



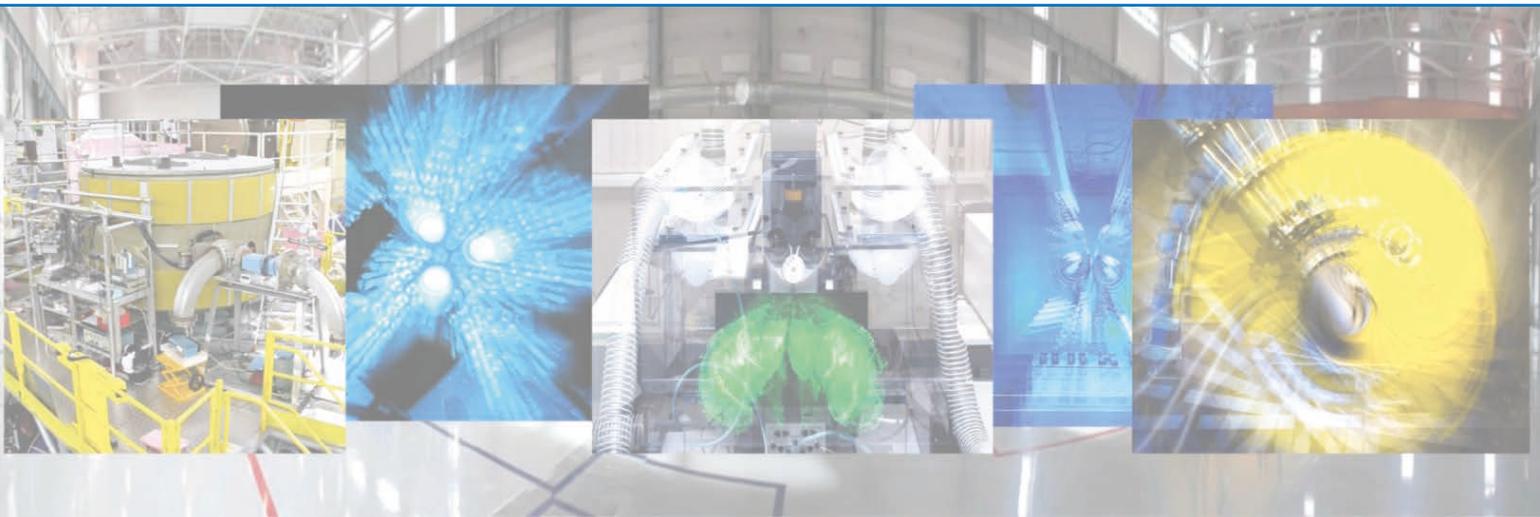
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Б. П. КОНСТАНТИНОВА  
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



Основные результаты  
научной деятельности  
**2016**



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Б. П. КОНСТАНТИНОВА  
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



# Основные результаты научной деятельности 2016

Гатчина • 2017

**Научные редакторы:**

В. Л. Аксенов  
В. В. Воронин  
С. В. Саранцева

**Составители:**

Г. Д. Алхазов  
С. А. Артамонов  
А. А. Воробьев  
С. И. Воробьев  
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 2016. –**

Гатчина Ленинградской обл.: Издательство НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2017. – 152 с.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных результатов научных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ за 2016 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 978-5-86763-393-6

© НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2017

# Оглавление

- 5** Введение
- 9** Научные отделения
- 27** Теоретическая и математическая физика
- 45** Исследования с использованием нейтронов, фотонов и мюонов
- 67** Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино
- 93** Молекулярная и радиационная биофизика
- 105** Ядерная медицина (производство изотопов, лучевая терапия, био- и нанотехнологии для медицины)
- 111** Физика ядерных реакторов и ускорителей
- 121** Прикладные исследования и разработки
- 131** Базовые установки
- 135** Научно-организационная деятельность



МОНГОЛ УЛАМЫН  
ХАМГААГА

## Введение

Федеральное государственное бюджетное учреждение «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. В 2016 г. Институт отмечал 45-летие со дня образования.

Научные работы сотрудников Института отмечены Ленинской и Государственными премиями, премиями Правительства Российской Федерации, академическими премиями. Три сотрудника избраны действительными членами, восемь сотрудников – членами-корреспондентами Российской академии наук. В настоящее время в Институте работает 1 906 человек, из них 581 научный сотрудник, 69 докторов и 254 кандидата наук. Один сотрудник является действительным членом, трое 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 направ-

лениям 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 декабря 2015 г. переведен в режим длительного останова в связи с окончанием лицензии на эксплуатацию. Протонный синхротрон ЦЦ-1000, построенный в 1970 г., работал в 2016 г. 3 225 ч. Впервые выведен на проектные параметры изохронный циклотрон Ц-80 по ускорению отрицательных ионов водорода, имеющий энергию выведенного протонного пучка в диапазоне 40–80 МэВ. В 2016 г. продолжались работы по реализации инвестиционных проектов по модернизации и реконструкции инженерно-технических систем реакторного комплекса ПИК (РК ПИК).

2016 год стал важным этапом на пути создания РК ПИК. Бюджетом Российской Федерации поддержано выполнение проектов по модернизации инженерно-технических систем обеспечения и реконструкции лабораторного комплекса научно-исследовательского РК ПИК, предполагающих энергетический пуск в 2018 г. С целью реализации этих проектов в НИЦ «Курчатовский институт» был создан оперативный штаб по подготовке к энергопуску РК ПИК, в который вошли ключевые руководители НИЦ «Курчатовский институт», НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, главный конструктор, генеральный проектировщик и основные подрядные организации. Штабу даны широкие полномочия для управления проектом, руководителем оперативного штаба назначен директор Института профессор Д. Ю. Минкин.

2016 год был насыщен событиями научной и общественной жизни. 7–8 февраля проводилось празднование в Институте Дня российской науки. Программу, подготовленную Советом молодых ученых и специалистов, открыл торжественный Ученый совет, на котором были вруче-



ны именные стипендии для молодых ученых Института в честь выдающихся деятелей науки, еще не так давно трудившихся в стенах Института: стипендия им. В. Н. Грибова за работы в области теоретической физики, стипендия им. Г. М. Драбкина за работы в области физики конденсированного состояния, стипендия им. В. М. Лобашева за работы в области ядерной физики, стипендия им. С. Е. Бреслера за работы в области биологии. Программа включала также посещения Института школьниками и занятия с ними. Завершил праздник зимний бал.

В первой половине марта состоялась юбилейная, 50-я Зимняя научная школа ПИЯФ. Школа включала лекции известных ученых, семинары и выступления участников по всем ключевым направлениям: физике атомного ядра и элементарных частиц, физике и технике реакторов, теоретической физике, физике конденсированного состояния и, после долгого перерыва, биофизике и молекулярной биологии. В работе 50-й Зимней научной школы приняли участие более 500 ученых и специалистов, представляющих Институт и другие ведущие научные организации России и зарубежья. Кроме того, в 2016 г. Институт организовал 13 научных конференций, среди которых можно отметить мероприятия, подготовленные молодыми сотрудниками: масштабное культурное мероприятие – деловая игра «ПИЯФ-2020», Моло-

дежная школа реактора ПИК, III Конференция молодых ученых и специалистов, которая в этом году впервые проходила в формате молодежного научного форума под названием “Open Science 2016”. Форум проходил на РК ПИК, который в 2018 г. станет основой Международного центра нейтронных исследований мирового уровня.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных результатов научных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в 2016 г. Это описание предваряют обзоры руководителей научных отделений основных направлений 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 569 статьях в ведущих российских и международных реферируемых журналах и представлены на 130 российских и международных конференциях.

В заключительном разделе дана общая информация об Институте.



Директор Института  
профессор Д. Ю. Минкин



Научный руководитель Института  
член-корреспондент РАН В. Л. Аксенов

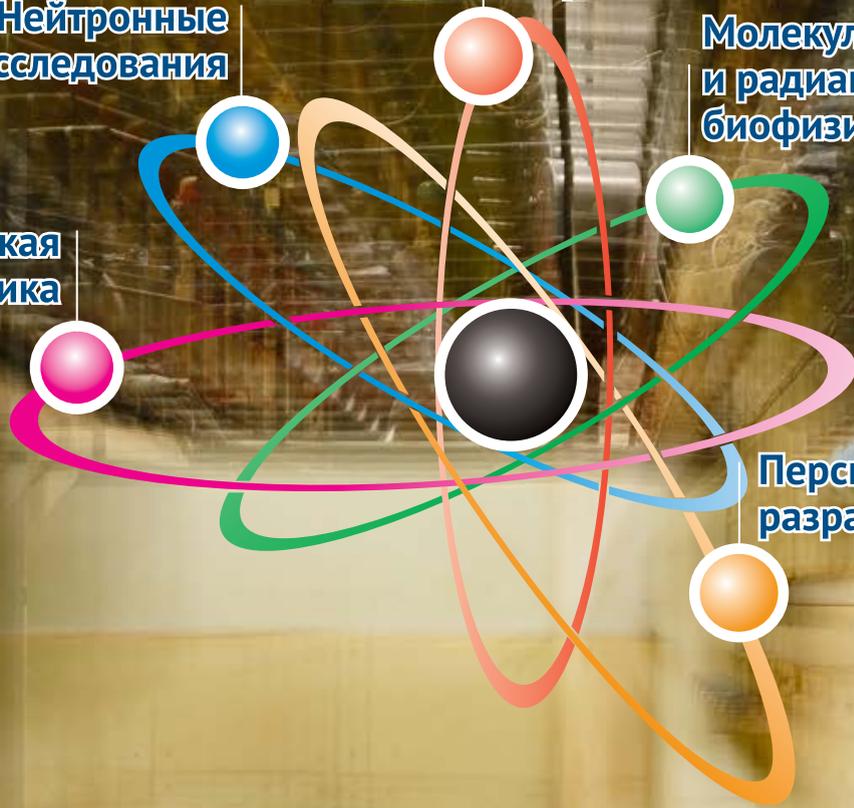
**Физика высоких энергий**

**Молекулярная и радиационная биофизика**

**Нейтронные исследования**

**Перспективные разработки**

**Теоретическая физика**



## Научные отделения

- 10** Отделение теоретической физики
- 13** Отделение нейтронных исследований
- 17** Отделение физики высоких энергий
- 20** 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);
- физики высоких энергий (и. о. заведующего д. ф.-м. н. В. Ю. Петров);
- теории конденсированного состояния (заведующий д. ф.-м. н. С. Л. Гинзбург);
- теории ядра (заведующий д. ф.-м. н. М. Г. Рыскин);
- теории атома (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 квантовой теории поля до физики ядерных реакторов.

Рассеяние при высоких энергиях – традиционная тема исследований в ОТФ. В течение долгого времени работы сотрудников Отделения определяли мировой уровень в данной области. В 2016 г. в работах Л. Н. Липатова и др. было продолжено исследование уравнения Балицкого – Фадиной – Кураева – Липатова (БФКЛ), определяющего асимптотику амплитуд рассеяния при высоких энергиях. В 2016 г. в работах Л. Н. Липатова и др. БФКЛ-померон был рассмотрен в модели Хиггса с бегущей константой связи. Вычислен спектр померонов в  $j$ -плоскости с учетом бегущей константы связи, что позволяет судить о поведении амплитуд рассеяния при высоких энергиях в этой теории, которая является прототипом Стандартной модели (СМ).

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 в пространстве анти-де Ситтера, и оба подхода являются точно решаемыми. Фактически дуальность выражается в связи аномальных размерностей операторов в суперсимметричной теории со спектром струны в пространстве анти-де Ситтера. В последнее время Н. А. Громовым и др. был предложен общий метод вычисления аномальных размерностей произвольных операторов, основанный на так называемом методе алгебраической кривой. Используя этот метод в работе В. Н. Велижанина, представленной в настоящем сборнике, удалось вычислить аномальные размерности в семипетлевом приближении, что является своеобразным рекордом. Метод вычисления приводит к необходимости решения больших систем диофантовых уравнений.

Невылетание кварков остается наиболее интересным и до сих пор непроявленным явлением в квантовой хромодинамике (КХД). Конфайнмент все еще недоступен для прямых исследований непосредственно в КХД, поэтому для его изучения приходится использовать более простые (имеющие более высокую симметрию) тео-

рии, такие как суперсимметричные (SUSY) теории Янга – Миллса. В работах А. В. Юнга эти теории изучаются на протяжении многих лет, и теперь механизм невылетания в этих теориях полностью выяснен. Возможно, это не совсем то, что требуется для объяснения невылетания в природе, однако был открыт целый ряд новых интересных непертурбативных явлений. В работе, представленной в настоящем сборнике, изучаются неабелевы струны, возникающие в суперсимметричных теориях. Показано, что при определенных условиях возникает струна, свойства которой близки к наблюдаемым в природе. Построенная теория струны остается критической (т. е. не содержит ультрафиолетовых расходимостей) в пространстве четырех измерений.

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. Альтернативным вариантом является слабосвязанное состояние двух адронов с открытым чармом. В работе 2016 г. анализируются обе эти возможности, вычислены свойства пентакварка в каждом из сценариев и предсказаны новые состояния пентакварков. Показано, что измерение отношения вероятностей распадов пентакварков на состояния с открытым и скрытым чармом может дать ответ на вопрос, какой из сценариев реализуется в природе.

В работах М. Г. Рыскина и др. изучается эксклюзивное рождение  $J/\psi$ -мезонов при энергиях БАК. Уже давно было предложено использовать этот процесс как способ очень точного измерения глюонной структурной функции при малых  $x$ . К сожалению, оказалось, что первоначальные вычисления не учитывали ряд поправок (степенных и дважды логарифмических), которые оказываются велики. В работе 2016 г., вошедшей в сборник, указывается, как можно учесть эти поправки и все же извлечь структурную функцию с достаточно высокой точностью.

Идеи, позволяющие объяснить происхождение иерархии масс кварков и свойства матри-

цы Кобаяши – Маскавы в СМ, продолжают привлекать внимание теоретиков. Одним из наиболее популярных расширений СМ является идея «зеркальной симметрии». В работах И. Т. Дятлова 2016 г. показано, как в рамках «зеркальной симметрии» можно объяснить, с одной стороны, факт отсутствия иерархии в спектре нейтрино и, с другой стороны, иерархию масс кварков и лептонов. Оказывается, что для этого требуется так называемый инверсный порядок масс нейтрино, причем легчайшее нейтрино имеет массу менее 0,1 эВ.

Одним из ярких проявлений расширения СМ, доступных экспериментальному обнаружению, мог бы стать процесс двойного бета-распада. В работе Е. Г. Друкарева обсуждается влияние электронной оболочки на этот процесс. Электронная оболочка сдвигает энергии вылетающих электронов к меньшим значениям. Этот сдвиг вычислен для германия и ксенона и составляет несколько сотен электронвольт.

Теоретическая физика конденсированного состояния представлена в сборнике тремя работами. Работа А. В. Сыромятникова и А. В. Сизанова посвящена исследованию фазы бозе-стекла. Такая фаза может возникнуть в системе взаимодействующих бозе-частиц. Теория бозе-стекла, предложенная недавно в работах Фишера и др., однако, не подтверждается на эксперименте. В работе, вошедшей в сборник, предлагается новая теория упорядоченной фазы вблизи фазы бозе-стекла. Она позволяет обобщить сценарий, предложенный в работе Фишера. Показано, что он реализуется только в непосредственной близости от критической точки, не достигнутой пока на эксперименте. Этот режим переходит в перколяционный сценарий, который также является универсальным, но скейлинговый анзац Фишера перестает работать. Предложенная теория хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Работа Н. Е. Савицкой посвящена теории лавин – явлений, характерных для динамики сложных систем. Рассмотрен вопрос о стабилизации лавинообразных процессов, т. е. о возможности уменьшения их размеров и частоты возникновения катастрофических событий. Показано, что лавины, развивающиеся на динамической

решетке, оказываются в общем случае стабильнее, чем в статическом.

В течение ряда последних лет В. В. Шагинян и др. развивают теорию новой фазы вещества, основанную на явлении так называемой фермионной конденсации. Гипотеза о фермионной конденсации с единой точки объясняет большое количество необычных свойств различных материалов, открытых в последние годы. В статье, вошедшей в сборник, подведены итоги этих исследований.

Физической теории вихрей и ураганов посвящена работа В. Г. Горшкова, А. М. Макарьевой и А. В. Нефедова, в которой обсуждается источник осадков в радиусе сотен километров от эпицентра

урагана. Показано, что количество осадков непосредственно связано со скоростью перемещения урагана.

Реакторная тематика представлена в сборнике работой М. С. Онегина, где демонстрируются возможности программной оболочки MURE для нейтронно-физических расчетов реактора ПИК. Полностью рассчитана кампания реактора ПИК со штатными и модифицированными твэлами.

Сотрудниками ОТФ в 2016 г. опубликовано 109 исследовательских работ в рецензируемых журналах (88 статей в зарубежных изданиях), 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 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);
- рентгеновской и гамма-спектроскопии (заведующий д. ф.-м. н. В. В. Федоров);
- молекулярных и атомных пучков (заведующий к. ф.-м. н. В. Ф. Ежов)

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).

Отдел исследования 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).

Научно-технические отделы:

- 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 165 научных сотрудников, из них 16 докторов наук, 63 кандидата наук.



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

Основными направлениями деятельности ОНИ являются фундаментальная и прикладная физика. Большинство сотрудников научных отде-

лов и практически все сотрудники научно-технических подразделений принимают участие в создании реакторного комплекса ПИК (РК ПИК). В последние годы появилось еще одно важное направление – преподавательская деятельность в вузах Санкт-Петербурга, ее основной целью является воспитание молодых ученых, которые

через несколько лет станут основой научного персонала Международного центра нейтронных исследований на базе РК ПИК.

В области научных исследований Отделение в основном сосредоточено на проведении работ в области физики ядра и элементарных частиц и физики конденсированного состояния.

В 2016 г., как и во все последние годы, большие успехи достигнуты в области физики нейтрино. В рамках коллаборации Borexino проведен поиск корреляции 2 350 гамма-всплесков (ГВ) с данными детектора Borexino, собранными в период с декабря 2007 по ноябрь 2015 г. Никаких статистически значимых корреляций не обнаружено. Установлены наиболее строгие ограничения на флюенс нейтрино и антинейтрино, связанный с ГВ, при энергиях менее 7-8 МэВ.

НИЦ КИ – ПИЯФ и НИЦ КИ участвуют в работе коллаборации DarkSide с момента образования

в 2010 г. DarkSide-50 – двухфазный жидкоаргоновый 46-килограммовый детектор, созданный для поиска рассеяния частиц темной материи на ядрах Ar. В 2016 г. впервые в мире в установке использовался подземный аргон, в котором содержание радиоактивного изотопа  $^{39}\text{Ar}$  в 1 400 раз меньше, чем в атмосферном аргоне. В результате 71-суточных измерений установлены новые, наиболее строгие для ядер Ar, ограничения на спин-независимое сечение взаимодействия и массу массивных слабодействующих частиц WIMP.

Для поиска осцилляций нейтрино в стерильное состояние в июне 2016 г. в нейтринной лаборатории ПИЯФ – НИИАР на реакторе SM-3 в Димитровграде установлен детектор сотового типа с 16 секциями. Проведены измерения потока антинейтрино в зависимости от расстояния  $L$  от активной зоны реактора. Измерение потока антинейтрино от реактора при помощи перемещаемого детектора на малых расстояниях 6–12 м проводилось впервые. Главные трудности эксперимента связаны с космическим фоном, что сильно уменьшает точность измерений. В условиях доступной статистической точности не обнаружено каких-либо отклонений плотности потока нейтрино от закона  $1/L^2$ , где  $L$  – расстояние до центра реактора. Результаты измерений в диапазоне 10–12 м требуется продолжить для достижения большей точности.

Измерение времени жизни свободного нейтрона методом хранения ультрахолодных нейтронов (УХН) в криогенной материальной ловушке с гравитационным запирающим светом на проблему расхождения времени жизни нейтрона, измеренного «пучковым» методом, и времени жизни нейтрона, измеренного методом «хранения». Окончательным результатом эксперимента 2016 г. можно считать значение времени жизни нейтрона  $880,3 \pm 0,8_{\text{stat}} \pm 0,8_{\text{sys}}$ .

Продолжаются кристалл-дифракционные исследования фундаментальных свойств и взаимодействий нейтрона. Готовится эксперимент по проверке эквивалентности инертной и гравитационной масс нейтрона новым методом, основанным на использовании эффектов, возникающих при дифракции нейтронов в больших совершенных кристаллах. Основная особенность

предлагаемого метода заключается в прямой компенсации гравитационной силы, действующей на нейтрон, силой инерции, действующей на нейтрон в неинерциальной системе координат, связанной с Землей. В течение 2016 г. проведены испытания пространственного разрешения установки. Обнаружено снижение пространственного разрешения при углах Брэгга  $> 78^\circ$ .

Продолжалось изучение динамики деления ядер нейтронами. В 2016 г. проведено детальное исследование измеренных ранее на реакторе ИЛЛ (Гренобль, Франция) TRI- и ROT-эффектов в тройном делении для четырех делящихся ядер  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ . Установлено, что указанные эффекты имеют место для всех исследованных ядер, но при этом значительно различаются как по знаку, так и по абсолютному значению.

Продолжались исследования механизма эмиссии мгновенных нейтронов в делении ядер в рамках эксперимента CORA. В результате анализа данных, полученных на первом этапе экспериментальных исследований, удалось получить оценку величины коэффициента анизотропии эмиссии мгновенных нейтронов деления  $^{252}\text{Cf}$  в системе центра масс осколка деления.

В 2016 г. завершена работа, проводимая в рамках проекта МАГАТЭ CRP “Prompt Fission Neutron Spectra of Actinide Nuclei”. Проведены измерения интегральных спектров мгновенных нейтронов при делении  $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  тепловыми нейтронами и при спонтанном делении  $^{252}\text{Cf}$ ; выполнена их совместная оценка с данными других экспериментов; даны рекомендации по использованию оцененных спектров при проектировании новых энергетических установок и при проведении модельных расчетов.

Для поиска наиболее перспективных систем ультрахолодных многозарядных ионов и молекул в ОНИ разработан пакет программ для расчетов свойств атомов с учетом корреляционных и релятивистских эффектов. В 2016 г. к этому пакету добавлены программы, позволяющие учитывать основные квантово-электродинамические поправки и эффективные трехэлектронные взаимодействия. Также разрабатываются методы охлаждения и удержания таких ионов для проведения с ними прецизионных экспериментов.

Большое место в научной деятельности ОНИ занимает исследование функциональных материалов и новых физических явлений в них.

Продолжается цикл работ по решению фундаментальной научной проблемы: экспериментальному установлению основных квантовых состояний в низкоразмерных магнетиках. Физика низкоразмерного магнетизма является новым, одним из наиболее интересных и активно развивающихся последние годы направлений современной науки, т. к. в низкоразмерных магнетиках квантовая суть материи проявляется наиболее ярко, и становится возможным экспериментально наблюдать и применять в дальнейшем множество неклассических квантовых кооперативных эффектов. В ОНИ проводятся многосторонние систематические исследования статических и динамических магнитных характеристик широкого класса квазидвумерных магнетиков с различной геометрией обменных связей и выявления нетривиальных типов основного состояния таких систем. В настоящий момент исследуются соединения с треугольной магнитной подрешеткой и катионной подрешеткой типа «пчелиных сот» в слое. В 2016 г. закончено исследование сложных оксидов  $\text{Li}_3\text{Ni}_2\text{SbO}_6$  и  $\text{Na}_3\text{Co}_2\text{SbO}_6$ . Впервые экспериментально установлено антиферромагнитное (типа зигзага) нетривиальное основное квантовое состояние: зигзагообразные ферромагнитные цепочки, связанные между собой антиферромагнитно в  $ab$ -плоскости.

Проведено исследование монокристаллов квазидвумерных магнетиков  $\text{La}_{1,4}\text{Sr}_{1,6}(\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{O}_7$ . В таких двухслойных манганитах наблюдается гигантская анизотропия магнитосопротивления, связанная со слоистой структурой данных соединений, что приводит к спин-зависимому туннелированию носителей между марганец-кислородными плоскостями. В ходе исследований были обнаружены аномальный рост сопротивления и понижение намагниченности при низких температурах. Следует отметить, что такое поведение физических характеристик является нетипичным для соединений, обладающих эффектом колоссального магнитосопротивления.

Исследованы морфология, магнитные свойства и продольное электрическое сопротив-

ление в многослойных нанокompозитах  $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{C}]_{47}$ , которые содержат 47 аморфных бислоев «металл – диэлектрик / углерод», полученных ионно-лучевым распылением и различающихся толщиной углеродного слоя. Суперпарамагнитные свойства гранул подтверждены результатами СКВИД-магнитометрии. Методом GISAXS определены толщины слоев, характерные размеры металлических гранул и расстояния между ними. Обнаружено, что термоактивированная проводимость таких многослойных структур описывается универсальным законом  $1/2$ , а характеристическая температура линейно уменьшается с увеличением толщины углеродных прослоек.

Проводятся исследования разнообразных уникальных наноструктурных материалов. Анализ данных рассеяния нейтронов в прямом и обратном пространствах позволил расшифровать структуру впервые синтезированных алмазных гидрогелей размерами от единиц до десятков нанометров. Установлено, что формирование ближнего порядка в системе идет последовательно через связывание заряженных частиц (диаметр  $\sim 5$  нм) в пределах первой координационной сферы, объединение таких фрагментов в цепные агрегаты и соединение цепей в сетку (масштаб  $\sim 40$  нм). В нейтронных экспериментах также подтверждена ведущая роль электростатического притяжения несферических кристаллов алмаза, которое прочно стабилизирует структуру геля.

В медицине актуальной проблемой является создание новых наноматериалов, таких как раневые повязки, искусственный хрящ, прекурсор костной ткани. Комплексный анализ экспериментальных данных, полученных при изучении морфологии структуры целлюлозы *Gluconacetobacter xylinus* и органо-неорганических композиционных материалов на ее основе, показал, что исходная гель-пленка представляет собой пористую систему со сложной трехуровневой фрактальной организацией структуры. Выявлено, что как состав, так и агрегатное состояние используемых в процессе синтеза легирующих добавок – наночастиц  $\text{ZrO}_2$ , ионов  $\text{Tb}^{3+}$  в виде низкомолекулярной соли  $\text{TbCl}_3$  и в составе металл-полимерного

комплекса [Tb(PolyLig)](III) – оказывают существенное влияние на структурные характеристики органо-неорганических композитов.

Инструментальная и радиохимическая нейтронно-активационные методики были разработаны для анализа образцов кварц-адулярных жил Милоградского золотосеребряного месторождения. Определены оптимальные условия отделения Pt, Au, Ir, Re, Ag от неблагородных металлов. В результате проведенных измерений было подтверждено наличие платинового оруднения в образцах жил.

Довольно значительная часть сотрудников ОНИ принимает участие в создании экспериментальных станций для РК ПИК. В 2016 г. проведено численное моделирование отдельных элементов установок по физике конденсированного состояния: поляризатора / анализатора для установок МУРН, расчет формирователя пучка для рефлектометра NERO, предварительные расчеты трехосного спектрометра на холодных нейтронах, предварительные расчеты нейтронно-проводной системы (НС) нейтронно-проводного зала РК ПИК. Проведены разработка и оптимизация нейтронно-оптических линий НС ПИК в соответствии с требованиями проектов реконструкции и создания приборной базы РК ПИК; разработаны новые зеркальные системы для поляризации нейтронов и анализа их поляризации. Завершено создание формирователя нейтронного пучка для рефлектометра «РЕФЛЕКС» на реакторе ИБР-2 как

альтернативы для продолжения начатых работ по совершенствованию поляризирующей и неполяризирующей зеркальной оптики при отсутствии нейтронов в НИЦ КИ – ПИЯФ. Завершены расчеты и моделирование первого источника холодных нейтронов (ИХН) и на их основе создан эскизный проект ИХН и НС на ГЭК-3 реактора ПИК.

Реактор ВВР-М планируется оснастить источником УХН. Будет достигнута плотность УХН на уровне  $10^4 \text{ см}^{-3}$ , что на два порядка превосходит плотность УХН в существующих на данный момент источниках по всему миру. Это позволит НИЦ КИ – ПИЯФ стать мировым центром фундаментальных исследований с УХН. Полномасштабная модель источника УХН для реактора ВВР-М, на которой в ноябре 2015 г. был получен сверхтекучий гелий с температурой 1,3 К при тепловой нагрузке 15 Вт, успешно проработала весь 2016 г. Были получены экспериментальные температуры гелия при тепловой нагрузке вплоть до 60 Вт. Даже при такой высокой нагрузке гелий оставался в сверхтекучем состоянии.

Сотрудниками ОНИ в 2016 г. опубликовано 105 статей, в т. ч. 68, индексируемых в базе данных «Сеть науки» / Web of Science, издано 2 монографии, сделано 111 докладов на российских и международных конференциях, получено 6 патентов и 4 свидетельства государственной регистрации специализированных программ и баз данных, защищены 4 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 134 научных сотрудника, из них 16 докторов наук, 69 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

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

### Эксперименты, проводившиеся в 2016 г.

На синхротроне НИЦ КИ – ПИЯФ:

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

- исследование поляризационных эффектов в квазиупругом рассеянии протонов на ядрах;

- изучение  $\eta$ -мезонов, образующихся при бомбардировке ядер  $\pi$ -мезонами;

- изучение магнитных свойств материалов  $\mu$ SR-методом;

- исследования в области кристаллооптики протонов высоких энергий.

Кроме того, проводилось тестирование экспериментального оборудования на специальном стенде на протонном пучке с энергией 1 ГэВ.

В Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН):

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

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

- изучение возможностей кристаллической коллимации пучков БАК (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  $\gamma$ - $p$ - 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  $pp$ -столкновений на Тэватроне);

- EPECUR в НИЦ КИ – ИТЭФ, Москва (поиск узких резонансов в  $p\bar{p}$ -рассеянии).

#### Новые проекты:

- эксперимент PolFusion по исследованию ядерного  $dd$ -синтеза при столкновении поляризованных дейтронов (НИЦ КИ – ПИЯФ);

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

- эксперимент PROTON по измерению радиуса протона на ускорителе MAMI (Майнц, 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 (НИЦ КИ – ПИЯФ);

- проект РИЦ-80 по производству радиоизотопов для медицинского применения на циклотроне Ц-80 (НИЦ КИ – ПИЯФ).

Одним из основных направлений деятельности ОФВЭ является участие в экспериментах

на БАК: эксперименты CMS, ATLAS, LHCb и ALICE. НИЦ КИ – ПИЯФ участвовал в этих экспериментах с начальных стадий проектирования и конструирования 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 Сеансе 2 (2015–2016 гг.) энергия сталкивающихся протонов в БАК была увеличена с 4 ТэВ + 4 ТэВ до 6,5 ТэВ + 6,5 ТэВ. При этом была также увеличена светимость. Анализ новых экспериментальных данных позволил получить более детальную информацию о бозоне Хиггса, а также существенно ограничить области возможного проявления «новой физики» за пределами Стандартной модели. Получено много других важных результатов, среди которых можно отметить наблюдение и исследование новых барионных состояний – пентакварков. В 2016 г. по результатам экспериментов CMS, ATLAS, LHCb и ALICE опубликовано более 280 работ. Авторский список этих публикаций включает 35 ученых из ОФВЭ.

Коллектив Отделения участвует в программах модернизации коллайдерных детекторов. В частности, в рамках программы модернизации детектора ATLAS в НИЦ КИ – ПИЯФ была подготовлена лаборатория для сборки тонкозачерненных камер (ТЗК), предназначенных для передней части мюонного спектрометра детектора ATLAS. В настоящее время идет сборка первого опытного образца. Всего в НИЦ КИ – ПИЯФ должны быть изготовлены 36 квадруплетов ТЗК.

Важный результат был получен в эксперименте UA9 (Лаборатория кристаллооптики заряженных частиц). Впервые продемонстрировано каналирование протонов с энергией 6,5 ТэВ в изогнутых кристаллах. Эксперимент был выполнен непосредственно в кольце БАК с использованием гало

циркулирующего протонного пучка. Тем самым доказана принципиальная возможность кристаллической коллимации пучков БАК. В эксперименте использованы кристаллы, изготовленные в ОФВЭ.

В эксперименте PolFusion (Лаборатория криогенной и сверхпроводящей техники) знаменательным событием явилось создание в ОФВЭ уникальной экспериментальной установки для

исследования  $dd$ -синтеза поляризованных дейтронов. В этом эксперименте также принимают участие ученые из Германии и Италии.

Сотрудниками ОФВЭ в 2016 г. опубликована 361 научная работа в рецензируемых журналах (из них около 350 – в зарубежных), сделано 45 научных докладов на различных российских и международных мероприятиях, защищены 1 докторская и 5 кандидатских диссертаций.

## Отделение молекулярной и радиационной биофизики

Отделение молекулярной и радиационной биофизики (ОМРБ) –

руководитель 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),
- испытательного центра радиофармпрепаратов и других средств медицинского применения (и. о. заведующего к. м. н. А. П. Трашков)
- и научно-технического отдела биоэлектроники (руководитель А. П. Роганов).

В ОМРБ работает 121 научный сотрудник, из них 13 докторов наук, 64 кандидата наук.



**А. Л. Коневега,**  
к. ф.-м. н.,  
руководитель  
Отделения

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

В ОМРБ активно ведутся исследования макромолекулярных комплексов методами малоуглового рассеяния нейтронного и синхротронного излучения, атомно-силовой микроскопии и методами молекулярного моделирования (Лаборатория биофизики макромолекул и Лаборатория молекулярной и клеточной биофизики).

В работе Г. Н. Рычкова и др. впервые в мире были построены полноатомные модели частично собранных нуклеосомных структур: дисомы, тетрасомы и гексасомы. Построенные модели

дали возможность по-новому интерпретировать имеющиеся экспериментальные данные, характеризующие структурные и динамические свойства нуклеосомных частиц, полученные методами атомно-силовой микроскопии, резонансного переноса энергии флуоресценции и малоуглового рентгеновского рассеяния. Существование таких структур регулирует доступ белковых факторов к генетической информации, закодированной в ДНК, и может ускорять процесс транскрипции.

Традиционными для ОМРБ являются исследования молекулярных механизмов ремодуляции хроматина. В работе А. Ю. Конева (Лаборатория генетики эукариот) совместно с иностранными коллегами исследована роль регуляции уровня экспрессии ACF1 в оогенезе дрозофилы. Обнаружено, что ACF1 экспрессируется и в соматических, и в половых клетках, однако заметно обогащен в зародышевых стволовых клетках и ооцитах. Показано, что асимметричная локализация ACF1 в этих клетках зависит от транспорта мРНК *Acf1* с помощью комплекса Bicaudal-D/Egalitarian.

Выделен новый делеционный мутант гена *Acf*, и именно он является истинным нуль-аллелем гена *Acf1*.

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 2016 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. При измерении уровня олигомерного альфа-синуклеина в плазме крови и активности *GBA* показано, что у носителей мутаций наблюдалось более выраженное снижение активности *GBA* и повышение олигомеров альфа-синуклеина, чем у носителей полиморфных вариантов. Это наблюдение проясняет механизм высокого риска развития БП у носителей мутаций в гене *GBA*, а также позволяет 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. Однако следует отметить, что агрегаты амилоидных белков обладают рядом физиологических функций и не всегда связаны с патологическими процессами. Белки мозга *BASP1* и *GAP-43*, расположенные на внутренней поверхности пресинаптической мембраны аксонных окончаний нейронов, являются критически важными для жизнедеятельности организма, участвуют в направленном росте аксонов, синаптической пластичности и нейрорегенерации, способны образовывать олигомеры в при-

сутствии кислых фосфолипидных мембран. В работе О. С. Витюка и В. В. Захарова (Лаборатория биополимеров) исследованиями структур олигомеров *BASP1* и *GAP-43* различными методами установлено, что олигомеры *GAP-43* и *BASP1* состоят из 6-7 и 10–14 мономеров соответственно, а также имеют кольцевое расположение мономеров. На основании полученных результатов предложена модель электростатического ядра, описывающая строение олигомеров *BASP1* и *GAP-43*, согласно которой короткие положительно заряженные (эффektorные) домены, взаимодействуя с молекулами фосфатидилинозитол-4,5-дифосфата или додецилсульфата натрия, образуют альфа-спиральное ядро комплекса. При этом основная часть белковых цепей остается в неструктурированном виде.

Традиционными для ОМРБ являются работы по гомологической репарации генома. Белок *RecA* – центральное звено гомологической рекомбинации у бактерий – является одним из ключевых компонентов рекомбинационной репарации и детально изучается в Лаборатории молекулярной генетики эукариот. В работе Д. М. Байтина показано, что супрессия гиперрекомбиногенного фенотипа является результатом мутаций, блокирующих экспрессию белка *RecAD112R*, а также что рекомбиназные возможности белка *RecA* представляют собой эволюционный компромисс между необходимым уровнем рекомбинационной репарации ДНК и негативными последствиями для роста бактерии.

В ОМРБ на протяжении многих лет ведутся работы по структурно-функциональной характеристике ферментов (Лаборатория энзимологии). В работе С. В. Швецовой исследованы ферментативные свойства новой  $\alpha$ -L-фукозидазы из *Fusarium proliferatum* LE1 (FpFucA). Дана детальная характеристика FpFucA, включающая физико-химические данные и кинетические параметры гидролиза модельного субстрата *n*-нитрофенил- $\alpha$ -L-фукопиранозиды (*p*NPFuc), синтетических  $\alpha$ -L-фукобиозидов с различными типами связи, а также нескольких натуральных фукоолигосахаридов. Исследована способность данного фермента катализировать реакции трансгликозирования с разными типами акцепторов.

В ОМРБ ведутся работы по созданию методов диагностики различных заболеваний, например злокачественных опухолей – глиобластом (Лаборатория клеточной биологии). Одним из подходов создания диагностики может быть протеомный путь поиска биомаркеров глиобластомы. Известно, что многие белки отличаются большим количеством протеоформ, и предполагается, что эти формы могут быть потенциальным источником высокоспецифичных биомаркеров глиобластомы. В работе С. Н. Нарыжного получен протеомный профиль глиобластомы высокой степени злокачественности с помощью виртуально-экспериментального 2D-электрофореза. Использование оригинального метода секционирования геля 2D-электрофореза на 96 секций с масс-спектрометрией (ESILC-MS/MS) позволило идентифицировать на порядок большее количество протеоформ – 16 012 (кодируемых 4 050 генами) против 1 542 (кодируемых 600 генами) – обычным способом.

В работе В. А. Рыжова (Лаборатория биофизики макромолекул) при использовании оригинальной методики измерения второй гармоники нелинейного отклика  $M_2$  на слабое магнитное поле в параллельном ему постоянном поле показано селективное накопление магнитных частиц Hsp70–SPION в инфарктной зоне миокарда. Это открывает возможность адресной доставки лекарственных средств в область поражения с помощью конъюгата Hsp70–SPION.

Исследование низких доз излучения радиоактивного изотопа  $^{69}\text{Yb}$  на пролиферацию и гибель клеток человека в культуре показало, что источники на основе изотопа  $^{169}\text{Yb}$  обладают выраженным антипролиферативным эффектом, реализующимся в индукции апоптотической гибели потомков облученных клеток. Полученные

результаты могут представлять интерес для клинического применения брахитерапии с иттербиевыми источниками.

В ОМРБ ведутся работы по изучению озерной воды и льда подледникового озера Восток, расположенного под четырехкилометровым ледовым щитом в Антарктиде (Лаборатория криоастробиологии). Исследуется вопрос возможного существования микробной жизни в озере Восток. Получены результаты молекулярно-микробиологического анализа доступных проб озерной воды, вошедшей в скважину после первых двух вскрытий озера и замерзшей в ней. ДНК-анализ проб озерной воды разной степени загрязненности жидкостью для бурения обнаружил неидентифицированную и неклассифицированную бактерию w123-10 (менее 86 % сходства с ближайшими таксонами), которая показала отдаленное родство с неидентифицированной бактерией AF532061 (92 % сходства с ближайшими таксонами) из озерного льда. Эти две бактерии могут представлять неизученную микробную жизнь, существующую в водной толще подо льдом озера Восток. Однако эта гипотеза требует дальнейшего подтверждения.

В 2016 г. в Отделении создано новое научное подразделение – испытательный центр радиофармпрепаратов и других средств медицинского применения, в задачи которого входят проведение доклинических испытаний, разработка биомоделей социально значимых заболеваний человека, а также объединение компетенций различных подразделений Института для проведения исследований в области биомедицины.

Сотрудниками ОМРБ в 2016 г. опубликовано более 60 работ в рецензируемых журналах, из них 22 – в зарубежных. Сделано более 40 докладов на международных конференциях.

## 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),

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);
- научно-технического – информационных технологий и автоматизации (заведующий С. Б. Олешко), в состав которого входит Лаборатория информационно-вычислительных систем (и. о. заведующего С. Б. Олешко), и группы протонной терапии (и. о. в. н. с. Д. Л. Карлин).

В ОПР работает 151 научный сотрудник, из них 3 доктора наук, 15 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, позволяющий проводить широкий круг научных и прикладных исследований в различных областях: от ядерной физики до медицины. В 2016 г. на синхротроне НИЦ КИ – ПИЯФ появилась уникальная система, позволившая значительно расширить диапазон энергий протонов, доступных для проведения экспериментов. На этом пучке начал функционировать специализированный центр радиационных испытаний с энергией протонов от 60 до 1 000 МэВ, включающий современное рабочее место с системами диагностики пучка, новейшими приборами дозиметрии, автоматизированной системой обработки результатов и оптимальной инфраструктурой для пользователей. Также силами Лаборатории радиационной физики разработаны абсолютные мониторы с диаметром ка-

мер 10 и 20 см для измерения параметров пучков протонов с большим поперечным сечением и с энергиями в диапазоне 50–1 000 МэВ. С использованием этих камер проведены измерения потоков протонов с энергиями от 64 до 1 000 МэВ.

В 2016 г. в ОПР силами Ускорительного отдела НИЦ КИ – ПИЯФ и НИИЭФА им. Д. В. Ефремова осуществлен запуск изохронного циклотрона Ц-80, предназначенного для создания пучка протонов с энергией 40–80 МэВ и током до 100 мкА. Высокая энергия ускоренного пучка в сочетании с высокой интенсивностью позволят производить радиоизотопы и радиофармпрепараты высокого качества, недоступные для коммерческих циклотронов, в частности генераторные изотопы  $^{82}\text{Sr}$  и  $^{68}\text{Ge}$ . В проекте предусмотрена возможность сепарации изотопов с помощью магнитного сепаратора. Использование масс-сепаратора для электромагнитного разделения получаемых радионуклидов обеспечит получение широкого спектра сверхчистых радионуклидов (лучше  $1 \cdot 10^{-4}$ ) как для диагностики, так и для терапии. Высокая энергия пучка позволит также создать на базе циклотрона первый в стране офтальмологический центр для радиационной терапии раковых заболеваний глаза. Такая технология лечения обладает высокой эффективностью, широко применяется за рубежом и востребована медицинским сообществом.

В настоящее время стандарты ведущих стран мира предусматривают обязательные испытания радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры, используемой в авиационной и космической технике, относительно воздействия потоков нейтронов со спектром, подобным атмосферному спектру нейтронов, и высокоэнергичных протонов, составляющих основную компоненту космического излучения. В НИЦ КИ – ПИЯФ действуют два универсальных центра испытаний радиационной стойкости, в которых можно будет проводить радиационные испытания радиоэлектроники как на пучке протонов с энергией от 100 до 1 000 МэВ, так и на пучке нейтронов со спектром, повторяющим спектр атмосферных нейтронов. В 2016 г. на проведение этих испытаний для госкорпорации «Роскосмос» было использовано около 20 % рабочего времени синхроциклотрона.

Лаборатория голографических информационно-измерительных систем (ЛГИИС) 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. В 2016 г. сотрудниками опубликованы результаты многолетней работы, обосновывающие метод синтеза апертуры интерференционного поля в оптическом диапазоне. Применение этого метода позволяет изготавливать широкоапертурные ультрапрецизионные линейные дифракционные решетки, используемые при создании линейных и угловых датчиков для измерительных систем, обладающих рекордной точностью.

Отдел информационных технологий и автоматизации обеспечивает работу локальной вычислительной сети Института, включая вычислительный кластер, а также узла ГРИД-сети WLCG в НИЦ КИ – ПИЯФ. В 2016 г. одним из основных направлений деятельности отдела стало создание центра обработки данных на реакторе ПИК. С вводом в эксплуатацию этого центра в 2017 г. вычислительные возможности для сотрудников Института значительно возрастут. В этом же отделе в 2016 г. совместно с ОМРБ впервые был разработан и изготовлен микрочип для биологических исследований (ангиочип для исследования сочетательного влияния ангиогенных факто-

ров на процесс образования микроциркуляторного русла *ex vivo*).

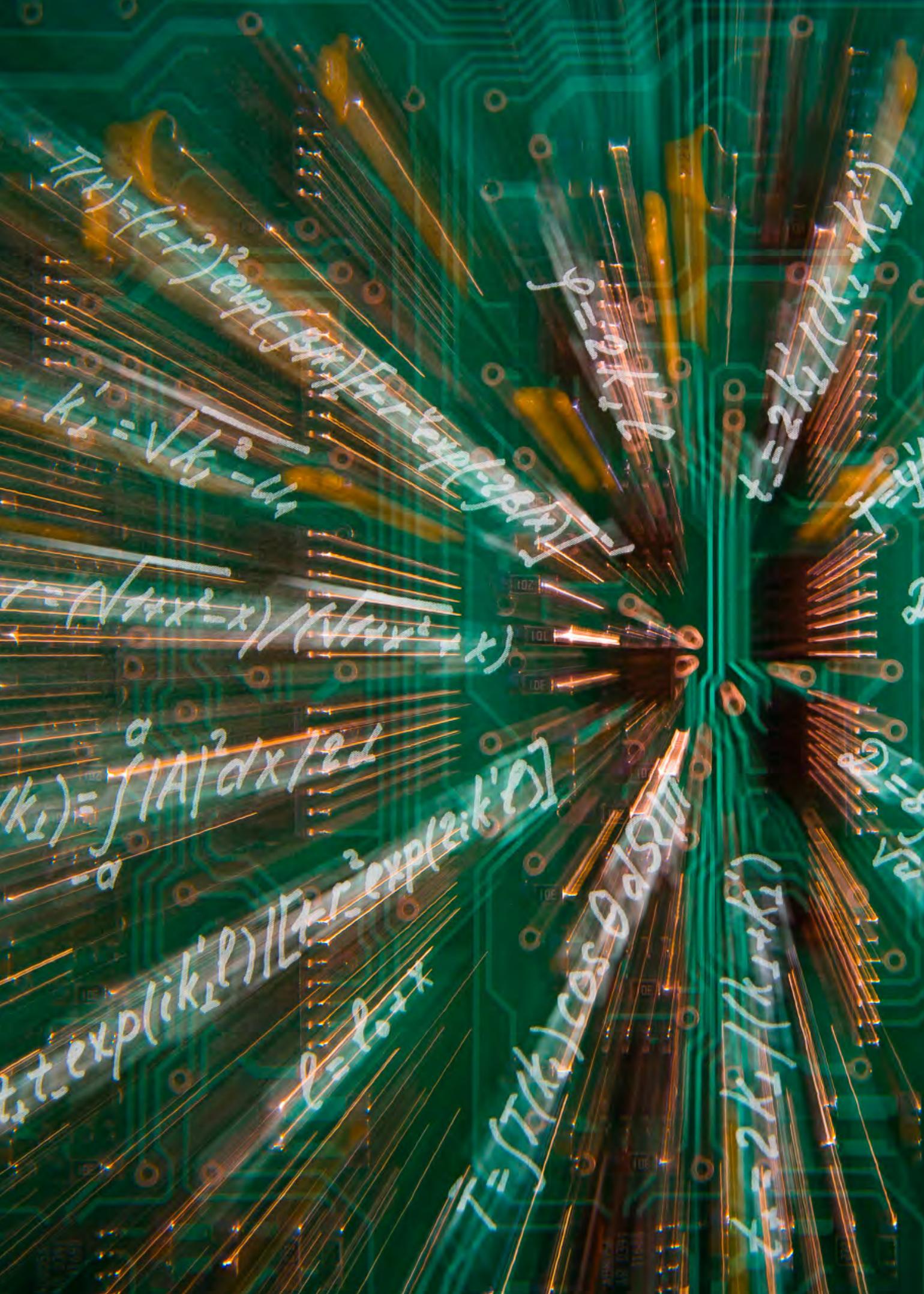
Открытие подледникового озера Восток в Антарктиде стало последним географическим открытием XX века. Его исследование позволит получить уникальные данные о происхождении и эволюции форм жизни в экосистемах, характеризующихся крайне высокой степенью олиготрофности (т. е. низкой концентрацией питательных веществ) и экстремальными условиями. НИЦ КИ – ПИЯФ является головной организацией по исследованию водной толщи озера. В этой программе активно участвуют сотрудники ОНР, ОМРБ и ОНИ. Перед Институтом стоит сложнейшая техническая задача разработки такой технологии проникновения в толщу водной среды озера, при которой будет исключено загрязнение озера буровой жидкостью, заполняющей скважину. В 2016 г. в НИЦ КИ – ПИЯФ изготовлено и отправлено на станцию Восток оборудование, предназначенное для отбора проб воды подледникового озера, проведения съемок в скважине и измерения содержания кислорода в воде.

Основным направлением развития работ Лаборатории квантовой химии 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. Данные расчетов коэффициента усиления величины электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона использованы в наилучшем на сегодня эксперименте по поиску ЭДМ электрона на молекуле ThO.

Сотрудниками ОНР в 2016 г. опубликовано 35 работ (и более 100 в соавторстве с учеными коллаборации ATLAS), сделано 33 доклада на российских и международных научных конференциях, проведено 2 международных конференции, получены 4 гранта, защищены 2 кандидатские диссертации.



8 ноября 2016 г. на изохронном циклотроне Ц-80 НИЦ КИ – ПИЯФ был получен выведенный пучок протонов с проектными параметрами. С пуском этой установки перед Институтом ставятся новые задачи, связанные с ее практическим применением



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

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

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

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

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

$$l = 2a + x$$

$$T = \int T(k) \cos \theta \sin \theta dk$$

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

$$\phi = 2k_1 l$$

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

$$T = \int T(k) \cos \theta \sin \theta dk$$

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

# Теоретическая и математическая физика

- 28 БФКЛ-померон в хиггсовской модели с бегущей константой связи
- 29 LHCb-пентакварки: аналог дейтона или хадрочармониум
- 30 Структуры спектра масс нейтрино и смешивания лептонов. Результат нарушенной зеркальной симметрии
- 31 Эксклюзивное рождение  $J/\psi$ -мезонов как способ измерения плотности глюонов при малых  $x$
- 32 Сильно коррелированные ферми-системы как новое состояние вещества
- 33 Неабелевы струны в суперсимметричных теориях
- 34 Перколяционный сценарий вблизи перехода из упорядоченной (сверхтекучей) фазы в фазу бозе-стекла
- 35 Интегрируемость и АдС/КТП-соответствие
- 36 Стабилизация лавинообразных процессов на динамических сетях
- 37 Роль электронной оболочки в двойном бета-распаде
- 38 Адаптация программы MURE для управления нейтронно-физическими расчетами реактора ПИК
- 39 Квантово-химическое моделирование электронной структуры соединений сверхтяжелых элементов
- 41 Лазерное охлаждение и прецизионная спектроскопия соединений радия для поиска «новой физики»
- 42 Поиск «новой физики» с помощью атомов и молекул
- 43 Осадки и пропационная скорость ураганов

## БФКЛ-померон в хиггсовской модели с бегущей константой связи

Л. Н. Липатов

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В работе из уравнения Балицкого – Фаина – Кураева – Липатова (БФКЛ) вычисляется спектр померонов  $\omega$  в  $j$ -плоскости для полевых теорий с калибровочной группой  $SU(N_c)$ :

$$\omega \Psi_\omega(k) = \int \frac{d^2 k'}{2\pi} \alpha_s(k, k') K(k, k') \Psi_\omega(k'), \quad \omega = j - 1,$$

вне рамок главного логарифмического приближения  $\alpha_s \ln s \sim 1$ , когда учитываются эффекты бегущей константы связи  $\alpha_s(k, k')$ . В области малых поперечных импульсов  $|k| \sim \Lambda_c \approx 200$  МэВ вместо обычной для квантовой хромодинамики (КХД) трансмутации размерности эффективная масса глюона  $m \approx 0,54$  ГэВ генерируется за счет эффекта Хиггса в согласии с вычислениями на решетках. В работе используются различные формы параметризации  $\alpha_s$ , в частности так называемый триумвират констант связи

$$\alpha_s(k, k') = \frac{\alpha_s(k') \alpha_s(k - k')}{\alpha_s(k)}, \quad \alpha_s(k) = \frac{1}{\beta \ln \frac{k^2}{\Lambda_c^2}},$$

где  $\beta = \frac{11}{12} N_c - \frac{1}{6} n_f$  – первый коэффициент функции Калана – Симанчика. Спектр померонов  $\omega_n$  в плоскости  $t$ -канального углового момента  $j$  вычислен приближенно с использованием дискретизации интегрального уравнения БФКЛ и квазиклассически путем сшивки в области  $|k| \geq m$  двух решений. Одно из решений отвечает большим  $k$ , где можно пренебречь массой глюона, а другое получается из уравнения путем «заморозки» бегущей константы связи  $\alpha_s$  при  $|k| \sim m$ . Их сшивка приводит к дискретному

спектру померонов при нулевом переданном импульсе  $\sqrt{-t} = 0$  следующей формы:

$$\omega_n = \frac{0,4085}{n - \frac{1}{4}}, \quad n = 1, 2, \dots$$

Для больших  $n$  квазиклассический подход подтверждается прямыми вычислениями собственных значений интегрального ядра уравнения БФКЛ. Однако положение лидирующего реджевского полюса  $\omega_n$  с  $n = 1$  сильно зависит от деталей сшивки решений в области конфайнмента  $|k| \sim m \sim \Lambda_c$  (в частности, от выбора формы зависимости  $\alpha_s$  от  $k$  и  $k'$ ). В то же время прямые вычисления  $\omega_1$  хорошо согласуются с результатами, полученными с помощью вариационного принципа. Эти вычисления также важны для исследования непрерывного спектра померонов в области  $\omega < 0$ , дающего значительный вклад в соотношение полноты для собственных функций ядра БФКЛ. В работе показано, что в модели Хиггса плотность непрерывного спектра испытывает скачок при некоторых отрицательных значениях  $\omega$ , отвечающих возможному распаду померона на составляющие глюоны. Такое изменение плотности померонов, связанное с их де-конфайнментом, могло бы иметь место в реальной КХД, но его исследование требует выхода за рамки теории возмущений. Возможная модификация КХД на малых расстояниях за счет «новой физики» (например, суперсимметрии) тоже влияет на спектр померонов, но положение лидирующего реджевского полюса  $\omega_1$  практически не зависит от известных обобщений Стандартной модели.

## LHCb-пентакварки: аналог дейтона или хадрочармониум

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

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Основной вопрос в интерпретации пентакварков, открытых недавно в LHCb, связан с расстоянием между тяжелыми кварками. Примерный вид взаимодействия между *s*-кварками изображен на рисунке. Видно, что имеются два минимума, которые отвечают двум возможным состояниям пентакварка.

Если расстояние между тяжелыми кварками велико (~ 1,5 фм), то его следует описывать как слабосвязанное состояние двух адронов с открытым чармом. Эта область находится в ведении своеобразной «ядерной физики»  $\Sigma_c$ -гиперонов и *D*-мезонов, причем свойства пентакварка оказываются весьма близки к свойствам дейтона.

Если же расстояние между тяжелыми кварками мало (~ 0,3 фм), то его можно представлять как возбужденный чармоний  $\Psi(2s)$ , находящийся в центре протона (хадрочармониум).

Связь адронов осуществляется за счет непертурбативного двухглюонного обмена.

Мы рассмотрели обе возможные картины устройства пентакварков и вычислили их свойства в каждом из подходов. И та и другая интерпретация предсказывают дополнительные состояния, массы которых вычислены. Новые состояния возникают также при замене легких кварков на странные или тяжелых кварков *s* на *b*-кварки.

Решающим экспериментом, позволяющим судить о том, какая из двух картин является правильной, было бы измерение отношения вероятности распада пентакварка на адроны с закрытым и открытым чармом. Если оно велико, то верна картина пентакварка как хадрочармониума. Поскольку пентакварк был открыт именно в таких распадах, эту гипотезу следует считать более вероятной.



Потенциальная энергия взаимодействия бесконечно тяжелых кварков («кварковый терм») как функция расстояния между *s*-кварками

## Структуры спектра масс нейтрино и смешивания лептонов. Результат нарушенной зеркальной симметрии

И. Т. Дятлов

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Наблюдаемый спектр масс нейтрино: два очень близких по массе состояния – 1 и 2, одно – 3 – удалено от них, отличается от строгой иерархической структуры спектров всех других фермионов Стандартной модели (СМ) – кварков и заряженных лептонов. Матрица слабого смешивания (МСС) лептонов тоже абсолютно не похожа на МСС кварков – матрицу СКМ (Кабиббо – Кобаяши – Маскавы).

Оба этих отличия объясняются моделью, в которой массы фермионов СМ образуются как результат спонтанного нарушения первоначальной зеркальной симметрии, т. е. в СМ, дополненной тяжелыми аналогами с противоположными (лево – право) слабыми свойствами. Для кварков такая система при наблюдаемой иерархии их масс воспроизводит все качественные черты матрицы СКМ. Большая масса зеркальных частиц – обязательное условие воспроизводства.

Для лептонов зеркальная модель приводит к появлению факторов, указывающих на исключительную малость масс нейтрино СМ, инверсный порядок их масс (два близких друг другу состояния – более тяжелые) и их дираковскую природу.

Отсутствие видимой иерархии в спектре масс нейтрино возникает здесь как следствие совместного участия в формировании массовых матриц двух независимых спектров нейтральных зеркальных масс – дираковской и майорановской. Но оба этих спектра по отдельности располагают массы в «нормальном» иерархическом порядке, подобно спектрам всех других фермионов СМ.

Таким образом, иерархия масс является общей особенностью всех спектров, участвующих

в формировании масс поколений любых фермионов, включая нейтрино. Мы имеем дело с необъясненным до сих пор всеобщим механизмом.

В зеркальном сценарии находит объяснение и иная форма МСС лептонов. Именно наблюдаемый спектр масс нейтрино, его инверсный порядок и иерархия масс заряженных лептонов приводят к МСС – матрице ПМНС (Понтекорво – Маки – Накагавы – Сакаты) – со свойствами, в корне отличными от свойств матрицы СКМ. Необходимым условием является также малость массы самого легкого (при инверсии) нейтрино  $m_3 \ll m_1, m_2$ . Качественно воспроизводятся экспериментально обнаруживаемые свойства матрицы ПМНС.

Малость угла Daya Bay  $\theta_{13}$  – главная характерная черта матрицы ПМНС – обусловлена возникающей из модели при пренебрежении малыми отношениями масс ортогональностью (в пространстве индексов поколений) волновых функций электрона и удаленного нейтрино 3. Величина  $\theta_{13}$  определяется как раз этими малыми отношениями, в основном, по-видимому, отношениями масс нейтрино  $m_3/m_1, m_3/m_2$ .

Инверсный порядок спектра и требуемая малость  $m_3$  позволяют оценить и абсолютные значения масс нейтрино. Наблюдаемое значение  $\sin \theta_{13} = 0,14-0,16$  соответствует неизвестной массе легкого нейтрино 3, меньшей 0,01 эВ. «Большие» массы  $m_1, m_2$  при сформулированных условиях приблизительно равны 0,05 эВ. Дополнительных условий на константы модели (кроме тех, которые навязаны иерархией масс) для воспроизведения качественной картины не требуется.

1. Дятлов И. Т. // ЯФ. 2015. Т. 78. С. 1015: arXiv:1509.07280 [hep-ph].

2. Дятлов И. Т. // ЯФ. 2017. № 1. С. 80: arXiv:1611.05635 [hep-ph].

3. Дятлов И. Т. Структуры спектра масс нейтрино и смешивания лептонов. Результат нарушенной зеркальной симметрии // ЯФ. 2017. Готовится к печати.

## Эксклюзивное рождение $J/\psi$ -мезонов как способ измерения плотности глюонов при малых $x$

М. Г. Рыскин

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Сечение дифракционного фоторождения  $J/\psi$ -мезонов пропорционально квадрату плотности глюонов в протоне:

$$\frac{d\sigma}{dt}(\gamma^* p \rightarrow J/\psi p)|_{t=0} = \frac{\Gamma_{ee} M_\psi^3 \pi^3}{3\alpha^{QED}} \left[ \frac{4\alpha_s}{(Q^2 + M_\psi^2)^2} xg(x, \mu_F^2) \right]^2 \left( 1 + \frac{Q^2}{M_\psi^2} \right).$$

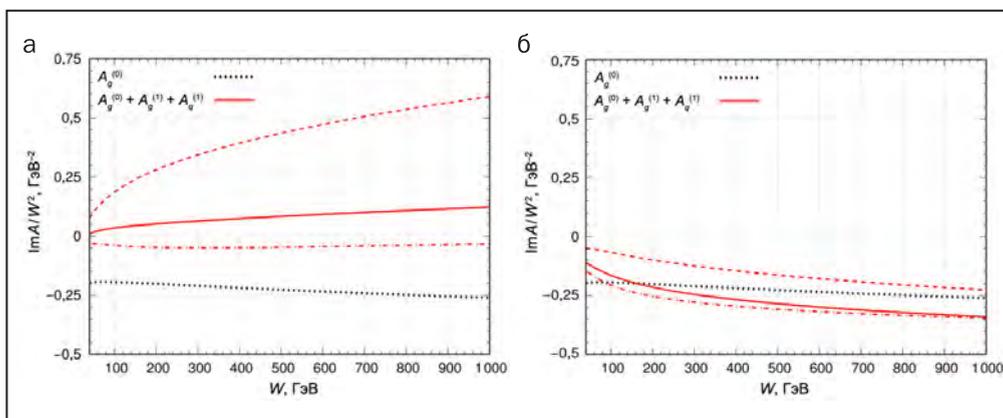
Это позволяет, в принципе, измерять на Большом адронном коллайдере (БАК) распределения глюонов в области очень малых  $x$ , вплоть до  $x \sim 3 \cdot 10^{-6}$ , при скейле порядка 1-2 ГэВ. Это как раз та область, которая определяет поведение сечений при высоких энергиях. К сожалению, оказалось, что поправки к формуле главного логарифмического приближения очень велики, что ставит под сомнение полученные таким образом распределения глюонов:  $xg(x, \mu_F^2)$ .

Большие поправки обусловлены двумя причинами: а) дважды логарифмические слагаемые, усиленные большой величиной  $\ln(1/x)$ ; б) степенные поправки вида  $Q_0^2 / \mu_F^2$ , возникающие из-за того, что вклады от области импульсов  $q < Q_0$  были

учтены дважды – в начальном значении плотности партонов в эволюции Докшицера – Грибова – Липатова – Альтарелли – Паризи (ДГЛАП) и в NLO-коэффициентной функции. Эти степенные поправки не важны для жестких процессов при больших  $\mu_F \gg Q_0$ , но для случая рождения  $J/\psi$ -мезонов, где величина  $Q_0$  порядка массы чармованного кварка, их роль весьма значительна.

Отсуммировав усиленные  $\ln(1/x)$  члены и исключив лишний вклад от области  $q < Q_0$ , мы получили устойчивый результат, показанный на рис. б красными кривыми (вычислены с использованием партонных распределений СТЕQБ.6). Как видно из сравнения кривых на рис. а (до вычитания вкладов от области  $q < Q_0$ ) и рис. б, стабильность относительно изменения  $\mu_F$  резко возросла.

Полученный результат позволит в дальнейшем использовать данные БАК по ультрапериферическому образованию  $J/\psi$ -мезонов для измерения плотности глюонов в области сверхмалых  $x$ , где неопределенности современных партонных анализов крайне велики.



Амплитуда фоторождения  $J/\psi$ -мезонов в главном приближении (черная кривая) и с учетом NLO-поправок (красная кривая). Пунктиром показана зависимость результата при изменении факторизационного скейла от  $\mu_F^2 = 1,7 \text{ ГэВ}^2$  до  $\mu_F^2 = 4,8 \text{ ГэВ}^2$

1. Jones S.P. ..., Ryskin M.G. et al. // J. Phys. G. 2016. V. 43. P. 035002.  
 2. Jones S.P. ..., Ryskin M.G. et al. // Eur. Phys. J. C. 2016. V. 76. P. 633.

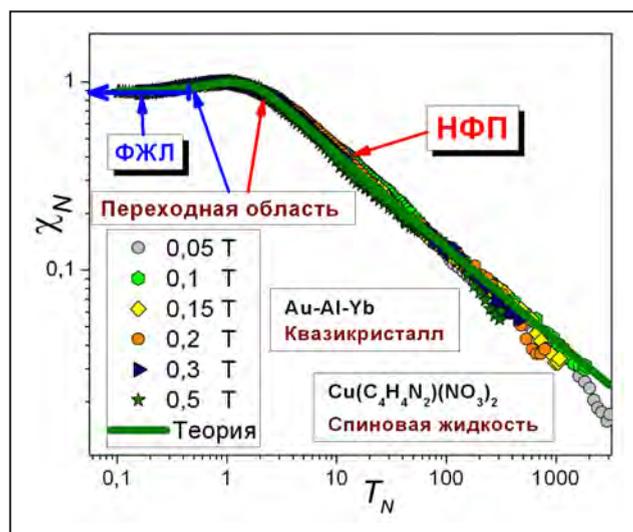
## Сильно коррелированные ферми-системы как новое состояние вещества

В. Р. Шагинян

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Во многих коррелированных ферми-системах при нулевой температуре происходит фазовый переход. Этот переход приводит к определенному состоянию, названному фермионной конденсацией. Сигналом к такому топологическому квантовому фазовому переходу служит резкое увеличение эффективной массы квазичастиц, которая определяет спектр их возбуждения и создает плоские зоны. Топологический фазовый переход формирует состояние вещества, представленное различными металлами с тяжелыми фермионами, двумерными жидкостями типа  $^3\text{He}$  на графитовой подложке, квантовыми спиновыми жидкостями, квазикристаллами и изоляторами с одномерной квантовой спиновой жидкостью. Были теоретически исследованы диаграммы состояния этих сильно коррелированных ферми-систем. На основе анализа широкого круга экспериментальных данных показано, что эти вещества при низких температурах ведут себя однообразно: их термодинами-

ческие, транспортные и релаксационные свойства обнаруживают универсальное скейлинговое поведение. Такое универсальное поведение хорошо объясняется в рамках теории фермионной конденсации. Мы показали, что эти различные вещества демонстрируют универсальное однородное поведение, несмотря на их микроскопическое разнообразие. Пример универсального скейлингового поведения спиновой функции отклика сплава  $\text{Cu}(\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2)(\text{NO}_3)_2$  с одномерной спиновой жидкостью и квазикристалла  $\text{Au-Al-Yb}$  показан на рисунке. Из проведенного анализа следует, что квантовая критическая физика сильно коррелированных ферми-систем универсальна, поскольку определена одним и тем же топологическим квантовым ферми-конденсатным фазовым переходом, проявляется независимо от микроскопических свойств самых разнообразных сплавов с тяжелыми фермионами и формирует новое состояние вещества.



Универсальное скейлинговое поведение спиновой функции отклика сплава  $\text{Cu}(\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2)(\text{NO}_3)_2$  с одномерной спиновой жидкостью и квазикристалла  $\text{Au-Al-Yb}$ . Показаны характерные области неферми-жидкостного поведения (НФП), область ферми-жидкости Ландау (ФЖЛ) и переходная область. Кривая (теория) показывает поведение отклика спиновой жидкости и квазикристалла

1. Amusia M.Ya. ..., Shaginyan V.R. et al. Theory of Heavy-Fermion Compounds: Theory of Strongly Correlated Fermi-Systems. Berlin: Springer, 2015. V. 182. 359 p.
2. Shaginyan V.R. et al. // Front. Phys. 2016. V. 11. P. 117103.

## Неабелевы струны в суперсимметричных теориях

А. В. Юнг

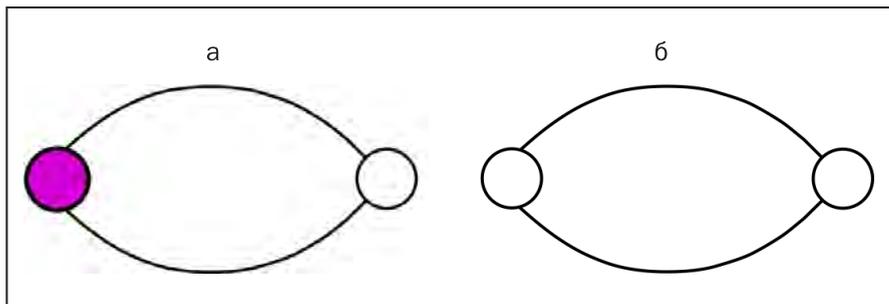
Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Было показано, что неабелевы струны в определенной суперсимметричной теории Янга – Миллса с фундаментальной материей становятся критическими суперструнами. В дополнение к трансляционным нулевым модам неабелева струна имеет еще ориентационные и размерные моды. Их динамика описывается двумерной взвешенной  $CP$ -моделью. В  $N = 2$  суперсимметричной квантовой хромодинамике (КХД) с калибровочной группой  $U(2)$  и четырьмя кварковыми гипермультиплетами неабелева струна имеет шесть ориентационных и размерных мод. Комбинируя их с четырьмя трансляционными модами, мы получаем десятимерное пространство, необходимое для того, чтобы суперструна стала критической. Таргет-пространство полученной таким образом струнной сигма-модели представляет собой прямое произведение плоского

четырёхмерного пространства и шестимерного некомпактного многообразия Калаби – Яу, называемого конифолдом.

Мы изучаем состояния замкнутой струны, возникающие в четырех измерениях в такой теории, и идентифицируем их с адронами  $N = 2$  суперсимметричной КХД. Оказывается, что большинство состояний струны, возникающих в четырех измерениях из десятимерного гравитона, нединамические. В частности, отсутствует четырехмерный гравитон из-за того, что его волновая функция на конифолде ненормируема.

Обнаружен единственный безмассовый гипермультиплет, отвечающий деформациям комплексной структуры конифолда. Он идентифицирован как монополю-монополюльный барион четырехмерной КХД (в сильной связи) (рис.).



Струнный монополю-антимонполюльный мезон (а); струнный монополю-монополюльный барион (б). Белые и темные кружки обозначают монополи и антимонполюли соответственно

1. Koroteev P. ..., Yung A. // Phys. Rev. D. 2016. V. 94. P. 065002: arXiv:1605.08433[hep-th].
2. Koroteev P. ..., Yung A. // Phys. Lett. B. 2016. V. 759. P. 154–158: arXiv:1605.01472[hep-th].

## Перколяционный сценарий вблизи перехода из упорядоченной (сверхтекучей) фазы в фазу бозе-стекла

А. В. Сизанов, А. В. Сыромятников

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Квантовый переход в системе взаимодействующих бозе-частиц из фазы моттовского изолятора (MI) в сверхтекучую (SF) фазу эквивалентен переходу в антиферромагнетике Гейзенберга (АФГ) в магнитном поле из фазы с полностью насыщенной намагниченностью (MI) в упорядоченную фазу SF (параметром порядка является компонента средней намагниченности подрешеток  $\langle S_{\perp} \rangle$ , перпендикулярная магнитному полю). Беспорядок в системе приводит к появлению промежуточной, несверхтекучей, фазы бозе-стекла (BG) с локализованными одночастичными возбуждениями. В терминах АФГ фаза BG представляет собой набор островов конечного объема с ненасыщенной намагниченностью, которые окружены областями с насыщенной намагниченностью. При уменьшении поля острова растут, сливаются, и в тот момент, когда в системе возникнет большой остров, объем которого сравним с объемом всей системы, происходит переход в магнитоупорядоченную фазу (SF).

Теория перехода из SF в BG была предложена Фишером с сотрудниками на основе простого и естественного скейлингового анзаца для свободной энергии. Однако в последние несколько лет появилось довольно большое количество экспериментальных и численных данных, противоречащих теории Фишера. В частности, последняя предсказывает  $\nu > 2$  для критического индекса  $\nu$  температуры перехода в фазу SF, но соответствующие эксперименты на разных соединениях и численные расчеты на разных моделях дают  $\nu = 1,1$ . То есть в последних работах обнаружено универсальное поведение, отличное от предсказанного Фишером. Убедительного объяснения этого противоречия до сих пор предложено не было.

В нашей работе построена теория упорядоченной фазы вблизи перехода в фазу BG, основанная на гидродинамическом описании длинноволновых возбуждений. Полученные результаты находятся в полном согласии с теорией Фишера, но обладают большей общностью и могут описать также кроссовер от поведения, предсказанного Фишером, к другому универсальному поведению. Полученные нами формулы хорошо описывают недавно полученные экспериментальные и численные данные (в частности,  $\nu = 1,1$ ), противоречащие предсказаниям Фишера, если предположить существование перколяционного критического поведения не очень близко к точке перехода. То есть мы предлагаем следующую картину: в непосредственной близости от критической точки реализуется критическое поведение, предсказанное Фишером, но при отходе от критической точки происходит кроссовер к перколяционному (тоже универсальному) критическому сценарию, в котором скейлинговый анзац, использованный Фишером, перестает работать. По-видимому, в недавних работах был изучен лишь перколяционный режим, а кроссовер к режиму, описанному Фишером, не был достигнут из-за достаточно малых размеров систем в численных расчетах и достаточно высоких температур в экспериментах.

Помимо этого, мы дополнили теорию Фишера рядом новых результатов. Одним из самых ярких из них является обнаружение суперуниверсального поведения плотности DOS локализованных, относительно высокоэнергетических, возбуждений (т. е. независимость DOS не только от типа решетки и других деталей модели – обычная универсальность, но и от размерности пространства – суперуниверсальность).

## Интегрируемость и АдС/КТП-соответствие

*В. Н. Велижанин*

*Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*

Большой интерес в последние годы вызывает исследование различных аспектов АдС/КТП-соответствия – соответствия между классической теорией гравитации в пространстве анти-де Ситтера и конформной теорией поля (максимально расширенной  $N = 4$  суперсимметричной теорией Янга – Миллса). Одним из объектов интенсивных исследований в данной модели являются составные операторы, аномальные размерности которых соответствуют спектру энергий струн на световом конусе и результаты для которых в высших порядках теории возмущений могут быть получены из предположения об интегрируемости данной модели (пока в планарном пределе). Знание аномальной размерности для операторов твиста-2 позволяет получить ценную информацию об аналитических свойствах аномальной размерности, и наоборот, знание аналитических свойств аномальных размерностей операторов твиста-2 дает возможность проверить правильность разрабатываемых и применяемых математических методов. Недавно был предложен новый метод для вычисления аномальных размерностей любых операторов при любой константе взаимодействия, основанный на использовании квантовой спектральной кривой данной теории (Quantum Spectral Curve approach – QSC). При использовании данного метода нами были вычислены

несколько (более 100) первых четных значений семипетлевой аномальной размерности операторов твиста-2 в данной модели. Основываясь на предположении о виде функций, которые могли бы входить в искомый ответ (обобщенные гармонические суммы), и применяя методы теории чисел, позволяющие решать систему линейных диофантовых уравнений, т. е. систему уравнений в целых числах, в которой число неизвестных больше числа уравнений, мы восстановили общий вид этой аномальной размерности (для произвольного значения лоренцева спина оператора). Следует отметить, что система уравнений, которую нам удалось решить с использованием методов теории чисел, состояла из более 100 уравнений на более чем 1 000 переменных, т. е. число переменных было почти на порядок больше числа неизвестных, тем не менее LLL-алгоритм и использование модулярной арифметики для разбиения базиса из гармонических сумм на несколько независимых частей позволяют решить такую систему в целых числах. Полученный результат после аналитического продолжения дал большое количество новой информации об аналитических свойствах аномальных размерностей, в частности о структуре поправок к уравнению Балицкого – Фадиной – Кураева – Липатова и обобщенному дважды логарифмическому уравнению.

## Стабилизация лавинообразных процессов на динамических сетях

Н. Е. Савицкая

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Лавины, запускаемые внешним возмущением, являются распространенным типом динамики сложных систем, состоящих из большого числа взаимодействующих пороговых элементов (магнитная динамика в дискретных сверхпроводниках, динамика земной коры, динамика финансовых рынков и многое другое). Возникающие в системе лавины могут быть как малыми, так и охватывающими всю систему. Последние чаще всего рассматриваются как катастрофы. Поэтому при изучении подобных систем очень важен вопрос о стабилизации лавинообразных процессов, т. е. о возможности уменьшения их размеров и частоты возникновения катастрофических событий.

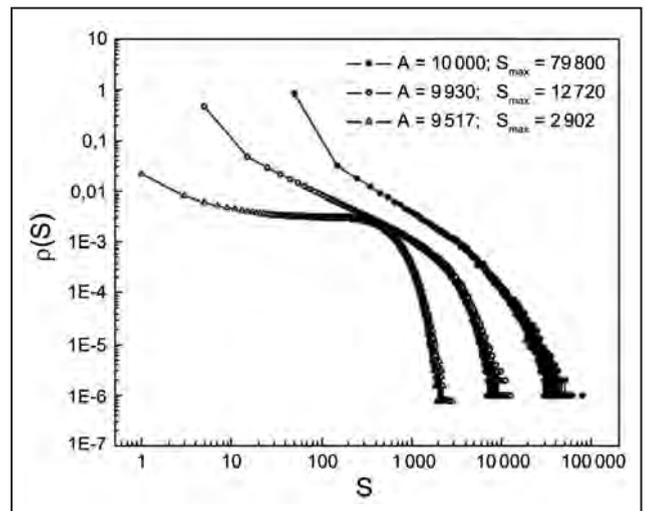
В работе впервые рассмотрена проблема стабилизации лавинообразных процессов в случае, когда они развиваются на сети, структура связей в которой меняется со временем, причем времена существования связей в сети равны длительности возникающих в системе лавин. Такая ситуация представляет практический интерес, поскольку довольно часто реализуется в социальных системах, например при передаче заболеваний контактным или воздушно-капельным путем.

Для исследования подобных процессов в нашей работе мы построили математическую модель системы с лавинообразной динамикой, учитывающую изменения решетки, на которой развиваются лавины.

В результате мы показали, что лавинообразные процессы, развивающиеся на динамической решетке, стабильнее в смысле возникновения

катастрофических событий, чем в случае развития на статической, не меняющейся во времени, решетке. И особенно важно, что на динамической решетке возможно регулирование максимального размера лавины и характера динамики путем изменения функции распределения активностей ее узлов.

Этот замечательный результат проиллюстрирован на рисунке, где представлена плотность вероятности размеров лавин для динамической решетки размером  $N = 10\,000$  с различным количеством активных узлов  $A$  в каждый момент времени. Видно, что максимальный размер лавины значительно уменьшается с уменьшением величины  $A$ .



Плотность вероятности размеров лавин для динамической решетки размером  $N = 10\,000$  с различным количеством активных узлов  $A$  в каждый момент времени

## Роль электронной оболочки в двойном бета-распаде

Е. Г. Друкарев

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В двойном бета-распаде два нейтрона ядра превращаются в протоны, при этом излучаются два электрона и два электронных антинейтрино. Этот переход второго порядка по слабым взаимодействиям наблюдался для 11 ядер. Процесс включает промежуточное состояние ядра, и его изучение представляет интерес для ядерной физики. Однако гипотетический безнейтринный распад еще интересней. Он требует несохранения лептонного квантового числа и поэтому невозможен в рамках Стандартной модели электрослабых взаимодействий.

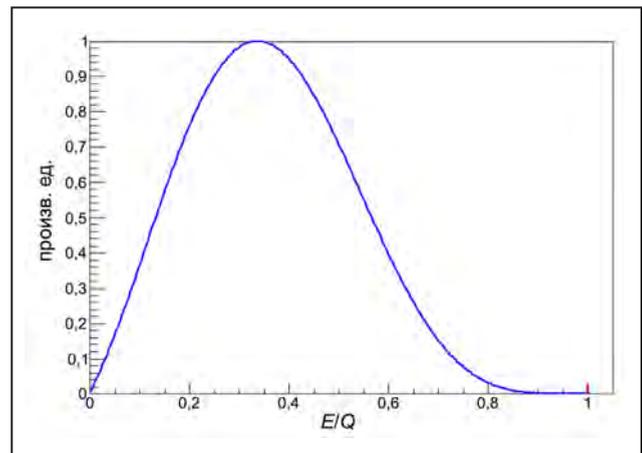
Если электронное нейтрино представляет собой майорановскую частицу, т. е. совпадает со своей античастицей, то процесс возможен, если к тому же нейтрино обладает ненулевой массой. То, что нейтрино действительно имеет ненулевую массу, стало известно сравнительно недавно. Это открытие увеличило интерес к безнейтринному двойному бета-распаду. Если существует массивное майорановское нейтрино, то механизм процесса очень прост. В двух последовательных бета-распадах ядра образуются два отрицательно заряженных мезона. Они взаимодействуют путем обмена нейтрино. В результате излучаются два бета-электрона. Несколько групп пытались детектировать безнейтринный процесс, и еще несколько экспериментов планируются. Пока обнаружить безнейтринный процесс не удалось.

Сумма энергий бета-электронов  $E$  не может превышать разность масс  $Q$  распадающегося и дочернего ядер. Распределение по  $E$  в двойном бета-распаде представляет собой гладкую кривую, стремящуюся к нулю при  $E = Q$ , т. к. при этом фазовый объем излучаемых антинейтрино

становится исчезающе малым. В безнейтринном распаде электроны всегда вылетают с суммарной энергией  $E = Q$ . Поэтому безнейтринный процесс заявит о себе монохроматическим пиком при  $E = Q$ , отмеченным красным на рисунке.

Величина  $Q$  может быть измерена с хорошей точностью для случая, когда как распадающийся, так и дочерний атом находятся в основном состоянии. Однако неупругие процессы в электронной оболочке сдвигают величину  $Q$  к меньшим значениям  $Q' < Q$ . Определение величины сдвига особенно важно для нынешних и планируемых экспериментов из-за их высокой разрешающей способности.

Мы вычислили величину сдвига в приближении встряски, используя функции Хартри – Фока для описания связанных электронов. Для сегодняшних экспериментов  $Q' - Q = -350$  эВ для германия и  $Q' - Q = -400$  эВ для ксенона.



Распределение по суммарной энергии электронов в двухнейтринном двойном бета-распаде (синяя линия) и в безнейтринном распаде (красный пик)

## Адаптация программы MURE для управления нейтронно-физическими расчетами реактора ПИК

М. С. Онегин

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Выбор нейтронно-физического кода для прецизионных расчетов и сопровождения кампании реактора ПИК является актуальной задачей. В настоящей работе продемонстрированы возможности программной оболочки MURE для управления нейтронно-физическими расчетами реактора ПИК по программе MCNP. С использованием данной оболочки для штатной тепловыделяющей сборки (ТВС) реактора ПИК были рассчитаны важные для анализа его безопасности характеристики: температурные эффекты реактивности, распределение энерговыделения по активной зоне, исследовано влияние стержней с выгорающими поглотителями на это распределение. Рассчитана кампания реактора ПИК со штатными и модифицированными ТВС, содержащими стержни с выгорающим поглотителем. Представлены результаты

расчетов по программе MURE радиационных характеристик выгоревшего топлива.

При больших температурах топлива  $T$  изменение реактивности реактора ПИК в целом следует теоретической зависимости (рис. 1)

$$\Delta\rho(T) = 0,19(1/\sqrt{T} - 1/\sqrt{T_0}). \quad (1)$$

Показано, что зависимость изменения реактивности реактора при повышении температуры воды в активной зоне можно аппроксимировать зависимостью

$$\Delta\rho = -0,397(|\Delta c_{\text{H}_2\text{O}}|)^{1,4}, \quad (2)$$

где  $\Delta c_{\text{H}_2\text{O}}$  – изменение плотности воды ( $\text{г/см}^3$ ) при повышении температуры с  $20^\circ\text{C}$  до текущей температуры. Результат аппроксимации представлен на рис. 2.

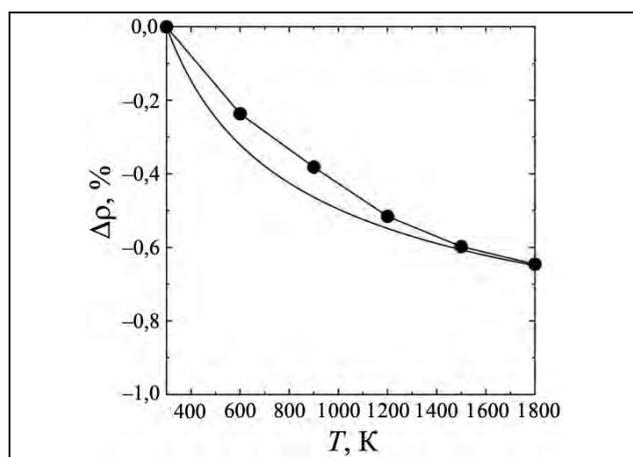


Рис. 1. Зависимости реактивности реактора от температуры топлива: точки – расчет по программе MCNP-MURE; кривая – теоретическая зависимость

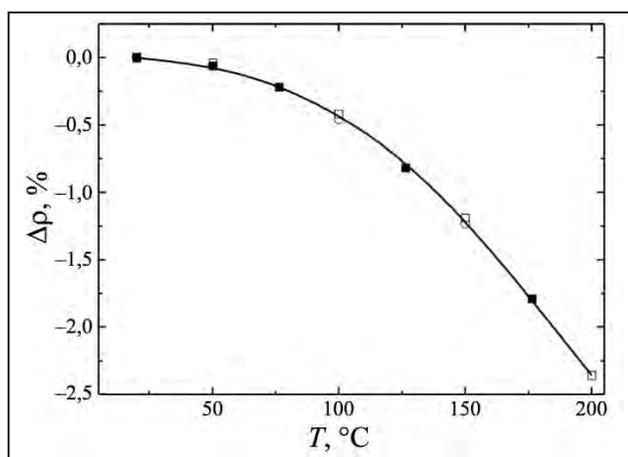


Рис. 2. График зависимости изменения реактивности реактора при изменении температуры теплоносителя в активной зоне: ○ – библиотека JEF-2.2; □ – библиотека JEFF-3.1; ■ – библиотека ENDF/B-VII; — – аппроксимация (2)

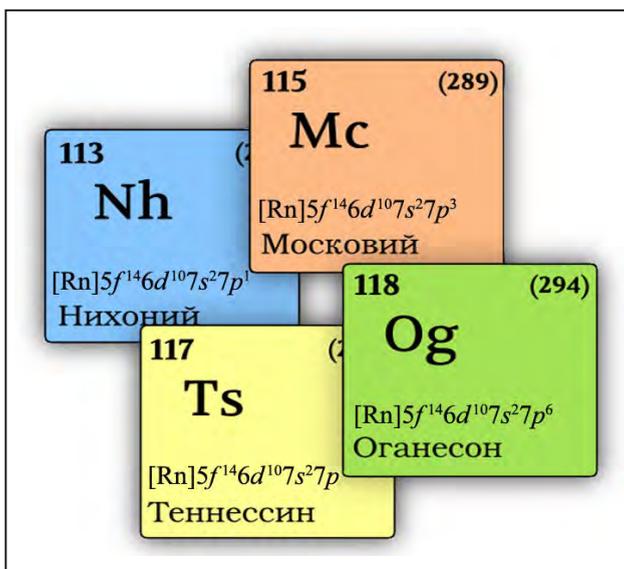
## Квантово-химическое моделирование электронной структуры соединений сверхтяжелых элементов

Ю. А. Демидов, А. В. Зайцевский

Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Открытие долгоживущих изотопов сверхтяжелых элементов (СТЭ) в реакциях полного слияния ядер  $^{48}\text{Ca}$  и тяжелых ядер мишеней позволяет говорить о приближении к области значительной стабилизации ядерных оболочек. Значительные периоды полураспадов получаемых изотопов СТЭ позволяют экспериментально исследовать их химические свойства. Так, недавно выполнена химическая идентификация коперниция (элемент 112, Cn) и флеровия (элемент 114, Fl) и проведены первые аналогичные эксперименты с нихонием (элемент 113, Nh). Нихоний был включен в периодическую систему химических элементов Д. И. Менделеева в 2016 г. (рис.).

С теоретической точки зрения исследование химии СТЭ осложнено необходимостью моделирования электронной структуры в поле тяжелых ядер и требует корректного учета релятивистских эффектов. В Лаборатории квантовой химии НИЦ КИ – ПИЯФ под руководством д. ф.-м. н. А. В. Титова разработан оригинальный метод релятивистских псевдопотенциалов для расчета электронной структуры соединений тяжелых и сверхтяжелых элементов, откуда могут быть получены их важнейшие физические и химические свойства. Основной особенностью этого метода является замена большого числа электронов на внутренних оболочках тяжелого атома эффективным внешним полем – псевдопотенциалом. В результате такой замены из расчета исключаются лишь те электроны, которые не участвуют в образовании химических связей, поэтому свойства элемента не изменяются. Кроме того, внутренние электроны сильно экранируют заряд ядра, что позволяет описывать «медленные» внешние электроны методами, не учитывающими релятивистские эффекты. Благодаря резкому уменьшению числа электронов, явно



Элементы, включенные в таблицу Менделеева в 2016 г.

описываемых при моделировании, применение метода релятивистских псевдопотенциалов позволило существенно увеличить размер рассматриваемых систем, что необходимо для моделирования адсорбции атома сверхтяжелого элемента на поверхности золота. При решении этой задачи поверхность кристаллического золота моделировалась последовательностью небольших кластеров, поскольку атомы золота, далекие от места адсорбции, вносят малый вклад в энергию адсорбции. Когда энергия связи атома сверхтяжелого элемента с кластером перестает сильно зависеть от размера последнего, ее можно отождествить с энергией адсорбции на поверхности золота. Так, в процессе компьютерного моделирования с использованием методов релятивистской теории функционала плотности были получены надежные оценки энергии связи элементов с зарядом ядра 113 и 120 (и более легких аналогов последнего – Ra и Va) с поверхностью

золота. Помимо энергии связи контролировался и электрический заряд на атоме сверхтяжелого элемента. Одновременная сходимость обоих параметров по мере увеличения размера кластеров повышает надежность моделирования. По рассчитанной энергии связи системы «атом – поверхность» может быть вычислена соответствующая температура адсорбции, а это как раз то, что можно наблюдать экспериментально. Полученная информация может быть использована при планировании термохроматографических экспериментов для изучения свойств элементов 113 и 120.

Химические свойства сверхтяжелых элементов могут существенно отличаться от свойств их более легких гомологов. Причиной таких отличий являются огромные релятивистские эффекты. Электроны вблизи сверхтяжелого ядра имеют скорость, близкую к скорости света, в результате они становятся тяжелее и приближаются к ядру. Таким образом, теория относительности А. Эйнштейна вносит существенные изменения в периодический закон Д. И. Менделеева. Теоретическое исследование свойств различных молекул,

содержащих атомы СТЭ, позволяет выполнить поиск наиболее близких к ним химических аналогов. Модельные эксперименты с такими более легкими элементами позволяют подобрать оптимальные условия для проведения эксперимента. Было показано, что температуры и энергии адсорбции атомов Cn и Fl на поверхности золота близки друг к другу и значительно меньше, чем у их непосредственных гомологов – Hg и Pb. Эти свойства атомов СТЭ находятся в согласии с предсказаниями теории: сильная релятивистская стабилизация  $s$ - и  $p_{1/2}$ -оболочек как для Cn ( $6d^{10}7s^2$ ), так и для Fl ( $6d^{10}7s^27p_{1/2}^2$ ) приводит к замкнутооболочечной конфигурации основного состояния данных атомов. Вследствие этой уникальной особенности 7-го периода таблицы Менделеева электронная структура атома Nh может рассматриваться как дырка в замкнутой  $7p_{1/2}$ -оболочке Fl. С этой точки зрения астат является химическим аналогом ниохония. Схожесть химических свойств Nh и At в реакциях с сильными окислителями обсуждается нами в сравнительном исследовании свойств молекул их гидроксидов.

## Лазерное охлаждение и прецизионная спектроскопия соединений радия для поиска «новой физики»

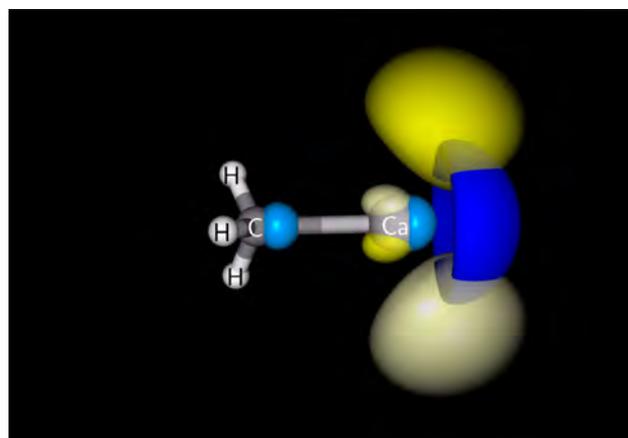
Т. А. Исаев

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В последние годы все большую популярность приобретает метод молекулярного доплеровского охлаждения (МДО). Недавно реализованный на основе данного метода захват двухатомных молекул в магнитооптические ловушки позволяет контролировать состояние молекул на качественно новом уровне, что с большой вероятностью приведет к серьезному прогрессу в исследованиях при помощи молекул физики за пределами Стандартной модели, поиске аксионной темной материи и т. д. Для эффективной реализации МДО требуются молекулы, обладающие квазидиагональной матрицей Франка – Кондона для переходов между рабочими электронными состояниями (как правило, основным и первым возбужденным). Ранее было указано, что число подобных молекул очень велико, а в 2016 г. мы продемонстрировали наличие замкнутых «петель охлаждения» не только в двух-, но также и в многоатомных молекулах. Особенный интерес для поисков электрических дипольных моментов (ЭДМ) элементарных частиц (в частности, электрона, нейтрона и протона) представляют соединения тяжелых элементов благодаря сильной зависимости усиления ЭДМ от заряда тяжелого ядра. Нами рассмотрена трехатомная молекула моногидроксида радия ( $\text{RaOH}$ ) в качестве кандидата по поиску эффектов несохранения

пространственной четности, связанных со спином ядра на лазерно-охлаждаемых молекулах.

В качестве характерного примера электронной структуры лазерно-охлаждаемых молекул на рисунке приведены поверхности постоянного значения (изоповерхности) волновой функции валентного электрона для основного и первого возбужденного электронного состояний молекулы  $\text{CaCH}_3$ . Основная часть электронной плотности в обоих случаях находится вне области химической связи, что является указанием на несвязывающий характер валентного электрона.



Изоповерхности орбитали валентного электрона в молекуле  $\text{CaCH}_3$ : для основного электронного состояния – синий цвет; для первого возбужденного – желтый

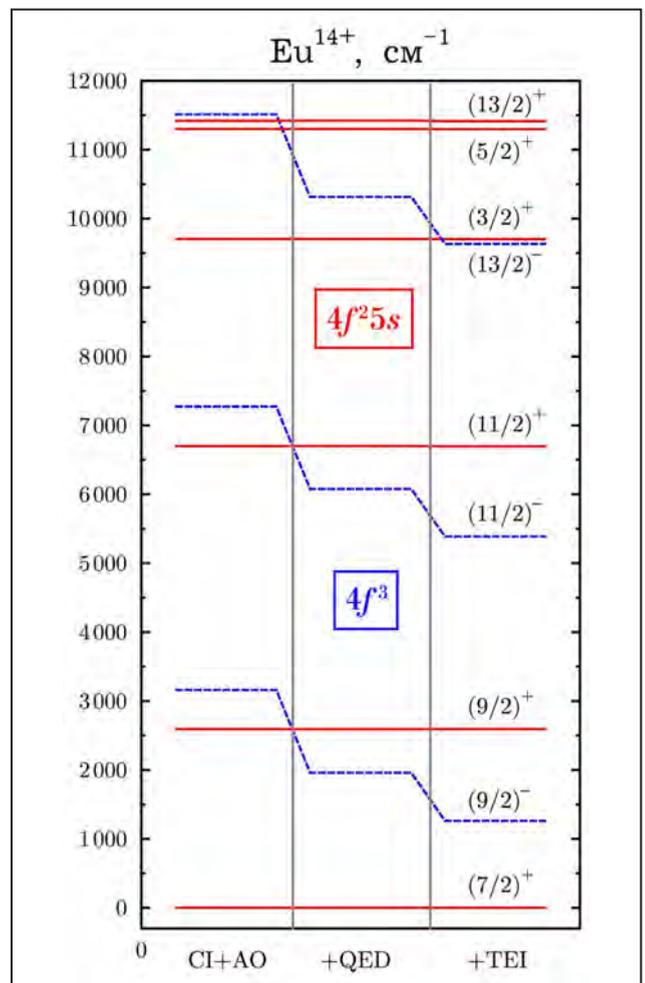
1. Isaev T.A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. P. 063006.
2. Isaev T.A., Zaitsevskii A.V. et al. 2016. arXiv:1610.08243.

## Поиск «новой физики» с помощью атомов и молекул

М. Г. Козлов – Отделение нейтронных исследований  
С. Г. Порсев – Отделение теоретической физики  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В атомной физике продолжается быстрое развитие экспериментальных методов. С одной стороны, это позволяет существенно повышать чувствительность экспериментов к «новой физике» за пределами Стандартной модели (СМ). С другой стороны, появляется возможность проведения экспериментов с использованием таких систем, как ультрахолодные многозарядные ионы и молекулы. Для поиска наиболее перспективных систем необходимо проводить расчеты вкладов «новой физики» в спектры атомов и молекул и развивать атомную теорию. Нами разработан пакет программ для расчетов свойств атомов с учетом корреляционных и релятивистских эффектов. В 2016 г. к этому пакету добавлены программы, позволяющие учитывать основные квантово-электродинамические (КЭД) поправки и эффективные трехэлектронные взаимодействия (ТЭВ). Оба типа поправок важны для предсказания свойств многозарядных ионов с заполняющейся оболочкой  $4f$ . В частности, ион  $\text{Eu}^{14+}$  представляет интерес для создания оптических часов нового поколения и обладает высокой чувствительностью к вариации постоянной тонкой структуры  $\alpha$ . Поэтому его можно использовать для поиска  $\alpha$ -вариации, которая предсказывается некоторыми расширениями СМ. Результаты расчета спектра  $\text{Eu}^{14+}$  показаны на рисунке. Левая панель дает спектр в приближении Дирака – Кулона – Брейта. На центральной панели дополнительно учтены КЭД-поправки, а на правой панели добавлены ТЭВ. Видно, что эти поправки не только влияют на частоты переходов, но и меняют порядок

уровней. Отметим, что в настоящее время разрабатываются методы охлаждения и удержания таких ионов для проведения с ними прецизионных экспериментов.



Результаты расчета спектра  $\text{Eu}^{14+}$

1. Kozlov M.G., Porsev S.G. et al. // Comput. Phys. Commun. 2015. V. 195. P. 199.
2. Tupitsyn I.I., Kozlov M.G. et al. // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117. P. 253001.
3. Kozlov M.G. ..., Porsev S.G. et al. // Phys. Rev. A. 2016. V. 94. P. 032512.

## Осадки и пропационная скорость ураганов

В. Г. Горшков, А. М. Макарьева, А. В. Нефёдов

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

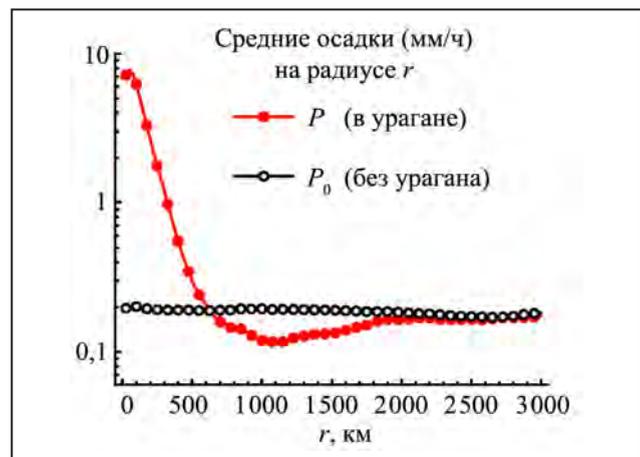
В мощных циклонах локальные осадки превышают долгосрочные средние значения в десятки и сотни раз, неся с собой наводнения, оползни и другие опасные для жизни людей явления. Предсказание этих осадков, как и интенсивности циклонов, является нерешенной проблемой.

Известно, что в радиусе порядка 400 км от центра урагана локальное испарение составляет лишь около 20 % от наблюдаемого дождя. Остальная влага импортируется извне. Но откуда она берется? Чтобы объяснить наблюдаемые в урагане осадки за счет известной скорости испарения с поверхности океана, необходимо было бы предположить, что эта влага концентрируется в урагане с круга порядка 8 000 км в диаметре. Однако ураган не генерирует градиентов давления, которые могли бы обеспечить столь широкомасштабные потоки. Поэтому вопрос о происхождении влаги, формирующей осадки в интенсивных циклонах, остается открытым.

На основании анализа большого объема мировых баз данных по осадкам (Tropical Rainfall Measuring Mission – TRMM) и атмосферной влаге (NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications – MERRA) мы показали, что осадки в ураганах формируются за счет его перемещения в пространстве, при котором поглощается ранее накопленная в атмосфере влага. Чем больше скорость урагана относительно окружающего атмосферного воздуха (так называемая *пропационная скорость* урагана), тем более интенсивные осадки в круге заданного радиуса он может обеспечить. Было установлено, что передвижение циклона как единого целого полностью обеспечивает средние наблюдаемые осадки в радиусе 700 км от центра урагана.

Также было показано, что этот радиус «самодостаточности» урагана по отношению к водяному пару примерно совпадает с радиусом  $r_d$  сухого следа урагана – впервые описанного нами явления, при котором осадки при  $r > r_d$  вокруг урагана оказываются в полтора раза ниже по сравнению с осадками при отсутствии урагана (рис.). Этот сухой след является следствием уменьшения количества атмосферной влаги после прохождения урагана, т. е. он описывает истощение запасов атмосферной влаги ураганом.

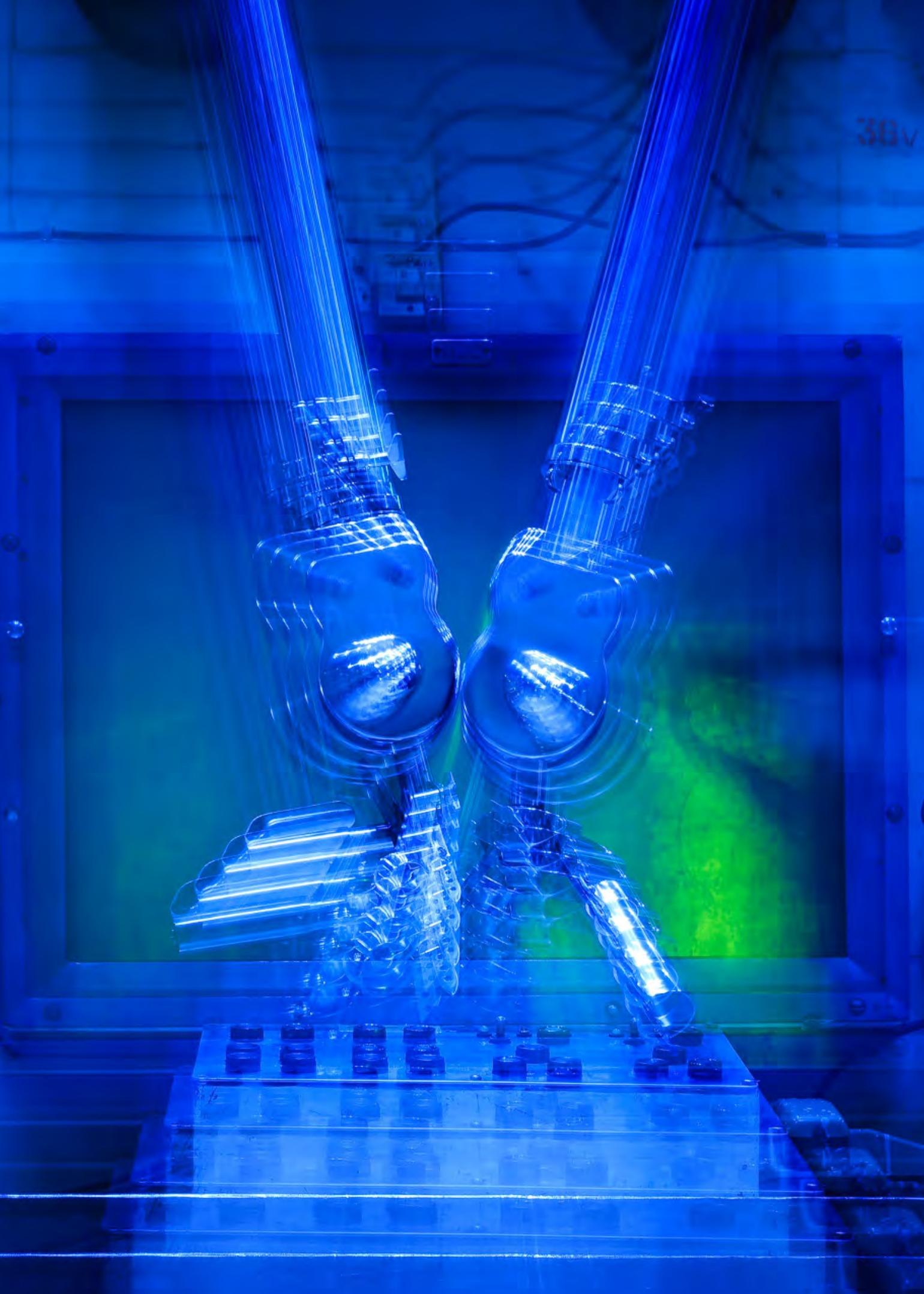
Полученные результаты имеют большое значение для оценки интенсивности ураганов. Если мощность стационарного урагана, поддерживаемого испарением с поверхности океана (испарение = осадки), ограничена сверху коэффициентом полезного действия Карно, то для нестационарного урагана подобного предела не существует, т. к. накопленная потенциальная энергия водяного пара может расходоваться с любой скоростью.



Сухой след урагана:  $P(r) < P_0(r)$ ,  $r_d \approx 600$  км

1. Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Nefiodov A.V. // Phys. Lett. A. 2015. V. 379. P. 2396–2398.

2. Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Nefiodov A.V. et al. // Atmos. Res. 2017. V. 193. P. 216–230.



30V

# Исследования с использованием нейтронов, фотонов и мюонов

- 46 Измерение времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой
- 48 Эксперимент «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино
- 50 Источник ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия на реакторе ВВР-М
- 52 Детектор ультрахолодных нейтронов для спектрометра по измерению времени жизни нейтрона
- 53 Угловые распределения и анизотропия осколков деления  $^{233}\text{U}$  и  $^{209}\text{Bi}$  нейтронами с энергией 1–200 МэВ
- 54 Особенности тройного деления  $^{233}, ^{235}\text{U}$  и  $^{239}, ^{241}\text{Pu}$  поляризованными нейтронами
- 56 Экспериментальное исследование характеристик запаздывающих нейтронов из реакции деления  $^{238}\text{U}$  протонами с энергией 1 ГэВ
- 57 Анализ пространственного разрешения эксперимента по проверке принципа эквивалентности для нейтрона дифракционным методом
- 58 Эффект двухкристальной фокусировки
- 59 Класс светосилы нейтронных рефлектометров
- 60 Нейтронно-активационное определение Au, Pt, Re, Ag, Ir в кварц-адулярных жилах Милоградского месторождения
- 62 Спиновая структура квазидвумерного фрустрированного магнетика  $\text{Li}_3\text{Ni}_2\text{SbO}_6$  с магнитной решеткой типа «пчелиные соты»
- 63 Магнитная фазовая диаграмма сплавов  $\text{Y}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Mn}_6\text{Sn}_6$  ( $x = 0; 0,175; 0,2; 0,225; 0,25$ )
- 64 Многоуровневая структура алмазных гидрогелей по данным рассеяния нейтронов
- 65 Исследование мультиферроиков  $\text{Eu}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Mn}_2\text{O}_5$  и  $\text{EuMn}_2\text{O}_5$  с помощью  $\mu\text{SR}$ -метода

## Измерение времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой

*В. Е. Варламов, А. В. Васильев, Э. А. Коломенский, И. А. Краснощекова, А. О. Полюшкин, А. П. Серебров, А. К. Фомин, А. Г. Харитонов, М. Е. Чайковский, А. В. Чечкин, И. В. Шока – Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
П. Гельтенборт, Т. Дженке, О. Циммер – Институт им. Лауэ – Ланжевена  
М. ван дер Гринтен, М. Такер – Лаборатория Резерфорда – Эплтона*

Эксперимент по измерению времени жизни нейтрона относится к области фундаментальной физики и направлен на проверку предсказаний Стандартной модели элементарных частиц в области электрослабых взаимодействий и моделей нуклеосинтеза в ранней Вселенной. В данный момент важно пролить свет на проблему расхождения времени жизни нейтрона, измеренного «пучковым» методом, и времени жизни нейтрона, измеренного методом «хранения».

В 2016 г. мы проводили исследования на экспериментальной установке Gravitrapp-2, расположенной в зале исследовательского реакторного комплекса Института им. Лауэ – Ланжевена (ИЛЛ, Гренобль, Франция) (рис. 1). Для проведения эксперимента нам было выделено два полных реакторных цикла (в сумме 100 дней).

Исследования нацелены на измерение времени жизни свободного нейтрона методом хранения ультрахолодных нейтронов (УХН) в криогенной материальной ловушке с гравитационным запирающим устройством, внутренние стенки которой покрыты полимером fomblin grease UT 18, имеющим низкое сечение захвата нейтронов. Потери УХН сильно подавлены, если ловушка поддерживается при низкой температуре (80–100 К). Время удержания УХН без распада, только из-за потерь на стенках,  $4 \cdot 10^4$  с. Дополнительная поверхность (вставка), также покрытая полимером, вводится в объем ловушки и таким образом увеличивает площадь внутри нее и, следовательно, частоту столкновений нейтронов с поверхностью. В итоге мы измеряем два

различных времени хранения УХН ( $\tau_1, \tau_2$ ), соответствующих двум частотам соударений ( $\gamma_1, \gamma_2$ ).



**Рис. 1.** Экспериментальная установка НИЦ КИ – ПИЯФ для измерения времени жизни нейтрона на реакторе ИЛЛ

Время жизни нейтрона определяется экстраполяцией к частоте соударений, равной нулю. Вероятность потери УХН при одиночном столкновении ( $\eta$ ) определяется экспериментально, но частота соударений является расчетной величиной

и определяется численным расчетом. Ниже приведены результаты измерений времени жизни нейтрона, полученные в реакторных циклах 178 и 179 (2016 г.) (рис. 2).

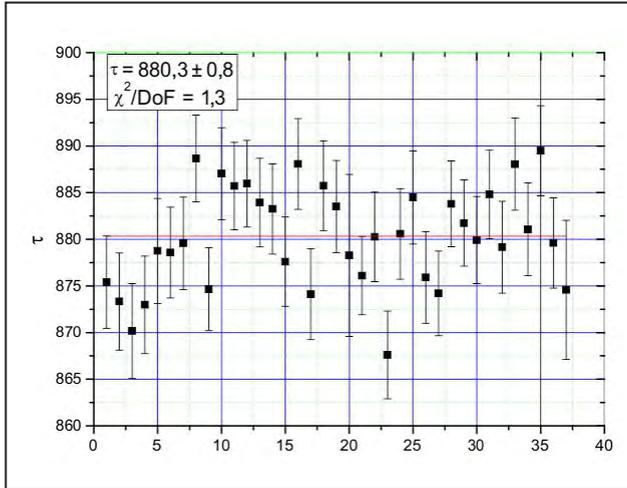


Рис. 2. Время жизни нейтрона, измеренное в циклах 178 и 179

Итоговым результатом 2016 г. можно считать определение времени жизни нейтрона –  $880,3 \pm 0,8_{\text{stat}}$  с. Для окончательного результата нужно оценить систематическую ошибку, мы считаем, что есть два ее основных источника. Первый связан с неодинаковостью непокрытой поверхности ловушки и вставки. Второй – с неточностью измерений геометрических размеров ловушки и вставки.

Мы оцениваем систематическую ошибку в 0,8 с. Однако наш новый результат измерения времени жизни нейтрона ( $880,3 \pm 0,8_{\text{stat}} \pm 0,8_{\text{sys}}$  с) отличается от нашего результата 2005 г. ( $878,5 \pm 0,7_{\text{stat}} \pm 0,3_{\text{sys}}$  с) на 1,8 с, поэтому необходимо продолжение измерений и увеличение их точности.

Дальнейшее улучшение точности возможно при модификации установки, которая позволит уменьшить разницу между временем хранения со вставкой и без вставки, т. е. при еще большем приближении времени хранения ко времени жизни нейтрона. Это возможно в случае уменьшения величины потерь при соударениях со стенками, например при переходе к температуре  $\approx 10$  К.

На данный момент статистическая ошибка сравнялась по величине с систематической, а результат хорошо согласуется с общепринятым временем жизни нейтрона, представленным в обзоре Particle Data Group. При этом расхождение между результатами нашего и «пучкового» эксперимента ( $888,0 \pm 2,1$  с) превышает три стандартных отклонения. Для дальнейшего исследования вопроса о природе этого расхождения необходимо уточнение данных, полученных «пучковым» методом, т. е. требуется повторение эксперимента NIST (National Institute of Standards and Technology – Национальный институт стандартов и технологии, США).

## Эксперимент «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино

О. М. Жеребцов, М. Е. Зайцев, В. Г. Зиновьев, В. Г. Ивочкин, А. О. Полюшкин,  
Р. М. Самойлов, А. П. Серебров, А. К. Фомин, М. Е. Чайковский, А. В. Черный –  
Отделение нейтронных исследований  
В. Л. Головцов, П. В. Неустроев – Отделение физики высоких энергий  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
В. И. Алешин, В. П. Мартемьянов, В. Г. Тарасенков – НИЦ «Курчатовский институт»  
В. В. Афанасьев, М. О. Громов, А. Л. Ижутов, А. Л. Петелин, С. А. Сазонтов, А. А. Тузов –  
ОАО «ГНЦ НИИ атомных реакторов»  
М. Е. Зайцев, Д. К. Рязанов – Димитровградский инженерно-технологический институт  
НИЯУ МИФИ

Для поиска осцилляций нейтрино в стерильное состояние необходимо наблюдать отклонения в плотности потока реакторных антинейтрино от закона  $1/L^2$ , где  $L$  – расстояние до центра реактора, м. Если такой процесс существует, то его можно описать следующим уравнением:

$$P(\tilde{\nu}_e \rightarrow \tilde{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left( 1,27 \frac{\Delta m_{14}^2 L}{E_{\tilde{\nu}}} \right),$$

где  $E_{\tilde{\nu}}$  – энергия антинейтрино, МэВ;  $\Delta m_{14}^2$  [эВ<sup>2</sup>] и  $\sin^2 2\theta_{14}$  – неизвестные параметры осцилляций.

Для проведения исследований по поиску стерильного нейтрино на базе реактора СМ-3 (Димитровград, Россия) была создана нейтринная лаборатория. Результаты измерений разности счета нейтриноподобных событий для модели и полномасштабного детектора представлены на рис. 1 в виде зависимости от расстояния до центра реактора.

Измерение потока антинейтрино от реактора при помощи перемещаемого детектора на малых расстояниях 6–12 м проводилось впервые. В условиях доступной статистической точности пока не видно явных отклонений плотности потока нейтрино от закона  $1/L^2$ .

Однако объединение наших данных с данными других экспериментов на больших расстояниях требует анализа с предположением о возможности существования стерильного нейтрино,

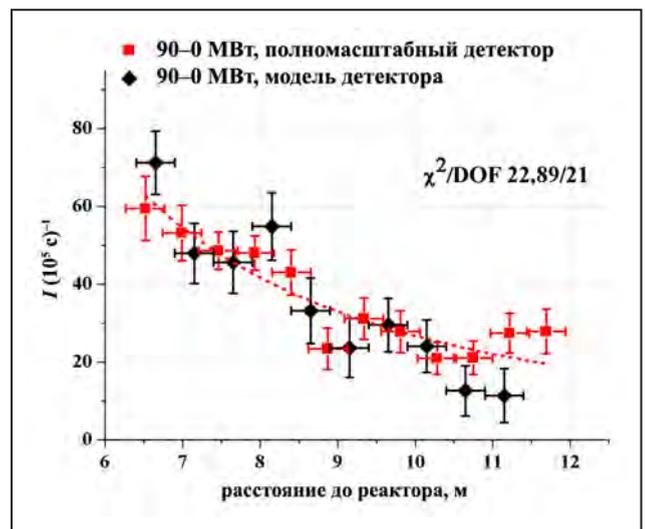


Рис. 1. Зависимость потока реакторных антинейтрино для модели и детектора: пунктирная линия – подгонка законом  $1/L^2$

т. к. ряд экспериментов на больших расстояниях демонстрирует дефицит потока реакторных антинейтрино по отношению к расчетному. Поэтому мы представляем результаты измерений в диапазоне 6–12 м от центра активной зоны реактора совместно с результатами широко известных измерений вплоть до 1000 м. Поскольку эффективность нашего многосекционного детектора в регистрации антинейтрино не может быть рассчитана с достаточной точностью, полученные данные нормированы по среднему значению на общепринятое отношение 0,936, т. е.

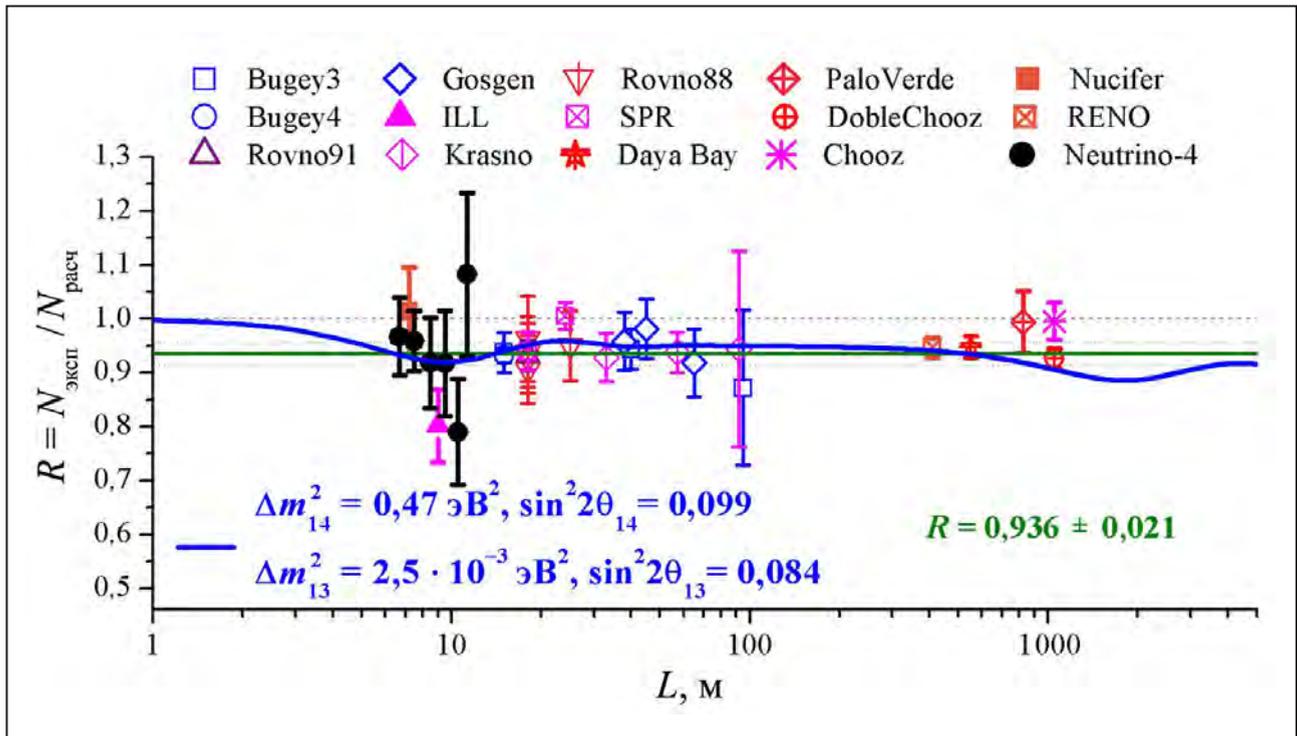


Рис. 2. Результаты наших измерений в диапазоне 6–12 м от центра активной зоны реактора совместно с результатами широко известных измерений вплоть до 1 000 м и кривая осцилляций с параметрами  $\Delta m_{14}^2 = 0,47 \text{ эВ}^2$  и  $\sin^2 2\theta_{14} = 0,099$ , а также с параметрами  $\Delta m_{13}^2 = 0,0025 \text{ эВ}^2$  и  $\sin^2 2\theta_{13} = 0,084$

на отношение измеренного потока реакторных антинейтрино к расчетному потоку. Напомним, что в нашем эксперименте, благодаря методу передвижного детектора, ставится задача относительных измерений и поиска отклонения от закона  $1/L^2$ , а также поиска вариации формы спектра из-за процесса осцилляций в стерильное состояние. К сожалению, статистическая точность наших измерений пока недостаточна для наблюдения предполагаемых процессов с высокой точностью. Для дальнейшего продвижения по точности эксперимента требуется продолжение набора статистики и привлечения дополнительных методов подавления фона. Однако уже сейчас можно провести анализ на параметры модели с одним стерильным нейтрино, используя набор данных, представленных на рис. 2.

В заключение следует сказать, что в настоящее время представлять результаты данного анализа как обнаружение стерильного нейтрино с параметрами  $\Delta m_{14}^2 = 0,47 \text{ эВ}^2$  и  $\sin^2 2\theta_{14} = 0,099$  было бы преждевременно. Нужны более высокая статистическая точность измерений и их проведение вплоть до расстояния 15 м от центра активной зоны реактора, которые позволят сопоставить наши результаты относительных измерений с результатами других измерений – при 15 м, в которых был использован метод абсолютных измерений нейтринного потока.

Наконец, нужно напомнить, что проблема реакторной антинейтринной аномалии в значительной степени связана с расчетами потока антинейтрино от реактора. Надежность и точность этих расчетов пока не гарантированы.

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

А. С. Канин, В. А. Лямкин, Д. В. Прудников, О. Ю. Самодуров, А. П. Серебров, А. К. Фомин  
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Реактор ВВР-М в НИЦ КИ – ПИЯФ планируется оснастить источником ультрахолодных нейтронов (УХН) с высокой плотностью. Метод получения УХН основывается на их накоплении в сверхтекучем гелии благодаря особенностям этой квантовой жидкости. Планируется получение плотности УХН в экспериментальной ловушке на уровне  $10^4 \text{ см}^{-3}$ , что на два порядка превосходит плотность УХН в существующих источниках по всему миру. Увеличение плотности УХН приведет к улучшению на порядок точности измерения электрического дипольного момента нейтрона, что чрезвычайно важно для решения проблемы  $CP$ -нарушения. Источник с самой высокой плотностью нейтронов позволит НИЦ КИ – ПИЯФ стать центром фундаментальных исследований с УХН.

После того как успешные испытания полномасштабной модели источника УХН показали возможность удерживать гелий в сверхтекучем состоянии при тепловой нагрузке в 60 Вт (при расчетной нагрузке 20 Вт), начались работы по проектированию технологического комплекса в главном зале реактора ВВР-М, где в данный момент готов проект размещения вакуумного и криогенного оборудования (рис. 1).

Все технологическое оборудование, показанное на рис. 1, имеется в наличии. Однако криогенное оборудование (рефрижератор и ожижитель) и система вакуумной откачки гелия сейчас находятся в здании компрессорной 1-го корпуса (правая часть схемы) для проведения испытаний с полномасштабной моделью источника. Для реализации проекта требуется решить следующие

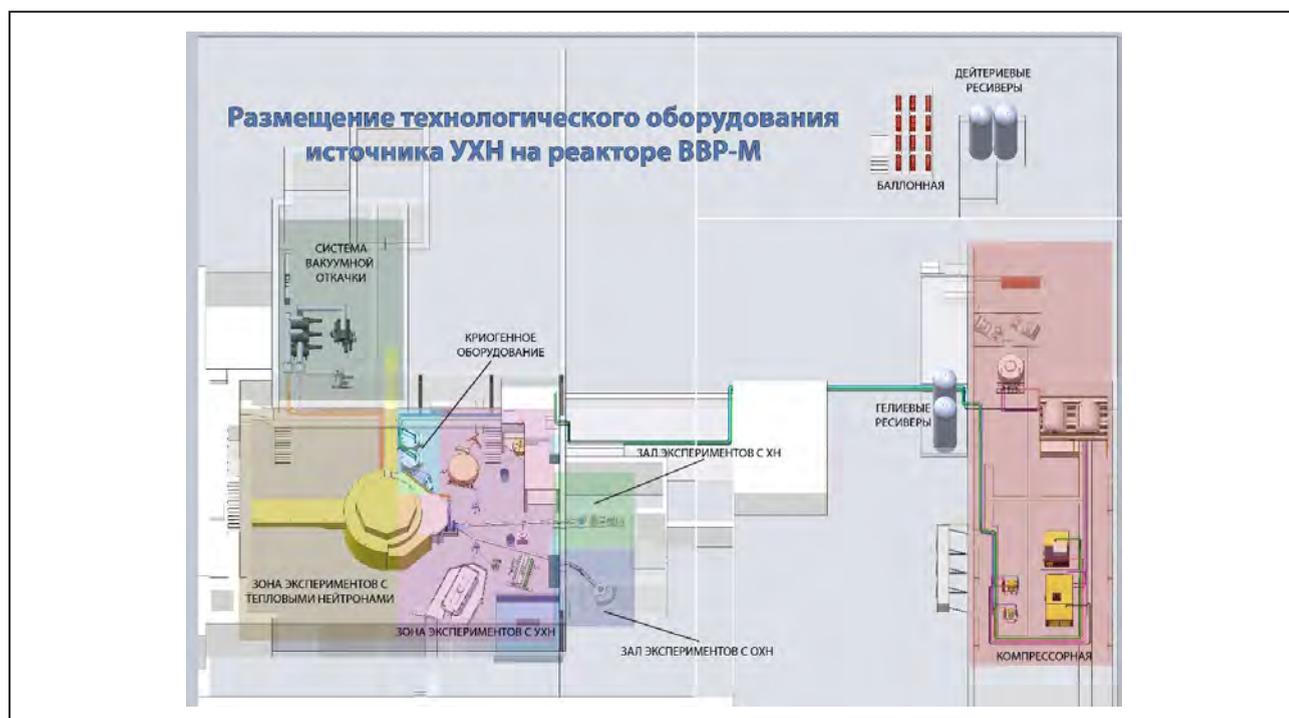
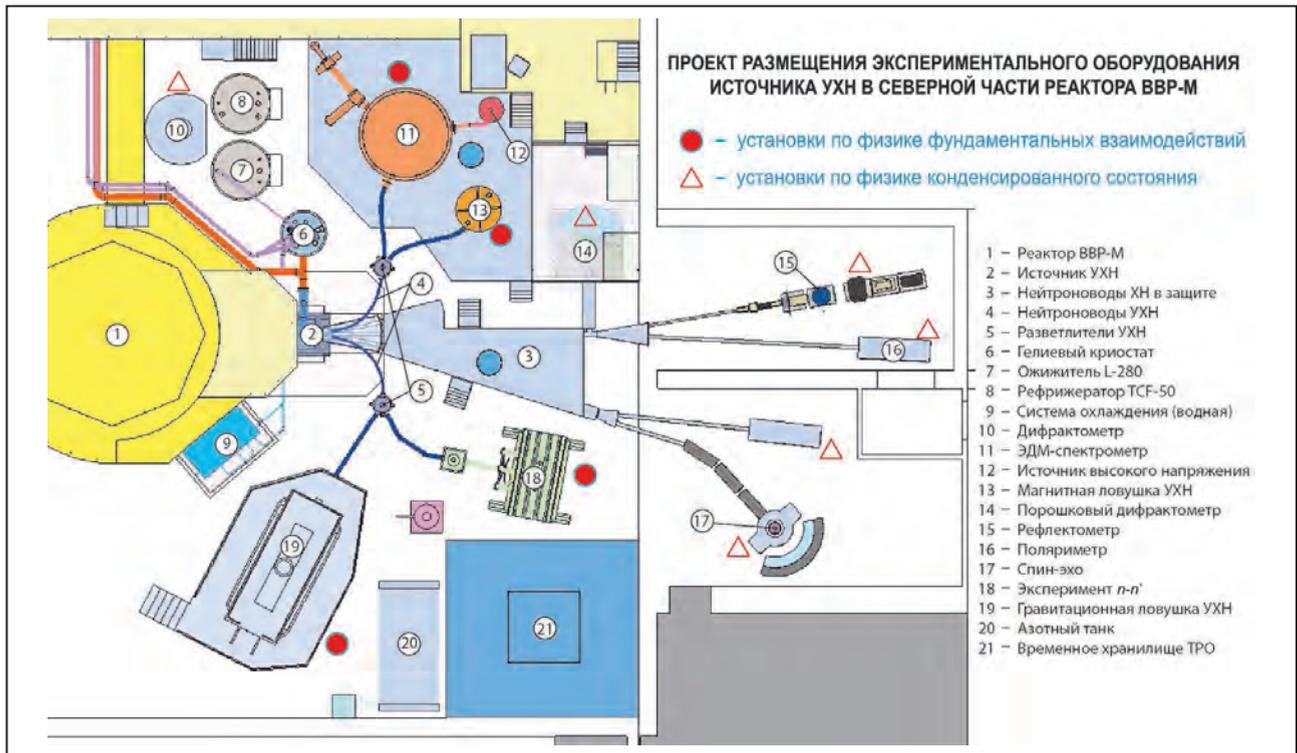


Рис. 1. Схема размещения технологического оборудования на источнике УХН



**Рис. 2.** Схема размещения экспериментального оборудования на источнике УХН: ● – исследовательские установки по физике фундаментальных взаимодействий; ▲ – исследовательские установки по физике конденсированного состояния

задачи: 1) перенести и смонтировать криогенное оборудование в главном зале реактора ВВР-М; 2) перенести и смонтировать откачное оборудование на специальном вакуумном участке здания ВВР-М; 3) осуществить установку и монтаж коммуникаций между отдельными элементами общей схемы; 4) заменить стальные дейтериевые ресиверы на нержавеющие. Наконец, важнейшей задачей является изготовление внутриканальной части источника УХН.

Подготовка северной части зала реактора ВВР-М уже начата. Произведен демонтаж платформ и экспериментальных установок вокруг тепловой колонны реактора. Изготовление внутриканальной части источника УХН ведется в цехе экспериментального и технологического оборудования НИЦ КИ – ПИЯФ.

В настоящее время разработана схема размещения экспериментального оборудования (рис. 2).

Все экспериментальные установки, показанные на рис. 2, имеются в наличии и находятся в той или иной степени готовности. В частности, установки НИЦ КИ – ПИЯФ для поиска электрического дипольного момента нейтрона и измерения времени жизни нейтрона сейчас проходят испытания на реакторе Института им. Лауэ – Ланжевена (ИЛЛ) и будут возвращены в НИЦ КИ – ПИЯФ после запуска высокоинтенсивного источника УХН. Следует отметить, что нейтронотводная система для холодных и очень холодных нейтронов с покрытием из изотопа  $Ni^{58}$  также имеется в наличии, хотя и требует некоторой доработки в системе разводки пучков. Технология изготовления нейтронотводов УХН на основе зеркальных реплик высокого качества с покрытием из изотопа  $Ni^{58}$  разработана и опробована на реакторе ИЛЛ.

Работа проведена в НИЦ КИ – ПИЯФ при поддержке гранта РФ (проект № 14-22-00105).

## Детектор ультрахолодных нейтронов для спектрометра по измерению времени жизни нейтрона

*В. А. Андреев, Е. А. Иванов, Д. С. Ильин, А. Г. Крившич – Отделение физики высоких энергий  
А. В. Васильев, А. П. Серебров – Отделение нейтронных исследований  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*

Для спектрометра по измерению времени жизни нейтрона методом хранения ультрахолодных нейтронов (УХН) в большой гравитационной ловушке был построен газоразрядный детектор. Он предназначен для счета нейтронов на спектрометре УХН в Институте им. Лауэ – Ланжевена (Гренобль, Франция).

Детектор состоит из шести пропорциональных счетчиков. Аноды изготовлены из золоченой вольфрамовой проволоки диаметром 25 мкм. Длины счетчиков выбраны таким образом, чтобы обеспечить максимальную площадь регистрации (рис.). Входное окно детектора диаметром 290 мм было изготовлено из алюминиевой фольги толщиной 100 мкм и поддерживается со стороны нейтронновода специальной решеткой. В рабочих условиях нагрузка на фольгу составляет около 660 кг.

Структура электрического поля в каждом пропорциональном счетчике была оптимизирована и выбрана близкой к симметричной. Это обеспечило значительное увеличение быстродействия

детектора за счет уменьшения максимального времени дрейфа образованных в газовой лавине ионов более чем в восемь раз, а также минимизировало вероятность срабатывания соседних ячеек, вызванного отдельными протон-трифонными треками (ядерная реакция  ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$ ).

При обработке амплитудных спектров при регистрации УХН необходимо принимать во внимание «стеночный» эффект, в результате которого часть событий попадает в область низких амплитуд спектра, а форма наблюдаемого спектра искажается. «Стеночный» эффект является ключевым фактором для обеспечения эффективной режекции фона и достижения высокой эффективности регистрации УХН.

Детектор успешно прошел испытания в лаборатории НИЦ КИ – ПИЯФ и был включен в состав установки для измерения времени жизни нейтрона на реакторе ИЛЛ Института им. Лауэ – Ланжевена.

Работа проведена при поддержке РФФИ (проект № 14-22-00105).



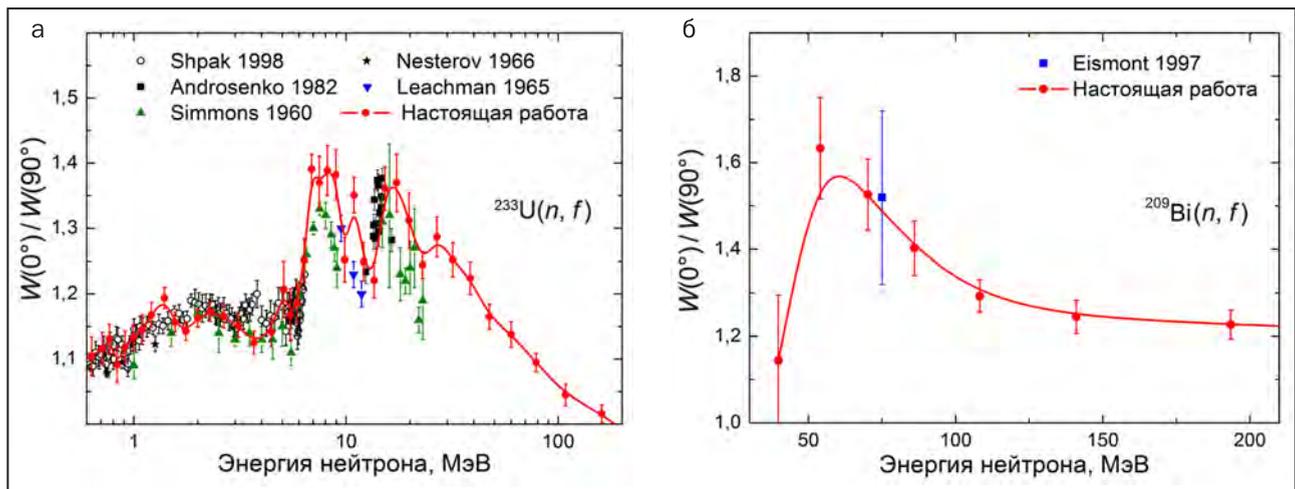
Части детектора УХН: верхняя крышка с входным окном, виден профиль поддерживающей решетки после испытаний номинальным давлением (а); нижняя часть детектора (основание) с шестью пропорциональными счетчиками (б); собранный детектор, вид со стороны основания, видны два предусилителя и газовый вентиль (в)

## Угловые распределения и анизотропия осколков деления $^{233}\text{U}$ и $^{209}\text{Bi}$ нейтронами с энергией 1–200 МэВ

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

В 2016 г. на нейтронном времяпролетном спектрометре ГНЕЙС завершены измерения угловых распределений  $W(\theta)$  осколков деления  $^{233}\text{U}$  и  $^{209}\text{Bi}$  нейтронами с энергией 1–200 МэВ (рис.). Из экспериментальных данных, полученных с использованием позиционно-чувствительных многопроволочных пропорциональных счетчиков в качестве детекторов осколков деления, вычислена величина анизотропии  $W(0^\circ)/W(90^\circ)$ , которая является параметром, используемым для теоретического описания угловых распределений осколков деления. Уникальность полученных результатов заключается в том, что для  $^{233}\text{U}$  в области энергии нейтронов выше 20 МэВ и для  $^{209}\text{Bi}$  во всем исследованном диапазоне энергий другие эксперименталь-

ные данные практически отсутствуют. Сложность измерений на ядре  $^{209}\text{Bi}$  обусловлена малой величиной сечения реакции деления – от нескольких мбн вблизи порога реакции ( $\sim 40$  МэВ) до  $\sim 70$  мбн при 200 МэВ, что на 1-2 порядка величины ниже сечений деления ядер-актиноидов. Высокая интенсивность нейтронного источника спектрометра ГНЕЙС в области промежуточных энергий нейтронов выше 10 МэВ позволяет успешно решать задачу измерения характеристик продуктов реакции деления при величине нейтронных сечений деления 1–100 мбн. Следующим объектом исследования является свинец, для которого также отсутствуют данные по анизотропии осколков деления на промежуточных энергиях.



Анизотропия осколков деления ядер  $^{233}\text{U}$  (а),  $^{209}\text{Bi}$  нейтронами с энергией 1–200 МэВ (б)

1. Vorobyev A.S., Gagarski A.M., Shcherbakov O.A., Vaishnene L.A. et al. // Book of Abstracts of the XXIV Int. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei. JINR. 2015. P. 84.
2. Vorobyev A.S., Gagarski A.M., Shcherbakov O.A., Vaishnene L.A. et al. // JETP Lett. 2016. V. 104. Iss. 6. P. 365.

## Особенности тройного деления $^{233, 235}\text{U}$ и $^{239, 241}\text{Pu}$ поляризованными нейтронами

А. М. Гагарский, И. С. Гусева, Т. А. Заварухина, Г. А. Петров –  
 Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
 Ю. Н. Копач – Объединенный институт ядерных исследований  
 Т. Е. Кузьмина, Г. П. Тюрин – Радиевый институт им. В. Г. Хлопина  
 Ф. Гённенвайн, П. Есингер – Тюбингенский университет Эберхарда и Карла  
 Э. Лельевр-Берна, В. Несвижевский, Т. Солднер – Институт им. Лауэ – Ланжевена  
 М. Муттерер – Технический университет Дармштадта  
 В. Г. Тржаска – Университет Юваскюля

Легкие заряженные частицы (ЛЗЧ) в тройном делении ядер в основном испускаются в момент разрыва из области шейки между осколками деления. Их угловое распределение сфокусировано силами Кулона, при этом наиболее вероятный угол вылета  $\alpha$ -частиц, составляющих более 90 % от всех ЛЗЧ, равен  $\sim 82^\circ$  относительно импульса легкого осколка деления  $\mathbf{p}_{\text{ЛО}}$ .

Было обнаружено, что в тройном делении поляризованными нейтронами нарушается симметрия углового распределения ЛЗЧ вокруг оси деления. При инвертировании спина нейтрона  $\sigma_n$ , направленного перпендикулярно импульсу легкого осколка  $\mathbf{p}_{\text{ЛО}}$  и импульсу ЛЗЧ  $\mathbf{p}_{\text{ЛЗЧ}}$ , наблюдается небольшой ( $\sim 0,1^\circ$ ) сдвиг углового распределения ЛЗЧ относительно оси деления (ROT-эффект). Кроме того, полные вероятности вылета ЛЗЧ вверх и вниз относительно ориентированной плоскости, образованной импульсом легкого осколка деления  $\mathbf{p}_{\text{ЛО}}$  и спином нейтрона  $\sigma_n$ , отличаются на  $\sim 0,1\%$  (TRI-эффект).

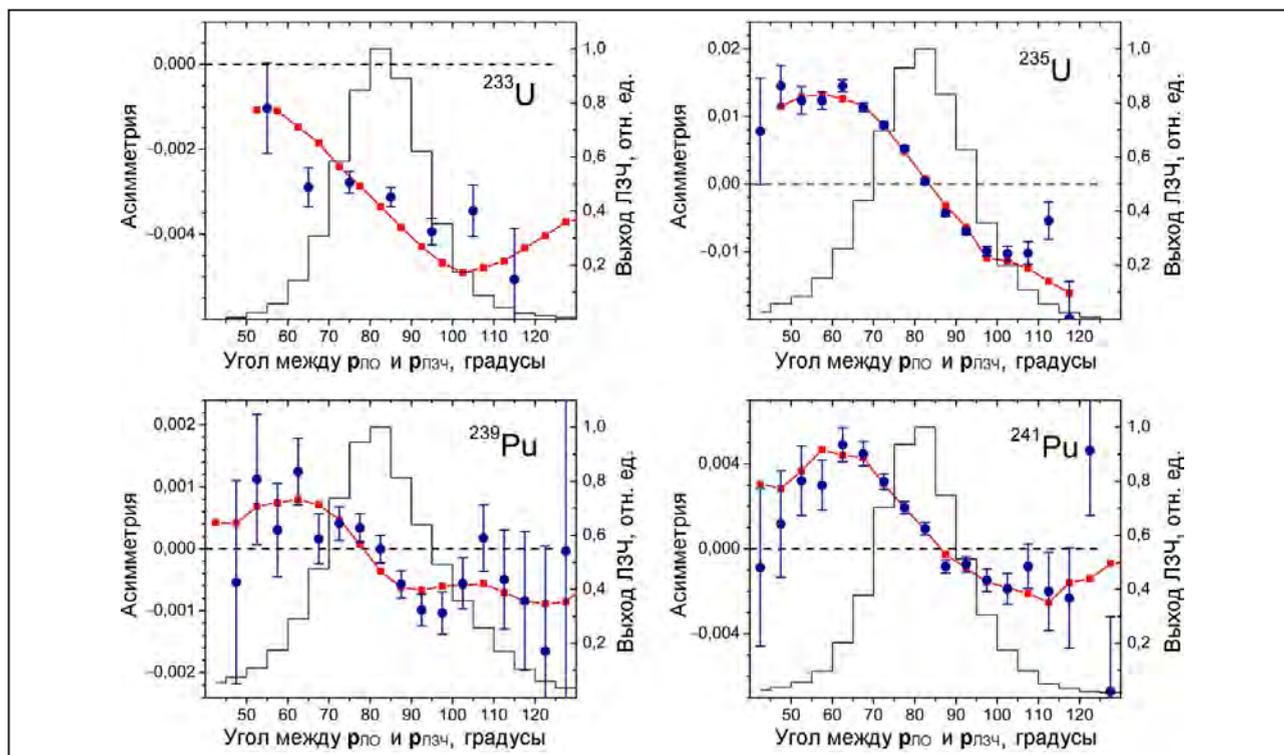
Эти малые эффекты исследовались путем измерения угловой зависимости коэффициента асимметрии ( $A$ ) счета совпадений осколков деления с ЛЗЧ ( $N_{\uparrow\downarrow}$ ) при периодическом перевороте спина  $\sigma_n$ :  $A = (N_{\uparrow} - N_{\downarrow}) / (N_{\uparrow} + N_{\downarrow})$ . Легко понять, что «чистый» ROT-эффект приводит к изменению знака  $A$  слева и справа от максимума углового распределения, в то время как TRI-эффект дает постоянную асимметрию  $A$  для всего углового распределения.

В детальных исследованиях этих эффектов при делении  $^{233, 235}\text{U}$  и  $^{239, 241}\text{Pu}$  было показано, что ROT- и TRI-эффекты присутствуют одновременно

во всех этих реакциях, но их величины и знаки сильно различаются. Экспериментальные зависимости асимметрии  $A$  от угла между  $\mathbf{p}_{\text{ЛЗЧ}}$  и  $\mathbf{p}_{\text{ЛО}}$  приведены на рисунке вместе с результатами их подгонки суммой выражений для TRI- и ROT-эффектов. Полученные в результате минимизации  $\chi^2$  экспериментальные значения параметра ROT-сдвига при перевороте спина –  $2\Delta$  и коэффициента TRI-асимметрии –  $D$  для исследованных ядер приведены в таблице.

В предложенной квазиклассической модели TRI- и ROT-эффекты объясняются коллективным вращением и поперечными вибрациями делящегося ядра перед разрывом. Эти движения определяются квантовыми числами переходных состояний над барьером деления ( $J, K$ ) (спин компаунд-ядра и его проекция на ось деления). ROT-эффект возникает при движении ЛЗЧ во вращающемся электрическом поле разлетающихся осколков и является индикатором скорости вращения ядра в момент разрыва (ось деления продолжает вращаться после разрыва с быстро убывающей угловой скоростью согласно закону сохранения углового момента). TRI-эффект является результатом влияния вращения делящегося ядра перед разрывом на поперечное движение зарождающихся ЛЗЧ в области шейки (сила Кориолиса). Это взаимодействие вызывает асимметрию эмиссии ЛЗЧ относительно плоскости, образованной  $\sigma_n$  и  $\mathbf{p}_{\text{ЛО}}$ .

С помощью данной модели при практически однозначном выборе доминирующих ( $J, K$ ) переходных состояний для каждого из четырех ядер удалось хорошо совместно описать как знаки,



Угловая зависимость асимметрии  $A$  для четырех изученных реакций: синие точки – эксперимент; красные точки – описание в рамках предложенной модели TRI- и ROT-эффектов; гистограммы со шкалой справа – полученные в эксперименте угловые распределения ЛЗЧ

**Таблица.** Экспериментальные значения параметра ROT-сдвига  $2\Delta$ , коэффициента TRI-асимметрии  $D$  для четырех исследованных ядер и квантовые числа  $(J, K)$  доминирующих переходных состояний над барьером деления, полученные при совместном описании экспериментальных данных в рамках предложенной модели

Ядро	$^{233}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$
Спин-четность $I^\pi$	$5/2^+$	$7/2^-$	$1/2^+$	$5/2^-$
ROT $2\Delta$	$0,021(4)^\circ$	$0,215(5)^\circ$	$0,020(3)^\circ$	$0,047(4)^\circ$
TRI $D \cdot 10^3$	$-3,90(12)$	$1,7(2)$	$-0,23(9)$	$1,30(15)$
$\sigma_{f_+}/\sigma_{f_-}$	1,27	1,76	0,48	0,64
$(J_+, K_+)$	(3,2)	(4,0)	(1,1)	(3,0)
$(J_-, K_-)$	(2,0)	(3,2)	(0,0)	(2,1)

так и величины TRI- и ROT-эффектов. Показана высокая чувствительность эффектов к значениям  $(J, K)$ . В таблице приведены квантовые числа  $(J_\pm, K_\pm)$  доминирующих переходных состояний над барьером деления, полученные при совместном описании экспериментальных данных в рамках предложенной модели. Знаки « $\pm$ » соответствуют захвату в состояния компаунд-ядра со спинами  $J_\pm = I \pm 1/2$ , где  $I$  – спин материнского

ядра. При анализе использовались отношения вкладов в сечение деления холодными нейтронами из компаунд-состояний со спинами  $J_\pm$   $\sigma_{f_+}/\sigma_{f_-}$  (см. табл.).

Изучение TRI- и ROT-эффектов в угловых распределениях продуктов тройного деления поляризованными нейтронами оказывается новым методом для спектроскопии переходных состояний  $(J, K)$  вблизи барьера деления.

## Экспериментальное исследование характеристик запаздывающих нейтронов из реакции деления $^{238}\text{U}$ протонами с энергией 1 ГэВ

А. С. Воробьев, О. А. Щербаков – Отделение нейтронных исследований  
 Л. А. Вайшнене, Ф. В. Мороз – Отделение физики высоких энергий  
 НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
 Д. Е. Гремячкин, А. С. Егоров, В. Ф. Митрофанов, К. В. Митрофанов, В. М. Пиксайкин,  
 Б. Ф. Самылин – АО «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского»

Целью данной работы является измерение относительных выходов запаздывающих нейтронов и периодов полураспада их ядер-предшественников при взаимодействии релятивистских протонов с ядрами  $^{238}\text{U}$ . Эксперимент выполнен на пучке протонов с энергией 1 ГэВ синхротрона СЦ-1000 с использованием экспериментальной установки, включающей детектор нейтронов, пневмопочту и электронную измерительную систему. Сравнение среднего периода полураспада  $\langle T \rangle$  ядер-предшественников в цепочках  $\beta$ -распада, испускающих запаздывающие нейтроны, измеренного в данной работе, с результатами других авторов показало, что данные согласуются в пределах погрешностей. Показано, что испускание запаздывающих ней-

тронов в реакции  $^{238}\text{U}(n, f)$  происходит в асимметричном канале деления, в котором основным делящимся ядром является компаунд-ядро  $^{234}\text{U}^*$ . Вместе с тем показано, что измеренное в данной работе значение среднего периода полураспада предшественников запаздывающих нейтронов  $\langle T \rangle = 7,13 \pm 0,12$  с существенно отличается от величины  $\langle T \rangle = 12,38 \pm 0,37$  с, полученной в низкоэнергетическом делении  $^{235}\text{U}$  быстрыми нейтронами, несмотря на то, что в том и другом случае делятся одинаковые компаунд-ядра. Объяснение такого расхождения, а также измерения на ядрах  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $\text{Pb}$  являются целью дальнейших исследований, которые планируется проводить на пучке протонов с энергией 1 ГэВ синхротрона НИЦ КИ – ПИЯФ (рис.).

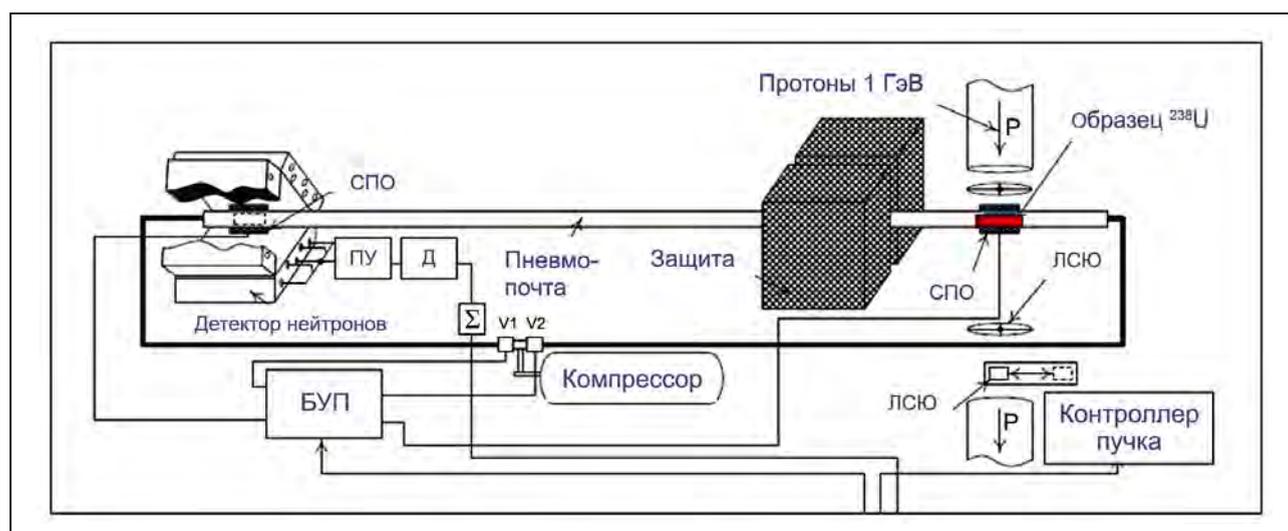


Схема экспериментальной установки: СПО – сенсоры положения образца; ЛСЮ – лазерная система юстировки; БУП – блок управления пневмопочтой; ПУ – предусилитель; Д – дискриминатор;  $\Sigma$  – сумматор импульсов;  $v_1$  и  $v_2$  – электромагнитные клапаны

1. Егоров А. С. ..., Вайшнене Л. А., Мороз Ф. В., Воробьев А. С., Щербаков О. А. // Вопр. атом. науки и техн. Сер. Ядерно-реакторн. конст. 2016. Вып. 2. С. 5.
2. Egorov A.S. ..., Vaishnene L.A., Moroz F.V., Vorobyev A.S., Shcherbakov O.A. // Progr. Nucl. Energy. 2017. V. 97. P. 106.

# Анализ пространственного разрешения эксперимента по проверке принципа эквивалентности для нейтрона дифракционным методом

Ю. П. Брагинец, В. В. Воронин, И. А. Кузнецов, М. В. Ласица, С. Ю. Семенихин, В. В. Федоров – Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
 А. Я. Бердников, Я. А. Бердников – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

В настоящее время готовится эксперимент по проверке эквивалентности инертной и гравитационной масс нейтрона новым методом, основанным на использовании эффектов, возникающих при дифракции нейтронов в больших совершенных кристаллах. Основная особенность предлагаемого метода заключается в прямой компенсации гравитационной силы, действующей на нейтрон, силой инерции, действующей на нейтрон в неинерциальной системе координат, связанной с Землей. По сути, эксперимент аналогичен классическим экспериментам Этвеша или Брагинского, только в нашем случае на одной чаше весов находится Земля, а на другой – нейтрон. В 2016 г. проведены исследования пространственного разрешения установки. Исследования проводились при углах Брэгга 74–82°. Было обнаружено снижение пространственного разрешения при углах Брэгга > 78°. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

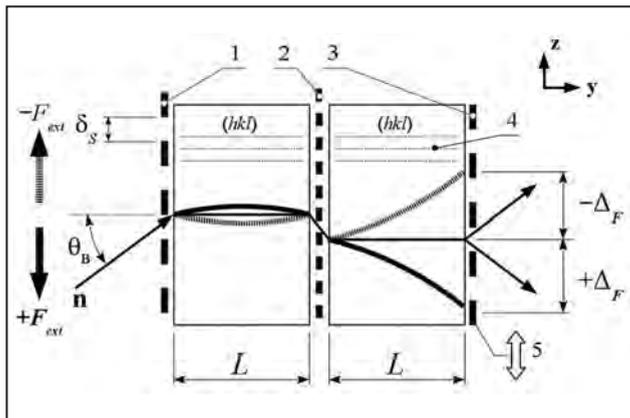


Рис. 1. Схема эксперимента: 1, 2, 3 – входная, промежуточная и выходная (подвижная) щели соответственно; 4 – кристаллографические плоскости; 5 – направление движения выходной щели 3

Экспериментальные результаты показаны на рис. 2, 3, где видно, что увеличение угла Брэгга приводит к уменьшению контраста (см. рис. 3). Для ответа на вопрос о причинах уменьшения контраста планируется продолжение исследований на реакторе ИЛЛ (Гренобль, Франция).

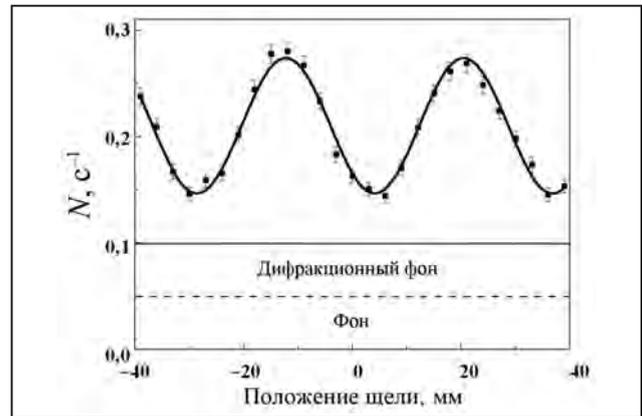


Рис. 2. Зависимость интенсивности от положения щели на выходной поверхности кристалла при угле дифракции 76°

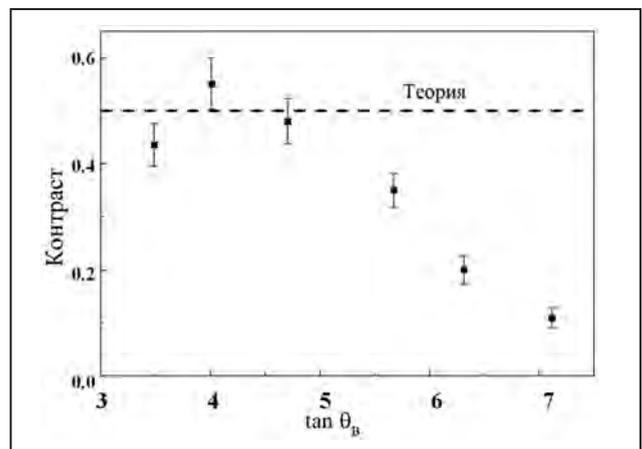


Рис. 3. Зависимость контраста (см. рис. 2) от угла дифракции

## Эффект двухкристальной фокусировки

Ю. В. Борисов, Ю. П. Брагинец, В. В. Воронин, И. А. Кузнецов, М. В. Ласица, С. Ю. Семенихин, В. В. Федоров – Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
А. Я. Бердников, Я. А. Бердников, М. Л. Иванова – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Проведено исследование явления дифракционной фокусировки в двухкристальной схеме дифракции по Лауэ. Эксперимент проводился на пучке тепловых нейтронов реактора ВВР-М. Исследовалась дифракция по Лауэ на кристаллах кремния размерами  $110 \times 110 \times 100$  мм<sup>3</sup> на плоскости (220). Схема эксперимента показана на рис. 1. Кристаллы были вырезаны из единого моноблока, таким образом, расстояние между ними являлось фиксированным. В результате на выходе второго кристалла мы имели два фокуса от прямого и отраженного пучков, распространявшихся между кристаллами (рис. 2).

Известно, что малое угловое отклонение пучка нейтронов между кристаллами приводит к огромной величине смещения линии по выходной поверхности второго кристалла за счет эффекта дифракционного усиления. Данные исследования

открывают перспективу по созданию ультрапрецизионных устройств для изучения свойств нейтрона и его взаимодействия с окружающей материей.

Ширина линии, показанная на рис. 2, соответствует угловому смещению пучка между кристаллами  $\sim 1,5 \cdot 10^{-7} = 0,03''$ , что, например, позволяет на строящемся реакторе ПИК достичь статистической чувствительности к заряду нейтрона  $\sim 1,5 \cdot 10^{-21}$  е за 100 сут накопления статистики.

Дальнейшее увеличение чувствительности возможно еще приблизительно на два порядка величины, т. к. собственное пространственное разрешение двухкристальной схемы эксперимента много лучше реально измеренного. Для ответа на вопрос об экспериментально достижимой чувствительности метода необходимы более детальные экспериментальные исследования на интенсивном пучке холодных нейтронов.

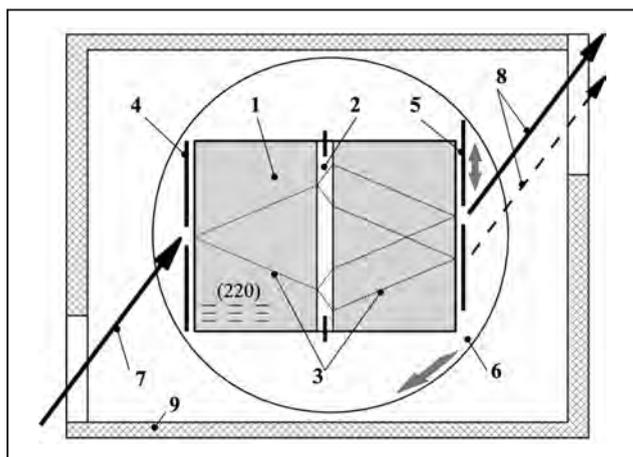


Рис. 1. Схема эксперимента

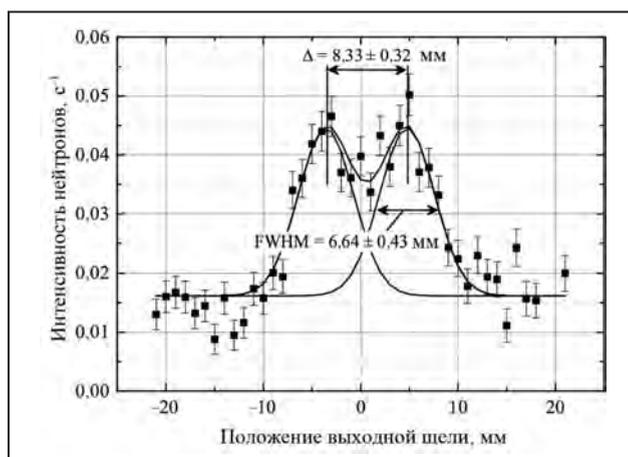


Рис. 2. Зависимость регистрируемой интенсивности от положения щели на выходе второго кристалла

1. Воронин В. В. ..., Борисов Ю. В., Брагинец Ю. П., Кузнецов И. А., Ласица М. В., Семенихин С. Ю., Федоров В. В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102. Вып. 7. С. 471–474.

2. Kuznetsov I.A. ..., Borisov Yu.V., Braginetz Yu.P., Fedorov V.V., Lasitsa M.V., Semnikhin S.Yu. ..., Voronin V.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 746. P. 012049.

## Класс светосилы нейтронных рефлектометров

Н. К. Плешанов – Отделение нейтронных исследований  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Наиболее подробно рассмотрена связь интенсивности и разрешения в нейтронной рефлектометрии, что актуально как для оптимизации съемок на любом нейтронном рефлектометре, так и при проектировании нейтронных рефлектометров. Светосила  $\mathcal{L}$  была определена как максимально возможный поток при условии съемок с переданным импульсом  $q_0$  и разрешением  $\Delta q_0$ , т. е. впервые была связана с разрешением по переданному импульсу. Так, сходные выражения были получены для потока монохроматических и белых пучков. В частности, при измерениях на монохроматическом пучке с  $q$  и  $\Delta q$  поток

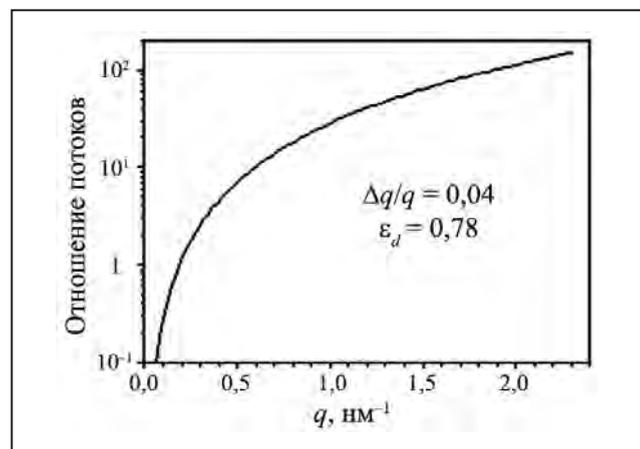
$$\Phi = \varepsilon_g \varepsilon_d \frac{q_0}{q} \left( \frac{\Delta q}{\Delta q_0} \right)^3 \mathcal{L},$$

где  $\varepsilon_g = 2(d_1/d_2 + d_2/d_1)^{-1}$  – фактор, определяющий уменьшение потока при отклонении ширин первой и второй коллимационных диафрагм от оптимального (для заданной расходимости  $\Delta\theta$  пучка) соотношения  $d_1 = d_2$ ;  $\varepsilon_d = (3\sqrt{3}/2)\kappa(1 + \kappa^2)^{-3/2}$  – фактор, определяющий уменьшение потока при отклонении  $\kappa = (\Delta\lambda/\lambda)(\Delta\theta/\theta)^{-1}$  от оптимального (для заданного разрешения  $\Delta q$ ) соотношения  $\Delta\theta/\theta = \sqrt{2}\Delta\lambda/\lambda$ .

Формулы позволяют находить интенсивности для различных условий съемок и достаточно хорошо иллюстрируют предложенный подход к проблеме соотношения интенсивности и разрешения в нейтронной рефлектометрии. Определив светосилу для унифицированных параметров (предложены  $q_0 = 1 \text{ нм}^{-1}$  и  $\Delta q_0 = 0,01 \text{ нм}^{-1}$ ), получим референтную светосилу, или класс светосилы  $C_R = \log_{10} \mathcal{L}$  – одно-единственное число,

характеризующее светосилу (каждого из режимов работы) прибора, которое может быть использовано для классификации существующих и оптимизации проектируемых рефлектометров.

Потенциал нового подхода был продемонстрирован на примере нейтронного рефлектометра НР-4М (НИЦ КИ – ПИЯФ). Было показано, что при оптимизации съемок с монохроматическим пучком потоки на больших  $q$  увеличиваются до двух порядков величины (рис.) практически без ухудшения разрешения. При оптимизации съемок с белым пучком потоки на больших  $q$  увеличиваются до порядка величины, причем с улучшением разрешения. Определен класс светосилы рефлектометра НР-4М для четырех режимов его работы: 2.1 (монохроматический неполяризованный пучок); 1.9 (монохроматический поляризованный пучок); 1.5 (белый неполяризованный пучок); 1.1 (белый поляризованный пучок).



Отношение потока для диафрагм с изменяемой шириной щелей, обеспечивающих съемки с  $\Delta q/q = 0,04$  и  $\varepsilon_d = 0,78$ , к потоку для щелей с фиксированной шириной 0,2 мм в зависимости от  $q$

1. Плешанов Н. К. // Поверхность. Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исслед. 2016. № 8. С. 20–32.
2. Pleshanov N.K. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2016. V. 820. P. 146–155.
3. Pleshanov N.K. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2016. V. 834. P. 197–204.

## Нейтронно-активационное определение Au, Pt, Re, Ag, Ir в кварц-адулярных жилах Милоградовского месторождения

А. И. Егоров, В. Г. Зиновьев, Ю. Е. Логинов, И. А. Митропольский, И. С. Окунев,  
Т. М. Тюкавина, Г. И. Шуляк – Отделение нейтронных исследований  
П. А. Сушков – Отдел физики и техники реакторов  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Инструментальная и радиохимическая нейтронно-активационные методики были разработаны для анализа образцов кварц-адулярных жил Милоградовского эпитегрмального золотосеребряного месторождения (Дальний Восток, Приморье). Определены оптимальные условия отделения Au, Pt, Re, Ag, Ir от неблагородных металлов в хроматографической системе А400 МВ в Cl-форме – 0,2 М HCl.

Смола Purolite А400 МВ является гелиевой анионообменной смолой высокой емкости на основе полистирола, прошитого дивинилбензолом с  $N^+(CH_3)_3$  функциональной группой. Статическая обменная емкость составляет 1,3 г-экв/л. Сравнение экспериментальных и расчетных значений коэффициентов сорбции ионов  $[PtCl_4]^{2-}$ ,  $[PtCl_6]^{2-}$ ,  $[AuCl_4]^-$ ,  $[ReO_4]^-$  смолой А400 МВ представлены на рисунке.

Оптимальная высота слоя сорбента была определена по распределениям по длине колонки

радионуклидов, осажденных на смоле. Изменялось отношение активности  $A_1$  радионуклида на высоте колонки  $L$  к начальной активности раствора  $A_0$ . Профили распределения Re, Pt, Ir, Au, Ag представлены на рис. 2, они задерживаются в основном в первых 5-6 см хроматографической колонки. Для проведения измерений был использован слой смолы 10 см.

Гамма-спектры от облученных исследуемых образцов и образцов сравнения регистрировали коаксиальным HPGe-детектором с эффективностью регистрации 20 % и энергетическим разрешением 1,7 кэВ по линии  $^{60}Co$  с  $E\gamma = 1\ 332,5$  кэВ. Входная скорость счета детектора была примерно в 5 раз меньше, а соотношение «сигнал – фон» в 82 раза лучше при регистрации  $\gamma$ -излучения образца, прошедшего ионообменное хроматографическое разделение, по сравнению со спектром неразделенного образца. Результаты измерения концентрации Au, Pt, Re, Ag и Ir в образцах

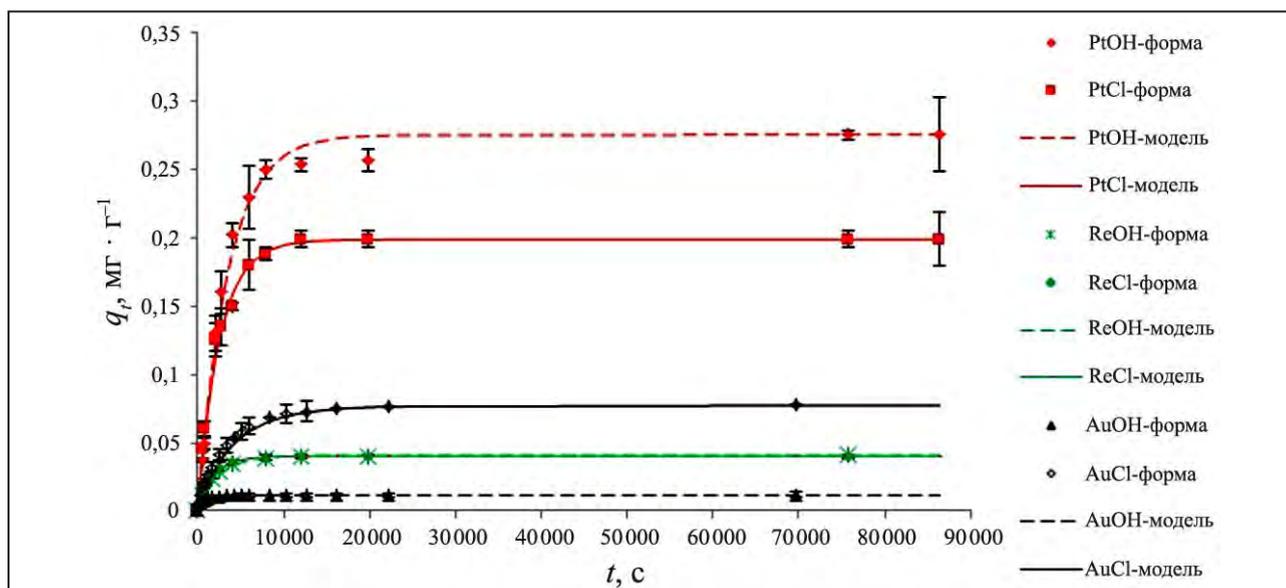


Рис. 1. Кинематические кривые сорбции анионных комплексов на смоле А400 МВ в ОН- и Cl-формах

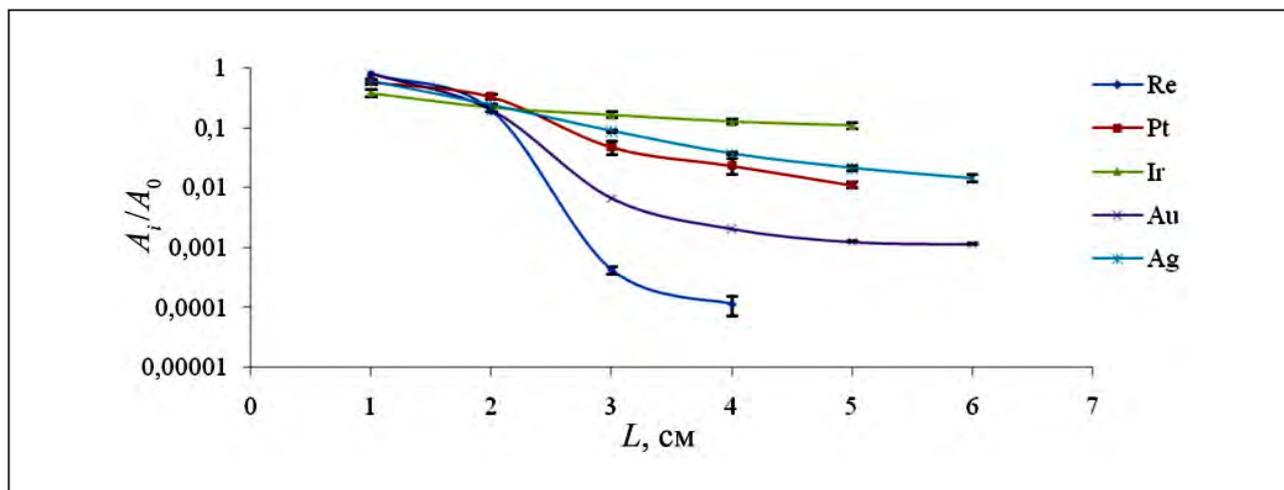


Рис. 2. Профили распределений Re, Pt, Ir, Au, Ag вдоль длины  $L$  хроматографической колонки

Таблица. Содержание Au, Pt, Re, Ag и Ir (% масс.) в образцах кварц-адулярных жил Милоградского месторождения

Образец	Au	Pt	Re	Ag	Ir
582 28-12	$6,8(8) \cdot 10^{-5}$	$4,6(4) \cdot 10^{-4}$	$7(2) \cdot 10^{-7}$	$3,9(2) \cdot 10^{-3}$	$5,2(3) \cdot 10^{-5}$
583 15-12	$2,3(4) \cdot 10^{-6}$	$1,0(1) \cdot 10^{-3}$	$1,3(4) \cdot 10^{-6}$	$2,4(2) \cdot 10^{-4}$	$1,3(8) \cdot 10^{-4}$
583 16-12	$2,8(6) \cdot 10^{-6}$	$4,2(3) \cdot 10^{-4}$	$6(2) \cdot 10^{-7}$	$1,7(1) \cdot 10^{-4}$	$7,4(3) \cdot 10^{-5}$
583 66-13	$3,2(3) \cdot 10^{-4}$	$4,5(3) \cdot 10^{-4}$	$1,3(1) \cdot 10^{-6}$	$1,6(1) \cdot 10^{-2}$	$8(2) \cdot 10^{-5}$
583 80-13	$8,7(9) \cdot 10^{-4}$	$1,1(1) \cdot 10^{-3}$	$2,8(3) \cdot 10^{-6}$	$4,0(2) \cdot 10^{-2}$	$2,5(8) \cdot 10^{-4}$

кварц-адулярных жил Карлик и Южная Милоградского золотосеребряного месторождения представлены в таблице.

Пределы обнаружения Au, Pt, Re, Ir и Ag для данной радиохимической методики равны  $3 \cdot 10^{-9}$ ;  $2 \cdot 10^{-8}$ ;  $8 \cdot 10^{-8}$ ;  $7 \cdot 10^{-7}$  и  $1 \cdot 10^{-8}$  % соответственно, при погрешности измерения 3–25 %.

Комбинация инструментального и радиохимического нейтронно-активационного анализа позволила определить еще 40 элементов с пределом обнаружения  $n \cdot (10^{-4} - 10^{-10})$  % и погрешностью измерения 3–25 %. В результате проведенных измерений было подтверждено наличие платинового оруднения в образцах жил Карлик и Южная Милоградского эпитеpmального золотосеребряного месторождения.

## Спиновая структура квазидвумерного фрустрированного магнетика $\text{Li}_3\text{Ni}_2\text{SbO}_6$ с магнитной решеткой типа «пчелиные соты»

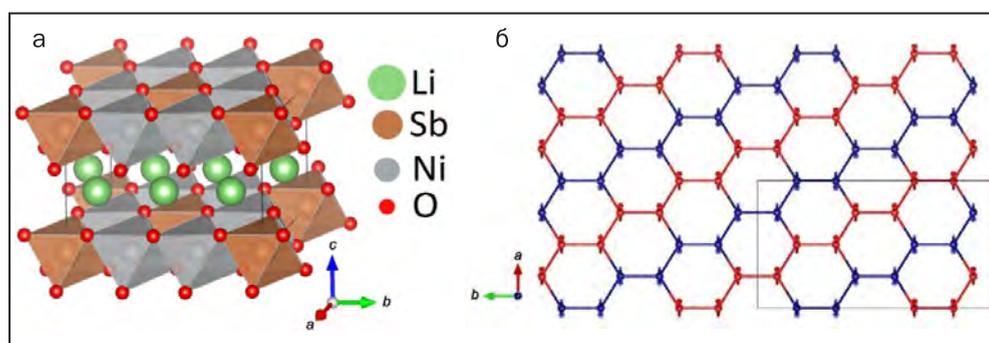
А. Н. Коршунов, А. И. Курбаков, А. Л. Малышев, С. Ю. Подчерзцев  
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Квазидвумерный магнетизм является одной из самых захватывающих тем современной физики твердого тела. Понижение размерности приводит к появлению большого числа новых явлений. Данная работа посвящена экспериментальному изучению кристаллической структуры и установлению основного квантового состояния в низкоразмерном магнетике со слоистой сверхструктурой катионных слоев типа «пчелиные соты»  $\text{Li}_3\text{Ni}_2\text{SbO}_6$  с помощью нейтроннои и синхротронной порошковой дифракции.

Синхротронный эксперимент выявил незначительное расщепление пиков, что позволило определить истинную пространственную группу  $\text{Li}_3\text{Ni}_2\text{SbO}_6$  –  $C2/m$ ; также было обнаружено дополнительное диффузное рассеяние, указывающее на наличие ошибок упаковки слоев. Кристаллическая структура соединения базируется на структурных мотивах сопряженных по ребрам кислородных октаэдрических слоев. Упорядоченные смешанные слои, состоящие из магнитных  $\text{Ni}^{2+}$ - и немагнитных  $\text{Sb}^{5+}$ -катионов внутри кислородных октаэдров, чередуются с Li-слоями (рис. а). Определено, что упорядочение в пределах слоя является практически идеальным: не наблюдается

никакого замещения между позициями Ni и Sb. Близкие к  $90^\circ$  значения Ni-O-Ni углов связей предсказывают наличие слабых ферромагнитных внутрислоевых взаимодействий в соответствии с правилами Гуденафа – Канамори; слегка искаженные углы O-Ni-O указывают на наличие тригонального кристаллического поля на позициях Ni.

Фрустрации взаимодействий между спинами ближайших, вторых и третьих соседей, а также квантовые флуктуации приводят к большому разнообразию возможных основных состояний. Низкотемпературная нейтронная порошковая дифракция показала появление дополнительных пиков, связанных с магнитным рассеянием, ниже  $T_N = 15$  К. Впервые экспериментально установлено нетривиальное основное квантовое состояние – антиферромагнитное типа зигзага с вектором распространения  $\mathbf{k} = (1/2, 1/2, 0)$  (рис. б): зигзагообразные ферромагнитные цепочки связаны между собой антиферромагнитно в  $ab$ -плоскости. При этом спины еще и наклоняются в магнитоупорядоченном состоянии (ниже  $T_N$ ) при понижении температуры от положения вдоль кристаллографической  $c$ -оси до положения перпендикулярно сотовому (001) слою (на  $15,6^\circ$ ).



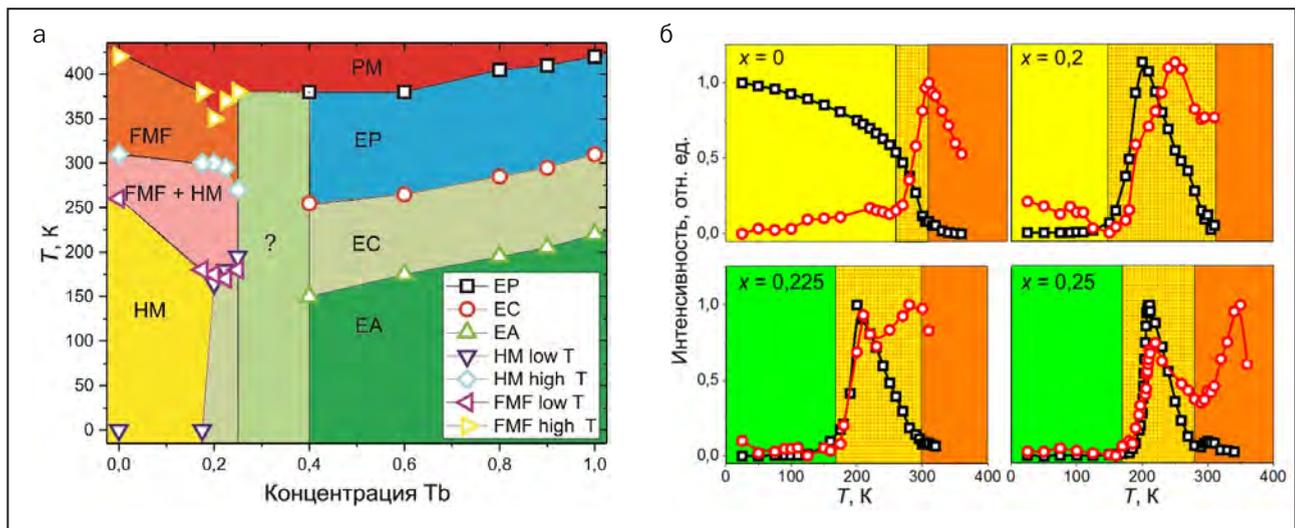
Структура  $\text{Li}_3\text{Ni}_2\text{SbO}_6$ : кристаллическая (а); магнитная (б). Магнитная элементарная ячейка (прямоугольник) удвоена вдоль осей  $a$  и  $b$  по отношению к кристаллической. Противоположные направления спинов отмечены разными цветами

## Магнитная фазовая диаграмма сплавов $Y_{1-x}Tb_xMn_6Sn_6$ ( $x = 0; 0,175; 0,2; 0,225; 0,25$ )

А. А. Быков, С. В. Григорьев, Е. В. Москвин, А. Н. Пирогов, Ю. О. Четвериков – Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
 С. В. Григорьев, Е. В. Москвин – Санкт-Петербургский государственный университет  
 А. Н. Пирогов – Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН,  
 Уральский федеральный университет им. Б. Н. Ельцина

В последнее время существенное внимание уделяется сплавам, имеющим слоистую магнитную структуру, в том числе и соединениям типа  $RMn_6Sn_6$ , где R – редкоземельный ион. В данной работе соединения  $Y_{1-x}Tb_xMn_6Sn_6$  ( $x = 0; 0,175; 0,2; 0,225; 0,25$ ) исследовались методом малоуглового рассеяния нейтронов и парамагнитного спин-эхо-рассеяния нейтронов. Был обнаружен геликомагнитный тип магнитного упорядочения для  $YMn_6Sn_6$  в широком диапазоне температур ниже  $T_N = 310$  К. По мере приближения к  $T_N$  на карте рассеяния появляется еще один пик с лоренцевой формой профиля в центре карты, т. е. пик с  $Q = 0$ . Причина

появления такого пика на карте рассеяния – появление ферромагнитных флуктуаций магнитных моментов Mn в плоскости  $ab$ . Магнитный порядок в соединениях, допированных Tb, меняется с увеличением температуры от конической ферримагнитной фазы в низких  $T$  через геликоидальную фазу к фазе ферромагнитных корреляций вблизи  $T_N$ . Температурно-концентрационная магнитная фазовая диаграмма сплавов  $Y_{1-x}Tb_xMn_6Sn_6$ , построенная на основе полученных данных, и температурная зависимость интегральных интенсивностей брэгговского и центрального пиков для различных концентраций Tb представлены на рис. а, б.



Температурно-концентрационная магнитная фазовая диаграмма (а); температурная зависимость интегральных интенсивностей брэгговского и центрального пиков для различных концентраций Tb (б). Цветом отмечены различные магнитные состояния: желтым – геликомагнитная фаза; зеленым – ферримагнитная легкая плоскость; оранжевым – ферромагнитные флуктуации (смесь геликомагнитной фазы и фаза ферромагнитных флуктуаций заштрихованы)

1. Bykov A.A., Chetverikov Yu.O. ..., Grigor'ev S.V. // JETP Lett. 2015. V. 101. P. 699.  
 2. Bykov A.A., Chetverikov Yu.O., Moskvina E.V. ..., Grigor'ev S.V. // J. Magn. Magn. Mater. 2017. V. 424. P. 347–351.

## Многоуровневая структура алмазных гидрогелей по данным рассеяния нейтронов

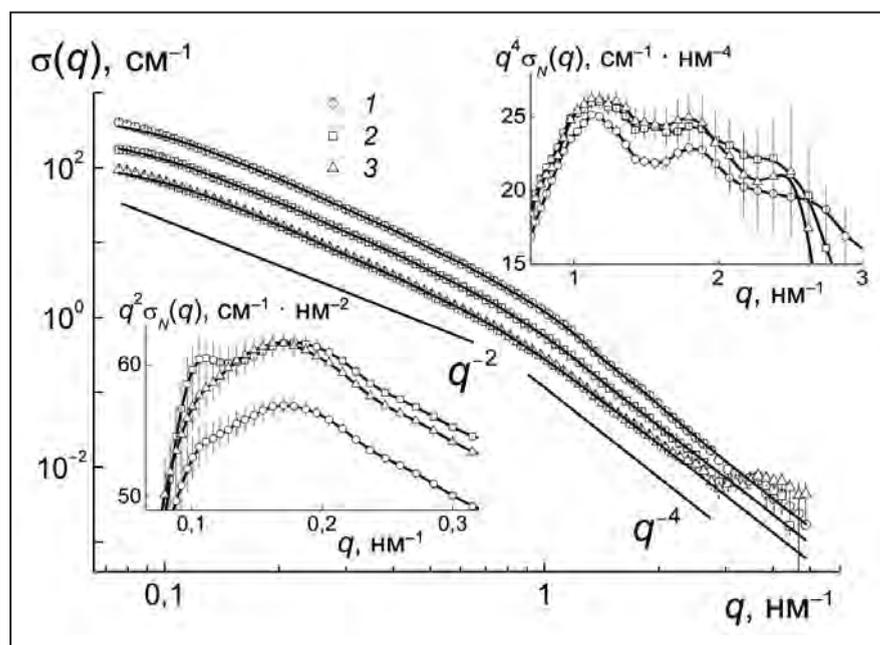
Ю. В. Кульвеллис, В. Т. Лебедев – Отделение нейтронных исследований  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

А. И. Куклин – Объединенный институт ядерных исследований

А. Я. Вуль – Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Анализ данных рассеяния нейтронов (рис.) в прямом и обратном пространствах позволил расшифровать структуру впервые синтезированных алмазных гидрогелей (ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН) как систем с тремя уровнями организации на масштабах от единиц до десятков нанометров. Установлено, что формирование ближнего порядка в системе идет последовательно через связывание заряженных частиц (диаметр  $\sim 5$  нм) в пределах первой координационной сферы, объединение таких фрагментов в цепные агрегаты и соединение цепей в сетку (масштаб  $\sim 40$  нм). Образование геля фиксировали по достижении

критической концентрации по резкому нарастанию вязкости дисперсии. В нейтронных экспериментах установлено, что в обратной ситуации при разбавлении геля до концентрации вчетверо ниже критической точки ( $C^* \sim 4,2$  % масс.) локальная структура геля сохраняется. Это необычное явление объясняется образованием микрогеля: с увеличением доли воды гель превращается в дисперсию субмикронных доменов в водном окружении. Этим подтверждается ведущая роль электростатического притяжения несферических кристаллов алмаза, которое прочно стабилизирует структуру геля.



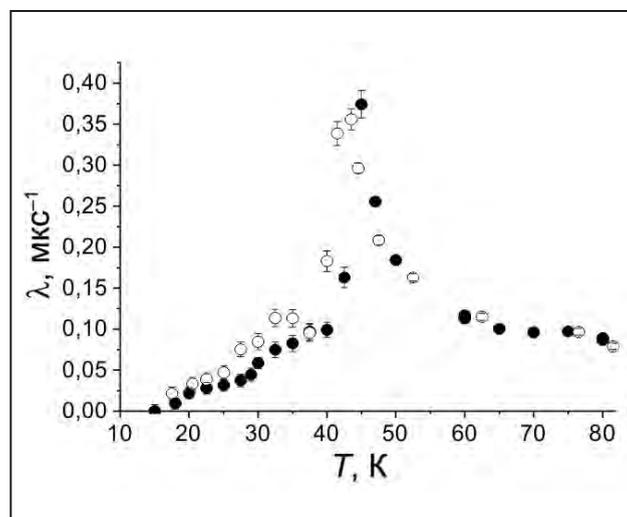
Сечения  $\sigma(q)$  образцов, содержащих 5,05; 2,25; 1,13 % масс. алмаза: 1–3 – функции переданного импульса. Показаны характерные наклоны для  $q$ -зависимостей сечений и кривые аппроксимации в приближении набора сфер. Вставки (левая, правая) – данные, нормированные на концентрации, в представлении Кратки и Порода обнаруживают максимумы, характеризующие масштаб сетки геля и цепное связывание частиц

## Исследование мультиферроиков $\text{Eu}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Mn}_2\text{O}_5$ и $\text{EuMn}_2\text{O}_5$ с помощью $\mu\text{SR}$ -метода

Д. С. Андриевский, С. Г. Барсов, С. И. Воробьев, А. Л. Геталов, Е. Н. Комаров, С. А. Котов, Г. В. Щербаков – Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
Е. И. Головенчиц, В. А. Санина – Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН  
А. Ю. Мищенко – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

С помощью  $\mu\text{SR}$ -метода проведено сравнительное исследование керамических образцов мультиферроиков  $\text{EuMn}_2\text{O}_5$  и  $\text{Eu}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Mn}_2\text{O}_5$  в области температур от 15 до 300 К. Обнаружено, что легирование образца  $\text{EuMn}_2\text{O}_5$  ионами церия приводит к незначительному понижению температуры магнитного фазового перехода: от  $T_N = 45$  К для образца  $\text{EuMn}_2\text{O}_5$  до  $T_N = 42,5$  К для образца  $\text{Eu}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Mn}_2\text{O}_5$  (рис.). Ниже температуры  $T_N$  для обоих образцов существуют два типа локализации термализованного мюона с разной температурной зависимостью частоты прецессии магнитного момента мюона во внутреннем магнитном поле. Более высокая частота в обоих образцах относится к исходной антиферромагнитной матрице. Поведение этой частоты в  $\text{Eu}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Mn}_2\text{O}_5$  следует закону Кюри – Вейсса с показателем  $\beta = 0,29 \pm 0,02$ , заметно отличным от стандартной для 3D-магнетиков гейзенберговского типа величины  $\beta = 0,39$ , наблюдаемой в  $\text{EuMn}_2\text{O}_5$ , что связано с сильной фрустрацией легированного образца. Более низкая, не зависящая от температуры, частота обусловлена наличием ферромагнитных пар  $\text{Mn}^{3+}-\text{Mn}^{4+}$ , расположенных как вдоль оси  $b$  антиферромагнитной матрицы, так и в областях фазового расслоения, содержащих такие пары ионов и перезаряжающих их  $e_g$ -электроны. В обоих образцах обнаружены одинаковые потери поля-

ризации (около 20 %), связанные с образованием мюониевых комплексов  $\text{Mn}^{4+}-\text{Mn}^{4+} + \mu$  вблизи ферромагнитных пар  $\text{Mn}^{3+}-\text{Mn}^{4+}$ . В интервале температур от 25 до 45 К обнаружено расслоение структуры  $\text{Eu}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Mn}_2\text{O}_5$  на две фракции с различающимися на порядок скоростями релаксации поляризации мюонов. Этот эффект обусловлен изменением состояния областей фазового расслоения (1D-сверхрешеток) при указанных температурах. Такой эффект в  $\text{EuMn}_2\text{O}_5$  значительно ослаблен.



Температурная зависимость скорости релаксации поляризации мюонов, остановившихся в образцах  $\text{Eu}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Mn}_2\text{O}_5$  (светлые точки) и  $\text{EuMn}_2\text{O}_5$  (темные точки)



# Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино

- 68 Совместный анализ ATLAS и CMS по измерению свойств образования и распадов бозона Хиггса и получений ограничений на его константы связи при энергиях Большого адронного коллайдера 7 и 8 ТэВ
- 70 Указание на проявление асимптотических эффектов БФКЛ-эволюции при измерении двухструйных азимутальных угловых декорреляций в CMS при энергии 7 ТэВ на Большом адронном коллайдере
- 72 Измерение угловых коэффициентов в событиях распада Z-бозона на электронные и мюонные пары в данных эксперимента ATLAS при энергии протон-протонных столкновений  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ
- 74 Поиск тяжелых резонансов в эксперименте ATLAS
- 75 Исследование экзотических адронов в эксперименте LHCb
- 76 Указание на нарушение CP-инвариантности в распадах барионов
- 77 Аномальный выход чармония в периферических столкновениях ядер на Большом адронном коллайдере
- 78 Излучение тепловых фотонов во взаимодействии ультрарелятивистских ядер золота в эксперименте PHENIX на Релятивистском коллайдере тяжелых ионов
- 79 Энергия распада «астрофизического» нуклида  $^{123}\text{Te}$
- 81 Схемы резонансной ионизации атомов теллура и германия
- 82 Исследование сосуществования форм в легких изотопах таллия методом лазерной спектроскопии
- 84 Запаздывающее деление и  $\alpha$ -распад  $^{196}\text{At}$
- 85 Поиск узких резонансов в упругом  $\pi p$ -рассеянии в эксперименте EPECUR
- 86 Структурные эффекты в поляризации и сечениях инклюзивного рассеяния  $A(p, p')X$  на ядрах  $^{12}\text{C}$  и  $^{40}\text{Ca}$  при энергии 1 ГэВ
- 87 Исследование фрагментации ( $Z = 2$ ) релятивистских ядер  $^{16}\text{O}$  и  $^{208}\text{Pb}$
- 88 Поиски корреляции сигналов в детекторе Borexino от нейтрино и антинейтрино с  $\gamma$ -всплесками во Вселенной
- 89 Первые результаты поиска темной материи с использованием низкорadioактивного аргона в детекторе DarkSide-50
- 90 Метод восстановления газоразрядных детекторов при возникновении в них мальтер-эффекта

## Совместный анализ ATLAS и CMS по измерению свойств образования и распадов бозона Хиггса и получению ограничений на его константы связи при энергиях Большого адронного коллайдера 7 и 8 ТэВ

Коллаборация ATLAS

А. Е. Басалаев, В. Т. Грачев, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев,  
Ю. Г. Нарышкин, В. М. Соловьев, О. Л. Федин, В. А. Щегельский

Коллаборация CMS

А. А. Воробьев, В. Л. Головцов, Ю. М. Иванов, В. Т. Ким, Е. В. Кузнецова, В. А. Мурзин,  
В. А. Орешкин, В. В. Сулимов, Л. А. Щипунов –

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Эксперименты ATLAS и CMS, наиболее амбициозные проекты современной физики высоких энергий, продемонстрировали на первом этапе работы ускорителя Большого адронного коллайдера (БАК) уникальные возможности по расширению границ наших знаний в области фундаментальной физики элементарных частиц. На данный момент основным результатом ATLAS и CMS является открытие в 2012 г. бозона Хиггса. В Стандартной модели (СМ) бозон Хиггса – это квант фундаментального скалярного поля, которое отвечает за спонтанное нарушение электрослабой симметрии и появление масс частиц.

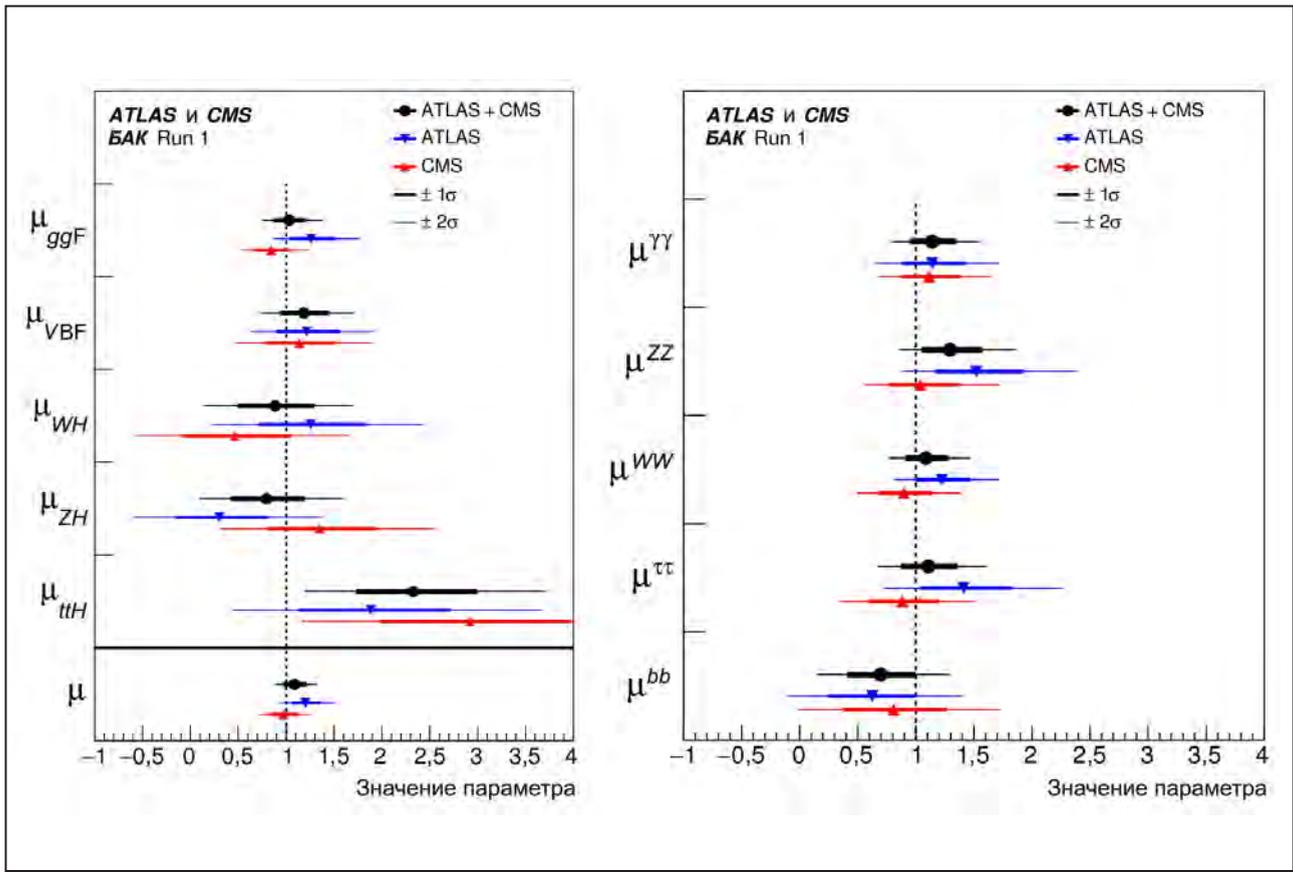
Важную роль в обнаружении бозона Хиггса и определении его свойств сыграли торцевой мюонный детектор CMS (система EMU) и центральный трекер ATLAS – детектор переходного излучения (система TRT), в разработку и создание которых весомый вклад внес НИЦ КИ – ПИЯФ.

В 2016 г. ATLAS и CMS представили совместные результаты, основанные на данных, полученных в 2011 и 2012 гг., по измерению констант связи бозона Хиггса с векторными бозонами СМ и фермионами. Данные результаты основаны на пяти процессах рождения бозона Хиггса: рождение через слияние глюонов, рождение через слияние калибровочных бозонов, ассоциативное рождение вместе с  $W$ - или  $Z$ -бозонами и рождение через пару тор-кварков – и на шести процессах распада бозона Хиггса:  $H \rightarrow ZZ, WW, \gamma\gamma, \tau\tau, bb$

и  $\mu\mu$ . Результаты получены в предположении, что масса бозона Хиггса равна 125,09 ГэВ, что соответствует значению, полученному для совместного анализа данных экспериментов ATLAS и CMS. Совместный анализ чувствителен как к константам связи бозона Хиггса с легкими векторными бозонами, так и к более тяжелым фермионам ( $t$ -кварки,  $b$ -кварки,  $\tau$ -лептоны), и незначительно к мюонам. Анализ также чувствителен к эффективным константам связи бозона Хиггса, к фотонам и глюонам. На БАК измеряются только произведения сечений на вероятность распада в данный канал, т. к. ширина бозона Хиггса не может быть исследована без предположения, что процессы рождения и распадов бозонов Хиггса близки к предсказываемым в СМ.

Комбинированный анализ, представленный в данной работе, позволяет значительно улучшить результаты, опубликованные каждой коллаборацией по отдельности. Точность полученных результатов улучшается в большинстве случаев на коэффициент приблизительно 1/2, как и следовало ожидать для сочетания двух в значительной степени некоррелированных измерений на основе выборок данных аналогичного размера.

В данной работе впервые показаны результаты анализа для наиболее общей параметризации наблюдаемого выхода событий, который определяется произведением сечения рождения бозона Хиггса ( $\sigma_i$ ) в процессе ( $i$ ) на относительную



Результаты экспериментов ATLAS и CMS и их объединенных измерений уровней сигналов по отношению к ожидаемым в СМ для рождения (слева) и распадов (справа) бозона Хиггса. Жирные линии – ошибка измерения  $1\sigma$ , тонкие –  $2\sigma$

вероятность распада ( $B^f$ ) по каналу ( $f$ ), для каждой из 20 измеренных пар ( $\sigma_i, B^f$ ) процессов рождения и распада бозона Хиггса. Выполненные измерения не опираются на теоретические предсказания для инклюзивных сечений, а ошибка измерения в основном определяется набранной статистикой. В контексте этой параметризации можно проверить, являются ли наблюдаемые выходы следствием рождения и распада более чем одного бозона Хиггса с экспериментально неразличимыми массами, но, возможно, с различными константами связи с частицами СМ. Полученные данные согласуются с гипотезой о существовании единственного бозона Хиггса с вероятностью 79 %.

На рисунке показаны результаты объединенных измерений уровней сигналов по отношению к ожидаемым в СМ для рождения и распада бозона Хиггса. Полный уровень сигнала к ожидаемому составил  $1,09 \pm 0,11$ . В объединенных измерениях также показано, что наблюдаются процессы рождения бозона Хиггса через процесс слияния бозонов СМ и распад  $H \rightarrow \tau\tau$  на уровне 5,4 и 5,5 стандартного отклонения соответственно.

Таким образом, заключительные данные Run 1 по образованию и распаду бозона Хиггса и по ограничениям на его константы связи в рамках имеющихся неопределенностей согласуются с СМ.

## Указание на проявление асимптотических эффектов БФКЛ-эволюции при измерении двухструйных азимутальных угловых декорреляций в CMS при энергии 7 ТэВ на Большом адронном коллайдере

Коллаборация CMS

А. А. Воробьев, В. Л. Головцов, Ю. М. Иванов, В. Т. Ким, Е. В. Кузнецова,

В. А. Мурзин, В. А. Орешкин, В. В. Сулимов, Л. А. Щипунов –

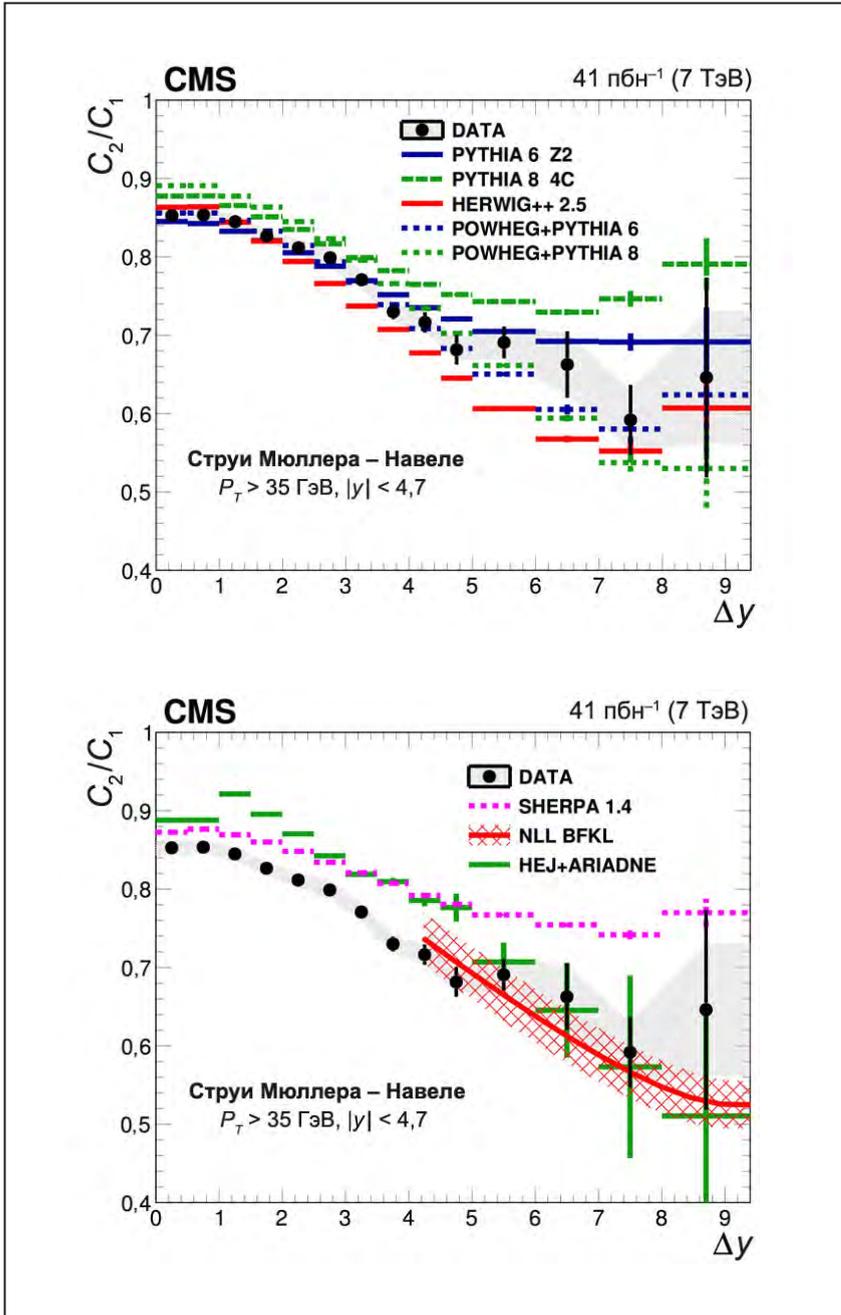
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Главными целями эксперимента на компактном мюонном солениоде (CMS) на Большом адронном коллайдере (БАК) являются поиск «новой физики» за пределами Стандартной модели (СМ) и определение пределов ее применимости. Для достижения этих целей CMS постоянно улучшает точность измеряемых параметров СМ и проверяет ее свойства при новых энергиях. Существуют два основных кинематических режима при столкновениях при высоких энергиях. Один из них, жесткий режим рассеяния ( $\sqrt{s} \sim k_T \gg \Lambda_{\text{QCD}}$ ), который описывается эволюционными уравнениями Грибова – Липатова – Алтарелли – Паризи – Докшицера (ГЛАПД) пертурбативной квантовой хромодинамики (КХД), хорошо проверен и широко используется для предсказаний СМ. Другой, полужесткий режим ( $\sqrt{s} \gg k_T \gg \Lambda_{\text{QCD}}$ ), который должен стать доминирующим при асимптотически высоких энергиях, описывается уравнением эволюции Балицкого – Фадиной – Кураева – Липатова (БФКЛ).

В пертурбативной КХД в партон-партоном рассеянии в главном порядке по константе связи сильного взаимодействия  $\alpha_s$  образуется два партона, которые имеют противоположные (антикомпланарные) компоненты импульса в азимутальной плоскости. Конечные партоны проявляют себя как коллимированные потоки адронов, которые называются адронными струями. Отклонение от антикомпланарной конфигурации двух конечных струй происходит из-за излучения партонов (партоновых ливней), инициированных начальными и конечными партонами в процессе рассеяния. Соответствующая

асимптотическая область, которая описывается уравнением эволюции БФКЛ, может быть экспериментально определена в  $pp$ -столкновениях при наличии струй с поперечными импульсами  $k_T$ , подобными по величине, но при этом сильно разделенными по скорости. Таким образом, азимутальная декорреляция таких струй с большим разделением по скорости между струями может указывать на новые БФКЛ-эффекты, выходящие за рамки описания ГЛАПД. Основной вклад в новом кинематическом полужестком режиме должны вносить струи с наибольшими скоростями в передней и задней областях (струи Мюллера – Навеле). При этом азимутальные угловые декорреляции будут увеличиваться с увеличением интервала скорости между струями  $\Delta y = |y_1 - y_2|$ . В случае же обычного жесткого режима, описываемого эволюцией ГЛАПД, азимутальные декорреляции струй должны быть малы и слабо зависимы от  $\Delta y = |y_1 - y_2|$  вследствие сильной упорядоченности излучаемых партонов по величине поперечного импульса в таком кинематическом режиме.

В 2016 г. эксперимент CMS представил еще одно указание на асимптотическое поведение при высоких энергиях в КХД при измерении двухструйных азимутальных угловых декорреляций с большим разделением струй по скорости в  $pp$ -столкновениях при энергии 7 ТэВ. Предыдущее указание было обнаружено в измерении отношений двухструйных сечений с большим интервалом скорости между струями. Измеренные азимутальные декорреляции на рисунке согласуются с эволюцией БФКЛ в главном



Отношение усредненных косинусов для одиночных и двойных углов в азимутальной плоскости двухструйных событий в зависимости от интервала быстроты между струями. Сплошная кривая – отношение косинусов, согласующееся с предсказаниями БФКЛ в NLLA

логарифмическом приближении с учетом следующих за ведущими вкладами (NLLA), улучшенном по предписанию, предложенному С. Дж. Бродским, В. С. Фадиным, В. Т. Кимом, Л. Н. Липатовым и Г. Б. Пивоваровым. В то же время различные генераторы событий Монте-Карло, основанные на эволюции ГЛАПД, не могут описать все особенности наблюдаемых величин.

Таким образом, эксперимент CMS получил новое указание об асимптотическом проявлении БФКЛ-эволюции в азимутальных декорреляциях двухструйных событий с большим интервалом быстроты между струями при энергии БАК 7 ТэВ. Необходимы дальнейшие измерения при более высоких энергиях, чтобы установить новую высокоэнергетическую асимптотику СМ.

## Измерение угловых коэффициентов в событиях распада $Z$ -бозона на электронные и мюонные пары в данных эксперимента ATLAS при энергии протон-протонных столкновений $\sqrt{s} = 8$ ТэВ

Коллаборация ATLAS

В. Т. Грачев, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев,

Ю. Г. Нарышкин, В. М. Соловьев, О. Л. Федин, В. А. Щегельский –

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Изучение угловых распределений заряженных лептонных пар, образующихся в адрон-адронных столкновениях в процессе Дрелла – Яна, позволяет выполнить прецизионные измерения динамики их рождения за счет спиновых эффектов корреляции между начальными состояниями партонов и конечными состояниями лептонов.

Полное дифференциальное сечение, описывающее кинематику двух лептонов от распада  $Z$ -бозона, может быть записано в виде суммы девяти гармонических полиномов, которые зависят от  $\cos\theta$  и  $\phi$ , умноженных на сечения с соответствующими спиральностями, которые, в свою очередь, зависят от поперечного импульса ( $p_T^Z$ ), быстроты ( $y^Z$ ) и массы ( $m^Z$ )  $Z$ -бозона. Безразмерные угловые коэффициенты  $A_{0-7}(p_T^Z, y^Z, m^Z)$  представляют собой отношение сечений с определенными спиральностями к неполяризованному сечению.

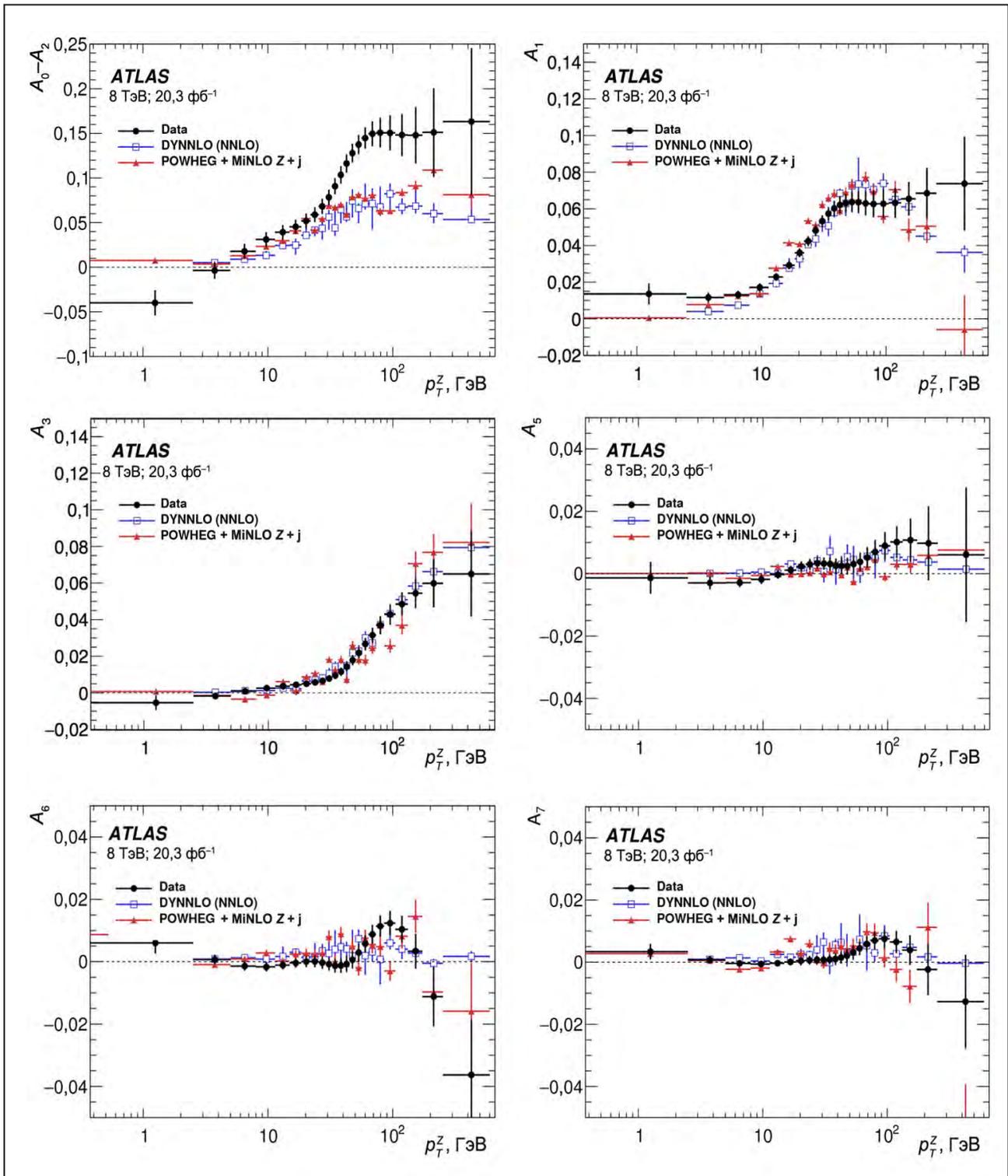
В данной работе впервые выполнено измерение полного набора угловых коэффициентов  $A_{0-7}$  в данных, соответствующих интегральной светимости  $20,3 \text{ фб}^{-1}$ , накопленных экспериментом ATLAS в  $pp$ -столкновениях с энергией  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ. Точность выполненных измерений для двух диапазонов по быстрой электронных и мюонных пар  $0 < |y^Z| < 3,5$  и  $0 < |y^Z| < 2,5$  ограничена статистической ошибкой данных, которая равна  $0,002$  при малых поперечных импульсах  $p_T^Z$  и возрастает до  $0,008$  при  $p_T^Z = 100$  ГэВ. Экспериментальные систематические ошибки много меньше, чем статистическая ошибка, в большинстве случаев. Теоретические систематические ошибки минимизированы путем использования специально разработанной методики измерения угловых коэффициентов так, что ошибка,

возникающая от неточности знания партонных функций распределения, которая вносит основной вклад в теоретическую систематическую ошибку, меньше  $0,004$  во всех случаях.

Выполнено сравнение измеренных угловых коэффициентов с теоретическими расчетами для различных генераторов Монте-Карло, а также с наиболее точными, доступными в настоящее время вычислениями в фиксированных порядках теории возмущения с точностью до  $O(\alpha_S^2)$ . Достигнутая точность измерений угловых коэффициентов достаточна для проверки вычислений в фиксированных порядках теории возмущений квантовой хромодинамики (КХД) и для проверки реализации в различных генераторах событий моделей развития партонных ливней в процессах адронизации.

Результаты измерений угловых коэффициентов показывают значительное отклонение измеренной разности коэффициентов  $A_0 - A_2$  от расчетов в фиксированных порядках теории возмущений КХД (рис.), что указывает на необходимость учета более высоких порядков для описания данных. Впервые показано экспериментально на уровне трех стандартных отклонений ( $3\sigma$ ), что коэффициенты  $A_{5, 6, 7}$  не равны нулю (см. рис.), как это и ожидалось из теоретических расчетов.

Измерение угловых коэффициентов  $A_7$  в частности через корреляции угловых распределений в зависимости от поперечного импульса лептонной пары, является важной составляющей частью для последующих прецизионных измерений параметров Стандартной модели на Большом адронном коллайдере, таких как эффективный угол смешивания  $\sin^2\theta_W$  и масса  $W$ -бозона.



Измеренная разница угловых коэффициентов  $A_0 - A_2$  (сверху слева) и угловые коэффициенты  $A_1$  (сверху справа),  $A_3$  (посередине слева),  $A_5$  (посередине справа),  $A_6$  (внизу слева),  $A_7$  (внизу справа) в зависимости от поперечного импульса лептонной пары

1. ATLAS Collaboration // JHEP. 2016. V. 8. P. 159.
2. Ezhilov A., Fedin O. // PoS.DIS2016. P. 121.

## Поиск тяжелых резонансов в эксперименте ATLAS

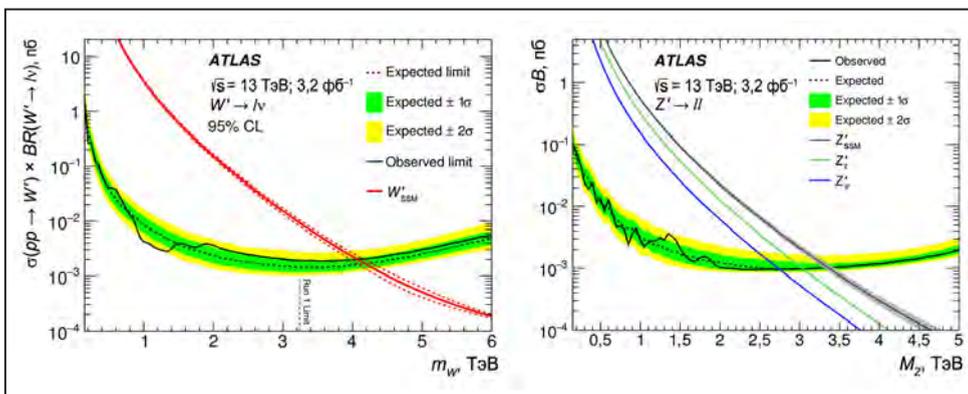
В. Т. Грачев, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев,  
Ю. Г. Нарышкин, В. М. Соловьев, О. Л. Федин, В. А. Щегельский  
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В 2015 г. Большой адронный коллайдер (БАК) возобновил свою работу после двухгодичного технологического перерыва, который был вызван необходимостью модернизации ускорительного комплекса и работами по увеличению энергии протон-протонных столкновений. После перерыва энергия протон-протонных столкновений в системе центра масс составила 13 ТэВ.

Эксперимент ATLAS, в котором принимает участие Лаборатория адронной физики ОФВЭ НИЦ КИ – ПИЯФ, продолжил поиски тяжелых (с массами порядка 1 ТэВ) резонансов, являющихся бозонами, т. е. обладающих целым спином. Целый класс моделей, призванных решить проблемы Стандартной модели (СМ), такие как существование темной материи, проблема калибровочной иерархии и т. д., содержит дополнительные калибровочные бозоны, обычно обозначаемые  $Z'$  (нейтральный) и  $W'$  (заряженный).

Поиск осуществлялся в каналах распада  $W' \rightarrow l\nu$  и  $Z' \rightarrow ll$ , где  $l$  обозначает электрон или мюон. В накопленных в 2015 г. данных, соответствующих  $3,2 \text{ фб}^{-1}$  интегральной светимости, статистически значимого отклонения данных

от предсказания СМ обнаружено не было. В отсутствие зарегистрированного сигнала от распада тяжелых бозонов были установлены пределы на сечения рождения  $W'$ - и  $Z'$ -бозонов,  $\sigma$ , умноженные на вероятность их распада в каналах  $W' \rightarrow l\nu$  и  $Z' \rightarrow ll$ ,  $B$ , на уровне достоверности 95 % в зависимости от их масс для некоторых моделей. В качестве базовой модели для поиска была выбрана модель Sequential Standard Model (SSM). В этой модели константа взаимодействия  $W'$ - и  $Z'$ -бозонов с фермионами совпадает с константой взаимодействия для  $W$ - и  $Z$ -бозонов СМ. Для поиска  $Z'$ -бозонов также рассматривались модели теории великого объединения, основанные на калибровочной группе  $E_6$ , включающей дополнительные нейтральные калибровочные бозоны  $Z'_\psi$  и  $Z'_\chi$ . Ожидаемые и наблюдаемые пределы для объединения электронного и мюонного каналов показаны на рисунке. Существование SSM  $W'$ - и  $Z'$ -бозонов с массами ниже 4,07 и 3,36 ТэВ соответственно, а бозонов  $Z'_\psi$  и  $Z'_\chi$  с массами ниже 2,47 и 3,05 ТэВ соответственно было исключено на уровне достоверности 95 %.



Ожидаемый (черная пунктирная линия) и наблюдаемый (черная сплошная линия) пределы на сечение  $\sigma \times B$ , установленные с уровнем достоверности 95 % для объединения электронного и мюонного каналов для бозонов  $W'$  (слева) и  $Z'$  (справа). Также показаны теоретические сечения рождения  $W'$ - и  $Z'$ -бозонов

1. ATLAS Collaboration // Phys. Lett. B. 2016. V. 762. P. 334: arXiv:1606.03977.
2. ATLAS Collaboration // Phys. Lett. B. 2016. V. 761. P. 372–392: arXiv:1607.03669.

## Исследование экзотических адронов в эксперименте LHCb

Коллаборация LHCb

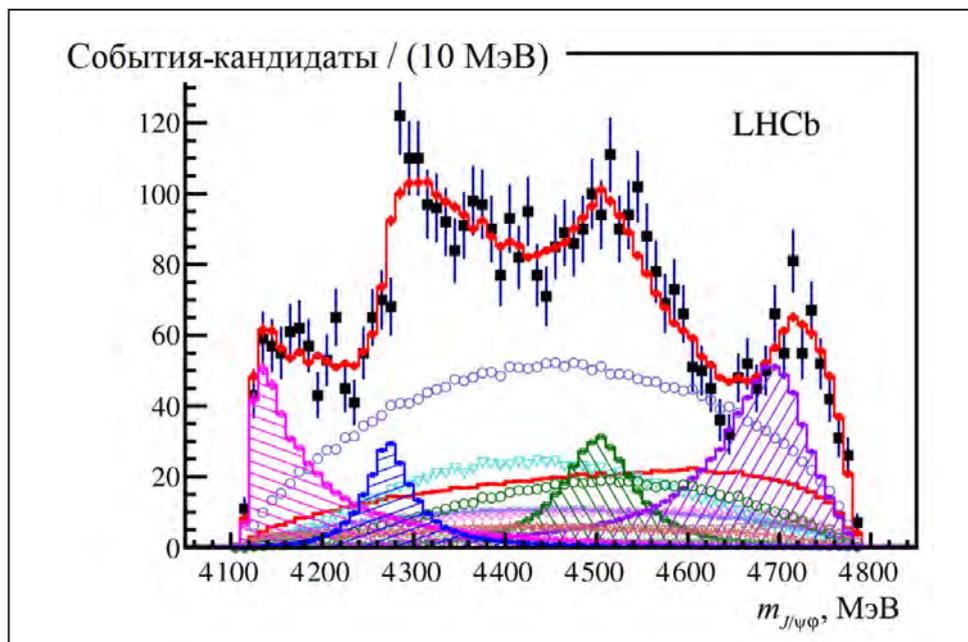
Г. Д. Алхазов, Н. Ф. Бондарь, А. А. Воробьев, А. А. Дзюба,

О. Е. Маев, Н. Р. Сагидова, Ю. А. Щеглов –

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Исследование экзотических адронов – тетра-кварков и пентакварков – является одним из направлений исследований в эксперименте LHCb на Большом адронном коллайдере (БАК). Большим достижением сотрудничества LHCb в 2015 г. стало открытие пентакварков – частиц, состоящих из четырех кварков и одного антикварка. Два таких экзотических состояния проявили себя в распадах  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$ . В 2016 г. было получено указание на существование пентакварков в другом канале распада:  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p \pi^-$ . Относительно небольшая статистическая значимость (составившая чуть более трех стандартных отклонений) объясняется подавлением данного канала распада по элементу матрицы кваркового смешивания  $|V_{cd}|$ .

Также в 2016 г. были опубликованы новые результаты амплитудного анализа экспериментальных данных по распаду  $B^+ \rightarrow J/\psi \phi K^+$ . Для удовлетворительного описания угловых распределений и распределений по инвариантным массам продуктов распада  $B^+$ -мезона необходимо допустить существование четырех тяжелых экзотических состояний. Статистическая значимость для каждого из них превышает пять стандартных отклонений. Проявление данных состояний в спектре инвариантной массы  $J/\psi \phi$  показано на рисунке. Квантовые числа, соответствующие данным состояниям, определены со статистической значимостью более четырех стандартных отклонений.



Спектр инвариантной массы системы  $J/\psi\phi$ . Черные точки – экспериментальные данные; красные точки – результат амплитудного анализа распада  $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ ; заштрихованные гистограммы – вклад экзотических состояний

1. LHCb Collaboration // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117. P. 082002.
2. LHCb Collaboration // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117. P. 082003.
3. LHCb Collaboration // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 118. P. 022003.
4. LHCb Collaboration // Phys. Rev. D. 2017. V. 95. P. 012002.

## Указание на нарушение $CP$ -инвариантности в распадах барионов

Коллаборация LHCb

Г. Д. Алхазов, Н. Ф. Бондарь, А. А. Воробьев, А. А. Дзюба,

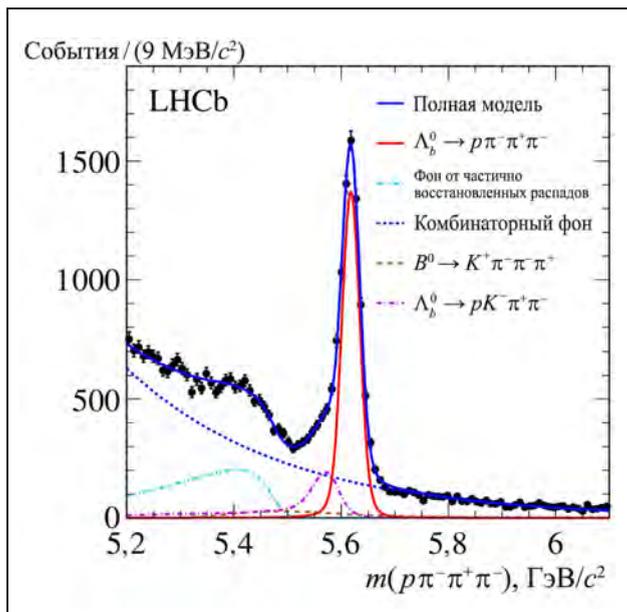
О. Е. Маев, Н. Р. Сагидова, Ю. А. Щеглов –

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Одной из задач эксперимента LHCb является изучение нарушения  $CP$ -инвариантности в различных процессах. Как было впервые показано А. Д. Сахаровым, нарушение  $CP$ -инвариантности лежит в основе барионной асимметрии Вселенной. В Стандартной модели эффекты  $CP$ -нарушения предсказываются и наблюдаются в распадах частиц, содержащих  $s$ - или  $b$ -кварки. Существование таких эффектов связано с наличием комплексной фазы у элементов матрицы кваркового смешивания (матрицы Кабиббо – Кобаяши – Маскава). До настоящего времени эффекты нарушения  $CP$ -инвариантности наблюдались только в распадах  $K$ - и  $B$ -мезонов.

В 2016 г. эксперимент LHCb представил результаты анализа данных по распаду  $\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-\pi^+\pi^-$ , в котором впервые получено

указание на проявление эффектов  $CP$ -нарушения для барионов. Используя статистику, накопленную в LHCb в ходе первого сеанса работы Большого адронного коллайдера и соответствующую интегральную светимость  $3 \text{ фб}^{-1}$ , удалось выделить  $6\,646 \pm 105$  событий-кандидатов данного распада (рис.). Для различных частей фазового объема были построены наблюдаемые параметры  $a_p^{T\text{-odd}}$  и  $a_{CP}^{T\text{-odd}}$ , отклонение которых от нуля должно свидетельствовать о нарушении пространственной ( $P$ ) и комбинированной ( $CP$ ) четности. Рассматривались два различных разбиения фазового объема. Для обоих разбиений были выявлены участки с отличными от нуля значениями  $a_p^{T\text{-odd}}$  и  $a_{CP}^{T\text{-odd}}$ . Статистическая значимость указаний на нарушение  $P$ - и  $CP$ -четности составила 3,3 стандартного отклонения.



Спектр инвариантной массы системы  $p\pi^-\pi^+\pi^-$ . Точки – экспериментальные данные LHCb; красная кривая – вклад исследуемого распада  $\Lambda_b^0$ ; пунктирные и штрихпунктирные линии – вклады фоновых компонентов; синяя кривая – сумма всех вкладов

## Аномальный выход чармония в периферических столкновениях ядер на Большом адронном коллайдере

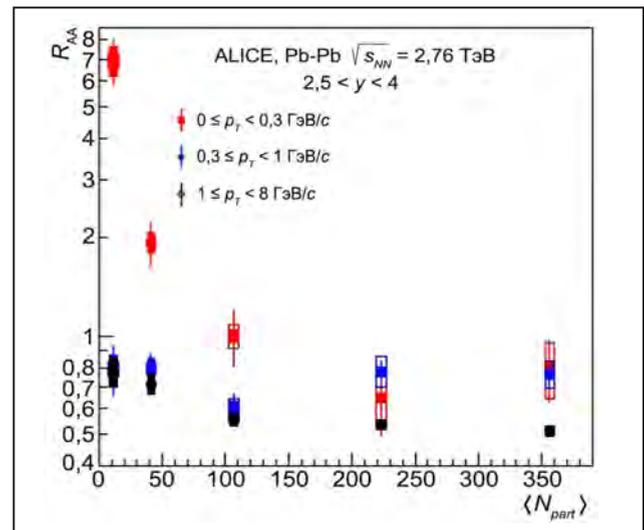
Колаборация ALICE

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 НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Рождение кваркониев ( $J/\psi$ ,  $\psi(2s)$ ,  $\Upsilon$ ) в процессах столкновения ультрарелятивистских ионов является одним из ключевых способов исследования состояния материи, образующейся в зоне взаимодействия ядер. Большой объем данных по выходу  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  в эксперименте ALICE получен в области быстрот  $-4 < y < -2,5$  на мюонном спектрометре, в создание и успешную работу которого НИЦ КИ – ПИЯФ внес значительный вклад, включающий разработку и изготовление мюонных камер, их экспертное обслуживание, набор данных и их анализ. В 2016 г. при изучении зависимости выхода  $J/\psi$  от поперечного импульса  $p_T$  и центральности ядро-ядерного столкновения в событиях с небольшой множественностью был получен новый неожиданный результат – обнаружен аномально высокий выход  $J/\psi$  в области очень малых поперечных импульсов  $p_T < 0,3$  ГэВ/с.

Зависимость от центральности извлеченного из данных фактора ядерной модификации  $R_{AA}$  для чармония показана на рисунке. По существу эта величина является отношением выхода  $J/\psi$  при неупругом столкновении пары ядерных нуклонов в ядро-ядерном взаимодействии к выходу в неупругом столкновении свободных нуклонов при тех же кинематических условиях. Центральность столкновения ядер прокалибрована в терминах числа провзаимодействовавших нуклонов  $N_{part}$ . В преимущественно центральных столкновениях ( $N_{part} > 200$ ) выход  $J/\psi$  с любыми поперечными импульсами подавлен, и в совокупности с наблюдением сильных анизотропных потоков адронов и эффектов гашения струй это указывает на формирование кварк-глюонной плазмы. В периферических столкновениях с малой

множественностью поведение  $R_{AA}$  для событий с  $p_T > 0,3$  ГэВ/с и событий с  $p_T < 0,3$  ГэВ/с различительно отличается. В первом случае небольшой эффект подавления ( $R_{AA} < 1$ ) возникает в основном из-за ядерных экранировок партонных распределений в сталкивающихся ядрах. Выход же  $J/\psi$  с малыми  $p_T < 0,3$  ГэВ/с в периферическом ядро-ядерном взаимодействии существенно превышает оценку, основанную на данных из протон-протонных столкновений. К настоящему времени ни в одной из теоретических моделей, описывающих рождение чармония в сильных взаимодействиях, воспроизвести столь значительное (почти на порядок) усиление не удается. Одно из возможных и обсуждаемых объяснений наблюдаемого эффекта – вклад когерентного фоторождения чармония на тяжелых фрагментах взаимодействующих ядер в периферических столкновениях.



Фактор ядерной модификации выхода чармония в столкновении ядер свинца при энергии Большого адронного коллайдера

## Излучение тепловых фотонов во взаимодействии ультррелятивистских ядер золота в эксперименте PHENIX на Релятивистском коллайдере тяжелых ионов

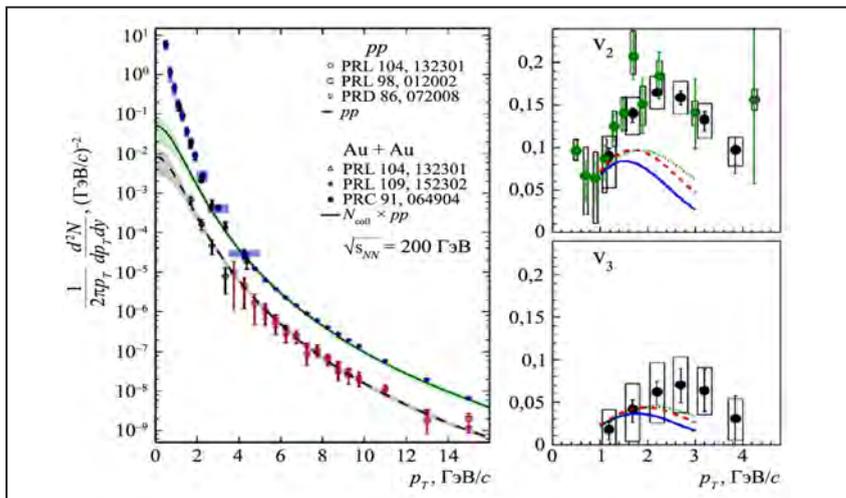
Коллаборация PHENIX

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

Одним из наиболее ярких результатов, полученных и опубликованных коллаборацией PHENIX в 2016 г., является измерение выхода и азимутальной анизотропии прямых фотонов. В эксперименте PHENIX фотоны регистрировались центральной трековой системой детектора по их конверсии в  $e^+e^-$ -пары. НИЦ КИ – ПИЯФ внес определяющий вклад в создание трековой системы и осуществление ее экспертного обслуживания.

На рисунке (левая панель) показаны извлеченные из данных спектры прямых фотонов, измеренные в широкой области поперечных импульсов  $p_T$  от 0 до 15 ГэВ/с в протон-протонных ( $pp$ ) (черные и красные точки, фитированные черной линией) и ядро-ядерных (Au-Au) столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ. Зеленая линия показывает, какой спектр фотонов можно было бы ожидать в столкновении ядер золота, если их выход в  $pp$ -взаимодействиях масштабировать числом парных неупругих нуклон-нуклонных столкновений ( $N_{coll}$ ) в Au-Au-взаимодействиях. При  $p_T < 2$  ГэВ/с наблюдается

ярко выраженный избыточный выход фотонов (синие точки). Спектр в этой области с хорошей точностью описывается экспоненциальной функцией, характерной для теплового излучения горячей равновесной среды с эффективной температурой  $\sim 240$  МэВ, существенно превышающей критическую температуру адрон-партонового фазового перехода  $\sim 175$  МэВ. Это предполагает быструю термализацию формирующейся в зоне взаимодействия ядер партоновой среды и излучение фотонов на ранней стадии реакции. Фурье-разложение измеренного спектра прямых фотонов демонстрирует большую азимутальную анизотропию. Столь значительные эллиптический ( $v_2$ ) и триангулярный ( $v_3$ ) потоки (рис., правая панель) не удастся описать ни в одной из существующих моделей (результаты расчетов показаны синей, зеленой и красной линиями). Развитие теоретических моделей позволит из сравнения с данными определить доминирующие механизмы рождения мягких прямых фотонов и ввести ограничения на описание пространственно-временной эволюции взаимодействующей системы.



Спектры рождения, эллиптический и триангулярный потоки прямых фотонов, измеренные в  $p + p$ - и Au + Au-столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  ГэВ

## Энергия распада «астрофизического» нуклида $^{123}\text{Te}$

Колаборация SHIPTRAP

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

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

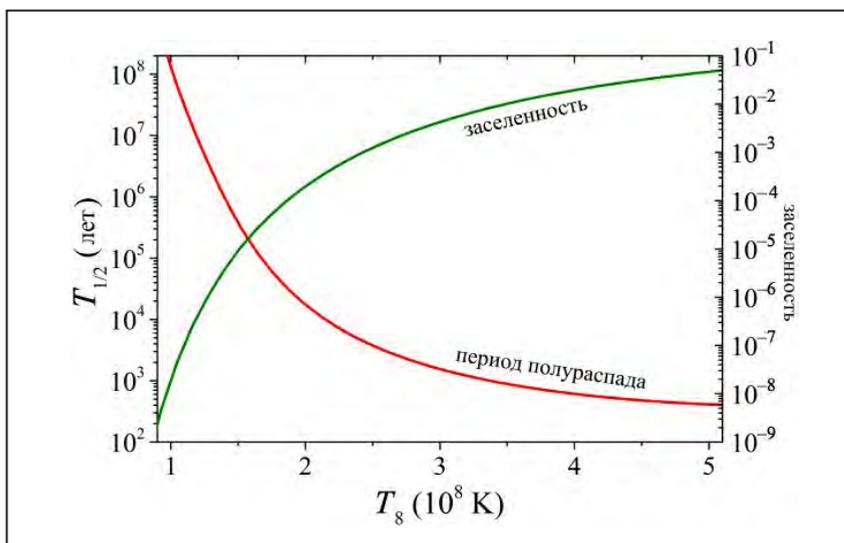
Исследование некоторых механизмов астрофизических процессов основано на изучении распространенности химических элементов в природе, сохранившихся до наших дней, т. е. имеющих периоды полураспада, соизмеримые с возрастом Вселенной. Однако в звездных условиях времена жизни некоторых из этих нуклидов могут сильно отличаться от земных. Причиной тому служат два фактора. В высокотемпературных условиях заселяются и находятся в термодинамическом равновесии с основным состоянием низколежащие возбужденные ядерные состояния, с которых «открывается» разрешенный  $\beta$ -распад, приводящий к существенному уменьшению эффективного времени жизни нуклида. Вторым фактором является участие в распаде высокоионизированных атомов, что вносит коррективы в вероятности распадов, особенно ощутимые в случае малых энергий переходов, присущих очень долгоживущим нуклидам. Такие малые энергии распадов с большой точностью, а главное,

надежно могут быть измерены только ионными ловушками.

В первом эксперименте из серии, планируемой на SHIPTRAP в GSI (Дармштадт), была измерена энергия распада  $^{187}\text{Re}$  (опубликовано ранее), а в 2016 г. опубликован результат по энергии распада  $^{123}\text{Te}$ . Этот нуклид образуется в звездах только в результате медленного процесса захвата нейтронов (s-процесс), поэтому знание его «звездных» характеристик весьма важно для правильного описания самого процесса.

Первое возбужденное состояние  $^{123}\text{Te}$  с энергией 159 кэВ при типичной температуре процесса  $4 \cdot 10^8$  К заселяется с вероятностью 2 % по отношению к основному состоянию (рис. 1), но позволяет открыть канал разрешенного  $\beta$ -перехода, на много порядков превосходящий вероятность распада с основного состояния (рис. 2).

Определение энергии распада  $^{123}\text{Te}$  производилось по измерению разности масс материнского



**Рис. 1.** Зависимость заселенностей возбужденного состояния 159 кэВ в  $^{123}\text{Te}$  (правая шкала) и значений эффективного периода полураспада  $^{123}\text{Te}$  (левая шкала) в зависимости от температуры

и дочернего ( $^{123}\text{Sb}$ ) нуклидов. Измерения резонансных частот, связанных напрямую с массами, производились в ионной ловушке с использованием нового метода фазового отображения. Результатом измерения стало получение значения энергии распада между основными состояниями нейтральных атомов  $Q = 51,912(67)$

кэВ (рис. 3). С использованием этого значения была получена картина зависимости эффективного периода полураспада  $^{123}\text{Te}$  от температуры процесса нуклеосинтеза, показавшая весьма существенное, способное достичь 14 порядков величины, ускорение распада по сравнению с земными условиями (см. рис. 1).

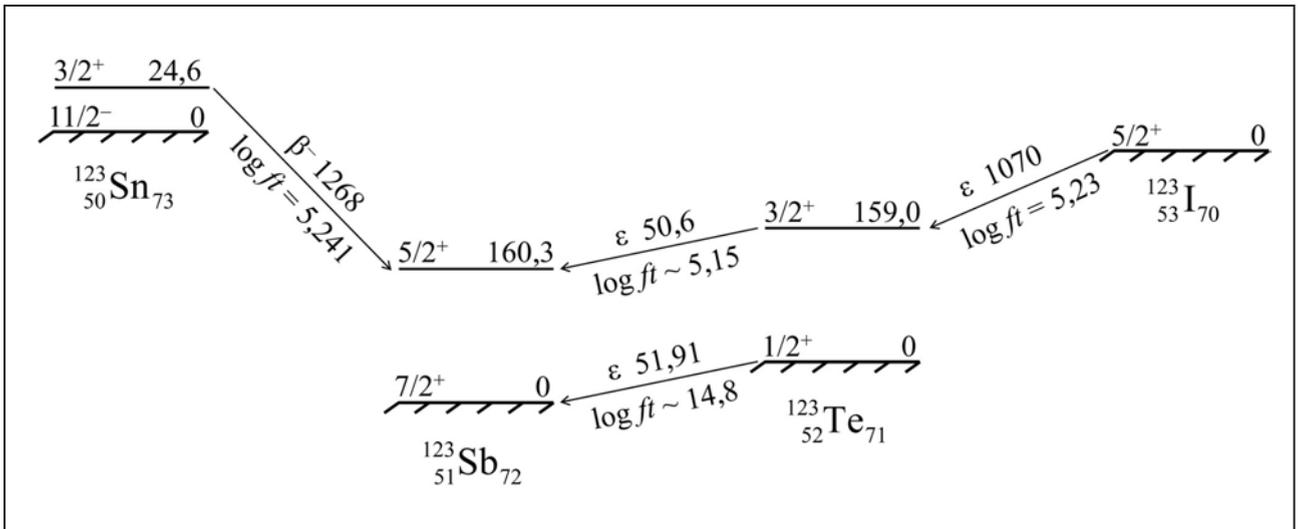


Рис. 2. Схема распада для изобарных нуклидов с массовым числом  $A = 123$  в условиях «звездной» среды, когда открывается разрешенный  $\beta$ -переход с возбужденного состояния 159 кэВ с вероятностью, превышающей переход с основного состояния (в земных условиях) на 10 порядков величины

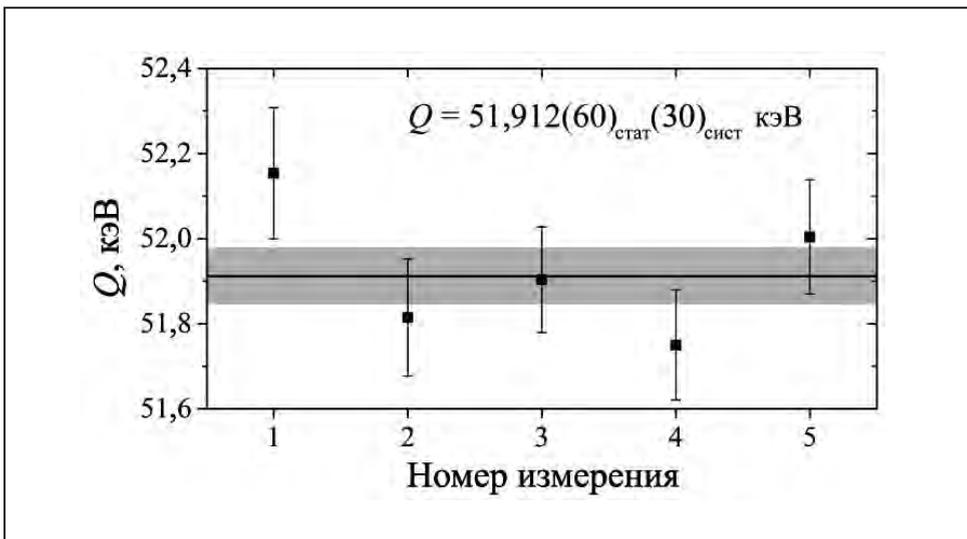


Рис. 3. Значения энергии распада  $^{123}\text{Te}$ , полученные для отдельных циклов измерения

1. Filianin P. ..., Eliseev S., Novikov Yu. et al. // Phys. Lett. B. 2016. V. 758. P. 407–411.  
 2. Takahashi K. ..., Novikov Yu.N. // Astroph. J. 2016. V. 819. P. 118.

## Схемы резонансной ионизации атомов теллура и германия

Д. В. Федоров

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Ионные пучки изотопов  $^{116}\text{Te}$  и  $^{118}\text{Te}$  необходимы для исследований кулоновского возбуждения этих ядер, что важно для изучения изменения оболочечной структуры для удаленных ядер в районе  $Z = 50$ . Ранее ионные пучки теллура получались на ISOLDE (ЦЕРН) с помощью плазменного ионного источника, не обеспечивающего необходимую для указанных выше экспериментов химическую селективность. Использование RILIS позволило бы обеспечить изобарно-чистый пучок ионов теллура. В 2016 г. была проведена работа по поиску оптимальной схемы лазерной ионизации атомов теллура (рис. 1).

Ионные пучки изотопов германия требуются для исследований  $\beta^+$ /EC-распада  $^{64}\text{Ge}$  и  $^{66}\text{Ge}$  методом спектроскопии полного поглощения, что позволит получить информацию о развитии гр-процесса, ответственного за образование

легких элементов после Большого взрыва. На комплексе RILIS были проведены эксперименты по поиску эффективной схемы ионизации атомов германия. Оптимальная трехступенчатая схема ионизации в континуум показана на рис. 2.

Для данной схемы была измерена абсолютная эффективность ионизации. Калиброванный источник атомарного германия был помещен в лазерный ионный источник масс-сепаратора. Фотоионный ток регистрировался на выходе масс-сепаратора с помощью цилиндра Фарадея. Отношение числа зарегистрированных ионов к известному количеству атомов, помещенных в источник, дает значение эффективности ионизации около 2 %.

Работа была выполнена совместно с коллегами из Швейцарии, Великобритании и Германии.



Рис. 1. Оптимальная схема резонансной ионизации теллура через автоионизационное состояние

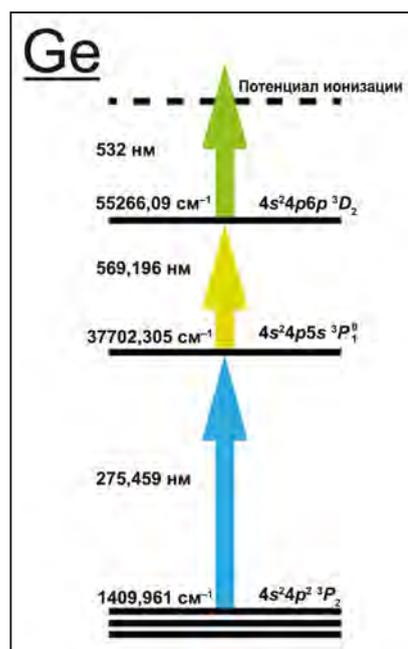


Рис. 2. Схема ионизации атомов германия

## Исследование сосуществования форм в легких изотопах таллия методом лазерной спектроскопии

А. Е. Барзах, П. Л. Молканов, М. Д. Селиверстов, Д. В. Федоров  
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Измерены константы сверхтонкой структуры (СТС) и изотопические сдвиги для перехода 276,9 нм в нейтронно-дефицитных изотопах таллия ( $A = 179-184$ ). Измерения проводились на масс-сепараторе ISOLDE (ЦЕРН) методом резонансной лазерной спектроскопии в ионном источнике. Анализ СТС позволил определить спины  $^{179, 181, 183}\text{Tl}^g$  ( $I = 1/2$ ). Получены магнитные моменты и изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов для исследованных изотопов. Анализ формы спектров СТС, полученных с помощью мониторинга фотоионного тока по различным  $\alpha$ - и  $\gamma$ -линиям, наблюдаемым при распаде  $^{182}\text{Tl}$ , подтвердил наличие низкоспинового изомера у этого ядра. Магнитные моменты  $^{179, 181, 183}\text{Tl}^g$  ( $I = 1/2$ ) и  $^{183}\text{Tl}^m$  [ $I = (9/2)$ ] хорошо вписываются в параболическую и линейную

изотопические зависимости, наблюдаемые для более тяжелых изотопов Tl с теми же спинами (рис. 1). Использование «соотношения аддитивности» для нечетно-нечетных ядер Tl позволило подтвердить величины спинов и характер ведущих конфигураций для этих ядер:  $[\pi 3s_{1/2} \times \nu 1h_{9/2}]_4^-$  для  $^{180}\text{Tl}$  и  $^{182}\text{Tl}^{m1}$ ;  $[\pi 3s_{1/2} \times \nu 1i_{13/2}]_{7+}$  для  $^{182}\text{Tl}^{m2}$  и  $^{184}\text{Tl}^{m2}$ ;  $[\pi 1h_{9/2} \times \nu 1i_{13/2}]_{10-}$  для  $^{184}\text{Tl}^{m3}$ . Ход зарядовых радиусов основных состояний  $^{179-184}\text{Tl}$  воспроизводит ход зарядовых радиусов, наблюдавшийся ранее для сферических ядер свинца с тем же числом нейтронов (рис. 2). Обнаружено заметное различие зарядовых радиусов основных и изомерных состояний со спинами  $9/2^-$  и  $10^-$  в  $^{183, 184}\text{Tl}$  (рис. 2, 3). Увеличение радиусов для изомеров объясняется возрастанием их деформации по сравнению с деформацией основных

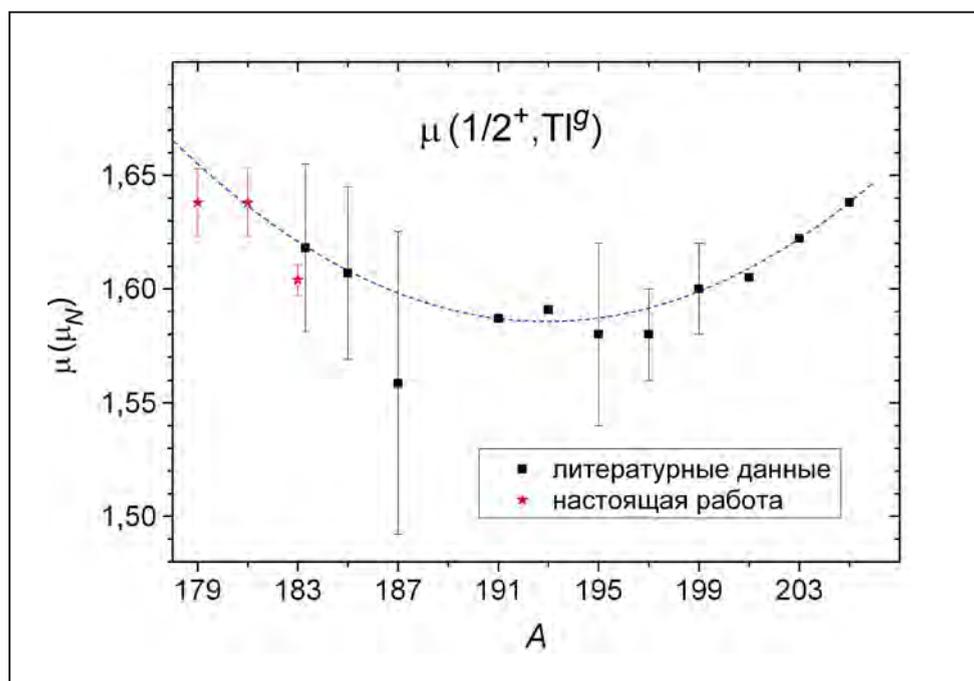


Рис. 1. Изотопическая зависимость магнитных моментов основных состояний таллия ( $I = 1/2$ )

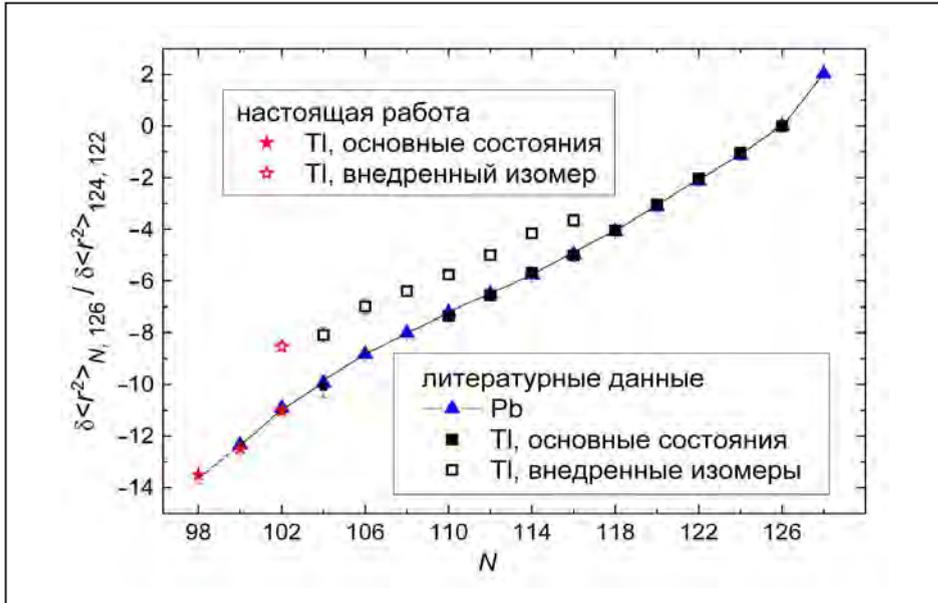


Рис. 2. Относительные изменения радиусов для изотопов Tl и Pb

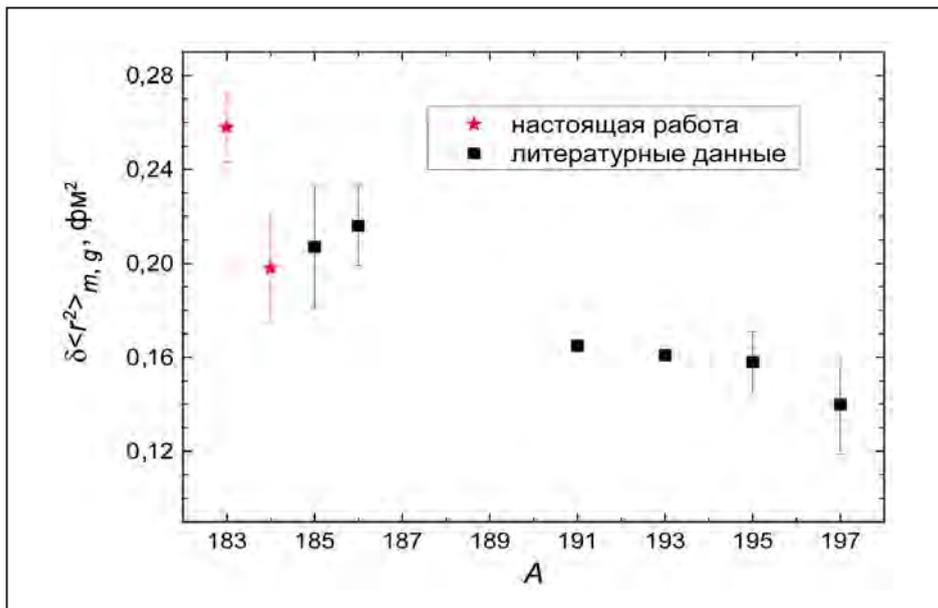


Рис. 3. Изомерные сдвиги между «внедренными» и нормальными состояниями в изотопах Tl

состояний. Неожиданный рост изомерного сдвига для  $^{183}\text{Tl}$  (см. рис. 3) указывает на возможное смешивание состояний с деформацией разного знака в этом ядре.

Также был изучен  $\alpha$ -распад  $^{182, 184}\text{Tl}$ . Впервые удалось выделить  $\alpha$ -линии для каждого из трех долгоживущих изомеров  $^{184}\text{Tl}$  – ( $10^-$ ), ( $7^+$ ) и ( $2^-$ ) – по отдельности и определить для каждого из них ветки  $\alpha$ -распада. Обнаружены новые  $\alpha$ -линии

у  $^{182}\text{Tl}$ . Все каналы  $\alpha$ -распада, исследованные в данной работе (кроме  $\alpha$ -распада ( $10^-$ ) изомера  $^{184}\text{Tl}$ ), оказались заторможенными, что говорит о различной структуре соответствующих материнских и дочерних ядер.

Работа была выполнена совместно с учеными из Японии, Великобритании, Бельгии, Швейцарии, Германии, Франции и Словакии.

1. Beveren C. van ..., Barzakh A.E. ..., Fedorov D.V. et al. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2016. V. 43. P. 025102.
2. Barzakh A.E. ..., Fedorov D.V. ..., Molkanov P.L. ..., Seliverstov M.D. et al. // Phys. Rev. C. 2017. V. 95. P. 014324.

## Запаздывающее деление и $\alpha$ -распад $^{196}\text{At}$

А. Е. Барзах, М. Д. Селиверстов, Д. В. Федоров  
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Исследована тонкая структура  $\alpha$ -распада и  $\beta$ -запаздывающее деление ( $\beta\text{DF}$ ) нейтронно-дефицитного изотопа  $^{196}\text{At}$ , полученного с использованием резонансной лазерной ионизации и масс-сепаратора ISOLDE (ЦЕРН). Благодаря высокой селективности лазерной системы и чувствительности детектирующей системы, включающей детекторы из сверхчистого германия, измерения проводились с чистыми источниками  $^{196}\text{At}$ , что позволило получить новые или существенно уточненные данные. В частности, обнаружены новые возбужденные состояния в дочернем  $^{192}\text{Bi}$  и определены мультипольности  $\gamma$ -линий, сопровождающих распад этих состояний (рис. 1), что необходимо для дальнейшего изучения ядер данной области.

Систематическое исследование  $\beta\text{DF}$  для изотопов в области свинца продолжено для  $^{196}\text{At}$ . Установлено, что массовое распределение (МР) фрагментов деления дочернего изотопа  $^{196}\text{Po}$  (заселяемого в  $\beta$ -распаде  $^{196}\text{At}$ ) представляет собой смесь симметричного и асимметричного распределений (мультимодальное деление) (рис. 2). Таким образом, данная работа

расширяет область ядер с мультимодальным типом деления: ранее этот феномен наблюдался только для трансурановых ядер. Определена вероятность запаздывающего деления  $P_{\beta\text{DF}}(^{196}\text{At}) = 9(1) \cdot 10^{-5}$ .

Работа была выполнена совместно с коллегами из Японии, Великобритании, Бельгии, Словакии, Швейцарии, Франции и Германии.

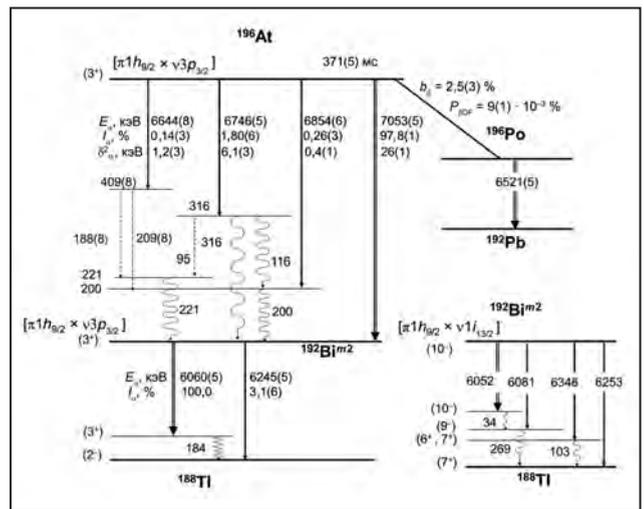


Рис. 1. Схема распада  $^{196}\text{At}$

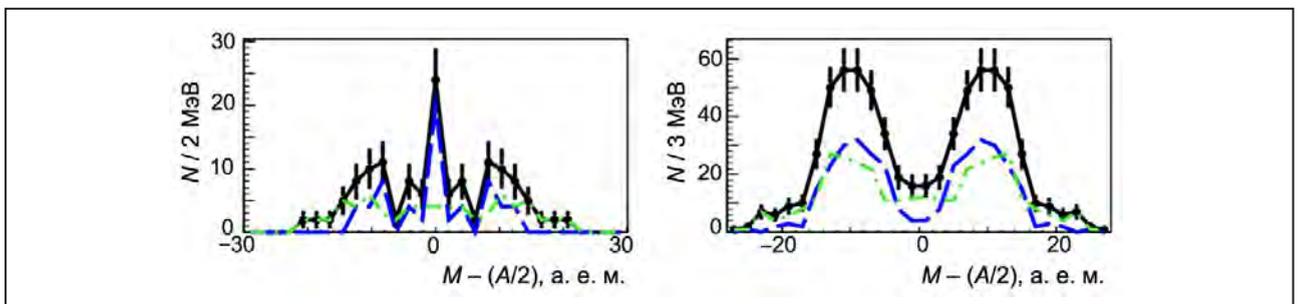


Рис. 2. Сравнение МР осколков запаздывающего деления для  $^{196}\text{At}$  (слева – настоящая работа) и  $^{180}\text{Tl}$  (справа – литературные данные). Черные линии – МР, полученные с использованием всех зафиксированных событий деления; зеленый штрихпунктир и голубой пунктир – события с полной кинетической энергией (ПКЭ) меньше и больше наиболее вероятного значения ПКЭ соответственно

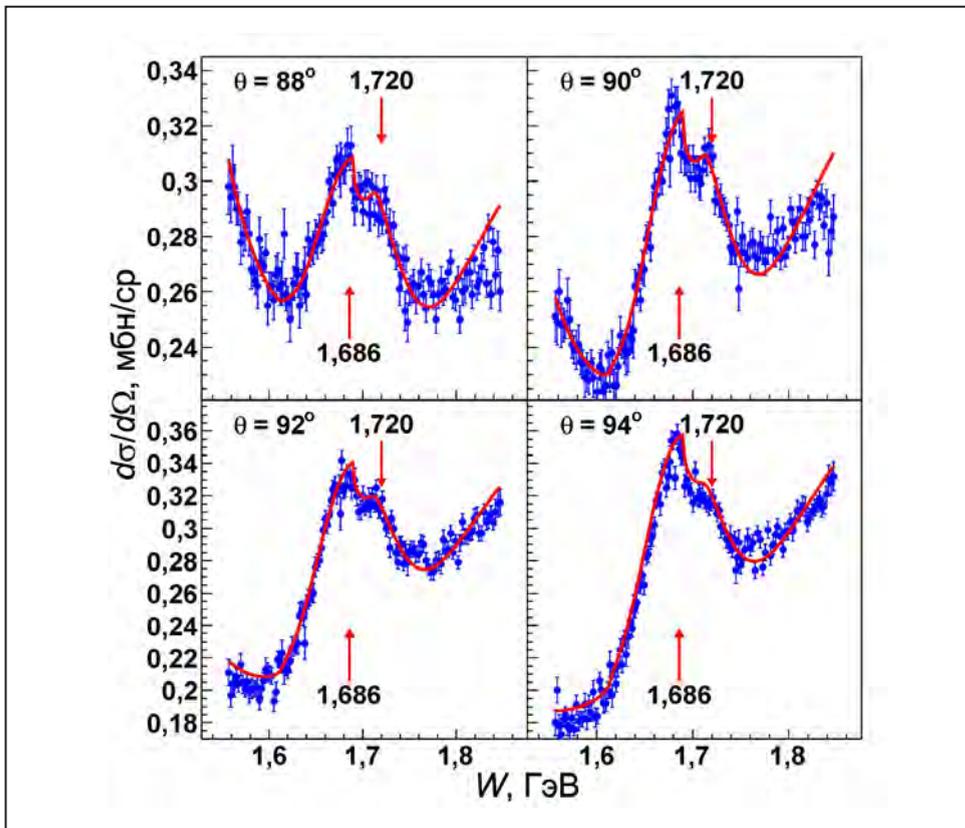
## Поиск узких резонансов в упругом $\pi p$ -рассеянии в эксперименте EPECUR

Коллаборация EPECUR

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

Представлен анализ высокоточных данных по упругим сечениям  $\pi p$ -рассеяния, полученных коллаборацией EPECUR на основе многоканального  $K$ -матричного подхода. В общей сложности в анализ было включено около 10 000 новых экспериментальных точек. Узкие структуры в этих данных изучаются с точки зрения как открытия новых порогов, так и резонансных вкладов. Результаты показаны на рисунке. Частично особенность при  $W \approx 1,686$  ГэВ связана с открытием канала  $K\Sigma$ . Тем не менее полное описание данных значительно улучшается с добавлением

двух узких резонансных структур при  $W \approx 1,686$  и  $W \approx 1,720$  ГэВ. Эти структуры интерпретируются как проявления  $S_{11}$ - и  $P_{11}$ -резонансов. Оба резонанса имеют малую ширину и слабую связь с упругим каналом. Это согласуется со свойствами нестранного состояния пентакварков, которые были предсказаны Д. И. Дьяконовым, В. Ю. Петровым и М. В. Поляковым. Мы рассматриваем резонанс  $P_{11}$  (1720), который имеет квантовые числа нуклона, как лучший кандидат в качестве нестранного члена экзотического антидекуплета.



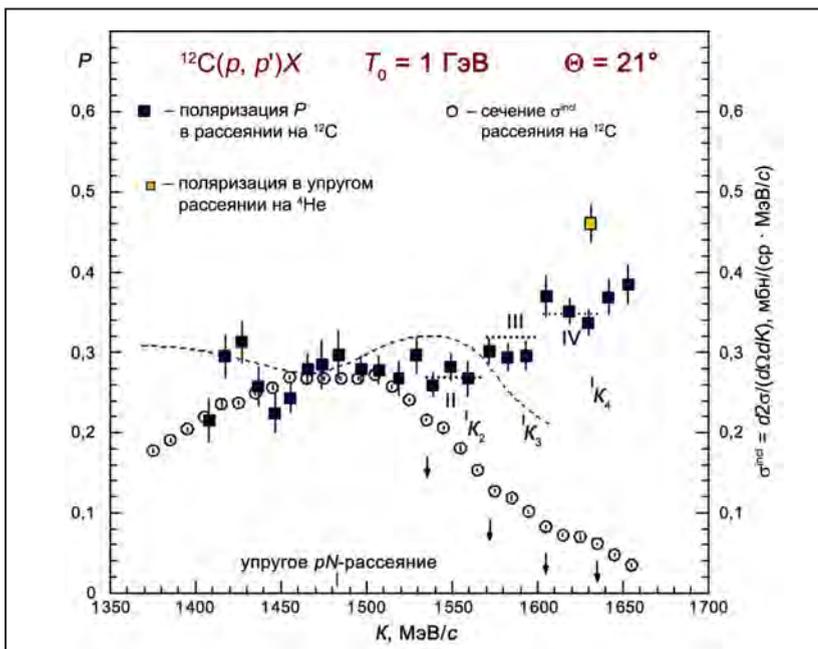
Дифференциальное сечение упругого  $\pi p$ -рассеяния. Красная сплошная линия – результаты вычислений с добавленными резонансами

## Структурные эффекты в поляризации и сечениях инклюзивного рассеяния $A(p, p')X$ на ядрах $^{12}\text{C}$ и $^{40}\text{Ca}$ 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 НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Впервые наблюдается структура в поляризации ( $P$ ) и сечениях ( $\sigma^{\text{incl}}$ ) инклюзивного рассеяния  $A(p, p')X$  на ядрах. Данные для ядра  $^{12}\text{C}$  представлены на рисунке. Отрезками пунктирных линий обозначены интервалы импульсов II, III и IV вторичных протонов ( $K$ ), в пределах которых поляризация практически одинакова. Средняя поляризация растет с импульсом от интервала II к интервалу IV. Начало каждого интервала примерно совпадает с импульсом (отмечен на рисунке стрелкой), соответствующим замедлению падения сечения рассеяния. Наблюдаемое поведение поляризации и сечения в импульсных интервалах II, III и IV, возможно, связано с квазиупругим рассеянием на нуклонных объединениях (корреляциях) в ядре, состоящих из двух, трех и четырех нуклонов соответственно. При этом

вклад рассеяния на отдельных ядерных нуклонах в интервалах III и IV мал, т. к. их импульсы принимают значения большие, чем импульс Ферми ( $K_F \sim 250$  МэВ/с).  $K_2$ ,  $K_3$  и  $K_4$  соответствуют импульсам протонов, упруго рассеянных на малонуклонных корреляциях (кластерах)  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{He}$  ( $^3\text{H}$ ) и  $^4\text{He}$ . Импульсы рассчитывались в предположении, что кластер покоится и его масса равна свободной массе, а остаточное ядро в реакции находится в основном состоянии. Ширина отмеченных выше интервалов определяется движением корреляций. Отметим, что область самых больших импульсов, которая следует сразу за областью IV, возможно, соответствует квазиупругому рассеянию на остаточном ядре ( $X$ ) в указанной выше реакции.



Данные для ядра  $^{12}\text{C}$ . Штриховая кривая – результат расчета поляризации  $P$  в рамках импульсного приближения с искаженными волнами с учетом модификации нуклонного спинора Дирака в ядерной среде. Предполагается, что ядро состоит только из нуклонов. Кинематика реакции: при  $K > 1480$  МэВ/с переданный ядру импульс  $Q$  практически не меняется и равен  $600$  МэВ/с ( $Q > 2 K_F$ )

## Исследование фрагментации ( $Z = 2$ ) релятивистских ядер $^{16}\text{O}$ и $^{208}\text{Pb}$

Е. А. Котиков

Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Для исследования фрагментации релятивистских ядер используются угловые распределения двухзарядных фрагментов ядра  $^{16}\text{O}$  с импульсом  $4,5 \text{ А} \cdot \text{ГэВ} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $^{208}\text{Pb}$  с импульсом  $160 \text{ А} \cdot \text{ГэВ} \cdot \text{с}^{-1}$  при их взаимодействии с ядрами фотоэмульсии. Первичные измерения для кислорода и свинца были выполнены в Отделении физики высоких энергий. В данной работе рассматриваются раздельно события с двумя и более двухзарядными фрагментами первичного ядра.

Результаты аппроксимации по программе Origin Pro 7.0 экспериментальных распределений парных углов в событиях с двумя, тремя и четырьмя двухзарядными фрагментами ядра  $^{16}\text{O}$  нормальными приведены в таблице.

Согласно статистической модели фрагментации релятивистских ядер,  $\sigma(\phi_{ij}) = 14,45$  мрад, что не соответствует полученному экспериментальному результату. Таким образом, ни в одной группе рассмотренных событий статистическая модель фрагментации ядер не описывает импульсное распределение двухзарядных фрагментов в ядре  $^{16}\text{O}$ .

При поиске событий (с 2–4  $\alpha$ -частицами) наблюдались также «чистые» события вида  $^{16}\text{O} \rightarrow \alpha + ^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O} \rightarrow \text{Li} + \text{B}$  и  $^{16}\text{O} \rightarrow \text{p} + \text{N}$ . Возбужденные состояния Li, B,  $^{12}\text{C}$  и N могут вносить вклад в рассматриваемые двухзарядные фрагменты.

Визуальные наблюдения фрагментации ядер  $^{16}\text{O}$  с четырьмя двухзарядными фрагментами позволяют предположить, что ядро  $^{16}\text{O}$  может представлять одну из кластерных структур – ( $\text{p} + \text{N}$ ), ( $\text{Li} + \text{B}$ ), ( $\text{Be} + \text{Be}$ ) и ( $\text{He} + \text{C}$ ), находящихся

в динамическом равновесии. Наблюдаемые же ансамбли кластеров ядра  $^{16}\text{O}$  появляются в результате электромагнитного воздействия ядра мишени (виртуальный  $\gamma$ -квант) и ядерного дисперсионного взаимодействия внутри  $^{16}\text{O}$ .

Полученные значения  $\sigma(\phi_{ij})$  во всех группах событий фрагментации ядра  $^{208}\text{Pb}$  значительно отличаются от ожидаемого из статистической модели значения (520 мрад). Следовательно, и в ядре  $^{208}\text{Pb}$  ни в одной группе рассмотренных событий статистическая модель фрагментации ядер не описывает импульсное распределение двухзарядных фрагментов.

Данная работа явилась альтернативным результатом распространенному мнению о соответствии фрагментации релятивистских ядер в широком интервале масс и энергий статистической модели. Из нее также следует, что при полном и детальном исследовании фрагментации релятивистских ядер можно получить сведения об их структурном строении. Причем исследование нужно начинать с легчайших ядер, продвигая шаг за шагом к более тяжелым.

Таблица. Параметры аппроксимирующих функций для событий ядра  $^{16}\text{O}$

$\sigma(\phi_{ij}) = 9,3 \pm 0,5$ мрад	$\chi^2 = 0,95$	(2 $\alpha$ )
$\sigma(\phi_{ij}) = 9,5 \pm 0,5$ мрад	$\chi^2 = 0,94$	(3 $\alpha$ )
$\sigma(\phi_{ij}) = 6,1 \pm 0,5$ мрад	$\chi^2 = 0,86$	(4 $\alpha$ )

## Поиски корреляции сигналов в детекторе Borexino от нейтрино и антинейтрино с $\gamma$ -всплесками во Вселенной

Коллаборация Borexino

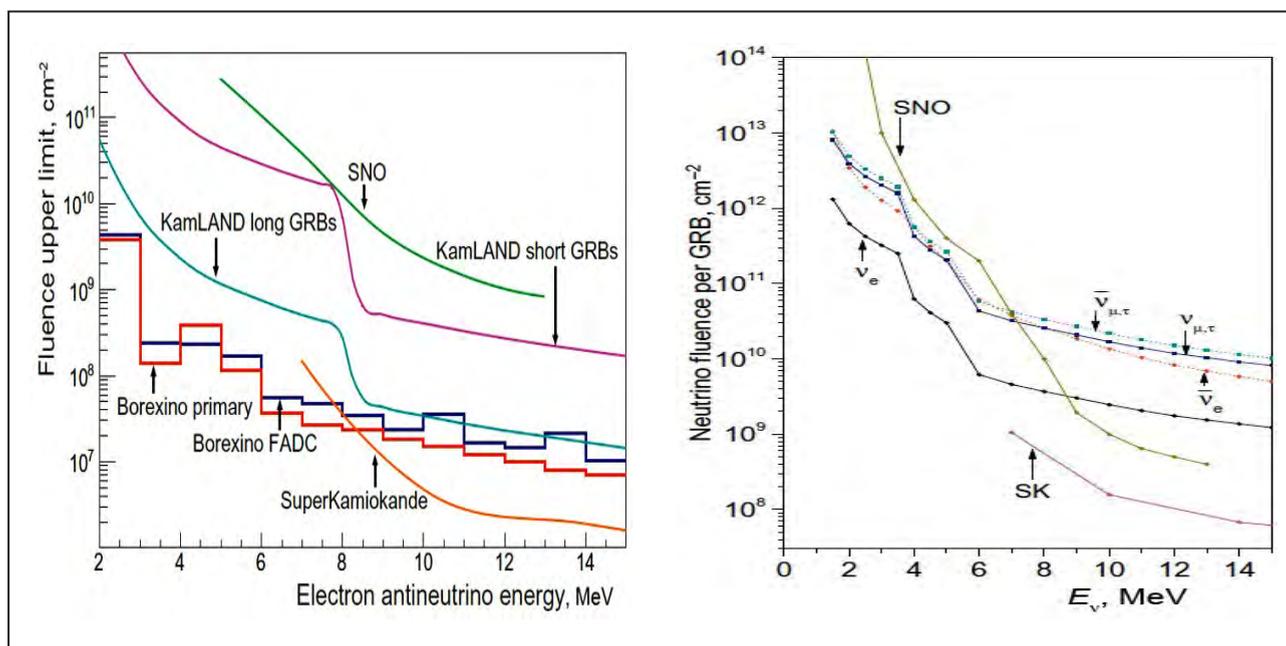
А. В. Дербин, И. С. Драчнев, В. Н. Муратова, Д. А. Семенов, Е. В. Унжаков –  
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Гамма-всплеск (ГВ) – масштабный космический выброс энергии взрывного характера, наблюдаемый в отдаленных галактиках в жесткой части электромагнитного спектра. Продолжительность типичного ГВ составляет несколько секунд. Коллаборация Borexino проанализировала корреляцию 2 350 ГВ с данными детектора Borexino, собранными в период с декабря 2007 по ноябрь 2015 г. Сотрудники НИЦ КИ – ПИЯФ предложили провести поиск корреляций не только с событиями обратного  $\beta$ -распада для электронных антинейтрино, но и с событиями

рассеяния нейтрино на электроне для всех типов нейтрино. Никаких статистически значимых корреляций не обнаружено. Установлены наиболее строгие ограничения на флюенс нейтрино и антинейтрино, связанный с ГВ, при энергиях менее 7-8 МэВ (рис.).

Результаты получены при активном участии российских ученых из НИЦ КИ – ПИЯФ, НИЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ и НИИЯФ МГУ.

Работа поддержана грантами РФФИ № 15-02-02117 и № 16-29-13014.



Верхние пределы на флюенсы нейтрино и антинейтрино в корреляции с ГВ.

Слева: ограничения для электронных антинейтрино, полученные из отсутствия корреляции ГВ с событиями обратного  $\beta$ -распада; результат Borexino (красная и синяя линии) показан в сравнении с пределами S-Kamiokande, SNO и KamLAND. Справа: ограничения для нейтрино и антинейтрино различных флейвов, полученные из отсутствия корреляции ГВ с событиями рассеяния нейтрино на электроне

## Первые результаты поиска темной материи с использованием низкорadioактивного аргона в детекторе DarkSide-50

Коллаборация DarkSide

А. В. Дербин, В. Н. Муратова, Д. А. Семенов, Е. В. Унжаков –

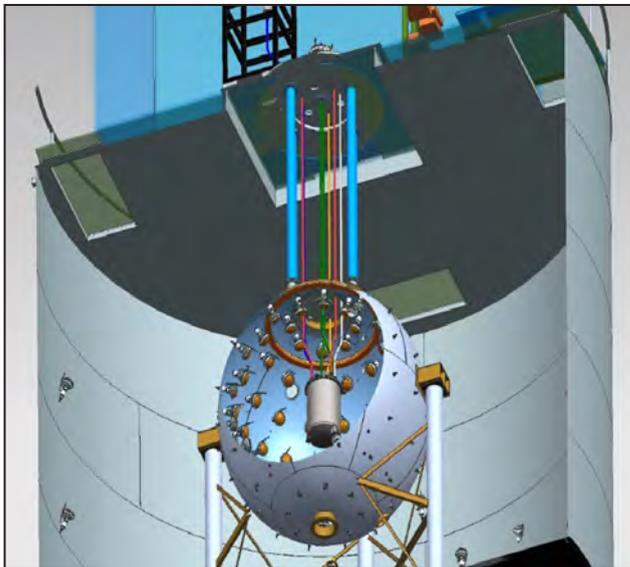
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Эксперимент DarkSide-50 с двухфазным жидкоаргоновым детектором массой 46 кг ведет поиск темной материи в виде слабо взаимодействующих массивных частиц (Weakly Interacting Massive Particle – WIMP). Столкновения WIMP с ядрами Ar приводят к ядрам с энергией отдачи порядка 10 кэВ, которые и должен зарегистрировать детектор (рис. 1). НИЦ КИ – ПИЯФ участвует в работе коллаборации DarkSide с момента ее образования в 2010 г. В 2016 г. впервые в мире в установке использовался подземный аргон, в котором содержание

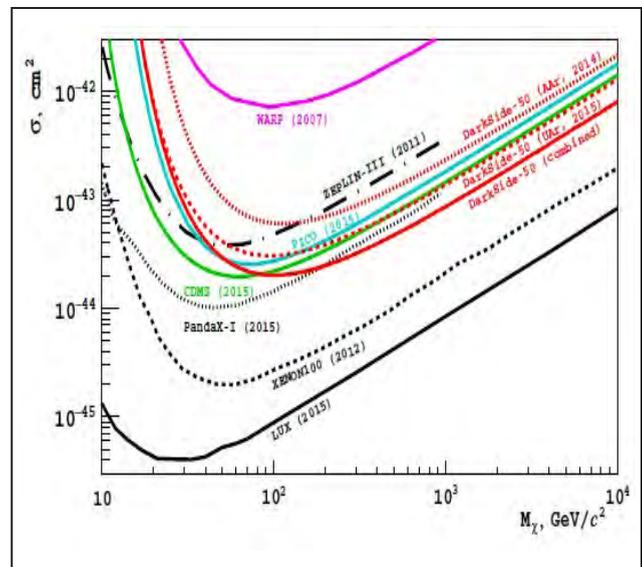
радиоактивного изотопа  $^{39}\text{Ar}$  в 1 400 раз меньше, чем в атмосферном аргоне. В результате измерений, которые продолжались 71 сутки, установлены новые, наиболее строгие для ядер Ar, ограничения на спин-независимое сечение взаимодействия и массу частиц WIMP (рис. 2).

Результаты получены при активном участии российских ученых из НИЦ КИ – ПИЯФ, НИЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ и НИИЯФ МГУ.

Работа поддержана грантами РФФИ № 15-02-02117 и № 16-29-13014.



**Рис. 1.** Схема детектора DarkSide-50. Центральный детектор находится внутри стальной сферы, заполненной сцинтиллятором с добавкой бора для поглощения нейтронов. Вся конструкция размещена внутри водного танка для подавления внешней  $\gamma$ -активности



**Рис. 2.** Верхние пределы на сечения взаимодействия WIMP в зависимости от их массы, полученные с детектором DarkSide-50 (красные кривые). Более строгие пределы получены в экспериментах XENON 100 и LUX, использующих в качестве мишени ядра Xe

## Метод восстановления газоразрядных детекторов при возникновении в них мальтер-эффекта

Г. Е. Гаврилов, О. Е. Маев, Д. А. Майсузенко, С. А. Насыбулин  
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Проблема старения газоразрядных детекторов частиц по-прежнему остается актуальной для современных физических установок, включая эксперименты на Большом адронном коллайдере (БАК). Данная работа посвящена разработке метода противодействия одному из наиболее распространенных видов катодного старения, приводящего к появлению зон с самоподдерживающимися спонтанными токами в детекторе – мальтер-эффекту (МЭ).

При работе на пучке БАК значительное число многопроволочных пропорциональных камер (МПК) мюонного детектора эксперимента LHCb демонстрируют периодически возникающие мальтеровские токи. Это приводит к искажению выходных данных, к большим локально накопленным дозам в детекторах и аварийным сбросам высоковольтного питания. Возникновение МЭ связывается с появлением на катоде зон, где образуется тонкая резистивная пленка из полимерных соединений кремния, которая, заряжаясь положительными ионами, стимулирует вторичную эмиссию электронов в МПК. Обычно для подавления МЭ в рабочую газовую смесь добавляют пары воды или различных спиртов, которые останавливают полимеризацию и снимают заряд с пленки. Однако подобные добавки не устраняют, а лишь гасят мальтеровские токи, и в работе необходимо постоянно использовать модифицированную газовую смесь. В результате возникает риск химического взаимодействия добавок с конструкционными материалами. Поэтому данные методы гашения МЭ применимы не для всех МПК.

Демонстрирующие МЭ пропорциональные камеры LHCb восстанавливаются с помощью

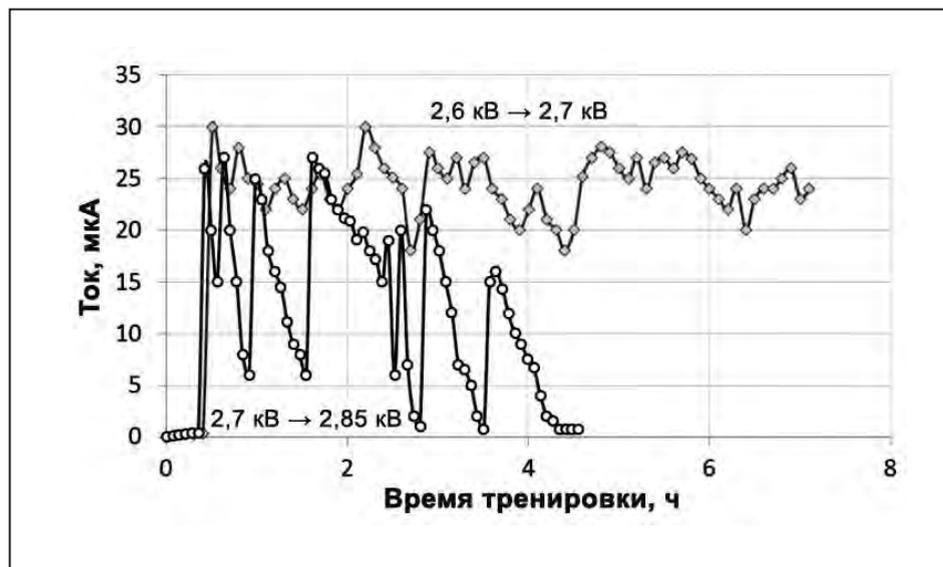
длительных высоковольтных тренировок в разряде рабочей газовой смеси 55 % Ar + 40 % CO<sub>2</sub> + 5 % CF<sub>4</sub>, где происходит генерация химически активных радикалов, удаляющих диэлектрическую пленку с поверхности катода. Процедура восстановления одной зоны МЭ может длиться от нескольких дней до нескольких недель и более. Для ускорения и повышения эффективности восстановления был разработан метод тренировки в разряде рабочей смеси с добавлением 2 % кислорода. Метод апробирован на четырех МПК, снятых с установки LHCb из-за появления в них больших мальтеровских токов. Процедура подавления МЭ в МПК включала локализацию зон зажигания самоподдерживающихся токов путем сканирования входного окна детектора β-источником <sup>90</sup>Sr и затем тренировку этих зон в режиме мальтеровского тока при облучении <sup>90</sup>Sr. В результате полное исчезновение токов МЭ происходило всего за 4–6 ч.

Сравнение изменения мальтеровских токов при тренировке зон МЭ в рабочей смеси и в новой смеси с добавлением 2 % O<sub>2</sub> показано на рис. 1. В первом случае за 7 ч тренировки устранить МЭ не удалось, и мальтеровский ток в МПК остался на уровне 25 мкА. Во втором уже через 4,5 ч после поджигания МЭ в газовой смеси с добавлением кислорода ток спал до уровня менее 1 мкА. Эта величина соответствует току ионизации от <sup>90</sup>Sr, т. е. мальтеровский ток в МПК практически исчез. Динамика роста напряжения зажигания МЭ в процессе тренировки МПК показана на рис. 2. Видно, что тренировка с кислородом ускоряет процесс очистки катода от диэлектрических образований. Даже 2 ч тренировки в смеси с кислородом

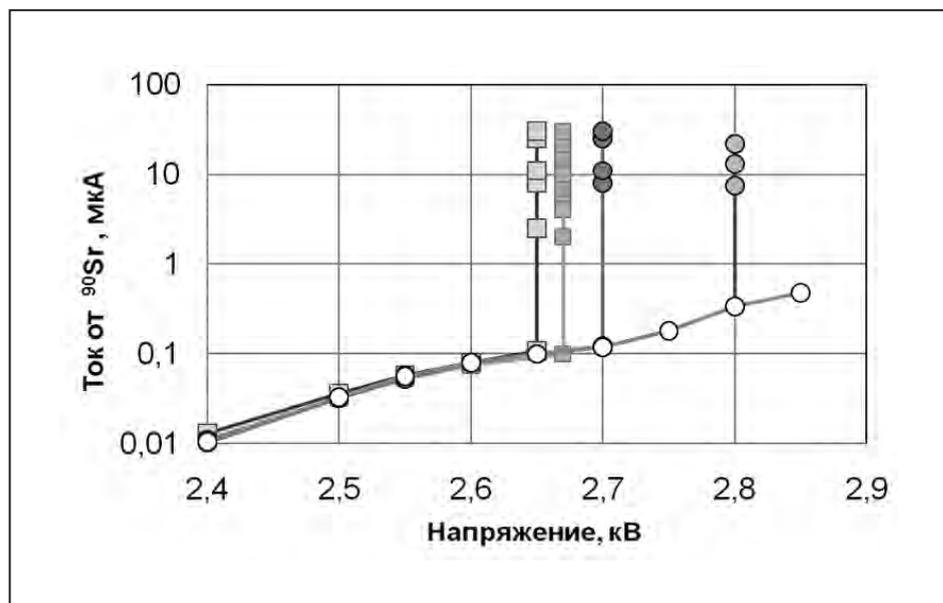
по эффективности превосходят 6 ч тренировки на «чистой» рабочей газовой смеси.

Полученные результаты восстановления газоразрядных детекторов ЛНСб имеют долговременный характер: все восстановленные новым

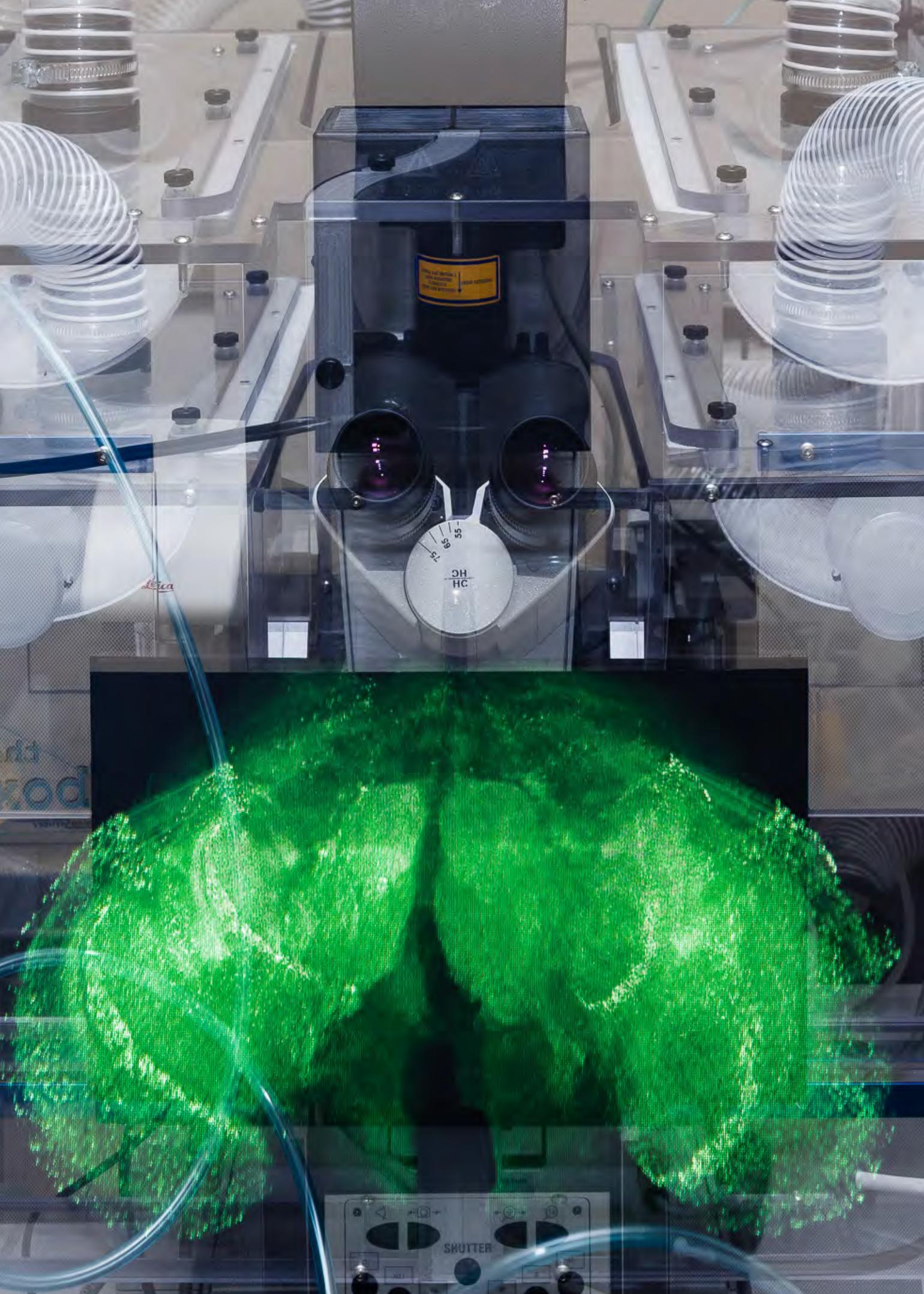
методом МПК успешно работают на пучке БАК. Очевидно, что данный метод восстановления может быть широко применен для детекторов других экспериментов.



**Рис. 1.** Мальтеровские токи в процессе тренировки:   
 —◇— в рабочей газовой смеси 55 % Ar + 40 % CO<sub>2</sub> + 5 % CF<sub>4</sub> при напряжении 2,6–2,7 кВ;   
 —○— в рабочей смеси с 2 % O<sub>2</sub> при напряжении 2,7–2,85 кВ



**Рис. 2.** Изменение напряжения зажигания МЭ:   
 —□— до и —■— после 6 ч тренировки в 55 % Ar + 40 % CO<sub>2</sub> + 5 % CF<sub>4</sub> без кислорода.   
 Зажигание МЭ после тренировки с 2% O<sub>2</sub>:   
 —●— через 2 ч,   
 —○— через 4 ч,   
 —○— через 6 ч



## Молекулярная и радиационная биофизика

- 94 Полноатомные модели частично собранных нуклеосом и их применение для интерпретации экспериментальных данных
- 96 Характеристика новой  $\alpha$ -L-фукозидазы из *Fusarium proliferatum* LE1, специфичной к  $\alpha$ -(1 → 4)-L-фукозидной связи в гидролизе  $\alpha$ -L-фукобиозидов
- 97 Эволюционный компромисс: метаболизм ДНК и рекомбиногенность
- 98 Структурная неупорядоченность олигомеров нативно-развернутых белков мозга BASP1 и GAP-43
- 99 Определение экспериментального инфаркта миокарда у крыс с помощью МРТ с использованием конъюгата белка теплового шока 70 с суперпарамагнитными наночастицами оксида железа
- 100 Микробиология озера Восток в Антарктике: результаты исследований озерной воды, заморозившейся в скважине после вскрытия озера
- 101 Получение протеомного профиля глиобластомы высокой степени злокачественности с помощью виртуально-экспериментального 2DE
- 102 Роль тонкой регуляции уровня экспрессии ACF1 – субъединицы ремоделирующего нуклеосомы фактора в оогенезе дрозофилы

## Полноатомные модели частично собранных нуклеосом и их применение для интерпретации экспериментальных данных

А. В. Илатовский, В. В. Исаев-Иванов,  
 А. Ю. Конев, Д. В. Лебедев, Г. Н. Рычков, А. В. Швецов –  
 Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
 А. В. Илатовский – Школа фармации и фармацевтических наук им. Скагз, Сан-Диего  
 И. Б. Назаров – Институт цитологии РАН  
 А. В. Онуфриев – Виргинский политехнический университет

Впервые в мире нами были построены полноатомные модели частично собранных нуклеосомных структур (рис. 1а–в): дисомы, тетрасомы и гексасомы, существование которых регулирует доступ белковых факторов к генетической информации, закодированной в ДНК. Свойства таких структур сравниваются со свойствами октасомы (рис. 1г) – коровой нуклеосомной частицы. Для каждой нуклеосомной структуры была проанализирована доступность участков ДНК для белковых факторов (см. рис. 1). Построенные модели дали нам возможность по-новому интерпретировать

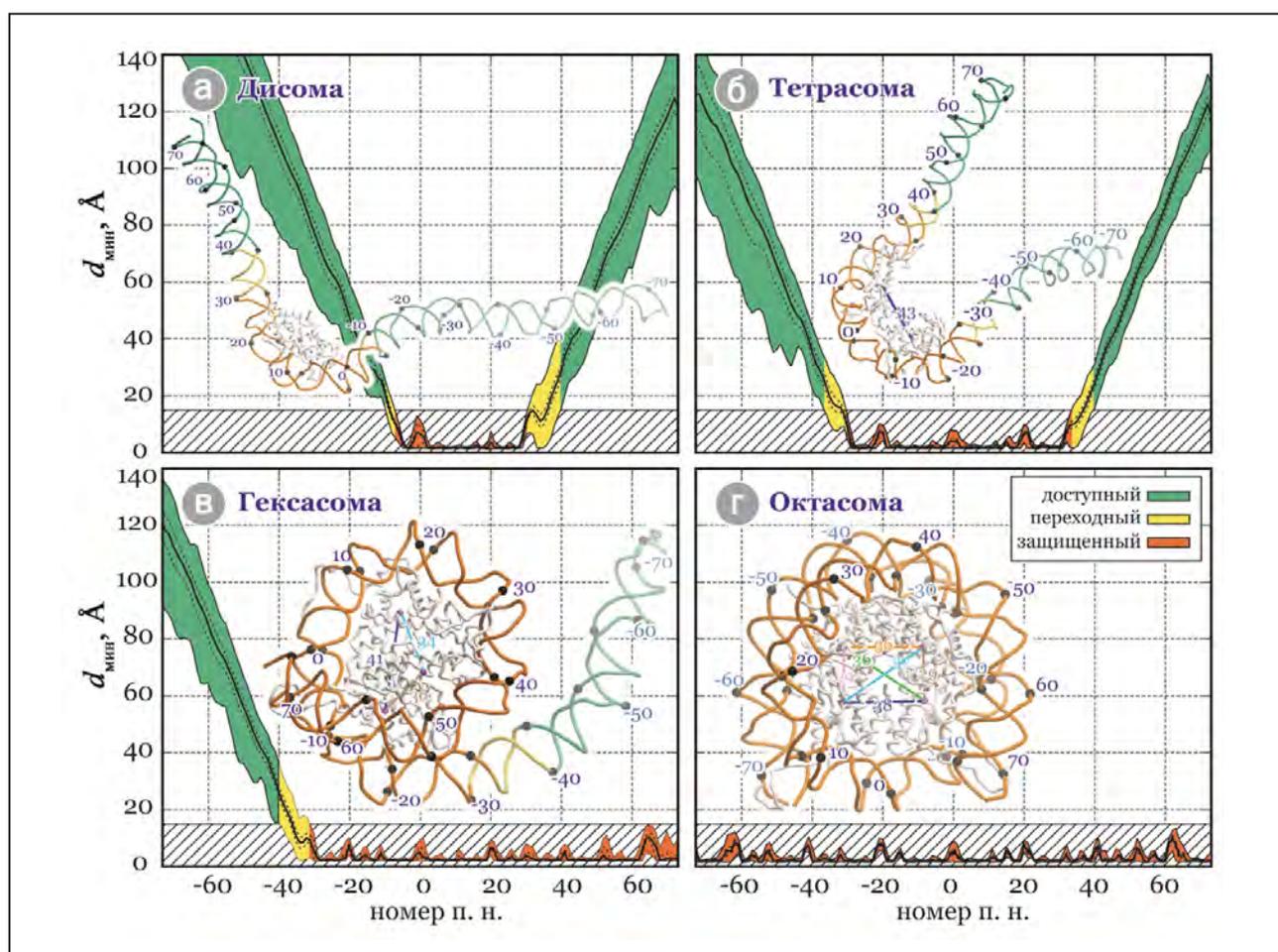


Рис. 1. Нуклеосомные частицы: дисома (а); тетрасома (б); гексасома (в); октасома (г).  
 Полноатомные модели и расчетные данные по длине защищенных участков ДНК

имеющиеся экспериментальные данные, характеризующие структурные и динамические свойства нуклеосомных частиц, полученные методами атомной силовой микроскопии (рис. 2), резонансного переноса энергии флуоресценции и малоуглового рентгеновского рассеяния. Анализ защищенности от действия нуклеаз активного хроматина позволил нам сделать вывод

о существовании частично собранных нуклеосомных частиц *in vivo*, присутствие которых может ускорять процесс транскрипции. Материалы работы приняты в печать в специальный выпуск *Biophysical Journal*, посвященный исследованиям хроматина. Предложен вариант обложки журнала (рис. 3).

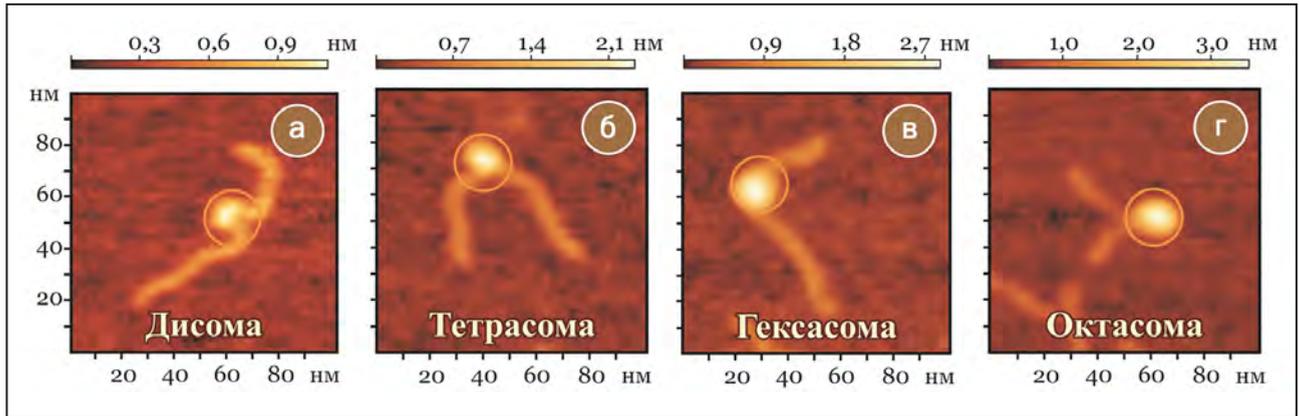


Рис. 2. Снимки нуклеосомных структур, полученные методом атомной силовой микроскопии: дисомы (а); тетрасомы (б); гексасомы (в); октасомы (г)



Рис. 3. Вариант обложки для журнала *Biophysical Journal*: из нуклеосомных частиц составлена аббревиатура PANS (Partially Assembled Nucleosome Structures)

## Характеристика новой $\alpha$ -L-фукозидазы из *Fusarium proliferatum* LE1, специфичной к $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4)-L-фукозидной связи в гидролизе $\alpha$ -L-фукобиозидов

К. С. Бобров, Д. Р. Иванен, А. А. Кульминская,  
С. Н. Нарыжный, К. А. Шабалин, С. В. Швецова, Е. В. Энейская –  
Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
А. А. Кульминская, К. А. Шабалин, С. В. Швецова –  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
В. Б. Крылов, Н. Э. Нифантьев, Н. Е. Устюжанина –  
Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН  
В. Г. Згода, С. Н. Нарыжный –  
Научно-исследовательский институт биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича РАН

В настоящем исследовании изучены ферментативные свойства новой  $\alpha$ -L-фукозидазы (FrFucA) с широкой субстратной специфичностью, выделенной из мицелиального гриба *Fusarium proliferatum* LE1. Высокоочищенный фермент FrFucA получен в результате нескольких хроматографических стадий после роста на среде с L-фукозой и является мономером с изоэлектрической точкой  $pI = 5,21 \pm 0,05$  и массой  $67 \pm 1$  кДа. Показано, что фермент стабилен в достаточно широком диапазоне значений pH 4,5–6,0, а pH-оптимум равен 5,5. Оптимальное значение температуры в гидролизе синтетического субстрата pNPFuc равно 45 °C, но уже после инкубирования фермента в течение 20 мин при данной температуре активность снижалась вдвое. Фермент FrFucA способен гидролизовать синтетический субстрат *p*-нитрофенил- $\alpha$ -L-фукопиранозид (pNPFuc) с  $K_m = 1,1 \pm 0,1$  ммоль и  $k_{кат} = 39,8 \pm 1,8$  с<sup>-1</sup>. L-фукоза, 1-деоксифуконоджиримидин и трис-HCl являются конкурентными ингибиторами гидролиза pNPFuc с константами ингибирования  $0,2 \pm 0,05$  ммоль,  $7,1 \pm 0,05$  нмоль и  $12,2 \pm 0,1$  ммоль соответственно. При выявлении влияния ионов двухвалентных металлов на активность фермента показан существенный ингибирующий эффект Hg<sup>2+</sup>, что может указывать на присутствие сульфгидрильных групп в каталитическом участке, ответственном за активность фермента. Мы предположили,

что фермент принадлежит к подсемейству A 29-го семейства гликозидгидролаз (база данных CAZy). Предположение сделано на основании способности фермента гидролизовать практически все фукозосодержащие олигосахариды, имеющиеся в работе, и по результатам филогенетического анализа. Среди pNP- $\alpha$ / $\beta$ -гликозидов фермент FrFucA специфичен лишь в отношении pNPFuc. Для экспериментов по определению субстратной специфичности был использован набор фукозосодержащих субстратов, среди которых были использованы как специально синтезированные дифукозиды с «чистой» фукозидной связью, так и натуральные фукоолигосахариды (Le<sup>x</sup>, Le<sup>d</sup>, L-Fuc- $\alpha$ -OPr, L-Fuc- $\alpha$ -(1  $\rightarrow$  4)-D-GlcNAc-PAА и 6-O- $\alpha$ -L-Fuc-N,N'-диацетил-хитобиоза). Мы показали, что исследуемая  $\alpha$ -L-фукозидаза является уникальной, предпочитающей гидролизовать  $\alpha$ -(1  $\rightarrow$  4)-фукозидную связь в  $\alpha$ -L-фукобиозах с различными типами связи. Будучи гликозидазой с сохраняющим механизмом гидролиза, FrFucA способна катализировать реакции трансгликозирования со спиртами (метанол, этанол, 1-пропанол) и pNP-гликозидами в качестве акцепторов. Эти особенности делают фермент важным инструментом, который может быть использован в различных модификациях значимых фукозосодержащих соединений.

Часть исследований была выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 16-14-00109.

1. Shvetsova S.V., Zhurishkina E.V., Bobrov K.S., Ronzhina N.L., Lapina I.M., Ivanen D.R. ..., Kulminskaya A.A. // J. Basic Microbiol. 2015. V. 55. No. 4. P. 471–479.
2. Shvetsova S.V., Shabalin K.A., Bobrov K.S., Ivanen D.R. ..., Krylov V.B. ..., Naryzhny S.N. ..., Eneyskaya E.V., Kulminskaya A.A. // Biochimie. 2017. V. 132. P. 54–65: doi: 10.1016/j.biochi.2016.10.014.

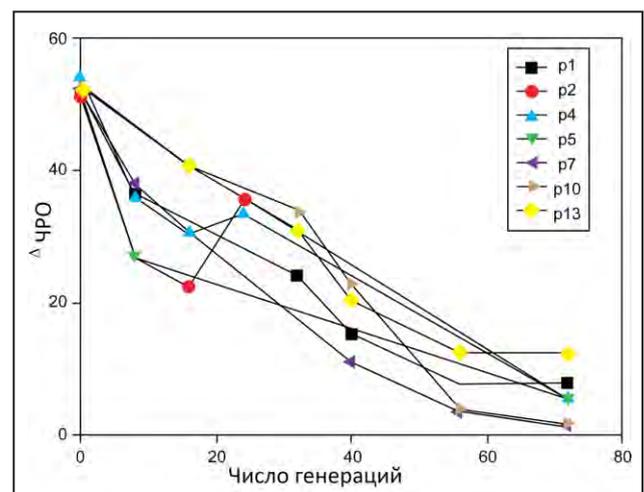
## Эволюционный компромисс: метаболизм ДНК и рекомбиногенность

**В. А. Ланцов**, Д. М. Байтин, И. В. Бахланова, А. В. Дудкина –  
Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
Е. А. Вуд, М. М. Кокс – Висконсинский университет в Мадисоне

Рекомбиногенность белка RecA из *Escherichia coli*, ключевой элемент рекомбинационной репарации, эволюционировала таким образом, что способствует спариванию и обмену нитей ДНК не самым оптимальным образом. Вместо этого рекомбиназные возможности белка RecA представляют собой эволюционный компромисс между необходимым уровнем рекомбинационной репарации ДНК и потенциалом вредных последствий для бактерии. Мутантный вариант RecA, RecAD112R, индуцирует повышенный уровень конъюгационной рекомбинации. Когда белок RecAD112R экспрессируется вместо белка дикого типа, то частота рекомбинационных обменов увеличивается более чем в 50 раз. Тем не менее экспрессия белка RecAD112R в *E. coli* приводит к снижению динамики клеточного роста. В ходе непрерывного роста негативные свойства RecAD112R, наряду с повышенной конъюгационной рекомбинацией, теряются в течение 70 клеточных генераций (рис.). Супрессия гиперрекомбиногенного фенотипа является результатом снижения экспрессии белка RecAD112R, которое связано в первую очередь с делецией в промоторе гена *recA* либо с хромосомной мутацией, которая вызывает уменьшение числа копий плазмиды. Однако негативные последствия RecAD112R на рост клеток могут быть сведены на нет с помощью коэкспрессии белка RecX. Эффект белка RecX в естественных условиях роста бактерии аналогичен воздействию того же белка RecX на филамент RecAD112R в пробирке. Единственная известная функция белка RecX – это смещение белка RecA с ДНК. Способность

белка RecX восстанавливать рост клеток, экспрессирующих RecAD112R, означает, что мутантный белок связывает хромосомную ДНК чрезмерно активно. Полученные результаты свидетельствуют о том, что токсичность белка RecAD112R обусловлена его устойчивым взаимодействием с двуниевой геномной ДНК, что, в свою очередь, создает барьеры для других процессов метаболизма ДНК.

Супрессия гиперрекомбиногенного фенотипа является результатом мутаций, блокирующих экспрессию белка RecAD112R. Рекомбиназные возможности белка RecA представляют собой эволюционный компромисс между необходимым уровнем рекомбинационной репарации ДНК и негативными последствиями для роста бактерии.



Исчезновение гиперрекомбиногенного фенотипа в клетках, экспрессирующих мутантный белок RecAD112R (ЧРО – частота рекомбинационных обменов ДНК)

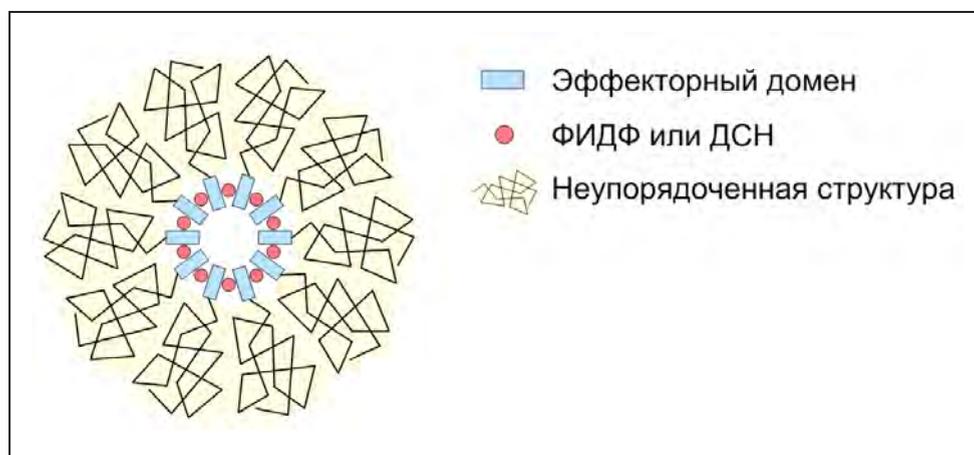
## Структурная неупорядоченность олигомеров нативно-развернутых белков мозга BASP1 и GAP-43

В. В. Захаров, О. С. Форсова

Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Белки BASP1 и GAP-43 локализованы на внутренней поверхности пресинаптической мембраны аксонных окончаний нейронов и участвуют в направленном росте аксонов, синаптической пластичности и нейрорегенерации, предположительно за счет секвестрирования фосфатидилинозитол-4,5-дифосфата (ФИДФ) в липидных рафтах. В присутствии кислых фосфолипидных мембран или додецилсульфата натрия (ДСН) BASP1 и GAP-43 образуют олигомеры гетерогенного размера. BASP1 и GAP-43 являются полностью неструктурированными (нативно-развернутыми) белками. В данной работе мы исследовали структуру олигомеров BASP1 и GAP-43 различными методами. С помощью химической сшивки глутаровым альдегидом мы определили агрегационные числа для олигомеров BASP1 и GAP-43: 10–14 и 6–7 мономеров в комплексе соответственно. Характер сшивки указывает на кольцевое расположение мономеров. Спектры кругового дихроизма мономеров показали наличие неупорядоченной структуры с высоким

содержанием конформации полипролиновой спирали II типа. Олигомеризация сопровождается минимальной структуризацией белков, связанной с образованием коротких  $\alpha$ -спиральных участков. Число остатков в  $\alpha$ -спиральной конформации было оценено как 13 для BASP1 и 18 для GAP-43. Однако общая структура олигомеров остается неупорядоченной. Это было подтверждено с помощью определения гидродинамического размера олигомеров методами гель-фильтрации и электрофореза в градиентном полиакриламидном геле, а также исследования устойчивости олигомеров к протеолитической деградации. На основании полученных результатов мы предложили модель «электростатического ядра», описывающую строение олигомеров BASP1 и GAP-43 (рис.), согласно которой короткие положительно заряженные (эффекторные) домены, взаимодействуя с молекулами ФИДФ или ДСН, образуют  $\alpha$ -спиральное ядро комплекса. При этом основная часть белковых цепей остается в неструктурированном виде.



Модель «электростатического ядра», описывающая строение олигомеров BASP1 и GAP-43

## Определение экспериментального инфаркта миокарда у крыс с помощью МРТ с использованием конъюгата белка теплового шока 70 с суперпарамагнитными наночастицами оксида железа

В. А. Рыжов –

Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
Г. Милхофф, М. А. Шевцов – Технический университет Мюнхена

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

А. В. Добродумов – Институт высокомолекулярных соединений РАН

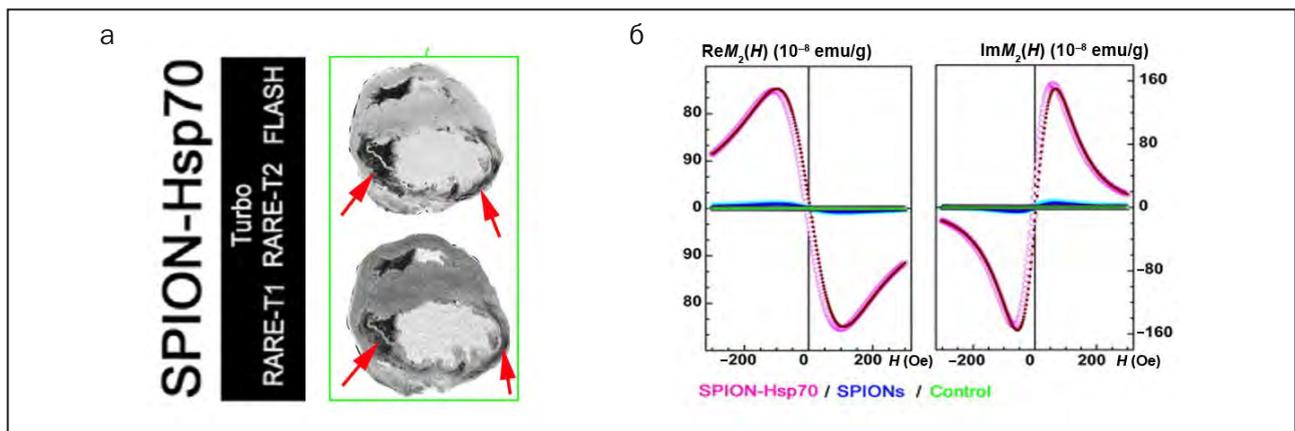
И. В. Гузова, Б. А. Маргулис – Институт цитологии РАН

И. Питкин – Университет Пенсильвании

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

Известно, что магнитные наночастицы (МНЧ) на основе оксидов железа (SPIONs) могут использоваться для обеспечения  $T_2$ -негативного контраста при диагностике инфаркта миокарда с помощью магнитно-резонансной томографии (МРТ), а рецепторы CD40 стресс-индуцибельного белка теплового шока Hsp70 (72 кДа) экспрессируются на мембране мышечных клеток сердца. Поэтому функционализация SPIONs путем пришивки Hsp70 к их декстрановой оболочке может увеличить накопление конъюгата SPION–Hsp70 в зоне инфаркта за счет специфичности связывания и обеспечить ее МРТ-диагностику. Проверка этого предположения с контролем биораспределения конъюгата в тканях и органах и была задачей настоящей работы.

Измерения второй гармоники нелинейного отклика  $M_2$  на слабое ас магнитное поле в параллельном ему постоянном  $H$  показало возрастание в  $\sim 30$  раз накопления Hsp70–SPION по сравнению с SPIONs в инфарктной зоне миокарда (рис. б). Это существенно увеличивает ее МРТ-контраст (рис. а). Анализ биораспределения конъюгата на базе данных  $M_2$  показал, что его накопление в зоне инфаркта в 5 раз больше, чем в печени, и более чем в 10 раз превышает накопление в других органах и тканях. Это показывает возможность адресной доставки лекарственных средств в область поражения с помощью конъюгата.



а – МРТ-изображения сердца, полученные в Turbo RARE-T2- и FLASH-режимах для крыс, обработанных конъюгатом Hsp70–SPION; зоны инфаркта вследствие накопления МНЧ выглядят как затемненные области на МРТ-образах (указаны красными стрелками). Панели рис. б (слева и справа) представляют сигналы  $M_2$  нелинейного отклика от ткани сердца, отражающие накопление в ней МНЧ, для крыс, обработанных SPIONs, Hsp70–SPION, и контрольных животных

## Микробиология озера Восток в Антарктике: результаты исследований озерной воды, замерзшей в скважине после вскрытия озера

С. А. Булат, М. В. Доронин, Д. С. Карлов, М. О. Хильченко –  
Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
Д. Мари – Морская биологическая станция  
Национального центра научных исследований Франции

Исследуется вопрос возможного существования микробной жизни в подледниковом озере Восток, погребенном под 4-километровым ледовым щитом в Антарктике. Получены первые результаты молекулярно-микробиологического анализа единственно доступных проб озерной воды, вошедшей в скважину после первых двух вскрытий озера и замерзшей в ней. Для сравнения использованы данные ранее выполненных исследований природного озерного льда, в которых в числе прочих была найдена бактерия AF532061, которую не удалось идентифицировать (92 % сходства с ближайшими таксонами). ДНК-анализ проб озерной воды, которые в разной степени оказались загрязненными

жидкостью для бурения, обнаружил неизвестную (неидентифицированную и неклассифицированную) бактерию w123-10 (менее 86 % сходства с ближайшими таксонами) (рис.), которая прошла все контроли на загрязнение и показала отдаленное родство с неидентифицированной бактерией AF532061 из озерного льда. Эти две бактерии могут представлять неизученную микробную жизнь, существующую в водной толще подо льдом озера Восток; гипотеза требует подтверждения. Отметим, что данное открытие оказалось возможным благодаря использованию «чистых» лабораторных помещений и собственной библиотеки контаминантов, с которой сравниваются все находки.



Отбор материала из замерзшей “drill-bit” воды на буровой коронке. Отчетливо видны струйки стекающей буровой жидкости

## Получение протеомного профиля глиобластомы высокой степени злокачественности с помощью виртуально-экспериментального 2DE

*Н. В. Белякова, О. А. Клейст, О. К. Легина,  
С. Н. Нарыжный, Р. А. Пантина, Н. Л. Ронжина, М. В. Филатов –  
Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
В. Г. Згода, М. А. Майнскова, С. Н. Нарыжный, С. Е. Новикова –  
Научно-исследовательский институт биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича РАН*

При использовании двумерного электрофореза (2DE), масс-спектрометрии (ESI LC-MS/MS) и иммунодетекции были проведены идентификация и количественный анализ различных протеоформ, присутствующих в клеточной линии, полученной из глиобластомы высокой степени злокачественности. Белковая карта на основе 2DE (937 пятен) содержит данные о 1 542 протеоформах, кодируемых 600 генами (рис. 1). Также были проведены другие эксперименты, где 16 012 протеоформ, кодируемых 4 050 генами, были идентифицированы с помощью тандемной масс-спектрометрии MS/MS и в соответствии с их

положением в геле, разделенном на 96 секций (рис. 2). Были получены графики, содержащие теоретическую и экспериментальную информацию о протеоформах, кодируемых одним и тем же геном. Такое виртуально-экспериментальное представление позволило лучше визуализировать состояние генных продуктов. Особое внимание было уделено белкам – потенциальным биомаркерам глиобластомы. Многие белки, в т. ч. биомаркеры глиобластомы, отличаются большим количеством протеоформ. Мы предполагаем, что эти формы могут быть потенциальным источником высокоспецифичных биомаркеров глиобластомы.

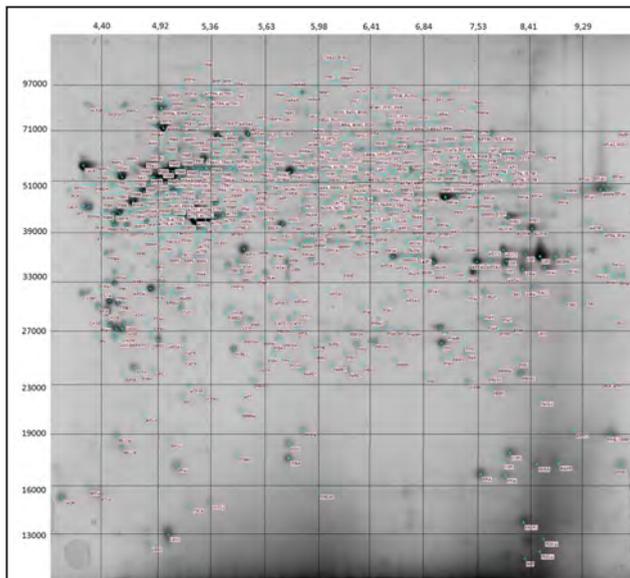


Рис. 1. 2DE, идентификация протеоформ в пятнах

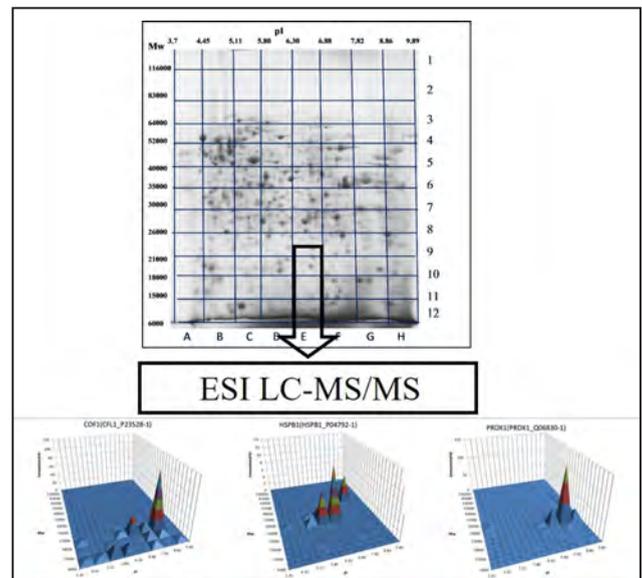


Рис. 2. Идентификация протеоформ, локализованных в выделенных секциях геля

1. Naryzhny S.N. ..., Ronzhina N.L., Kleyst O.A. et al. // J. Proteome Res. 2016. V. 15. P. 525–530.
2. Naryzhny S.N. ..., Ronzhina N.L. et al. // Electrophoresis. 2016. V. 37. P. 302–309.
3. Naryzhny S.N. ..., Ronzhina N.L. et al. // J. Proteom. Bioinf. 2016. V. 9. Iss. 6. P. 158–165.

## Роль тонкой регуляции уровня экспрессии ACF1 – субъединицы ремоделирующего нуклеосомы фактора в оогенезе дрозофилы

А. Ю. Конев –

*Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*

*П. Б. Беккер, К. Бёнер, С. Венгадасалам, Д. Жаин, Н. Стеффен –*

*Биомедицинский центр и Центр интегративной протеомики в Мюнхене,*

*Мюнхенский университет им. Людвига-Максимилиана*

*П. Васкес-Пианзола, Б. Сутер – Институт клеточной биологии, Бернский университет*

*Д. В. Федоров – Медицинский колледж им. Альберта Эйнштейна*

*П. Томанчак – Институт молекулярной клеточной биологии и генетики Общества Макса Планка*

В клетках высших организмов ДНК функционирует в составе хроматина – нуклеопротеидного комплекса, состоящего из ДНК, гистонов и негистоновых белков. Преобразования хроматина происходят постоянно в течение клеточного цикла, в ходе таких процессов метаболизма ДНК, как, например, репликация, транскрипция, репарация или рекомбинация. АТФ-зависимые ремоделирующие белки модифицируют структуру хроматина, изменяя ДНК-гистоновые контакты, приводя к перемещению или удалению нуклеосом. АТФаза Imitation Switch (ISWI) является каталитической субъединицей хроматин-ремоделирующих факторов, которые индуцируют скольжение нуклеосом на ДНК и, таким образом, позволяют проводить структурные изменения хроматина, необходимые для использования генома и сохранения его целостности.

Среди шести ISWI-комплексов, в настоящее время известных у дрозофилы, NURF, NoRC и ToRC принимают важное участие в активации транскрипции. RSF, ACF и CHRAC, с другой стороны, используют активность ремоделирования нуклеосом, чтобы, как полагают, закрыть пробелы в нуклеосомных массивах во время сборки хроматина или после его разрушения и улучшить стабильность и упаковку хроматиновой фибриллы. Обеспечивающий доступность хроматина белковый комплекс CHRAC (Chromatin Accessibility Complex) состоит из АТФазы ISWI, большой субъединицы ACF1 и пары маленьких гистоноподобных белков – CHRAC-14 и CHRAC-16.

CHRAC является прототипным фактором скольжения нуклеосом, который мобилизует нуклеосомы, увеличивая регулярность расположения. Такая активность может способствовать формированию репрессивного хроматина. Физиологические роли CHRAC и ACF плохо изучены. Экспрессия большой субъединицы ACF1 ограничена временем эмбрионального развития, но остается высокой в примордиальных зародышевых клетках полового зачатка, предшественниках клеток полового пути взрослых особей.

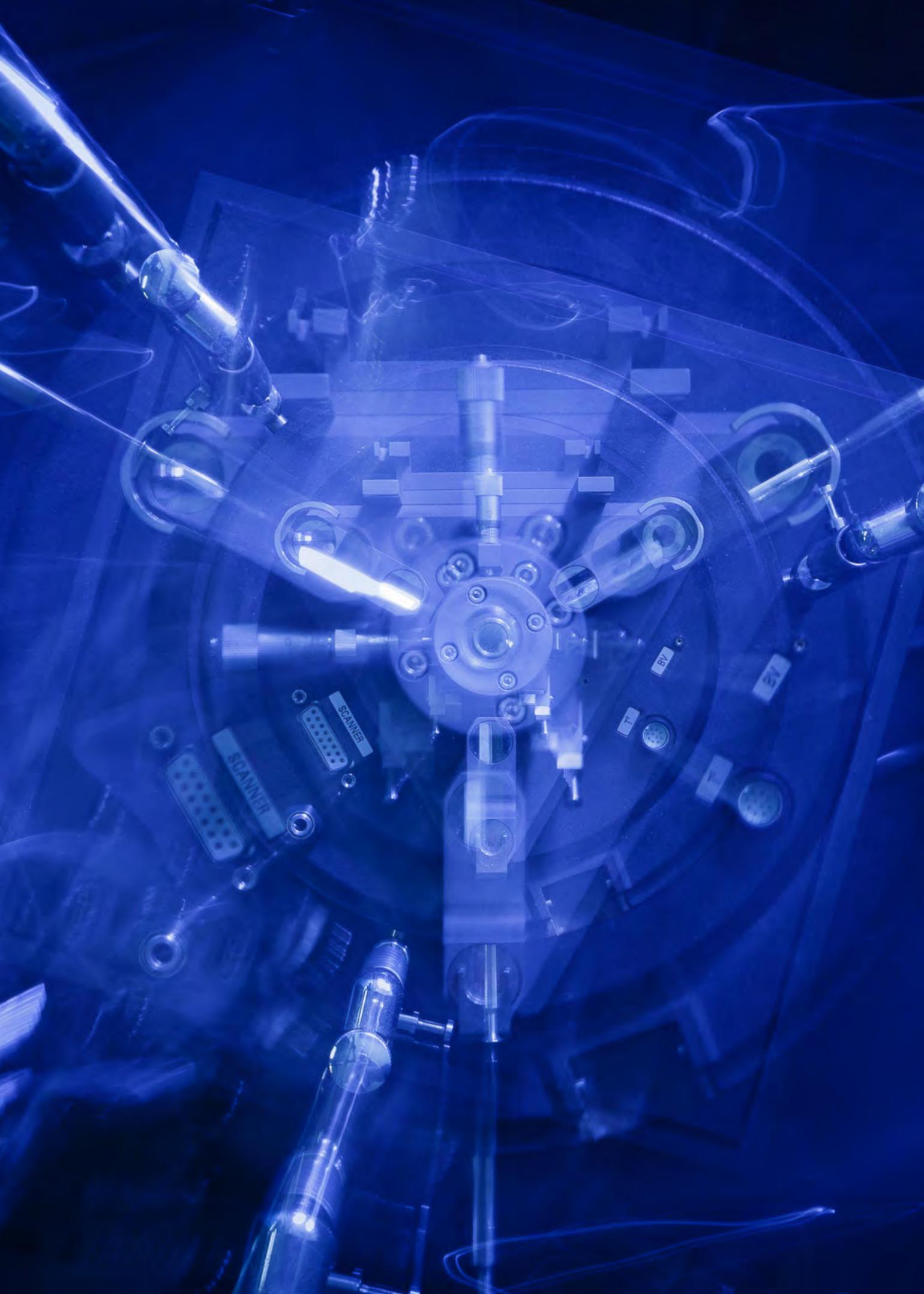
Оогенез дрозофилы особенно подходит для изучения зародышевых стволовых клеток (GSC) и обновления соматических стволовых клеток (SSC), исследования детерминации ооцитов, а также формирования и созревания яиц. Поэтому мы исследовали роль фактора ACF1 в оогенезе дрозофилы. В гермариуме овариол в своей нише находятся 2-3 GSC, которые делятся асимметрично, чтобы произвести еще одну стволовую клетку и дочерний цистобласт. Цистобласты проходят четыре митотических деления с неполным цитокинезом с образованием взаимосвязанной 16-клеточной цисты, в ходе созревания которой одна клетка становится ооцитом. Мы обнаружили, что комплекс ACF1 экспрессируется и в соматических, и в половых клетках, однако заметно обогащен в зародышевых стволовых клетках и ооцитах. Было показано, что асимметричная локализация ACF1 в этих клетках зависит от транспорта мРНК *Acf1* с помощью комплекса Bicaudal-D/Egalitarian. Нами выделен новый



Обложка для журнала *Developmental Biology*.  
Яйцевая камера у мутанта *Acf1*<sup>1</sup> с двумя ооцитами  
на противоположных полюсах

делеционный мутант гена *Acf1*<sup>7</sup> и показано, что именно он является истинным нуль-аллелем гена *Acf1*. Потеря функции ACF1 у мутанта *Acf1*<sup>7</sup> приводит к появлению дефектных яйцевых камер и их элиминации с помощью апоптоза. При изучении ранее охарактеризованной мутации *Acf1*<sup>1</sup> мы обнаружили различные необычные фенотипы организации 16-клеточной цисты с поразительным преобладанием яйцевых камер с двумя функциональными ооцитами на противоположных полюсах. К нашему удивлению, мы обнаружили, что у особей, несущих ранее считавшуюся нуль-мутацией гена делецию *Acf1*<sup>1</sup>, несмотря на нарушения рамки считывания гена *Acf1*, экспрессируется, хотя и на низком уровне, содержащий PHD-бромодомен C-терминальный фрагмент

белка ACF1, который накапливается в ооцитах. При отсутствии функционального ACF1 экспрессия такого PHD-бромодоменсодержащего фрагмента из геномного локуса *Acf1* приводит к появлению дефектов упаковки клеток в 16-клеточной цисте, вероятно, в результате конкурентного взаимодействия с неизвестными молекулами-мишенями. Примечательно, что увеличение экспрессии CHRAC (ACF1 и CHRAC-16) в два раза с помощью интеграции в геном дополнительных копий клонированных в фосмидах генов *Acf1* и *CHRAC-16* приводит к увеличению апоптоза и появлению дефектов упаковки клеток в 16-клеточной цисте. По-видимому, точная настройка уровней экспрессии субъединиц комплекса CHRAC необходима для правильного прохождения оогенеза.



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

- 106 Влияние низких доз излучения  $^{169}\text{Yb}$  на пролиферацию и гибель клеток человека в культуре
- 107 Уровень олигомерного альфа-синуклеина и активность глюкоцереброзидазы при болезни Паркинсона, ассоциированной с мутациями в гене *GBA*
- 109 Новый метод получения генераторного радионуклида  $^{82}\text{Sr}$  и других медицинских радионуклидов

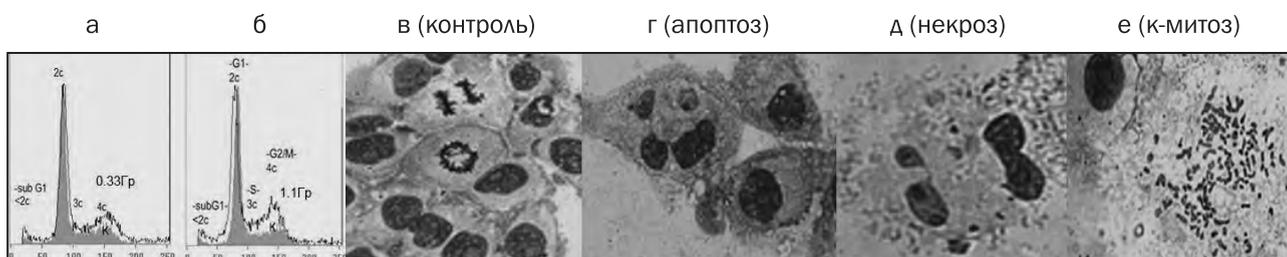
## Влияние низких доз излучения $^{169}\text{Yb}$ на пролиферацию и гибель клеток человека в культуре

Н. Я. Гильяно, Е. В. Журишкина, Л. В. Коневега, С. И. Степанов –  
Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ  
С. В. Акулиничев, В. И. Держиев, С. А. Чаушанский, И. А. Яковлев –  
Институт ядерных исследований РАН

$^{169}\text{Yb}$  представляет собой радионуклид с большим потенциалом использования в клинике брахитерапии опухолей. Источники  $^{169}\text{Yb}$ , изготовленные в Институте ядерных исследований РАН, представляют собой керамические сердечники из обогащенного иттербия в герметичном титановом корпусе.

Мы провели исследования эффективности летального и цитогенетического действия низкоинтенсивного  $\gamma$ -излучения (при дозах от 0,3 до 1,2 Гр) на клетках человека в культуре. Установлено, что облучение иттербием клеток дозами 0,33–1,2 Гр приводит к блокировке клеток в фазах G2/M клеточного цикла. Блокирование клеточной прогрессии зависит от дозы и становится необратимым, что приводит к гибели клеток. Даже через 96 ч (4-й генерационный цикл) после облучения регистрируются аккумуляция тетраплоидных клеток в фазах G2/M клеточного цикла и увеличение доли клеток с содержанием

ДНК меньше диплоидного (< 2с, или sub-G1-популяция), что указывает на апоптотическую гибель клеток, при этом почти втрое снижается концентрация клеток в облученном образце по сравнению с необлученным контролем (рис. а и б). Морфологический анализ состава клеточной популяции (рис. в–е) подтвердил апоптотическую гибель (рис. г) потомков облученных клеток и также показал, что при различных режимах облучения возможно включение и некротической гибели (рис. д).  $^{169}\text{Yb}$ -источники индуцировали увеличение уровня повреждений хромосом. Испытанные источники на основе изотопа  $^{169}\text{Yb}$  обладают выраженным антипролиферативным эффектом, реализующимся в индукции апоптотической гибели потомков облученных клеток. Полученные результаты могут представлять интерес для клинического применения брахитерапии с иттербиевыми источниками.



Цитометрический (а и б) и морфологический (в–е) анализ состава клеточной популяции до и после облучения клеток HeLa  $^{169}\text{Yb}$ -источниками в объеме с фреоном

1. Гильяно Н. Я., Коневега Л. В., Журишкина Е. В., Степанов С. И., Носкин Л. А. // Патогенез. 2015. Т. 13. № 4. С. 57–61.
2. Гильяно Н. Я., Журишкина Е. В., Коневега Л. В., Степанов С. И. и др. Эффективность гено- и цитотоксического действия  $\gamma$ -излучения иттербия-169 на клетки человека в культуре // Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Принято в печать.

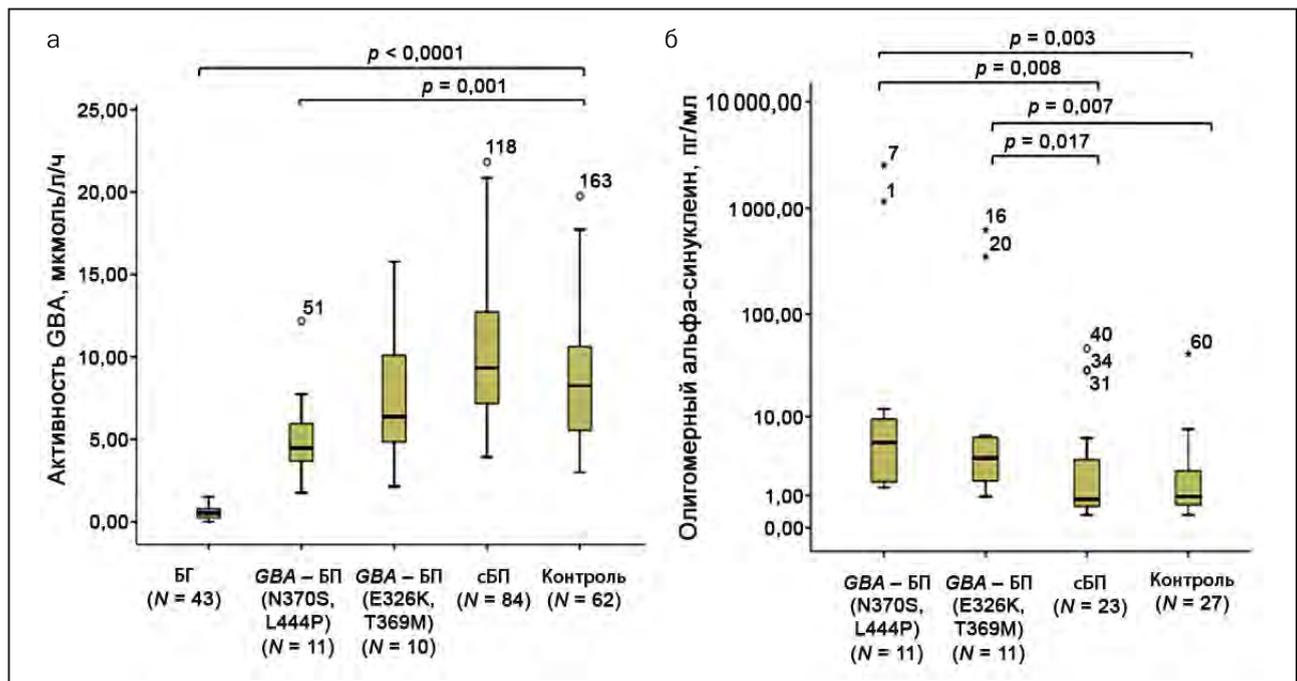
## Уровень олигомерного альфа-синуклеина и активность глюкоцереброзидазы при болезни Паркинсона, ассоциированной с мутациями в гене *GBA*

П. А. Андоскин, Л. А. Гараева, А. К. Емельянов, А. Э. Копытова, Д. Г. Кулабухова, А. О. Лавринова, М. А. Николаев, С. Н. Пчелина, К. А. Сенкевич, Т. С. Усенко – Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ Е. Ю. Захарова – Медико-генетический научный центр

В 2014–2015 гг. нами выполнена серия работ по оценке нейротоксичных форм альфа-синуклеина и активности лизосомного фермента глюкоцереброзидазы (*GBA*) у пациентов с гомозиготным носительством мутаций в гене *GBA* (пациенты с болезнью Гоше – БГ), показано накопление олигомерных форм альфа-синуклеина в плазме и обратная корреляция их уровня с активностью *GBA*. Известно, что мутации в гене *GBA* повышают риск развития болезни Паркинсона (БП) в 6-7 раз во всех популяциях, однако молекулярный механизм высокого риска БП у носителей мутаций *GBA* остается неизвестным. В гене *GBA* описаны также полиморфные вари-

анты, не приводящие к развитию БГ, но ассоциированные с двукратным увеличением риска БП. Мы предположили, что мутации в гене *GBA*, приводящие к дисфункции лизосом, могут способствовать накоплению и олигомеризации белка альфа-синуклеина, т. е. содействовать формированию именно тех форм белка, которые являются нейротоксичными и могут приводить к гибели нейронов при БП.

В исследование было включено 84 пациента со спорадической БП (сБП), 22 пациента с выявленными мутациями (L444P, N370S) ( $N = 11$ ) и полиморфными вариантами (E326K, T369M) ( $N = 11$ ) в гене *GBA* (*GBA* – БП), контрольная



Активность *GBA* у пациентов: с БГ, с мутациями N370S, L444P *GBA*, с полиморфными вариантами E326K, T369M *GBA*, сБП и в контроле (а); уровень олигомерного альфа-синуклеина в плазме крови пациентов: с мутациями N370S, L444P *GBA*, с полиморфными вариантами E326K, T369M *GBA*, сБП и в контроле (б). Данные для олигомерного альфа-синуклеина представлены в логарифмическом масштабе

**Таблица.** Активность глюкоцереброзидазы и уровень олигомерного альфа-синуклеина крови у носителей мутаций и полиморфных вариантов в гене *GBA*

Обследованные группы пациентов с БП	Активность GBA (медиана, минимум – максимум), мкмоль/л/ч	N	P (по сравнению с сБП)	Уровень олигомерного альфа-синуклеина минимум – максимум), пкг/мл	N	P (по сравнению с сБП)
Носители мутаций L444P, N370S	4,47 (1,76–12,78)	11	< 0,0001	5,3 (1,38–2 518,81)	11	0,008
Носители полиморфных вариантов E326K, T369M	6,38 (2,14–15,78)	10	0,05	3,50 (0,95–623,22)	11	0,017
Пациенты с отсутствием мутаций в гене <i>GBA</i> (сБП)	9,33 (3,91–21,83)	84	–	0,85 (0,32–47,12)	23	–

группа ( $N = 62$ ). При оценке активности GBA в качестве группы сравнения была включена группа пациентов с БГ ( $N = 43$ ). Уровень олигомерного альфа-синуклеина в плазме крови оценивали методом иммуноферментного анализа с использованием коммерческого набора Human Alpha-Synuclein PATНО ELISA kit (Analytik Jena, Германия). Активность GBA оценивали в сухих пятнах крови методом tandemной масс-спектрометрии LC-MS/MS.

Нами впервые показано снижение активности GBA у пациентов с *GBA* – БП по сравнению как с контролем ( $p = 0,001$ ), так и с сБП ( $p = 0,0001$ ) наряду с повышением олигомерных форм альфа-синуклеина в плазме ( $p = 0,002$  и  $p < 0,0001$

соответственно) (см. рис.). У носителей мутаций наблюдалось более выраженное снижение активности GBA и повышение олигомеров альфа-синуклеина, чем у носителей полиморфных вариантов (табл.). Полученные данные могут прояснять механизм высокого риска развития БП у носителей мутаций в гене *GBA*, а также высказать предположение, что для лечения *GBA*-ассоциированной БП могут быть использованы фармакологические шапероны GBA, и впервые подойти к лечению одной из форм паркинсонизма.

Исследование поддержано грантами РФФИ № 16-04-00764 и № 16-54-76009.

1. Nuzhnyi E., Emelyanov A., Boukina T., Usenko T., Yakimovskii A. ..., Pchelina S. // *Mov. Disord.* 2015. V. 30. Iss. 7. P. 989–991.
2. Pchelina S., Emelyanov A. ..., Andoskin P. ..., Nikolaev M. ..., Usenko T., Kulabukhova D., Lavrinova A., Kopytova A., Garaeva L. et al. // *Neurosci. Lett.* 2017. V. 636. P. 70–76.

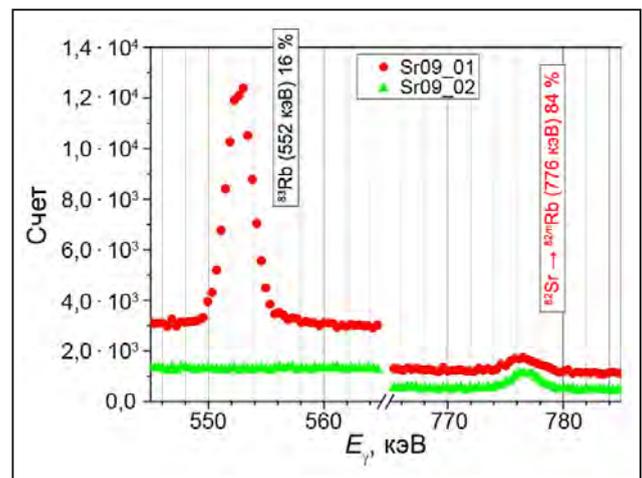
## Новый метод получения генераторного радионуклида $^{82}\text{Sr}$ и других медицинских радионуклидов

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

В НИЦ КИ – ПИЯФ произведен запуск нового циклотрона Ц-80 со следующими планируемыми параметрами: энергия выведенного протонного пучка 40–80 МэВ, интенсивность до 200 мкА. Данные параметры обеспечат широкие возможности получения медицинских радионуклидов и радиофармпрепаратов для диагностики и терапии. На пучке Ц-80 строится радиоизотопный комплекс РИЦ-80 (Радиоактивные Изотопы на Циклотроне Ц-80). По своим параметрам и возможностям РИЦ-80 будет соответствовать самым лучшим зарубежным аналогам. Особенностью проекта является использование масс-сепаратора «в линию» с мишенным устройством для получения источников радиоизотопов высокой чистоты, что особенно важно для медицинских приложений. Уникальные параметры комплекса РИЦ-80 позволят получать  $^{68}\text{Ge}$ ,  $^{82}\text{Sr}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{124}\text{I}$ ,  $^{223}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ , а также другие радионуклиды, считающиеся в настоящее время перспективными кандидатами для использования в диагностике и терапии. Среди них  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{67}\text{Cu}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{77}\text{Br}$  и  $^{81}\text{Rb}$ . При создании мишени для РИЦ-80 с целью получения  $^{82}\text{Sr}$ , широко применяемого в ПЭТ-диагностике, был разработан новый метод разделения облученного мишенного вещества в виде металлического рубидия или соли  $\text{RbCl}$  и образованных в нем в результате реакции на протонах радионуклидов стронция. Суть метода заключается в использовании различия в скорости испарения мишенного вещества и образованных в нем радионуклидов при нагревании мишенного вещества в вакууме. В случае разделения радионуклидов стронция

и мишенного вещества в виде металлического рубидия или соли  $\text{RbCl}$  оказалось, что при определенной температуре можно достаточно быстро испарить с минимальными потерями в балластный объем мишенное вещество, сохраняя при этом в нагреваемом объеме с эффективностью более 90 % радиоактивные атомы стронция. На рисунке представлены  $\gamma$ -спектры, демонстрирующие процесс разделения облученного мишенного материала  $\text{RbCl}$  и генераторного радионуклида  $^{82}\text{Sr}$ .

Данный метод может быть использован также для получения других радионуклидов. Обещающие результаты получены при выделении терапевтического радиоизотопа  $^{67}\text{Cu}$  из мишени в виде металлического цинка.



Часть  $\gamma$ -спектра капсулы с облученным мишенным веществом до и после нагрева в вакууме при температуре полного испарения мишенного вещества (900–1 000 °С) за время нагрева, равное 60 мин



## Физика ядерных реакторов и ускорителей

- 112 Выгорающий поглотитель для модернизированных тепловыделяющих сборок реактора ПИК
- 114 Измерение количества платины в катализаторах методом нейтронно-активационного анализа
- 115 Опыт эксплуатации тяжеловодного отражателя реактора ПИК в период с 2010 по 2016 год
- 117 Перечень исходных событий для расчетного анализа обоснования безопасности реактора ПИК
- 118 Обеспечение контроля загрузки топлива при энергетическом пуске реактора ПИК

## Выгорающий поглотитель для модернизированных тепловыделяющих сборок реактора ПИК

А. С. Захаров, К. А. Коноплев, И. М. Косолапов, С. Р. Фридман –  
Отдел физики и техники реакторов

А. С. Полтавский – Управление ядерной и радиационной безопасности

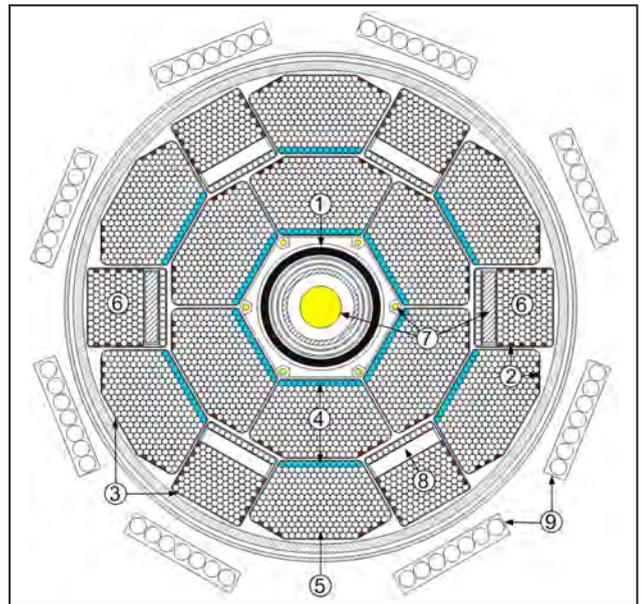
М. С. Онегин – Отделение теоретической физики

С. Л. Смольский – заместитель директора по эксплуатации ядерных установок  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В концепции эксплуатационного комплекта тепловыделяющих сборок (ТВС) ПИК-2 предусмотрено увеличение на 20 % топливной загрузки и установка стержней выгорающего поглотителя (СВП) с целью увеличения длительности кампании реактора. Твэлы унифицированы с твэлами реактора СМ и отличаются от них только высотой активного слоя топлива. Комплект ТВС состоит из 12 шестигранных и 6 квадратных ТВС, которые могут поставляться в стандартном исполнении или с полостью, в которой могут размещаться облучаемые образцы-свидетели или дополнительные блоки СВП (рис. 1).

Разработанные СВП в форме полуцилиндров предназначены для замены стальных вытеснителей. Эффективность СВП в этом варианте ограничена. В связи с увеличением содержания топлива не реализуются некоторые варианты топливных перегрузок.

Концепция ТВС ПИК-2 допускает размещение СВП вместо части твэлов. В 2016 г. авторами рассмотрены конструкционные и организационные решения для обеспечения наиболее выгодных вариантов перегрузок ТВС и облучаемых образцов-свидетелей. Вместо отдельных твэлов целесообразно устанавливать крестообразные СВП с пониженным эффектом вытеснения воды и очень небольшими непроизводительными потерями реактивности (рис. 2). В таком варианте увеличивается эффективность СВП и обеспечивается возможность снижения неравномерности энерговыделения в активной зоне. Размещение СВП любого профиля в полостях (или каналах) ТВС позволяет увеличивать их эффективность. Оптимизация водоуранивого отношения при этом позволяет умень-



**Рис. 1.** Схема активной зоны реактора ПИК с дополнительными полостями: 1 – поглощающие шторки из гафния; 2 – СВП  $Gd_2O_3 + ZrO_2$ ; 3 – циркониевые чехлы ТВС; 4 – твэлы с содержанием топлива (0,48 номинального); 5 – твэлы с номинальным содержанием топлива; 6 – ТВС с образцами-свидетелями; 7 – облучаемые образцы; 8 – дополнительные полости для облучаемых образцов или блоков СВП; 9 – поглощающие стержни в отражателе

шать число твэлов в активной зоне без заметной потери максимальной длительности кампании реактора.

Подтверждена возможность перевода реактора ПИК на ТВС ПИК-2, что увеличит максимальную длительность его кампании с 30 до  $\approx 38$  сут с учетом потерь реактивности на облучение образцов-свидетелей (рис. 3).

Целесообразно разработать модификацию шестигранной ТВС с дополнительными стержнями выгорающего поглотителя не только для уве-

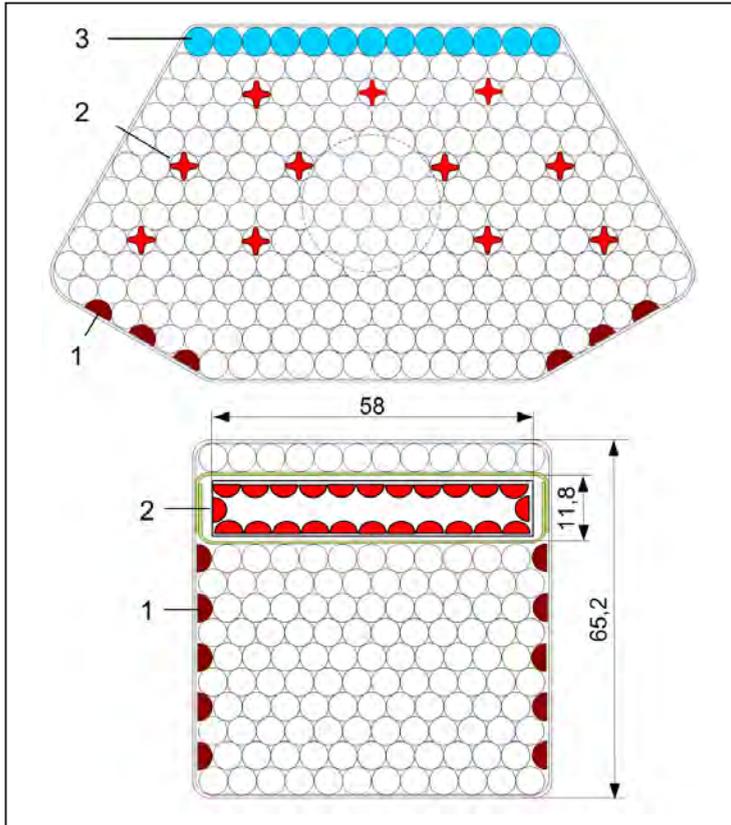


Рис. 2. Пример размещения СВП:  
1 – стандартные; 2 – дополнительные;  
3 – зона топливного профилирования

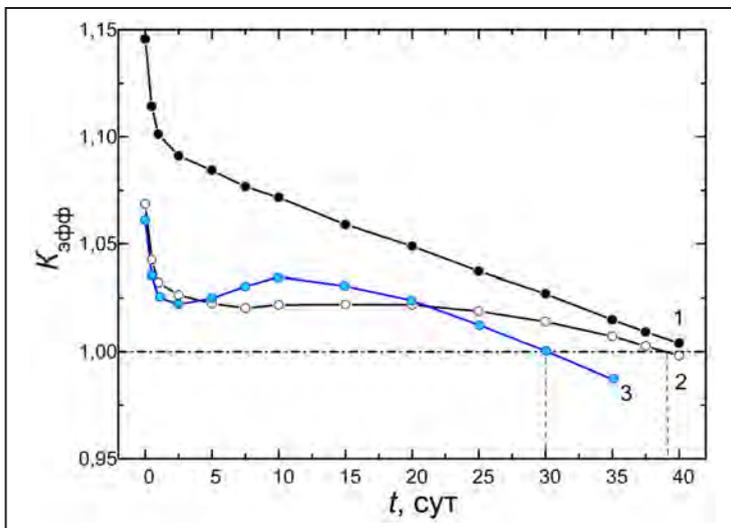


Рис. 3. Изменение  $K_{эфф}$  при выгорании активной зоны с комбинированной установкой 132 крестообразных и 140 стандартных полуцилиндрических СВП: 1 – твэл без Gd 8,57 г  $^{235}\text{U}$ ; 2 – твэл 8,57 г  $^{235}\text{U}$ , СВП 1,4 г Gd; 3 – твэл 7,14 г  $^{235}\text{U}$ , СВП 0,7 г Gd

личения длительности кампании, но и для выравнивания энерговыделения и обеспечения новых возможностей облучения материалов в активной зоне. Технология изготовления ТВС с новыми вариантами СВП не меняется. При производстве уменьшается число изготавливаемых твэлов.

Дальнейшее улучшение параметров реактора в перспективе связано с более современной топливной композицией. Новые варианты СВП пригодны для любых схем топливных перегрузок, включая однократную, и могут быть использованы при переходе к твэлам с малопоглощающей матрицей.

## Измерение количества платины в катализаторах методом нейтронно-активационного анализа

И. А. Алексеев, С. А. Панасенко, П. А. Сушков – Отдел физики и техники реакторов  
В. Г. Зиновьев – Отделение нейтронных исследований  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

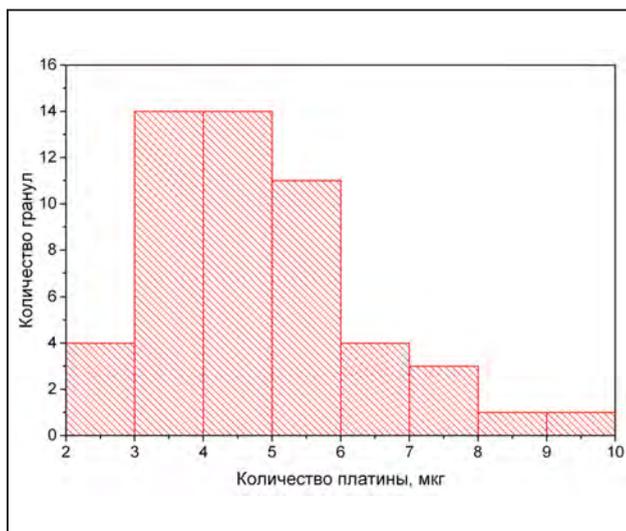
Для извлечения из тяжелой воды радиоактивного изотопа водорода – трития, образующегося в тяжеловодном отражателе реактора ПИК, по проекту предусмотрено использование метода изотопного обмена между водородом и водой при противотоке в колоннах с платиновым гидрофобным катализатором и насадкой и электролизером для обращения потоков фаз.

Для сравнения эффективности использования платины в катализаторах изотопного обмена применяется коэффициент массопередачи, отнесенный к количеству платины в катализаторе.

Разработана методика измерения количества платины в гранулах катализаторов, предполагаемых к использованию в установке извлечения трития из тяжелой воды реактора ПИК методом нейтронно-активационного анализа.

Измерения проводились посредством сравнения активности платины в исследуемом образце с активностью эталонного образца. Облучение нейтронами гранул катализатора проводилось в вертикальном канале В-4 реактора ВВР-М НИЦ КИ – ПИЯФ. Дополнительно было определено распределение гранул по размеру и яркости с помощью анализа фотографий гранул.

Измерения показали, что количество платины в катализаторах составляет  $1,11 \pm 0,02$  % масс. для катализатора РХТУ-СМ и  $1,33 \pm 0,02$  % масс. для катализатора РХТУ-ЗСМ (рис.), что отличается в большую сторону от указанного производителем. Было отмечено, что темный цвет гранулам придает платина: чем ее больше, тем темнее гранула. Установлено, что между количеством платины в грануле, ее объемом и яркостью существует линейная корреляция со сводным коэффициентом корреляции 0,89.



Распределение числа гранул катализатора по содержанию платины

Полученные результаты могут быть использованы для определения реального количества платины в катализаторах, сравнения эффективности использования ее в катализаторах РХТУ с эффективностью зарубежных аналогов, а также для проверки полноты извлечения платины из носителя при необходимости извлечения вещества с одного носителя и нанесения на другой. Разработанная методика позволит определять количество платины не только в катализаторах на органическом носителе, но и на других, наиболее распространенных носителях, т. к. атомы химических элементов природного изотопного состава, входящих в состав этих носителей (алюминий, кислород, кремний и фтор для водоотталкивающей обработки) не становятся радиоактивными при облучении нейтронами.

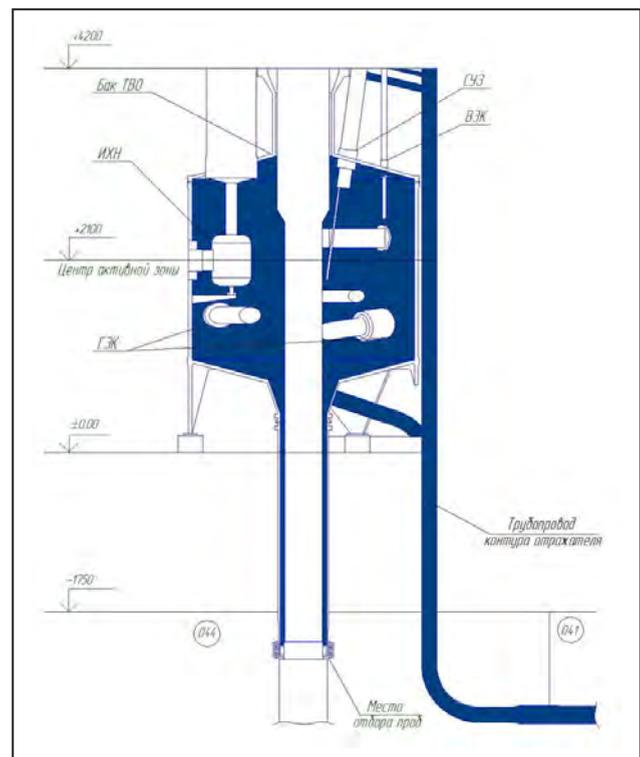
## Опыт эксплуатации тяжеловодного отражателя реактора ПИК в период с 2010 по 2016 год

С. Д. Бондаренко, А. С. Захаров, К. А. Коноплев – Отдел физики и техники реакторов  
Т. В. Воронина, В. Н. Тищенко, Д. Ю. Тугушева – Управление ядерной и радиационной безопасности  
В. П. Мащетов, Г. И. Переверза – Управление ввода в эксплуатацию РК ПИК  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

28 февраля 2011 г. был осуществлен физический пуск реактора ПИК мощностью 100 Вт. Необходимым условием получения нейтронного потока было заполнение бака тяжеловодного отражателя (ТВО) высококонцентрированной тяжелой водой с содержанием дейтерия  $a_D$  не ниже чем 99,80 %. Поэтому с 12 по 25 мая 2010 г. были выполнены работы по заполнению бака ТВО тяжелой водой.

По проекту заполнение бака отражателя выполняется посредством системы заполнения контура ТВО. Но при проведении физического пуска бак был отсечен от контура ТВО заглушками. Поэтому заполнение бака выполняли не по штатной, а по временной схеме при помощи нескольких переливных устройств для транспортных бидонов, исключающих контакт тяжелой воды с воздухом. Заливка тяжелой воды осуществлялась непосредственно в бак ТВО. Эта схема заливки тяжелой воды оказалась очень удачной по двум причинам: 1) работа по заполнению бака была выполнена оперативно – за три рабочих дня, что существенно быстрее, чем по штатной схеме; при этом было задействовано минимальное количество персонала; 2) вероятность разбавления тяжелой воды при такой схеме заполнения бака была минимальной, т. к. тяжелая вода из бидона попадала прямо в бак ТВО, минуя рабочие баки и многометровые трубопроводы системы заполнения. В результате изотопный и химический состав тяжелой воды в баке ТВО соответствовал проектным нормам. Поэтому главная задача – сохранить высокое содержание дейтерия в тяжелой воде при заполнении бака – была выполнена.

С момента заливки тяжелой водой (2010 г.) до момента слива (2016 г.) бак ТВО (рис.) нахо-



Вертикальный разрез реактора ПИК. На схеме цветом выделено оборудование, заполненное тяжелой водой в период с 2010 по 2016 г.

дился в эксплуатации, которая включала в себя периодический контроль качества тяжелой воды в баке и выполнение технологических сливов тяжелой воды из бака.

В этот период времени оборудование и трубопроводы бака ТВО находились под атмосферой газообразного азота с давлением, близким к атмосферному, при температуре  $20 \pm 5$  °С; циркуляции тяжелой воды не было, система очистки тяжелой воды не была введена в действие. Фактически это было хранение тяжелой воды в баке с периодическим контролем

качества и технологическими сливами. Так как весь период эксплуатации содержание дейтерия в тяжелой воде бака ТВО оставалось неизменным ( $99,856 \pm 0,005$  %), а объемная активность трития снижалась в соответствии с периодом полураспада, то можно утверждать, что бак ТВО был герметичен – качество азота, использованного для поддержания давления в баке ТВО, было высоким. Однако химическое качество тяжелой воды за 2010–2016 гг. заметно ухудшилось: практически все показатели выросли в несколько раз, содержание продуктов коррозии в 2016 г. превысило установленные регламентом нормы. Источниками загрязнения тяжелой воды бака ТВО были: 1) процессы коррозии; 2) недостаточная отмывка бака ТВО перед заполнением. Поэтому ввод в эксплуатацию системы очистки тяжеловодного теплоносителя на этапе подготовки к энергетическому пуску реактора ПИК – это обязательное условие.

В период с 15 марта по 28 апреля 2016 г. были выполнены работы по сливу тяжелой воды из бака ТВО реактора ПИК, которая поставлена на учет в ЗБМ PNR4.

Безвозвратные потери тяжелой воды за все время эксплуатации бака ТВО, включая заполнение бака, контроль качества тяжелой воды, технологические сливы, полный слив тяжелой воды из бака ТВО и сушку бака, не превысили установленных норм и составили 0,46 % от общего количества.

Однако во время слива тяжелой воды из бака ТВО было установлено снижение концентрации тяжелой воды с 99,86 до 99,58 %. Причиной такого разбавления, скорее всего, стал слив воды с высоким содержанием протия и примесей из предполагаемых застойных зон бака ТВО: 1) линий контроля уплотнений и продувки зазоров в отражателе; 2) полостей системы управления и защиты; 3) зазоров между горизонтальными каналами и баком отражателя. Разбавление тяжелой воды показало, что необходимо совершенствовать процедуру подготовки (сушки) бака ТВО. Слитая из отражателя тяжелая вода требует изотопной и химической очистки для последующего использования.

Авторы благодарны персоналу РК ПИК, который участвовал в проведении работ.

1. Воронина Т. В., Переверза Г. И. Опыт эксплуатации бака тяжеловодного отражателя реактора ПИК в период с 2010 по 2016 г. Техн. отчет, инв. № 16ЯУ-11 УЯРБ. Гатчина, 2016. 63 с.
2. Бондаренко С. Д., Воронина Т. В., Захаров А. С., Коноплев К. А., Переверза Г. И., Тищенко В. Н., Тугушева Д. Ю. Опыт эксплуатации тяжеловодного отражателя реактора ПИК в период с 2010 по 2016 г. // Мат. VIII научн.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития химического и радиохимического контроля в атомной энергетике» (Атомэнергоаналитика-2017). 2017. Готовится к печати.

## Перечень исходных событий для расчетного анализа обоснования безопасности реактора ПИК

*А. С. Захаров, С. Р. Фридман – Отдел физики и техники реакторов  
А. В. Коротынский, А. С. Полтавский – Управление ядерной и радиационной безопасности  
С. Л. Смольский – заместитель директора по эксплуатации ядерных установок  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*

В рамках подготовки реактора ПИК к энергетическому пуску и вводу в эксплуатацию специалисты созданной кооперации НИЦ «Курчатовский институт», НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, АО «НИКИЭТ», АО «Атомтехэнерго» и АО «Альянс-Гамма» разработали базовые документы для анализа безопасности: «Ведомость разделения работ при подготовке ООБ ИЯУ ПИК» и «Перечень исходных событий для расчетного анализа возможных аварий на ИЯУ ПИК».

Разработанный перечень устанавливает объем и общие требования к проведению анализа возможных проектных и запроектных аварий в соответствии с требованиями НП-049-03 при подготовке соответствующих разделов «Отчета по обоснованию безопасности реактора ПИК».

Перечень устанавливает соответствие рассматриваемых исходных событий в ООБ требованиям НП-049-03, а также другим федеральным нормам и правилам в области использования атомной энергии – НП-061-05, НП-033-11, НП-009-04, регламентирующим обоснование безопасности реакторного комплекса ПИК (РК ПИК).

В перечень вошли разделы, охватывающие все исходные события, которые потенциально могут привести к нарушению нормальных условий эксплуатации реактора:

- исходные события, приводящие к введению избыточной реактивности;
- исходные события, приводящие к нарушению теплоотвода реактора;

- изменение давления в первом контуре реактора;
- ухудшение отвода тепла вторым контуром реактора (промежуточным контуром и контуром обратного водоснабжения);
- нарушение при работе с ядерным топливом;
- исходные события проектных аварий для хранилищ ядерного топлива;
- природные явления и события техногенного происхождения;
- исходные события для расчетного анализа запроектных аварий.

Разработанный перечень учитывает конструкционные особенности, нейтронно-физические и технические характеристики реактора ПИК. Всего рассмотрено 85 исходных событий, часть которых по результатам предварительных расчетов требует уточнения сценариев аварийных ситуаций, дополнительных организационных и технических решений для уменьшения радиационных последствий: разгерметизации отводящих трубопроводов максимального диаметра, введения положительной реактивности, потери внешнего электроснабжения площадки с наложением дополнительных отказов.

Перечень будет использоваться в качестве основы расчетного анализа для конструкторского сопровождения первоочередных работ в обеспечение ввода в эксплуатацию РК ПИК, обоснования безопасности при энергетическом пуске и вводе в эксплуатацию с поэтапным увеличением его экспериментальных возможностей.

## Обеспечение контроля загрузки топлива при энергетическом пуске реактора ПИК

А. С. Захаров, В. П. Стулов, С. Р. Фридман – Отдел физики и техники реакторов  
А. А. Ланкович, Г. Т. Потапенко – Управление ввода в эксплуатацию РК ПИК  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

С целью подготовки к энергетическому пуску реактора ПИК совместно с главным конструктором АО «НИКИЭТ» проведен анализ показаний детекторов штатной системы управления и защиты измерительных каналов реактора ПИК (АСУЗ-03Р) и комплекта дополнительной аппаратуры счетно-пусковых установок при физическом пуске в 2011 г. Проанализированы эксперименты с испытаниями измерительного канала АСУЗ-03Р на критическом стенде (рис. 1), разработаны предложения, приводящие к более надежной регистрации изменения состояния активной зоны на первых этапах ее набора.

Для нейтронно-физических расчетов использовался прецизионный код MCU-KS с библиотекой MDBKS50, являющийся развитием программ MCU-RFFI/A и MCU-REA. Для моделирования взаимодействия нейтронов с веществом в области термализации нейтронов в физическом модуле программы использовался подмодуль ФИМТОЭН. В расчетную модель реактора включены моделируемые каналы системы управления и защиты (СУЗ) (рис. 2, 3).

Расчетное моделирование физического пуска в 2011 г. показало, что удовлетворительный уровень регистрации сигнала штатными блоками детектирования с превышением паспортной чувствительности достигается при загрузке семи тепловыделяющих сборок (ТВС), что соответствовало фактическим результатам. На первом этапе дополнительная пусковая аппаратура используется не только для набора активной зоны, но и для архивирования, обработки полученных от детекторов сигналов и вычисления нейтронно-физических характеристик при минимально возможной мощности. Рассмотрены различные варианты компоновок загружаемых ТВС, детекторов и внешнего источника.

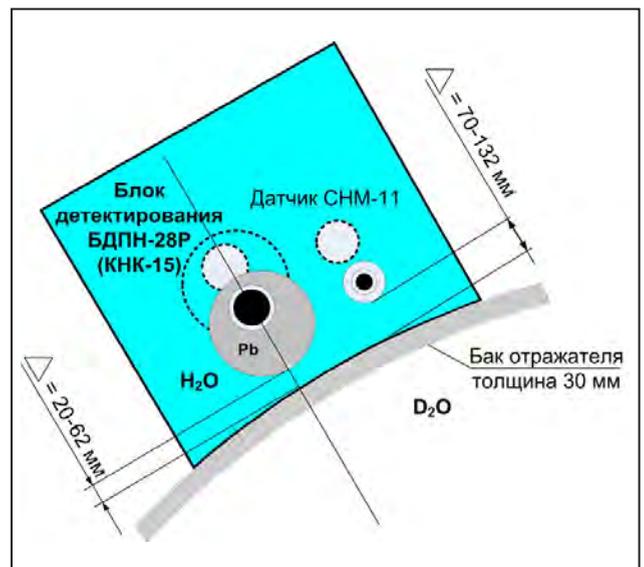


Рис. 1. Расположение блоков детектирования с регулируемым водным зазором в макете железобетонной защиты на критстенде

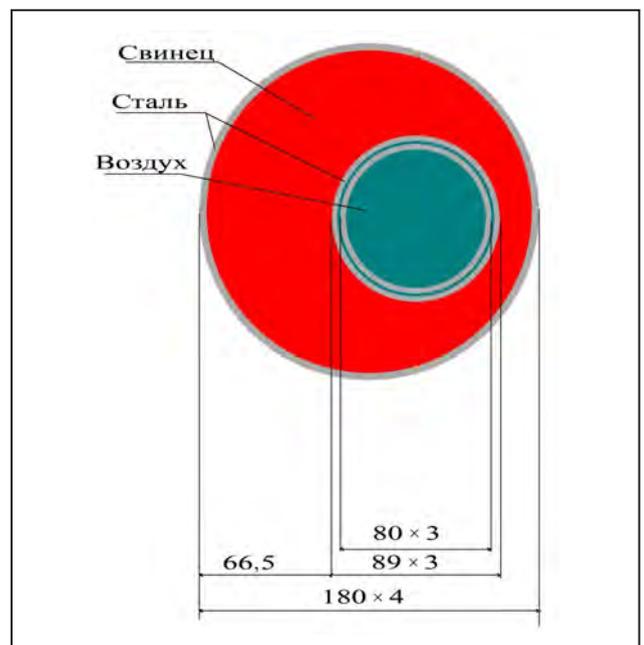
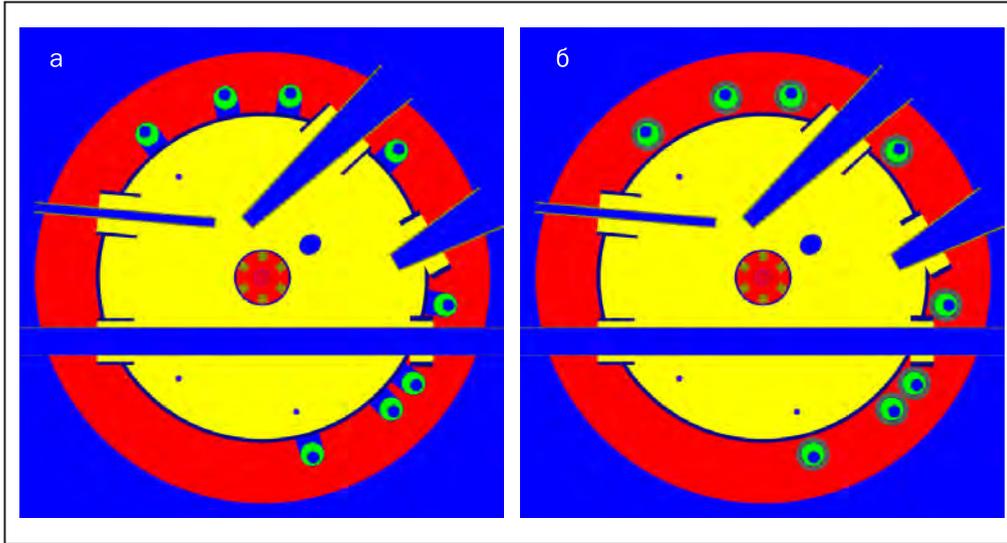


Рис. 2. Канал СУЗ в расчетной модели реактора



**Рис. 3.** Расположение блоков детектирования в каналах СУЗ с вытеснителями в расчетной модели реактора: вытеснитель сложной формы (а); кольцевой вытеснитель (б)

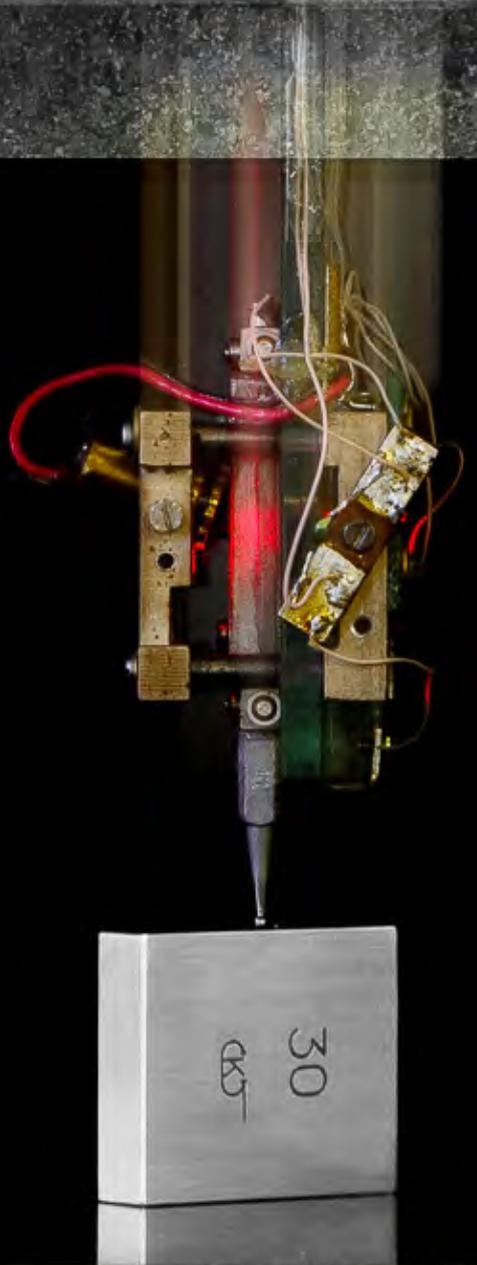
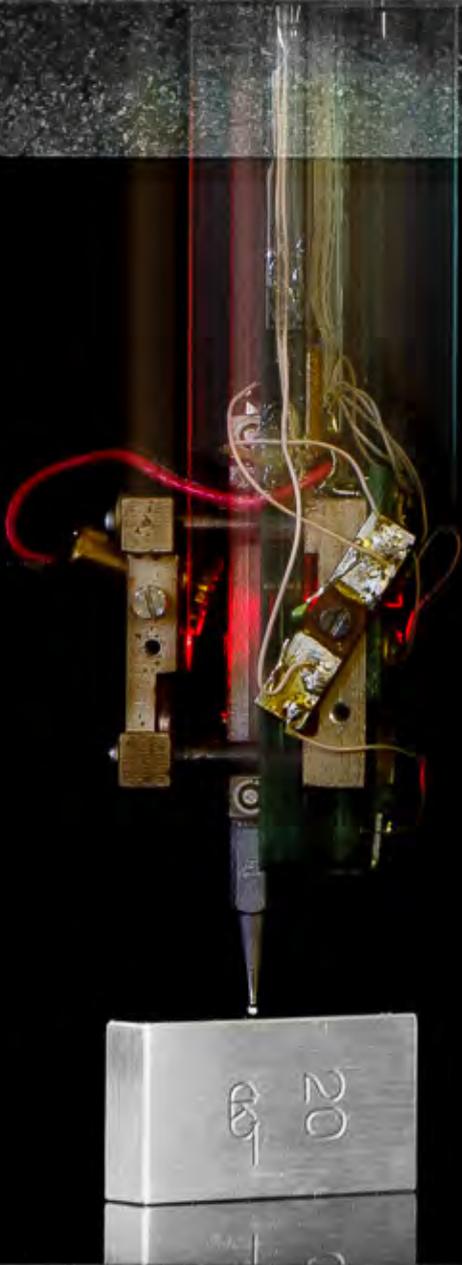
**Таблица.** Изменение скорости счета штатных блоков детектирования на первых этапах набора активной зоны

Вариант	Эффект
Замена плутоний-бериллиевый источника нейтронов интенсивностью $4,5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ на калифорниевый интенсивностью $1,0 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$	× 10,0
Вытеснение воды из активной зоны алюминиевыми вытеснителями	× 2,2
Перемещение каналов с детекторами ближе к баку ТВО (зазор 10 мм)	× 3,9
Полное вытеснение воды между баком ТВО и свинцовой защитой детектора	× 10
Установка кольцевого алюминиевого (сплав АД1) вытеснителя толщиной 35 мм вокруг свинцовой защиты детекторов	× 3,6
Замена стальных оболочек свинцовой защиты и детектора на циркониевые/алюминиевые	× 3,6/3,4
Размещение детекторов в баке ТВО	> 100
Использование более чувствительных детекторов	5–10

Физический анализ распространения нейтронов от источника к детектору показывает, что существенными этапами являются четыре стадии: 1) распространение нейтронов в активной зоне; 2) прохождение нейтронами тяжеловодного отражателя (ТВО); 3) прохождение нейтронами корпуса ТВО и зазора между его корпусом и свинцовой защитой; 4) распространение в свинцовой защите и оболочках канала СУЗ. В таблице представлены концептуальные меры по увеличению скорости счета в штатных блоках детектирования на первых этапах набора активной зоны. Требуемый эффект может быть достигнут одновременной реализацией нескольких мер.

Наиболее простой способ улучшения статистики счета детекторов – временная установка резервных штатных блоков детектирования на основе ионизационных камер КНК-15 в наклонные экспериментальные каналы отражателя. После энергетического пуска эти каналы должны быть освобождены и переданы потребителям.

Полученные результаты необходимы для разработки аппаратуры системы контроля перегрузок, детекторы которой отличаются от аппаратуры первого пуска устойчивостью к воздействию  $\gamma$ -излучения от облученных ТВС и должны располагаться за отражателем.



## Прикладные исследования и разработки

- 122 Изучение условий проведения научных исследований в ледниковой скважине озера Восток в Антарктиде
- 124 Двухсекционные ионизационные камеры для мониторинга пучков протонов с переменной энергией
- 125 Трёхкоординатная наноизмерительная машина «3D НАНО КИМ»
- 127 Универсальный протонный и нейтронный центр радиационных испытаний электроники, используемой для нужд авиации, космоса и других приложений, на синхроциклотроне СЦ-1000 НИЦ КИ – ПИЯФ

## Изучение условий проведения научных исследований в ледниковой скважине озера Восток в Антарктиде

*В. Ф. Ежов, А. А. Захаров – Отделение перспективных разработок  
С. А. Булат – Отделение молекулярной и радиационной биофизики  
В. А. Соловей, Ю. О. Четвериков – Отделение нейтронных исследований  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*

Первое вскрытие подледникового озера Восток в Антарктиде состоялось 5 февраля 2012 г., однако исследования водного бассейна озера до настоящего времени так и не начались. При бурении ледяного покрова озера используется буровая жидкость, состоящая из авиационного керосина ТС-1 и фреона R-141b. Температура стенок скважины постепенно повышается от  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  на поверхности до температуры замерзания воды  $-2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  на глубине 3 769 м. Фреон, оставаясь жидким при низких температурах, служит утяжелителем буровой жидкости для создания гидростатического давления в забое скважины, значение которого немного меньше значения давления в озере. При вскрытии буровым снарядом границы «лед – вода» озерная вода поднимается по скважине вверх в результате разницы давления внутри озера и гидростатического давления столба буровой жидкости.

При повторном бурении замерзшей воды в скважине в ней была обнаружена белая пробка. Буровым снарядом было извлечено 10,5 м керна белого цвета, содержащего клатратные гидраты фреона R-141b. Клатратные гидраты образуются в результате контакта воды с буровой жидкостью, содержащей фреон R-141b. Клатратная пробка в скважине препятствует погружению в озеро

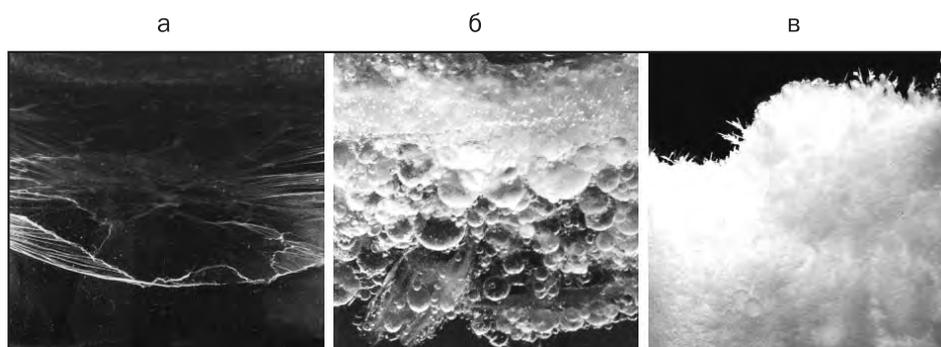
научных приборов и может вызвать загрязнение воды.

В НИЦ КИ – ПИЯФ была проведена серия экспериментов с целью изучения процесса образования клатратных гидратов R-141b, в результате были получены три типа макроструктуры клатратов (рис. 1).

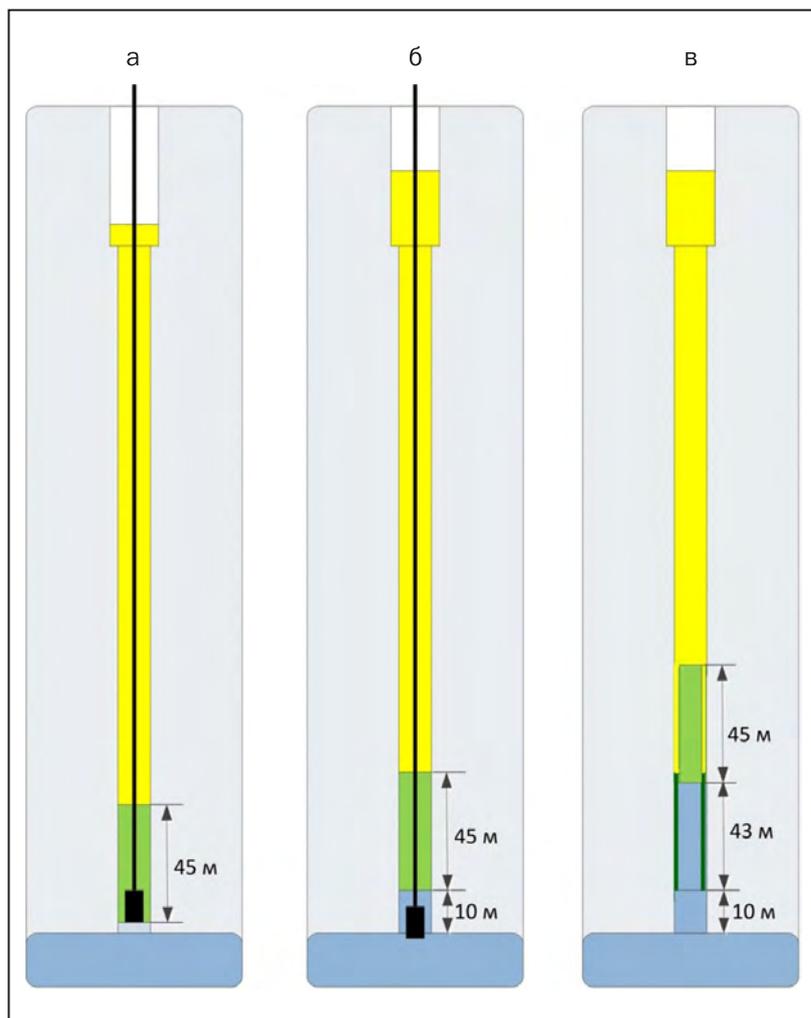
Для предотвращения контакта буровой жидкости с водой в скважине при следующем вскрытии озера в качестве барьера будет использоваться гидрофобная силиконовая (полиметилсилоксановая) жидкость. Уровни жидкостей в скважине показаны на рис. 2. Загрузка экологически инертной силиконовой жидкости в забой скважины производится непосредственно перед бурением последнего метра льда, остающегося до озера (рис. 2а). Высота столба силиконовой жидкости, которая располагается под буровой жидкостью, должна быть не менее 45 м.

Компенсация давления в озере производится весом столба жидкостей таким образом, чтобы высота подъема воды в скважине при вскрытии озера составила примерно 10 м. Положение уровней разных жидкостей в скважине после вскрытия озера показано на рис. 2б.

При извлечении несущего кабеля с буровым снарядом происходит подъем уровня воды



**Рис. 1.** Макроструктуры клатратных гидратов: пленочная структура на границе раздела жидкостей (а); структура в объеме воды после перемешивания границы раздела жидкостей (б); рыхлая структура в объеме с фреоном (в)



**Рис. 2.** Уровни жидкостей в скважине: состояние перед вскрытием озера (высота столба силиконовой жидкости 45 м) (а); положение уровней после вскрытия озера и подъема воды на 10 м (б); положение уровней после извлечения оборудования из скважины и подъема уровня воды в ней еще на 43 м (в)

в скважине на 43 м (рис. 2в). Общий уровень воды в скважине достигает 53 м. При этом поднимающаяся вода оmyивает стенки скважины, где находилась силиконовая жидкость, а не буровая. В свою очередь столб силиконовой жидкости при подъеме на 43 м оmyивает поверхность, где находилась буровая жидкость. Буровая жидкость, оставшаяся на стенках скважины, растворяется в силиконовой жидкости.

Проведенные эксперименты показали, что при контакте буровой жидкости с водой образование и разрастание клатратных гидратов не наблюдается, если в буровой жидкости содержится более 20 % силиконовой жидкости.

На первом этапе научных исследований будет изучаться вода, которая поднялась в сква-

жину из озера. После извлечения несущего кабеля с буровым снаряжением последовательно погружаются и извлекаются из нее научные модули. Изменение уровня жидкостей в скважине при этих погружениях показано на рис. 2б, в.

Проведенные в НИЦ КИ – ПИЯФ эксперименты позволили изучить протекание процессов образования клатратных гидратов фреона R-141b и обосновать необходимость использования гидрофобной силиконовой жидкости, которая позволит избежать образования клатратной пробки в скважине и обеспечит экологически чистую доставку научного оборудования в озерную воду.

## Двухсекционные ионизационные камеры для мониторинга пучков протонов с переменной энергией

Д. А. Амерканов, Г. И. Горкин, Е. М. Иванов, Н. А. Иванов,  
Е. А. Котиков, Ж. С. Лебедева, О. В. Лобанов, В. В. Пашук  
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В исследованиях радиационной стойкости изделий электронной техники на синхроциклотроне НИЦ КИ – ПИЯФ с энергией протонов 64–1 000 МэВ использован программно управляемый абсолютный монитор протонов на основе двухсекционной ионизационной камеры (ДИК) с воздушным наполнением при нормальном давлении, работающий в режиме реального времени. Были спроектированы и изготовлены ДИК различных модификаций с отверстиями в апертурных электродах 10 и 20 см. Они помещены в экранный корпус, выполненный из дюралюминия. Сигнальные и высоковольтные электроды камер изготовлены из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм и распаяны по разработанной в Лаборатории радиационной физики технологии на панелях, выполненных из односторонней фольгированной фторопластовой пластины толщиной 1,5 мм. Межэлектродные расстояния были выбраны равными 2,1 (ИК<sub>1</sub>) и 4,2 см (ИК<sub>2</sub>). Апертурные электроды выполнены из дюралюминия толщиной 0,2 мм.

Был оценен «фоновый» вклад в ионизацию чувствительной области ИК, сформированной апертурным электродом, от  $\delta$ -электронов, вылетающих из электродов, облучаемых протонами. Коэффициенты, определяющие вклад в общую ионизацию камер для трех модификаций ДИК (6, 10 и 20 см), рассчитывались с помощью программного комплекса Geant4. Максимальный вклад составил 6 % при энергии 60 МэВ и минимальный вклад 4 % при энергии 1 000 МэВ.

Тестирование камер с апертурными электродами 10 и 20 см проводилось на пучке протонов с энергией 1 000 МэВ. Пучок протонов формировался коллиматором с диаметром 20 мм. Контроль постоянства потока протонов осуществлялся большой ИК, расположенной в главном зале ускорителя. Исследования показали, что отклик камер на воздействие протонов с одним и тем же потоком практически одинаков как в центральных, так и в периферийных областях камер (разброс не более 5 %).

Экспериментально был проверен алгоритм вычисления числа протонов, приходящихся на любую заданную область поперечного сечения пучка, при использовании «фотографии» пучка протонов разной энергии. С этой целью фотоизображение было обработано с помощью стандартных программ (MathCad, Origin и др.) для нахождения распределения почернения, а следовательно, распределения плотности потока протонов.

Одновременно с монитором на основе ДИК потоки протонов измерялись методом наведенной активности с использованием углеродной и полиэтиленовой фольг диаметром 3 см. Путем фотометрирования изображений пучков были вычислены потоки протонов в пределах тех же 3 см. Результаты измерений с учетом погрешности практически совпадают в диапазоне энергии протонов 64–1 000 МэВ.

## Трехкоординатная наноизмерительная машина «3D НАНО КИМ»

*Е. А. Вилков, В. В. Добырн, О. Г. Ермоленко, Л. А. Константинов, В. Е. Кормин, Ю. М. Лавров, Р. П. Синельщикова, В. Г. Толчин, Б. Г. Турухано, Н. Турухано, С. Н. Ханов, Н. А. Щипунова*  
 Отделение перспективных разработок НИЦ КИ – ПИЯФ

Трехкоординатная наноизмерительная машина (3D НАНО КИМ) содержит нанопреобразователи (датчики) линейных перемещений с высокоточным измерительным элементом в виде метрологической голографической дифракционной решетки (МГДР), которые предназначены для прецизионных измерений линейных перемещений и определения в реальном масштабе времени геометрии сложных изделий, обработки и сохранения результатов измерения при работе с автоматизированными системами (рис. 1).

Исследование объемной точности машины (получено  $\pm 1,6$  мкм) демонстрируется на рис. 2. На рис. 3 приведена картина обмера тороидального зеркала на 3D НАНО КИМ. Вначале обмерялись четыре угла, затем включался автомат, и картина выводилась на печать.

Для осуществления синхронного движения двух кареток с точностью до нескольких десятков нанометров по координате  $Y$  будет наблюдаться гистерезисное запаздывание правой части моста относительно левой его части. С целью корректировки этого явления по координате  $Y$

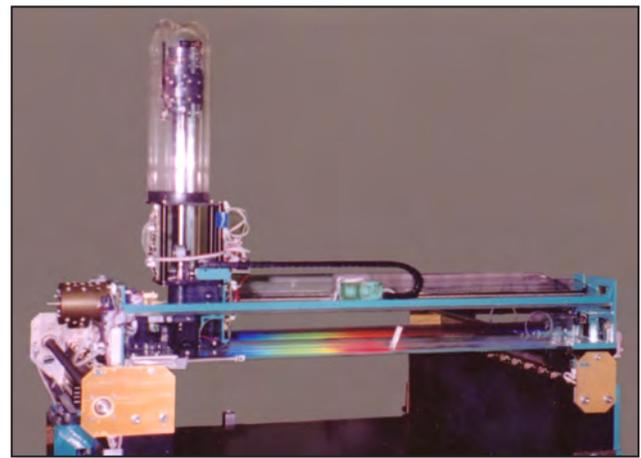


Рис. 1. 3D НАНО КИМ

устанавливается, помимо датчика  $Y_1$ , второй датчик –  $Y_2$  со своей измерительной решеткой и головкой. Расчет окончательного значения координаты  $Y$  осуществляется программным способом и является функцией положения координаты  $X$  соответствующей оси вертикального голографического длиномера, измеряющего координату  $Z$ . Таким образом, значения  $Y_1$  и  $Y_2$

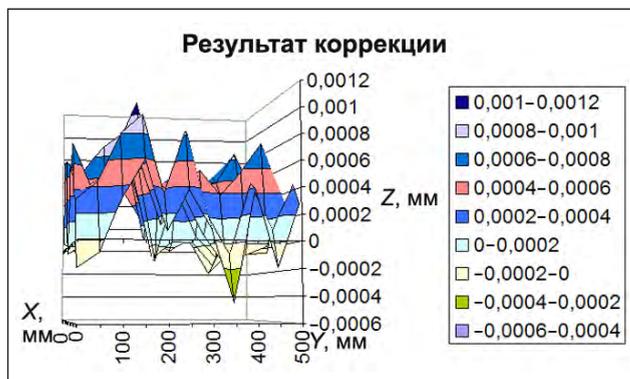


Рис. 2. Коррекции 3D НАНО КИМ

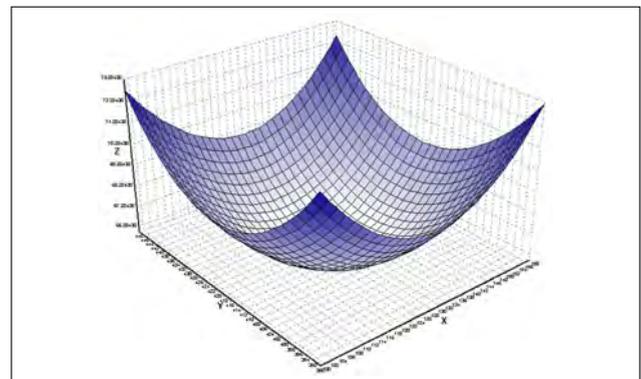


Рис. 3. Картина сканирования тороидального зеркала с помощью 3D НАНО КИМ

отсчитанных по измерительным решеткам датчиков  $Y_1$  и  $Y_2$  позволяют найти истинное значение координаты  $Y$ :

$$Y = 1/L [(L - X)Y_1 + XY_2],$$

где  $L$  – полная длина по координате  $X$ .

Введение четвертой координаты –  $Y_2$  переводит контрольно-измерительную машину в разряд «нано».

Вторая конструктивная особенность 3D НАНО КИМ связана с тем, что в длинноте с датчиком касания (ДК) совмещены принципы действия датчика линейных перемещений по  $Z$  и ДК (т. к. ДК выполнен также в виде датчика линейных перемещений на базе дифракционных решеток). Более того, у него одна и та же измерительная решетка МГДР<sub>Z</sub> и одна и та же направляющая для датчика по координате  $Z$  и ДК.

Основными особенностями 3D НАНО КИМ являются:

- использование четырех ультрапрецизионных наноизмерительных линейных голографических датчиков (НЛДГ);
- наличие внутренних автономных высокопрецизионных направляющих;
- использование легкого ажурного и жесткого стеклянного мостов, служащих для крепления из-

мерительной системы – координат  $X$  и  $Z$ . Большой вес диабазового моста, обычно используемого в 3D-КИМ различными фирмами в качестве точной направляющей по координате  $X$ , приводит к увеличению деформации, инерционности системы и, как следствие, к уменьшению точности измерительной машины;

- установка по координате  $Y$  одновременно двух датчиков –  $Y_1$  и  $Y_2$ .

Технические характеристики 3D НАНО КИМ приведены в таблице.

Таблица. Технические характеристики 3D НАНО КИМ

Обмеряемый объем, мм	550 × 550 × 200
Точность по объему, мкм	±1,6
Разрешение, нм	10
Интерфейс связи	CAN-USB
Температура окружающей среды, °C	20 ± 2

Таким образом, благодаря применению НЛДГ впервые создана координатно-измерительная машина с наноразрешением и рекордной точностью.

## Универсальный протонный и нейтронный центр радиационных испытаний электроники, используемой для нужд авиации, космоса и других приложений, на синхроциклотроне СЦ-1000 НИЦ КИ – ПИЯФ

Д. А. Амерканов, С. А. Артамонов, Е. М. Иванов, Ж. С. Лебедева, Г. Ф. Михеев, Г. А. Рябов – Отделение перспективных разработок

А. С. Воробьев, О. А. Щербаков – Отделение нейтронных исследований

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В. С. Анашин, Л. Р. Бакиров, А. Е. Козюков, П. А. Чубунов – Филиал ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «НИИ космического приборостроения»

Приводится краткое описание протонных (IS SC-1000 и IS OP-1000) и нейтронных (ИС НП / ГНЕЙС) испытательных стендов, разработанных в НИЦ КИ – ПИЯФ в сотрудничестве с филиалом ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «НИИ космического приборостроения» (Роскосмос). Уникальное сочетание протонных пучков с переменной энергией 60–1 000 МэВ и пучка нейтронов атмосфероподобного спектра с широким диапазоном энергий (1–1 000 МэВ) позволяют проводить комплексное тестирование полупроводниковых электронных устройств на СЦ-1000 в рамках одного цикла испытаний.

### Протонные испытательные стенды

В настоящее время два из существующих трех протонных пучков СЦ-1000 могут быть использованы для радиационных испытаний электроники. Испытательный стенд IS SC-1000 имеет фиксированную энергию протонов 1 000 МэВ и расположен на тракте транспортировки P2. На стенде IS OP-1000, расположенном на тракте транспортировки P3, энергия протонов может изменяться от 1 000 до 60 МэВ с помощью медного деградера (поглотителя) переменной толщины от 73 мм (при 900 МэВ) до 530 мм (при ~ 60 МэВ). Схема размещения

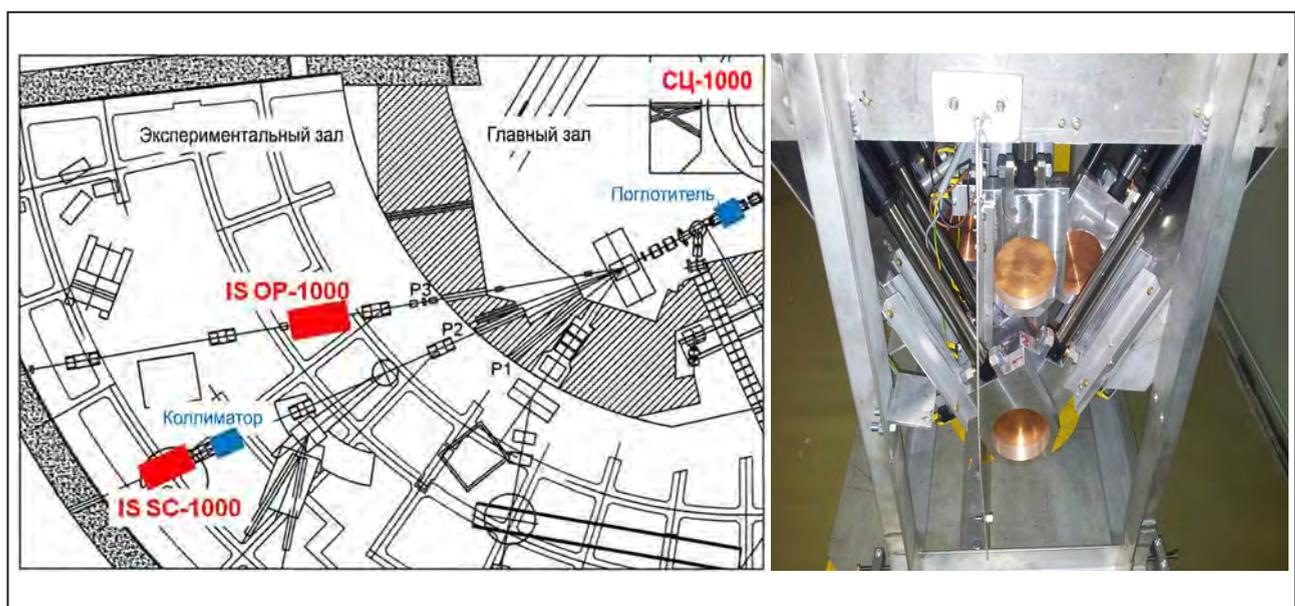


Рис. 1. Схема протонных пучков: P2 – протоны с энергией 1 000 МэВ; P3 – протоны с переменной энергией ~ 60–1 000 МэВ (слева). Устройство для дистанционного изменения длины поглотителя и энергии протона (справа)

Таблица. Параметры протонных испытательных стендов

Параметр	IS SC -1000	IS OP-1000
Условия облучения	Атмосфера	Атмосфера
Частица	Протоны	Протоны
Энергия, МэВ	1 000	60–1 000
Поток протонов, см <sup>-2</sup> · с <sup>-1</sup>	10 <sup>5</sup> –10 <sup>8</sup>	10 <sup>5</sup> –10 <sup>8</sup>
Диаметр пучка, мм	∅ ≥ 25	∅ ≥ 25
Однородность, %	≤ 10	≤ 10
Статус	В работе (1998)	В работе (2015)

в экспериментальном зале протонных трактов и рабочих станций облучения показана на рис. 1 слева. Справа показана фотография самого деградера, расположенного в главном зале СЦ-1000. Параметры обоих протонных испытательных стендов приведены в таблице.

Параметры протонного пучка на выходе из медного поглотителя переменной толщины были оценены на основе вычислений по коду Geant4. Экспериментальная диагностика параметров пучков выполняется с помощью набора стандартных инструментов: 1) тонкого сцинтилляционного экрана с ПЗС-матрицей для оперативного определения профиля пучка; 2) двухкоординатного полупроводникового профилометра; 3) двухсекционной ионизационной камеры (ДИК) для онлайн-мониторинга интенсивности потока протонов; 4) активационного метода с помощью алюминиевой фольги с последующим анализом НРГ-детектором с высоким разрешением для абсолютного измерения флюенса протонов.

### Нейтронный испытательный стенд

Испытательный стенд ИС НП / ГНЕЙС действует с 2010 г. на нейтронном времяпролетном спектрометре ГНЕЙС. Его основной особенностью является источник со спектром нейтронов, подобным спектру атмосферных нейтронов в диапазоне энергий 1–1 000 МэВ. В свинцовой мишени с водяным охлаждением, расположенной внутри вакуумной камеры уско-

рителя (рис. 2), генерируются короткие импульсы быстрых нейтронов длительностью 10 нс с частотой повторения 45–50 Гц и средней интенсивностью до  $3 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup>. Испытательный стенд ИС НП / ГНЕЙС расположен внутри здания ГНЕЙС на пучке нейтронов № 5, который имеет следующие параметры: диапазон энергий нейтронов 1–1 000 МэВ; поток нейтронов  $4 \cdot 10^5$  см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup> (на расстоянии 36 м); диаметр пучка 50–100 мм (на расстоянии 36 м); однородность профиля пучка ± 10 %.

Поток нейтронов  $4 \cdot 10^5$  см<sup>-2</sup> · с<sup>-1</sup> является интегралом по спектру нейтронов в диапазоне энергий 1–1 000 МэВ. Это соответствует максимальному значению 3 мкА внутреннего среднего тока пучка протонов СЦ-1000. Поток и форма спектра нейтронов измеряются с помощью FIC (нейтронный монитор) и TOF-техники. FIC представляет собой быструю плоскопараллельную ионизационную камеру, содержащую две мишени – <sup>235</sup>U и <sup>238</sup>U. Сечения нейтронного деления этих ядер являются рекомендуемыми стандартами в диапазоне энергий 1–200 МэВ. Профиль пучка нейтронов измеряется с помощью двухкоординатного позиционно-чувствительного многопроволочного пропорционального счетчика (МППС), используемого для регистрации осколков деления из мишени <sup>235</sup>U, нанесенных на катод МППС. Спектр нейтронов  $F_{ис\ нп}(E)$  показан на рис. 2 вместе со стандартным спектром атмосферных нейтронов (JESD89A), умноженным на коэффициент масштабирования  $7 \cdot 10^7$ , а также спектры нейтронов ведущих испытательных установок. Как форма потока нейтронов, так и их интенсивность демонстрируют, что ИС НП / ГНЕЙС успешно конкурирует с другими испытательными центрами мирового класса с атмосферным спектром нейтронов. СЦ-1000 обладает потенциалом роста интенсивности нейтронов. Новая станция облучения, расположенная на расстоянии 5–6 м от мишени для нейтронов, работающая на выведенном протонном пучке, позволит увеличить нейтронный поток в месте расположения образца не менее чем в 10 раз. Одновременно существует возможность облучения блоков оборудования большого размера.

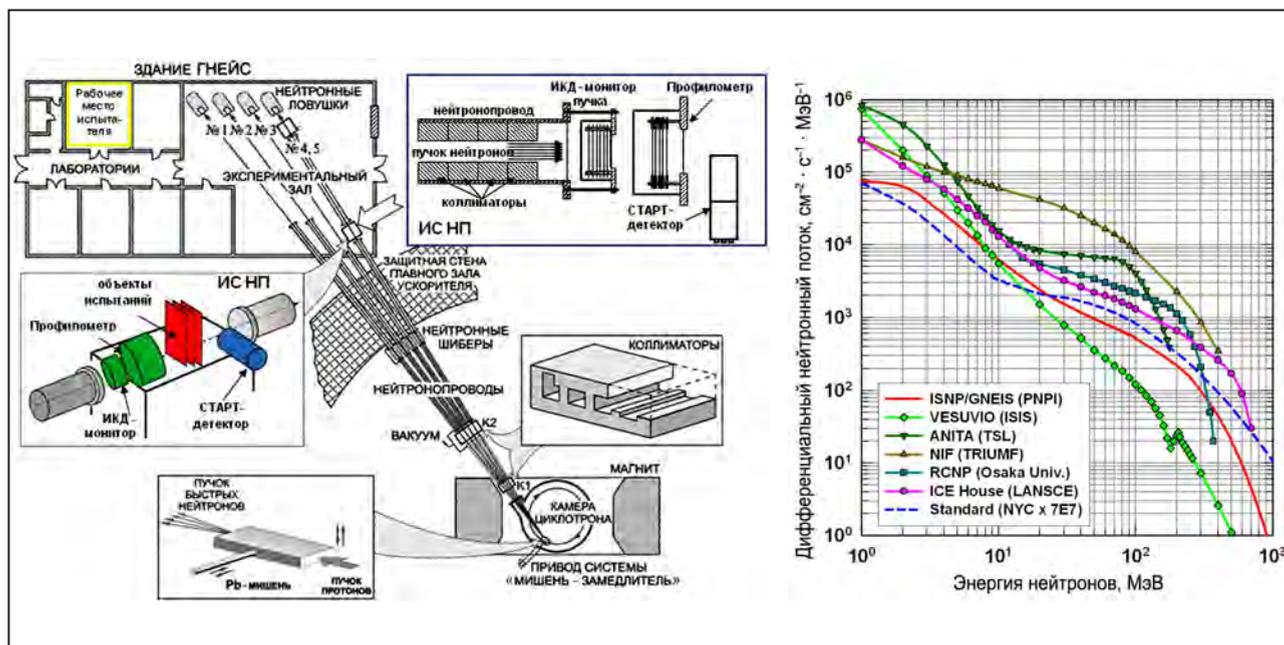
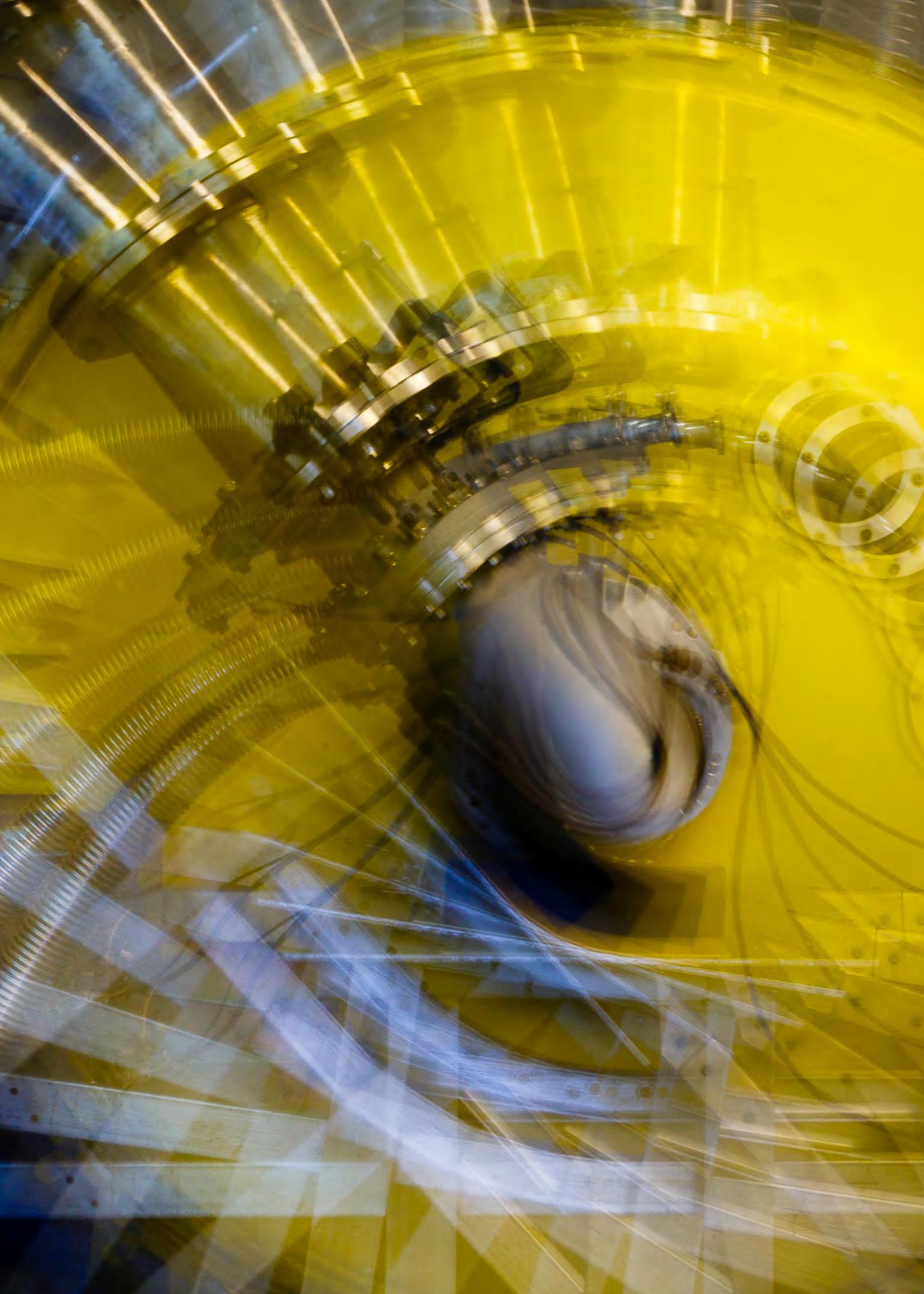


Рис. 2. Общая схема нейтронного времяпролетного спектрометра ГНЕЙС и испытательного стенда ИС НП / ГНЕЙС (слева). Спектр нейтронов  $F_{ис\ нп}(E)$  стенда ИС НП / ГНЕЙС в сравнении со стандартным спектром атмосферных нейтронов и спектрами других испытательных стендов мирового класса (справа)

Таким образом, на ускорителе СЦ-1000 НИЦ КИ – ПИЯФ разработан универсальный протонный и нейтронный центр. В настоящее время все большее число российских исследовательских организаций, специализирующихся на радиационных испытаниях электроники, проводят

исследования на протонных и нейтронных пучках по прямым соглашениям с Институтом или филиалом ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «НИИ космического приборостроения».



## Базовые установки

- 132** Статус синхроциклотрона на энергию протонов 1 000 МэВ в 2016 году
- 133** Изохронный циклотрон Ц-80. Статус и перспективы

## Статус синхроциклотрона на энергию протонов 1 000 МэВ в 2016 году

С. А. Артамонов, Е. М. Иванов, Г. Ф. Михеев  
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Синхроциклотрон СЦ-1000 на энергию протонов 1 000 МэВ с интенсивностью выведенного пучка 1 мкА является базовой установкой НИЦ КИ – ПИЯФ с 1970 г. Он широко используется для фундаментальных исследований в области физики элементарных частиц, структуры атомных ядер (включая ядра, удаленные от полосы стабильности) и механизмов ядерных реакций в них, физики твердого тела, а также в прикладных работах по радиационным испытаниям и ядерно-медицинским исследованиям.

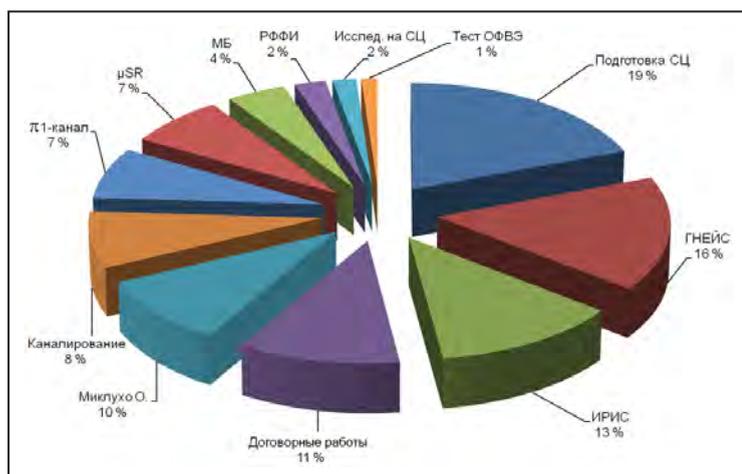
В 2016 г. ускоритель отработал в общей сложности 3 225 ч. На диаграмме показано распределение времени работы СЦ-1000 по различным направлениям исследований на его пучках.

Также в этом году было завершено создание на базе СЦ-1000 универсального центра для испытаний на радиационную стойкость электроники космического, авиационного и других прикладных назначений. Центр включает в себя два испытательных стенда для работы на протонном

пучке с энергией 1 000 МэВ, на пучках протонов переменной энергии ~ 60, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000 МэВ, а также испытательный стенд на нейтронном пучке атмосфероподобного спектра. На базе созданного центра был успешно выполнен ряд договорных работ со сторонними организациями.

В кооперации с сотрудниками Российского института мощного радиостроения были выполнены работы по определению возможности замены устаревших электрических машин СЦ-1000 на их современные и чрезвычайно компактные аналоги. Результаты исследований показали, что разработка источников питания для магнитных элементов синхроциклотрона возможна.

Совместно с Отделением молекулярной и радиационной биофизики начались разработки методов диагностики и лечения онкологических заболеваний с использованием облучения лабораторных грызунов модифицированным протонным пучком.



Направления работ, проводимых на пучках синхроциклотрона СЦ-1000

1. Amerkanov D.A., Artamonov S.A., Ivanov E.M., Lebedeva J.S., Mikheev G.F., Riabov G.A., Shcherbakov O.A., Vorobyev A.S. et al. // Proc. of XXV Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC-2016). 2016. P. 105–107.
2. Фокусирующее устройство синхроциклотрона: пат. РФ на полезную модель № 165907 / Е. М. Иванов, Г. Ф. Михеев; приоритет от 16.02.16.

## Изохронный циклотрон Ц-80. Статус и перспективы

Д. А. Амерканов, С. А. Артамонов, В. П. Гресь, Е. М. Иванов, Г. Ф. Михеев, И. А. Петров,  
А. С. Покровский, Г. А. Рябов, В. А. Тонких, В. И. Юрченко  
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В НИЦ КИ – ПИЯФ 8 ноября 2016 г. впервые выведен на проектные параметры изохронный циклотрон Ц-80 по ускорению отрицательных ионов водорода, имеющий энергию выведенного протонного пучка в диапазоне 40–80 МэВ (рис.).

Создание циклотрона Ц-80 открывает заманчивые возможности для организации на его основе производства радиоизотопов на качественно новом уровне как в плане увеличения объемов производства, так и в плане расширения номенклатуры производимых радиоизотопов. В этом отношении будут удовлетворены практически все потребности медицинских учреждений Северо-Запада РФ, занимающихся внедрением в медицинскую практику новых радиофармпрепаратов. При этом в данный проект заложена стратегическая возможность не только производства изотопов, но и приготовления на их основе радиофармпрепаратов.

Переменная энергия ускоренного пучка в сочетании с высокой интенсивностью позволяет

производить радиоизотопы и радиофармпрепараты высокого качества, недоступные для производства на коммерческих циклотронах, в частности генераторные изотопы  $^{82}\text{Sr}$  и  $^{68}\text{Ge}$ . На базе данного циклотрона предусмотрена возможность сепарации изотопов с помощью магнитного сепаратора.

Использование масс-сепаратора для электромагнитного разделения получаемых радионуклидов обеспечит получение широкого спектра сверхчистых радионуклидов (лучше  $1 \cdot 10^{-4}$ ) как для диагностики, так и для терапии.

Высокая энергия пучка циклотрона Ц-80 также позволяет создать на его базе единственный на сегодня в России и странах СНГ офтальмологический центр для протонной терапии онкологических заболеваний органов зрения. Такая технология лечения обладает высокой эффективностью, широко применяется за рубежом и востребована медицинским сообществом. Возможности центра будут использоваться клиниками Санкт-Петербурга и Ленинградской области.



Изохронный циклотрон Ц-80. Верхний уровень (слева). Трапты к мишенным станциям. Нижний уровень (справа)

1. Artamonov S.A., Chernov A.N., Ivanov E.M., Riabov G.A., Tonkikh V.A. // Proc. of XXV Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC-2016). 2016. P. 176–178. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2016/>
2. Amerkanov D.A., Artamonov S.A., Ivanov E.M., Riabov G.F., Yurchenko V.I. et al. // Proc. of XXV Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC-2016). 2016. P. 179–181. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2016/>



## Научно-организационная деятельность

- 136 Кадровый состав Института
- 138 Количественные показатели научной деятельности
- 141 Награды. Премии
- 143 Семинары
- 146 Конференции

## Кадровый состав Института



Анатолий Павлович Серебров – заведующий Отделом нейтронной физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, один из ведущих ученых в области исследования фундаментальных взаимодействий и нейтронной физики. А. П. Серебров избран членом-корреспондентом Российской академии наук по Отделению физических наук, специальность «ядерная физика».

### Численность сотрудников

Сотрудники	2015	2016
Всего без учета совместителей	1 989	1 906
Всего научных сотрудников	585	581
<i>Из них с должностью</i>		
руководителя	54	56
главного научного сотрудника	12	12
ведущего научного сотрудника	53	50
старшего научного сотрудника	176	166
научного сотрудника	132	126
младшего научного сотрудника	65	61
прочие научные сотрудники	93	110
<i>С ученой степенью</i>		
доктора наук	72	69
кандидата наук	267	254
<i>С ученым званием</i>		
академика	1	1
члена-корреспондента	2	3
профессора	16	15
доцента (с. н. с.)	116	106

### 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	16	6	13
Главные научные сотрудники	12	–	4	8
Ведущие научные сотрудники	50	8	21	21
Старшие научные сотрудники	166	21	21	124
Научные сотрудники	126	26	22	78
Младшие научные сотрудники	61	55	6	–

### Возраст научных сотрудников

Сотрудники	Возраст, лет					
	20-29	30-39	40-49	50-59	60 и старше	средний возраст
Всего научных сотрудников	124	80	58	82	237	51
<i>С ученой степенью</i>						
доктора наук	-	1	4	11	53	68
кандидата наук	8	35	37	51	123	58
Не имеют ученой степени	116	44	17	20	57	40
<i>С ученым званием</i>						
академика	-	-	-	-	1	76
члена-корреспондента	-	-	-	-	3	75
профессора	-	-	-	-	15	75
доцента (с. н. с.)	-	-	1	9	96	71

### Численность и средний возраст научных сотрудников по должностям

Должность	2015		2016	
	количество	средний возраст	количество	средний возраст
Главный научный сотрудник	12	80	12	81
Ведущий научный сотрудник	53	67	50	68
Старший научный сотрудник	176	63	166	63
Научный сотрудник	132	52	126	51
Младший научный сотрудник	65	30	61	31
Руководитель	54	65	56	64
Прочие научные сотрудники	93	24	110	26

### Структура по штатному расписанию за 5 лет

Категория персонала	2012	2013	2014	2015	2016
Научный персонал	445	455,2	479,4	514,9	529,4
Научно-технический персонал	221,9	254,9	262,8	277,1	244,5
Административно-хозяйственный персонал	1 032,8	1 119,3	1 177,5	1 190,7	1 158,8
Младший обслуживающий персонал	22,1	22,5	22,5	22,5	24,5
Всего по штатному расписанию	1 721,8	1 851,9	1 942,2	2 005,2	1 957,2

## Количественные показатели научной деятельности

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ выполнены все мероприятия, а также достигнуты все целевые индикаторы и показатели, запланированные на 2016 г., в т. ч. за счет субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на 2016 г.

### Динамика публикаций, индексируемых в WoS и ассоциированных с НИЦ КИ – ПИЯФ за 2013–2016 гг.

	2013	2014	2015	2016
Количество публикаций, содержащих результаты интеллектуальной деятельности в научных журналах, в т. ч. индексируемых в базе данных «Сеть науки» / Web of Science	598/374	519/361	565/395	569/398

В 2016 г. сотрудниками Института было сделано более 350 докладов на международных и российских научных мероприятиях.

Получено 15 патентов, из них патентов на изобретение – 3, патентов на полезную модель – 4, свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ – 5, свидетельств на базы данных – 2, зарегистрированных ноу-хау – 1.

### Динамика полученных охранных документов за 2013–2016 гг.

Наименование	2013	2014	2015	2016
Патенты на изобретения	3	4	5	3
Патенты на полезные модели	4	6	4	4
Свидетельства на программы для ЭВМ	4	3	6	5
Свидетельства на базы данных	1	–	–	2
Зарегистрированные ноу-хау	–	–	–	1
Всего:	12	13	15	15

В 2016 г. научные исследования сотрудников НИЦ КИ – ПИЯФ были поддержаны грантами Президента РФ, РФФИ и РНФ, а также Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.».

### Количество грантов

Гранты	Количество	Финансирование (тыс. руб.)
РФФИ	49	38 487,00
РНФ	6	62 946,04
Президента РФ	1	600,00
Минобрнауки РФ	1	14 000,00
Всего:	57	116 033,04

В 2016 г. сотрудники НИЦ КИ – ПИЯФ защитили 2 докторские и 11 кандидатских диссертации.

Ф.И.О.	Название работы
Елисеев Сергей Александрович, доктор физико-математических наук	«Высокопрецизионные измерения масс нуклидов ловушками Пеннинга для широкого спектра задач фундаментальной физики» 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц»
Семенчук Геннадий Георгиевич, доктор физико-математических наук	«Экспериментальное исследование процесса мюонного катализа $dd$ -синтеза в газах $D_2$ , $H_2+D_2$ и $HD$ » 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц»
Андоскин Павел Александрович, кандидат биологических наук	«Альфа-синуклеин крови как белковый маркер болезни Паркинсона», 03.01.04 – «Биохимия»
Демидов Юрий Андреевич, кандидат физико-математических наук	«Квантовохимическое моделирование электронной структуры соединений сверхтяжелых элементов» 01.04.17 – «Химическая физика, горения и взрыв, физика экстремальных состояний вещества»
Ломачук Юрий Вячеславович, кандидат физико-математических наук	«Метод расчета химических сдвигов рентгеновских эмиссионных спектров», 01.04.02 – «Теоретическая физика»
Малаев Михаил Владимирович, кандидат физико-математических наук	«Рождение $f$ -мезонов в $p$ - $p$ -, $p$ - $Pb$ - и $Pb$ - $Pb$ -столкновениях в эксперименте ALICE на LHC» 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц»
Семенова Алла Николаевна, кандидат физико-математических наук	«Описание мезонов в модели составной суперконформной струны и экзотических мезонных состояний как системы „дикварк–антидикварк“ в терминах $D$ -матрицы» 01.04.02 – «Теоретическая физика»
Смирнов Михаил Владимирович, кандидат физико-математических наук	«Исследование свойств нейтрино низких энергий, испускаемых искусственными источниками» 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц»
Тарнавич Владислав Валерьевич, кандидат физико-математических наук	«Магнитные свойства гольмий-иттриевых и диспрозий-иттриевых сверхструктур» 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»
Уклеев Виктор Алексеевич, кандидат физико-математических наук	«Исследование неоднородных магнитных пленок и многослойных систем взаимодополняющими методами поверхностного рассеяния нейтронного и рентгеновского излучений» 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»
Утесов Олег Игоревич, кандидат физико-математических наук	«Квантовые фазовые переходы и роль беспорядка в спиральных магнетиках и магнитных системах, находящихся в спин-жидкостных фазах» 01.04.02 – «Теоретическая физика»
Ченмарев Станислав Валерьевич, кандидат физико-математических наук	«Прецизионные измерения масс нуклидов в ионной ловушке с помощью метода фазового отображения» 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц»
Чубова Надежда Михайловна, кандидат физико-математических наук	«Магнитная структура кубического моносилцида марганца $MnSi$ и соединений на его основе» 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

В 2016 г. НИЦ КИ – ПИЯФ участвовал в открытом конкурсе Министерства образования и науки РФ по распределению контрольных цифр приема (КЦП) граждан на обучение по программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по очной форме за счет бюджетных ассигнований федерального бюджета на 2017/18 учебный год. Были получены КЦП по направлению «Физика и астрономия» – 12 мест, по направлению «Биологические науки» – 4 места.

Доля молодых ученых (исследователи без ученой степени, кандидаты наук до 35 лет и доктора наук до 40 лет) в общем количестве сотрудников, занятых в исследованиях и разработках, составила 16 %.

В лабораториях Института в 2016 г. более 100 студентов вузов Санкт-Петербурга (СПбГУ, СПбПУ и др.) выполняли учебно-исследовательские и научные работы, проходили практику, готовили выпускные квалификационные работы бакалавров и специалистов, а также магистерские диссертации.

НИЦ КИ – ПИЯФ, стремясь популяризировать науку и заинтересовать молодежь в получении профильного физического и биологического образования, занимается организацией и проведением экскурсий по территории Института (в частности, на ускорительный комплекс СЦ-1000, реакторный комплекс ПИК, реактор ВВР-М и в Отделение молекулярной и радиационной биофизики), участвует в профориентации школьников старших классов. В 2016 г. было организовано более 30 экскурсий для более чем 600 учащихся школ г. Гатчины и Гатчинского района, а также школ Ленинградской области и г. Санкт-Петербурга.

Сотрудниками Института в подшефной школе – МБОУ «Гатчинский Лицей № 3 имени Героя Советского Союза А. И. Перегудова» ведется работа со старшеклассниками, включающая чтение научно-популярных лекций, отбор перспективных учащихся и проведение с ними практических занятий по углубленному изучению физики, математики и биологии.

В научно-образовательном центре НИЦ КИ – ПИЯФ, который в будущем планируется расширить за счет создания Лаборатории конвергенции и наукоемких технологий НИЦ «Курчатовский институт», ученые читают лекции для учащихся школ г. Гатчины и Гатчинского района, в рамках которых ученики знакомятся с достижениями современной науки и техники.

## Награды. Премии

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



### Победители конкурса на соискание премии им. И. В. Курчатова

В конкурсе на соискание премии им. И. В. Курчатова за 2016 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 11 работ сотрудников Института.

#### В области научных исследований:

- «10 лет нейтринных исследований в эксперименте «Борексино» – А. В. Дербин, В. Н. Муратова, (Е. А. Литвинович, И. Н. Мачулин, М. Д. Скорохватов – НИЦ КИ);
- «Исследования запаздывающего деления и сосуществования форм ядра методом резонансной ионизации в лазерном ионном источнике» – А. Е. Барзах, Д. В. Федоров, М. Д. Селиверстов, П. Л. Молканов, В. Н. Пантелеев;
- «Высокопрецизионные измерения масс нуклидов ловушками Пеннинга для широкого спектра задач фундаментальной физики» – С. А. Елисеев.

#### Среди работ молодых научных сотрудников и инженеров-исследователей:

- «Развитие теоретических методов расчета электронной структуры молекул и кристаллов для экспериментов по поиску «новой физики» – Л. В. Скрипников;
- «Дефекты в спиральных магнетиках со взаимодействием Дзялошинского – Мория» – О. И. Утесов, А. В. Сизанов;
- «Олигомеры нативно-развернутых белков мозга BASP1 и GAP-43 с высоким агрегационным числом сохраняют структурную неупорядоченность» – О. С. Форсова.

**Среди студенческих работ:**

- «Разработка и введение в эксплуатацию системы измерения тока банчируванного пучка на ускорителе COSY» – Л. Д. Ельцов;
- «Дифракционные исследования кристаллической структуры сотообразных слоистых оксидов» – С. Ю. Подчерзцев;
- «Каналирование и объемное отражение протонов с энергией 1 ГэВ в изогнутых кристаллах кремния» – М. В. Мальков;
- «Низкоэнергетичная ядерная изомерия» – Н. С. Мартынова;
- «Исследование структуры углеродных нанотрубок» – А. Н. Матвеева.

**Победители конкурса на соискание премии им. академика А. П. Александрова**

В молодежном отделении ежегодного конкурса научных работ на соискание премии им. академика А. П. Александрова в НИЦ «Курчатовский институт» за 2016 г. победителями стали молодые сотрудники НИЦ КИ – ПИЯФ:

- «Разработка газоразрядных детекторов нейтронов для экспериментальных установок физики конденсированного состояния и фундаментальной физики» – Д. С. Ильин;
- «Запуск полномасштабной модели источника УХН. Анализ результатов» – В. А. Лямкин.

В 2016 г. правительством Ленинградской области продолжалась поддержка 11 работ сотрудников Института, ранее удостоенных именных научных стипендий губернатора Ленинградской области: 2 получили именную научную стипендию губернатора Ленинградской области в категории «Молодые ученые», а 9 – в категории «Ведущие ученые».



В 2016 г. и. о. заведующего Лабораторией молекулярной генетики человека Отделения молекулярной и радиационной биофизики доктор биологических наук С. Н. Пчелина получила премию губернатора Ленинградской области за заслуги в развитии науки и техники, за достижения в области фундаментальных исследований в номинации «Естественные и технические науки» за работу «Генетические и биохимические маркеры болезни Паркинсона».

Для молодых ученых и специалистов НИЦ КИ – ПИЯФ, демонстрирующих существенные успехи в научных исследованиях, были учреждены именные стипендии в знак признания заслуг и в память выдающихся ученых С. Е. Бреслера, В. Н. Грибова, Г. М. Драбкина и В. М. Лобашева, чья научная деятельность была неразрывно связана с Институтом.

В 2016 г. стипендии были присуждены в следующих номинациях:

- «Стипендия им. С. Е. Бреслера» за работы в области биологии – О. С. Форсова;
- «Стипендия им. В. Н. Грибова» за работы в области теоретической физики – О. И. Утесов;
- «Стипендия им. Г. М. Драбкина» за работы в области физики конденсированного состояния – Н. М. Чубова;
- «Стипендия им. В. М. Лобашева» за работы в области ядерной физики – В. М. Самойлов.



## 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 НИЦ КИ – ПИЯФ (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

- 14 января.** В. А. Щегельский (Отделение физики высоких энергий НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Бозе – Эйнштейн-фемтоскопия, структура протона и «размер померона».
- 26 января.** Д. Ю. Минкин (НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Особенности использования современного ракетного вооружения».
- 4 февраля.** О. А. Щербаков (Отделение нейтронных исследований НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Испытательный стенд на синхроциклотроне НИЦ КИ – ПИЯФ для нейтронных радиационных испытаний электроники».
- 11 февраля.** И. В. Голосовский (Отделение нейтронных исследований НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Магнитные структуры в наночастицах CoO с кристаллической структурой „вюртцита“ и „цинковой обманки“, которые существуют только в форме наночастиц. Нейтронная и рентгеновская дифракция».
- 24 марта.** М. И. Эйдес, А. А. Воробьев (Отделение теоретической физики, Отделение физики высоких энергий НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Среднеквадратичный радиус протона: обсуждение проблемы и проект нового эксперимента по упругому *ep*-рассеянию».
- 24 марта.** А. О. Сорокин (Отделение теоретической физики НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Топологические дефекты в двумерном спиральном магнетике и метод непertурбативной ренормгруппы».
- 7 апреля.** В. Ю. Петров (Отделение теоретической физики НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Квантовая проволока с примесью как 0-мерная теория поля».
- 14 апреля.** А. С. Суханов (Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Измерение спин-волновой жесткости в гелимагнетиках методом малоуглового рассеяния нейтронов».
- 14 апреля.** И. М. Беляев (НИЦ КИ – ИТЭФ) – «Поиски возможного тетракваркового состояния  $\chi(5568)$  в эксперименте LHCb».
- 28 апреля.** А. В. Накин (Отделение нейтронных исследований НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Математическое моделирование анизотропных решеток джозефсоновских контактов в неоднородном магнитном поле».
- 11 мая.** М. Г. Хренова (МГУ им. М. В. Ломоносова) – «Суперкомпьютерное молекулярное моделирование для интерпретации и предсказания свойств белковых систем».
- 12 мая.** С. И. Тютюнников (Объединенный институт ядерных исследований) – «EXAFS-спектроскопия на Курчатовском источнике синхротронного излучения».
- 19 мая.** Б. Н. Гикал (Лаборатория ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований) – «Циклотронный комплекс тяжелых ионов ЛЯР ОИЯИ для научных исследований и прикладных задач (современное состояние и планы развития на ближайшие 7 лет)».
- 23 мая.** Ю. Поликанов (University of Illinois at Chicago) – «От структуры рибосомы до антибиотиков».
- 26 мая.** В. А. Матвеев (Отделение нейтронных исследований НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Исследование нанослоев титана методами нейтронной и рентгеновской рефлектометрии».
- 9 июня.** Jan K. Kruger, Martine Philipp (University of the Saarland) – «The Role of Nonlinearities at Phase Transitions and Glass Transitions in Polymers».
- 9 июня.** М. Г. Рыскин, В. А. Щегельский (Отделение теоретической физики, Отделение физики высоких энергий НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Два масштаба в бозе-эйнштейновских корреляциях. Первое наблюдение излучающего „померона“ в эксперименте АТЛАС».
- 15 июня.** Т. А. Исаев (Отделение нейтронных исследований НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Перспективы исследований с холодными молекулами в ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт».
- 16 июня.** А. А. Сжогина (Отделение нейтронных исследований НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Структура и магнитно-релаксационные свойства эндодральных железоуглеродных комплексов».

- 16 июня.** М. Стрикман (Университет Штата Пенсильвания) – «Эффект флуктуаций цвета в протон-ядерных и фотон-ядерных взаимодействиях на БАК».
- 23 июня.** С. В. Малеев (Отделение теоретической физики НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Взаимодействие спиновых волн в  $B2O$  ( $MnSi$  и т. п.) магнетиках».
- 30 июня.** М. В. Суясова (Отделение нейтронных исследований НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Агрегирование и механизмы самоорганизации фуллеренолов в водных растворах».
- 6 октября.** Я. М. Бельтюков (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН) – «Применение теории случайных матриц к описанию колебаний гранулярных сред».
- 13 октября.** А. В. Сыромятников (Отделение теоретической физики НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Спин-флор-переход с изменением типа магнитного порядка».
- 27 октября.** А. Ю. Актерский (Отделение теоретической физики НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Низкоэнергетический синглетный спектр  $J_1$ - $J_2$ -модели антиферромагнетика Гейзенберга со спином  $1/2$  на квадратной решетке».
- 2 ноября.** Д. С. Карлов (Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Разнообразие бактерий в пелагической и придонной зонах пресноводного антарктического озера Радок (оазис Эймери)».
- 3 ноября.** А. Б. Арбузов (Объединенный институт ядерных исследований) – «Радиационные КЭД-поправки к упругому электрон-протонному рассеянию».
- 10 ноября.** А. Ю. Гойхман (НОЦ «Функциональные наноматериалы», Балтийский федеральный университет им. И. Канта) – «Мобильные ростовые установки для *in-situ* формирования и исследований уникальных наноструктур и систем на установках megascience».
- 17 ноября.** И. В. Голосовский (Отделение нейтронных исследований НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Спиновые волны и обменные взаимодействия в мультиферроике  $NdFe_3(VO_3)_4$ . Неупругое рассеяние нейтронов».
- 1 декабря.** И. А. Бабинцев (Отделение теоретической физики НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Снятие вырождения собственного значения оператора кинетического уравнения Беккера – Деринга».
- 8 декабря.** М. Г. Рыскин, В. А. Щегельский (Отделение теоретической физики, Отделение физики высоких энергий НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Кипящий КХД-вакуум: изучение корреляций Бозе – Эйнштейна в  $pp$ -взаимодействиях в широком диапазоне энергий БАК с детектором АТЛАС».
- 29 декабря.** А. В. Титов (Отделение перспективных разработок НИЦ КИ – ПИЯФ) – «Теоретические исследования молекул и твердых тел с тяжелыми атомами в Лаборатории квантовой химии ПИЯФ: развитие методов и расчеты».

## Конференции

В рамках широкого спектра тематик научных исследований, осуществляемых в НИЦ КИ – ПИЯФ, организуются собственные конференции, лектории и рабочие совещания, в которых участвуют ведущие научные центры России и зарубежья.

В 2016 г. при участии Института было организовано 13 научных мероприятий (совещания, конференции и школы), в которых приняло участие более 1 500 человек, из них более 300 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 – 2016». **18–19 февраля.**
2. 50-я Зимняя школа ПИЯФ по физике ядра и элементарных частиц, теоретической физике, физике и технике реакторов, физике и технике ускорителей. **29 февраля – 5 марта.**
3. XVII Зимняя молодежная школа по биофизике и молекулярной биологии. **29 февраля – 5 марта.**
4. L Зимняя школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния (ФКС-2016). **14–19 марта.**
5. Четвертое рабочее совещание по проекту реконструкции установок на реакторе ПИК “PIK-GGBase”. **26–27 мая.**
6. Международная конференция “Quarks-2016”. **29 мая – 4 июня.**
7. Рабочее совещание по неупругому рассеянию нейтронов «Спектрина-2016». **23–24 июня.**
8. Международная конференция «Структура адронов и квантовая хромодинамика» – “Hadron Structure and QCD (HSQCD’2016)”. **27 июня – 1 июля.**
9. II Молодежная школа реактора ПИК (Профессионализм. Интеллект. Карьера. «ПИК-2016»). **3–8 июля.**
10. Международное совещание коллаборации FAIR/NuSTAR/R3B “R3B Collaboration Meeting”. **19 сентября – 23 сентября.**
11. IV Совещание по малоугловому рассеянию нейтронов «Муромец-2016». **28–30 сентября.**
12. Молодежный научный форум “Open Science–2016”. **16–18 ноября.**
13. V Школа по физике поляризованных нейтронов «ФПН-2016». **15–16 декабря.**

Также в течение 2016 г. сотрудники НИЦ КИ – ПИЯФ участвовали в 130 российских и международных конференциях, где представили более 350 докладов.



# Основные результаты научной деятельности **2016**

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*