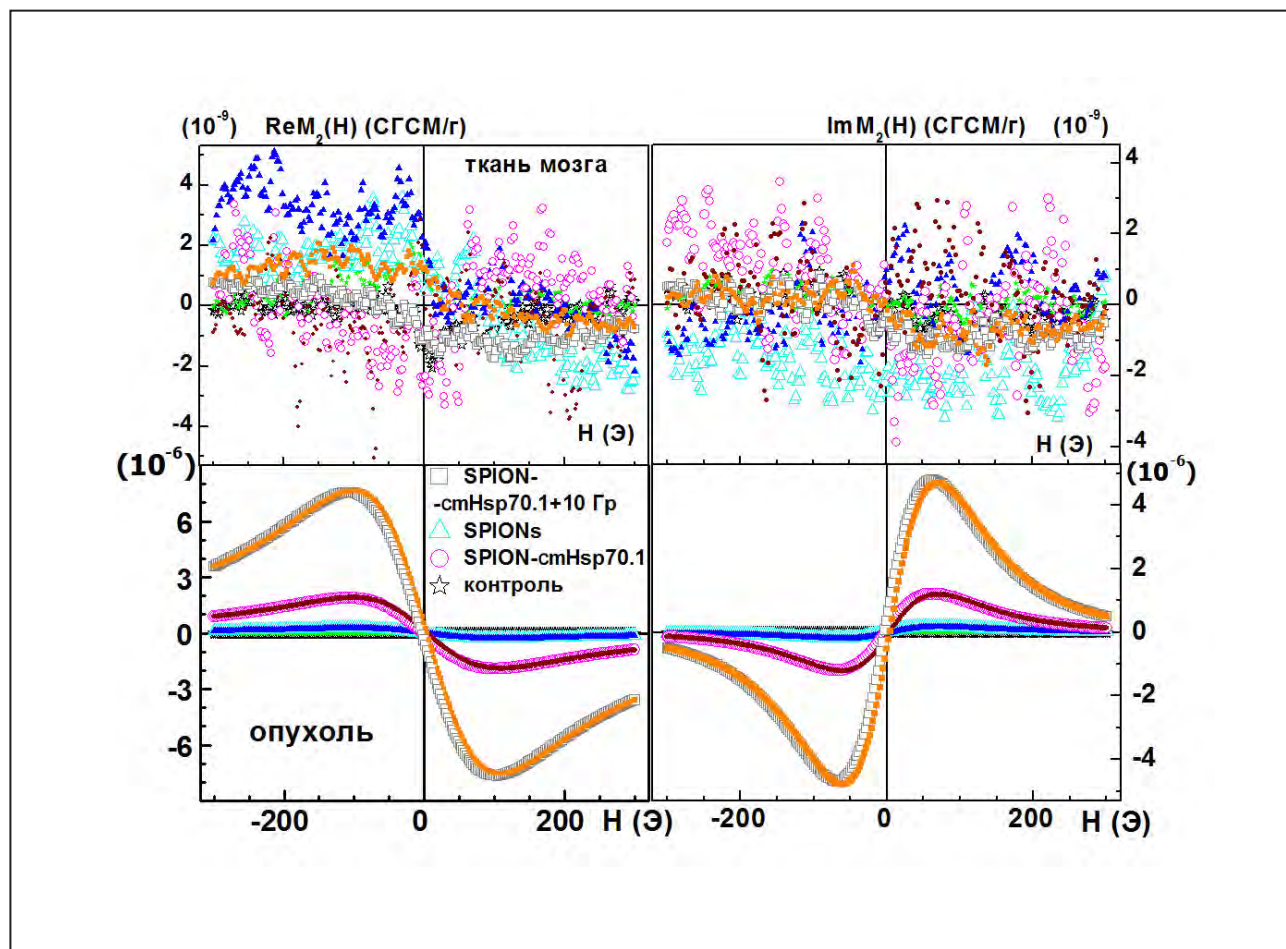
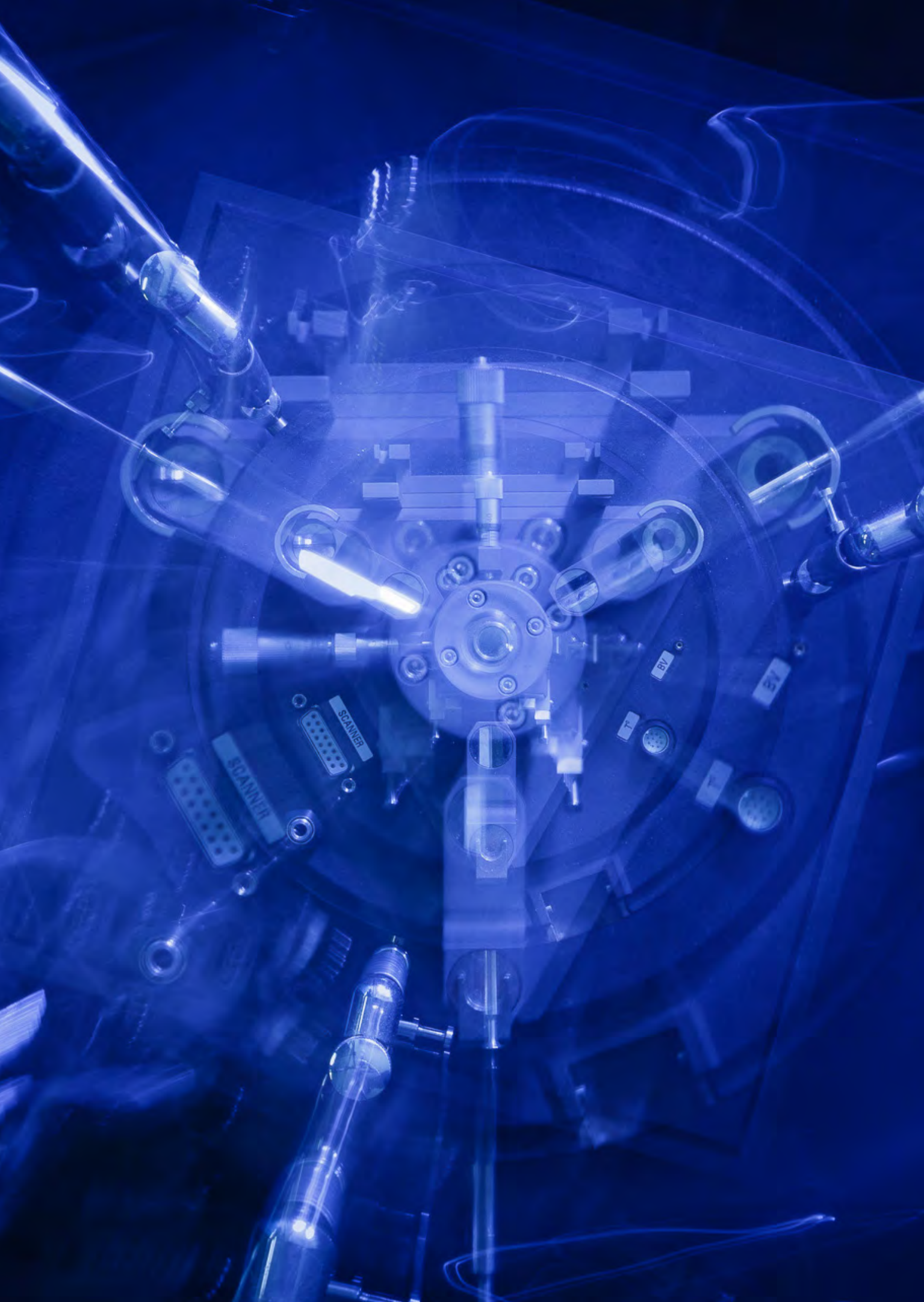


Рис. 2. Биораспределение НЧ в ткани мозга и опухоли необлученных крыс, инъектированных SPIONs, SPION–cmHsp70.1, и облученных животных (10 Гр), инъектированных конъюгатом



Ядерная медицина (производство изотопов, лучевая терапия, био- и нанотехнологии для медицины)

- 96 Предшественник НАД рибозид никотиновой кислоты: биосинтез, выход и вход в клетки у человека
- 97 Обратная корреляция уровня олигомеров белка альфа-синуклеина с активностью глюкоцереброзидазы в крови у пациентов с болезнью Гоше
- 98 Исследование однослойных везикул в водных растворах сахарозы
- 99 Характеризация наносистем для транспорта лекарств
- 100 Необходимость уточнения относительной биологической эффективности протонов
- 101 Разработка мишеней для получения радионуклидов ^{82}Sr , ^{223}Ra , ^{224}Ra на радиоизотопном комплексе РИЦ-80

Предшественник NAD рибозид никотиновой кислоты: биосинтез, выход и вход в клетки у человека

К. А. Шабалин, А. П. Якимов – Отделение молекулярной и радиационной биофизики
ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

В. А. Куликова, К. Б. Неринковский, А. А. Никифоров, М. А. Ходорковский, К. А. Шабалин,
А. П. Якимов – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
К. Б. Неринковский – Санкт-Петербургский государственный университет

А. А. Никифоров – Институт цитологии РАН

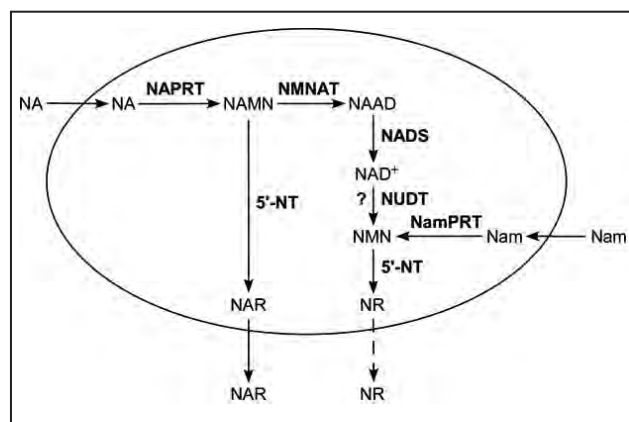
К. Долле, М. Нир, М. Циглер – Бергенский университет

М. Мизгад, Ф. Реднач – Королевский университет Белфаста

Никотинамидадениндинуклеотид (NAD) – важнейший кофактор окислительно-восстановительных реакций ключевых метаболических путей. Помимо этого, NAD является субстратом для нескольких семейств регуляторных белков: деацетилаз белков сиртуинов, АДФ-рибозилтрансфераз и поли-АДФ-рибозилполимераз, которые регулируют такие жизненно необходимые процессы, как экспрессия генов, репарация ДНК, апоптоз, секреция инсулина и многие другие. Для эффективного осуществления NAD-зависимых метаболических и сигнальных функций клетке необходимо постоянно поддерживать определенный уровень NAD, а нарушения его регуляции могут быть связаны с развитием таких серьезных патологий, как нейродегенеративные заболевания, диабет и рак.

Основным способом регуляции уровня NAD в клетках человека является его биосинтез из поступающих с пищей предшественников, таких как никотинамид (Nam) и никотиновая кислота (NA) – витамин В3. Также было показано, что рибозид никотинамида (NR) и рибозид никотиновой кислоты (NAR) также являются эффективными предшественниками NAD, однако физиологическая роль данных нуклеозидов изучена недостаточно хорошо.

Установлено, что помимо поступления с пищей нуклеозиды NR и NAR могут образовываться внутри клеток (рис.). Показано, что цитозольные 5'-нуклеотидазы человека CN-II и CN-III дефосфорилируют мононуклеотиды NMN и NAMN с образованием соответствующих нуклеозидов NR и NAR *in vitro*. Более того, выявлено, что синтезированный NAR выходит из клеток человека и выступает в роли предшественника для синтеза NAD в других клетках, не способных метаболизировать Nam и NA.



Механизмы биосинтеза нуклеозидов NR и NAR в клетках человека

Обратная корреляция уровня олигомеров белка альфа-синуклеина с активностью глюкоцереброзидазы в крови у пациентов с болезнью Гоше

А. К. Емельянов, С. Н. Пчелина, Т. С. Усенко – Отделение молекулярной и радиационной биофизики ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Т. М. Букина, Е. Ю. Захарова, Е. П. Нужный, А. Ф. Якимовский – Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова

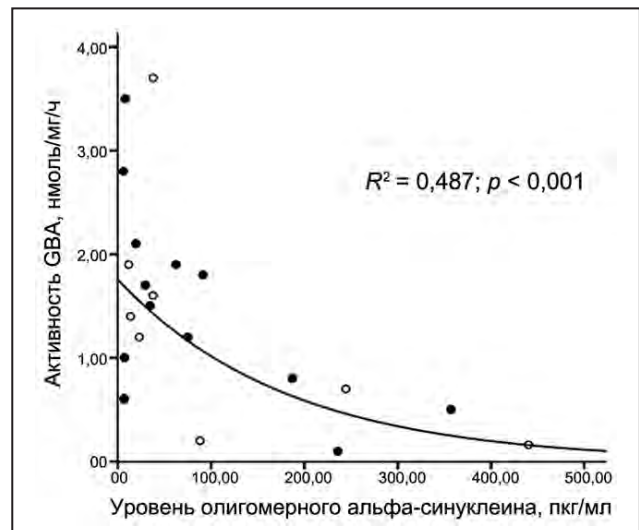
В 2015 г. выполнено исследование по оценке корреляции уровня олигомерных форм белка альфа-синуклеина и активности лизосомного фермента глюкоцереброзидазы (GBA) у пациентов с болезнью Гоше. Наличие двух мутантных аллелей в гене *GBA* является причиной развития редкого наследственного заболевания, относящегося к классу лизосомных болезней накопления, – болезни Гоше. Наличие одного мутантного аллеля в гене *GBA* повышает риск развития болезни Паркинсона (БП) в 6–7 раз. Такой высокий риск развития БП у носителей мутаций в гене *GBA* показан во всех популяциях мира, в т. ч. в России, однако молекулярный механизм высокого риска остается неизвестным. Предположительно мутации в гене *GBA*, приводящие к дисфункции лизосом, могут приводить к накоплению и олигомеризации белка альфа-синуклеина, т. е. способствовать формированию именно тех форм белка, которые являются нейротоксичными и способствуют гибели нейронов при БП.

Исследовался 21 пациент с болезнью Гоше. Уровень олигомерного альфа-синуклеина в плазме крови оценивали методом иммуноферментного анализа с использованием коммерческого набора Human Synuclein OLIGO kit (ajRoboscreen, Германия). Активность GBA оценивали в лейкоцитах крови с использованием флуоресцентно-меченного субстрата (4-methylumbelliferyl- β -D-glucopyranoside (4MU- β -glc), Sigma-Aldrich).

Экспоненциальный корреляционный анализ показал обратную корреляцию уровня олигомеров альфа-синуклеина в плазме и остаточной

активности GBA ($R^2 = 0,487$, $p < 0,001$) (рис.). Это первое сообщение о существовании обратной корреляции между активностью GBA и уровнем олигомерных форм альфа-синуклеина. Полученные данные могут прояснять механизм высокого риска развития БП у носителей мутаций в гене *GBA*. Предположительно для лечения GBA-ассоциированной БП могут быть использованы фармакологические шапероны GBA (например, амброксол, изофагомин). Впервые появилась возможность подойти к лечению одной из форм паркинсонизма.

Исследование поддержано грантами РФФИ № 13-04-01510, № 14-04-31665.



Обратная корреляция активности GBA и уровня олигомерного альфа-синуклеина в плазме крови у пациентов с БП, не получавших лечение ферментозаместительной терапией (белые точки), и у пациентов, принимавших терапию менее пяти лет (черные точки)

Исследование однослойных везикул в водных растворах сахарозы

В. Л. Аксенов – ФГБУ «ПНИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»
М. А. Киселев – Объединенный институт ядерных исследований

Развитие рынка нанолечарств и их переносчиков требует развития адекватных методов для их диагностики, в т. ч. методов исследования везикулярных систем из фосфолипидов, используемых как транспортные лекарственные системы. Методы малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) и рентгеновского синхротронного излучения являются основными методами исследования структуры везикулярных систем. Применение малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) требует увеличения контраста между липидным бислоем и водной средой. Дисахариды стабилизируют липидный бислой. Везикулы, приготовленные в водных растворах дисахаридов, полностью сохраняют свои свойства после лиофилизации и последующей гидратации. Это свойство дисахаридов (мальтозы) используется при изготовлении фосфолипидной транспортной наносистемы, применяемой как контейнер для лекарств (НИИ биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича РАМН – ИБМХ). Дисахариды (сахароза и мальтоза) существенно (в десятки раз) увеличивают контраст в экспериментах методом

МУРР на однослойных везикулах фосфолипидов. При этом вопрос о влиянии дисахаридов на структуру липидного бислоя оставался открытым. Исследовано влияние сахарозы на структуру однослойных везикул димиристоил фосфатидилхолина (ДМФХ) методами МУРН и МУРР.

Для анализа данных МУРН использован метод разделенных формфакторов. Показано, что увеличение концентрации сахарозы приводит к существенному уменьшению среднего радиуса везикул и толщины бислоя, а также к незначительному снижению полидисперсности популяции.

Результаты показаны в таблице, где $\langle R \rangle$ – средний радиус везикулы, m – коэффициент полидисперсности (параметры подгонки); толщина мембраны d и толщина гидрофобной области D – свободные параметры; ρ_0 – плотность длины рассеяния.

Используемые методы открывают возможность характеристики наносистем для транспорта лекарств.

Таблица. Параметры 1 %-ной (w/w) популяции везикул ДМФХ в водных (D₂O) растворах сахарозы*

Концентрация сахарозы, %	$\langle R \rangle$, Å	m	σ , %	d , Å	D , Å	χ^2	ρ_0 , см ⁻²
0	307,5 ± 4,9	9,8 ± 0,8	30,4	49,8 ± 0,8	16,5 ± 1,7	1,1	6,37 · 10 ¹⁰
5	270,6 ± 4,8	9,7 ± 0,9	30,7	48,1 ± 2,1	19,9 ± 2,9	6,9	6,11 · 10 ¹⁰
10	243,5 ± 3,2	12,8 ± 0,8	26,9	47,6 ± 1,9	23,0 ± 3,1	6,6	5,85 · 10 ¹⁰
20	213,4 ± 2,2	13,7 ± 0,5	26,1	44,5 ± 2,1	25,1 ± 2,8	9,5	5,33 · 10 ¹⁰
40	190,6 ± 1,6	13,2 ± 0,7	26,5	34,8 ± 0,6	27,2 ± 1,3	0,7	10,94 · 10 ¹²

* Концентрация сахарозы 0–20 % (эксперимент МУРН). В последней строке даны результаты фитирования МУРР-спектра для случая 40 %-ной концентрации сахарозы в H₂O.

Характеризация наносистем для транспорта лекарств

В. Л. Аксенов – ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

М. А. Киселев – Объединенный институт ядерных исследований

Методом малоуглового рассеяния рентгеновских лучей на синхротроне НИЦ КИ впервые исследована морфология фосфолипидной транспортной наносистемы (ФТНС) (рис. 1), разработанной в ИБМХ. Доказано, что ФТНС является везикулярной (рис. 2), а не мицеллярной системой. Показано, что для концентрации ФТНС в воде 25 % (5 % – фосфолипиды, 20 % – мальтоза, 75 % – вода) средний радиус фосфолипидной транспортной наносистемы $R_{\text{ФТНС}} = 160 \pm 2 \text{ \AA}$ и толщина липидного бислоя $d = 43,5 \pm 0,5 \text{ \AA}$.

Соевые фосфолипиды являются сложной многокомпонентной системой (пять различных насыщенных и ненасыщенных фосфолипидов с различной длиной углеводородного хвоста) (рис. 3). Экспериментально доказана возможность определения структурных параметров везикул, образованных

из соевых фосфолипидов. Представленные результаты открывают новое направление исследования нанолекарств на нейтронных и синхротронных источниках. При этом синхротронные эксперименты позволяют исследовать нанолекарства при фармацевтических концентрациях.

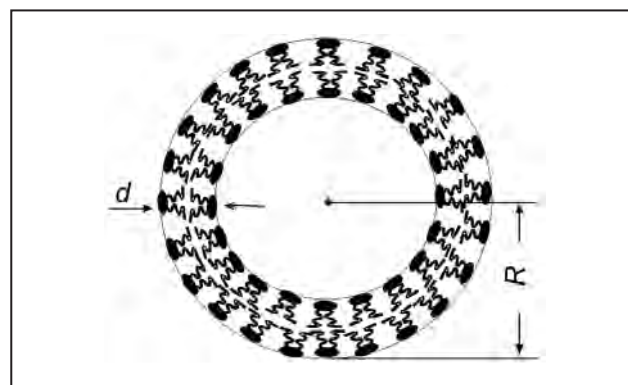


Рис. 2. Структура везикулы ФТНС

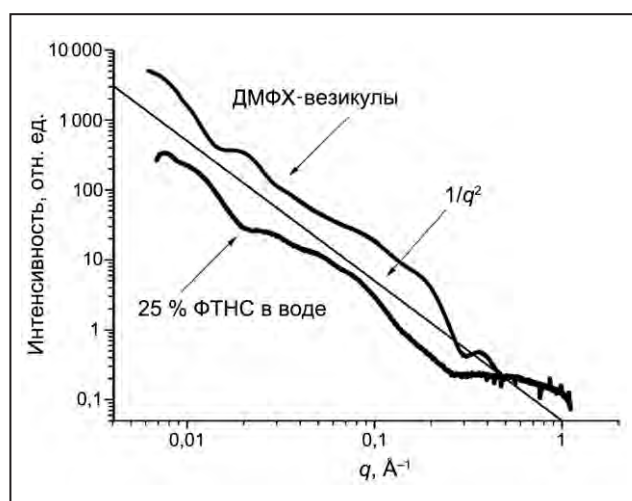


Рис. 1. Синхротронные спектры малоуглового рассеяния рентгеновских лучей от экстрадированных везикул димиристоил фосфатидилхолина (ДМФХ) и ФТНС

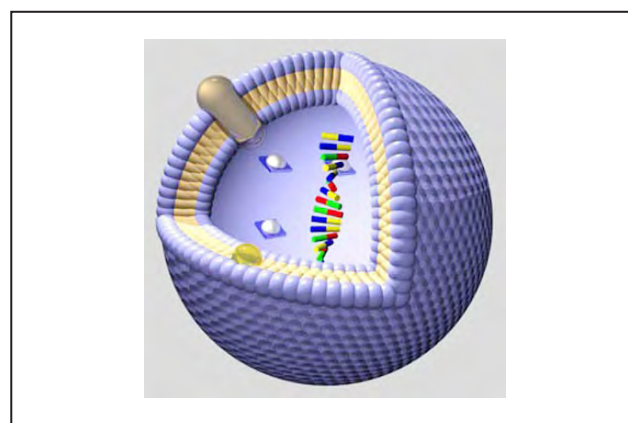


Рис. 3. Структура нанолекарства на основе фосфолипидной транспортной системы, в которую встроены молекулы водорастворимых (водный объем внутри везикулы) и водонерастворимых (липидный бислой) лекарств

Необходимость уточнения относительной биологической эффективности протонов

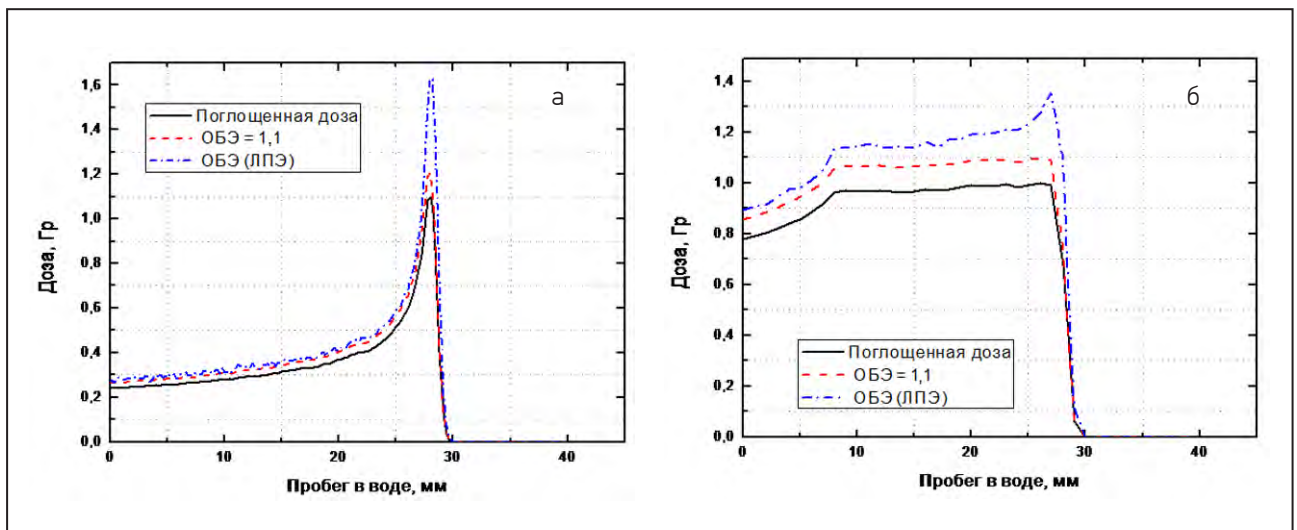
Н. А. Иванов, Ж. С. Лебедева

Отделение перспективных разработок ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Созданная программа расчета системы формирования протонного пучка на циклотроне Ц-80 ПИАФ НИЦ КИ может быть применена и при создании модифицированной кривой Брэгга (МКБ) для биологической дозы. Проведено исследование проблемы перехода от поглощенной дозы к биологической. В клинической практике для протонов с энергиями 0–200 МэВ принято использовать постоянную величину относительной биологической эффективности (ОБЭ), равную 1,1. Однако многочисленные радиобиологические эксперименты свидетельствуют об увеличении ОБЭ с уменьшением энергии протонов. Результаты расчета биологической дозы для клинической практики (ОБЭ = 1,1) на основе феноменологической модели зависимости ОБЭ от линейной передачи энергии (ЛПЭ) приведены на рисунке.

Отмечается значительное повышение биологического эффекта в дистальной части МКБ, что может приводить к переоблучению расположенных за объемом облучения критических структур.

Полученные результаты показывают, что имеющиеся данные для перехода от поглощенной дозы к биологической не являются достаточно точными для применения в клинической практике, а пробел в понимании биологического эффекта, производимого протонами, не дает реализовать потенциал метода протонной терапии в полной мере. В связи с этим представляется необходимым проведение дополнительных экспериментальных и теоретических исследований в данной области.



Пик Брэгга для протонов с энергией 60 МэВ (а); МКБ (б)

Разработка мишеней для получения радионуклидов ^{82}Sr , 223 , ^{224}Ra на радиоизотопном комплексе РИЦ-80

А. Е. Барзах, Л. Х. Батист, Ю. М. Волков, В. С. Иванов, П. Л. Молканов,
Ф. В. Мороз, С. Ю. Орлов, В. Н. Пантелеев, Д. В. Федоров
Отделение физики высоких энергий ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

В ПИАФ НИЦ КИ разработан проект комплекса РИЦ-80, который будет создан на одном из выведенных пучков нового циклотрона Ц-80. Энергия выведенного протонного пучка 40–80 МэВ и интенсивность до 200 мкА обеспечат широкие возможности получения медицинских радионуклидов и радиофармпрепаратов для диагностики и терапии. По своим параметрам и возможностям РИЦ-80 будет соответствовать лучшим зарубежным аналогам. Особенность проекта – использование масс-сепаратора в комбинации с мишенно-ионным устройством для получения ионных пучков радиоизотопов высокой чистоты, что особенно важно для медицинских приложений.

Масс-сепаратор с собственной мишенной станцией будет использоваться для производства сверхчистых пучков медицинских радионуклидов. Уникальные параметры комплекса обеспечат получение ^{68}Ge , ^{82}Sr , ^{111}In , 123 , ^{124}I , 223 , ^{224}Ra , а также других радионуклидов (^{64}Cu , ^{67}Cu , ^{67}Ga , ^{77}Br и ^{81}Rb), рассматривающихся в качестве перспективных кандидатов для диагностики и терапии.

Для первых экспериментов по получению ^{82}Sr , широко применяемого в ПЭТ-диагностике, использовался дикарбид иттрия, спрессованный в виде таблеток. γ -спектр от распада ^{82}Sr , выделенного из мишени при $T = 1\,950\text{--}2\,000\text{ }^\circ\text{C}$, представлен на рис. 1. Очень эффективный метод для лечения злокачественных образований на раннем этапе их формирования – использование α -радиоактивных нуклидов, среди которых изотопы ^{223}Ra и ^{224}Ra . Их можно получать с помощью облучения протонами мишенного вещества на основе U или Th. α -спектры от распада радионуклидов, выделенных из UC-мишенного материала при $T = 2\,400\text{ }^\circ\text{C}$, представлены на рис. 2. Имеется возможность увеличить выходы изотопов Ra более чем на порядок величины, используя в качестве мишенного вещества карбид тория, мишенный материал, который также обладает необходимыми характеристиками для изготовления высокотемпературного мишенного устройства, соединенного с источником поверхностной ионизации масс-сепаратора.

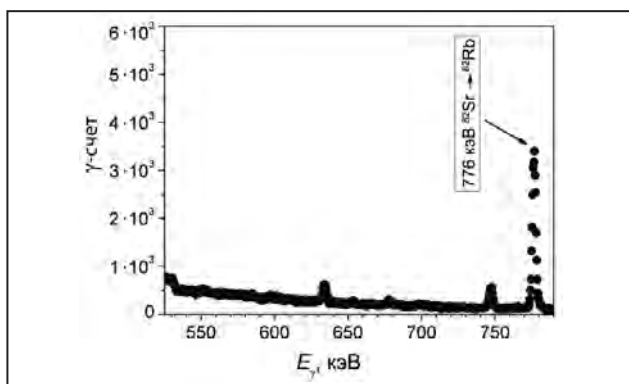


Рис. 1. γ -спектр радиоактивного источника, выделенного на охлаждаемый коллектор в результате нагрева мишени в вакууме до $T = 1\,950\text{--}2\,000\text{ }^\circ\text{C}$. Эффективность выделения выше 90 %

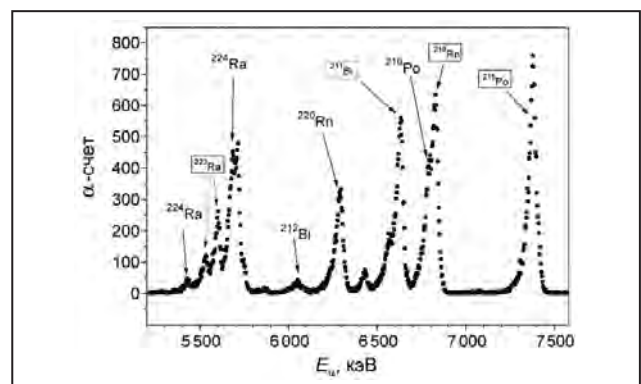


Рис. 2. α -спектр радионуклидов, выделенных из UC-мишени, нагретой в высоком вакууме до $T = 2\,400\text{ }^\circ\text{C}$, на охлаждаемый танталовый коллектор. Прямоугольники – изотопы, принадлежащие цепочке α -распадов ^{223}Ra



Физика ядерных реакторов и ускорителей

- 104 Комплекс расчетов по обоснованию безопасности реактора ПИК
- 105 Возмущения нейтронных потоков в отражателе реактора ПИК
- 106 Определение объемной активности трития в теплоносителях реактора ПИК методом жидкостно-сцинтилляционной радиометрии
- 107 Создание макета проточного анализатора тяжелой воды дополнительной системы безопасности реактора ПИК на базе промышленного БИК фурье-спектрометра
- 108 Новые результаты в исследовании процесса изотопного обмена в системе «вода – водород» на опытно-промышленной установке ЭВИО
- 109 Облучение конструкционных материалов в реакторе ВВР-М

Комплекс расчетов по обоснованию безопасности реактора ПИК

*А. С. Захаров – Отдел физики и техники реакторов; А. В. Коротынский, А. С. Полтавский, В. Н. Тищенко – Управление ядерной и радиационной безопасности
ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»
Е. В. Бурлаков, А. А. Иванов, А. В. Краюшкин и др. –
Курчатовский ядерно-технологический комплекс НИЦ «Курчатовский институт»*

Проведен комплекс расчетов по обоснованию безопасности реактора ПИК в рамках выполнения пункта 7 «Обоснование безопасности эксплуатации реактора ПИК (этап 2)» технического задания на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по теме «Исследования в области научно-технических и методических основ развития ядерных энергетических технологий, топливообеспечения и безопасности ядерной энергетики на 2015 г. и плановый период 2016–2017 гг.», утвержденного приказом НИЦ «Курчатовский институт» от 31.12.2014 № 1965. Составлены и утверждены четыре совместных научно-технических отчета:

- «Уточняющий расчет аварии с полным обесточиванием реакторной установки и аварии с разрывом отводящего трубопровода диаметром 450 мм», в котором определены условия возникновения отрицательных последствий рассмотренных аварийных ситуаций и разработаны рекомендации по техническим и организационным мероприятиям, позволяющим снизить или устранить опасные последствия данных аварийных ситуаций;
- «Расчетный анализ аварийных ситуаций с центральным экспериментальным каналом», где разработана трехмерная модель расчета динамики

активной зоны реактора ПИК для моделирования аварии с обезвоживанием центрального экспериментального канала (ЦЭК), проведены моделирование контура ЦЭК с помощью кода Relap5-mod3 для расчета аварий с нарушением охлаждения, анализ дополнительных отказов, выбор и обоснование рассматриваемых сценариев аварии;

- «Проведение верификационных расчетов по коду Relap5-mod3», в ходе которых выполнены модельные расчеты стационарных, переходных и аварийных режимов реактора ПИК для сравнения с результатами, полученными с использованием кода СОКРАТ/В1;
- «Уточняющий расчет радиационных последствий тяжелой запроектной аварии с плавлением топлива», в котором уточнен сценарий возможных разрушений топлива в запроектной аварии с полным обесточиванием реакторного комплекса, выполнены моделирование транспорта радионуклидов внутри комплекса и определение активности выброса в окружающую среду с оценкой доз при работающей и неработающей вентиляции.

Результаты проведенных расчетов будут использованы при разработке дополнений к отчету по обоснованию безопасности реактора ПИК.

1. Уточняющий расчет аварии с полным обесточиванием реакторной установки и аварии с разрывом отводящего трубопровода диаметром 450 мм. Отчет о НИР, инв. № 110.11-14/15-97. Москва – Гатчина, 2015. 130 с.
2. Расчетный анализ аварийных ситуаций с центральным экспериментальным каналом. Отчет о НИР, инв. № 110.11-14/15-98. Москва – Гатчина, 2015. 127 с.
3. Проведение верификационных расчетов по коду Relap5-mod3. Отчет о НИР, инв. № 110.11-14/15-99. Москва – Гатчина, 2015. 106 с.
4. Уточняющий расчет радиационных последствий тяжелой запроектной аварии с плавлением топлива. Отчет о НИР, инв. № 110.11-14/15-100. Москва – Гатчина, 2015. 66 с.

Возмущения нейтронных потоков в отражателе реактора ПИК

А. Н. Ерыкалов – Отделение теоретической физики
 А. С. Захаров, К. А. Коноплев, И. М. Косолапов – Отдел физики и техники реакторов
 А. С. Полтавский – Управление ядерной и радиационной безопасности
 С. Л. Смольский – Управление эксплуатации ядерных установок
 ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Одним из преимуществ тяжеловодного отражателя является возможность изменения формы и размеров экспериментальных каналов или установка новых устройств. В реакторе ПИК невозможная плотность потока тепловых нейтронов в отражателе достигает $1,3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а в нейтронной ловушке в активной зоне – $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Размещение экспериментальных устройств в отражателе должно учитывать их влияние на нейтронные потоки. Ранее в экспериментах на полномасштабном критическом стенде физической модели реактора ПИК исследовалось влияние конструкции канала на плотность потока тепловых нейтронов в нем и окружающих каналах.

С помощью аттестованного программного средства MCNP исследованы основные факторы возмущения нейтронных потоков в тяжеловодном отражателе для первого варианта (рис. 1) размещаемых каналов. Расчеты выполнены для состояния до и после установки каналов. Увеличение размеров каналов – главный фактор депрессии плотности нейтронного потока в отражателе. Снижение плотности потока тепловых нейтронов на донышках или внутри наиболее крупных каналов достигает 50 %, а в среднем составляет ~ 35 %. Заметным возмущающим фактором является введение водородосодержащих замедлителей внутрь канала.

Каналы также снижают плотность потока тепловых нейтронов в тяжелой воде – пространстве между каналами (рис. 2). Изменение положения поглощающих шторок и выгорание стержней поглотителя вызывает изменение нейтронного потока в отражателе в пределах 10 %.

Рассмотрены возможные подходы и критерии для оценки вклада каждого канала в долю полез-

но потребляемых нейтронов от общего числа генерируемых, учитывающие плотность нейтронного потока, геометрические размеры и назначение канала. Для научной программы на реакторе ПИК наиболее информативным параметром является спектральная яркость канала – дифференциальная характеристика, позволяющая оценить интенсивность выхода нейтронов заданной энергии в единичный телесный угол из горизонтальных каналов для вывода нейтронных пучков.

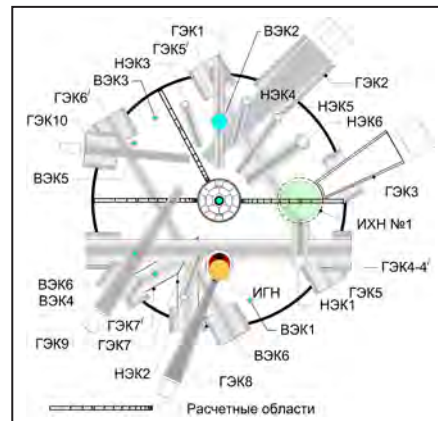


Рис. 1. Направления, выбранные для расчета нейтронных потоков

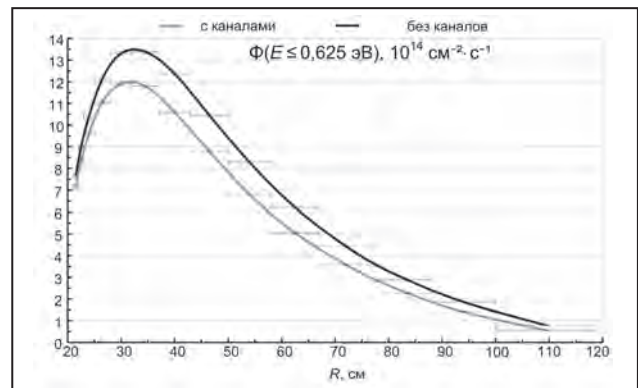


Рис. 2. Радиальное распределение плотности потока тепловых нейтронов в отражателе реактора ПИК

Определение объемной активности трития в теплоносителях реактора ПИК методом жидкостно-сцинтилляционной радиометрии

Т. В. Воронина, Д. Е. Романова, Д. Ю. Тугушева

Управление ядерной и радиационной безопасности ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

На тяжеловодных реакторах объемная активность тяжелой воды может достигать нескольких десятков Ки/л, что приводит к тому, что значительная часть (до 40 %) дозовой нагрузки на персонал обусловлена тритием. По проекту в состав реакторной установки ПИК должно входить два тяжеловодных контура: контур тяжеловодного отражателя (ТВО) и контур жидкостного регулирования. Максимальная объемная активность их теплоносителей не должна превышать 2 Ки/л. Это требует организации надежного контроля теплоносителей и технологических сред реактора ПИК на содержание в них трития. Наиболее чувствительным и точным для анализа тритиевой воды является жидкостно-сцинтилляционный метод.

В результате проведенной работы на современном спектрометрическом радиометре Thriathler LSC получены линейные градуировочные зависимости объемной активности тритиевой воды от счета (рис.). Установлена стабильность полученных градуировочных зависимостей, что позволит не проводить их регулярную корректировку, в отличие от старой методики анализа. Рекомендовано измерение одного контрольного раствора тритиевой воды (с известной объемной активностью) при выполнении каждой серии анализов (для контроля состояния прибора и градуировки).

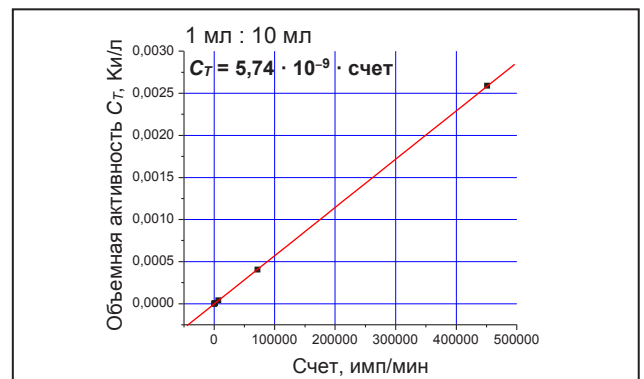
Разработанная методика определяет объемную активность тритиевой воды в диапазоне $(3,7 \cdot 10^{-7} - 6)$ Ки/л, что позволит использовать ее как для анализа тяжелой воды бака ТВО (до 2 Ки/л), так и для контроля легкой воды первого контура ($10^{-5} - 10^{-3}$ Ки/л) или воды с низкой активностью порядка уровня вмешательства. Подготовка одной пробы занимает 15 мин, анализ на радиометре – от 10 мин (при времени измерения 60 с) до 2 ч (при времени измерения 600 с) с учетом параллельных измерений.

Рекомендовано использовать при подготовке проб к анализу следующие соотношения объемов «проба – жидкость сцинтилляционная (ЖС)»:

- 1 : 10 – для проб со средней активностью ($10^{-6} - 8,5 \cdot 10^{-3}$ Ки/л);
- 8 : 10 – для низкоактивных проб ($< 10^{-6}$ Ки/л);
- 0,1 : 10 – для высокоактивных проб ($> 8,5 \cdot 10^{-3}$ Ки/л).

Установлено, что при соблюдении требований методики к пробоподготовке и измерению относительная погрешность определения объемной активности трития в пробах воды (средне- и высокоактивных) не должна превышать 4 %, при измерении низкоактивных проб может достигать 10 %. Установлено влияние гашения на результат анализа.

Так как Thriathler LSC регистрирует не только счет, но и спектры анализируемых проб, это позволит исключить возможность неправильного выполнения анализа по причине, например, присутствия мешающих примесей. Поэтому в дальнейшем планируется выполнить работу по установлению мешающих примесей (проверка влияния вероятных продуктов коррозии в контурах реактора ПИК на результат анализа проб теплоносителей на содержание трития).



Калибровочная зависимость объемной активности трития от счета радиометра. Соотношение «проба – ЖС» = 1 : 10

Создание макета проточного анализатора тяжелой воды дополнительной системы безопасности реактора ПИК на базе промышленного БИК фурье-спектрометра

Т. В. Воронина, Д. Е. Романова

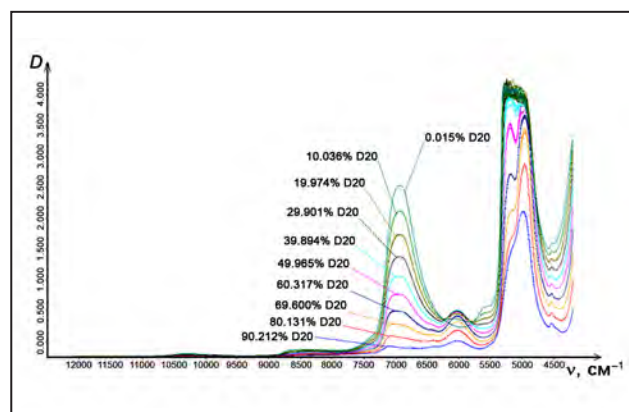
Управление ядерной и радиационной безопасности ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Актуальной задачей при эксплуатации любого реактора является обнаружение на ранней стадии нарушения герметичности его корпуса. Современный подход к обеспечению безопасной эксплуатации оборудования реактора строится на концепции «исключение разрушения» и требует надежного фиксирования течи для регистрации сквозных дефектов. Для исследовательского тяжеловодного реактора ПИК на базе существующих штатных датчиков (по давлению и уровню) организован оперативный контроль образования дефектов корпуса реактора, однако время их обнаружения составляет не менее часа. При этом для реактора ПИК предложен дополнительный, более чувствительный метод контроля целостности корпуса реактора – по снижению содержания дейтерия в концентрированной тяжелой воде охлаждающего контура жидкостного регулирования (ЖР) при появлении малой протечки легкой воды первого контура. Для этого необходимо создать систему дистанционного прецизионного мониторинга содержания протия в тяжелой воде контура ЖР на базе проточного анализатора «Анализ-3».

Ранее было показано, что решить эту задачу можно методом инфракрасной (ИК) спектроскопии на основе проточного анализатора, работающего в ближней инфракрасной (БИК) области. Перед установкой датчика в контур ЖР необходимо провести в лабораторных условиях его градуировку. Это непростая задача, т. к. в диапазоне БИК $12\ 000 - 4\ 000\ \text{см}^{-1}$ находятся не валентные колебания, а обертоны и составные колебания воды, т. е. заранее ясно, что зависимость будет сложной.

В 2015 г. в лабораторию производственного химического контроля было передано для тестовой эксплуатации оборудование, на базе которого

планируется создание дополнительной системы безопасности реактора ПИК: промышленный БИК фурье-спектрометр MATRIX-F, промышленная проточная кювета из нержавеющей стали толщиной 2 мм и оптоволоконно. В лабораторных условиях был создан макет системы, на котором разработана методика градуировки проточного анализатора и определен ее оптимальный алгоритм: непрерывная циркуляция тяжелой воды через кювету по замкнутой схеме; стабилизация расхода тяжелой воды через кювету при помощи насоса; термостатирование проточной кюветы. Минимальное количество растворов тяжелой воды для выполнения градуировки – не менее 20 шт. в каждом диапазоне концентраций. По полученным экспериментальным данным (рис.) построены градуировочные модели. Погрешность градуировки для концентрированной тяжелой воды составила 0,002 ат. %, для широкого диапазона концентраций – 0,02 ат. %. Качество работы градуировочных моделей было протестировано на независимых образцах тяжелой воды.



Спектры тяжелой воды в широком диапазоне концентраций, полученные на MATRIX-F

Новые результаты в исследовании процесса изотопного обмена в системе «вода – водород» на опытно-промышленной установке ЭВИО

И. А. Алексеев, С. Д. Бондаренко, Т. В. Васянина, О. А. Федорченко

Отдел физики и техники реакторов ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Новая колонна каталитического изотопного обмена (LPCE-3) с высотой засыпки 2 м и внутренним диаметром 50 мм расширила экспериментальные возможности опытной установки ЭВИО (табл.). Экспериментальные результаты представлены в сравнении с ранее полученными на LPCE-1 и LPCE-2. В колонне был испытан обновленный катализатор РХТУ-3СМ с несколько большим содержанием платины (1,33 % против 1,17 %) и немного более крупным размером носителя SDBC (сферические гранулы сополимера 0,8–1,2 мм против 0,5–1,0 мм). Были изучены как гидравлические, так и разделительные характеристики колонны, заполненной чередующимися слоями катализатора и спирально-призматической насадки в объемном соотношении 1 : 4 (та же насадка и то же соотношение, что и в LPCE-1 и LPCE-2). Характеристики LPCE-3 выглядят впечатляюще. Пропускная способность (рис. 1) и разделительная эффективность (рис. 2) выросли значительно по сравнению со старыми колоннами. Обнаружена зависимость разделительной

эффективности от удельной нагрузки по водороду. Эффективность разделения, выражаемая через атрибут трехпоточной модели (K_c – коэффициент массопередачи для каталитического изотопного обмена), остается неизменной для различных изотопов (H, D и T), чего не наблюдается при использовании общего коэффициента массопередачи K_y .

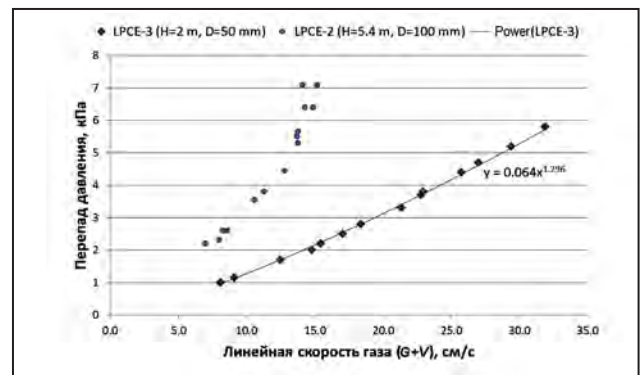


Рис. 1. Перепад давления от линейной скорости газа (водород плюс пар) для двух колонн

Таблица. Колонны установки ЭВИО

Колонна	LPCE-1	LPCE-2	LPCE-3
Начало работы	2003	1995	2014
Высота, м	5,4	5,9	2
Внутренний диаметр, м	0,1	0,1	0,05
Количество секций	5	3	1
Насадка / катализатор	Объемное отношение 4 : 1		
Насадка	Спирально-призматическая из нержавеющей проволоки 2,2 × 2,2 × 0,2 мм		
Катализатор	RCTU-3		RCTU-3SM
Содержание Pt, масс. %	0,8–1 (1,17 ± 0,02)		0,8–1 (1,33 ± 0,02)
Носитель	SDBC		
Диаметр гранул, мм	0,5–1,0		0,8–1,2

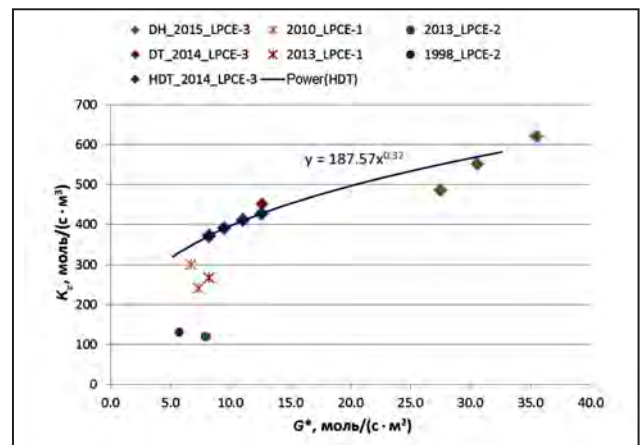


Рис. 2. Зависимость коэффициента K_c от удельной нагрузки по водороду (при фиксированном коэффициенте массопередачи для фазового обмена $B_x = 500$ моль/(с · м³))

Облучение конструкционных материалов в реакторе ВВР-М

С. П. Орлов – Управление ядерной и радиационной безопасности; В. Л. Соловей – Отделение нейтронных исследований; С. Р. Фридман – Отдел физики и техники реакторов; О. П. Якорев – Управление эксплуатации ядерных установок ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

В период с 1985 по 2015 г. в реакторе ВВР-М проводили облучение конструкционных материалов в рамках подготовки к изучению физико-механических свойств и обоснованию их радиационной стойкости. В 2015 г. проведены анализ и ревизия материаловедческих ампул и образцов-свидетелей. Объем работ включал определение следующих характеристик ампул и образцов:

- продолжительность и условия облучения материаловедческих ампул;
- флюенс нейтронов на образцах;
- схема загрузки образцов и мониторов в ампулах;
- материал образцов;
- тип и характеристика образцов.

По результатам работы составлены перечень и основные характеристики облученных материалов, которые в дальнейшем могут быть использованы для исследования физико-механических свойств материалов с целью обоснования ресурса корпуса реактора ПИК, внутрикорпусных элементов и экспериментальных каналов РК ПИК.

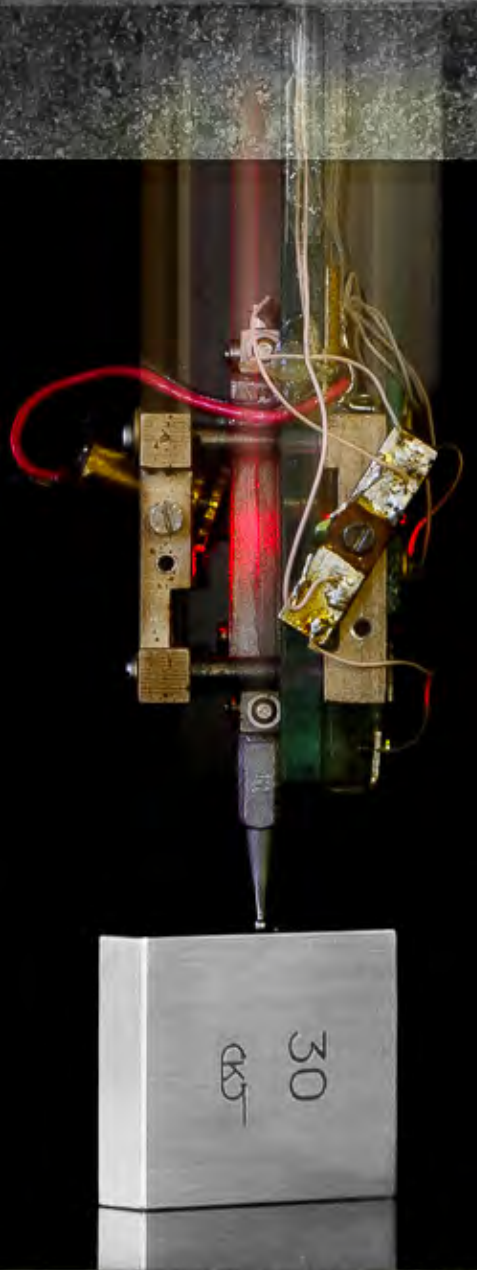
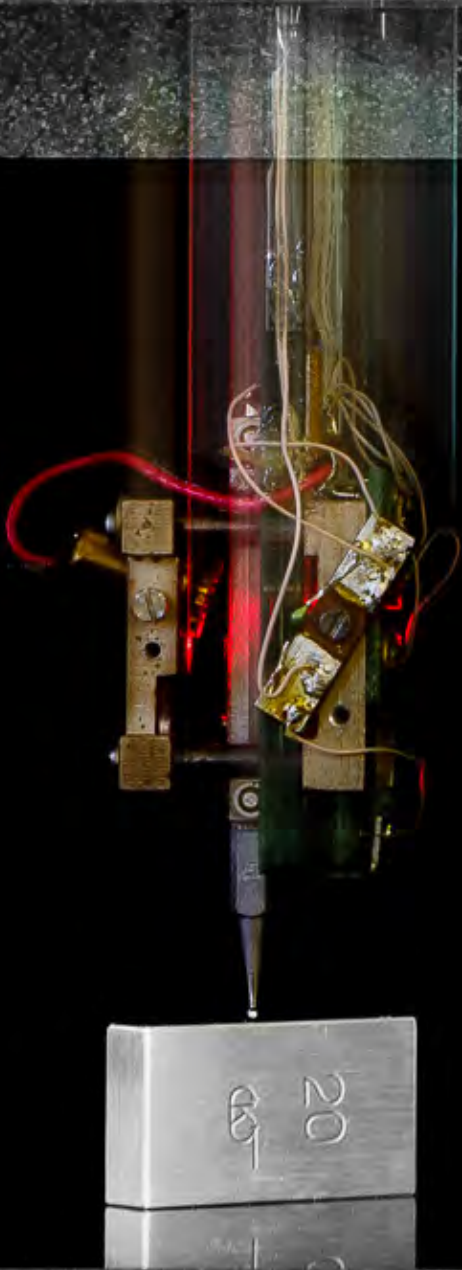
Приведенный перечень включает обширный набор материаловедческих образцов, облученных в реакторе ВВР-М:

- из сталей:
 - 08X18H10T; X18H10T-ВД; X18H10T;
 - ЧС42ВИ; ЧС-42 ТМО; ЧС-42 (аустенизация); ЧС-42 с Ti (аустенизация, состаренная);
 - X16H11M3РЦ-ВД; X16H11M3; X16H11M3Т-ВН;
 - 04X16H11M3Т;
 - X15H35M3ЧС56 (1 100 °С – 1 ч).
 - из алюминиевых сплавов:
 - САВ-1; АТ11; АД1; АМг3; АД33 (6061); САВ-6; АД31,
- а также нескольких чистых образцов из Ge, Si и Al (999).

Образцы предназначены для исследования физико-механических свойств материалов после облучения в реакторе ВВР-М при температуре ~ 70 °С до различных повреждающих доз. Максимальное значение флюенса быстрых нейтронов на образцах из сталей превышает $1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ($E > 1 \text{ МэВ}$); на образцах из алюминиевых сплавов флюенс тепловых нейтронов превышает $1 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Возможно исследование механических свойств как основного металла, так и сварных соединений.

На основании результатов испытаний образцов и исследований их свойств может быть определена деградация свойств представленных материалов в результате воздействия облучения, характерного для оборудования атомных реакторов, эксплуатирующегося при температуре теплоносителя до 100 °С.

Влияние радиационного повреждения материалов при температурах 50–150 °С на физические и механические свойства мало исследовано. Имеется ряд работ, в которых проведен анализ результатов по физико-механическим свойствам стали 08X18H10T, облученной до флюенса $5,6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ($E > 0,8 \text{ МэВ}$) при температуре 300–350 °С, что актуально для энергетических и некоторых других реакторов. Исследования представленных в отчете и имеющихся уже сейчас в наличии образцов позволяют получить данные о свойствах сталей и алюминиевых сплавов, облученных при температуре до 100 °С, что важно как для обоснования применения внутриреакторного оборудования и продления ресурса эксплуатации реакторов ПИАФ НИЦ КИ, так и для многих российских исследовательских реакторов.



Прикладные исследования и разработки

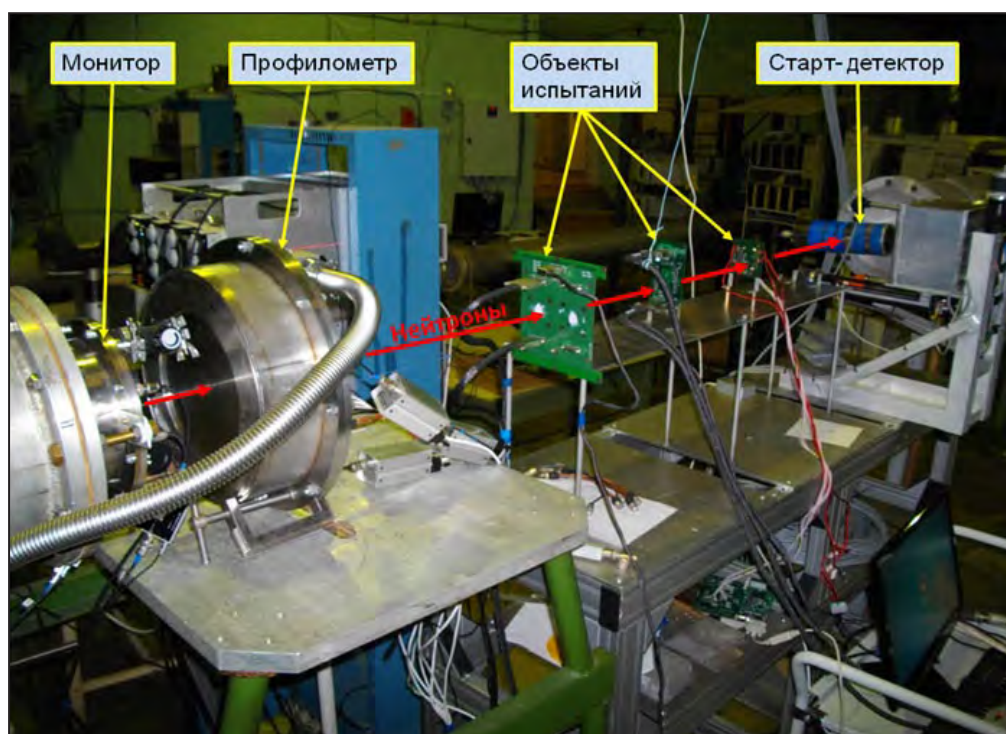
- 112 Исследования радиационной стойкости электронной компонентной базы для авиации и космоса на нейтронном испытательном стенде Роскосмоса ИС НП/ГНЕЙС
- 113 Кластеры спайков в ПЗС-матрицах, облученных нуклонами
- 115 Финальные расчеты и экспериментальная настройка протонных пучков с энергией от 64 до 1 000 МэВ для испытания радиационной стойкости электроники
- 116 Профилومتر нейтронного пучка с энергией до 200 МэВ
- 117 Результаты работы ПИЯФ НИЦ КИ в коллаборации по контролю эксперимента ATLAS на Большом адронном коллайдере

Исследования радиационной стойкости электронной компонентной базы для авиации и космоса на нейтронном испытательном стенде Роскосмоса ИС НП/ГНЕЙС

Л. А. Вайшнене – Отделение физики высоких энергий
 А. С. Воробьев, А. М. Гагарский, О. А. Щербаков – Отделение нейтронных исследований
 Е. М. Иванов – Отделение перспективных разработок
 ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»
 Л. Р. Бакиров – Филиал ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «НИИ космического приборостроения»

В 2015 г. на нейтронном испытательном стенде ИС НП/ГНЕЙС (рис.) со спектром, повторяющим спектр атмосферных нейтронов в широком интервале энергий 1–1 000 МэВ, филиалом ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «НИИ космического приборостроения» проведены два сеанса испытаний изделий электронной компонентной базы. Для шести образцов запоминающих устройств (статическое оператив-

ное запоминающее устройство) отечественного (два типонамала) и иностранного (четыре типонамала) производства, используемых в авиационном и космическом приборостроении, измерены сечения возникновения одиночных радиационных эффектов SEU (сбой) и SEL («защелка»). Одновременно с испытаниями выполнялись методические работы с целью совершенствования конструкции профилометра нейтронного пучка.



Нейтронный испытательный стенд ИС НП / ГНЕЙС

1. Shcherbakov O. A., Vorobyev A. S., Gagarski A. M., Vaishnene L. A., Ivanov E. M. et al. // Book of Abstracts of XXIII Int. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei. JINR. 2015. P. 76.
2. Shcherbakov O. A., Vorobyev A. S., Gagarski A. M., Vaishnene L. A., Ivanov E. M. et al. // Proc. of 15th Europ. Conf. on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS-2015). 2015. P. 288.

Кластеры спайков в ПЗС-матрицах, облученных нуклонами

*К. Н. Ермаков, Н. А. Иванов, О. В. Лобанов, В. В. Пашук –
Отделение перспективных разработок ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»
М. О. Прыгунов – ООО «НПЦ «Гранат»*

Под действием протонов и нейтронов в ПЗС-матрицах в результате ядерных реакций возникают спайки – долговременные повреждения пикселей, величины темновых токов $I_{ТТ}$, в которых значительно превышают средние значения темновых токов в пикселях исходной матрицы. Было установлено, что в ПЗС-матрицах, облученных нуклонами, образуются кластеры из нескольких соседних спайков. Рассмотрена кинетика поведения данных кластеров как в процессе облучения, так и после него. Исследовалось воздействие протонов с энергией 1 000 МэВ и нейтронов атмосферного спектра с максимальной энергией 1 000 МэВ на ПЗС-матрицы ICX259AL марки Sony, которые содержат $\sim 4 \cdot 10^5$ пикселей размером $6,50 \times 6,25 \text{ мкм}^2$.

В качестве примера на рис. 1 приведен рельеф одного из кластеров в процессе облучения нейтронами и после него. Данный кластер был образован при флюенсе нейтронов $5,3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ (рис. 1а). Непосредственно после такого облучения кластер

имел размеры $\sim 13 \times 12,5 \text{ мкм}^2$ и включал в себя четыре спайка.

В результате последующего облучения до флюенса $3,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ в этом кластере возросла яркость спайков, их количество увеличилось до восьми, а поперечный размер кластера вырос до $\sim 13 \times 25 \text{ мкм}^2$ (рис. 1б). Механизм роста кластера и увеличения яркости спайков обусловлен, возможно, тем, что нарушенная кристаллическая структура полупроводникового материала в области кластера является аттрактором для радиационных дефектов, образующихся вблизи кластера в процессе последующего облучения.

Рельеф этого же кластера через 214 ч после окончания облучения показан на рис. 1в. Видно, что после облучения происходит уменьшение количества спайков и поперечного размера кластера, а также снижается яркость спайков в кластере. Наряду с этим со временем наблюдалось исчезновение части кластеров, яркость спайков в которых уменьшалась до величин $I_{ТТ}$ в необлученной ПЗС-матрице.

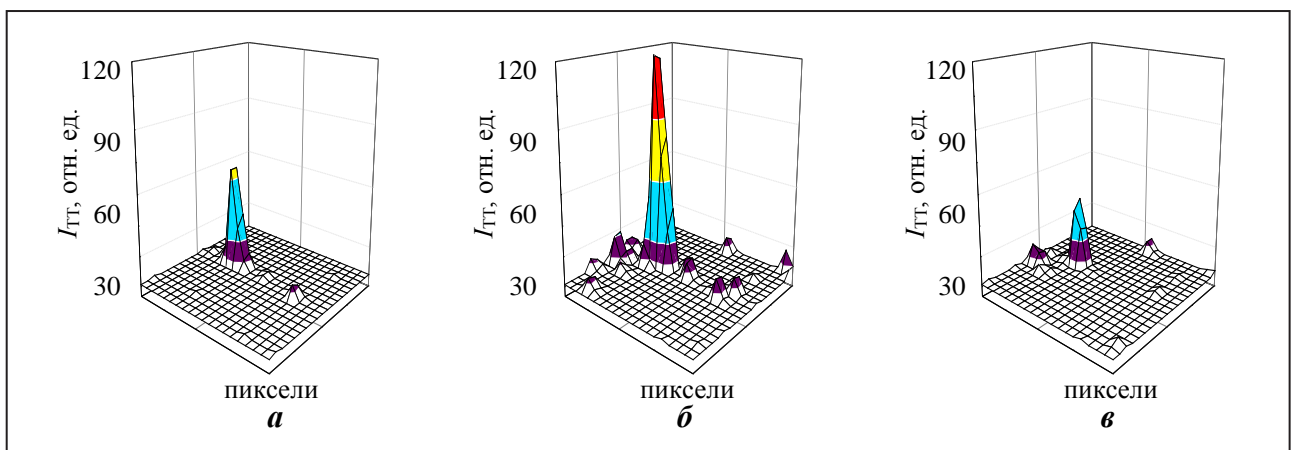


Рис. 1. Рельеф кластера спайков в ПЗС-матрице, облученной нейтронами: флюенс $5,3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ (а); флюенс $3,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ (б); через 214 ч после облучения (в)

Временные зависимости распределения пикселей по величине темнового тока в ПЗС-матрице после окончания облучения приведены на рис. 2. Анализ скорости уменьшения количества спайков в облученной нуклонами ПЗС-матрице показал, что временные зависимости числа спайков N могут быть аппроксимированы экспоненциальной функцией: $N \sim \exp(-t/\tau)$ при величине $\tau \sim 3,5 \cdot 10^4$ с.

Следует отметить, что возникновение кластеров спайков под действием нуклонов указывает на возможность множественных сбоев и отказов в

интегральных схемах с размером чувствительных областей, близких и меньших размеру пикселей в исследованной ПЗС-матрице. Наблюдаемые особенности роста кластеров спайков в процессе облучения и отжиг радиационных дефектов в поврежденных пикселях дают основания к проведению дальнейших исследований с целью повышения надежности работы изделий микроэлектроники в радиационных полях.

Исследования поддержаны грантом РФФИ № 14-29-09240.

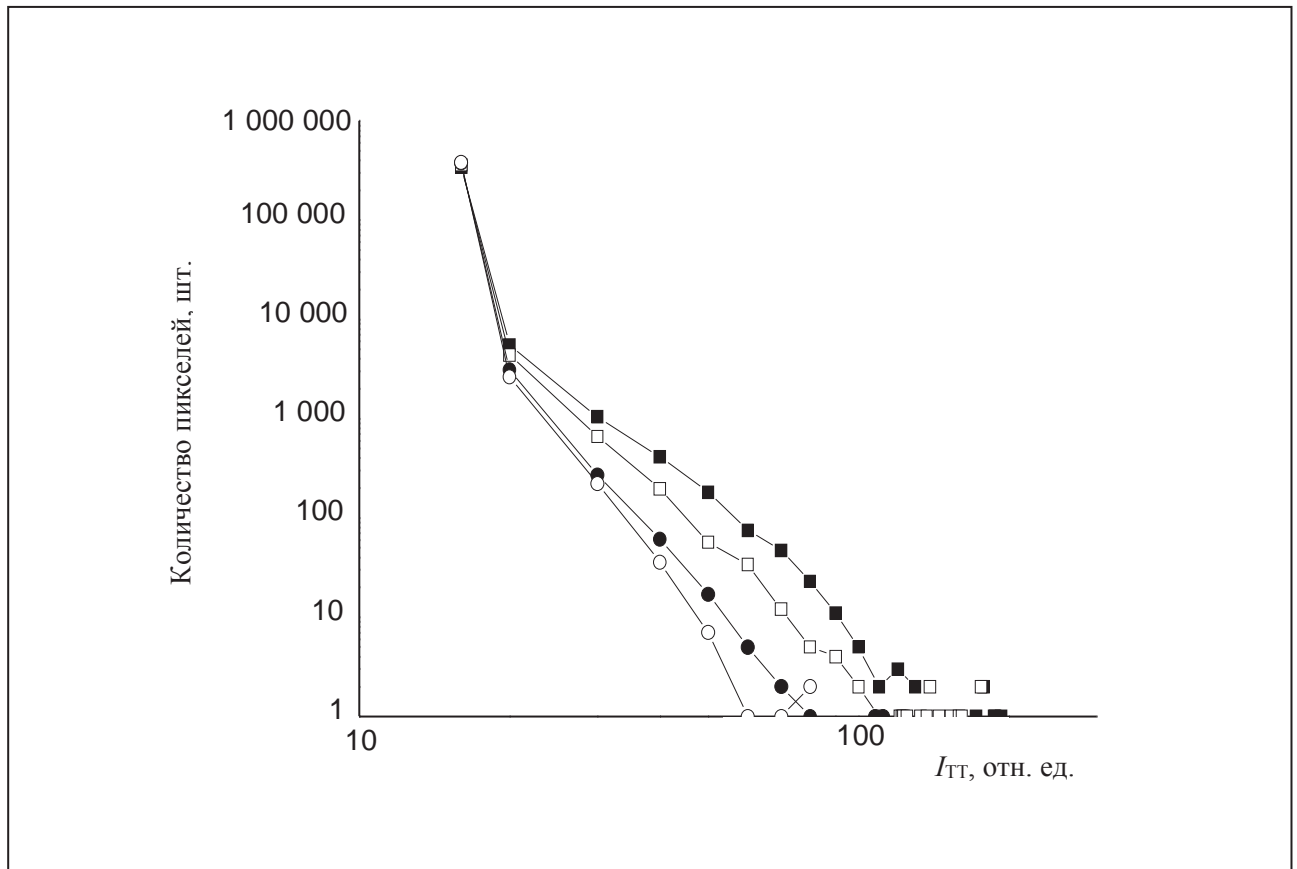


Рис. 2. Зависимости распределения пикселей по величине I_{TT} в ПЗС-матрице, облученной нейтронами при флюенсе $3,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$, от времени после окончания облучения: ■ – 2,4 ч, □ – 40 ч, ● – 182 ч, ○ – 428 ч

Финальные расчеты и экспериментальная настройка протонных пучков с энергией от 64 до 1 000 МэВ для испытания радиационной стойкости электроники

*Д. А. Амерканов, С. А. Артамонов, Г. И. Горкин, В. П. Гресь, Е. М. Иванов, Ж. С. Лебедева, Г. Ф. Михеев, В. В. Пашук, Г. А. Рябов, В. А. Тонких, Д. С. Удолдин – Отделение перспективных разработок
С. В. Косьяненко, В. Г. Муратов, В. А. Соловей – Отделение нейтронных исследований
ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»*

Для успешной работы авиационной и космической техники в условиях радиации необходима радиационно стойкая электроника. На синхротроне СЦ-1000 ПИАФ НИЦ КИ совместно с филиалом ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «НИИ космического приборостроения» создан универсальный центр по испытанию электронной компонентной базы (ЭКБ) для нужд авиации и космоса.

Одним из основных инструментов таких испытаний являются пучки протонов переменной энергии. На СЦ-1000 для радиационных испытаний ЭКБ было решено создать быстро настраиваемые пучки с энергиями 64, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 и 1 000 МэВ с целым набором наперед заданных свойств. Для этой цели потребовалось максимальным образом автоматизировать процесс облучения ЭКБ. В частности, был разработан и создан поглотитель из меди с дистанционным изменением его длины, что позволило быстро и безопасно для каждого эксперимента устанавливать необходимое значение энергии пучка. Сам поглотитель удалось расположить максимально близко к фокусирующим линзам канала, что привело к увеличению захвата пучка и, как следствие, росту его интенсивности в месте облучения. Было реализовано полное компьютерное управление магнитными элементами тракта.

Выполнение такой обширной программы потребовало опережающих трудоемких расчетов для каждого требуемого значения энергии пучка. С помощью комплекса программ Geant4 по методу Монте-Карло моделировались миллионы траекторий протонов с энергией 1 000 МэВ, отслеживалась

их судьба в медном поглотителе, определялись параметры пучка, прошедшего поглотитель, а также длина поглотителя, задающая нужную величину энергии пучка. Полученные данные были использованы как входные для программ «Мезон» и «Оптимум», которые позволили проследить траекторию каждого протона в канале, провести в нем оптимизацию параметров пучка и получить оптимальные режимы всех магнитных элементов тракта.

С учетом выполненных расчетов последующая экспериментальная настройка протонных пучков переменной энергии позволила достигнуть всех необходимых параметров для испытания ЭКБ. Получены требуемые пучки в диапазоне энергий 1 000–64 МэВ с плотностью интенсивности в месте облучения от $1 \cdot 10^9$ до $6 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ с 10 %-ной зоной однородности интенсивности диаметром не менее 25 мм.



Установка для радиационных испытаний ЭКБ

Профилومتر нейтронного пучка с энергией до 200 МэВ

Л. А. Вайшнене, О. А. Щербаков – Отделение физики высоких энергий
А. С. Воробьев, А. М. Гагарский – Отделение нейтронных исследований
ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

При проведении испытаний электронной компонентной базы на нейтронном испытательном стенде ИС НП/ГНЕЙС для измерения профиля пучка нейтронов с энергией 1–200 МэВ используется разработанный в ПИАФ НИЦ КИ профилومتر на основе двухкоординатного многопроволочного пропорционального счетчика низкого давления (МППС) размером 140×140 мм² (рис. 1). Принцип действия профилометра основан на регистрации с помощью МППС осколков деления из реакции $^{238}\text{U}(n, f)$, индуцируемой нейтронами пучка в материале (уран) конвертера, нанесенного на катод МППС, изготовленный из тонкой майларовой пленки. Информация с анодов X, Y, состоящих из 140 проволочек, расположенных с шагом 1 мм, считывается через

линии задержки системой регистрации, в которой для оцифровки сигналов используется быстродействующий FLASH-АЦП (250 МС/с, 12 бит). Пространственное разрешение профилометра находится в пределах 2–4 мм, а его высокое быстродействие в сочетании с методом времени пролета позволяет измерять профиль пучка в функции энергии нейтронов. Приведенное на рис. 2 изображение профиля пучка соответствует нейтронному коллиматору диаметром 75 мм. Благодаря использованию ^{238}U , сечение деления которого ниже порога ~ 1 МэВ пренебрежимо мало, профилومتر имеет очень низкую чувствительность к нейтронам фона в помещении стенда.

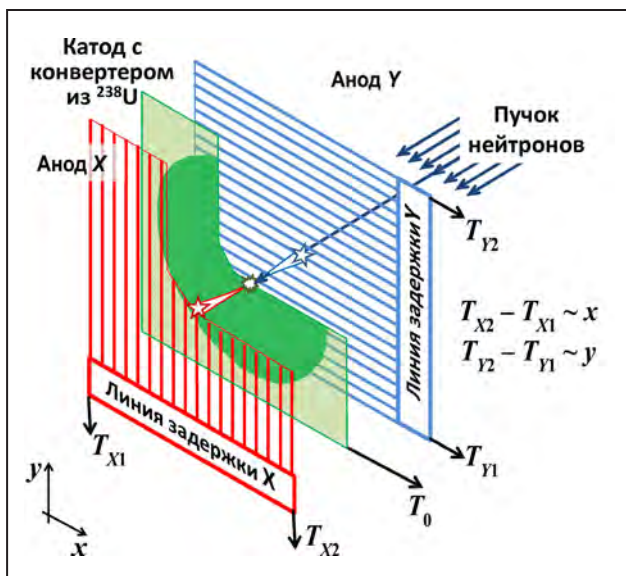


Рис. 1. Схема устройства профилометра

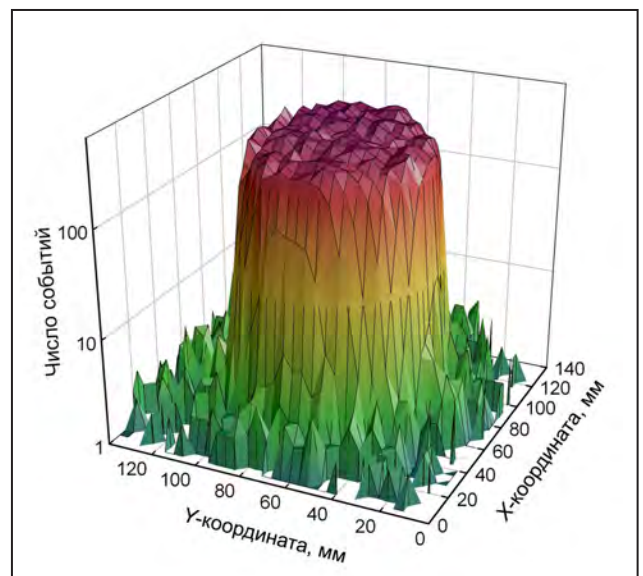


Рис. 2. Трехмерное изображение профиля нейтронного пучка

1. Shcherbakov O. A., Vorobyev A. S., Gagarski A. M., Vaishnene L. A., Ivanov E. M. et al. // Book of Abstracts of XXIII Int. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei. JINR. 2015. P. 76.
2. Shcherbakov O. A., Vorobyev A. S., Gagarski A. M., Vaishnene L. A., Ivanov E. M. et al. // Proc. of 15th Europ. Conf. on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS-2015). 2015. P. 288.

Результаты работы ПИЯФ НИЦ КИ в коллаборации по контролю эксперимента ATLAS на Большом адронном коллайдере

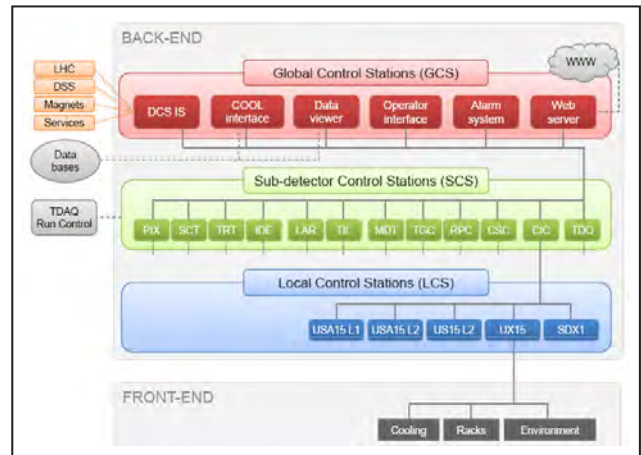
Ю. Ф. Рябов, В. М. Филимонов, В. П. Хомутников
Отделение перспективных разработок ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Открытие бозона Хиггса в экспериментах, проводимых с использованием детекторов ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРН, стало блестящим достижением мировой ядерно-физической науки. Существенную роль в обеспечении стабильной и надежной работы эксперимента ATLAS сыграла и система контроля детектора (Detector Control System – DCS), в разработке и сопровождении которой с самого начала участвует группа из ПИЯФ НИЦ КИ.

В 2013–2015 гг. была произведена модернизация БАК для удвоения мощности пучков, а также усовершенствование DCS. Главными задачами группы контроля детектора ATLAS в 2015 г. являлись завершение реинтеграции системы, включающей 16 подсистем субдетекторов эксперимента, и запуск ее в новом цикле эксперимента Run-2. Работа по совершенствованию широко используемого в ЦЕРН CANOpen OPC-сервера и центральной части системы, поддерживаемой непосредственно группой ПИЯФ НИЦ КИ (контроль рэков, конфигурирование и мониторинг состояния подсистем, обмен информацией с БАК, ведение базы данных условий эксперимента, контроль доступа к системе), сочеталась с поддержкой субдетекторов во вводе нового аппаратного и программного обеспечения, запуске и реинтеграции их локальных подсистем. Основными результатами работы специалистов ПИЯФ НИЦ КИ в 2015 г. на этих

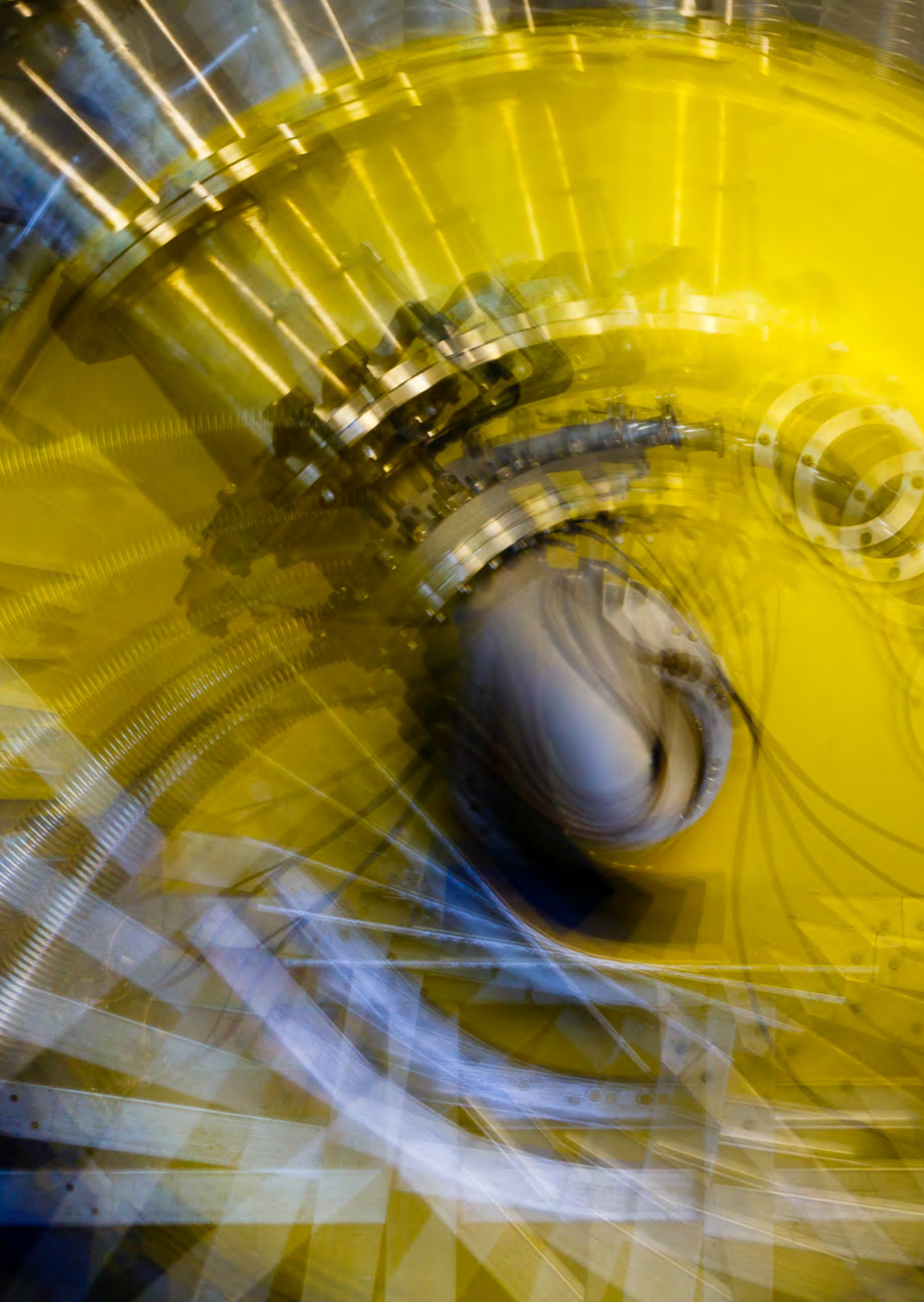
направлениях, представленными на международных конференциях, являются:

- выпуск серийного релиза CANOpen-сервера в современном стандарте OPC UA, ввод его в эксплуатацию и поддержка как в центральных системах, так и в ряде систем контроля субдетекторов;
- модернизация системы контроля рэков и системы мониторинга субдетекторных подсистем;
- совершенствование интерфейса обмена данными между DCS и БАК;
- разработка средств и координация перехода на новую реализацию базы данных Condition для реконструкции событий (в части данных от DCS) каждого из субдетекторов ATLAS.



Архитектура ATLAS-DCS

1. Nikiel P. ..., Filimonov V. et al. // Proc. of 21th Int. Conf. Computing in High Energy Physics (CHEP2015). 2015. <http://chep2015.kek.jp/>
 2. Maciejewski J., Khomutnikov V. et al. // Int. Workshop “Database & Metadata TIM in Genoa”, 2015. https://indico.cern.ch/event/390140/session/2/contribution/21/attachments/1150664/1651791/DB_Future_08_09_2015_ATLAS_DCS.pdf



Базовые установки

- 120** Статус синхроциклотрона СЦ-1000 ПИЯФ НИЦ КИ в 2015 году

Статус синхроциклотрона СЦ-1000 ПИЯФ НИЦ КИ в 2015 году

С. А. Артамонов, Е. М. Иванов, Г. Ф. Михеев

Отделение перспективных разработок ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Синхроциклотрон СЦ-1000 на энергию протонов 1 000 МэВ с интенсивностью выведенного пучка 1 мкА является одной из базовых установок ПИЯФ НИЦ КИ. Он широко используется для фундаментальных исследований в области физики элементарных частиц, структуры атомных ядер и механизмов ядерных реакций, физики твердого тела, а также в прикладных работах по радиационным испытаниям и ядерно-медицинским исследованиям.

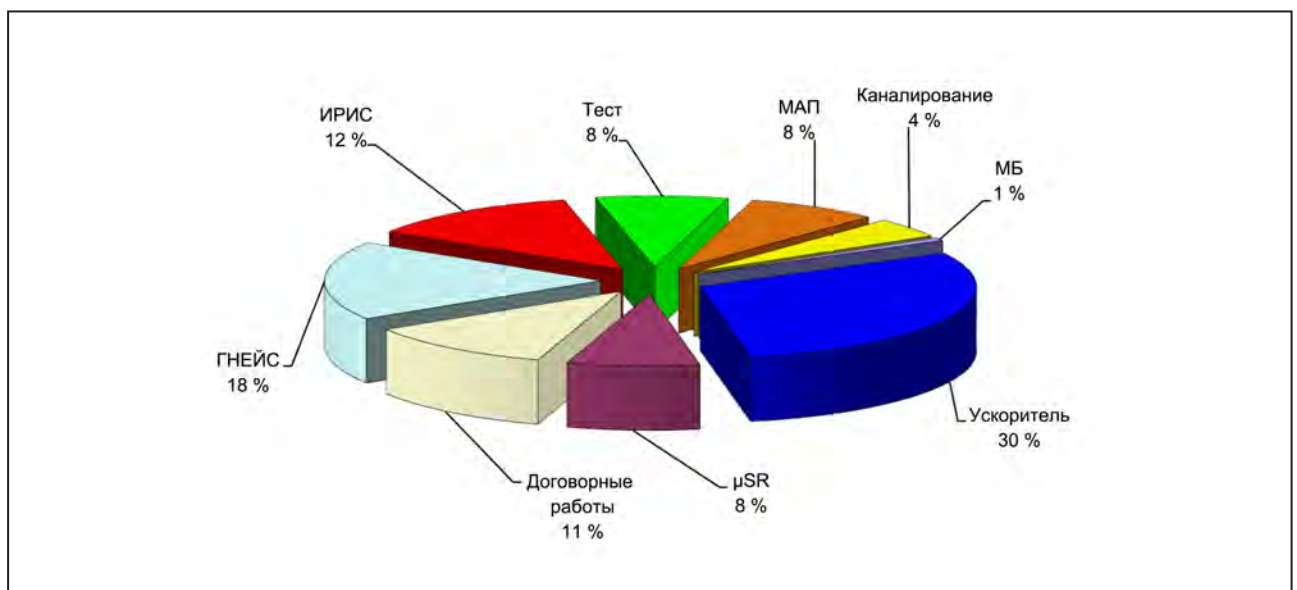
В 2015 г. ускоритель отработал в общей сложности 1 874 ч. На диаграмме показано распределение времени работы СЦ-1000 по отдельным направлениям исследований на его пучках.

Наиболее значимой работой 2015 г. является завершение создания на базе синхроциклотрона СЦ-1000 универсального центра для испытаний на радиационную стойкость электроники авиакосмического назначения. При этом центр включает в себя два испытательных стенда для работы на

протонном пучке, а также испытательный стенд на нейтронном пучке атмосфероподобного спектра.

Создание протонных стендов включало следующие основные этапы:

- выполнение расчетов по SRIM и изготовление поглотителя из меди; расчет варианта поглотителя из вольфрама;
- выполнение по Geant3 и Geant4 расчетов прохождения протонов через материал поглотителя, которые определяют начальные условия для оптимизации параметров магнитных элементов тракта;
- оптимизация параметров магнитных элементов протонного тракта;
- установка датчиков ЯМР-магнитометра в Е-9 и магните СП-40 для фиксации энергии транспортируемого протонного пучка;
- разработка и изготовление автоматизированной системы поглощения энергии протонного пучка;



Направления работ, проводимых на пучках синхроциклотрона СЦ-1000

- изготовление плат для автоматизированной системы управления (АСУ) токами в магнитных элементах тракта транспортировки;
- изготовление автоматизированной системы линейного перемещения плат;
- изготовление системы нагрева бокса размещения плат;
- разработка и изготовление профилометра с возможностью измерения распределения протонов в пучке;
- создание системы онлайн-мониторинга протонного пучка.

Первый испытательный стенд – при постоянной энергии протонного пучка $E = 1\ 000\ \text{МэВ}$ – имеет плотность потока на объекте $10^8\ \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ с неоднородностью интенсивности $\leq 5\ %$ в поле облучения диаметром 26 мм; ведется онлайн-контроль флюенса протонов. Получен аттестат № 178/15 на его использование.

Второй испытательный стенд – в пучках протонов переменной энергии – в диапазоне $900 \div 64\ \text{МэВ}$. Достигнуты: плотность интенсивности в месте облучения от 10^9 до $8 \cdot 10^5\ \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$

при энергиях 900, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 200, 100, 64 МэВ с областью неоднородности интенсивности пучка 10 % при размере этой области не менее 25 мм в диаметре. Температура на объекте испытаний может меняться в диапазоне $+250 \div +125^\circ$. Ведется онлайн-контроль флюенса протонов. Получен аттестат № 177/15-1 на его использование.

Описание испытательного стенда на нейтронном пучке атмосфероподобного спектра приведено в сборнике ранее.

Все три стенда включены в состав Межведомственного испытательного центра Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос», а стенд на нейтронном пучке – в международный стандарт IEC-62396-2.

Важно подчеркнуть, что синхроциклотрон ПИЯФ НИЦ КИ является единственным ускорителем в России, где в одном месте сосредоточено проведение радиационных испытаний электронной компонентной базы как в протонных пучках переменной энергии, так и в нейтронном пучке атмосфероподобного спектра.



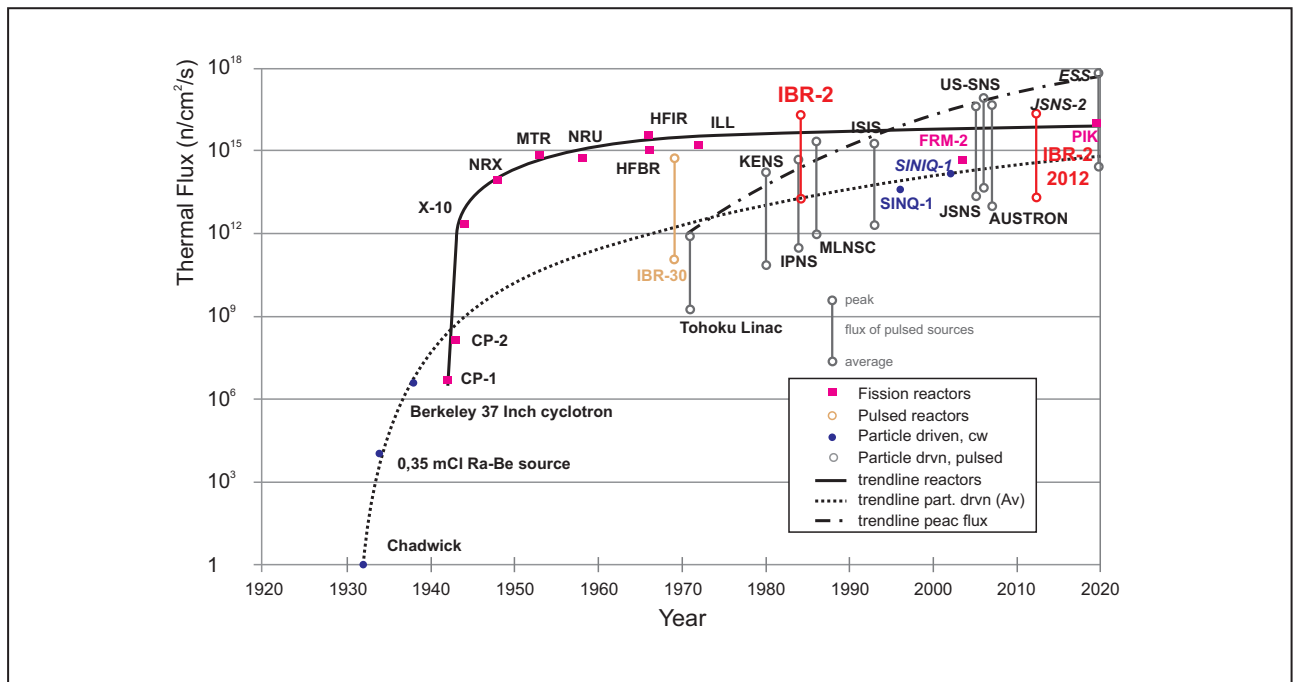


Научно-организационная деятельность

- 124 Международный центр нейтронных исследований
на базе реакторного комплекса ПИК
- 130 Кадровый состав Института
- 132 Количественные показатели научной деятельности
- 133 Награды. Премии
- 136 Семинары
- 138 Конференции

Международный центр нейтронных исследований на базе реакторного комплекса ПИК

На базе реакторного комплекса ПИК (РК ПИК) создается Международный центр нейтронных исследований (МЦНИ). В 2010 г. ПИЯФ НИЦ КИ подписал соглашение о сотрудничестве с Исследовательским центром им. Гельмгольца в г. Геестхакте (ГЦГ) о переносе части нейтронных станций на реактор ПИК. В 2014 г. НИЦ КИ подписал соглашение с Исследовательским центром Юлиха (ИЦ Юлиха), который является координатором участия научных центров Германии в создании МЦНИ в Гатчине. Взаимодействие с научными центрами Германии детально обсуждалось на рабочем совещании в октябре 2013 г. Участники совещания с удовлетворением констатировали тот факт, что реактор ПИК, наряду с реактором Европейского центра нейтронных исследований в Институте им. Лауэ – Ланжевена (Гренобль, Франция) и строящимся импульсным источником на основе протонного ускорителя ESS (Лунд, Швеция), включен в качестве исследовательской базы в стратегию развития нейтронной науки в Европе.



Эволюция потока нейтронов на различных нейтронных источниках Европы в прошлом столетии

Формирование научной программы и программы создания приборной базы РК ПИК проходит в координации с другими нейтронными центрами, в первую очередь с ОИЯИ, ИЦ Юлиха, ИЛЛ и ESS. Европейские ученые участвуют в разработке концепции, проектировании и создании экспериментальных станций. Отправной точкой для МЦНИ является реализация программы создания комплекса экспериментальных станций на реакторе ПИК.

В июне 2013 г. в Гатчине состоялось рабочее совещание НИЦ КИ – ИЛЛ, в ходе которого было подписано соглашение между ПИЯФ НИЦ КИ и ИЛЛ о сотрудничестве в области научных исследований, создании приборной базы реактора ПИК и научной экспертизе проектов экспериментальных станций для реактора ПИК. ИЛЛ взял на себя роль международной экспертной организации.



FRAMEWORK COOPERATION AGREEMENT

between

Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich
Federal Republic of Germany
- hereinafter referred to as „Forschungszentrum Jülich“ -

and

National Research Centre “Kurchatov Institute”
Moscow
Russia
- hereinafter referred to as “NRC Kurchatov Institute” -

For National Research Center “Kurchatov Institute”

Prof. Dr. M. V. Kovalchuk
Director of the National Research Centre
“Kurchatov Institute”

Date: *[Signature]*

Prof. Dr. V. I. Aksenov
Director of the B.F. Konstantinov Petersburg
Nuclear Physics Institute
NRC “Kurchatov Institute”

[Signature]

For Forschungszentrum Jülich GmbH

Prof. Dr. S. M. Schmidt
Member of the Board of Directors
of the Forschungszentrum Jülich GmbH

[Signature]

Prof. Dr. Th. Brückel
Director of the Jülich Centre for Neutron Science

16 июня 2014 г. НИЦ КИ и ИЦ Юлиха подписали рамочное соглашение о сотрудничестве. Профессор М. В. Ковальчук и профессор С. Шмидт на церемонии подписания

В рамках соглашения о сотрудничестве между НИЦ КИ и ИЦ Юлиха, подписанном в июне 2014 г., стороны приняли решение о создании консультативного комитета и научных подкомитетов для подробного обсуждения научной программы для реактора ПИК с целью создания приборной базы мирового уровня.

В 2014 г. НИЦ КИ учредил международный консультативный комитет по фотонным и нейтронным наукам (сопредседатели – профессор Х. Дош и член-корреспондент РАН М. В. Ковальчук), состоящий из двух подкомитетов – по фотонным и нейтронным исследованиям. Международный консультативный комитет по нейтронным исследованиям (NSAC) НИЦ КИ действует в качестве международного экспертного совета, председателем которого является профессор С. Шмидт (ИЦ Юлиха). Нынешний этап деятельности комитета сосредоточен на обсуждении предложенных экспериментальных станций и их расположении на нейтронных каналах реактора ПИК. Первое заседание NSAC состоялось 10–11 марта 2015 г.





Первое заседание NSAC 10–11 марта 2015 г. в Гатчине

В ходе первого заседания NSAC были выработаны рекомендации о создании шести подкомитетов (подгрупп) для дальнейшей работы в области нейтронной дифракции, нейтронной спектроскопии, малоуглового рассеяния и рефлектометрии, фундаментальной физики с нейтронами, нейтронной оптики и модераторов, детекторов и мониторов. В соответствии с рекомендациями NSAC в период с июня по сентябрь 2015 г. были проведены стартовые заседания каждого подкомитета.



Члены подкомитета по спектроскопии на РК ПИК

Члены NSAC

С. Шмидт	Исследовательский центр Юлиха (Германия) – председатель
С. В. Григорьев	ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт» (Россия) – секретарь
А. М. Балагуров	Объединенный институт ядерных исследований (Россия)
О. Байрон	Университет Глазго (Великобритания)
В. Т. Эм	НИЦ «Курчатовский институт» (Россия)
Э. Харрисон	Исследовательский центр Diamond Light Source (Великобритания)
В. В. Несвижевский	Институт им. Лауэ – Ланжевена (Франция)
В. Петри	Мюнхенский технический университет (Германия)
Д. Рихтер	Исследовательский центр Юлиха (Германия)
М. В. Рычев	Центр синхротронного излучения DESY, XFEL (Германия)
Х. Шобер	Институт им. Лауэ – Ланжевена (Франция)
А. Шрайер	Исследовательский центр им. Гельмгольца в Геестхахте (Германия)
Я. И. Штромбах	НИЦ «Курчатовский институт» (Россия)
Д. Йек	Европейский центр исследования материи, ESS (Швеция)
Х. Цабель	Рурский университет в Бохуме (Германия)

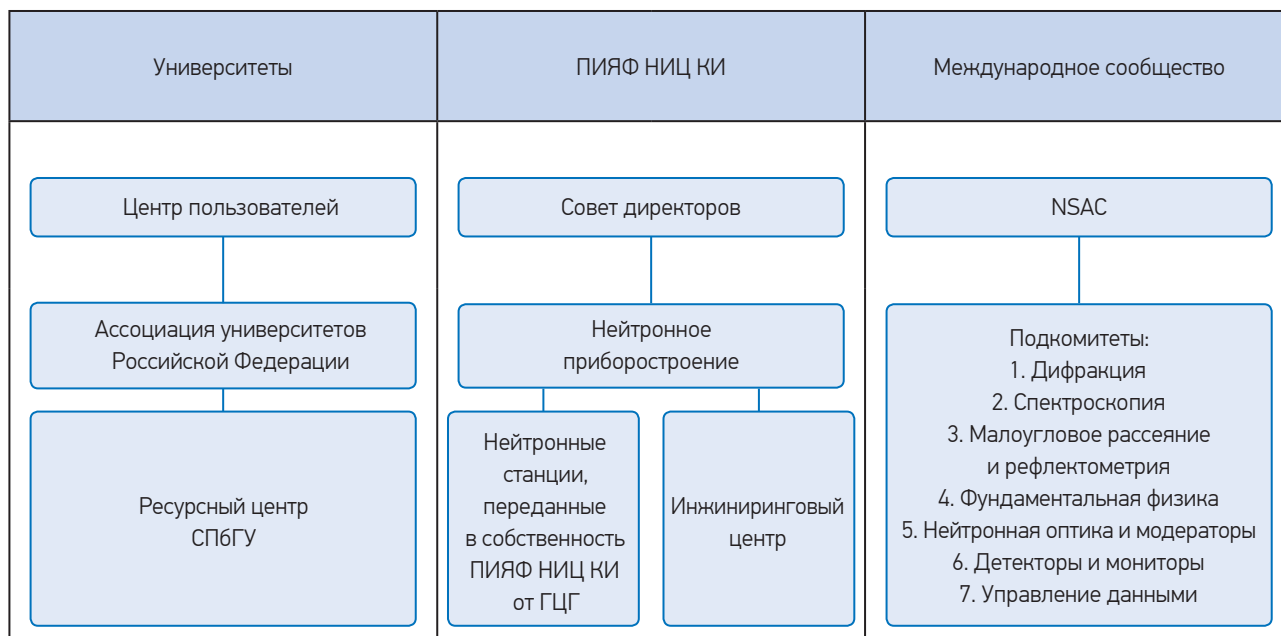
Члены подкомитетов

<p>Подкомитет по дифракции</p> <p>А. И. Курбаков (ПИАФ НИЦ КИ, Гатчина) – председатель</p> <p>А. М. Балагуров (ОИЯИ, Дубна) В. Т. Эм (НИЦ КИ, Москва) А. Г. Гукасов (ЛЛБ, Сакле) М. Мевен (Рейнско-Вестфальский ТУ Ахена, Ахен) В. Швейна (ИЦ Юлиха, Юлих) П. Штарон (ГЦГ, Геестхахт)</p>	<p>Подкомитет по фундаментальной физике</p> <p>В. В. Несвижевский (ИЛЛ, Гренобль) – председатель</p> <p>Х. Абель (Венский ТУ, Вена) Ш. Бэслер (Виргинский университет, Ок-Ридж) В. И. Фурман (ОИЯИ, Дубна) Е. В. Лычагин (ОИЯИ, Дубна) В. В. Воронин (ПИАФ НИЦ КИ, Гатчина) О. Циммер (ИЛЛ, Гренобль) М. Йентшель (ИЛЛ, Гренобль)</p>
<p>Подкомитет по спектроскопии</p> <p>К. Шмалцл (ИЦ Юлиха, отделение в ИЛЛ, Гренобль) – председатель</p> <p>П. А. Алексеев (НИЦ КИ, Москва) Е. С. Клементьев (БФУ им. Канта, Калининград) И. Кулда (ИЛЛ, Гренобль) М. Монкенбуш (ИЦ Юлиха, Юлих) М. Руссина (ГЦБ, Берлин) В. Г. Сакай (ISIS, Дидкот) Й. Войгт (ИЦ Юлиха, Юлих)</p>	<p>Подкомитет по нейтронной оптике и модераторам</p> <p>Ф. Мезей (ESS, Лунд) – председатель</p> <p>К. Батков (ESS, Лунд) А. П. Булкин (ПИАФ НИЦ КИ, Гатчина) Т. Гросс (Будапештский нейтронный центр, Будапешт) С. А. Куликов (ОИЯИ, Дубна) К. Лефманн (ESS, Лунд) П. Линк (Мюнхенский ТУ, Мюнхен) В. А. Митюхляев (ПИАФ НИЦ КИ, Гатчина) А. И. Музыка (ОИЯИ, Дубна) У. Рюккер (ИЦ Юлиха, Юлих)</p>
<p>Подкомитет по малоугловому рассеянию и рефлектометрии</p> <p>А. И. Иоффе (ИЦ Юлиха, Юлих) – председатель</p> <p>М. В. Авдеев (ОИЯИ, Дубна) Д. Лотт (ГЦГ, Геестхахт) Ш. Маттаух (ИЦ Юлиха, Юлих) Э. Метвалли (Мюнхенский ТУ, Мюнхен) Е. В. Москвин (ПИАФ НИЦ КИ, Гатчина) Б. П. Топерверг (ПИАФ НИЦ КИ, Гатчина)</p>	<p>Подкомитет по детекторам и мониторам</p> <p>С. А. Куликов (ОИЯИ, Дубна) – председатель</p> <p>Б. Герард (ИЛЛ, Гренобль) Р. Холл-Уилтон (ESS, Лунд) Д. С. Ильин (ПИАФ НИЦ КИ, Гатчина) Г. Кеммерлинг (ИЦ Юлиха, Юлих) С. В. Косьяненко (ПИАФ НИЦ КИ, Гатчина) Г. Новак (ГЦГ, Геестхахт) И. Стефанеску (ESS, Лунд)</p>

Основные мероприятия NSAC с марта по сентябрь 2015 г.

Дата	Событие	Результаты
10–11 марта 2015 г.	1-е заседание NSAC в ПИЯФ НИЦ КИ, Гатчина Подготовительное заседание подкомитета по нейтронной оптике и модераторам в ПИЯФ НИЦ КИ, Гатчина	Протокол заседания. Ответственный – С. Шмидт Протокол заседания. Ответственный – В. А. Митюхляев
17 июня 2015 г.	1-е заседание подкомитета по спектроскопии в ПИЯФ НИЦ КИ, Гатчина	Протокол заседания. Ответственный – К. Шмалцл
24 июня 2015 г.	1-е заседание подкомитета по нейтронной дифракции в ПИЯФ НИЦ КИ, Гатчина	Протокол заседания. Ответственный – А. И. Курбаков
29–30 июня 2015 г.	1-е заседание подкомитета по малоугловому рассеянию и рефлектометрии в ПИЯФ НИЦ КИ, Гатчина	Протокол заседания. Ответственный – А. И. Иоффе
6–7 июля 2015 г.	1-е заседание подкомитета по нейтронной оптике и модераторам в ESS, Лунд	Протокол заседания. Ответственный – Ф. Мезей
14–16 сентября 2015 г.	1-е заседание подкомитета по детекторам и мониторам в ПИЯФ НИЦ КИ, Гатчина	Протокол заседания. Ответственный – С. А. Куликов
23–24 сентября 2015 г.	1-е заседание подкомитета по фундаментальной физике в ПИЯФ НИЦ КИ, Гатчина	Протокол заседания. Ответственный – В. В. Несвижевский

В основе МЦНИ лежит нейтронное приборостроение, которое берет свое начало с нейтронной платформы ПИЯФ НИЦ КИ – ГЦГ. Существующая модель МЦНИ подразделяется на три части: университеты, ПИЯФ НИЦ КИ и международное сообщество (см. таблицу ниже).



В целях развития инфраструктуры крупномасштабных проектов европейской комиссией был создан новый проект CREMLIN, объединяющий усилия российских и европейских нейтронных центров в этой бурно развивающейся отрасли современной науки. ПИЯФ НИЦ КИ отвечает за координацию действий в области нейтронных исследований и, в частности, за деятельность международного сообщества по отношению к РК ПИК.



Ежегодная Зимняя школа по физике конденсированного состояния ПИЯФ НИЦ КИ

Кадровый состав Института

Численность сотрудников

Сотрудники	2015
Всего без учета совместителей	1 989
Всего научных сотрудников	585
<i>Из них с должностью</i>	
руководителя	54
главного научного сотрудника	12
ведущего научного сотрудника	53
старшего научного сотрудника	176
научного сотрудника	132
младшего научного сотрудника	65
прочие научные сотрудники	93
<i>С ученой степенью</i>	
доктора наук	72
кандидата наук	267
<i>С ученым званием</i>	
академика	1
члена-корреспондента	2
профессора	16
доцента (с. н. с.)	116

Сведения о научном стаже сотрудников

Сотрудники	Всего	В том числе со стажем		
		до 5 лет	более 5 лет	более 10 лет
Зав. лабораториями и отделами	35	13	6	16
Главные научные сотрудники	12	–	4	8
Ведущие научные сотрудники	53	6	22	25
Старшие научные сотрудники	176	20	23	133
Научные сотрудники	132	18	27	87
Младшие научные сотрудники	65	52	11	2

Возраст научных сотрудников

Сотрудники	Возраст, лет					
	20–29	30–39	40–49	50–59	60 и старше	средний возраст
Всего научных сотрудников	127	70	60	82	246	65
<i>С ученой степенью</i>						
доктора наук	–	1	6	11	54	67
кандидата наук	7	33	38	49	140	59
<i>Не имеют ученой степени</i>	120	36	16	22	49	39
<i>С ученым званием</i>						
академика	–	–	–	–	1	75
члена-корреспондента	–	–	–	–	2	75,5
профессора	–	–	–	1	15	74
доцента (с. н. с.)	–	–	2	11	103	70

Численность и средний возраст научных сотрудников по должностям

Должность	Количество	Средний возраст
Главный научный сотрудник	12	80
Ведущий научный сотрудник	53	67
Старший научный сотрудник	176	63
Научный сотрудник	132	52
Младший научный сотрудник	65	30
Руководитель	54	65
Прочие научные сотрудники	93	24

Структура по штатному расписанию за 5 лет

Категория персонала	2011	2012	2013	2014	2015
Научный персонал	451,2	445	455,2	479,4	514,9
Научно-технический персонал	215,8	221,9	254,9	262,8	277,1
Административно-хозяйственный персонал	1 013	1 032,8	1 119,3	1 177,5	1 190,7
Младший обслуживающий персонал	17,5	22,1	22,5	22,5	22,5
Всего по штатному расписанию	1 697,5	1 721,8	1 851,9	1 942,2	2 005,2

Количественные показатели научной деятельности

В ПИЯФ НИЦ КИ ведутся работы, поддержанные грантами РФФИ, РНФ, грантами Президента РФ и т. д.

Количество грантов

Гранты	Количество	Финансирование (тыс. руб.)
РФФИ	54	40 182,60
РНФ	4	54 500,00
Президента РФ	2	820,10
Минобрнауки России	1	13 000,00
Всего	61	108 502,70

Число публикаций

Публикации	2015
Отечественные	170
Зарубежные	395

Число защищенных диссертаций в 2015 г. – 6.

Патенты

В 2015 г. получено 15 патентов, из них патентов на изобретение – 5, патентов на полезную модель – 4, свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ – 6.

Правовая охрана и использование объектов интеллектуальной собственности

Наименование	Число заявок на получение охранных документов	Число полученных охранных документов	Число действующих охранных документов
Изобретения	4	5	24
Полезные модели	5	4	15
Товарные знаки	–	2	3
Программы для ЭВМ	8	7	14

Награды. Премии

ПИЯФ НИЦ КИ является активно функционирующим институтом, идущим в ногу с современными научными тенденциями, о чем свидетельствуют многочисленные премии и стипендии его сотрудников.

Сотрудники Отделения теоретической физики ПИЯФ НИЦ КИ академик РАН Л. Н. Липатов и Ю. Л. Докшицер стали лауреатами престижной награды Европейского физического общества – премии 2015 г. «За выдающийся вклад в физику высоких энергий».



Л. Н. Липатов



Ю. Л. Докшицер

28 сентября ПИЯФ НИЦ КИ посетил председатель Государственной думы РФ С. Е. Нарышкин. В ходе визита, совпавшего с профессиональным праздником и 70-летием атомной отрасли РФ, С. Е. Нарышкин провел торжественное награждение сотрудников Института благодарностями председателя Государственной думы. Памятные подарки и благодарности за особые заслуги и личный вклад в развитие атомной промышленности РФ получили научный руководитель Института член-корреспондент РАН В. Л. Аксенов, руководитель Отделения физики высоких энергий член-корреспондент РАН А. А. Воробьев, руководитель Отделения перспективных разработок к. ф.-м. н. В. Ф. Ежов, главный научный сотрудник Института к. т. н. К. А. Коноплев, руководитель Отделения теоретической физики академик РАН Л. Н. Липатов, заведующий Отделом нейтронной физики Отделения нейтронных исследований д. ф.-м. н. А. П. Серебров и заместитель директора по эксплуатации ядерных установок С. Л. Смольский.



Награждение В. Ф. Ежова



Награждение К. А. Коноплева



Награждение Л. Н. Липатова



Награждение А. П. Сереброва



Награждение С. Л. Смольского

Награды Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»

Нагрудный знак отличия «За вклад в развитие атомной отрасли» II степени:

- В. Ф. Ежов;
- Д. Л. Карлин;
- В. В. Пашук;
- А. П. Серебров;
- В. В. Федоров.

Юбилейная медаль «70 лет атомной отрасли России»:

- А. В. Коротынский.

Победители конкурса на соискание премии им. И. В. Курчатова

В конкурсе на соискание премии им. И. В. Курчатова за 2015 г. активное участие сотрудников Института стало уже доброй традицией. Особенно приятно, что его организаторы привлекают к участию не только ведущих и молодых ученых и инженеров, но также и студентов, для чего в положение о конкурсе внесены особые условия подачи работ. В этом году лучшими были признаны 8 работ сотрудников Института.

В области научных исследований:

«Исследование структуры и молекулярных механизмов белков семейства TIR49» – А. С. Афанасьева, А. П. Якимов, А. В. Швецов, М. Г. Петухов.

В области инженерных и технологических разработок:

Цикл работ «Разработка технологий продуктивного синтеза и функционализации углеродных структур для биомедицины, технических применений и стандартизации» – В. Т. Лебедев, В. А. Шилин, В. С. Козлов, В. П. Седов, А. А. Сжогина, М. В. Суясова, Ю. В. Кульвеллис, В. В. Рунов, Д. Н. Орлова, С. П. Орлов.

Среди работ молодых научных сотрудников и инженеров-исследователей:

– «Взаимодействие сверхтяжелых элементов с поверхностью аморфного селена» – Ю. А. Демидов;

– «Поиск резонансного поглощения и аксиоэлектрического эффекта для солнечных аксионов» – А. С. Каюнов, Д. А. Семенов, Е. В. Унжаков.

Среди студенческих работ:

– «Чувствительность туннельно-вращательных переходов в этиленгликоле к вариации отношения масс электрона и протона» – А. В. Вяткина;

– «Исследование киральных доменов $TbMn_2O_5$ методами рассеяния поляризованных нейтронов» – М. Д. Кучугура;

– «Роль кубической анизотропии при переходе от геликоидальной к ферромагнитной структуре в соединениях типа $B20$ » – А. С. Суханов;

– «Описание экспериментальных данных спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов на основе анализа сечения рассеяния нейтронов» – Е. Г. Яшина.

В 2015 г. правительством Ленинградской области продолжалась поддержка 22 работ, ранее удостоенных премий и именных научных стипендий губернатора Ленинградской области, а также ими были удостоены новые работы.

1. Премия губернатора Ленинградской области 1-й степени за лучшую научно-исследовательскую работу среди молодых ученых – за исследовательскую работу «Молекулярно-генетическая связь болезни Паркинсона и болезни Гоше» (сотрудник ОМРБ А. К. Емельянов);

2. Премия губернатора Ленинградской области 3-й степени за лучшую научно-исследовательскую работу среди молодых ученых – за исследовательскую работу «Расчет низколежащих состояний ионов с несколькими валентными электронами» (сотрудник ОНИ Е. А. Коновалова).

В конце 2015 г. были подведены итоги конкурса на присуждение именных научных стипендий губернатора Ленинградской области на 2016–2017 гг. По результатам работы конкурсной комиссии стипендиатами стали 9 сотрудников Института. В категории «Ведущие ученые» – К. С. Бобров (ОМРБ), О. И. Большакова (ОМРБ), П. А. Кравцов (ОФВЭ), О. В. Лобанов (ОПР), В. Н. Пантелеев (ОФВЭ), А. А. Сжогина (ОНИ), А. Е. Совестнов (ОНИ). В категории «Молодые ученые» победителями стали М. В. Суясова (ОНИ) и А. Е. Шмидт (ОМРБ).

Семинары

График проведения семинаров

Общеинститутские семинары:

- общий семинар – 1 раз в месяц, по четвергам;
- семинар по физике конденсированного состояния – каждый четверг (кроме дня общего семинара);
- семинар по биологии – 1–2 раза в месяц, по средам;
- совместный семинар Отделения физики высоких энергий и Отделения теоретической физики – 1 раз в месяц, по четвергам.

Семинары в отделениях:

- Отделение физики высоких энергий – каждый вторник;
- Отделение нейтронных исследований – 1 раз в месяц, по средам;
 - Отдел исследования конденсированных состояний – каждый вторник;
 - Лаборатория рентгеновской и гамма-спектроскопии – 1 раз в квартал, по средам;
 - Отделение нейтронных исследований по атомной и молекулярной физике – 1 раз в квартал, по четвергам;
- Отделение теоретической физики – по понедельникам в Международном математическом институте им. Л. Эйлера (Санкт-Петербург); по четвергам в ПИЯФ НИЦ КИ (Гатчина);
- Отделение молекулярной и радиационной биофизики (по статьям, направляемым в печать) – 1–2 раза в месяц, по средам;
 - Лаборатория генетики эукариот – 1 раз в неделю, по пятницам;
 - Лаборатория биофизики макромолекул – 1 раз в две недели, по средам;
 - Лаборатория клеточной биологии – 1 раз в неделю, по четвергам;
 - Лаборатория биосинтеза белка – 1 раз в две недели, по пятницам;
 - Лаборатория протеомики – 1 раз в две недели, по понедельникам;
 - Лаборатория экспериментальной и прикладной генетики – 1 раз в неделю, по средам;
 - Лаборатория энзимологии – 1 раз в две недели, по вторникам;
 - Лаборатория молекулярной генетики – 1 раз в месяц, по средам;
 - Лаборатория молекулярной генетики человека – 1 раз в неделю, по средам;
- Отделение перспективных разработок – третий вторник, ежемесячно;
 - Ускорительный отдел – второй вторник, ежемесячно.

Общеинститутские семинары

27 января. С. П. Гамбарян (Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова РАН) – «Внутриклеточная сигнализация циклическими нуклеотидами».

29 января. П. Н. Бибииков (Санкт-Петербургский государственный университет) – «Низкотемпературная термодинамика ХХЗ-цепочки».

12 февраля. В. В. Федоров (Отделение нейтронных исследований ПИЯФ НИЦ КИ) – «Кристалл-дифракционные методы в физике. К 85-летию первого директора ПИЯФ члена-корреспондента АН СССР О. И. Сумбаева».

26 февраля. А. В. Рожков (Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН) – «Низкоразмерные и анизотропные многочастичные системы».

26 марта. А. С. Суханов, С. В. Григорьев (Отделение нейтронных исследований ПИЯФ НИЦ КИ) – «Кубическая анизотропия в соединениях В20 (типа MnSi)».

2 апреля. В. Н. Робук (Лаборатория информационных технологий Объединенного института ядерных исследований) – «Симметричный анализ линейных однородных дифференциальных уравнений в частных производных с постоянными коэффициентами».

9 апреля. И. Т. Дятлов (Отделение теоретической физики ПИЯФ НИЦ КИ) – «Кварковые и лептонные матрицы смешивания: проявления нарушенной зеркальной симметрии».

16 апреля. Н. Е. Савицкая (Отделение теоретической физики ПИЯФ НИЦ КИ) – «Моделирование финансовых рынков с помощью меняющихся во времени сетей».

14 мая. Л. Н. Липатов (Отделение теоретической физики ПИЯФ НИЦ КИ) – «Уравнения эволюции партонов распределений».

21 мая. С. В. Малеев (Отделение теоретической физики ПИЯФ НИЦ КИ) – «Взаимодействие Дзялошинского – Мория в спиральных магнетиках».

28 мая. В. А. Щегельский (Отделение физики высоких энергий ПИЯФ НИЦ КИ) – «AMS-эксперимент. Недавние результаты в физике космических лучей».

4 июня. Л. А. Баталов, А. В. Сыромятников (Отделение теоретической физики ПИЯФ НИЦ КИ) – «Аномально сильное затухание длинноволновых магнонов в кубическом антиферромагнетике с дипольными силами».

18 июня. О. И. Утесов, А. В. Сыромятников (Отделение теоретической физики ПИЯФ НИЦ КИ) – «Дефекты в спиральных магнетиках со взаимодействием Дзялошинского – Мория».

17 июня. М. В. Филатов (Отделение молекулярной и радиационной биофизики ПИЯФ НИЦ КИ) – «Системный многофакторный подход к изучению процессов злокачественной трансформации и онкогенеза».

25 июня. С. В. Коныхин (Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет РАН и Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН) – «Исследование оптических и колебательных свойств углеродных наноструктур».

26 августа. Т. В. Диденко (Исследовательский институт Скриппса. Лаборатория Курта Вютриха) – «ЯМР-спектроскопия рецепторов, связанных с G-белками (GPCRs)».

24 сентября. Michael Jentschel (Institut Laue-Langevin) – “Nuclear Physics Instrumentation at a Neutron High Flux Reactor”.

22 октября. О. В. Акилин (Отделение ресурсных центров Курчатовского комплекса НБИКС-технологий НИЦ «Курчатовский институт») – «Ресурсные центры НИЦ «Курчатовский институт».

21 октября. М. И. Мосевичкий (Отделение молекулярной и радиационной биофизики ПИЯФ НИЦ КИ) – «Новая группа связанных с нейронами внеклеточных низкоспецифичных пептидаз».

5 ноября. В. В. Тарнавич (Отделение нейтронных исследований ПИЯФ НИЦ КИ) – «Магнитные свойства гольмий-иттриевых и диспрозий-иттриевых сверхрешеток».

10 декабря. В. Н. Робук (Лаборатория информационных технологий Объединенного института ядерных исследований) – «Многopараметрические решения уравнения Шредингера в 1 + 3-измерении».

16 декабря. Р. А. Шалек (Российский научный центр радиологии и хирургических технологий) – «Сорокалетний опыт клинического применения протонного пучка на базе синхроциклотрона с энергией 1 000 МэВ».

Конференции

В рамках широкого спектра тематик научных исследований, осуществляемых в ПИЯФ НИЦ КИ, организовываются собственные конференции, лектории и рабочие совещания, в которых участвуют ведущие научные центры России и зарубежья.

В 2015 г. при участии Института было организовано 15 научных мероприятий (совещания, конференции и школы), в которых приняло участие более 1 500 человек, из которых более 500 являются иностранными представителями мирового научного сообщества из таких стран, как Германия, Швеция, США, Швейцария, Япония, Китай, Нидерланды, Италия, Бельгия, Ирландия и т. д.





Проведенные мероприятия

1. Совещание «Дифракция нейтронов – 2015». **18–20 февраля.**
2. 49-я Зимняя школа ПИЯФ по физике ядра и элементарных частиц, теоретической физике, физике реакторов. **28 февраля – 6 марта.**
3. Зимняя молодежная школа по биофизике и молекулярной биологии. **10–15 марта.**
4. Зимняя школа по физике конденсированного состояния. **16–21 марта.**
5. Семинар, посвященный 85-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР В. Н. Грибова. **26 марта.**
6. Рабочее совещание «Малоугловое рассеяние в биополимерах». **23–24 апреля.**
7. Рабочее совещание по неупругому рассеянию нейтронов «Спектрина-2015». **18–19 июня.**
8. Международное совещание “Dzyaloshinskii-Moriya Interaction and Exotic Spin Structures (DMI-2015)”. **26–30 июня.**
9. I Летняя школа по подготовке кадров «Нарова-2015». **28 июня – 3 июля.**
10. Конференция “The Third Annual Conference on Large Hadron Collider Physics” (LHCP2015). **31 августа – 5 сентября.**
11. Совещание по малоугловому рассеянию нейтронов «Муромец-2015». **24–25 сентября.**
12. Международная конференция «Биогеохимические, биофизические и астробиологические исследования на российской станции „Восток“ в Антарктиде: заделы и перспективы». **25–27 сентября.**
13. Международная научно-практическая конференция «Адронная терапия и ядерная медицина». **5–7 октября.**
14. Конференция молодых ученых «КМУС-2015». **11–13 ноября.**
15. Совещание «Школа поляризованных нейтронов в Гатчине» (Школа ПН – 2014). **17–18 декабря.**

Также в течение 2015 г. сотрудники ПИЯФ НИЦ КИ участвовали в 139 российских и международных конференциях в качестве докладчиков.

Основные результаты научной деятельности 2015

Техническое редактирование и оформление обложки *Т. А. Парфеева*
Редакторы: *А. М. Архипова, Е. Ю. Оробец, Н. В. Силинская*
Компьютерная обработка и верстка: *Е. В. Веселовская,
А. Б. Кудрявцева, Т. А. Парфеева*

Отпечатано в издательско-полиграфическом отделе
ПИЯФ НИЦ КИ на Konica Minolta bizhub PRO C1060L

188300, Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща
Зак. 206, тир. 250, уч.-изд. л. 13; 31.05.2016 г.