



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
**«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ



# Основные результаты научной деятельности 2014

Гатчина • 2015

**Научные редакторы:**

В. Л. Аксенов  
С. В. Саранцева

**Составители:**

В. В. Воронин  
В. Т. Ким  
А. Л. Коневега  
Г. Ф. Михеев  
В. Ю. Петров  
В. В. Саранцев  
С. Р. Фридман  
Г. В. Фролов  
Ю. П. Черненко

**Ответственная за выпуск**

М. А. Каменская

**Основные результаты научной деятельности 2014. –**

Гатчина Ленинградской обл.: Издательство  
НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ», 2015. – 172 с.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных результатов научных исследований НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ» за 2014 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 978-5-86763-353-0

© НИЦ КИ ПИАФ, 2015

# Оглавление

- 5** Введение
- 9** Научные отделения
- 25** Теоретическая и математическая физика
- 43** Исследования с использованием нейтронов, синхротронного излучения и мюонов
- 59** Исследования с использованием протонов и ионов.  
Физика нейтрино
- 77** Молекулярная и радиационная биофизика
- 95** Ядерная медицина (производство изотопов, лучевая терапия, био- и нанотехнологии для медицины)
- 105** Физика ядерных реакторов и ускорителей
- 121** Прикладные исследования и разработки
- 131** Базовые установки
- 151** Научно-организационная деятельность



СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ  
КОСЫГАТКИН

## Введение

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Петербургский институт ядерной физики (НИЦ КИ ПИЯФ) – многопрофильный научный центр, ведущий фундаментальные и прикладные исследования в области физики элементарных частиц и высоких энергий, ядерной физики, физики конденсированного состояния, молекулярной и радиационной биофизики.

Научные работы сотрудников Института отмечены Ленинской и Государственными премиями, премиями Правительства РФ, академическими премиями. Три сотрудника избраны действительными членами, семь сотрудников – членами-корреспондентами Российской академии наук. В настоящее время в Институте работает 1 912 человека, из них 511 научных сотрудников, 76 докторов и 263 кандидата наук. Один сотрудник является действительным членом, двое сотрудников – членами-корреспондентами Российской академии наук.

В 2010 г. по инициативе М. В. Ковальчука Институт был включен в Программу совместной деятельности организаций, участвующих в пилотном проекте по созданию Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ КИ). В сентябре 2011 г. ПИЯФ был передан из Российской академии наук в ведение НИЦ КИ. В рамках Программы совместной деятельности в НИЦ КИ ПИЯФ ведутся исследования по следующим направлениям:

- фундаментальные и прикладные исследования с использованием нейтронов (по данному направлению НИЦ КИ ПИЯФ является координирующей организацией);
- теоретическая и математическая физика;
- фундаментальные междисциплинарные исследования в бионауках;
- фундаментальные и прикладные исследования с использованием протонов и ионов; физика нейтрино;
- физика ядерных реакторов и ускорителей;

– ядерная медицина (производство изотопов, лучевая терапия, нанобиотехнологии для медицины).

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

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

Как и другие институты, входящие в состав НИЦ КИ, НИЦ КИ ПИЯФ активно участвует в различных международных проектах, активно сотрудничает по основным направлениям своей деятельности с крупнейшими международными научными центрами:

- Европейским центром ядерных исследований (CERN, Швейцария);
- Объединенным институтом ядерных исследований (ОИЯИ, Россия);
- Исследовательскими центрами Ассоциации Гельмгольца (Германия);
- Европейским центром нейтронных исследований – Институтом им. Лауэ – Ланжевена (ILL, Франция);
- Институтом им. Пауля Шеррера (PSI, Швейцария) и др.

Базовыми установками Института являются исследовательский реактор ВВР-М (физический пуск осуществлен в декабре 1959 г., в эксплуатацию введен в конце 1961 г.) и протонный синхротрон СЦ-1000 на энергию 1 ГэВ (введен в эксплуатацию в 1970 г.).

В 1969 г. начались работы по проектированию нового реактора ПИК. Строительство реактора началось в 1976 г. После чернобыльской аварии проект реактора был подвергнут полной ревизии и переработке к 1991 г. с учетом новых норм безопасности. Строительство было возобновлено, однако средства выделялись нерегулярно и с перерывами, графики строительных

работ не выполнялись. Тем не менее благодаря самоотверженному труду сотрудников Института под руководством директоров академика В. А. Назаренко (1934–2006) с 1994 до 2006 г. и профессора В. М. Самсонова с 2006 до 2012 г. реакторный комплекс ПИК (РК ПИК) удалось сохранить. Однако перспективы завершения проекта оставались весьма туманными.

Ситуация кардинально изменилась после перевода ПИЯФ из РАН в НИЦ «Курчатовский институт». Была обеспечена стабильность получения средств, выделяемых Правительством РФ на сооружение реакторного комплекса, из Программы совместной деятельности финансирование Института было увеличено в 2 раза. В декабре 2013 г. завершилось строительство второго и третьего пусковых комплексов реактора ПИК. После окончания оформительских процедур и сдачи построенного комплекса в эксплуатацию в 2015 г. начнутся работы по наладке, испытанию и аттестации систем на соответствие нормативам в области использования атомной энергии, оформление разрешений на этапы энергетического пуска реактора и ввода его в эксплуатацию.

В ноябре 2014 г. в Главгосэкспертизе утверждены 2 проекта по модернизации и реконструкции ряда технологических систем с их реализацией в 2014–2019 гг. В рамках этих проектов будет построен необходимый для эксплуатации реактора ПИК комплекс изотопной очистки тяжелой воды отражателя, проведено совершенствование построенных объектов, технологических систем и инженерной инфраструктуры РК ПИК в целях обеспечения возросших требований к безопасности ядерных установок, а также подготовка комплекса для использования его физиками. В результате

в 2018 г. должен произойти энергетический пуск реактора с последующей сдачей его в эксплуатацию в 2019 г. с 12 работающими экспериментальными станциями. Из них 2 станции будут перенесены с реактора ВВР-М, 7 – были доставлены в Институт в 2012 г. из Исследовательского центра Геестхахта (ФРГ) и в настоящее время проходят стадию наладки и адаптации. Три станции будут перенесены из Европейского центра нейтронных исследований – Института им. Лауэ – Ланжевена (ИЛЛ, Гренобль, Франция). Эти станции принадлежат НИЦ КИ ПИЯФ, и в настоящее время с их помощью на реакторе ILL проводятся эксперименты.

Кроме того, в 2014 г. началась разработка проекта оснащения РК ПИК современными экспериментальными станциями для проведения научных исследований. Были образованы 12 рабочих групп из сотрудников НИЦ КИ и наших коллег из исследовательских центров России и Европы. В работе над концепцией проекта принимали участие более 50 ученых. Было проведено 12 национальных и международных рабочих совещаний по тематике концепции. В соответствии с общей концепцией рабочими группами были представлены концептуальные и технические рекомендации, необходимые для проведения проектных работ, конструирования и создания в рамках инвестиционного проекта «Создание приборной базы реакторного комплекса ПИК» 20 экспериментальных установок.

На базе РК ПИК планируется создание Международного центра нейтронных исследований (МЦНИ). Стратегическим партнером Института является Федеративная Республика Германия. В 2014 г. подписано соглашение с Исследовательским центром Юлиха, который является координатором участия научных центров Германии в создании МЦНИ



в Гатчине. Реактор ПИК, наряду с реактором ILL и строящимся в Швеции импульсным источником ESS, включен в качестве базы для исследований в стратегии развития нейтронных наук в Европе. Формирование научной программы и программы создания приборной базы ПИК проходит в координации с другими нейтронными центрами, в первую очередь с ОИЯИ (Дубна), Исследовательским центром Юлиха на базе реактора Технического университета (Мюнхен, Германия), ILL (Гренобль, Франция) и ESS (Лунд, Швеция). Мы предполагаем участие физиков Европы, в первую очередь Германии и Венгрии, в дальнейшей разработке концепции и последующем проектировании и создании экспериментальных станций. Собственно, с реализации программы создания комплекса экспериментальных станций на реакторе ПИК и начинается создание МЦНИ.

В качестве международного экспертного совета будет выступать Международный консультативный комитет НИЦ КИ по фотонным и нейтронным исследованиям, сопредседателями которого являются профессор Х. Дош (DESY, Германия) и член-корреспондент РАН М. В. Ковальчук (НИЦ КИ). Председателем подкомитета по нейтронным наукам назначен профессор С. Шмидт (ИЦ Юлиха, Германия). Первое заседание подкомитета по нейтронным наукам намечено провести в начале марта 2015 г.



23 декабря 2014 г. состоялось совместное заседание дирекции НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ» и ОАО «НИИЭФА» им. Д. В. Ефремова. Начальник ускорительного отдела Института Е. М. Иванов доложил о физическом пуске циклотрона Ц-80. Монтаж был завершен в ноябре, а в декабре были проведены физические испытания. Циклотрон Ц-80 создается совместно с ОАО «НИИЭФА» им. Д. В. Ефремова. Проект ускорителя задумывался давно, однако его реализация стала возможной только в рамках Программы совместной деятельности НИЦ «Курчатовский институт». Реально он стартовал в 2011 г. В 2014 г. завершен важный этап создания циклотрона Ц-80, на базе которого планируется развить изотопный комплекс по производству радионуклидов и радиофармпрепаратов для медицины.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных результатов научных исследований НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ» в 2014 г. Это описание предваряют обзоры руководителей научных Отделений основных направлений их деятельности. Там же 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 519 статьях в ведущих российских и международных реферируемых журналах и представлены на 171 национальной и международной конференциях.

В заключительном разделе дана общая информация об Институте.

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

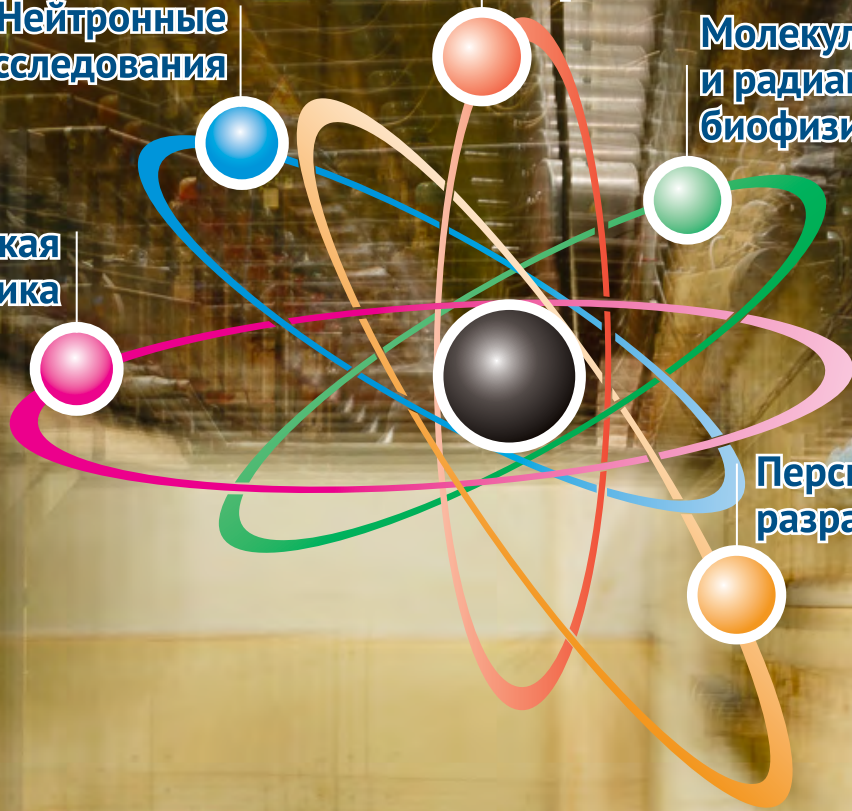
**Физика высоких энергий**

**Молекулярная и радиационная биофизика**

**Нейтронные исследования**

**Перспективные разработки**

**Теоретическая физика**





# Научные отделения

- 10** Отделение теоретической физики
- 14** Отделение нейтронных исследований
- 17** Отделение физики высоких энергий
- 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);
  - теоретической физики высоких энергий (и. о. заведующего д. ф.-м. н. В. Ю. Петров);
  - теории конденсированного состояния (заведующий д. ф.-м. н. С. Л. Гинзбург);
  - теоретической ядерной физики (заведующий д. ф.-м. н. М. Г. Рыскин);
  - атомной физики (заведующий д. ф.-м. н. А. И. Михайлов);
- и группы физики реакторов (руководитель к. ф.-м. н. А. Н. Ерыкалов).

**В ОТФ работает 68 научных сотрудников, из них 28 докторов наук, 31 кандидат наук.**



**Л. Н. Липатов,**  
академик РАН,  
руководитель  
Отделения

Исследования ОТФ касались всех основных разделов современной теоретической физики. Традиционной для ОТФ является теория рассеяния при сверхвысоких энергиях, в которой работы ОТФ определяют мировой уровень. В работах Л. Н. Липатова была построена функция Грина БФКЛ-померона (Балицкий, Фадин, Кураев, Липатов) (т. е. ведущей в рамках теории возмущений сингулярности, определяющей поведение сечений при высоких энергиях). Также БФКЛ-померон был рассмотрен в теории с массивными глюонами. Это есть как раз случай Стандартной модели (СМ), т. е. результаты этих работ позволяют судить об асимптотике амплитуд рассеяния в данной теории.

ОТФ – один из лидеров в области так называемой AdS/Cft дуальности (anti-de Sitter/), которая сегодня является одной из самых модных областей теоретической физики. Суть дела здесь состоит в том, что определенные суперсимметричные теории обладают настолько высокой симметрией, что эти теории поля (весьма нетривиальные и в  $d = 4$ ) могут быть решены точно. Они

оказываются дуальны теории суперструны, которая в определенном пределе сводится просто к супергравитации в определенной метрике (пространство anti-de Sitter). В работах Н. А. Громова построена точная теория БФКЛ-померона в этой теории при любой константе связи. Эти работы являются продолжением работ Л. Н. Липатова прошлых лет, в которых он рассмотрел померон в AdS/CFT в слабой и сильной связях. Таким образом, выяснено поведение при высоких энергиях в данной теории, что должно принести пользу и в более реалистических теориях, таких как квантовая хромодинамика (КХД).

Изучение непертурбативных явлений в теории поля также находится в центре исследований, проводимых ОТФ. Наиболее интересным и до сих пор непонятным явлением можно считать явление невылетания кварков. Оно все еще недоступно для непосредственного исследования, поэтому для понимания его механизма используются более простые (обладающие большей симметрией) суперсимметричные теории. Много лет изучение механизма конфайнмента в этих теориях проводится в работах А. В. Юнга. На этом пути достигнуты большие успехи, данный механизм можно считать почти окончательно выясненным, но все еще довольно далеким от того, что наблюдается в природе. Тем не менее Юнгом открыто совершенно новое явление – "instead-of-confinement mechanism". Впервые удалось сделать достоверные выводы о поведении  $N = 1$  суперсимметричной (SUSY) теории, которая

не решается точно и остается последней надеждой на реализацию невылетания того типа, который реализуется в природе. Интереснейшим by-product-ом данных исследований является вновь открытая дуальность между 4-мерными и 2-мерными SUSY-теориями. Это открытие находится в русле достижений теории последних лет: 2-мерные и 4-мерные теории обнаруживают поразительное сходство, значение которого еще предстоит осознать.

КХД при ненулевой температуре изучалась в работах В. Ю. Петрова. Основным инструментом изучения КХД при  $T > 0$  остаются решеточные симуляции, которые, однако, часто не позволяют осознать суть происходящих явлений. Были предложены сравнительно простой метод, позволяющий описать решеточные данные вплоть до температуры фазового перехода в состояние невылетания кварков, а также метод вычисления и измерения эффективного потенциала для поляковской петли. Эта величина играет особую роль в КХД, поскольку является параметром порядка для фазового перехода «конфайнмент – деконфайнмент».

В работах М. Г. Рыскина с соавторами рассмотрена дифракция при энергиях Большого адронного коллайдера (БАК). В ней были пересмотрены основные положения теории В. А. Грибова с целью учета логарифмического роста поперечного импульса в КХД. Как ни странно, это упрощает ситуацию: на основе модифицированной теории удалось построить самосогласованную модель, которая, по идее, должна полностью описывать дифракционные явления на БАК. На ряде примеров авторы показывают, что так оно и есть: их теория вполне хорошо согласуется с экспериментом.

Работы В. Н. Велижанина давно уже достигли рекордной точности в вычислении диаграмм теории возмущений. В 2013–2014 гг. в большой серии работ он вычислил поправки к параметрам СМ на уровне не хуже 3 петли. Большой интерес представляет и его исследование потенциала хиггсовского поля. Удивительным образом оказывается, что если принять наблюдаемое значение массы Хиггса, то этот потенциал с учетом поправок может и не находиться в области стабильности. Точность вычислений все еще не позволяет прийти к окончательным выводам, однако опасность сохраняется.

Также высокую точность (3 петли и выше) имеют работы М. И. Эйдеса с соавторами, касающиеся

другой, и хорошо известной, теории – квантовой электродинамики. Точность эксперимента здесь достигла фантастического уровня. В 2014 г. было вычислено сверхтонкое расщепление в мюонии.

Интересные идеи по поводу происхождения иерархии масс кварков и самой матрицы Кобаяши – Маскава были представлены в 2014 г. в работах И. Т. Дятлова. Автор основывается на идее зеркального мира, которая была предложена несколько лет назад. Несмотря на всю фантастичность идеи, совпадения, на которые указывает автор, заставляют задуматься.

Продолжается работа группы А. В. Саранцева по PWA (Partial Wave Analysis) ряда реакций с мезонами и барионами. Эта группа (так называемая Бонн-Гатчина) уже стала, вероятно, самой авторитетной в мире: данные PDG (Particle Data Group) в существенной части основываются на их результатах. Важно отметить, что впервые анализ основан на едином подходе ко всем реакциям: данные различных экспериментов взаимно дополняют друг друга. В 2014 г., в частности, опубликован большой обзор, описывающий метод и достижения группы.

В области физики конденсированного состояния исследования ОТФ также происходили по многим направлениям. Теория квантовых проволок уже на протяжении ряда лет развивается в работах Д. Н. Аристова с соавторами. В этой теории происходят удивительные явления: проводимость оказывается или тождественно равной нулю или равной максимально возможной в зависимости от знака электрон-электронного взаимодействия. В работах Д. Н. Аристова создана теория контакта (двух, трех и более) квантовых проволок, которая необходима для «квантовой электротехники». С точки зрения теории, дело сводится к очень красивым конформным теориям с критическим поведением. В 2014 г. авторы открыли новую область – теории нанопроволок, не находящихся в состоянии равновесия. Для этого приходится применить совершенно новые теоретические методы, основанные на технике Келдыша.

Нанофизика также была основной темой исследования сотрудника ОТФ А. Д. Мирлина. На эти исследования группе, одним из руководителей которой он является, был присужден грант РФФИ (совместно с Институтом теоретической физики им. Л. Д. Ландау).

Традиционной темой исследования в секторе физики конденсированного состояния являются магнетики. В работах А. В. Сыромятникова с соавторами разработана теория, описывающая низкотемпературные свойства димерной системы спинов  $1/2$  на треугольной решетке с анизотропным обменным взаимодействием в магнитном поле. Получены спектр элементарных возбуждений (триплетов), эффективное взаимодействие между ними в квантовой критической точке, разделяющей парамагнитную фазу и антиферромагнитную, зависимости критического поля от температуры и поперечной намагниченности от магнитного поля. Следующие из разработанной теории зависимости критического поля от температуры и поперечной намагниченности от магнитного поля находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Были рассмотрены также щелевые фазы в одно-, двух- и трехмерных спиновых системах со слабо взаимодействующими бозонными элементарными возбуждениями (как с дальним магнитным порядком, так и без него) и с беспорядком в константах обменного взаимодействия. Получены выражения для спектра элементарных возбуждений и плотности состояний в первом порядке по концентрации дефектов  $c \ll 1$ . Показано, как полученные общие результаты применяются для описания низкополевых и полностью поляризованных парамагнитных щелевых фаз в димеризованной системе со спином  $1/2$  и в системах с целым спином и большой одноионной легкоплоскостной анизотропией.

В работах С. Л. Гинзбурга и Н. Е. Савицкой изучались свойства неупорядоченных систем. Найдены условия, при которых в сверхпроводящем метаматериале, представляющем собой неупорядоченную решетку джозефсоновских контактов, возможна фазовая синхронизация в определенных группах контактов. Исследованы условия устойчивости данного явления относительно изменений параметров контактов и показано, что оно обладает уникальной устойчивостью, т. е. реализуется на большей части фазовой диаграммы системы.

Много лет развивается в работах В. В. Шагиняна с соавторами теория сильнокоррелированных фермионных систем. Показано, что они могут обладать необычными свойствами, близкими к ситуации, когда эффективная масса элементарного фермионного возбуждения обращается в бесконечность

для полосы значений импульса, близких к ферми-поверхности. С помощью данной теории описан целый ряд явлений, наблюдаемых в различных системах в физике конденсированного состояния. В этом году издательство «Спрингер» выпустило книгу авторов, посвященную теории этого явления и ее приложениям.

Значительная часть работ ОТФ была посвящена теории атомов и молекул, а также традиционной ядерной физике. Так, была предложена теория многофотонных каскадных переходов в атомах, внесен вклад в теорию внутренней конверсии, вычислено сечение возбуждения атомов электронами и фотонами высоких энергий. Однако существенная часть прецизионных вычислений носила прикладной характер. Во-первых, это вычисления свойств атомов и молекул для экспериментов по установлению постоянства фундаментальных констант. Во-вторых, это теоретический поиск подходящих молекул для постановки высокоточных экспериментов по поиску электрического дипольного момента электрона. И наконец, это исследования, проводимые в интересах термоядерного реактора. По последней тематике в 2014 г. проведено, например, прецизионное изучение свойств атома вольфрама (материала первой стенки термоядерного реактора).

Большое практическое значение имеют также работы ОТФ в области физики реакторов. Так, было изучено влияние толщины лопасти тепловыделяющего элемента реактора ПИК на топливную составляющую стоимости: уменьшение толщины существенно снижает стоимость. По результатам работы поданы 2 заявки на патент, 1 уже получен.

Практическим расчетам эксплуатации реактора ПИК посвящены также и другие работы ОТФ. Так, была рассчитана и проанализирована реактивность ПИК, в т. ч. и при возможных аварийных ситуациях. Также было проведено полномасштабное моделирование выгорания в реакторе после осуществления энергетического пуска, рассмотрена концепция эксплуатационного комплекта тепловыделяющей сборки реактора ПИК.

Сотрудниками ОТФ опубликовано 104 научных работы в реферируемых журналах (98 статей в зарубежных изданиях), получено 2 патента и издана 1 монография, сделано 30 докладов на международных и российских научных мероприятиях, защищена 1 кандидатская диссертация.

## Отделение нейтронных исследований

Отделение нейтронных исследований (ОНИ) – и. о. руководителя д. ф.-м. н. В. В. Воронин – состоит из 2 научных 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);
- рентгеновской и гамма-спектроскопии (заведующий д. ф.-м. н. В. В. Федоров);
- молекулярных и атомных пучков (заведующий к. ф.-м. н. В. Ф. Ежов);
- ядерной спектроскопии (заведующий д. ф.-м. н. И. А. Митропольский)

и 3 групп:

- физики деления ядер (руководитель к. ф.-м. н. А. С. Воробьев);
- исследований слабых взаимодействий (руководитель к. ф.-м. н. А. Н. Пирожков);
- ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М (руководитель Д. В. Прудников).

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

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

и 2 групп:

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

В ОНИ работает 153 научных сотрудника, из них 18 докторов наук, 76 кандидатов наук.



**В. В. Воронин,**  
д. ф.-м. н.,  
и. о. руководителя  
Отделения

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

В 2014 г. были проведены новые измерения электрического дипольного момента нейтрона (ЭДМ) с двухкамерным ЭДМ-спектрометром НИЦ КИ ПИЯФ на реакторе ILL (Гренобль, Франция). Использован двухкамерный магнитно-резонансный спектрометр с длительным удержанием ультрахолодных нейтронов. Полученные результаты на уровне достоверности 90 % устанавливают верхний предел на величину ЭДМ нейтрона  $|d_n| < 5,5 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{см}$ .

Исследование особенностей нейтронной оптики вблизи брэгговского отражения показало резо-

нансное поведение показателя преломления нейтрона при движении в кристалле с энергиями, близкими к брэгговским. В этом случае малое изменение энергии нейтрона на величину порядка брэгговской ширины ( $\Delta E/E \sim 10^{-5}$ ) приводит к существенному (на несколько десятков процентов) изменению потенциала взаимодействия нейтрона с кристаллом.

На реакторе SM-3 создана нейтринная лаборатория. Проведены первые измерения с прототипом нейтринного детектора на расстояниях 6–10 м от источника.

Впервые получено прямое экспериментальное доказательство протекания основополагающей термоядерной реакции на Солнце, в которой 2 ядра водорода образуют дейтерий:  $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$ . Эта реакция, называемая  $pp$ , ответственна за 99,8 % всей солнечной энергии, и до сих пор ни один эксперимент не наблюдал этот поток нейтрино напрямую. Эта работа опубликована в журнале Nature и включена в список 10 важнейших результатов в области физики 2014 г. Physics World's Top Ten Breakthroughs of 2014.

Впервые для поиска аксионов использовался болометрический BGO-детектор, охлажденный до температуры в несколько мК. Получено в 20 раз более строгое ограничение на область возможных значений масс  $m_A$  и констант связи аксиона с электроном  $g_{Ae}$  и нуклонами  $g_{AN}$ .

Проведено исследование снятия вырождения киральной симметрии в геликоидальной спиновой структуре  $Ho/Y$  сверхрешетки, индуцированного внешним магнитным полем. Используя оригинальную методику в эксперименте по рассеянию поляризованных нейтронов, установлено, что за счет приложения к образцу внешнего магнитного поля во время его охлаждения нарушается равновесная заселенность левых и правых спиральных доменов в спиновой структуре. Полученные экспериментальные результаты находят интерпретацию, связанную с появлением взаимодействия Дзялошинского – Мориа на границе раздела слоев в многослойной системе. Полученные результаты устанавливают общность нарушения киральной симметрии в многослойных системах с магнит-немагнитными границами на основе редкоземельных металлов.

Исследована структура металлических никелевых инвертированных опалоподобных кристаллов на мезоскопическом и атомном масштабах. Мезоскопическая структура инвертированных опалоподобных кристаллов на основе никеля полностью повторяет структуру исходной матрицы искусственного опалового кристалла с незначительным изменением постоянной решетки. Плотнопакетированные гексагональные слои упорядочены в гранецентрированную кубическую структуру (ГЦК). Вероятность образования ГЦК-мотива и средний поперечный размер структуры домена не зависят от количества слоев и остаются неизменными при условии, что исходная матрица является одинаковой для всех образцов. Мозаичность структуры возрастает с увеличением количества слоев.

Решены структура и функция бета-маннозидазы из *Trichoderma harzianum*. Сейчас большое внимание уделяется альтернативным видам топлива. В связи с этим актуально структурное изучение ферментов, преобразующих возобновляемые ресурсы и отходы производства в сырьё для производства альтернативного топлива. Филаментные грибы из рода *Trichoderma* секретируют

комплекс ферментов, обладающих высокой гидролитической активностью в отношении лигноцеллюлозы и галактоманнана – наиболее доступного природного возобновляемого сырья. Одним из важных гидролизующих ферментов такого комплекса является бета-маннозидаза. Получаемые в результате гидролиза моносахара – глюкоза, манноза, галактоза – могут быть использованы для производства биотоплива. Построена пространственная 3-мерная структура бета-маннозидазы из гриба *Tr. harzianum*. Это первая структура эукариотической бета-маннозидазы из 2-го семейства гликозид-гидролаз. На основе полученной структуры методами молекулярной динамики был изучен сайт связывания субстрата – галактоманнана, а также изучен механизм действия фермента.

Предложено новое направление развития нейтронной оптики – спин-манипуляционная оптика, основанная на квантовых аспектах взаимодействия нейтрона с магнитно-анизотропными слоями и означающая переход от 1D к 3D в поляризационной нейтронной оптике. Предложены решения, которые обеспечивают высокое отражение и слабую зависимость угла поворота спина от длины волны нейтрона и от угла скольжения. Данный подход открывает новые возможности для создания 3D-поляризаторов, спиновых манипуляторов, гиперполяризаторов, квантовых прецессоров и антипрецессоров спина.

Разработана методика нейтронно-активационного анализа сцинтилляционных керамик на основе  $Gd_2O_2S : Pr, Ce$ . Установлено содержание As, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, La, Sc, Tb, Zn, Zr, Pr, Gd, Na в исследуемых образцах в диапазоне концентраций от  $3 \cdot 10^{-8}$  до 2,0 %. Пределы обнаружения определяемых элементов составили  $(0,6-1,3) \cdot 10^{-8}$  %. Установлено, что относительный световой выход ( $\lambda_{\text{макс}} = 513$  нм) сцинтилляционных керамик уменьшается, когда увеличивается содержание Ce в образце. Максимальное значение относительного светового выхода, ~ 40 %, получается, когда содержание Ce достигает ~  $10^{-5}$  %. Показано, что легирование керамики Tb (~  $10^{-6}$  %) приводит к снижению послесвечения.

Сотрудниками Отделения опубликовано 85 научных работ в реферируемых журналах (39 статей в зарубежных изданиях), сделано 103 доклада на международных и российских научных мероприятиях, защищены 2 кандидатские диссертации.

## Отделение физики высоких энергий

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

- физики элементарных частиц (заведующий д. ф.-м. н. Г. Д. Алхазов);
- мезонной физики конденсированных сред (заведующий 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 отделов:

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

В Отделении работает 134 научных сотрудника, из них 13 докторов наук, 69 кандидатов наук.



**А. А. Воробьев,**  
член-корреспондент РАН,  
руководитель  
Отделения

Основными направлениями деятельности Отделения являются экспериментальные исследования в области физики элементарных частиц и физики

ядра. Кроме того, ведутся прикладные работы и исследования твердого тела  $\mu$ SR-методом. Как и в прежние годы, научные исследования велись на синхротроне НИЦ КИ ПИЯФ и на ускорителях ведущих зарубежных ядерных центров.

На установке ИРИС на синхротроне НИЦ КИ ПИЯФ методом резонансной ионизационной спектроскопии впервые измерены зарядовые радиусы и магнитные моменты у ряда ядер изотопов и изомеров Bi. На установке ISOLDE в ЦЕРН с участием физиков ОФВЭ методом резонансной ионизационной спектроскопии исследовано сосуществование форм у нейтронно-дефицитных ядер

изотопов Po. Также на установке ISOLDE исследован механизм запаздывающего деления у ядер At, Tl и Fr. У ядер изотопов At обнаружено сосуществование двух каналов деления – симметричного и асимметричного.

Продолжено проектирование масс-сепараторного комплекса ИРИНА для исследования на реакторе ПИК нейтронно-избыточных ядер, удаленных от полосы бета-стабильности. Спроектированы, изготовлены и протестированы прототипы линзовой и фокусирующей камер системы трансмиссии ионных пучков.

Ведется подготовка к работам на пучке циклотрона Ц-80 по производству генераторного радиоизотопа  $^{82}\text{Sr}$ . Для получения этого изотопа создан рабочий прототип мишенной станции.

С помощью  $\mu$ SR-метода на установке, расположенной на мюонном канале синхротрона НИЦ КИ ПИЯФ, проведены исследования магнитных фазовых переходов и распределения локальных магнитных полей в мультиферроике  $\text{Eu}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Mn}_2\text{O}_5$  в интервале температур 10–300 К. Исследование этого мультиферрика показало, что допирование образца  $\text{EuMn}_2\text{O}_5$  церием не приводит к изменению параметра

потери асимметрии  $a_s$  и скорости релаксации поляризации  $\lambda$ . Методом  $\mu$ SR начаты исследования керамики  $Tb_{0,95}Bi_{0,05}MnO_3$  и продолжены исследования манганита  $TbMnO_3$ , феррожидкости на основе  $CoFe_2O_4$  и образцов сталей FeCr ЭК-181 и ЧС-139.

Продолжен анализ сечений  $\pi p$ -рассеяния, измеренных ранее в экспериментах на пионных пучках НИЦ КИ ПИЯФ и НИЦ КИ ИТЭФ.

Продолжен анализ данных эксперимента OLYMPUS по упругому электрон-протонному и позитрон-протонному рассеяниям.

На мезонном пучке Института им. Пауля Шеррера (Швейцария) успешно проведен сеанс измерений в эксперименте MuSun по захвату мюона дейтерием. Создана система анализа примесей в криогенной ионизационной камере по ядрам отдачи и хроматографическим методом.

В НИЦ КИ ПИЯФ начата подготовка эксперимента PolFusion по исследованию  $dd$ -синтеза в столкновениях поляризованных дейтронов. Создан источник ионов дейтронов с энергией до 30 кэВ.

Наиболее значимые результаты были получены в экспериментах CMS, ATLAS, LHCb, ALICE и UA9 на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРН. То, что недавно открытая частица с массой  $150 \text{ ГэВ}/c^2$  – это бозон Хиггса, ключевая частица современной теории элементарных частиц (Стандартной модели – СМ), является в настоящее время уже твердо установленным фактом. Сейчас уточняются характеристики этой частицы. В частности, было показано, что это скалярная частица, т. е. ее спин равен нулю, как это и следует из теории.

Все имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные по элементарным частицам согласуются с предсказаниями СМ. В экспериментах CMS и LHCb впервые наблюден редкий процесс – распад  $B_s^0$ -мезона на два мюона. Этот процесс имеет высокую чувствительность к возможным проявлениям «новой физики» – за пределами СМ. Определенное в экспериментах сечение этого процесса согласуется со значением, предсказываемым СМ, так что проявлений «новой физики» не наблюдается.

В Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми на Тэватроне в экспериментах CDF и D0 (физики ОФВЭ участвовали в эксперименте D0) впервые наблюден другой редкий процесс,

который также имеет высокую чувствительность к возможным проявлениям «новой физики» – одиночное рождение  $t$ -кварков в  $s$ -канале при соударении протонов с антипротонами (при суммарной энергии 1,96 ТэВ). Измеренное сечение этого процесса  $\sigma = 1,29 \pm 0,25$  пбн согласуется с величиной сечения  $\sigma = 1,05 \pm 0,6$  пбн, предсказываемой СМ. Так что здесь тоже не наблюдается проявлений «новой физики».

Несмотря на успехи СМ в описании взаимодействия элементарных частиц, существует ряд вопросов, на которые она не дает ответа. В частности, СМ не предсказывает существование темной материи, не объясняет гравитационного взаимодействия, нейтринных осцилляций и т. д. Ряд моделей за рамками СМ, пытающихся ответить на эти вопросы, предсказывают существование тяжелых бозонов. Физики ОФВЭ участвовали в поиске таких бозонов ( $W'$  и  $Z'$ ) в данных эксперимента ATLAS. В результате были установлены новые пределы на величины сечений рождения этих барионов. Показано, что в протон-протонных столкновениях с полной энергией сталкивающихся частиц 8 ТэВ бозоны  $W'$  не наблюдаются с массой меньше 3,3 ТэВ, а бозоны  $Z'$  не наблюдаются с массой меньше 2,8 ТэВ.

В эксперименте LHCb продолжено исследование обнаруженного группой НИЦ КИ ПИЯФ дважды Кабиббо-запрещенного распада  $\Xi'_c \rightarrow p\phi$ .

При участии наших физиков в экспериментах CMS и ATLAS исследовано электрослабое рождение  $Z'$ -бозона с двумя ассоциированными струями. Измерено сечение образования  $Z'$ -бозонов в этом процессе.

Продолжено исследование возможных проявлений БФКЛ-эффектов в азимутальных корреляциях двухструйных процессов в протон-протонных соударениях.

Интересный, неожиданный результат был получен в эксперименте ALICE. Ранее в эксперименте PHENIX в ядро-ядерных соударениях наблюдалось подавление выхода частиц чармония. Этот результат интерпретировался как образование в ядро-ядерных столкновениях кварк-глюонной жидкости. Предполагалось, что в эксперименте ALICE при более высокой энергии сталкивающихся частиц подавление выхода чармония будет приблизительно таким же. Однако оно оказалось



значительно слабее. Полученный результат ждет теоретического объяснения.

В результате анализа ультрапериферических взаимодействий в экспериментальных данных детекторов ALICE и LHCb получена важная информация о распределении глюонной плотности в нуклоне при малых значениях фейнмановской переменной  $x$ .

В рамках эксперимента UA9 разработаны и изготовлены новые кристаллические дефлекторы пучков БАК. Проведены исследования характеристик этих новых кристаллов.

В коллайдерных детекторах БАК ведется работа по подготовке аппаратуры к новому набору экспериментальных данных при более высокой энергии и большей интенсивности пучков сталкивающихся частиц.

Физики ОФВЭ участвуют в создании детекторов CBM, PANDA, R3B и MATS для проведения совместных научных исследований на строящемся ускорительном комплексе FAIR в Германии (Дармштадт). FAIR – это сложный ускорительный комплекс, который предоставит высокоэнергичные пучки протонов, антипротонов, тяжелых стабильных ионов и вторичные пучки экзотических ядер с беспрецедентным качеством и высокой интенсивностью. Эти пучки будут использоваться в ряде экспериментальных программ, в т. ч. и в экспериментах CBM, PANDA, R3B и MATS.

В эксперименте CBM в протон-ядерных и ядро-ядерных соударениях будет изучаться ядерная материя в сверхплотном состоянии при высокой

температуре. НИЦ КИ ПИЯФ участвует в создании мюонной системы и черенковского детектора (программа CBM). Проект PANDA посвящен прецизионному исследованию соударений антипротонов со свободными протонами и с нуклонами в ядрах. В проекте PANDA Институт отвечает за создание передних времяпролетных детекторов. Эксперимент MATS посвящен прецизионному измерению масс экзотических ядер, удаленных от полосы стабильности. Измерения планируется проводить с помощью специальных ионных ловушек. Массы ядер будут измеряться с относительной точностью до  $10^{-9}$ . Физики ОФВЭ участвуют в создании экспериментальной установки MATS, в частности в разработке и изготовлении калибратора масс. Эксперимент R3B посвящен исследованию в ядерных реакциях свойств экзотических ядер. В данном проекте НИЦ КИ ПИЯФ участвует в создании времяпролетного нейтронного спектрометра NeuLAND, активной мишени АСТАР и протонных трековых детекторов. По завершении создания экспериментальных установок и запуска ускорительного комплекса FAIR Институт будет участвовать в проведении физических исследований по программам перечисленных проектов.

Сотрудниками Отделения в 2014 г. опубликовано 211 научных работ в реферируемых журналах (205 статей в зарубежных изданиях), сделано 42 доклада на международных и российских научных мероприятиях, защищена 1 кандидатская диссертация.

## Отделение молекулярной и радиационной биофизики

Отделение молекулярной и радиационной биофизики (ОМРБ) – руководитель д. б. н. В. Г. Королев – состоит из 13 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 д. 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. 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)

и научно-технического отдела биоэлектроники (начальник А. П. Роганов).

В Отделении работает 117 научных сотрудников, из них 16 докторов наук, 62 кандидата наук.



**В. Г. Королев,**

д. б. н.,  
руководитель  
Отделения

В ОМРБ активно ведутся исследования макромолекулярных комплексов методами малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) и методами молекулярного моделирования (Лаборатория биофизики макромолекул, зав. лаб. к. ф.-м. н. В. В. Исаев-Иванов). В работе были разработаны программные утилиты для расчета спектров МУРН по рассчитанным полноатомным траекториям молекулярной динамики, позволяющие учитывать конформационную подвижность белка при расчете спектров МУРН. Были получены экспериментальные спектры МУРН для всех моделей. Спектры МУРН для комплекса белка RecX с онДНК находились в хорошем соответствии с расчетными спектрами, а спектры комплекса белка RecX с пресинаптическим комплексом белка RecA оказались близки к расчетным спектрам для модели с соотношением RecA : RecX 12 : 5. Важным

результатом этой работы для структурной биологии является тот факт, что использование методов молекулярной динамики позволяет получить полноатомную структуру исследуемых мультимолекулярных комплексов в нативных условиях, используя для верификации предлагаемых моделей низко разрешающую экспериментальную методику, какой являются МУРН, и МУРР (малоугловое рентгеновское рассеяние).

Традиционными для ОМРБ являются исследования молекулярных механизмов биосинтеза белка. В работах Лаборатории биосинтеза белка (зав. лаб. к. ф.-м. н. А. Л. Коневега) исследовались молекулярные механизмы транслокации, а также редких событий трансляции, сдвига рамки считывания и трансляционного шунтирования. Помимо равномерного поступательного движения рибосомы по матричной РНК (шаг размером в 3 нуклеотида) также существуют различные механизмы трансляционного рекодирования, например сдвиг рамки считывания вперед или назад. Реализация этих процессов позволяет увеличить количество информации, зашифрованной в геноме, и дополнительно влиять на регуляцию экспрессии генов. В работе В. И. Катунина с соавторами изучался механизм запрограммированного сдвига рамки считывания на 1 нуклеотид

назад посредством детального рассмотрения продвижения рибосомы по участку мРНК, для которого характерен вышеупомянутый сдвиг рамки считывания. Для реализации сдвига рамки считывания необходимо наличие так называемой скользящей последовательности (по которой будет происходить сдвиг рибосомы назад) и псевдоузла, временно препятствующего продвижению рибосомы вперед. Наличие и эффективность работы этих компонентов в созданной *in vitro* системе были валидированы *in vivo*. В работе представлены результаты анализа, который включает кинетические данные пошаговой трансляции скользящей последовательности, встраивания аминокислот в полипептидные последовательности, соответствующие нормальному и сдвинутому назад положению рамки считывания, и реакции транслокации, обусловленной запрограммированным сдвигом рамки считывания. В работе А. Л. Коневеги с соавторами проведено изучение молекулярного механизма другого редкого события – трансляционного шунтирования. При трансляции гена 60 бактериофага Т4 после присоединения 46 аминокислот рибосома проскальзывает на 50 нуклеотидов и возобновляет синтез. Таким образом осуществляется синтез полипептида с двух непоследовательных рамок считывания. В работе показано, что способность к трансляционному шунтированию является внутренним свойством рибосомы, а все необходимые и достаточные сигналы для осуществления данного редкого события кодируются в транскрибируемой мРНК. Существенную роль играют как аминокислотная последовательность лидерного пептида, так и элементы вторичной структуры мРНК, определяющие, в частности, место возобновления синтеза. Для эффективного трансляционного шунтирования не требуются дополнительные белковые факторы. В третьей работе этой лаборатории показано, что быстрая транслокация, катализируемая EF-G и сопровождающаяся гидролизом GTP, происходит одновременно на субчастицах 30S и 50S рибосомного комплекса. Использование антибиотиков или мутантных форм EF-G позволяет рассинхронизировать транслокацию на субчастицах 30S и 50S. В этом случае транслокация на субчастице 50S происходит через дополнительное промежуточное состояние A/P2, для достижения которого достаточно использования свободной энергии связывания EF-G с рибосомой, тогда как полная

транслокация на субчастице 50S и транслокация на субчастице 30S требуют гидролиза GTP и полноценного функционального белка EF-G.

Также в число наиболее значимых научных достижений ОМПБ можно отнести работу по изучению возможной связи болезни Паркинсона (БП) и лизосомных болезней накопления (Лаборатория медицинской генетики человека, зав. лаб. д. б. н. А. Л. Шварцман), около 10–15 % пациентов с БП сообщают о семейной форме заболевания. В настоящее время идентифицировано 8 генов (*SNCA*, *LRRK2*, *PINK1*, *PARK2*, *PARK7*, *PLA2G6*, *FBXO7*, *ATP13A2*), мутации в которых приводят к развитию наследственных форм заболевания, однако данные мутации являются крайне редкими. Наиболее важными с точки зрения формирования групп риска развития БП являются гены *GBA*, *SMPD1* и *NPC1*, мутации в которых повышают риск развития БП в 8–9 раз, а частота их выявления колеблется от 0,5 до 5 % в зависимости от популяции. Наиболее распространенными являются мутации в гене глюкоцереброзидазы (*GBA*). Среди жителей европейской части России каждый 250-й может являться носителем мутации в гене *GBA*, а значит, иметь высокий риск развития БП. Было предположено, что мутации в генах лизосомных ферментов, приводящие к дисфункции лизосом, могут приводить к накоплению и олигомеризации белка альфа-синуклеина, т. е. способствовать формированию именно тех форм белка, которые являются нейротоксичными. Ранее было известно, что около половины альфа-синуклеина в клетке деградирует через лизосомы. Для проверки выдвинутой гипотезы были проведены исследования уровня олигомерных форм белка альфа-синуклеина в плазме крови у 41 пациента с болезнью Гоше и у 40 лиц контрольной группы. Проведенное исследование впервые показало повышение нейротоксичных олигомерных форм белка при наличии мутаций в генах высокого риска развития БП, что позволило связать такие далекие заболевания, как БП и лизосомные болезни накопления через агрегацию этого белка. Полученные нами данные открывают перспективу для обсуждения стратегии лечения такого нейродегенеративного заболевания, как БП (на сегодняшний момент считается неизлечимым).

В работе М. Г. Петухова (Лаборатория биофизики макромолекул) исследовались механизмы

гидролиза АТФ в белках *mkTIP49* путем введения точечных мутаций аминокислот в активном центре белка и исследования их последствий теоретическими и биохимическими методами. В частности, впервые была предложена аминокислотная замена N326Q из соседней к каталитической субъединицы белка, которая сдвигает полярную аминокислотную группу ближе к АТФ по сравнению с белком дикого типа и таким образом, согласно расчетам, может привести к образованию нового донора водородной связи для атакующей АТФ-молекулы воды. Теоретически было предсказано, что такая замена переориентирует атакующую молекулу воды, а также может препятствовать нормальной координации иона  $Mg^{2+}$  с D296 из Walker B. Как и предсказывалось, от такой перестановки АТФазы активность мутанта N326Q *mkTIP49* была полностью потеряна в биохимических экспериментах. Эти экспериментальные результаты подтвердили не только расчеты, но и правильность выбранного механизма гидролиза АТФ в исследуемых белках, а также и правильность пространственного расположения всех участников этой реакции в активном центре белка, включая и неизвестную пока структуру мультимерного комплекса исследуемого белка.

В работе, посвященной влиянию структуры хроматина на мутационный процесс в дрожжах (Лаборатория генетики эукариот, зав. лаб. д. б. н. В. Г. Королев), изучалась роль гена *SIN3* в этом процессе. Продукт гена *SIN3* функционирует в дрожжах *Saccharomyces cerevisiae* как репрессор большого числа генов в составе гистондеацетилазного комплекса RPD3. Было изучено влияние мутации *sin3* на мутагенез в дрожжах *S. cerevisiae*. В ходе исследования были сконструированы одиночные и двойные мутанты по гену *SIN3* и ключевым генам репарационных систем: *RAD1* – нуклеотидная эксцизионная репарация (НРР), *RAD52* – гомологичная рекомбинационная репарация (ГРР). Анализ мутантов *sin3*, *rad1* и *rad1sin3* позволил установить, что мутация *sin3* приводит к увеличению чувствительности гаплоидных клеток дрожжей при высоких дозах УФ, что связано с гибелью почкующихся клеток. Это свидетельствует о нарушениях в работе механизма ГРР.

Инактивация комплекса RPD3 в клетках дрожжей приводит к нарушениям мутационного процесса. Уровень УФ индуцированного мутагенеза у мутанта *sin3* понижен. Это означает, что белок Sin3 негативно регулирует уровень пула дНТФ. При нарушении этой регуляции можно ожидать, что уровень индуцированного мутагенеза будет понижен, что мы наблюдали в наших экспериментах. Аналогичным образом мутация *sin3* влияет на спонтанный мутагенез, как репликативный, так и репаративный. Таким образом, ген *SIN3* контролирует регуляцию уровня дНТФ как при репликации, так и репарации.

В ОМРБ ведутся работы по созданию белкового профиля злокачественных опухолей – глиобластом (Лаборатория протеомики, зав. лаб. д. б. н. С. Н. Нарыжный, и Лаборатория клеточной биологии, зав. лаб. к. б. н. М. В. Филатов). Разделение белков двумерным электрофорезом с последующим анализом, масс-спектрометрической и иммунологической идентификацией белков позволило визуализировать более 600 белковых пятен и идентифицировать более 130 из них. Протеомные профили в нормальных и глиобластомных клетках очень похожи, однако уровни содержания многих белков сильно отличаются. Среди таких белков выделяются ядерный антиген делящихся клеток (Proliferating Cell Nuclear Antigen, PCNA) и p53 (TP53). Особенно интересные результаты были получены для белка p53. По сравнению с нормальными, в глиобластомных клетках уровень данного белка не только сильно повышен, но еще и сопровождается появлением множества дополнительных форм. Полученные результаты, с одной стороны, подтверждают опубликованные ранее данные о некоторых раковых белках-маркерах, как общих, так и связанных с глиобластомой, с другой стороны, указывают на возможность использования в глиобластомных анализах в качестве биомаркеров PCNA и p53.

Сотрудниками Отделения опубликовано 68 научных работ в реферируемых журналах (28 статей в зарубежных изданиях), сделано 75 докладов на международных и российских научных мероприятиях, защищена 1 кандидатская диссертация.

## 50 лет Отделению молекулярной и радиационной биофизики

25 декабря 1964 г. вышло постановление Академии наук СССР, в котором было обозначено решение об организации Лаборатории радиационной генетики в филиале Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе (ныне НИЦ КИ ПИЯФ) – первой лаборатории на базе Радиобиологического отдела (РБО). Изначально целью создания Отдела было исследование влияния радиоактивного излучения на организм. Среди основных достижений РБО – создание ЭПР-спектрометра в 1967 г. (В. Н. Фомичев и сотр.), открытие явления цитодукции у дрожжей в 1969 г. (И. А. Захаров и сотр.) и создание первой инактивированной противогриппозной вакцины в 1971 г. (С. Е. Бреслер и сотр.)

В 1970-х гг. удельный вес работ по молекулярной биологии, биофизике и генетике существенно превысил радиобиологическое направление исследований, в связи с чем в 1976 г. РБО был преобразован в Отделение молекулярной и радиационной биофизики (ОМРБ). За годы существования Отделения было выполнено множество работ фундаментального и прикладного характера. Так, в 1980–1981 гг. были продемонстрированы серьезные преимущества разработанных в Гатчине катализаторов для очистки нефти от серы (Г. А. Багян и сотр.), в 1989 г. – предложено применять метод полимеразной цепной реакции для диагностики наследственных заболеваний человека (Е. И. Шварц и соавт.), в 1992 г. – получена кристаллическая структура глюкоамилазы (Л. М. Фирсов и сотр.)

Сегодня ОМРБ состоит из 13 лабораторий, в которых трудятся 190 сотрудников, причем 16 из них имеют докторскую, а 66 – кандидатскую научные степени. С 1976 г. ОМРБ проводит Зимние биологические школы, а с 2008 г. – конференции, посвященные памяти С. Е. Бреслера – Бреслеровские чтения. Особой гордостью ОМРБ является число работающих здесь молодых сотрудников, что дает Отделению право считаться самым «молодым» структурным подразделением Института.

ОМРБ сотрудничает со многими научно-исследовательскими институтами и вузами (в т. ч. с Научно-исследовательским институтом акушерства и гинекологии им. Д. О. Отта, Отделом молекулярно-генетических и нанобиологических технологий Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. И. П. Павлова, Научно-исследовательским институтом экспериментальной медицины, Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом, Институтом молекулярной генетики РАН, Объединенным институтом ядерных исследований, Государственным научно-исследовательским институтом генетики и селекции промышленных микроорганизмов, Радиобиологическим обществом Украины и Институтом клеточной биологии и генетической инженерии НАН Украины и многими другими) и внесло огромный вклад в формирование научного потенциала Российской Федерации и воспитание множества талантливых ученых.



## Отделение перспективных разработок

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

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

**и 2 отделов:**

- ускорительного (заведующий к. т. н. Е. М. Иванов);
- информационных технологий и автоматизации (начальник д. т. н. Ю.Ф. Рябов).

**В ОПР работает 43 научных сотрудника, из них 5 докторов наук, 15 кандидатов наук.**



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

Основным направлением деятельности Ускорительного отдела (УО) и Лаборатории физики и техники ускорителей является эксплуатация синхроциклотрона (СЦ-1000), проведение на нем научно-исследовательских и прикладных работ, а также настройка и оптимизация систем циклотрона Ц-80.

Научно-исследовательский комплекс на базе СЦ-1000 используется для исследований в области физики элементарных частиц, структуры атомного ядра и механизма ядерных реакций, физики твердого тела, а также в области прикладной физики и для ядерно-медицинских исследований. В 2014 г. синхроциклотрон СЦ-1000 отработал 2 784 часа.

Научно-исследовательский комплекс на базе СЦ-1000 используется для исследований в области физики элементарных частиц, структуры атомного ядра и механизма ядерных реакций, физики твердого тела, а также в области прикладной физики и для ядерно-медицинских исследований. В 2014 г. синхроциклотрон СЦ-1000 отработал 2 784 часа.

Основные направления фундаментальных и прикладных работ на ускорителе: исследование новых материалов методом вращения спина мюона ( $\mu$ SR-метод) – 20 %; исследование короткоживущих изотопов (Лаборатория короткоживущих ядер) – 14 %; договорные работы – 19 %; усовершенствование ускорителя и трактов – 14 %; исследование ядерной материи на спектрометре МАП – 10 %; каналирование протонов – 7 %.

Выполнена модернизация системы однооборотного сброса протонного пучка. Работа потребовала новых расчетов и изменения конструкции установки. Переход на современную элементную базу позволил получить фронт отклоняющего напряжения в требуемом диапазоне 50–60 нс при амплитуде около 120 кВ. Модернизация системы однооборотного сброса пучка позволила существенно упростить и ускорить настройку системы, а также увеличить ее надежность.

Разработан проект модернизации систем синхроциклотрона. Проводится модернизация комплекса протонной терапии на пучке 1 000 МэВ.

Обширные конструкторские и экспериментальные работы были проведены по программе исследования радиационной стойкости электронной компонентной базы (ЭКБ) для авиации и космоса: оборудованы 2 испытательных стенда для радиационной стойкости ЭКБ на нейтронах с атмосферным спектром 1–1 000 МэВ и протонах с энергией 200–1 000 МэВ, включающие изготовление дистанционно управляемого деградера протонного пучка для изменения его энергии, разработку и изготовление измерителей интенсивности и профиля протонного и нейтронного пучков, создание бокса-камеры температурного режима для испытания ЭКБ-плат, создание 2 магнетометров для стабилизации магнитных полей СЦ-1000 и СП-40.

Ведутся работы по созданию центра радиационных испытаний ЭКБ. Выполнены расчеты

и оптимизированы параметры нового тракта P2 с поглотителем из меди в диапазоне энергий 50, 100–1 000 МэВ с шагом 100 МэВ, предназначенного для испытаний ЭКБ. Введено в эксплуатацию компьютерное управление 6 линзами АСУМЭ (совместно с ОНИ).

На пучках СЦ-1000 в течение года выполнено 8 договорных работ по исследованию радиационной стойкости ЭКБ, были проведены испытания ЭКБ: ОАО «ЭНПО СПЭЛС», (Москва) – 1; ОАО «РНИИ «Электронстандарт» (Санкт-Петербург) – 1; ООО «НПЦ «Гранат» (Санкт-Петербург) – 2; НИИ космического приборостроения (Москва) – 2; Обнинск – 1; МФТИ – 1.

В 2014 г. в УО проводилась настройка и оптимизация систем Ц-80 для получения проектных параметров пучка (совместно с ОАО «НИИЭФА»). В результате проделанных работ 5 декабря 2014 г. осуществлен запуск Ц-80, получен ускоренный пучок Н<sup>+</sup>-ионов до радиуса 30 см интенсивностью 30 мкА и энергией ~ 10 МэВ. Работы продолжаются.

В Лаборатории информационно-вычислительных систем (ЛИВС) продолжались работы по проекту WLCG: модификация ПО (Grid FTR, DPM, SRM) с целью увеличения производительности передачи данных на грид-сайтах, разработка ПО для распределенной грид-сети по обработке данных экспериментов на Большом адронном коллайдере (БАК) и работа на кластерах БАК, обслуживание экспериментов (за 2014 г. просчитано 631 тыс. заданий).

Проводились конструкторско-технологические разработки (совместно с ОФВЭ и ОНИ): газовых детекторов TGEM и Monolithic TGEM, изготовление печатных плат, электродов пропкаммер для ЛНСб ЦЕРН и др. Важно отметить активное участие сотрудников ЛИВС в совместных программах с ОФВЭ на БАК.

В Лаборатории радиационной физики (ЛРФ) на основе программного комплекса Geant4 создана виртуальная модель системы формирования протонного пучка для офтальмологии. Рассчитано несколько вариантов схем формирования. Предложена оптимальная система формирования офтальмологического протонного пучка от Ц-80.

Исследовалось упругое рассеяние протонов и рождение  $\pi$ -мезонов в  $pp$ -взаимодействиях, набор статистики и обработка данных с пузырьковой камеры.

Совместно с УО проводились работы на протонном пучке СЦ-1000 в рамках договора с ВНИИКП (ДИК, деградер). Проведены испытания ЭКБ: ЗАО «НПО «ИМПУЛЬС» (Санкт-Петербург), ООО «НИИ Телевидения» (Санкт-Петербург).

Исследовалось радиационное воздействие излучений на ПЗС-матрицы. Изучалось пространственное и временное распределения спайков в матрицах, облученных протонами и нейтронами.

В Лаборатории голографических информационно-измерительных систем (ЛГИИС) выполнена разработка и проведена аттестация во ВНИИИМ им. Д. И. Менделеева приборов мирового уровня на базе метрологических линейных и радиальных голографических решеток (МАГДР и МРГДР). Разработан и создан 3D-наноуниверсальный измерительный микроскоп УИМ-23 точностью 0,6 мкм и разрешением по каждой из 3 координат 10 нм. Проведена разработка ультрапрецизионного фрезерного станка с разрешением 10 нм при длине 1 250 мм и 1 нм при ширине 150 мм. (совместно с предприятиями «Ресурс точности», Москва, Тула, Ногинск). Участие ЛГИИС и д. ф.-м. н. Б. Г. Туруханов в XX Международной выставке-конгрессе «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (HI-TECH-2014, Санкт-Петербург) было отмечено 2 дипломами и медалями лауреата конкурса.

Основным фундаментальным направлением научно-исследовательских работ Лаборатории квантовой химии (ЛКХ) являются расчеты по оценке электрического дипольного момента (ЭДМ) электрона в молекулах с «тяжелыми атомами».

Проведены исследования периодичности свойств сверхтяжелых элементов, построение химических графов; расчеты для экспериментов по поиску  $e$ -ЭДМ и «шиффовского момента»; исследование высших степеней окисления актинидов (Pu, Am, Cm); уточнение величин химических сдвигов рентгеноэмиссионных спектров; идентификация спектров катиона HfF<sup>+</sup> (Hf- $d$ -элемент).

Проведено моделирование свойств сверхтяжелых элементов для их химической идентификации. Проводились эксперименты в ОИЯИ, GSI (Дармштадт), RIKEN (Вако).

Сотрудниками Отделения опубликовано 14 научных работ в реферируемых журналах, сделано 18 докладов на международных и российских научных мероприятиях, получен 1 патент.

$$\Psi(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-ikx) \Psi(x) dx$$

$$k_1 = \sqrt{k_2^2 - \frac{1}{4}}$$

$$r = \frac{\sqrt{1+x^2} - x}{\sqrt{1+x^2} + x}$$

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

$$t \exp(ik_1 l) / [1 + r^2 \exp(2ik_1 l)]$$

$$l = 2a + \dots$$

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

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

$$\rho = 2k_1 l$$

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

$$T = \dots$$

$$T = \dots$$

$$T = \dots$$

$$T = \dots$$

$$T = \dots$$

$$T = \dots$$



# Теоретическая и математическая физика

- 26 Перенормировка кондактансов соединений  
квантовых проволок со взаимодействием
- 28 Дифракционные процессы на Большом адронном коллайдере:  
роль поперечных импульсов партонов
- 30 Спектроскопия и электронная структура ионов вольфрама  
в термоядерной и лазерной плазме
- 32 Матрицы смешивания кварков и лептонов –  
проявления нарушенной зеркальной симметрии
- 33 Вычисление поправок к параметрам Стандартной модели
- 35 Теория сильно коррелированных ферми-систем
- 36 Померон БФКЛ и структура вакуума  
в квантовой хромодинамике
- 38 Поиск эффектов несохранения  $P$ - и  $T$ ,  $P$ -четности  
в двухатомных системах
- 40 Химия элементов острова стабильности

## Перенормировка кондактансов соединений квантовых проволок со взаимодействием

Д. Н. Аристов

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

Говорят, что вся радиотехника – это наука о плохом контакте. В этом смысле моя деятельность в последние годы относится к радиотехнике в области теоретической физики, а именно к теоретическим исследованиям контактов и соединений квантовых проволок.

Интерес к этой теме связан с тем, что современная электроника становится все более миниатюрной. Развитие нанотехнологий приводит к размерам, при которых квантовые эффекты становятся существенными. В применении к полезным устройствам следует выделить два момента. Во-первых, чем тоньше проводки, через которые пропускается ток, тем значительнее то, что называется размерным квантованием. Оказывается, поперечное сечение провода может стать настолько малым, что проводящие ток электроны будут передаваться по этому проводу в некотором смысле «поштучно». В такой ситуации становится существенным второй момент: любое реальное электронное устройство состоит из разных элементов, которые соединены между собой через стыки и разветвления.

Обычно контакты между различными проводками лишь частично прозрачны для пропускания электрического тока. Эта неидеальная прозрачность довольно сильно зависит не только от самого контакта, но и от взаимодействия между подвижными электронами в проводе. Такое взаимодействие мало для приборов на основе традиционных полупроводников. В то же время новые технологические элементы (например, близкие родственники графена – углеродные нанотрубки) обладают поперечным размером в несколько нанометров (тысячных долей микрона), и межэлектронное взаимодействие в них весьма заметно.

Теоретически показано и экспериментально неоднократно подтверждено, что коэффициент

пропускания контактов, т. н. кондактанс, снижается при учете отталкивания между электронами. Этот квантовый эффект, называемый перенормировкой, усиливается при понижении температуры и с увеличением длины провода. Отсюда становится понятен интерес исследователей и технологов к «бесшовным» соединениям нанотрубок.

Теоретические исследования влияния взаимодействия электронов на кондактанс провода с внутренним дефектом появились в первой половине 1990-х гг. Тогда же был теоретически изучен кондактанс соединения различных проводов. Соединение нескольких проводов (три и более) привлекло внимание теоретиков в начале 2000-х гг. Взаимодействие между подвижными электронами

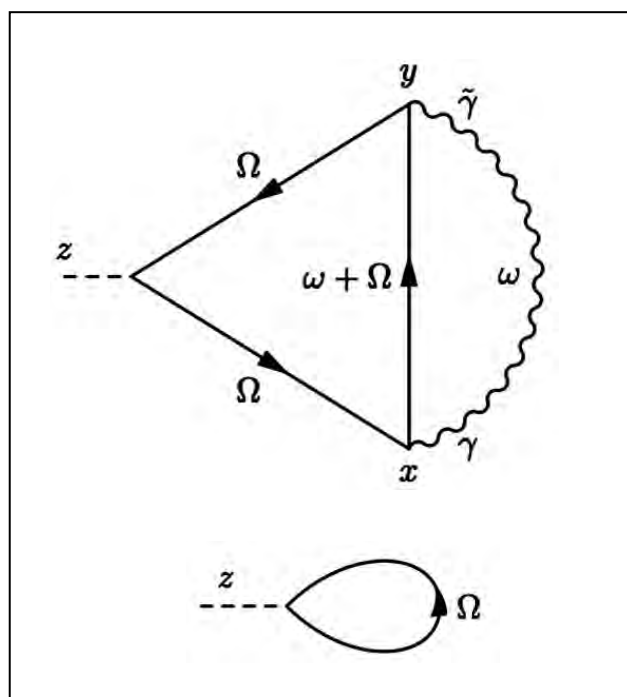


Рис. 1. Схематическое изображение соединения трех проводов со взаимодействием

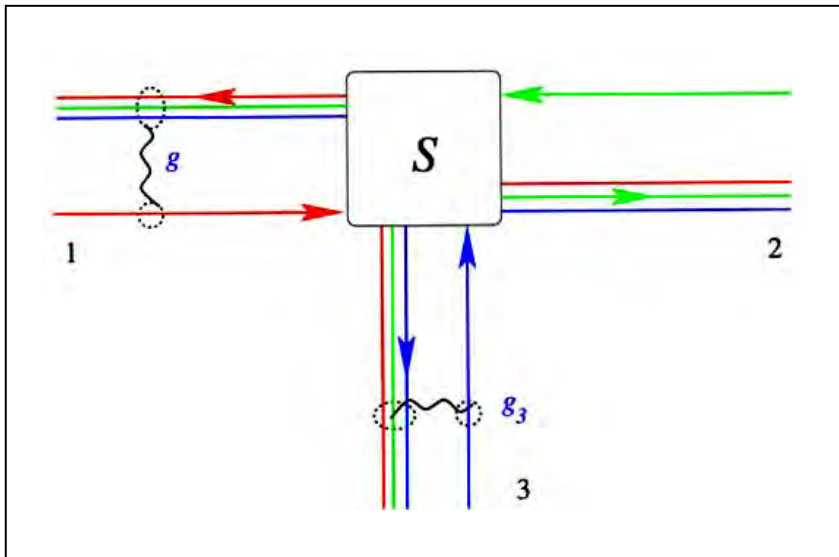


Рис. 2. Первые диаграммы для тока в технике Келдыша

в квантовых проволоках, как правило, приводит к существенным эффектам и поэтому должно быть учтено по возможности полностью. Для теоретического описания этого используются довольно изощренные методы (конформная теория поля, бозонизация), которые были разработаны в 1970-х гг. вне всякой связи с нанотехнологиями. В 1990-е гг. эти методы перестали быть «игрушками теоретиков» и стали рабочим инструментом при описании физики квантовых проволок.

Целью последних работ является описание перенормировки кондактанса соединения нескольких проводов как функции нескольких параметров задачи. Ранее мы с моим соавтором P. Wölfle предложили новый метод анализа задачи об одном проводе с внутренним дефектом. Оказалось, что мы точно воспроизводим ключевые результаты исследований других авторов, полученные методами конформной теории поля.

Это позволило применить наш метод к качественно более сложной ситуации соединения нескольких проводов. По сравнению с предыдущими теоретическими работами на эту тему наш

метод анализа обладает большей гибкостью и полнотой. В настоящий момент мы завершили цикл работ с достаточно исчерпывающим анализом задачи о соединении трех проводов (рис. 1), в эту категорию также попадает провод, касающийся своим концом середины другого длинного провода.

Предложенный метод анализа обобщен на неравновесную ситуацию. Для отработки методики заново решена задача о примеси в середине квантовой проволоки, присоединенной к контактам, характеризуемым различными химическими потенциалами. Нам пришлось вместо обычных функций Грина рассматривать матричные  $2 \times 2$  функции в формализме Келдыша (рис. 2). Планируется обобщить анализ неравновесных эффектов для большего числа проводов.

На очереди также задача о стыке четырех проводов (или касании двух проводов в их средней части). Данная задача, возможно, имеет большее значение для будущих приложений, но сложнее для анализа.

Работа поддержана грантом РФФ 1422-00281.

1. Aristov D. N. // Phys. Rev. B. 2011. V. 83. P. 115446.
2. Aristov D. N., Wölfle P. // Phys. Rev. B. 2011. V. 84. P. 155426.
3. Aristov D. N., Wölfle P. // Phys. Rev. B. 2012. V. 86. P. 035137.
4. Aristov D. N., Wölfle P. // Phys. Rev. B. 2013. V. 88. P. 075131.
5. Aristov D. N., Wölfle P. arXiv:1408.4914.

## Дифракционные процессы на Большом адронном коллайдере: роль поперечных импульсов партонов

М. Г. Рыскин

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

Обычно мягкие и дифракционные взаимодействия при высоких энергиях описываются в рамках реджеонной диаграммной техники, где главным элементом является затравочная амплитуда рассеяния двух частиц высоких энергий – померон и учитываются процессы с обменом многими померонами, а также взаимодействия самих померонов. Ранее предполагалось, что поперечные импульсы  $k_T$  частиц (партонов), составляющих померон, ограничены, а вершины взаимодействия померонов являются константами.

Однако квантовая хромодинамика (КХД) является логарифмической теорией с безразмерной константой связи, и в случае БФКЛ-померона на каждом шаге эволюции  $k_T$  партона может уменьшаться либо увеличиваться в несколько раз. Более того, многопомеронные диаграммы, описывающие абсорбционные поправки, приводят к более быстрому поглощению партонов с малыми  $k_T$ , поскольку сечение поглощения  $\sigma_{abs} \sim 1 / k_T^2$ . В результате средний поперечный импульс партонов растет. Этот эффект проявляется сильнее

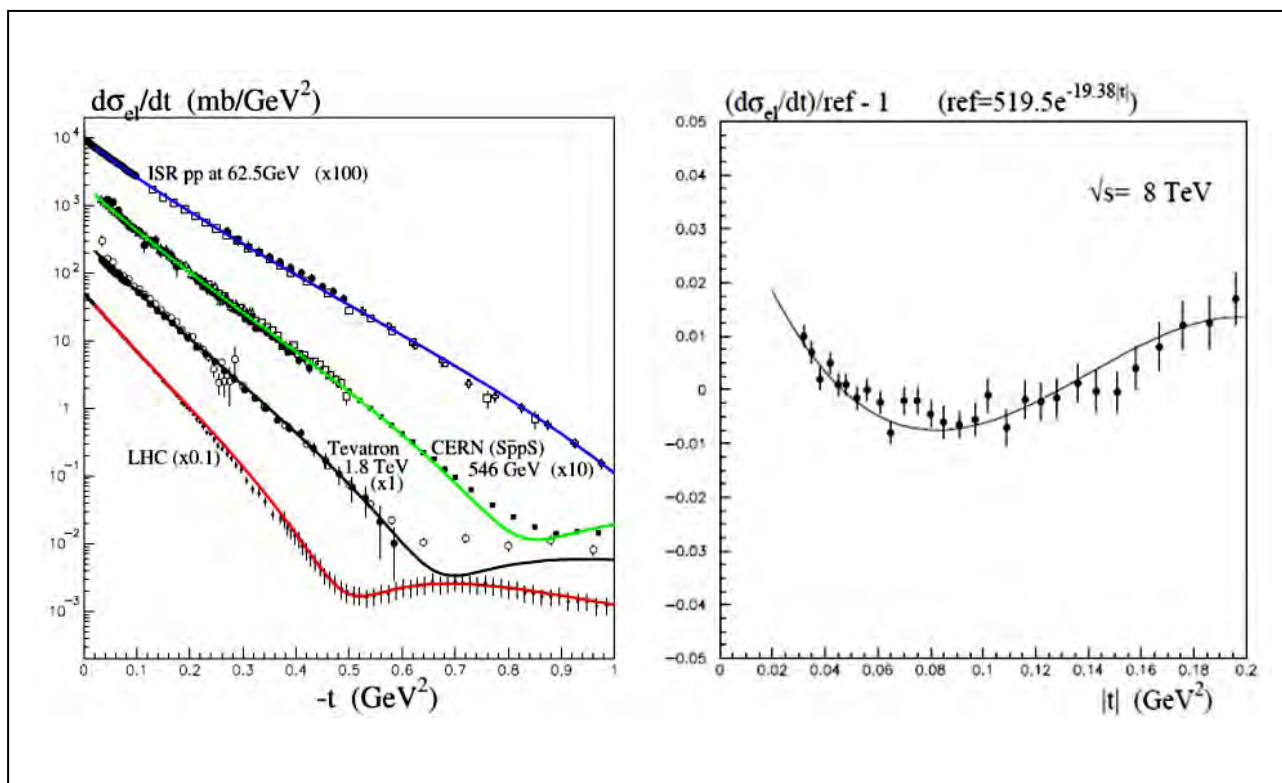
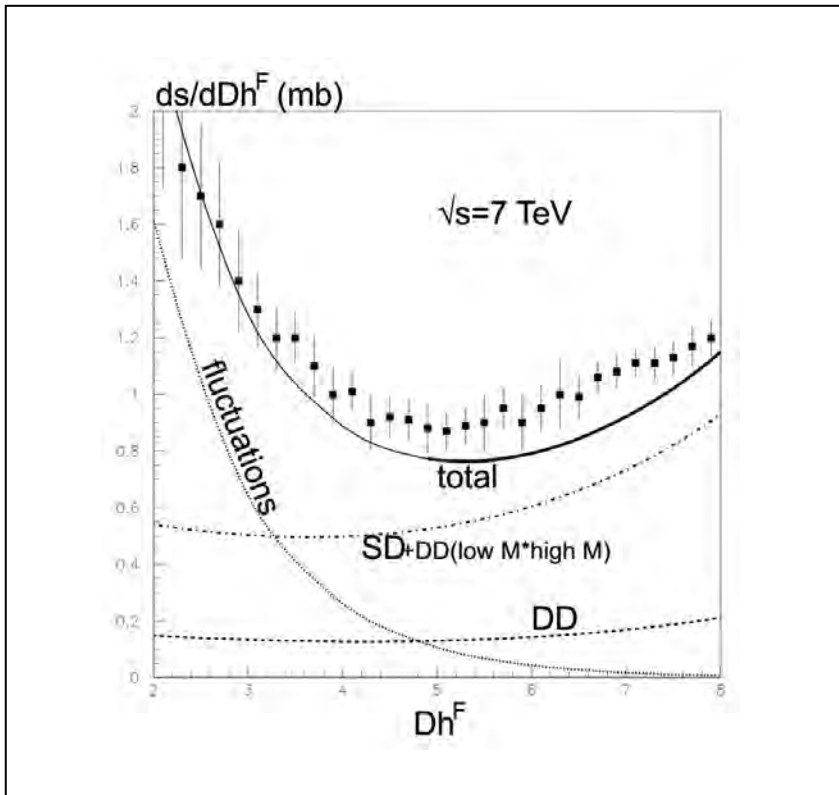


Рис. 1. Зависимость дифференциальных сечений рассеяния протонов  $d\sigma_{el}/dt$  от переданного импульса  $t$ . Справа: отклонение от чисто экспоненциального поведения, наблюдаемое при  $\sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}$



**Рис. 2.** Сечение событий с дифракционной диссоциацией протона в зависимости от размера незаполненного интервала быстрот  $Dh^F$

при высоких энергиях, т. к. с энергией увеличиваются сечения, а вместе с ними и вероятность поглощения партонов с малыми  $k_T$ .

Иными словами, динамика «мягких» взаимодействий при высоких энергиях начинает определяться «жесткими» процессами с большими  $k_T$  и благодаря этому может рассматриваться методами теории возмущений КХД.

Помимо увеличения поперечных импульсов вторичных частиц рост  $k_T$  партонов приводит к уменьшению вершин взаимодействия померонов; эти вершины имеют размерность, и их величина определяется обратной величиной  $k_T$ . Соответственно падает вероятность дифракционной диссоциации протона.

Учитывая эти эффекты, удалось успешно описать поведение полных и упругих сечений  $pp$ -рассеяния в широком диапазоне энергий (рис. 1), а также

наблюдаемые на Большом адронном коллайдере вероятности дифракционной диссоциации в состоянии как с малыми, так и с большими массами.

В случае диссоциации в состояние с малой массой  $M_x < 3,4$  ГэВ при энергии  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ TOTEM наблюдал неожиданно малое сечение  $\sigma_{low M}^{SD} = 2,6 \pm 2,2$  мб, примерно такое же, как при гораздо меньшей энергии зафиксировал CERN-ISR  $\sqrt{s} = 30-62$  ГэВ. Упругое сечение на том же интервале энергий выросло в 3,5–4 раза. Учитывая зависимость поперечных импульсов  $k_T$  от энергии, наша модель дает 3,6 мб, что находится в хорошем согласии с экспериментом.

Сечения диссоциации в состоянии с большими массами показаны на рис. 2.

Работа поддержана грантом РФФИ 1422-00281.

1. Ryskin M. G. et al. // Eur. Phys. J. C. 2011. V. 71. P. 1617; arXiv:1409.8451 [hep-ph].

2. Khoze V. A. ..., Ryskin M. G. // Eur. Phys. J. C. 2014. V. 74. P. 2756; arXiv:1402.2778 [hep-ph].

## Спектроскопия и электронная структура ионов вольфрама в термоядерной и лазерной плазме

М. Б. Тржасковская

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

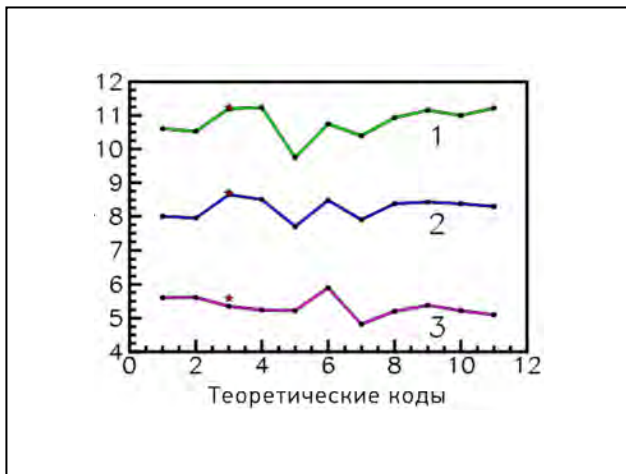
Вольфрам используется для покрытия стенок в реакторах нового поколения ITER (Международный термоядерный экспериментальный реактор), поэтому ионы различной зарядности  $W^{q+}$  присутствуют в качестве примесей в термоядерной плазме. Изучение примесей благодаря их высокой излучательной способности существенно для анализа плазмы. Важными процессами, влияющими на ионизационное равновесие и термодинамический баланс плазмы, являются фотоионизация и радиационная рекомбинация (PP). В рамках исследовательского проекта МАГАТЭ «Спектроскопические и столкновительные данные для вольфрама в плазме от 1 эВ до 20 кэВ» нами разработана база данных, включающая сечения фотоионизации и PP, коэффициенты скорости PP и радиационные потери на PP для всех ионов вольфрама от  $W^{6+}$  до  $W^{74+}$ . Эти данные необходимы для моделирования и диагностики термоядерной плазмы.

Данные получены на основе полностью релятивистских расчетов с учетом всех мультиполей поля излучения, при этом волновые функции вычислялись методом Дирака – Фока с точным учетом обменного взаимодействия между электронами. Показано, что точный учет обмена существен для малозарядных ионов при низких энергиях фотоэлектрона, а учет релятивизма и мультипольного излучения – для высокозарядных ионов при высоких энергиях. Например, релятивистское распределение электронов непрерывного спектра Максвелла – Джуттнера, впервые используемое нами вместо обычного распределения Максвелла – Больцмана при вычислении коэффициентов скорости PP и скорости радиационных потерь на PP, существенно изменяет коэффициенты скорости при высоких энергиях.

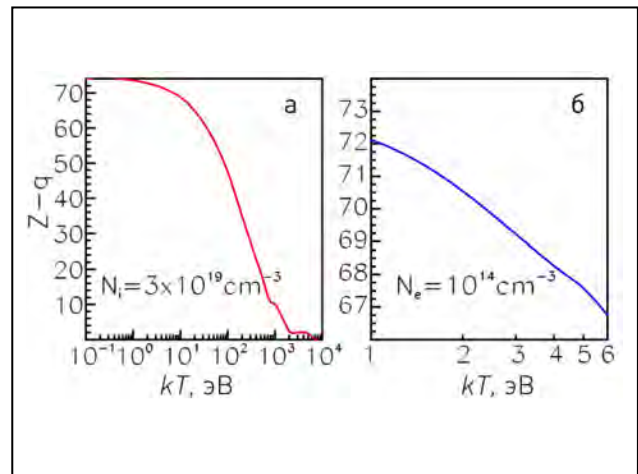
Так как при анализе плазмы удобно иметь аналитические формулы для парциальных сечений фотоионизации и PP, эти величины были аппроксимированы простым аналитическим выражением с пятью подгоночными параметрами. Вычисленные подгоночные параметры позволяют получить сечения для любых энергий фотона с погрешностью, обычно не превышающей 2 %. Все результаты введены в базу ALADDIN атомных данных МАГАТЭ.

Для термоядерной и лазерной плазмы исследовалось влияние температуры, а также плотности электронов и ионов на энергетический спектр, заполнение атомных уровней и волновые функции дискретного и сплошного спектров. Для расчетов использовался код PLASMASATOM, созданный на основе нашего комплекса программ RAINE. Проверено, что результаты, полученные нами для плотной плазмы ионов алюминия, железа и урана, хорошо согласуются с расчетами по разработанным ранее кодам INFERN0 («ад») в Лос-Аламосской национальной лаборатории в 1982 г.; PURGATORIO («чистилище») в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса в 2006 г.; PARADISIO («рай») в Комиссариате по атомной энергии (CEA, Франция) в 2009 г.

На рис. 1 наши результаты сравниваются с вычислениями теоретической группы OPAC, образованной для анализа экспериментов, связанных с определением непрозрачности плазмы на установке LULI 2010 (Gilles D. et al. arXiv:1201.6245). Знание непрозрачности астрофизической плазмы необходимо для изучения звездной атмосферы и эволюции звезд. Связанные с непрозрачностью средние заряды ионов железа  $\langle q \rangle$ , полученные OPAC с помощью 11 кодов, использующих разные приближения и методы расчета, представлены для плазмы



**Рис. 1.** Средняя ионизация  $\langle q \rangle$ , полученная с помощью 11 различных теоретических кодов, для ионов железа в лазерной плазме:  $kT = 38,5$  эВ (1);  $kT = 27,3$  эВ (2);  $kT = 15,3$  эВ (3). Звездочки – настоящий расчет с использованием кода PLASMASATOM



**Рис. 2.** Число связанных электронов: в ионах вольфрама в лазерной плазме с плотностью ионов  $N_{ion} = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  (а); и в примесных ионах вольфрама в термоядерной плазме с электронной плотностью  $N_e = 10^{14} \text{ см}^{-3}$  (б)

с электронной плотностью  $N_{el} = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и температурой  $15,3 \leq kT \leq 38,5$  эВ. Полученные нами значения показаны звездочками. Как видно, эти значения согласуются с другими расчетами и практически совпадают с лучшими данными, полученными с использованием кода 3 в рамках проекта OP. Наибольшее различие с данными OP (Opacity Project, <http://cdsweb.u-strasbg.fr/topbase/>) составляет 4 % для случая  $kT = 15,3$  эВ.

Новые расчеты были выполнены для ионов вольфрама в плотной лазерной плазме с плотностью

ионов  $N_{ion} = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  в интервале температур  $0,1 \text{ эВ} \leq kT \leq 10 \text{ кэВ}$  и для примесных ионов вольфрама в термоядерной плазме с электронной плотностью  $N_{el} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$  при низких температурах  $1 \leq kT \leq 6$  эВ. На рис. 2 приведена зависимость числа связанных электронов  $Z-q$  иона  $W^{q+}$  от температуры для этих случаев. Число связанных электронов, полученное в расчетах, демонстрирует зарядность ионов, которые преобладают в плазме при данной температуре.

Работа поддержана грантом РФФИ 1422-00281.

1. Trzhaskovskaya M. B., Nikulin V. K. et al. Horizons in World Physics. New York: Nova, 2012. V. 277. P. 173–228.
2. Trzhaskovskaya M. B., Nikulin V. K. // At. Data Nucl. Data Tables. 2014. V. 100. P. 986–1058.
3. Trzhaskovskaya M. B., Nikulin V. K. // At. Data Nucl. Data Tables. 2014. V. 100. P. 1156–1188.
4. Trzhaskovskaya M. B., Nikulin V. K. Presentation at Final Research Coordination Meeting on Project “Spectroscopic and Collisional Data for Tungsten in Plasma from 1 eV to 20 keV”. IAEA. Austria: Vienna, 6–8 October 2014.

## Матрицы смешивания кварков и лептонов – проявления нарушенной зеркальной симметрии

И. Т. Дятлов

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

Тяжелые зеркальные (т. е. с противоположными электрослабыми свойствами) аналоги обычных фермионов объяснили бы мысленный парадокс, обусловленный прямым нарушением четности, которое составляет важнейший элемент Стандартной модели (СМ). Дело в возникающей возможности физического различения левой или правой системы координат, т. е. кажущаяся неприемлемой способность указать, в какой из систем получены реальные физические результаты. Эта проблема волновала еще первооткрывателей явления Ли и Янга, они же предложили ее решение зеркальным расширением нашего мира.

Приведены аргументы, указывающие на возможное участие предполагаемых зеркальных состояний и в создании известных наблюдаемых свойств системы кварков и лептонов, образующих современную СМ. Имеются в виду одни из наиболее важных и наименее понятых характеристик СМ – спектров масс частиц и их матриц слабого смешивания.

Предложенный механизм образования свойств этих характеристик обязательно, как следствие именно зеркального характера дополнительных частиц, включает переход через промежуточное состояние – зеркальный аналог фермионов СМ (рис.).

Самое важное – свойства переходных ( $q - Q$ ) коэффициентов  $A$  матрицы  $3 \times 3$  в пространстве индексов поколений:

$$A(\text{up}) = A(\text{down}),$$

где up и down – верхнее и нижнее семейства кварков или лептонов.

Данное равенство – необходимое условие зеркального механизма, даже его определение. В таком подходе есть прямое условие инвариантности схемы по слабому изоспину СМ.

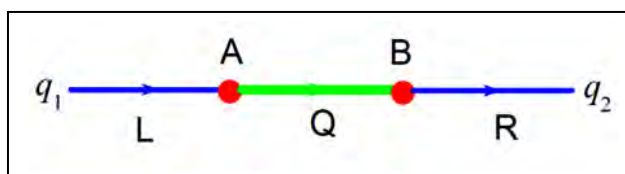


Схема перехода тяжелых зеркальных состояний  $Q$  между поколениями СМ  $q_1 > q_2$  из левых (L) компонент кварков и лептонов в правые (R)

Устанавливаются прямые следствия этого явления.

1. Матрица слабого смешивания кварков – матрица Кабиббо – Кобаяши – Маскава (ККМ) – приобретает экспериментально наблюдаемые качества: иерархические отношения между элементами (большие различия по величине), правильный порядок величин. Форма матрицы ККМ определяется здесь ограничениями, накладываемыми симметрией слабого изоспина  $SU(2)$  – основой слабых взаимодействий СМ, и иерархией масс кварков.

2. Матрица смешивания лептонов при тех же условиях абсолютно отлична от кварковой матрицы ККМ. Это точно соответствует качествам, определяемым в имеющихся экспериментальных данных.

3. В зеркальном механизме такой характер смешивания свидетельствует о том, что спектр масс нейтрино – *инверсный* (два тяжелых нейтрино рядом, легкое – далеко) и все нейтрино СМ – *дираковские* (не майорановские). Эти две особенности представляются важнейшими невыясненными вопросами физики нейтрино.

4. Исключительная малость масс нейтрино получает в зеркальном подходе новое (по отношению к известному механизму see-saw) теоретическое обоснование.

Работа поддержана грантом РФФИ 1422-00281.

Статья направлена в ЯФ.



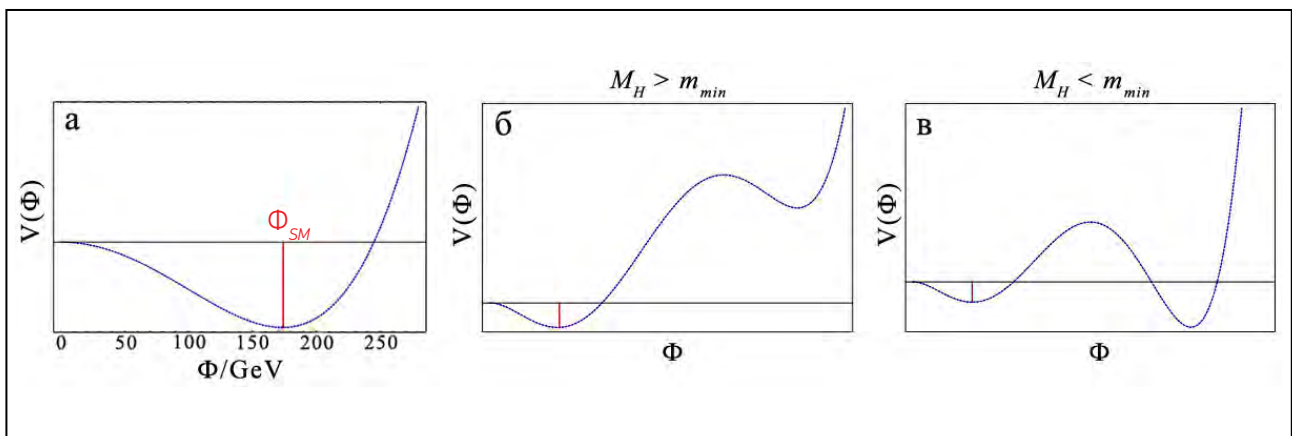
## Вычисление поправок к параметрам Стандартной модели

*В. Н. Велижанин – Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»  
А. В. Бедняков, А. Ф. Пикельнер – Объединенный институт ядерных исследований*

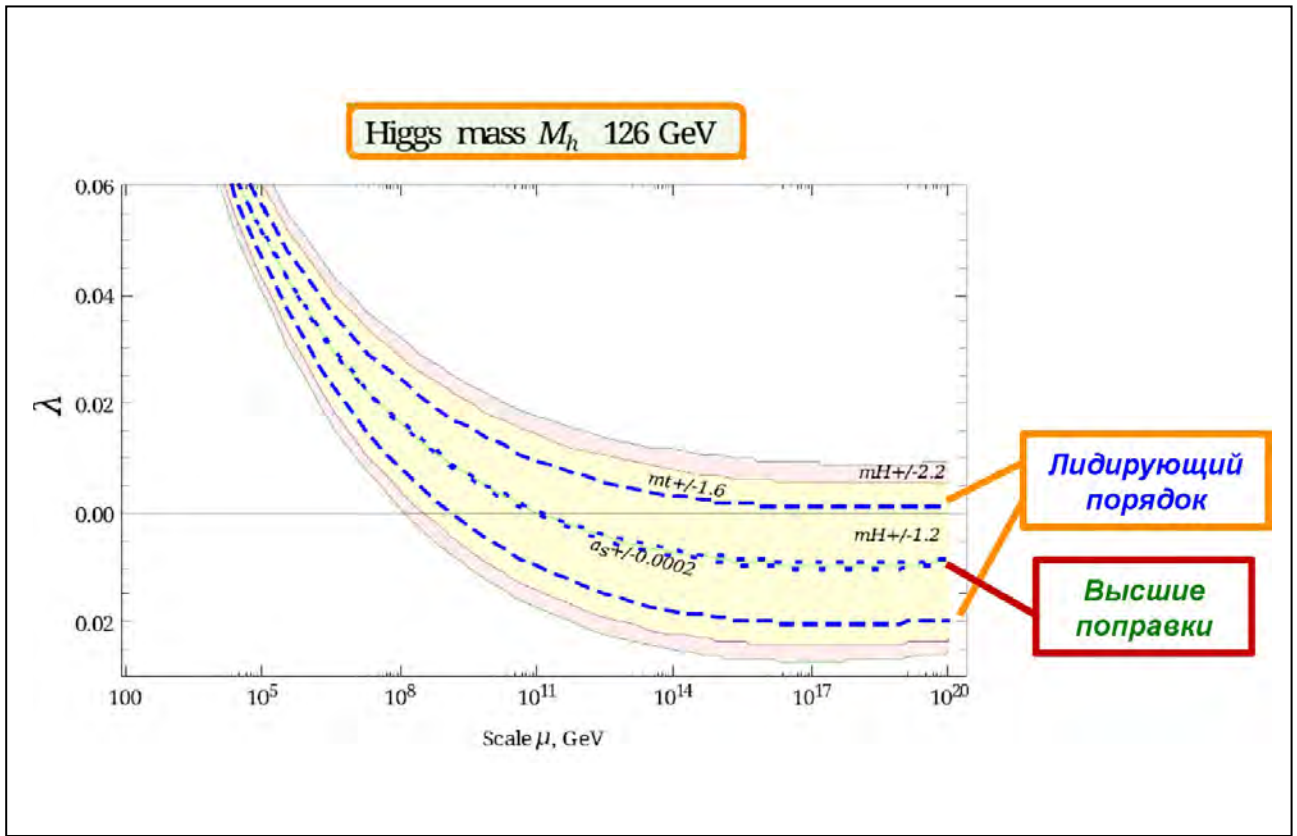
Увеличение точности экспериментов требует увеличения точности теоретических вычислений. Особую актуальность прецизионные вычисления получили в связи с исследованиями, проводимыми на Большом адронном коллайдере (БАК). Недавно открытый бозон Хиггса, будучи главной целью исследований на БАК, породил новые вопросы, прояснить которые могли в том числе вычисления в высших порядках теории возмущений. Одним из видов таких вычислений являются вычисления ренормгрупповых величин в рамках Стандартной модели (СМ) фундаментальных взаимодействий, которые были выполнены в сотрудничестве с коллегами из лаборатории теоретической физики ОИЯИ в третьем порядке теории возмущений. Такие расчеты требуют вычисления огромного числа диаграмм Фейнмана. Так, нам потребовалось вычислить более 10 млн диаграмм, что было сделано, конечно, с помощью современных компьютеров полностью автоматизированным методом.

Наиболее интересное применение полученные результаты нашли в исследовании стабильности вакуума СМ фундаментальных взаимодействий. Как известно, в рамках СМ возникновение масс у элементарных частиц связывают со спонтанным нарушением электрослабой симметрии, в результате которого скалярное поле приобретает ненулевое вакуумное среднее, что и приводит к генерации масс. При этом потенциал хиггсовского поля, используемый для теоретического описания данного явления, имеет минимум при некотором значении (рис. 1а).

Этот минимум является ближайшим к началу координат. Однако при увеличении энергии потенциал может иметь и другие минимумы (рис. 1б, в), более глубокие, чем вакуум, отвечающий СМ (рис. 1в). Тогда встает вопрос о стабильности вакуума или о возможности перехода или изменения текущего значения вакуумного среднего к другому возможному значению. Увеличение точности теоретических вычислений позволяет конкретизировать поведение хиггсовского потенциала.



**Рис. 1.** Хиггсовский потенциал: минимум, реализующийся в рамках СМ (а); локальный минимум при высоких энергиях выше текущего значения (б); локальный минимум при высоких энергиях ниже текущего значения, который может привести к нестабильности вакуума (в)



**Рис. 2.** Ренормгрупповой анализ поведения константы самодействия хиггсовского поля. Изменение знака может свидетельствовать о наличии минимума в хиггсовском потенциале

Результаты анализа, проведенного с использованием наших расчетов, показывают, что потенциал действительно может менять знак при очень высоких энергиях (рис. 2). Однако пока точность экспериментальных данных (в первую очередь погрешность в определении массы топ-кварка)

значительно превышает точность теоретических расчетов, и мы не можем точно указать на ту возможность, которая реализуется в природе.

Данная работа была выполнена в рамках гранта РФФИ 12-02-00412-а.

1. Bezrukov F., Kalmykov M. Y., Kniehl B. A., Shaposhnikov M. // JHEP. 2012. V. 1210. P. 140.
2. Bednyakov A. V., Pikelner A. V., Velizhanin V. N. // JHEP. 2013. V. 1301. P. 017.
3. Bednyakov A. V., Pikelner A. V., Velizhanin V. N. // Phys. Lett. B. 2013. V. 722. P. 336.
4. Bednyakov A. V., Pikelner A. V., Velizhanin V. N. // Nucl. Phys. B. 2013. V. 875. P. 552.

## Теория сильно коррелированных ферми-систем

*В. Р. Шагинян*

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

В книге "Theory of Heavy-Fermion Compounds" изложена теория фермионной конденсации сильно коррелированных ферми-систем, и на ее основе дано объяснение многочисленным и важным экспериментальным фактам, собранным в современной физике сильно коррелированных систем. К таким системам относятся некоторые сплавы металлов, высокотемпературные сверхпроводники, квантовые спиновые жидкости, квазикристаллы и двумерные ферми-системы.

С учетом эффектов, возникающих в теории сильно коррелированных систем, необходимо пересмотреть многие разделы физики твердого тела и жидкости. Вместе с тем есть эффекты, отсутствующие в обычной физике твердого тела. Например, нарушение симметрии «частица – дырка».

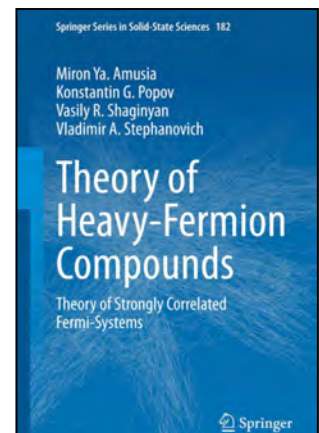
Сильно коррелированные ферми-системы обладают одинаковым универсальным поведением, отличным от наблюдаемого поведения в обычных металлах и ферми-жидкостях. Именно такое поведение, выявленное в рамках изложенной в книге оригинальной теории сильно коррелированных ферми-систем, позволило сделать вывод, что в этих системах реализуется новое состояние вещества, обладающее уникальными свойствами.

В частности, это новое состояние реализуется, возможно, в спиновых квантовых жидкостях, которые, как показывают недавние экспериментальные и теоретические исследования, принадлежат как раз к сильно коррелированным ферми-системам. Экзотическая квантовая спиновая жидкость состоит из спионов, являющихся квазичастицами со спином  $1/2$  и нулевым зарядом. Недавние эксперименты на магнитных изоляторах с почти плоской зоной, содержащей спионы, проливают свет на природу квантовой спиновой жидкости.

В книге представлена теория термодинамических, релаксационных и транспортных свойств, характерных для квантовой спиновой жидкости. Дано объяснение современным экспериментальным данным. Показано, что магнитные изоляторы ведут себя как сильно коррелированные металлы, низкотемпературная термодинамика, транспорт и релаксационные свойства которых определяются спиновой квантовой жидкостью. Таким образом, магнитные изоляторы представляют собой новый тип сильно коррелированных изоляторов и магнитов: их теплоемкость линейна по температуре, а магнитный порядок отсутствует при нулевой температуре. Другими словами, изолятор сохраняет все свойства твердого тела, а магнитная спиновая жидкость – текучесть. Недавно открытые магнитные изоляторы нового типа обладают всеми свойствами сильно коррелированных металлов, но они не проводят электрический ток, однако могут поддерживать спиновый.

Анализ сильно коррелированных ферми-систем осуществленный на основе характерных и значимых экспериментальных результатов; многочисленные расчеты термодинамических, релаксационных и транспортных свойств этих систем помогут читателю усвоить и теорию, и ее многочисленные приложения. Книга основана на опубликованных в лучших международных журналах оригинальных работ авторов книги, в т. ч. статьи, вышедшие в 2014 г.

Работа поддержана грантом РФФИ 1422-00281.



1. Amusia M. Ya., Popov K. G., Shaginyan V. R., Stephanowich W. A. Theory of Heavy-Fermion Compounds. Theory of Strongly Correlated Fermi-Systems. Berlin: Springer, 2014. V. 182. 359 p.
2. Shaginyan V. R., Msezane A. Z., Popov K. G., Japaridze G. S., Khodel V. A. // Europhys. Lett. 2014. V. 106. P. 37001.
3. Shashkin A. A., Dolgoplov V. T. ..., Shaginyan V. R., Zverev M. V., Khodel V. A. // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 186402.

## Померон БФКЛ и структура вакуума в квантовой хромодинамике

Л. Н. Липатов

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

Уравнение Балицкого, Фадына, Кураева и Липатова (БФКЛ) для волновой функции померона при нулевом переданном импульсе  $q$  в главном логарифмическом приближении (ГЛП) с учетом асимптотической свободы в квантовой хромодинамике (КХД) может быть записано в виде

$$\omega f_{\omega}^j(t) = \frac{1}{\beta_0 t} \chi(\hat{\nu}) f_{\omega}^j(t),$$

где  $j = 1 + \omega$  – спин померона, ответственного за рост адронных сечений;  $k_{\perp}^2$  – виртуальности двух глюонов, составляющих померон. Также используются следующие обозначения:

$$t = \ln \frac{k_{\perp}^2}{\Lambda_{QCD}^2}; \quad \hat{\nu} = -i\partial_t; \quad \beta_0 = \frac{11}{12} - \frac{n_f}{18};$$

$$\chi(\nu) = 2\psi(1) - 2\Re\psi\left(\frac{1}{2} + i\nu\right).$$

Ниже мы обсудим влияние области сильной связи, где  $k_{\perp}^2 \sim \Lambda_{QCD}^2$  на спектр померонов на примере уравнения БФКЛ в ГЛП. Частное решение этого уравнения имеет вид

$$f_{\omega}^j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\nu e^{i\nu t} g_{\omega}(\nu);$$

$$g_{\omega}(\nu) = \left( \frac{\Gamma\left(\frac{1}{2} + i\nu\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{2} - i\nu\right)} e^{-2i\nu\psi(1)} \right)^{\frac{1}{\beta_0\omega}}.$$

Аналогичным образом легко построить частное решение для функции Грина

$$G_{\omega}^0(t, t') = -\frac{it'}{\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\nu}{2\pi} e^{i\nu t'} g_{\omega}(\nu) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\nu'}{2} \varepsilon(\nu + \nu') e^{i\nu' t'} g_{\omega}(\nu'); \quad \varepsilon(x) = \frac{x}{|x|}.$$

Общее решение  $G_{\omega}$ , совместимое с граничными условиями, при  $\omega > 0$  имеет вид

$$G_{\omega}(t, t') = G_{\omega}^0(t, t') + \frac{t'}{4\pi\omega} \cot\phi(\omega) f_{\omega}(t) f_{\omega}(t').$$

Функция  $\phi(\omega)$  учитывает динамику в области  $|k_{\perp}^2| \sim \Lambda_{QCD}^2$  и равна разности фаз  $\delta_{\omega}^{np}(t)$  и  $\delta_{\omega}^p(t)$  волновых функций, полученных их эволюцией из малых и больших  $t$ . Например, в случае если глюоны приобретают массу  $m \approx 2,7 \Lambda_{QCD}$  и волновая функция померона обращается в ноль при  $t = 0$  в соответствии с численными оценками фазы  $\delta_{\omega}^{np}(t)$  в модели Хиггса, мы имеем в квазиклассическом приближении  $\phi(\omega) \approx 1/4 + 0,40862 / \omega$ , и, следовательно, спектр померонов дается формулой

$$\omega_k \approx \frac{0,40862}{k + 3/4}, \quad \text{при } k = 0, 1, 2, \dots$$

Это выражение хорошо воспроизводит точный спектр, полученный из условия  $f_{\omega}(0) = 0$ .

Можно построить померонные волновые функции для произвольных переданных импульсов  $q$ , используя конформную инвариантность уравнения БФКЛ. Они выражаются через частное решение уравнения БФКЛ с целым конформным спином  $n$  при  $q = 0$ :

$$f_{\omega}(t, \theta, n) = e^{i\theta v} \int_{-\infty}^{\infty} dv e^{iv} g_{\omega}(v, n);$$

$$g_{\omega}(v, n) = \left( \frac{\Gamma(\frac{1}{2} + iv + \frac{|n|}{2})}{\Gamma(\frac{1}{2} - iv + \frac{|n|}{2})} e^{-2iv\psi(1)} \right)^{\frac{1}{\beta_0 \omega}}.$$

Аналогичным образом может быть найдено частное решение для функции Грина:

$$G_{\omega}^0(t, \theta, t', \theta') = -\frac{it'}{\omega} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{e^{in(\theta - \theta')}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dv}{2\pi} e^{iv} g_{\omega}(v, n) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dv'}{2} \varepsilon(v + v') e^{it'v'} g_{\omega}(v', n).$$

Физическая функция Грина

$$G_{\omega}(t, \theta, t', \theta', q) = G_{\omega}^0(t, \theta, t', \theta') + \frac{t'}{4\pi\omega} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{e^{in(\theta - \theta')}}{2\pi} \cot \phi_{\omega}(n, q) f_{\omega}(t, n) f_{\omega}(t', n)$$

зависит от параметра  $\phi(\omega)(n, q)$ , равного разности фаз  $\delta_{\omega}^{np}(t, n, q)$  и  $\delta_{\omega}^p(t, n)$ , набранных волновой функ-

цией при ее эволюции от малых и больших значений  $t$  соответственно. Спектр реджевских траекторий  $\omega_k(n, q)$  находится из решения уравнения  $\phi_{\omega k}(n, q) = \pi k$  с учетом того, что фаза  $\delta^{np}$  зависит, вообще говоря, от  $q / \Lambda_{QCD}$ , так как бегущая константа связи КХД замерзает при  $k_{\perp} \sim q$ . Пример такой зависимости был построен в работах, где рассматривался померон БФКЛ в термостате при  $T \neq 0$ . Физически это отвечает модели, в которой двумерное пространство прицельных параметров  $\vec{p}$  приобретает топологию поверхности цилиндра с осью, направленной по  $\vec{q}$ , и радиусом  $R = 2\pi / T \sim 1 / \Lambda_{QCD}$ . Как предполагают, физический вакуум в КХД возникает в результате конденсации монополей, что приводит к выталкиванию из него хромозлектрического поля, создаваемого кварками и глюонами, – дуальному эффекту Мейснера. Поэтому адроны (и в частности померон) должны содержать каплю (мешок) затравочного вакуума, что приводит к невылетанию составляющих партонов. Действительно, с ростом температуры  $T$  первоначально интерсепт померона БФКЛ увеличивается, что объясняется возникновением дополнительного притяжения между глюонами за счет дуального эффекта Мейснера. Чтобы учесть влияние структуры вакуума в КХД на спектр померонов более детально, можно построить уравнение БФКЛ на поверхности тора и других компактных римановых пространств.

Работа поддержана грантом РФФИ 14-2200281.

1. Kowalski H., Lipatov L. et al. // Phys. Part. Nucl. 2013. V. 44. P. 547; arXiv:1401.6298[hep-ph].  
 2. De Vega H., Lipatov L. N. // Phys. Part. Nucl. 2013. V. 44. P. 515.  
 3. Levin E. M., Lipatov L. N. et al. // Phys. Rev. D. 2014. V. 89. P. 074002.

## Поиск эффектов несохранения $P$ - и $T$ , $P$ -четности в двухатомных системах

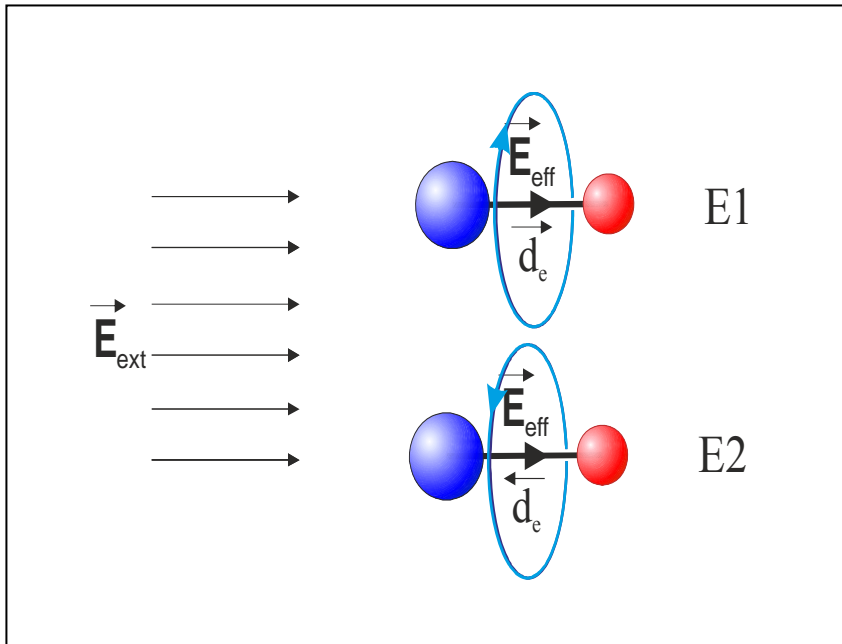
Л. В. Скрипников, А. Н. Петров, А. Д. Кудашов, Н. С. Мосягин, А. В. Тутов  
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

Наличие у элементарных частиц ненулевого перманентного электрического дипольного момента (ЭДМ) для заряженных частиц – это сдвиг центра заряда частицы от ее центра инерции, помноженный на заряд частицы, причем направление сдвига коллинеарно спине частицы) означает существование и проявление фундаментальных взаимодействий, нарушающих не только пространственную четность ( $P$ ), но и временную инвариантность ( $T$ ). Природа взаимодействий, нарушающих  $T$ -инвариантность (в согласии с  $CPT$ -теоремой нарушение  $T$ -инвариантности также означает нарушение и  $CP$ -инвариантности, где операция  $C$  означает зарядовое сопряжение), до сих пор не ясна, она не объясняется в рамках Стандартной модели (СМ), объединяющей сильные (электромагнитные) и слабые (нарушающие  $P$ -четность) взаимодействия. Обнаружение ЭДМ у элементарных частиц может пролить свет на механизм проявления «сверхслабых» ( $CP$ - или  $T$ -нечетных) взаимодействий. Поиск ЭДМ элементарных частиц рассматривается как одна из актуальнейших проблем современной физики в контексте понимания механизма нарушения  $CP$ -инвариантности и «реализованности» в природе суперсимметрии и других расширений СМ.

В 70–80-е гг. прошлого века было показано, что эксперименты по измерению ЭДМ электрона на молекулах или твердых телах, содержащих тяжелых атомы, очень перспективны. В таких соединениях достижимы чрезвычайно сильные внутренние эффективные электрические поля  $E_{eff}$  действующие на ЭДМ электрона, в результате чего энергия взаимодействия  $E_{eff}$  с ЭДМ электрона может быть достаточно большой, чтобы ее можно было измерить (рис.). Однако величина самого  $E_{eff}$  требуемая для «извлечения» величины ЭДМ

из экспериментальных данных, может быть получена только на основе теоретических расчетов. Нашей группой разрабатывается двухшаговый метод вычисления этой и других характеристик, требуемых для эксперимента. Двухшаговый подход позволяет избежать основных препятствий, возникающих в случае прямого релятивистского расчета.

В конце 2013 г. с использованием экспериментального ограничения на частоту прецессии магнитного момента молекулы  $\text{ThO}$  в метастабильном состоянии  $H^3\Delta_1$ , находящейся во внешнем электрическом поле, и величины эффективного электрического поля было установлено новое, самое жесткое на настоящей момент ограничение на величину ЭДМ электрона. Замечательное достижение этих двух работ состоит в том, что новое полученное ограничение,  $d_e < 8,7 \cdot 10^{-29} e \cdot \text{см}$ , более чем на порядок превосходит ранее полученные ограничения на молекуле  $\text{YbF}$  ( $d_e < 1,05 \cdot 10^{-27} e \cdot \text{см}$ , 2011 г.) и атоме таллия ( $d_e < 1,6 \cdot 10^{-27} e \cdot \text{см}$ , 2002 г.). Новое ограничение на ЭДМ электрона уже само по себе является серьезным вызовом популярным расширениям СМ, в первую очередь суперсимметрии, предсказывающей наличие ЭДМ у электрона на уровне  $d_e \sim 10^{-26} - 10^{-29} e \cdot \text{см}$ . Отметим, что наблюдение величины ЭДМ электрона на уровне, существенно большем чем  $10^{-38} e \cdot \text{см}$  (предсказание в рамках СМ), будет свидетельствовать о наличии «новой физики» за рамками СМ (популярные расширения СМ предсказывают ЭДМ электрона на уровне  $10^{-27} - 10^{-30} e \cdot \text{см}$ ). Полученный результат демонстрирует также уникальные возможности не только современных молекулярных экспериментов, но и теоретических методов (прецизионных неэмпи-



Измерение энергии взаимодействия ( $E1, E2$ ) внутреннего эффективного поля ( $E_{eff}$ ) с электрическим дипольным моментом электрона ( $d_e$ ) при противоположных направлениях проекции полного углового момента на ось молекулы, с учетом того, что  $|E1 - E2| = 2 |d_e \cdot E_{eff}|$

рических релятивистских расчетов электронной структуры молекул с тяжелыми атомами), разработанных ранее нашей группой. Полученный результат как минимум не уступает «потенциальным возможностям» экспериментов по исследованию  $CP$ -инвариантности на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН.

В 2013 г. была завершена только первая серия экспериментов на молекуле ThO. В настоящее время на данной молекуле подготавливается новая серия экспериментов, в которой ожидается улучшение чувствительности до порядка величины. В 2014 г. нами в сотрудничестве с коллаборацией ACME была проанализирована возможность выполнения экспериментов на втором вращательном подуровне молекулы ThO, а не на первом, как это делалось в эксперименте 2013 г. Как показано

в данной работе, это позволит уменьшить ряд систематических ошибок, т. е. появится возможность провести эксперимент более точно.

Помимо молекулы ThO нашей группой рассматриваются и другие системы, на которых в дальнейшем можно было бы провести эксперименты по поиску эффектов нарушения пространственной и временной симметрий в фундаментальных взаимодействиях. Одной из таких систем является молекула-радикал RaF. Нами проведено теоретическое исследование этой системы. Показано, что величина эффективного электрического поля в ней составляет величину около 50 ГВ/см, которое, как и в ThO, весьма велико. Помимо этого предполагается, что на RaF можно будет искать и другие эффекты, в частности так называемый анапольный и шиффовский моменты ядра.

1. ACME Collaboration // Science. 2013. V. 343. No. 6168. P. 269–272.
2. Skripnikov L. V., Petrov A. N., Titov A. V. // JCP Communication. 2013. V. 139. P. 221103.
3. Petrov A. N., Skripnikov L. V., Titov A. V. et al. // Phys. Rev. A. 2014. V. 89. P. 062505.
4. Kudashov A. D., Petrov A. N., Skripnikov L. V., Mosyagin N. S., Isaev T. A. ..., Titov A. V. // Phys. Rev. A. 2014. V. 90. P. 052513.

## Химия элементов острова стабильности

*А. В. Зайцевский, Ю. А. Демидов*

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

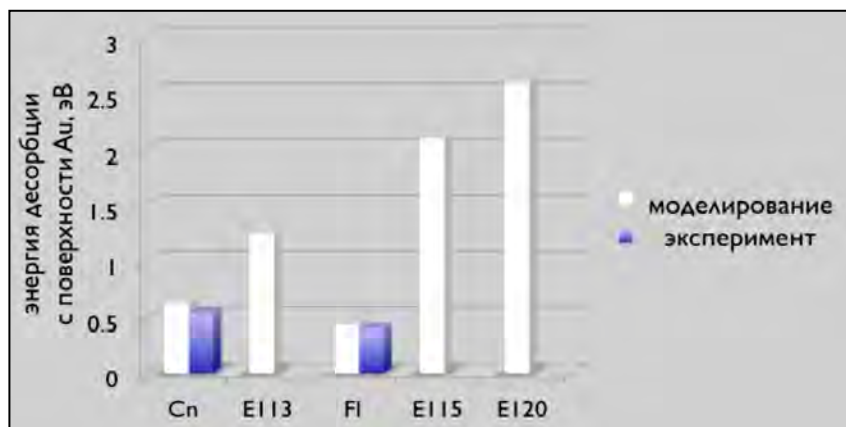
Гипотеза о существовании долгоживущих сверхтяжелых нуклидов, образующих на карте в координатах «атомный номер – число нейтронов в ядре» остров, окруженный морем нестабильных нуклидов, возникла много десятилетий назад. Предполагается, что вершины острова – очень устойчивые ядра с периодами полураспада, сопоставимыми с возрастом Земли, – соответствуют изотопам элементов 114 и 126 со 184 нейтронами в ядре. В лаборатории ядерных реакций ОИЯИ в Дубне выполнен целый ряд успешных попыток синтеза ядер с зарядами от 112 до 117 – значениями, характерными для острова стабильности. До вершин еще далеко: при достаточном числе протонов в ядрах имеется дефицит нейтронов. Тем не менее времена жизни таких ядер достигают секунд и даже десятков секунд – тенденция к быстрому уменьшению стабильности с ростом заряда ядра явно нарушается. Секундные времена жизни более чем достаточны для того, чтобы «одеть» ядро сверхтяжелого элемента электронами до нейтрального атома и попробовать изучить его химические свойства. На современных установках выход этих атомов невелик – 1 или 2 в неделю, так что одновременное существование двух атомов исключено. Пока единственной экспериментальной методикой, позволяющей изучать химические свойства сверхтяжелых элементов в таких условиях, является газовая термохроматография: экспериментально измеряется температура осаждения единичных атомов сверхтяжелого элемента на поверхности адсорбента, чаще всего золота. Единственное физико-химическое свойство, которое при этом удается оценить, – энергия адсорбции на поверхности. Эта величина найдена со сколько-нибудь удовлетворительной точностью для элементов 112 (Cn) и 114 (Fl) на золоте, и есть грубые оценки энергии адсорбции элемента 113 на том же адсорбенте.

Численное моделирование соединений сверхтяжелых элементов является значительно более универсальным источником информации об их физико-химических свойствах. Оно предоставляет возможность для систематического прогнозирования свойств различных соединений сверхтяжелых элементов, что позволит направить поиски таких элементов в природных объектах. Моделирование необходимо для планирования экспериментов; с этой целью, например, нами выполнен расчет характеристик адсорбции атома еще не синтезированного элемента 120 на золоте.

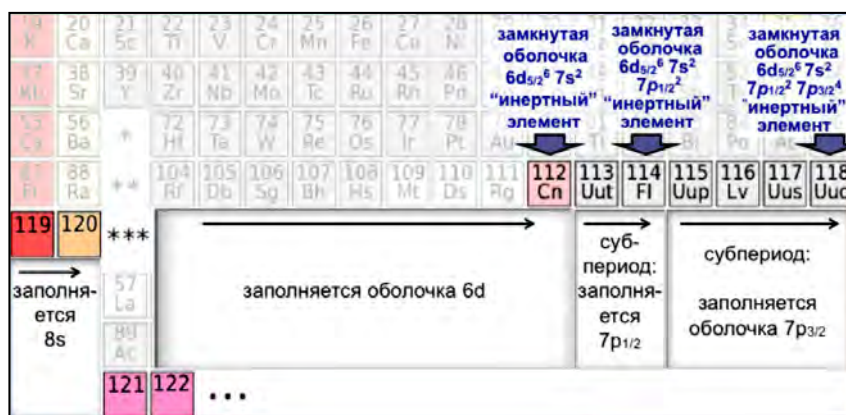
Сложность задачи моделирования из первых принципов не стоит недооценивать. Оказываясь вблизи ядра сверхтяжелого элемента, электроны разгоняются до огромных скоростей, и их нерелятивистское описание теряет всякий смысл. Оно неприемлемо даже как первое приближение. Исчезает спиновая симметрия, которая есть у любой нерелятивистской системы, даже с асимметричным расположением ядер. Сверхтяжелые атомы не имеют привычной пространственной оболочечной структуры – электронные оболочки размываются и перекрываются. Помимо того что полезное для химиков деление оболочек на остовные и валентные становится затруднительным, совершенно меняется характер электронных корреляций. Наконец, очень сложно контролировать надежность результатов при помощи сравнения с данными эксперимента, которых крайне мало. Эти обстоятельства многократно усложняют расчет электронной структуры соединений сверхтяжелых элементов. Тем не менее работы по моделированию проводятся, и в целом успешно.

Расчетные технологии, развиваемые в лаборатории квантовой химии НИЦ КИ ПИАФ, позволили достичь количественного согласия с данными термохроматографии (рис. 1). В частности, полностью





**Рис. 1.** Экспериментальные и расчетные значения энергий десорбции некоторых элементов острова стабильности с поверхности золота



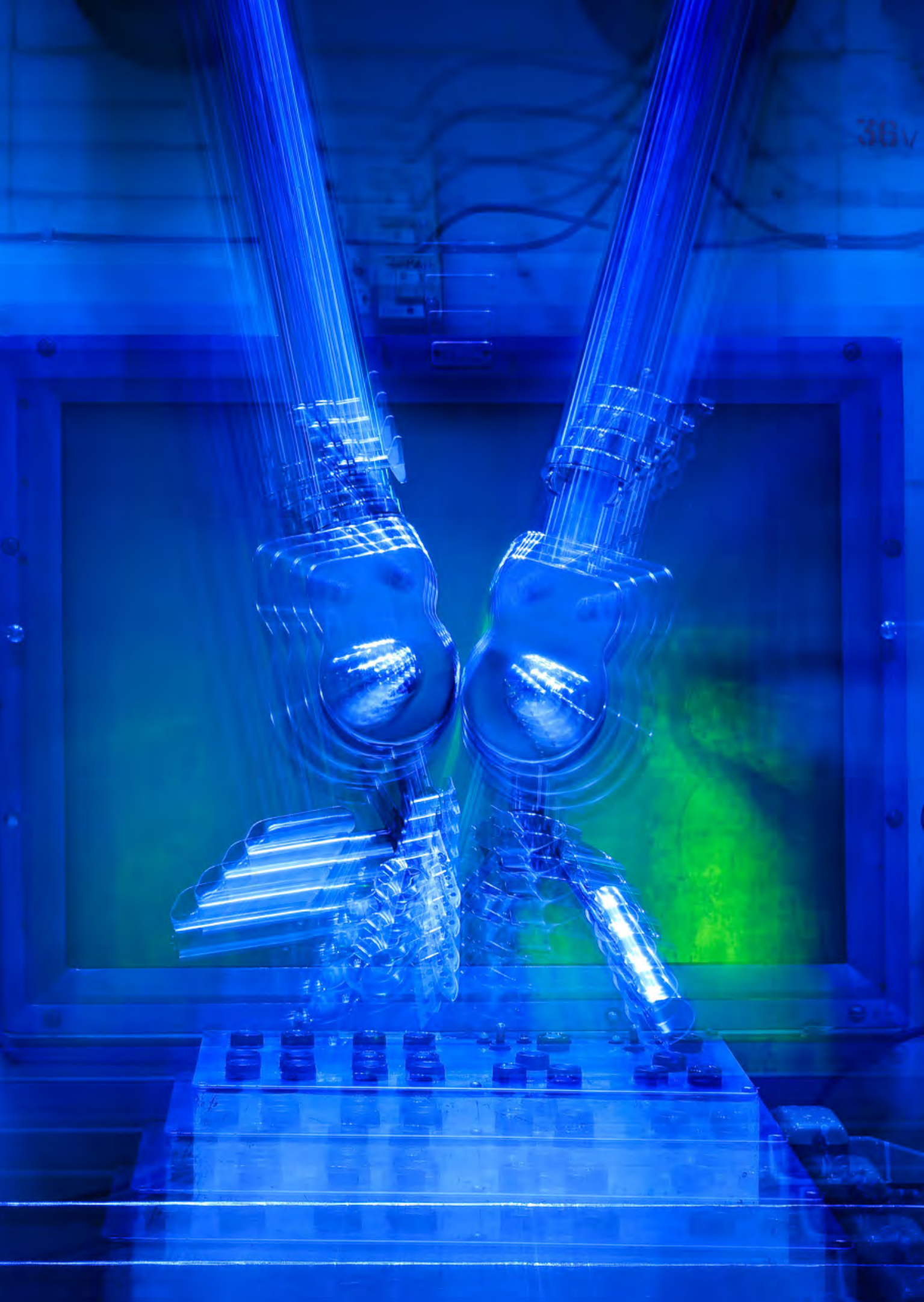
**Рис. 2.** Субпериодическая структура 7-го периода таблицы Менделеева. Ее существование связано с сильнейшей релятивистской стабилизацией подоболочек  $6s$  и  $7p_{1/2}$

подтвержден один из самых неожиданных экспериментальных результатов: эка-свинец (флеровий, Fl) разительно отличается от свинца и всех других своих гомологов, будучи ближе по своим характеристикам к тяжелым инертным газам. Предсказаны результаты термохроматографического эксперимента для некоторых других элементов острова стабильности. Систематические расчеты простых соединений элементов острова стабильности с распространенными легкими элементами позволили судить об особенностях проявлений периодического закона, которые связаны с беспрецедентной ролью релятивистских эффектов. В числе таких изменений аномально резкие отличия свойств сверхтяжелых элементов 12-й и 14-й групп от свойств их гомологов и появление субпериодической структуры в 7-м периоде (рис. 2). Между тем в 1-й и 2-й группах переход к элементам острова стабильности происходит вполне

регулярно, элементы 119 и 120 – нормальные щелочной и щелочноземельный металлы соответственно, хотя и более инертные химически, чем их ближайшие гомологи.

Сейчас внимание как экспериментаторов, так и теоретиков сосредоточено на исследовании свойств элемента 113 – единственного в полном смысле неинертного элемента короткого субпериода, образуемого им и флеровием. Его атомная конфигурация не имеет аналогов: один  $p$ -электрон над прочной (почти как у инертного газа) замкнутой оболочкой. Уже ясно, что свойства его сильно отличаются от свойств его ближайшего гомолога, – таллия. Кроме того, не исключено, что в недавних экспериментах элемент 113 достигает хроматографической колонки не в виде свободного атома, а в составе молекулы. Если это действительно так, то впервые появляется шанс зарегистрировать молекулу химического соединения элемента острова стабильности.

1. Demidov Yu., Zaitsevskii A. et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2014. V. 16. P. 2268.  
 2. Демидов Ю. А., Зайцевский А. В. // Известия АН. Сер. хим. 2014. № 8. С. 1647.



# Исследования с использованием нейтронов, синхротронного излучения и мюонов

- 44 Новые измерения электрического дипольного момента нейтрона с двухкамерным ЭДМ-спектрометром НИЦ КИ ПИЯФ
- 45 Резонансное поведение показателя преломления вблизи брэгговского отражения
- 46 Каналирование нейтронов в слоистых структурах Cu/Ti/Cu
- 47 Антисимметричный обмен в мультиферроиках  $R\text{Mn}_2\text{O}_5$
- 48 Мезоструктура и фрактальные свойства новых прозрачных стекол на основе диоксида циркония
- 49 Исследования структуры и конформаций звездообразных полимеров с фуллереновыми центрами ветвления, функционализированными карбонильными группами
- 51 Магнитная структура и фазовые переходы в «зеленой фазе»  $^{160}\text{Gd}_2\text{BaCuO}_5$ . Нейтронографические исследования
- 52 Нейтронная спин-манипуляционная оптика
- 53 Ядерно-магнитные интерференционные эффекты в малоугловом рассеянии поляризованных нейтронов
- 54 Исследование снятия вырождения киральной симметрии в геликоидальной спиновой структуре Ho/Y сверхрешетки, индуцированного внешним магнитным полем
- 55 Периодичность структуры и дефекты в никелевых инвертированных опалоподобных кристаллах на мезоскопическом и атомном масштабах
- 57 Исследование мультиферроика  $\text{Eu}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Mn}_2\text{O}_5$  с помощью  $\mu\text{SR}$ -метода

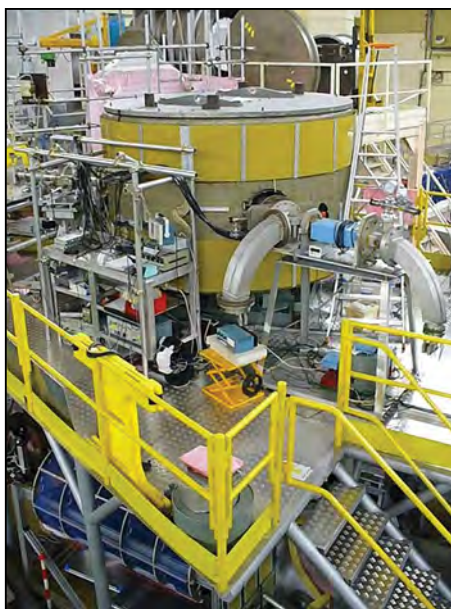
## Новые измерения электрического дипольного момента нейтрона с двухкамерным ЭДМ-спектрометром НИЦ КИ ПИЯФ

А. П. Серебров

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

Поиск электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона в физике низких энергий является альтернативой поиску новых частиц в физике высоких энергий на адронных коллайдерах. Величина или новое ограничение на величину ЭДМ нейтрона является очень чувствительным тестом для выбора теории с  $CP$ -нарушением. В работе представлены результаты измерений ЭДМ нейтрона, выполненные на реакторе ILL (Институт им. Лауэ – Ланжевена, Гренобль, Франция) на экспериментальной установке НИЦ КИ ПИЯФ. Использован двухкамерный магнитно-

резонансный спектрометр с длительным удержанием ультрахолодных нейтронов. Полученные результаты на уровне достоверности 90 % устанавливают верхний предел на величину ЭДМ нейтрона  $|d_n| < 5,5 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{см}$ . Эта точность измерений находится на уровне современного экспериментального предела на величину ЭДМ нейтрона. Новый результат и подтверждение существующего ограничения в независимом эксперименте на другой установке являются принципиально важными для данной фундаментальной проблемы.



Спектрометр НИЦ КИ ПИЯФ для поиска ЭДМ нейтрона на пучке ультрахолодных нейтронов реактора ILL

1. Serebrov A. P., Kolomenskiy E. A., Pirozhkov A. N., Krasnoschekova I. A., Vassiljev A. V., Polushkin A. O., Lasakov M. S., Fomin A. K., Shoka I. V., Solovey V. A., Zherebtsov O. M. et al. // Pis'ma v ZhETF. 2014. V. 99(1). P. 7–11.
2. Серебров А. П., Коломенский Э. А., Пирожков А. Н., Краснощечкова И. А., Васильев А. В., Полюшкин А. О., Ласаков М. С., Мурашкин А. Н., Соловей В. А., Фомин А. К., Шока И. В., Жеребцов О. М. и др. Препринт ПИЯФ 2956. Гатчина, 2014. 43 с.
3. Серебров А. П., Коломенский Э. А., Пирожков А. Н., Краснощечкова И. А., Васильев А. В., Полюшкин А. О., Ласаков М. С., Мурашкин А. Н., Соловей В. А., Фомин А. К., Шока И. В., Жеребцов О. М. и др. Новые измерения электрического дипольного момента нейтрона с двухкамерным ЭДМ-спектрометром ПИЯФ // Письма в ЭЧАЯ (в печати).

## Резонансное поведение показателя преломления вблизи брэгговского отражения

*В. В. Федоров*

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

При прохождении нейтрона через совершенный кристалл вблизи брэгговского условия обнаружено новое явление: дисперсионное (резонансное) поведение показателя преломления нейтрона при движении в кристалле с энергиями, близкими к брэгговским. Показано, что в этом случае малое изменение энергии нейтрона на величину порядка брэгговской ширины ( $\Delta E/E \sim 10^{-5}$ ) приводит к существенному (на несколько десятков процентов) изменению потенциала взаимодействия нейтрона с кристаллом.

При прохождении нейтроном совершенного кристалла, движущегося с переменной скоростью, впервые обнаружено ускорение нейтрона вблизи брэгговского резонанса. Эффект возникает в силу того, что за время пролета нейтрона через ускоренный кристалл (рис. 1) изменяется величина параметра отклонения от условия Брэгга и, соответственно, величина потенциала взаимодействия нейтрона с кристаллом. В результате изменяется кинетическая энергия нейтрона при выходе из кристалла (рис. 2).

Стоит отметить, что данное явление носит общий характер и должно учитываться при проведении прецизионных нейтронооптических экспериментов, т. к. приводит к тому, что показатель преломления нейтрона определяется не только средним потенциалом кристалла.

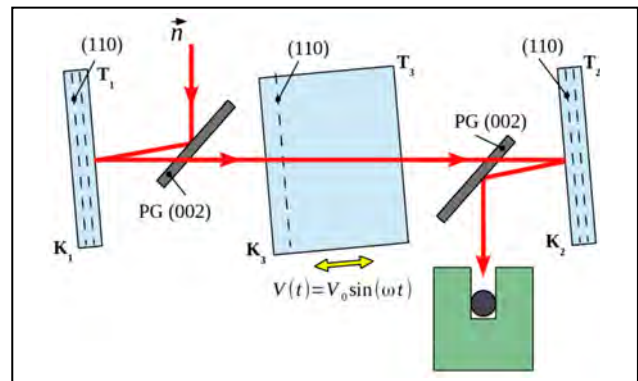


Рис. 1. Схема эксперимента

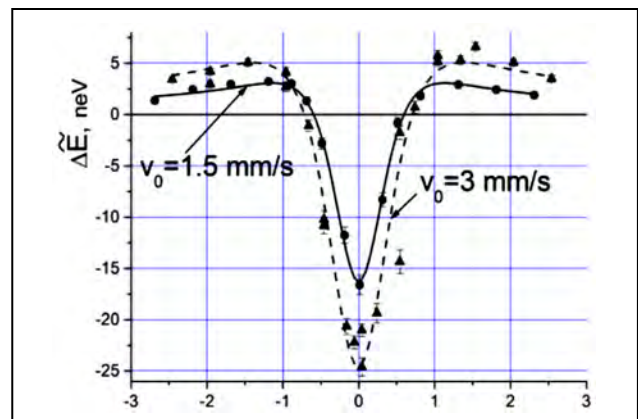


Рис. 2. Эффект ускорения нейтрона на движущемся кристалле вблизи брэгговского резонанса

## Каналирование нейтронов в слоистых структурах Cu/Ti/Cu

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

*Ю. В. Никитенко – Объединенный институт ядерных исследований*

*В. В. Проглядо – Институт физики металлов УрО РАН*

Явление каналирования частиц в твердом теле известно сравнительно давно. Широко используется каналирование ионов и электронов в атомных структурах – кристаллах. Под каналированием обычно понимается увеличение выхода частиц (излучения) при распространении их по выделенному в среде каналу. В слоистой структуре такими выделенными каналами для нейтронов являются слои структуры. Для каналирования необходимо выполнение одного важного условия. Оно состоит в том, что вблизи границы раздела слоя с окружающей средой взаимодействие частицы (излучения) со средой должно возвращать частицу в слой. Очевидно, что для эффективного отражения от границ слоя потенциал взаимодействия (энергия потенциального взаимодействия) должен быть сравним или превышать кинетическую энергию частицы  $E$  в направлении перпендикулярно границе слоя. Каналированию способствует также то, что сечение рассеяния излучения в направлении вдоль канала, как правило, меньше, чем в других направлениях. Интерес к изучению явления каналирования нейтронов обусловлен связанным с ним явлением многократного взаимодействия нейтронов с границами слоя или неоднородной структурой слоя. В этой связи при каналировании следует ожидать увеличения чувствительности измерений, возможности получения высококоллимированных и монохроматических пучков нейтронов, в т. ч. и для зондирования структур с нанометровым пространственным разрешением. В последнее время возросла актуальность определения такой

характеристики, как длины каналирования, в связи с исследованиями тесно связанного с каналированием явления образования усиленных стоячих волн нейтронов.

Исследования по определению длины каналирования были проведены на спектрометре АДАМ (ИЛЛ, Гренобль, Франция) со структурой Cu (33 нм)/Ti (350 нм)/Cu (150 нм)/стекло (5 мм). Данная слоистая структура была изготовлена в НИЦ КИ ПИАФ. Подложка из стекла толщиной 5 мм имела размеры 6 см (ширина) × 8 см (длина). На поверхности слоя Cu (33 нм) длиной 8 см устанавливалась комбинированная пластина, состоящая из стеклянной пластины толщиной 3 мм и длиной 1, 2 или 5 см и пластинки из кадмия высотой 3 мм и шириной 1 мм.

Регистрировались нейтроны, выходящие только из торцов слоев. Длина волны нейтронов  $\lambda$  составляла 4,4 Å. Угол скольжения падающего пучка варьировался в интервале 0,05–0,38°, что соответствует изменению волнового вектора в интервале  $k_z = 1,25 \cdot 10^{-4} - 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}^{-1}$ .

Показано, что при больших значениях волнового вектора экспериментальные данные описываются каналированием в слоях Cu. Только при  $k < 0,004 \text{ \AA}^{-1}$  можно считать, что каналирование идет практически равновероятно в слоях Ti и Cu. На существование каналирования в слое Ti при малых значениях волнового вектора указывает резонансный характер зависимости интенсивности выходящих с торца структуры нейтронов от начального  $\theta_i$  и конечного  $\theta_f$  углов скольжения.

## Антисимметричный обмен в мультиферроиках $R\text{Mn}_2\text{O}_5$

И. А. Зобкало, С. В. Гаврилов

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

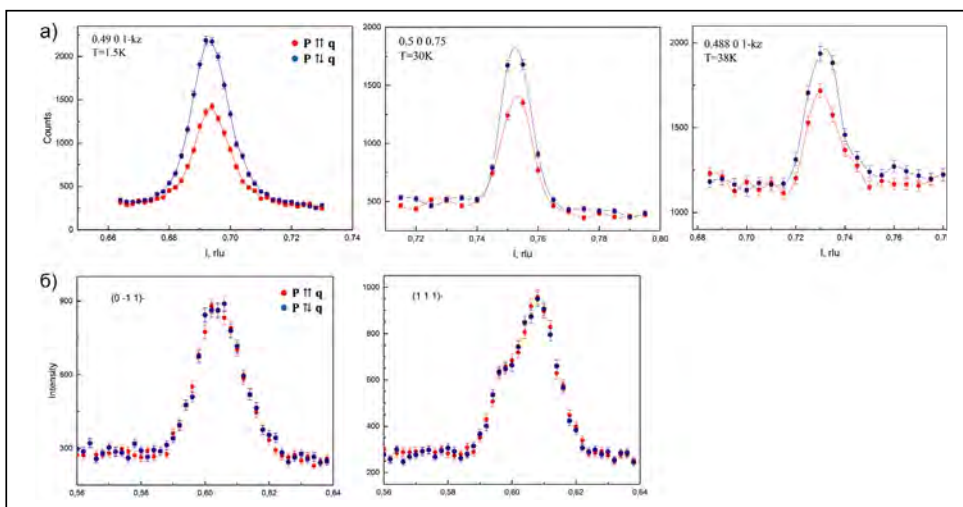
Семейство редкоземельных манганатов  $R\text{Mn}_2\text{O}_5$  ( $R$  – редкоземельный элемент) вызывает в последнее время серьезный интерес, поскольку в нем магнитоэлектрические связи проявляются в разнообразных впечатляющих эффектах.

Для объяснения механизма (ов) происхождения магнитоэлектрического взаимодействия в мультиферроиках  $R\text{Mn}_2\text{O}_5$  рассматриваются различные модели, основанные, главным образом, на двух типах обменного взаимодействия: симметричного гейзенберговского обмена, описываемого скалярным произведением спинов взаимодействующих ионов ( $\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2$ ), и антисимметричного обмена Дзялошинского – Мория, описываемого векторным произведением  $[\mathbf{S}_1 \times \mathbf{S}_2]$ .

В контексте выяснения микроскопических механизмов магнитоэлектрических взаимодействий в  $R\text{Mn}_2\text{O}_5$  проведены нейтронные исследования на монокристаллах мультиферроиков  $\text{TbMn}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Tb}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Mn}_2\text{O}_5$ , а также несегнетоэлектрического соединения  $\text{NdMn}_2\text{O}_5$ . Методом дифракции поляризованных нейтронов была определена раз-

ница в количестве «правых» и «левых» спиралей. В мультиферроиках  $\text{TbMn}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Tb}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Mn}_2\text{O}_5$  наблюдалась зависимость интенсивности рассеяния от направления поляризации, свидетельствующая о разнице в количестве «правых» и «левых» спиралей (~ 50 %), которая оставалась постоянной для всех магнитоупорядоченных фаз (рис.). В несегнетоэлектрическом изоструктурном кристалле  $\text{NdMn}_2\text{O}_5$  этого не наблюдается для любых магнитных сателлитов при всех температурах магнитного упорядочения.

Известно, что антисимметричное взаимодействие обуславливает преимущественное направление вращения спиралей в геликоидальных магнитных структурах. Таким образом, показано, что наличие антисимметричного обмена является необходимым условием для возникновения сегнетоэлектричества в  $R\text{Mn}_2\text{O}_5$ . При этом в соразмерной магнитной фазе эффект Дзялошинского – Мория может являться косвенной причиной появления электрической поляризации.



Результаты сканирования магнитных сателлитов при двух направлениях поляризации  $\mathbf{P}$  – вдоль и против вектора рассеяния  $\mathbf{q}$ :  $\text{TbMn}_2\text{O}_5$  (а);  $\text{NdMn}_2\text{O}_5$  (б)

1. Зобкало И. А., Гаврилов С. В. и др. // ФТТ. 2014. Т. 56. С. 57.

2. Zobkalo I. A., Gavrilov S. V. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 2014. V. 354. P. 85.

3. Зобкало И. А., Гаврилов С. В. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования (в печати).

## Мезоструктура и фрактальные свойства новых прозрачных стекол на основе диоксида циркония

Г. П. Копица, Н. Н. Губанова, К. В. Ездакова –  
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»  
А. Е. Баранчиков, В. К. Иванов – Институт общей и неорганической химии РАН  
А. Feoktistov, V. Pipich – For Jülich Centre for Neutron Science JCNS  
B. Angelov – Institute of Macromolecular Compounds

Прозрачные стекла на основе аморфного  $ZrO_2$  считаются крайне перспективными материалами для создания фотохромных устройств, каталитических систем, химических сенсоров. Также эти материалы можно использовать в качестве матрицы для термостойких люминесцентных нанокомпозитов и нелинейных оптических устройств, лазеров.

В данной работе были впервые синтезированы прозрачные пористые стекла на основе диоксида циркония, не содержащие стеклюющего компонента – диоксида кремния. Методами малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) и ультрамалоуглового рассеяния нейтронов (УМУРН), малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР), низкотемпературной адсорбции азота, рентгенофлуоресцентного анализа (РФА), растровой электронной микроскопии (РЭМ), а также термогравиметрического анализа (ТГА) были исследованы структура и физико-химические свойства стекол на основе  $ZrO_2$ , синтезированных с помощью золь-гель метода из органических растворов пропилата циркония (IV), с использованием в качестве одного из гидролизующих компонентов азотной ( $HNO_3$ ) и ледяной уксусной ( $CH_3COOH$ ) кислот.

Комплексный анализ полученных данных показал следующее.

1. Все образцы являются рентгеноаморфными и характеризуются высокой удельной поверхностью, до  $250 \text{ м}^2/\text{г}$ .

2. Стекла, полученные с использованием  $HNO_3$ , представляют собой системы с трехуровневой иерархической организацией структуры. Первый структурный уровень составляют первичные частицы  $ZrO_2$  с размерами  $d_1 \approx 1 \text{ нм}$ , из которых – на втором уровне – формируются фрактальные кластеры с размерами  $d_2 \approx 24\div 52 \text{ нм}$ . На третьем уровне образуются крупномасштабные ( $d_3 \approx 2 \text{ мкм}$ ) агрегаты, обладающие «диффузной» поверхностью.

3. Использование в качестве гидролизующего компонента  $CH_3COOH$  приводит к формированию стекол с двухуровневой иерархической организацией структуры. Первый структурный уровень составляют первичные частицы  $ZrO_2$  с размерами  $d_1 \approx 1 \text{ нм}$ , структурированные по типу ближнего порядка, из которых – на втором уровне – образуются крупномасштабные агрегаты с «диффузной» поверхностью.

4. Как температура синтеза, так и концентрация  $H_2O$  в исходном растворе оказывают существенное влияние на структурные характеристики стекол.



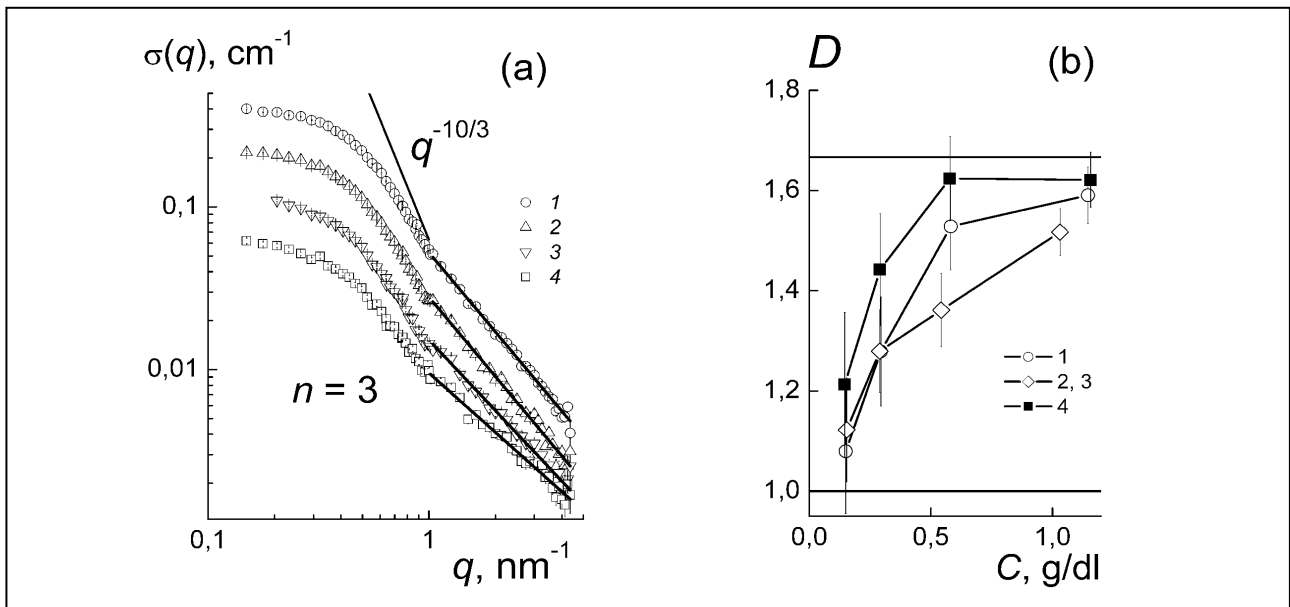
# Исследования структуры и конформаций звездообразных полимеров с фуллереновыми центрами ветвления, функционализированными карбонильными группами

В. Т. Лебедев

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

Впервые синтезированы и изучены методом малоуглового рассеяния нейтронов гибридные структуры из полимеров и фуллеренов, перспективные для электроники, биологии, молекулярной медицины, когда фуллерены играют роль активных центров, способных, например, катализировать химические процессы на своей поверхности, окруженной полимерной оболочкой из присоединенных лучей (нанореакторы). Результаты получены в НИЦ КИ ПИАФ (Лаборатория нейтронных физико-химических исследований, зав. лаб. д. ф.-м. н. В. Т. Лебедев, н. с. Д. Н. Орлова) в сотрудничестве с Институтом высокомолекулярных соединений РАН (в. н. с. д. х. н. Л. В. Виноградова) и Будапештским нейтронным центром (Dr. Gy. Török).

Звездообразные полистиролы  $(PS)_6C_{60}$  получали методом анионной полимеризации. Параметры оболочки вокруг  $C_{60}$  регулировали, варьируя молекулярные массы лучей, прививая к поверхности  $C_{60}$  группы  $C=O$ , поляризующие систему  $p$ -электронов углеродного каркаса. Молекулы  $(PS)_6C_{60}$  в дейтеротолуоле исследовали в зависимости от состояния поверхности  $C_{60}$  (число групп  $(C=O)$   $n = 1-3$ ) и концентрации полимера. Измеренные сечения  $\Sigma(q) = \sigma(q) + B$  включали некогерентную  $B \approx \text{const}$  и когерентную  $\sigma(q)$  части. Величины  $\sigma(q)$  возрастали пропорционально концентрации, указывая на отсутствие агрегации полимеров (рис. 1а).

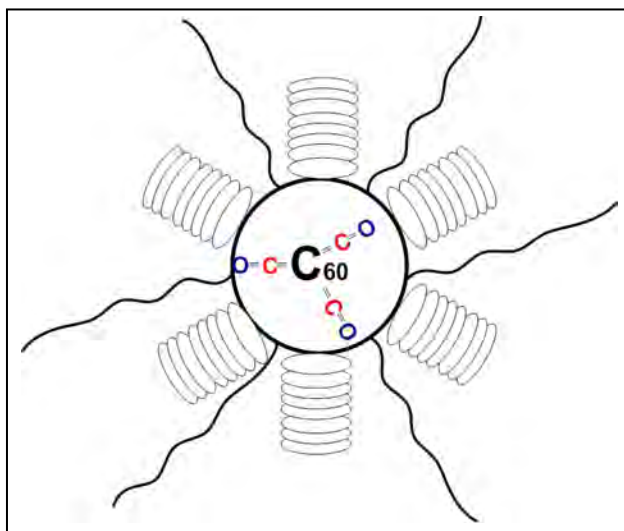


**Рис. 1.** Сечения растворов звезд  $\sigma(q)$  (а) с числом  $n = 3$  карбонильных групп на фуллерене  $C_{60}$  в зависимости от импульса при исходном содержании полимеров  $C \sim 1$  г/дл (1) и концентрациях при разбавлении в 2; 4; 8 раз (данные 2–4). Линии – функции аппроксимации  $J/q^D$  с параметрами  $J(C, n), D(C, n)$ . Показана модельная зависимость сечения  $\sigma(q) \sim q^{-10/3}$  для звездообразных полимеров. Показатели  $D(C, n)$  в зависимости от концентрации полимеров (б): 1 – данные для звезд без карбонильных групп; 2, 3 – усредненные данные при  $n = 1$  и 2; 4 – данные при  $n = 3$

Данные  $\Sigma(q)$  при  $q \geq 1 \text{ нм}^{-1}$  описаны функцией  $\Sigma(q) = J/q^D + B$ . Фактор  $J(C, n)$  пропорционален количеству полимера в растворе. Показатель  $D(C, n)$  характеризует конформацию полимеров на масштабах от размера звена до длины сегмента цепи в зависимости от концентрации ( $C$ ) и числа карбонильных групп ( $n$ ) на поверхности  $C_{60}$ .

При начальной концентрации,  $C \sim 1 \text{ г/дл}$ , параметр  $D \sim 1,5\text{--}1,6$  близок к показателю Флори  $D_F = 5/3$  для гибких цепей в хорошем растворителе. При разбавлении системы наблюдался предел  $D \rightarrow 1$  для вытянутых цепей как результат взаимного отталкивания лучей при упорядочении растворителя на поверхности  $C_{60}$  в колоннообразные сборки, способствующие выстраиванию лучей по радиусу (рис. 2).

В звездах установлен конформационный переход от свернутых к распрямленным лучам (рис. 1b) при уменьшении концентрации ( $1,0 \rightarrow 0,1 \text{ г/дл}$ ). Эффект усиливался при наличии 1–2 групп  $C=O$  на поверхности  $C_{60}$ , но присутствие 3 групп, напротив, вызывало сворачивание лучей в результате неоднородной поляризации фуллерена и фенильных групп в полистирольных лучах. Радиусы инерции звезд  $R_G \sim 3,3\text{--}3,4 \text{ нм}$  на  $\sim 30\%$  превышали размеры звездообразных макромолекул по модели Бенуа для лучей в гауссовой конформации, что объяснялось увеличением длины статистического сегмента в лучах звезд в 1,5 раза относительно линейного полистирола. С другой стороны, модель Дауда – Коттона, рассматривающая звезды как градиентные структуры, лишь ограниченно применима к данным объектам с  $C_{60}$ -центром, т. к. модельная асимптотика для сечений  $\sigma(q) \sim q^{-10/3}$  не описывает экспериментальные данные (рис. 1a).



**Рис. 2.** Звездообразный полимер  $(PS)_6C_{60}$  с присоединенными к центру группами  $C=O$ . Показаны лучи и колоннообразные структуры из молекул растворителя на поверхности  $C_{60}$

С помощью рассеяния нейтронов обнаружено необычное поведение полимерных звезд при переходе к разбавленным растворам, когда  $C_{60}$ -центр, структурируя растворитель, стабилизирует распрямленные конформации лучей на сегментальном масштабе. Присоединение к фуллерену полярных групп  $C=O$  в зависимости от их количества может усиливать или ослаблять указанные тенденции. Результаты демонстрируют возможности управления конформационными свойствами полимеров, используя фуллерен в роли активного структурирующего центра, действие которого можно регулировать, модифицируя его поверхность функциональными группами.

# Магнитная структура и фазовые переходы в «зеленой фазе» $^{160}\text{Gd}_2\text{BaCuO}_5$ . Нейтроннографические исследования

И. В. Голосовский, А. К. Овсяников

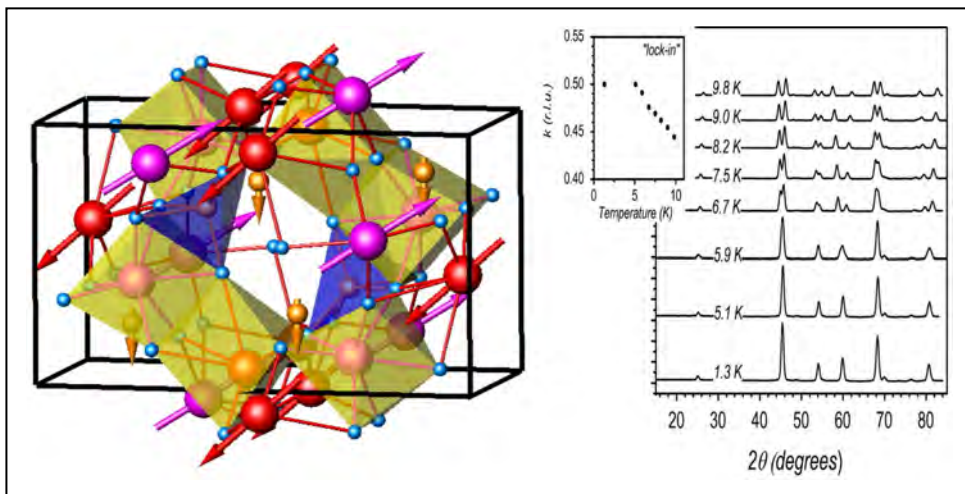
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

Купраты с общей формулой  $R_2\text{BaCuO}_5$  (где  $R$  – редкоземельный элемент), известные как «зеленая фаза», впервые привлекли внимание исследователей при синтезе высокотемпературных сверхпроводников, когда они наблюдались в виде примесей. Вскоре эти соединения стали предметом интенсивных исследований, поскольку структура медной подрешетки оказалась похожей на структуру меди в высокотемпературных сверхпроводниках. Позже стало понятно, что новые купраты являются также хорошими объектами для изучения магнитного взаимодействия между  $3d$ - и  $4f$ -подрешетками.

Физические свойства соединений с различными редкоземельными элементами оказались очень разными. В отличие от других «зеленых фаз», измерения магнитной восприимчивости и теплоемкости в  $\text{Gd}_2\text{BaCuO}_5$  показали вместо двух магнитных переходов, что обычно соответствует установлению порядка в  $3d$ - и  $4f$ -подрешетках, только один переход. Поэтому возник вопрос о реальной

магнитной структуре и ее температурной эволюции.

Магнитный порядок был исследован нейтроннографическим методом на изотопзамещенном образце  $^{160}\text{Gd}_2\text{BaCuO}_5$ , поскольку естественный  $\text{Gd}$  имеет очень большое поглощение нейтронов. Ниже температуры Нееля, около 12 К, была обнаружена несоразмерная магнитная структура с волновым вектором  $\mathbf{k} = [0\ 0\ 1/2 - \delta]$ . Однако при температуре 5 К наблюдался новый переход к соразмерной структуре с волновым вектором  $\mathbf{k} = [0\ 0\ 1/2]$ , который был ранее «невидим» в магнитных измерениях. Оказалось, что этот так называемый lock-in переход сопровождается переориентацией магнитных моментов в редкоземельной подрешетке и перестройкой атомной структуры. Из температурных зависимостей магнитных моментов следует, что соединение  $^{160}\text{Gd}_2\text{BaCuO}_5$  является низкоразмерным магнетиком, что типично для редкоземельных купратов (рис.).



Магнитная структура  $^{160}\text{Gd}_2\text{BaCuO}_5$  при температуре  $T = 1,3\text{ K}$  с волновым вектором  $\mathbf{k} = [0\ 0\ 1/2]$ . Розовым и красным цветами показаны атомы  $\text{Gd}$  в разных позициях; оранжевым – атомы меди (слева). Нейтроннограммы, измеренные при разных температурах. На вставке показана температурная зависимость величины волнового вектора (справа)

## Нейтронная спин-манипуляционная оптика

Н. К. Плешанов

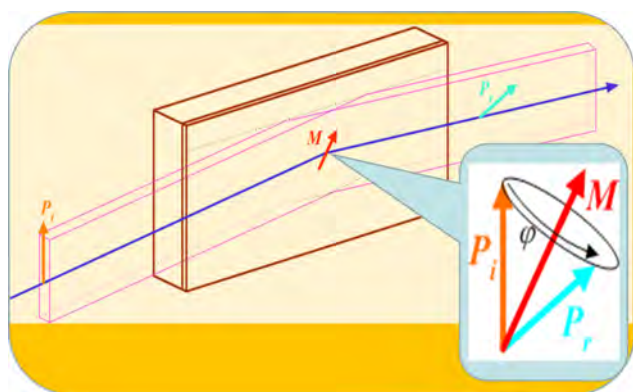
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

Предложено новое направление развития нейтронной оптики – спин-манипуляционная оптика, основанная на квантовых аспектах взаимодействия нейтрона с магнитно-анизотропными слоями и означающая переход от 1D (селекция спинов) к 3D (манипуляции со спинами) в поляризационной нейтронной оптике.

Предложены решения, которые обеспечивают высокое отражение ( $R \sim 1$ ) и слабую зависимость угла поворота спина от длины волны нейтрона и от угла скольжения. Открываются новые возможности для манипуляций со спинами. Нейтронные отражатели-вращатели спина (в частности,  $\pi/2$ - и  $\pi$ -вращатели, рис.) могут как использоваться непосредственно, так и комбинироваться для создания 3D-поляризаторов, 3D-анализаторов, 3D-ротаторов (спиновых манипуляторов), гиперполяризаторов, квантовых прецессоров и антипрецессоров спина.

Предложены гиперполяризаторы – новый тип поляризующих устройств, которые не только разделяют нейтроны с противоположными спинами, но и флиппируют «неправильные» спины, таким образом поляризуя до 100 % нейтронов (с увеличением углового расхождения или ширины пучка – в соответствии с теоремой Лиувилля).

Нейтронная спин-манипуляционная оптика непосредственно применима к развитию таких нейтронных методик, как рефлектометрия с 3D-поляризацией, нейтронно-оптическое спин-эхо, включая компактную и TOF-схемы. Также появляется возможность поляриметрии очень холодных и ультрахолодных нейтронов, эквивалентной эллипсометрии света, но с чрезвычайно высокой чувствительностью к поверхностному магнетизму.



Вращатели спина, включая  $\pi/2$ -вращатели и  $\pi$ -вращатели (флипперы), можно сделать из зеркал на основе магнитно-анизотропных пленок и многослойных структур. Для практического использования нужно, чтобы отражение было близко к 1, а угол поворота спина при отражении  $\phi$  слабо зависел от длины волны нейтрона и угла скольжения.  $P_i$  и  $P_r$  – поляризация нейтронов до и после отражения соответственно

1. Pleshanov N. K. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 528. P. 012023.

2. Плешанов Н. К. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. Т. 1. С. 28.

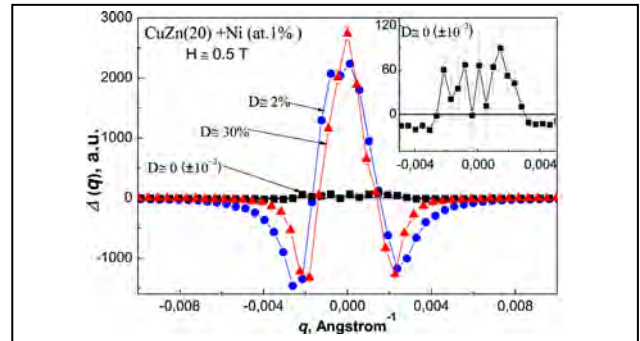
## Ядерно-магнитные интерференционные эффекты в малоугловом рассеянии поляризованных нейтронов

В. В. Рунов

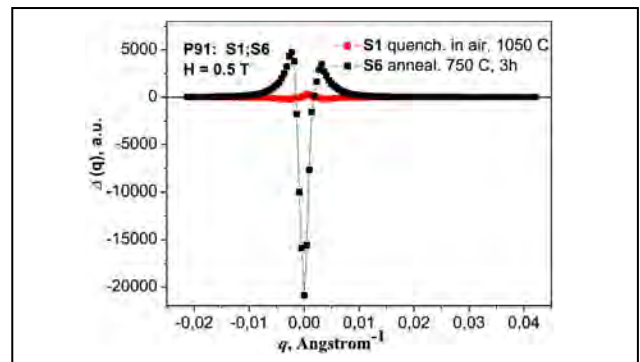
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

Рассеяние поляризованных нейтронов, в сравнении с неполяризованными, обладает очень важным преимуществом – в нем можно выделить часть, обусловленную ядерно-магнитным интерференционным рассеянием, т. е. измерить произведение ядерной амплитуды рассеяния ( $A$ ) на магнитную ( $B$ ), ( $AB$ ). Ниже показана высокая эффективность такого выделения при решении определенных задач, которая основана на возможности изучать ядерно-магнитное контрастирующее рассеяние на фоне общего, существенно более сильного, магнитного или ядерного, или того и другого, малоуглового рассеяния. Задача подобна поиску «иголки в стоге сена». Тем не менее она может быть решена благодаря обоюдному ядерно-магнитному контрастированию. В эксперименте интерференционное рассеяние  $\Delta(q)$  измеряют как разность в интенсивности рассеяния с поляризацией нейтронов по/против поля, прикладываемого к образцу, т. е.  $\Delta(q) = I^+(q) - I^-(q) \approx P(AB)$ , где  $P$  – поляризация прошедших образец нейтронов. Продемонстрируем результаты двух работ, сделанных в НИЦ КИ ПИАФ после модернизации установки «Вектор»: 1) по изучению магнитных корреляций в немагнитных матрицах, обусловленных примесью 3d-металла (CuZn (20) с 1 %-ной примесью Ni) (рис. 1); по обнаружению и эволюции ядерно-магнитной контрастирующей фракции в магнитном сплаве P91 в процессе термообработки (рис. 2).

Из данных интерференционного рассеяния определены характерные размеры выделяющихся при термообработке фаз, которые увеличивались при увеличении температуры и времени отжига от 150 до 450 Å, что согласуется с уменьшением твердости данного сплава.



**Рис. 1.** Зависимость ядерно-магнитной интерференции  $D(q) = I^+(q) - I^-(q)$  от переданного импульса в образцах CuZn(20) (Ni – 1 ат. %) в поле  $H \approx 0,5$  Тл при различной термической обработке образцов.  $D$  – деполаризация в образце. По результатам эксперимента определены вид кросс-корреляционной функции и величина характерного корреляционного радиуса примеси



**Рис. 2.** Зависимость ядерно-магнитной интерференции  $\Delta(q) = I^+(q) - I^-(q)$  от переданного импульса в образцах стали P91 в поле  $H \approx 0,5$  Тл при различной термической обработке образцов. Видно, как существенно отличается интерференционное рассеяние закаленного и отожженного образцов. Наблюдалась две стадии термообработки: 1) закалка и 2) отжиг, в которых меняется знак интерференционного рассеяния, обусловленный изменением знака ядерного контраста, связанного с образованием V или V(C) фаз при закалке и фаз карбидов металлов при отжиге

1. Рунов В. В., Ильин Д. С., Рунова М. К., Раджабов А. К. // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95. С. 530.

2. Рунов В. В., Скоробогатых В. Н., Рунова М. К., Сумин В. В. // ФТТ. 2014. Т. 56(1). С. 68.

## Исследование снятия вырождения киральной симметрии в геликоидальной спиновой структуре HoY сверхрешетки, индуцированного внешним магнитным полем

С. В. Григорьев, В. В. Тарнавич

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

В работе исследован уникальный эффект нарушения киральной симметрии геликоидальной спиновой структуры в многослойной HoY-системе. Используя оригинальную методику в эксперименте по рассеянию поляризованных нейтронов (рис.) установлено, что за счет приложения к образцу внешнего магнитного поля во время его охлаждения нарушается равновесная заселенность левых и правых спиральных доменов в спиновой структуре. Полученные экспериментальные результаты находят интерпретацию, связанную с появлением взаимодействия Дзялошинского – Мориа на границе раздела слоев в многослойной системе.

Работа является последовательным и принципиально новым продолжением большой исследовательской темы по изучению магнитоструктурных эффектов в многослойных системах с магнит-немагнитными границами на основе редкоземельных металлов. Полученные результаты устанавливают общность нарушения киральной симметрии в системах, оговоренных выше. Работа выполнена при активном участии сотрудников НИЦ КИ ПИАФ (зав. Отделом исследования конденсированного состояния, д. ф.-м. н. С. В. Григорьев, м. н. с. В. В. Тарнавич, HZG (Д. Лотт) и JCNS (С. Маттаух).

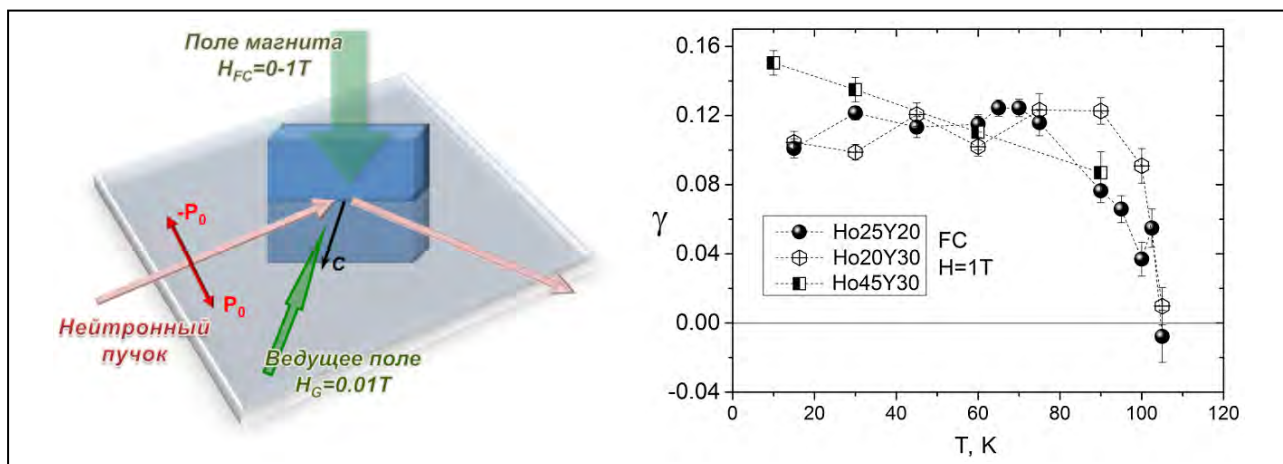


Схема эксперимента (для возможности выделения кирального вклада и исследования заселенности магнитных доменов во время измерений к образцу прикладывалось ведущее магнитное поле  $H_G$ , так что  $H_G \parallel P_0 \parallel k$ ; подобная геометрия эксперимента позволяет изучать поляризационно-зависимую часть нейтронного рассеяния) (слева); киральный параметр  $\gamma$ , характеризующий отношение заселенности доменов с левой и правой спиральями (справа)

## Периодичность структуры и дефекты в никелевых инвертированных опалоподобных кристаллах на мезоскопическом и атомном масштабах

А. В. Чумакова, А. А. Мистонов, В. А. Дядькин, С. В. Григорьев  
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

В работе была изучена структура металлических никелевых инвертированных опалоподобных кристаллов на мезоскопическом и атомном масштабах с помощью сканирующей электронной микроскопии, малоугловой и широкоугольной дифракции синхротронного излучения.

Опалоподобные кристаллы на основе проводящих материалов обладают целым рядом особенностей как по своим свойствам, так и по синтезу. В частности, оптические свойства проводящих опалов деградируют, поскольку металлическая поверхность отражает свет, следовательно пропускание лазерного луча через такую среду невозможно. Дифракция света на проводящих кристаллах определяется несколькими слоями на поверхности опала. Тем не менее проводящие инвертированные опалы являются интересными с точки зрения взаимосвязи оптических, транспортных и магнитных свойств.

Инвертированные опалоподобные кристаллы на основе никеля были получены путем заполнения пор опалоподобного кристалла никелем методом электрохимического осаждения с последующим удалением исходной матрицы. Метод электрохимического осаждения позволяет контролируемо осаждать металл, поэтому для исследования была синтезирована серия образцов  $Ni_{3,5}$ ,  $Ni_8$ ,  $Ni_{17}$  и  $Ni_{26}$  различной толщины, где число соответствует количеству плотноупакованных гексагональных слоев в исходной матрице (рис. 1).

Сегодня повсеместно для аттестации получаемой структуры и ее дефектности используется сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), однако этого недостаточно: ввиду локальности и «поверхностности» этого метода анализ протяженных дву- и трехмерных дефектов оказывается на практике весьма затруднительным. Для более детального исследования структуры и дефектов

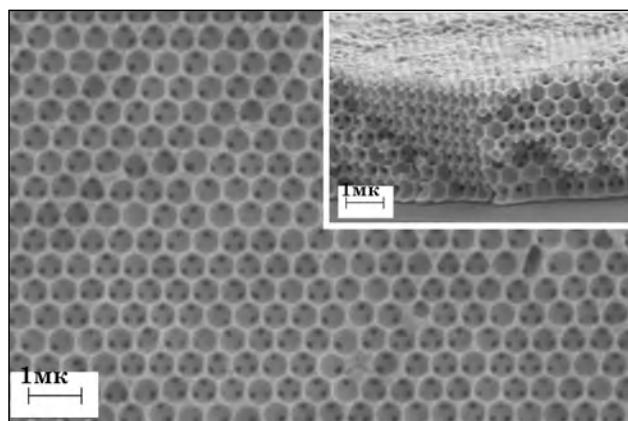
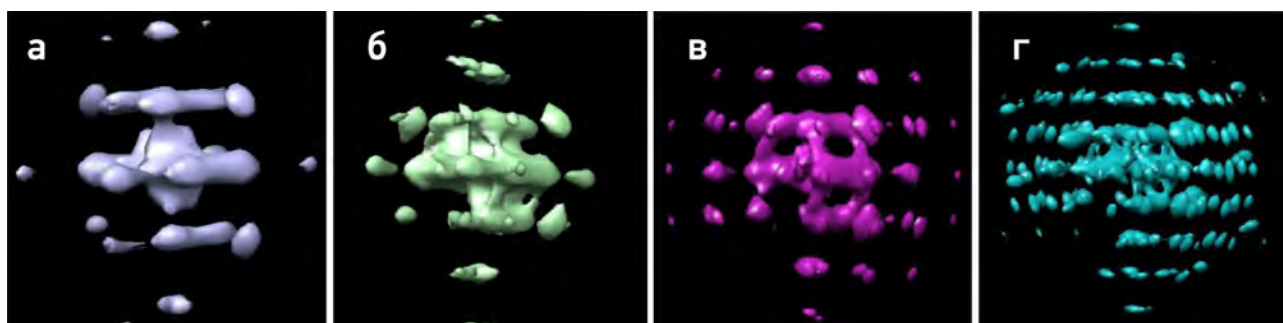


Рис. 1. Типичная микрофотография поверхности инвертированной опалоподобной пленки, полученная СЭМ. На вставке представлен скол пленки

упаковки прямых и инвертированных опалов хорошим дополнением является метод ультрамалоуглового рассеяния синхротронного излучения, позволяющий оценить структуру по всему объему кристалла. В работе показано, что дефекты упаковки в таких кристаллах могут формироваться как на этапе осаждения полистирольных сфер на проводящую подложку, так и на этапе электроосаждения металлов в поры коллоидного кристалла, причем второй этап генерирует большее количество дефектов по сравнению с первым. Следует отметить, что СЭМ-образы прямых и инвертированных опалов демонстрируют оптимистичные картины гранцентрированной кубической (ГЦК) структуры в обоих кристаллах, однако малоугловая дифракция ясно показывает почти 100 %-ное двойникование структуры и появление СГПУ-фазы вместо ГЦК для всех кристаллов.

Исследование структуры методом малоугловой дифракции синхротронного излучения привело к следующим выводам. Мезоскопическая структура инвертированных опалоподобных кристаллов



**Рис. 2.** Трехмерная визуализация обратного пространства инвертированных опалоподобных кристаллов  $Ni_{3,5}$  (а);  $Ni_8$  (б);  $Ni_{17}$  (в);  $Ni_{26}$  (г)

на основе никеля полностью повторяет структуру исходной матрицы искусственного опалового кристалла с незначительным изменением постоянной решетки. Плотнупакованные гексагональные слои упорядочены в ГЦК-структуру (вероятность образования мотива ГЦК составляет  $\alpha \sim 0,7$ ) с постоянной решетки  $750 \pm 20$  нм. Дополнительные дифракционные рефлексы, наблюдаемые на дифракционной картине, являются диффузными брэгговскими стержнями, которые хорошо видно при 3D-визуализации обратного пространства (рис. 2).

Эти диффузные брэгговские стержни расположены не только вдоль кристаллографического направления  $[111]$ , совпадающего с нормалью к подложке, но и по другим кристаллографическим направлениям  $\langle 111 \rangle$  в инвертированном опалоподобном кристалле, однако направление  $[111]$  является доминирующим. Тем не менее когда число слоев увеличивается до 20, число отражений возрастает и количество дефектов упаковки уменьшается. Вероятность образования ГЦК-мотива  $\alpha$  и средний поперечный размер структуры домена, равный 5 мкм, не зависят от количества слоев и остаются неизменными при условии, что исходная матрица является одинаковой для всех образцов. Мозаичность структуры возрастает с увеличением количества слоев.

Методом широкоугольной дифракции рентгеновских лучей было установлено, что на атомном

масштабе образцы инвертированных опалоподобных кристаллов содержат никель, обладающий ГЦК кристаллической структурой с параметром решетки  $\sim 3,52$  Å. Температура Дебая для инвертированных опалоподобных кристаллов совпадает с литературными данными для никеля (как для монокристалла, так и порошка). Коэффициенты теплового расширения для толстого инвертированного опалоподобного кристалла выше, чем соответствующие значения для порошковых материалов. Микроструктура никеля обладает своеобразными дислокациями и дефектами упаковки. Плотность дислокаций выше чем  $1 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$  и возрастает с увеличением числа слоев. Этот результат обусловлен условиями роста металла во время электроосаждения в матрице исходного опалоподобного кристалла и зависит от ее толщины. Вероятность образование двойников ( $\sim 0,01$ ) выше, чем дефектов деформационного типа ( $0,003 \pm 0,002$ ). Размер области когерентного рассеяния составляет  $\sim 50$  нм, что является хорошим результатом для оценки нижней границы среднего размера кристаллитов, которые равны  $\sim 100$  нм согласно данным сканирующей электронной микроскопии. Кристаллиты большего размера были найдены в более тонких инвертированных опалоподобных кристаллах (т. е. с меньшим количеством слоев).



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

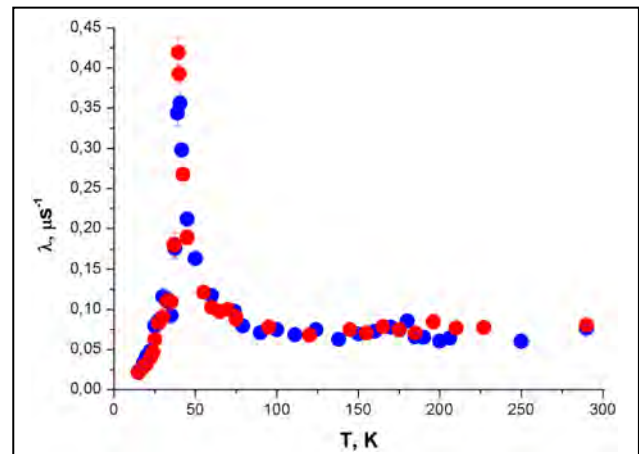
С. И. Воробьев, А. Л. Геталов, Е. Н. Комаров, С. А. Котов, Г. В. Щербанов  
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

С помощью  $\mu\text{SR}$ -метода на  $\mu\text{SR}$ -установке, расположенной на выходе мюонного канала синхротрона НИЦ КИ ПИАФ, были проведены исследования магнитных свойств мультиферроика  $\text{Eu}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Mn}_2\text{O}_5$  в интервале температур 10–300 К.

Измерения показали, что имеются значительные потери поляризации в области температур 15–40 К, причем потери поляризации зависят от режима охлаждения образца. Максимальное отличие в потерях асимметрии  $a_s$  для разных режимов охлаждения образца наблюдается в области температур 25–40 К (область несоизмерной фазы). В области температур 40–290 К никаких особенностей не наблюдается. При температуре 40 К наблюдается переход из парамагнитного состояния в магнитоупорядоченное (АФМ).

Характер поведения скорости релаксации поляризации  $\lambda$  от температуры для образца  $\text{Eu}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Mn}_2\text{O}_5$  полностью совпадает с образцом  $\text{EuMn}_2\text{O}_5$  и практически не зависит от режима охлаждения (рис.). В области температур 80–290 К никаких особенностей в температурной зависимости параметра  $\lambda$  не видно. Вблизи температуры перехода образца в магнитоупорядоченное состояние наблюдается заметный рост параметра  $\lambda$ . С понижением температуры образца в области  $T < T_N$  ( $T_N$  – температура перехода) наблюдается монотонное уменьшение скорости релаксации  $\lambda$ .

Таким образом, видим, что допирование образца  $\text{EuMn}_2\text{O}_5$  церием (Ce) не сильно повлияло на пове-



Температурная зависимость скорости релаксации поляризации  $\lambda$ . Образец  $\text{Eu}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Mn}_2\text{O}_5$  – синие точки; образец  $\text{EuMn}_2\text{O}_5$  – красные точки

дение измеренных параметров  $a_s$  и  $\lambda$ . Обнаруженный ранее эффект потери асимметрии  $a_s$  ниже температуры установления дальнего магнитного порядка в мультиферроиках  $\text{EuMn}_2\text{O}_5$  и  $\text{GdMn}_2\text{O}_5$  сохранился на том же уровне (~ 25 %). Если указанные потери асимметрии связаны с появлением ферромагнитных пар в образце, значит, последние образовались не в результате легирования, а за счет туннелирования  $e_g$ -электронов между плоскостями. Такие пары равномерно распределены по всему объему образца, а модифицированный легированный объем очень мал.

1. Воробьев С. И., Геталов А. Л., Головенчик Е. И., Комаров Е. Н., Котов С. А., Павлова И. И., Морослип А. Э., Санина В. А., Щербанов Г. В. // Сб. докл. VI Межд. научн. конф. «Актуальные проблемы физики твердого тела». Минск, 2013. Т. 1. С. 227–229.
2. Воробьев С. И., Геталов А. Л., Головенчик Е. И., Комаров Е. Н., Коптев В. П., Котов С. А., Павлова И. И., Санина В. А., Щербанов Г. В. // ФТТ. 2013. Т. 55(3). С. 422.



# Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино

- 60 Первое наблюдение редкого распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  и указание на существование распада  $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$
- 61 Измерение скорости мюонного захвата на протоне с точностью 1 % и определение псевдоскалярного формфактора  $g_p$  (эксперимент MuCap)
- 62 Эксперимент D0
- 63 Фоторождение чармония в ультрапериферических протон-ядерных столкновениях на Большом адронном коллайдере
- 65 Поиск тяжелых резонансов в эксперименте ATLAS
- 67 Влияние плотности потока нуклонов на эффективность повреждения ПЗС-матриц
- 69 Свойства бозона Хиггса в экспериментах CMS и ATLAS на LHC
- 71 Первое наблюдение процесса электрослабого образования Z-бозона в экспериментах CMS и ATLAS на LHC
- 72 Новые эффекты в инклюзивном рождении чармония в ядро-ядерном столкновении на Большом адронном коллайдере
- 74 Поиск солнечных аксионов, возникающих в реакции  $p(d, {}^3\text{He})A$ , с помощью сцинтилляционного BGO-болометра
- 75 Регистрация солнечных  $pp$ -нейтрино в эксперименте «Борексино»

## Первое наблюдение редкого распада $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ и указание на существование распада $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$

LHCb, CMS Collaborations

Стандартная модель (СМ) физики элементарных частиц описывает сильное и электрослабое взаимодействие всех известных элементарных частиц. Эта теория обладает мощной предсказательной силой и проверяется экспериментально, в том числе на Большом адронном коллайдере (БАК, ЦЕРН). Особый интерес для проверки СМ представляют редкие распады частиц, содержащие тяжелые  $s$ - и  $b$ -кварки. Так, в рамках СМ удастся довольно точно рассчитать вероятности и соотношение вероятностей редких распадов нейтральных мезонов:  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  и  $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ . Согласно СМ на 10 млрд родившихся частиц подобного рода только 40  $B_s^0$ -мезонов и один  $B^0$ -мезон распадаются на  $\mu^+\mu^-$ -пару. Многие теории, разработанные для объяснения астрофизических наблюдений, которые не могут быть описаны в рамках СМ, предсказывают значительное отклонение вероятностей данных распадов от предсказанных СМ. Соотношение вероятностей этих распадов,  $R \equiv \text{Br}(B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) / \text{Br}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$ , также отличается для разных классов подобных теорий. (Следует заметить, что целый класс теорий за пределами СМ, а именно теорий с минимальными нарушениями симметрии ароматов (minimal flavour violation), предсказывает такое же значение  $R$ , как и СМ.) Таким образом, точное измерение ве-

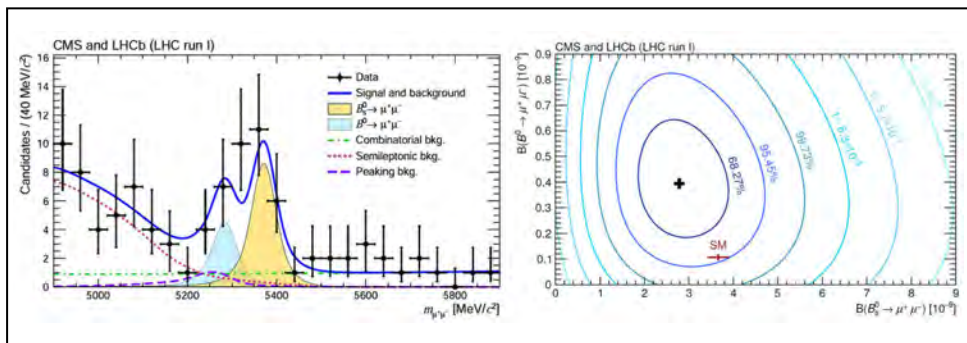
роятностей таких распадов является экспериментальным тестом СМ и инструментом для поиска указаний на существование «новой физики».

В ноябре 2014 г. эксперименты LHCb и CMS представили совместный анализ всех экспериментальных данных, накопленных в сеансах работы БАК. На рисунке (слева) приведено распределение отобранных событий кандидатов по инвариантной массе  $\mu^+\mu^-$ -пар. Синяя линия соответствует лучшему описанию всего спектра; заштрихованные распределения – вклад изучаемых распадов; прочие линии обозначают вклад различных фоновых компонентов. Проведенный анализ позволяет утверждать, что распад  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  экспериментально наблюдается на уровне статистической значимости  $6,2\sigma$ . Более того, полученные экспериментальные данные на уровне  $3\sigma$  указывают на существование распада  $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ . Измеренные вероятности распадов составили:

$$\text{Br}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = (2,8_{-0,6}^{+0,7}) \cdot 10^{-9},$$

$$\text{Br}(B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = (3,9_{-1,4}^{+1,6}) \cdot 10^{-10}.$$

Эти результаты находятся в согласии с предсказаниями СМ:  $\text{Br}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)_{\text{СМ}} = (3,66 \pm 0,23) \cdot 10^{-9}$  и  $\text{Br}(B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)_{\text{СМ}} = (1,06 \pm 0,09) \cdot 10^{-10}$ . Полученное отношение вероятностей этих распадов  $R = 0,14_{-0,06}^{+0,08}$  также согласуется с предсказаниями СМ и некоторых ее расширений (рис.).



Распределение событий-кандидатов по инвариантной массе  $\mu^+\mu^-$ -пар (слева). Вероятностные контуры в плоскости  $\text{Br}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$  vs.  $\text{Br}(B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$  и предсказания СМ (справа)

# Измерение скорости мюонного захвата на протоне с точностью 1 % и определение псевдоскалярного формфактора $g_p$ (эксперимент MuCap)

А. А. Васильев

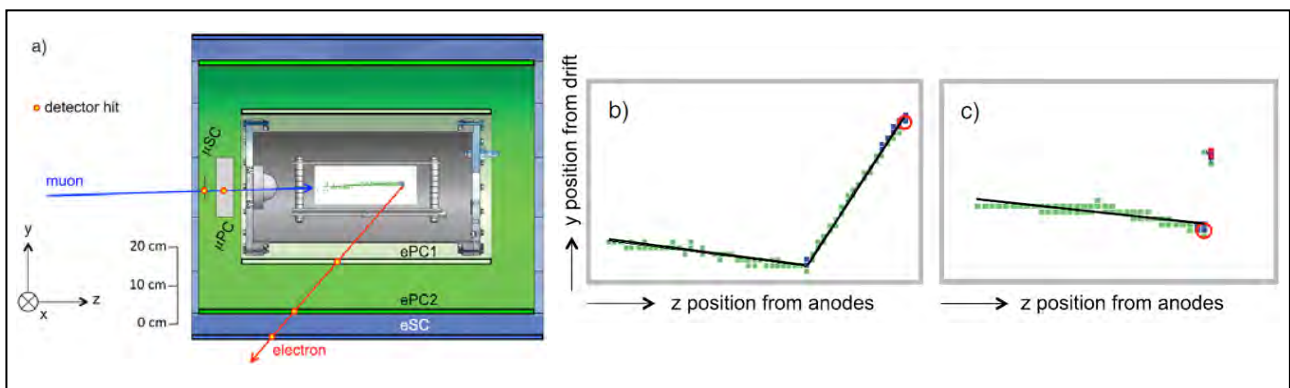
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

Задачей эксперимента MuCap, выполненного международной коллаборацией в составе ученых из России, Швейцарии, США и ряда других стран, являлось измерение скорости мюонного захвата  $\Lambda_S$  из синглетного состояния атома, образованного ядром водорода и мюоном. Точность измерения составляет 1 %, что на порядок лучше существующих данных. Эксперимент проводился на базе высокоинтенсивного мюонного пучка Института им. Пауля Шеррера (PSI, Швейцария). В основу техники эксперимента положена концепция активной мишени. Пучок мюонов останавливается во время-проекционной камере (Time Projection Chamber, TPC), заполненной особо чистым водородом. TPC является одновременно мишенью для пучка и детектором. Она позволяет восстановить координаты точки остановки мюона и его треков в рабочем газе. Окружающие TPC цилиндрические проволочные пропорциональные камеры и сегментированный цилиндрический сцинтиллятор детектируют электроны, порожденные распадом мюона,

и обеспечивают определение направления их вылета из камеры. Входные сцинтилляционный счетчик и мюонная пропорциональная камера регистрируют время появления мюона и контролируют профиль пучка (рис.). Согласованная работа TPC и окружающих детекторов обеспечивает однозначную интерпретацию зарегистрированных сигналов и сопоставление их с событием распада мюона. Величина  $\Lambda_S$  вычисляется из разности между скоростью распада  $\mu^-$  в водороде и скоростью распада свободных мюонов  $\mu^+$ . Высокая химическая ( $\sim 1 \cdot 10^{-8}$  молярных долей всех примесей) и изотопная ( $\sim 6 \cdot 10^{-9}$  молярных долей HD) чистота рабочего газа обеспечивается созданными в НИЦ КИ ПИАФ циркуляционной системой очистки и криогенной системой изотопной очистки.

В результате эксперимента зарегистрировано  $1,2 \cdot 10^{10}$  остановок мюонов в детекторе, что позволяет вычислить  $\Lambda_S = (714,9 \pm 5,4_{\text{стат.}} \pm 5,1_{\text{сист.}}) \text{ c}^{-1}$  и определяет псевдоскалярный формфактор протона

$$g_p(q_0^2 = -0,88 m_\mu^2) = 8,06 \pm 0,55.$$



Сечение системы детекторов эксперимента MuCap (TPC показана в центре):  $\mu$ SC – мюонный сцинтилляционный счетчик;  $\mu$ PC – мюонная пропорциональная камера; ePC1, ePC2 – электронные пропорциональные камеры; eSC – электронные сцинтилляционные счетчики (а). Восстановленные по данным TPC треки мюона для случая  $\mu$ - $p$ -рассеяния и захвата на примеси соответственно (b, c)

## Эксперимент D0

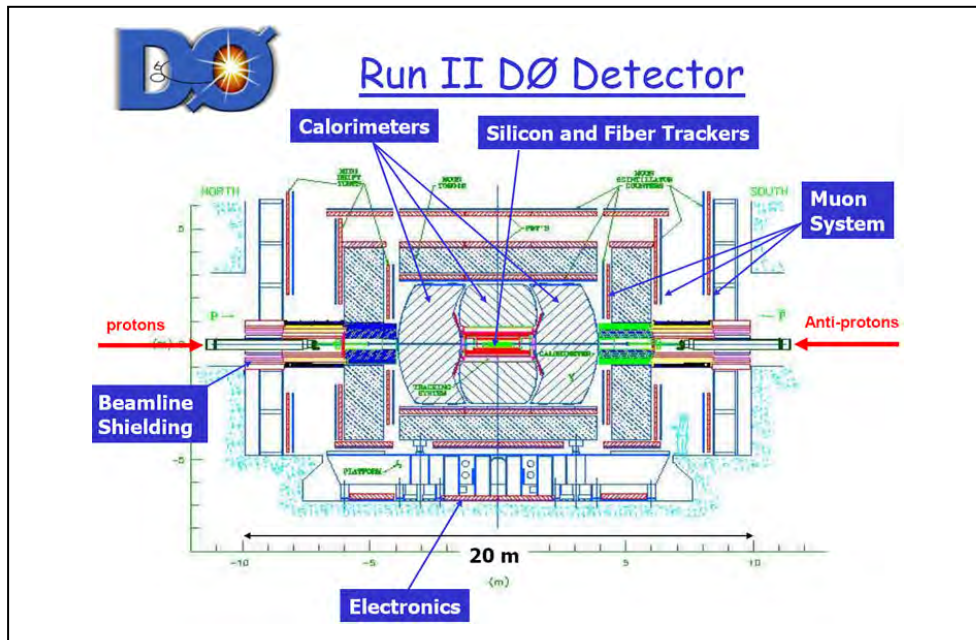
Г. Д. Алхазов

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

НИЦ КИ ПИАФ участвовал в международном эксперименте D0, посвященном физике элементарных частиц, проводившемся в Национальной ускорительной лаборатории им. Энрико Ферми (FNAL, США) на коллайдере «Тэватрон» с самой высокой в мире энергией (1 ТэВ) сталкивающихся пучков ускоренных протонов и антипротонов. На рисунке приводится схематическое изображение экспериментальной установки D0. Физики НИЦ КИ ПИАФ разработали и создали электронику для считывания информации с 50 тыс. каналов мини-дрейфовых трубок мюонного детектора D0, участвовали в сеансах по набору данных и в их анализе. Набор экспериментальных данных был завершен в 2011 г.;

в 2014 г. работа продолжалась и были получены новые результаты.

Здесь мы остановимся на одном из наиболее важных результатов, полученном в 2014 г. В совместном анализе данных экспериментов D0 и CDF впервые наблюдается редкий процесс – рождение одиночных  $t$ -кварков в  $s$ -канале. Сечение этого процесса  $\sigma_s$  имеет высокую чувствительность к проявлениям новой физики за рамками Стандартной модели (СМ). Определенное в экспериментальных данных сечение  $\sigma_s = 1,29 \pm 0,25$  пбн находится в хорошем согласии с величиной сечения  $\sigma_s = 1,05 \pm 0,06$  пбн, предсказываемой СМ.



Схематическое изображение детектора D0

## Фоторождение чармония в ультрапериферических протон-ядерных столкновениях на Большом адронном коллайдере

В. А. Гузей, М. Б. Жалов, Е. Л. Крышень, В. Н. Никулин, В. М. Самсонов

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

Когерентное фоторождение чармония на протоне является уникальным источником информации о плотности глюонов, переносящих долю  $x$  импульса протона. В лидирующем порядке теории возмущений квантовой хромодинамики (КХД) сечение процесса  $\gamma + p \rightarrow p + J/\psi$  при высоких энергиях  $W_{\gamma p}$  пропорционально квадрату глюон-

ной плотности в протоне  $g_p(x) = \frac{M_{J/\psi}^2}{W_{\gamma p}^2} \cdot \mu^2$  на мас-

штабе разрешения  $\mu^2$ , определяемом массой очарованного кварка и его характерным поперечным импульсом в  $J/\psi$ . Эта фундаментальная величина,  $g_p(x, \mu^2)$ , в области малых  $x$  известна с большой неопределенностью. В то же время ее знание необходимо для описания и предсказания в рамках КХД сечений жестких процессов во взаимодействиях протонов и ядер, для изучения процессов формирования и эволюции кварк-глюонной плазмы в столкновениях ультрарелятивистских ионов, а также для поисков «новой физики» за рамками Стандартной модели.

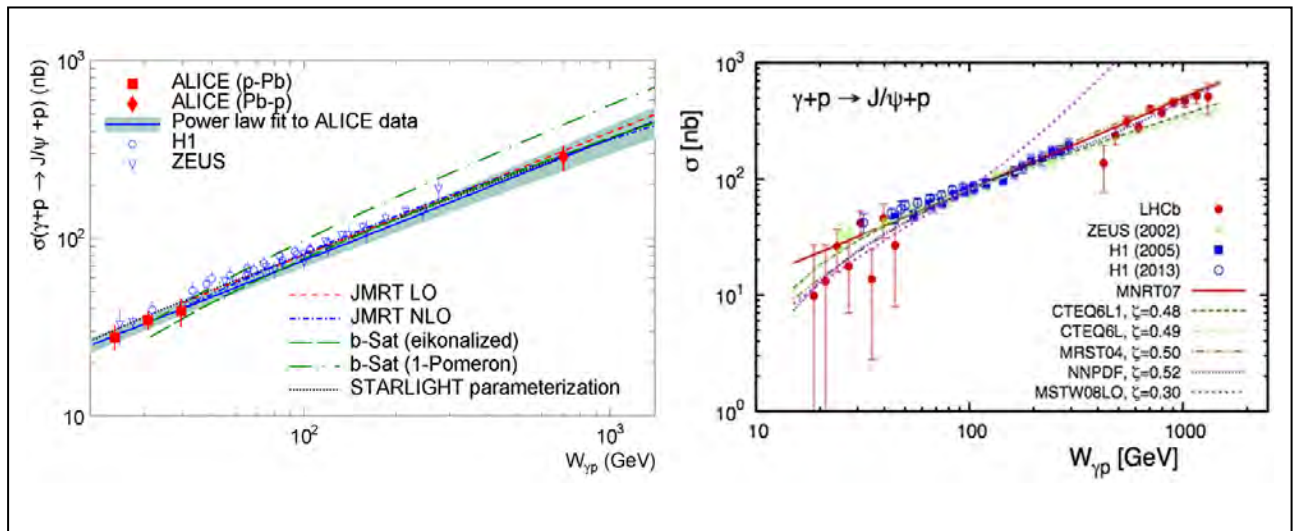
В настоящее время единственным экспериментальным методом изучения фотон-протонных и фотон-ядерных процессов при высоких энергиях являются ультрапериферические столкновения (УПС) протонов и ядер на коллайдерах. Релятивистские ионы – интенсивные источники квазиреальных фотонов с энергиями в широком диапазоне, что позволяет исследовать фоторождение чармония на протоне в ультрапериферических  $pA$ -столкновениях на Большом адронном коллайдере (БАК) при беспрецедентно высоких энергиях.

Коллаборация ALICE впервые измерила эксклюзивное фоторождение  $J/\psi$ -мезонов в столкновениях протонов с ядрами свинца ( $p$ -Pb) при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$  ТэВ.  $J/\psi$ -мезоны были восстановлены через их распад на мюонную пару, детектиру-

емую мюонным спектрометром, в создание которого НИЦ КИ ПИАФ внес значительный вклад. Требование отсутствия какой-либо другой адронной активности в детекторе гарантировало условия ультрапериферичности и эксклюзивности. В процессе набора данных направления движения пучков протонов и ядер свинца были изменены на противоположные, что позволило измерить сечение при больших положительных ( $2,5 < y < 4$ ) и отрицательных ( $-3,6 < y < -2,6$ ) значениях быстроты чармония  $y$ , соответствующих следующим значениям инвариантной энергии фотон-протонного взаимодействия  $W_{\gamma p}$ :  $21 < W_{\gamma p} < 45$  ГэВ и  $577 < W_{\gamma p} < 952$  ГэВ. Таким образом, измерения ALICE позволяют определить поведение  $g_p(x, \mu^2)$  в широкой области малых  $x$  ( $0,00002 < x < 0,02$ ) и проверить, происходит ли в этой области  $x$  выход на новый режим насыщения глюонной плотности в нуклоне. Следует отметить, что минимальное значение  $x \approx 0,00002$  в 5 раз меньше того, что было достигнуто в экспериментах H1 и ZEUS на электрон-протонном коллайдере HERA при измерении сечения  $\gamma + p \rightarrow p + J/\psi$ .

На рисунке (слева) представлено сравнение данных по сечению фоторождения  $J/\psi$  на протоне, полученных коллаборациями ALICE, H1 и ZEUS, с теоретическими предсказаниями в рамках лидирующего (JMRTL0) и следующим за лидирующим (JMRTNLO) порядками теории возмущений КХД и цветовой дипольной модели (b-Sat). Сплошная прямая с заштрихованной областью – результат однопараметрической подгонки в форме  $\sigma \propto W_{\gamma p}^{\delta}$  с  $\delta = 0,69 \pm 0,02$  (стат.)  $\pm 0,03$  (сист.) к данным H1 и ZEUS. Как видно из рисунка, теоретические модели (за исключением дипольной модели b-Sat (1-Pomeron)) хорошо описывают данные.

Фоторождение  $J/\psi$  на протонах было также измерено в протон-протонных УПС на БАК при



Данные по сечению фоторождения  $J/\psi$ , полученные коллаборациями ALICE, H1, ZEUS, LHCb

энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 7$  ТэВ коллаборацией LHCb. В этом случае ошибки в величине извлекаемых сечений когерентного фоторождения несколько больше из-за неопределенностей в разделении вкладов от фотонов высоких и низких энергий и учете взаимодействия в начальном и конечном состояниях в  $pp$ -столкновениях, и в пределах ошибок результаты ALICE и LHCb согласуются. На рисунке (справа) показано сравнение сечений, измеренных H1, ZEUS и LHCb, с вычислениями в рамках лидирующего порядка теории возмущений КХД, использующими различные параметризации глюонной плотности в протоне. Многие современные глюонные плотности (CTEQ6L, CTEQ6L1, MRST, NNPDF) хорошо

описывают зависимость сечения от  $W_{\gamma p}$ , но требуют 50 % нормировки (фактор  $\xi = 0,5$ ). В то же время глюонное распределение MSTW08LO предсказывает слишком быстрый рост с увеличением энергии  $W_{\gamma p}$ , не согласующийся с данными.

В заключение важно подчеркнуть, что степенная подгонка к сечениям процесса  $\gamma + p \rightarrow p + J/\psi$ , измеренным на HERA, также хорошо описывает результаты, полученные в экспериментах ALICE и LHCb. Это указывает на отсутствие значительных явлений, связанных с насыщением глюонной плотности в протоне, вплоть до области  $x \approx 0,00001$  при масштабе разрешения порядка нескольких ГэВ<sup>2</sup>.

1. Guzey V., Zhalov M. // JHEP. 2013. V. 1310. P. 207.

2. Abelev et al. [ALICE Collaboration {., Ivanov V., Kryshen E., Khanzadeev A., Malaev M., Nikulin V., Riabov V., Riabov Yu., Samsonov V., Zhalov M. (PNPI)}]. arXiv:1406.7819 [hep-ex]; CERN Courier, Oct. 27, 2014, <http://cerncourier.com/cws/article/cern/58915>

3. Aaij R. et al. [LHCb Collaboration] // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2014. V. 41. P. 055002.



## Поиск тяжелых резонансов в эксперименте ATLAS

В. П. Малеев, О. Л. Федин, В. М. Соловьев

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

Несмотря на успехи Стандартной модели (СМ) в описании взаимодействия элементарных частиц, существует ряд вопросов, на которые она не дает ответов. В частности, СМ не предсказывает существование темной материи, не включает в себя какую-либо модель квантовой гравитации, не объясняет нейтринных осцилляций и т. д. Большинство моделей, расширяющих СМ и пытающихся ответить на эти вопросы, предсказывают существование тяжелых (с массами порядка 1 ТэВ) резонансов, являющихся бозонами, т. е. обладающих целым спином. Целый класс моделей, таких как теории великого объединения (ТВО – теории, пытающиеся объединить сильные и электрослабые взаимодействия и в силу этого включающие дополнительные симметрии), содержит дополнительные калибровочные бозоны, обычно обозначаемые  $Z'$  (нейтральный) и  $W'$  (заряженный). Попытки ввести гравитационное взаимодействие через дополнительные размерности приводят к возникновению  $RS$ -гравитона  $G^*$ . Кроме того, существует

модель, предложенная российскими теоретиками, которая предсказывает существование киральных бозонов  $W^*$  и  $Z^*$ , распадающихся так же, как  $W$  и  $Z$ -бозоны СМ.

Лаборатория адронной физики Отделения физики высоких энергий НИЦ КИ ПИАФ участвовала в поиске таких резонансов, как нейтральных, так и заряженных, распадающихся на лептоны, в данных, накопленных в 2012 г. экспериментом АТЛАС на Большом адронном коллайдере (БАК) при энергии протон-протонных столкновений 8 ТэВ. В данных 2012 г. при интегральной светимости  $\sim 20 \text{ фб}^{-1}$  новых резонансов обнаружено не было. В отсутствие сигнала были установлены пределы на существование тяжелых резонансов, предсказанных некоторыми моделями. В частности, на рис. 1 приведены ограничения на массу  $Z'$ - и  $W'$ -бозонов Sequential Standard модели (SSM). В SSM-модели константа взаимодействия новых тяжелых калибровочных бозонов с фермионами совпадает с константой взаимодействия

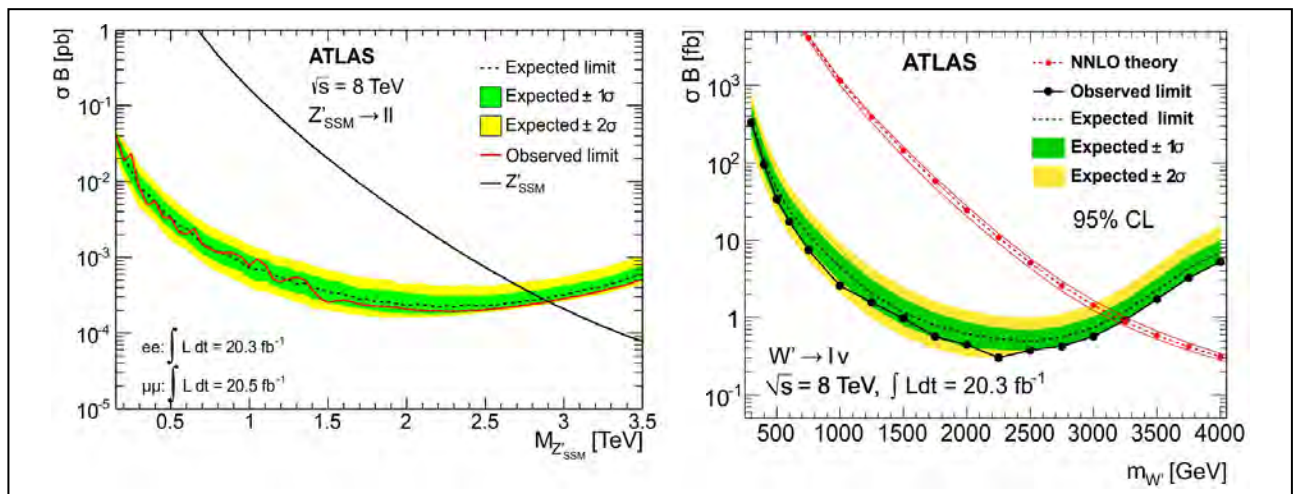
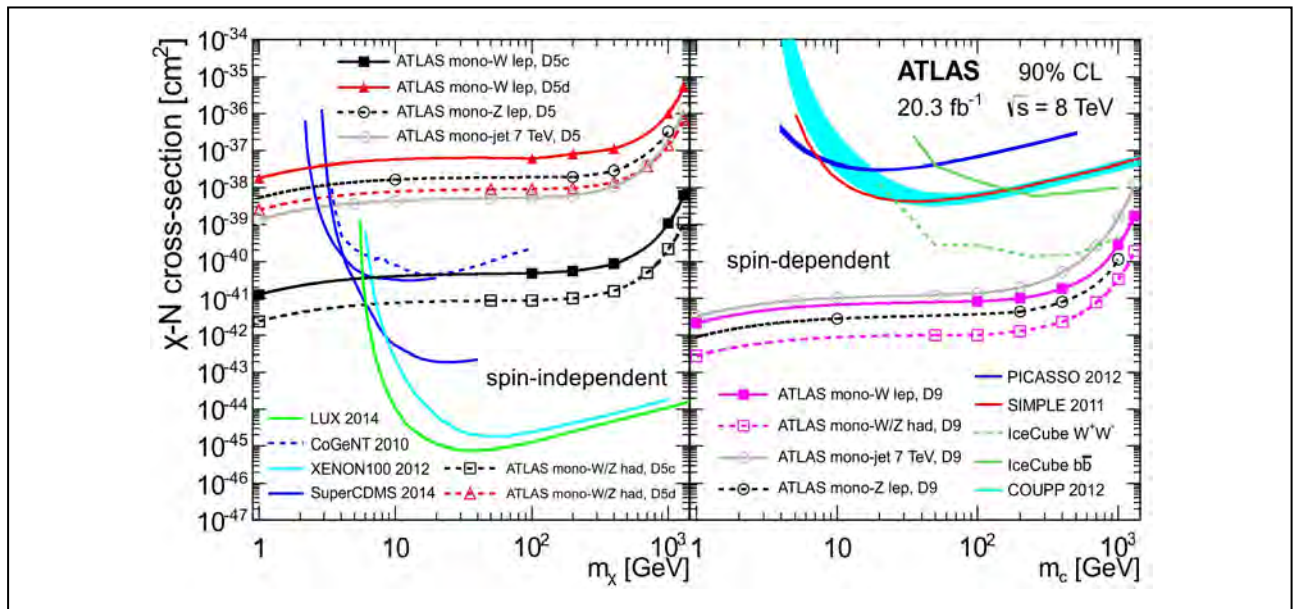


Рис. 1. Ожидаемые и наблюдаемые пределы на сечения рождения  $Z'$ -бозонов (слева) и  $W'$ -бозонов (справа) для уровня доверительной вероятности 95 %. Также показана теоретическая кривая сечений рождения  $Z'$ - и  $W'$ -бозонов



**Рис. 2.** Ограничения на существование частиц темной материи, полученные из анализа данных коллаборации ATLAS за 2012 г., в сравнении с результатами других экспериментов: для спин-независимого взаимодействия (слева) и спин-зависимого (справа)

с фермионами калибровочных бозонов SM. Как видно из рис. 1, существование  $Z'$ -бозона исключается вплоть до массы 2,85 ТэВ, а существование  $W'$ -бозона – до 3,2 ТэВ.

Результаты поиска заряженных тяжелых бозонов были интерпретированы для установления пределов на прямое рождение частиц темной материи на ускорителе в процессах такого рож-

дения, сопровождающихся излучением  $W$ -бозона в начальном состоянии. Результат интерпретации представлен на рис. 2; видно, что полученный результат находится в согласии с последними мировыми данными в этой области и позволяет существенно их улучшить в области малых масс  $< 10$  ГэВ.

## Влияние плотности потока нуклонов на эффективность повреждения ПЗС-матриц

К. Н. Ермаков, Н. А. Иванов, О. В. Лобанов, В. В. Пашук, Е. В. Митин, М. О. Прыгунов  
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

В современных интегральных схемах наблюдаются «одиночные эффекты»: сбои и отказы в работе изделий микроэлектроники под действием отдельных протонов и ионов космического излучения и нейтронов ближней атмосферы. Испытания радиационной стойкости элементной базы электронной аппаратуры авиакосмического назначения к таким эффектам проводятся, как правило, с использованием ускорителей протонов и ионов. Однако в этом случае плотности потоков частиц существенно превышают (на несколько порядков) плотности потока частиц космического излучения. В связи с этим возникает вопрос о соответствии результатов лабораторных (наземных) испытаний результатам работы электроники в космосе.

Нами были проведены исследования воздействия протонов с энергией 1 000 МэВ и нейтронов атмосферного спектра с максимальной энергией 1 000 МэВ на датчики изображения на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-матрицы). При облучении ПЗС-матриц нуклонами эффект воздействия отдельных частиц обусловлен структурными нарушениями в чувствительном объеме изделий, создаваемыми продуктами ядерных реакций нуклонов с ядрами атомов кремния, и проявляется в возникновении спайков – пикселей с темновыми токами  $I_{TP}$ , значительно превышающими средние значения. Такие пиксели на изображении с матрицы проявляются в виде белых точек, в связи с чем данный тип интегральных схем является удобным модельным типом для исследования одиночных эффектов в изделиях микроэлектроники.

В ПЗС-матрицах, облученных нуклонами с флюенсами в диапазоне  $10^9 \div 10^{10}$  см<sup>-2</sup>, исследовались временные распределения пикселей с большой величиной темнового тока: измерения яркости пикселей матрицы периодически проводились на протяжении месяца. Темновые токи в пикселях матрицы определялись по степени их яркости

в относительных единицах (отн. ед.) целым числом в диапазоне от 0 (черное) до 255 (белое).

Были получены временные зависимости, представленные на рис. 1, количества спайков в облученных матрицах, в которых темновые токи отличались от значений в необлученных матрицах на  $10 \div 30$ ,  $31 \div 60$ ,  $61 \div 100$  и  $101 \div 255$  отн. ед. Рассчитанные по экспериментальным данным сечения образования спайка нуклонами для этих групп составили  $1,1 \cdot 10^{-6}$ ,  $2,7 \cdot 10^{-7}$ ,  $3,6 \cdot 10^{-8}$  и  $4,3 \cdot 10^{-9}$  см<sup>-2</sup> соответственно. Из рисунка 1 видно, что после окончания облучения количество спайков со временем уменьшалось. Временные зависимости количества спайков аппроксимировались экспоненциальной функцией  $N \sim \exp(t/\tau)$  отдельно для пикселей каждой группы яркости. В результате аппроксимации были получены времена релаксации спайков различных яркостей, равные:  $\tau_{10 \div 30} = 6 \cdot 10^4$ ,  $\tau_{31 \div 60} = 4 \cdot 10^4$ ,  $\tau_{61 \div 100} = 3,5 \cdot 10^4$  и  $\tau_{101 \div 255} = 3,5 \cdot 10^4$  с.

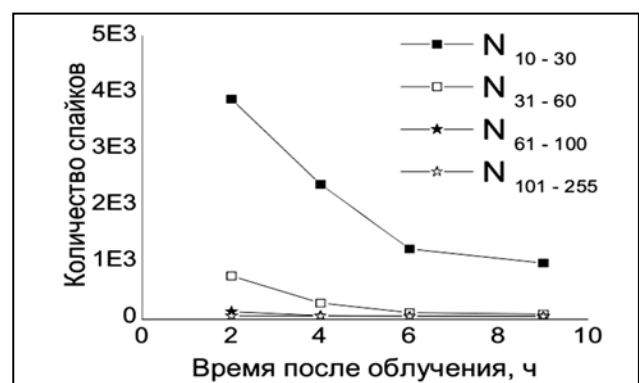


Рис. 1. Временные зависимости количества спайков

Снижение количества спайков обусловлено отжигом радиационных дефектов в облученных изделиях. Вследствие этого при длительном облучении нуклонами с плотностью потока частиц  $\Phi$  в ПЗС-матрице будет создано равновесное рас-

пределение спайков по величине темновых токов  $N_{\text{равн.}}(I_{\text{ТТ}})$ , которое определяется из условия: скорость образования новых спайков  $\phi\sigma$  равна скорости их отжига  $N_{\text{равн.}}/\tau$ , где  $\sigma$ ,  $\tau$  – сечение образования и среднее время жизни спайков с темновыми токами  $I_{\text{ТТ}}$  соответственно. Тогда  $N_{\text{равн.}} = \phi\sigma\tau$ .

Вследствие этого равновесные распределения спайков при длительном ( $t \gg \tau$ ) облучении ПЗС-матриц нуклонами и ионами космического излучения с различными плотностями потоков также будут различны.

На основании приведенной формулы с использованием данных по сечениям образования и временам релаксации спайков были вычислены равновесные величины количества спайков в указанных выше диапазонах яркости при плотности потока, характерного для протонов космического излучения.

На рисунке 2 приведены гистограммы распределения пикселей по яркости, полученные после облучения нуклонами с плотностью потока  $2,7 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и рассчитанные по формуле для  $\phi_{\text{ки}} = 3,2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Из рисунка видно, что равновесное распределение спайков по яркости при плотностях потоков частиц, типичных для космического излучения, существенно отличается от распределения, полученного при большей

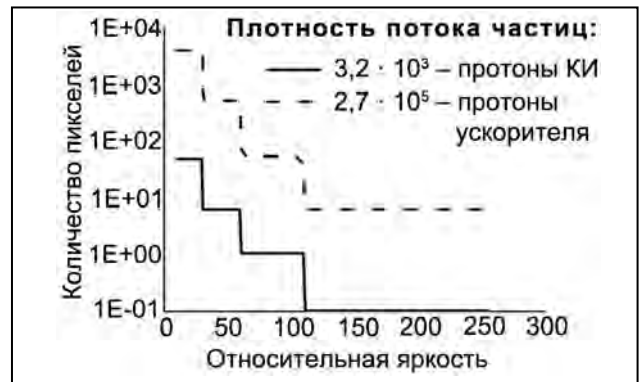


Рис. 2. Распределение количества спайков по яркости для различных плотностей потока нуклонов

плотности потока частиц в ускорительных экспериментах.

Таким образом, данное исследование показывает существенное влияние плотности потока частиц моделирующей установки на распределение темнового тока в пикселях ПЗС-матриц, требующее учета при прогнозировании эффектов от воздействия отдельных частиц космического излучения. Следует отметить, что данный результат справедлив, по всей видимости, и для других типов электронно-оптических устройств.

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ, грант № 14-29-09240.

1. Иванов Н. А., Лобанов О. В., Митин Е. В., Пашук В. В., Тверской М. Г. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 17. С. 35–43.
2. Иванов Н. А., Лобанов О. В., Пашук В. В., Митин Е. В., Прыгунов М. О., Богданов В. П., Осадчий И. С., Трещалин А. П. // Вопросы атомной науки и техники. 2014. Вып. 1. С. 49–51.

## Свойства бозона Хиггса в экспериментах CMS и ATLAS на LHC

В. Т. Ким

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

Эксперименты CMS и ATLAS, самые амбициозные проекты физики высоких энергий, продемонстрировали на первом этапе работы ускорителя LHC уникальные возможности по расширению границ наших знаний в области фундаментальной физики элементарных частиц. Основным результатом CMS и ATLAS на данный момент является открытие в 2012 г. бозона Хиггса с массой  $\sim 125$  ГэВ – кванта фундаментального скалярного поля вакуума, который отвечает за спонтанное нарушение симметрии электрослабых взаимодействий и происхождение масс элементарных частиц Стандартной модели (СМ). В 2014 г. CMS и ATLAS представили окончательный анализ данных, набранных в 2010–2012 гг., по уточнению свойств нового бозона. В CMS и ATLAS бозон Хиггса наблюдается теперь во всех основных модах распадов СМ, как в распадах на бозоны: на два  $Z$ -бозона ( $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ , где  $l = \mu, e$ ), два фотона, два  $W$ -бозона, так и на фермионы: на  $\tau$ -лептоны и  $b$ -кварки. Измеренные распределения по инвариантной массе в каналах распада  $H \rightarrow \gamma\gamma$  и  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  показаны на рис. 1.

Измеренная масса бозона в ATLAS  $125,36 \pm 0,37$  (стат.)  $\pm 0,18$  (сист.) ГэВ хорошо согласуется с данными CMS  $125,03 \pm 0,26$  (стат.)  $\pm 0,14$  (сист.) ГэВ. Отношение измеренного сечения к ожидаемому сечению СМ (интенсивность сигнала) с учетом всех каналов распада составило в ATLAS  $1,30 + 0,18 - 0,17$  и в CMS  $1,00 + 0,13 - 0,13$  (рис. 2), что хорошо согласуется с предсказаниями СМ. Анализ четности и спина хорошо согласуется с гипотезой для частицы со спином 0 и положительной четностью. Таким образом, уточненные свойства нового бозона в пределах имеющихся неопределенностей еще лучше согласуются с ожидаемыми свойствами бозона Хиггса СМ.

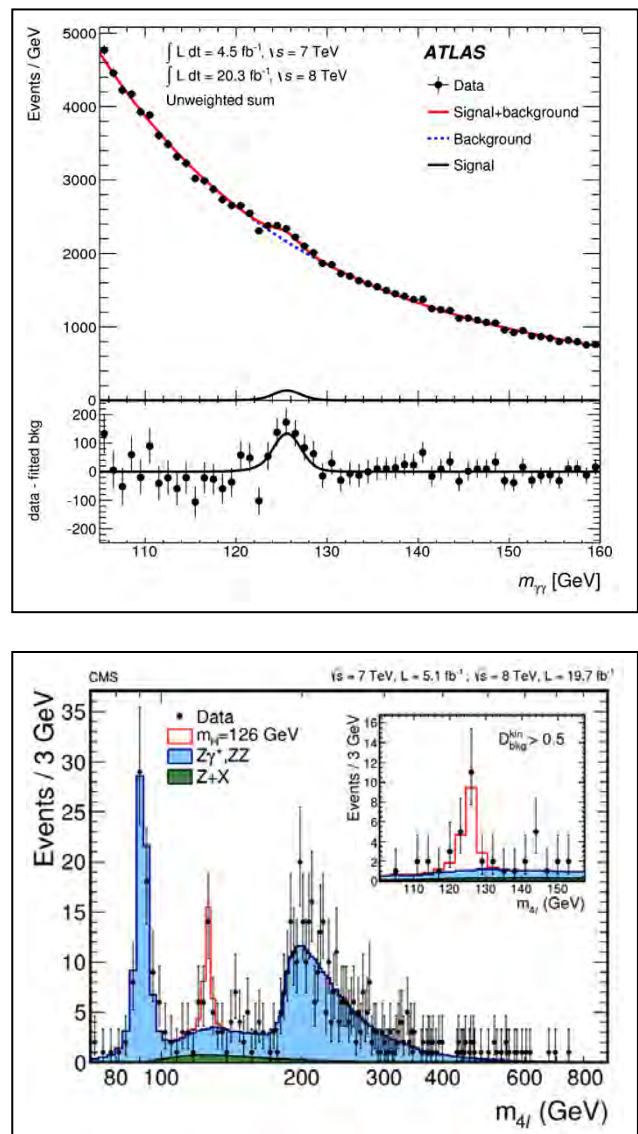


Рис. 1. Распределения по инвариантной массе двух фотонов в ATLAS (сверху) и четырех лептонов в CMS (снизу)

Важную роль в обнаружении бозона Хиггса и определении его свойств сыграли торцевой мюонный детектор CMS (система EMU) и центральный

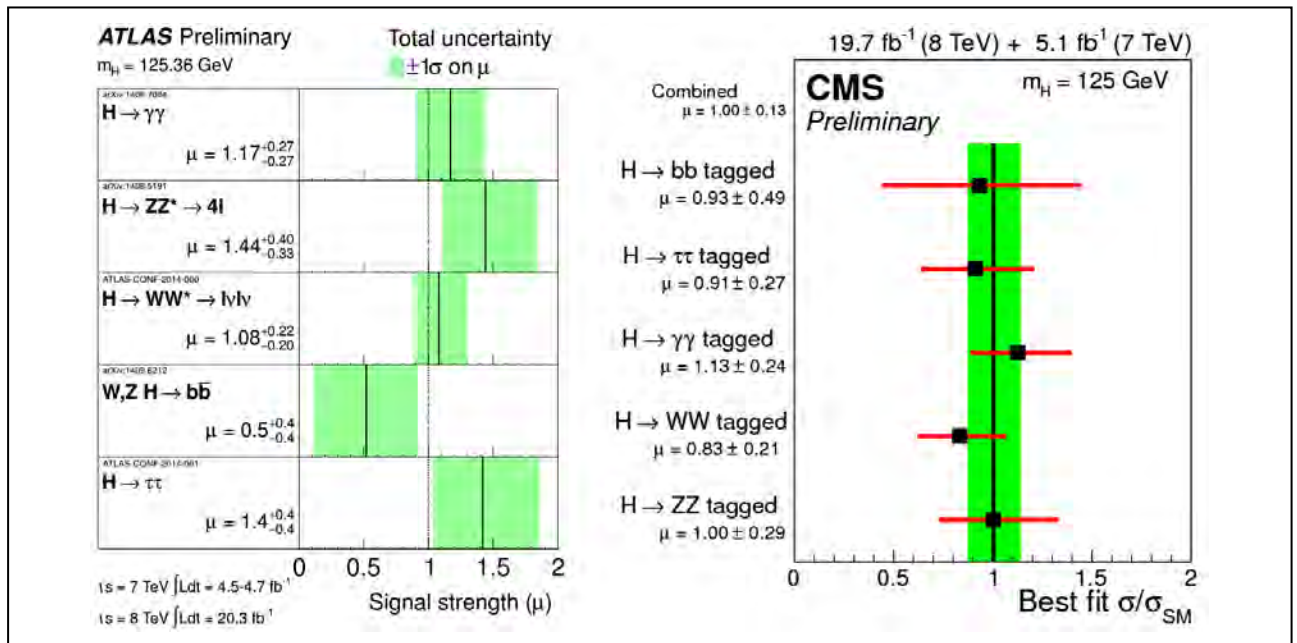


Рис. 2. Согласие с СМ данных ATLAS (слева) и CMS (справа) по сечению образования бозона Хиггса с учетом вероятностей его распада в различных каналах (отношение интенсивности сигнала к ожидаемой в СМ)

трекер ATLAS – детектор переходного излучения (система TRT), в разработке и создании которых определяющий вклад внес НИЦ КИ ПИЯФ.

Авторы из НИЦ КИ ПИЯФ в публикациях CMS: А. А. Воробьев, Ю. М. Иванов, В. Т. Ким, С. А. Вавилов, Ан. А. Воробьев, В. Л. Головцов, П. М. Левченко,

В. А. Мурзин, В. А. Орешкин, И. Б. Смирнов, В. В. Сулимов и Л. Н. Уваров; в публикациях ATLAS: О. Л. Федин, В. А. Щегельский, В. Т. Грачев, О. Г. Гребенюк, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев и В. М. Соловьев.

1. CMS Collaboration // Phys. Rev. D. 2014. V. 89. P. 092007.
2. CMS Collaboration // EPJ C. 2014. V. 74. P. 3076.
3. CMS Collaboration // JHEP. 2014. V. 1401. P. 096.
4. CMS Collaboration // JHEP. 2014. V. 1405. P. 104.
5. CMS Collaboration // Phys. Lett. B. 2014. V. 736. P. 64.
6. ATLAS Collaboration // Phys. Rev. D. 2014. V. 90. P. 052004.
7. ATLAS Collaboration // Phys. Lett. B. 2014. V. 726. P. 120.

# Первое наблюдение процесса электрослабого образования Z-бозона в экспериментах CMS и ATLAS на LHC

В. Т. Ким

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

Эксперименты CMS и ATLAS получили первые указания на обнаружение процесса электрослабого образования Z-бозона с двумя ассоциированными адронными струями на LHC (рис.). Процесс образования Z-бозона в результате слияния двух W-бозонов (рис. *слева*) дает важнейшую информацию о самодействии векторных бозонов, связанных с неабелевой природой электрослабых взаимодействий Стандартной модели (СМ). Многие модели «новой физики» за пределами СМ предсказывают аномально большое взаимодействие векторных бозонов.

Измеренные сечения электрослабого образования Z-бозона с двумя ассоциированными адронными струями в CMS:

$$\sigma = 154 \pm 24 \text{ (стат.)} \pm 46 \text{ (сист.)} \pm 26 \text{ (теор.)} \pm 3 \text{ (свет.)} \text{ Фб}$$

при  $m_{jj} > 120 \text{ ГэВ, } 7 \text{ ТэВ}$ ;

$$\sigma = 174 \pm 15 \text{ (стат.)} \pm 40 \text{ (сист.)} \text{ Фб}$$

при  $m_{jj} > 120 \text{ ГэВ, } 8 \text{ ТэВ}$

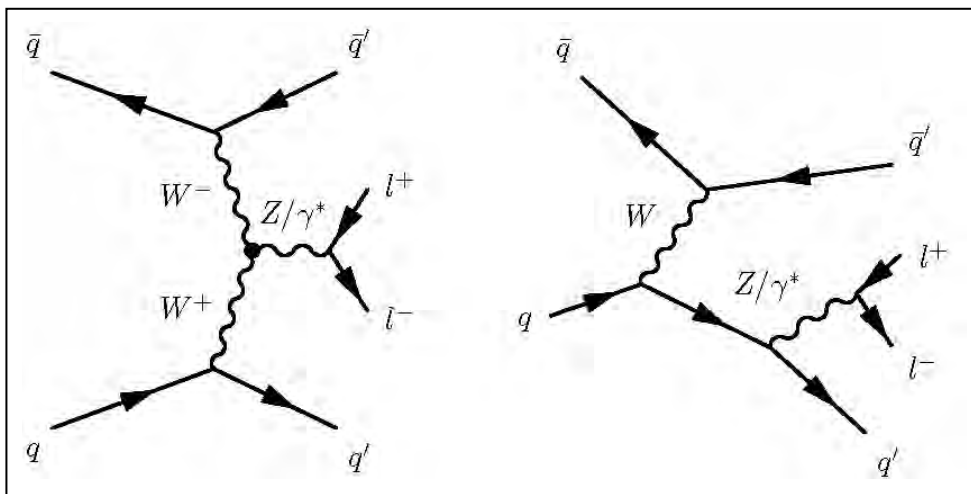
и в ATLAS:

$$\sigma = 10,7 \pm 0,9 \text{ (стат.)} \pm 1,9 \text{ (сист.)} \pm 1,9 \text{ (свет.)} \text{ Фб}$$

при  $m_{jj} > 1000 \text{ ГэВ, } 8 \text{ ТэВ}$

в рамках имеющихся неопределенностей хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями СМ.

Авторы из НИЦ КИ ПИАФ в публикациях коллаборации CMS: А. А. Воробьев, Ю. М. Иванов, В. Т. Ким, С. А. Вавилов, Ан. А. Воробьев, В. Л. Головцов, П. М. Левченко, В. А. Мурзин, В. А. Орешкин, И. Б. Смирнов, В. В. Сулимов, Л. Н. Уваров; в публикациях коллаборации ATLAS: О. Л. Федин, В. А. Щегельский, В. Т. Грачев, О. Г. Гребенюк, А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев, В. М. Соловьев.



Процессы электрослабого образования Z-бозона на LHC: слияние W-бозонов (*слева*) и тормозное излучение (*справа*)

1. CMS Collaboration // JHEP. 2013. V. 1310. P. 062.
2. CMS Collaboration. CERN-PH-EP-2014-234, e-Print: arXiv:1408.5191 [hep-ex], EPJ C.
3. ATLAS Collaboration // JHEP. 2014. V. 1404. P. 031.

## Новые эффекты в инклюзивном рождении чармония в ядро-ядерном столкновении на Большом адронном коллайдере

*М. Б. Жалов, В. В. Иванов, Е. Л. Крышень, М. В. Малаев,  
В. Н. Никулин, В. Г. Рябов, В. М. Самсонов, А. В. Ханзадеев  
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»*

Коллаборация ALICE, используя мюонный спектрометр, в создание которого НИЦ КИ ПИАФ внес значительный вклад, измерила инклюзивные выходы чармония в протон-протонных ( $pp$ ), протон-ядерных ( $pA$ ) и ядро-ядерных ( $AA$ ) взаимодействиях. Цель этих измерений – детально исследовать влияние среды, формируемой в зоне взаимодействия ультрарелятивистских ядер, на процесс рождения чармония. Естественным параметром, отражающим такое влияние, является фактор ядерной модификации

$$R_{AA}^{J/\psi} = \frac{Y_{AA}^{J/\psi}}{N_{coll} Y_{pp}^{J/\psi}},$$

который определяется отношением инклюзивных выходов чармония  $Y_{AA}^{J/\psi}$  и  $Y_{pp}^{J/\psi}$ , масштабированных числом  $N_{coll}$  бинарных столкновений нуклонов в ядро-ядерном взаимодействии.

Подавление выхода кваркониев, связанных кварк-антикварковых состояний при столкновении ультрарелятивистских ядер ожидалось по нескольким причинам. Тяжелые кварки и антикварки рождаются в жестком партон-партонном взаимодействии на ранней стадии столкновения, поэтому экранировка ядерных партонных распределений и перераспределение в конечном состоянии в адронной среде должны приводить к  $R_{AA}^{J/\psi} < 1$ . Эти так называемые эффекты холодной ядерной материи могут быть изучены в протон-ядерных или периферических ядро-ядерных столкновениях. Если при столкновении ультрарелятивистских ядер в зоне взаимодействия формируется горячая кварк-глюонная плазма (КГП), то по аналогии с дебаевской экранировкой в классической плазме цветовые заряды тяжелых кварков должны экранироваться. Тогда связанные кварк-антикварковые состояния не образуются либо диссоциируют,

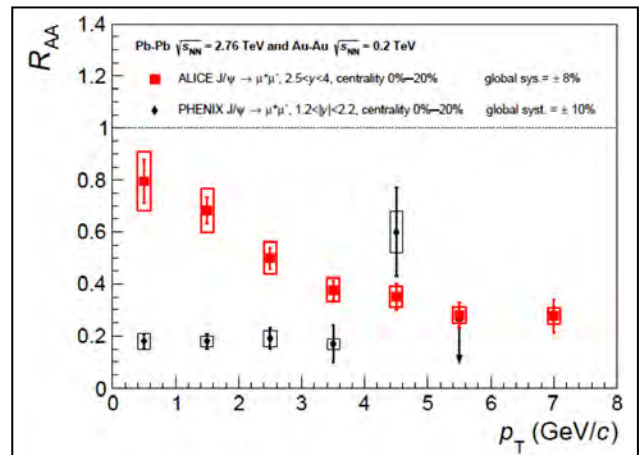
как только радиус дебаевской экранировки с ростом температуры среды станет меньше радиуса кваркония. В этом случае следует ожидать «аномального» подавления  $R_{AA}^{J/\psi} \ll 1$ .

Впервые подавление выхода чармония в событиях с большой множественностью адронов при столкновении ультрарелятивистских ядер было обнаружено на ускорителе SPS при  $\sqrt{s_{NN}} \approx 18$  ГэВ и интерпретировалось как один из наиболее ярких сигналов об образовании в зоне взаимодействия КГП. Однако детальный анализ показал, что наблюдаемая величина  $R_{AA}^{J/\psi}$  и ее зависимость от массовых чисел сталкивающихся ядер могут быть объяснены эффектами холодной ядерной материи и учетом того, что около 40 %  $J/\psi$  возникает от распадов слабо связанных возбужденных состояний чармония, которые диссоциируют при температурах, ниже или близких к температуре фазового перехода  $T_c \approx 160\text{--}170$  МэВ. Интерес к изучению подавления выхода  $J/\psi$  усилился после того, как в экспериментах на Релятивистском ионном коллайдере (РИК) при энергии столкновения  $\sqrt{s_{NN}} \approx 200$  ГэВ были получены убедительные указания на формирование кварк-глюонной среды со свойствами почти идеальной жидкости с температурой, превышающей 200 МэВ в начальные моменты ее эволюции. При этом оказалось, что величина  $R_{AA}$  для рождения  $J/\psi$  в ядро-ядерных столкновениях на РИК и SPS почти одинакова. Следовательно, либо зависимость эффекта подавления от температуры среды, созданной в зоне взаимодействия, отсутствует, либо при энергиях РИК появляется новый механизм рождения  $J/\psi$ , компенсирующий усиление подавления. С этой точки зрения измерение  $R_{AA}$  для  $J/\psi$  в столкновении ядер свинца при энергии столкновения  $\sqrt{s_{NN}} \approx 2,76$  ТэВ на Большом адронном коллайдере (БАК) пред-



ставляло несомненный интерес. При анализе данных для определения  $R_{AA}$  отбирались события центрального взаимодействия ядер, характеризующиеся большой множественностью адронов. Именно в событиях этого класса были обнаружены все признаки формирования в зоне взаимодействия плотной и горячей кварк-глюонной среды с температурой  $T > 300$  МэВ (подавление выхода легких адронов, гашение струй, эллиптические потоки частиц различного сорта и эффект кваркового скейлинга в эллиптических потоках, выход прямых фотонов).

На рисунке представлено сравнение результатов, полученных коллаборацией ALICE для зависимости  $R_{AA}$  от поперечного импульса  $J/\psi$  в интервале быстрот  $J/\psi$   $2,5 < y < 4$  на БАК и коллаборацией PHENIX в интервале  $1,2 < |y| < 2,2$  на РИК. Вопреки ожиданиям, связанным с повышением температуры среды более чем в 1,5 раза, подавление выхода  $J/\psi$  при энергиях БАК оказалось слабее. Одним из возможных объяснений интригующей зависимости  $R_{AA}$  от поперечного импульса может быть проявление нового механизма рождения  $J/\psi$ -рекомбинации термализованных очарованных кварков и антикварков на поздней стадии эволюции КГП, близкой к границе фазового перехода, когда температура кварк-глюонной среды



Сравнение результатов, полученных для зависимости  $R_{AA}$  от поперечного импульса  $J/\psi$  коллаборацией ALICE на БАК и коллаборацией PHENIX на РИК

уже оказывается порядка 160–170 МэВ. Аргументом в пользу такой интерпретации является почти десятикратное увеличение количества рожденных очарованных кварков и антикварков при энергии БАК по сравнению с РИК, обусловленное быстрым ростом сечений жестких процессов с ростом энергии столкновения. В результате возрастает вероятность статистической адронизации, а наличие плотной кварк-глюонной среды способствует термализации тяжелых кварков.

## Поиск солнечных аксионов, возникающих в реакции $p(d, {}^3\text{He})A$ , с помощью сцинтилляционного BGO-болметра

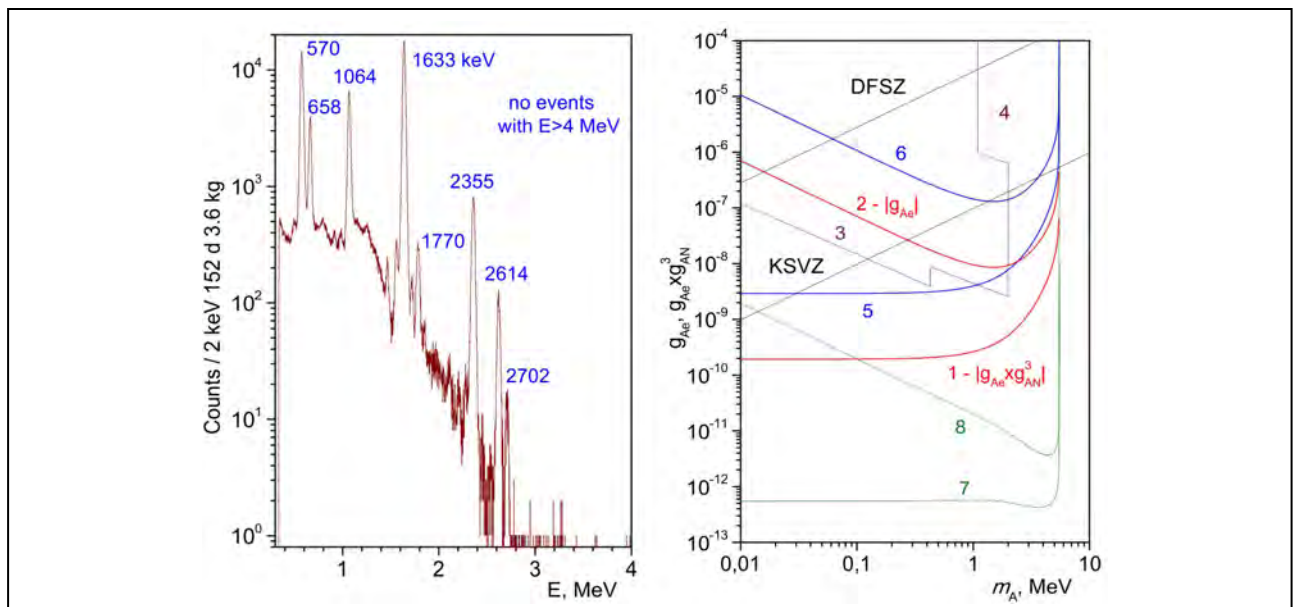
А. В. Дербин

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

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

В НИЦ КИ ПИАФ, в Лаборатории низкофоновых измерений (зав. лаб. А. В. Дербин) и в Национальной лаборатории Гранн-Сассо проведен поиск аксиоэлектрического эффекта (аналога фотоэффекта) на атомах висмута для солнечных аксионов с энергией 5,5 МэВ, которые образуются в реакции захвата протона дейтерием –

$p + d \rightarrow {}^3\text{He} + A$ . Поскольку сечение а. е. эффекта пропорционально  $Z^5$ , висмут ( $Z = 83$ ) является наиболее перспективным атомом. Впервые для поиска аксионов использовался болметрический BGO-детектор, охлажденный до температуры в несколько мК. В результате в прямом лабораторном эксперименте исключена новая область возможных значений масс  $m_A$  и констант связи аксиона с электроном  $g_{Ae}$  и нуклонами  $g_{AN^3}$ , которая в 20 раз более строгая, чем полученная с обычным сцинтилляционным BGO-детектором.



Слева: спектр  $\beta$ - и  $\gamma$ -событий, измеренный болметрическим BGO-детектором за 152 дня. В спектре отсутствуют события с энергией более 4 МэВ. Справа: исключенные области масс и констант связи аксиона, полученные в различных работах (внутри и выше приведенных кривых): 1, 2 – настоящая работа для констант  $|g_{Ae} \times g_{AN^3}|$  и  $|g_{Ae}|$  соответственно; 3 – эксперименты на реакторах; 4 – ускорительные эксперименты beam-dump; 5, 6 – ограничения на  $|g_{Ae} \times g_{AN^3}|$  и  $|g_{Ae}|$ , полученные со сцинтилляционным BGO-детектором; 7, 8 – ограничения эксперимента «Борексино», полученные из реакции комптоновской конверсии

1. Derbin A. V., Bakhlanov S. V., Dratchnev I. S., Kayunov A. S., Muratova V. N. // Eur. Phys. J. C. 2013. V. 73. P. 2490.
2. Derbin A. V., Gironi L., Nagorny S. S., Pattavina L. ..., Drachnev I. S. ..., Kayunov A. S. ..., Muratova V. N. ..., Semenov D. A., Unzhakov E. V. // Eur. Phys. J. C. 2014. V. 74. P. 3035.

## Регистрация солнечных *pp*-нейтрино в эксперименте «Борексино»

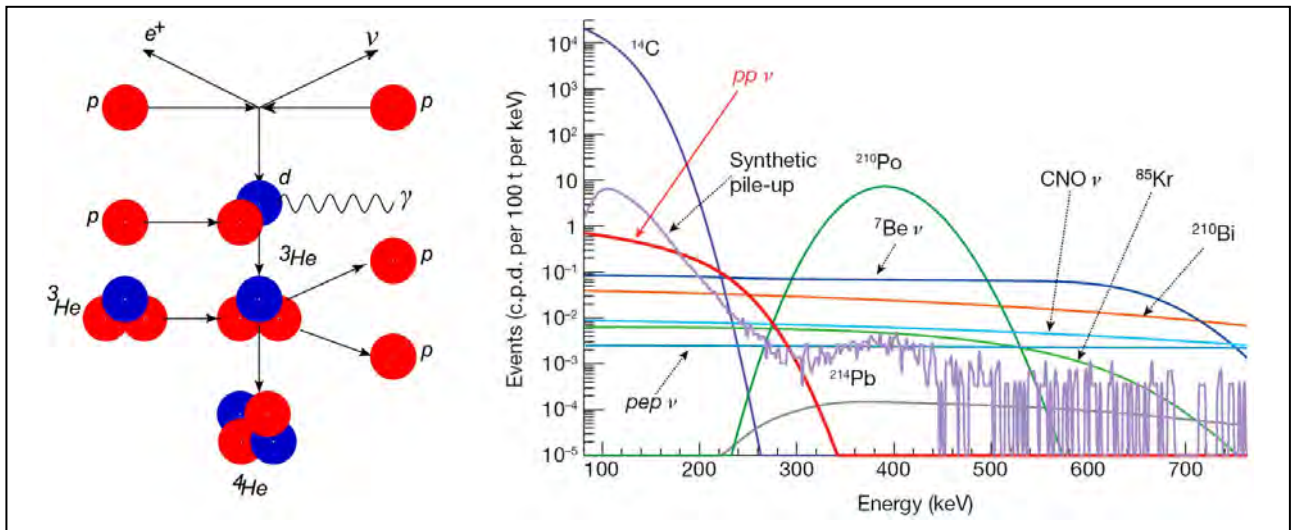
А. В. Дербин

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

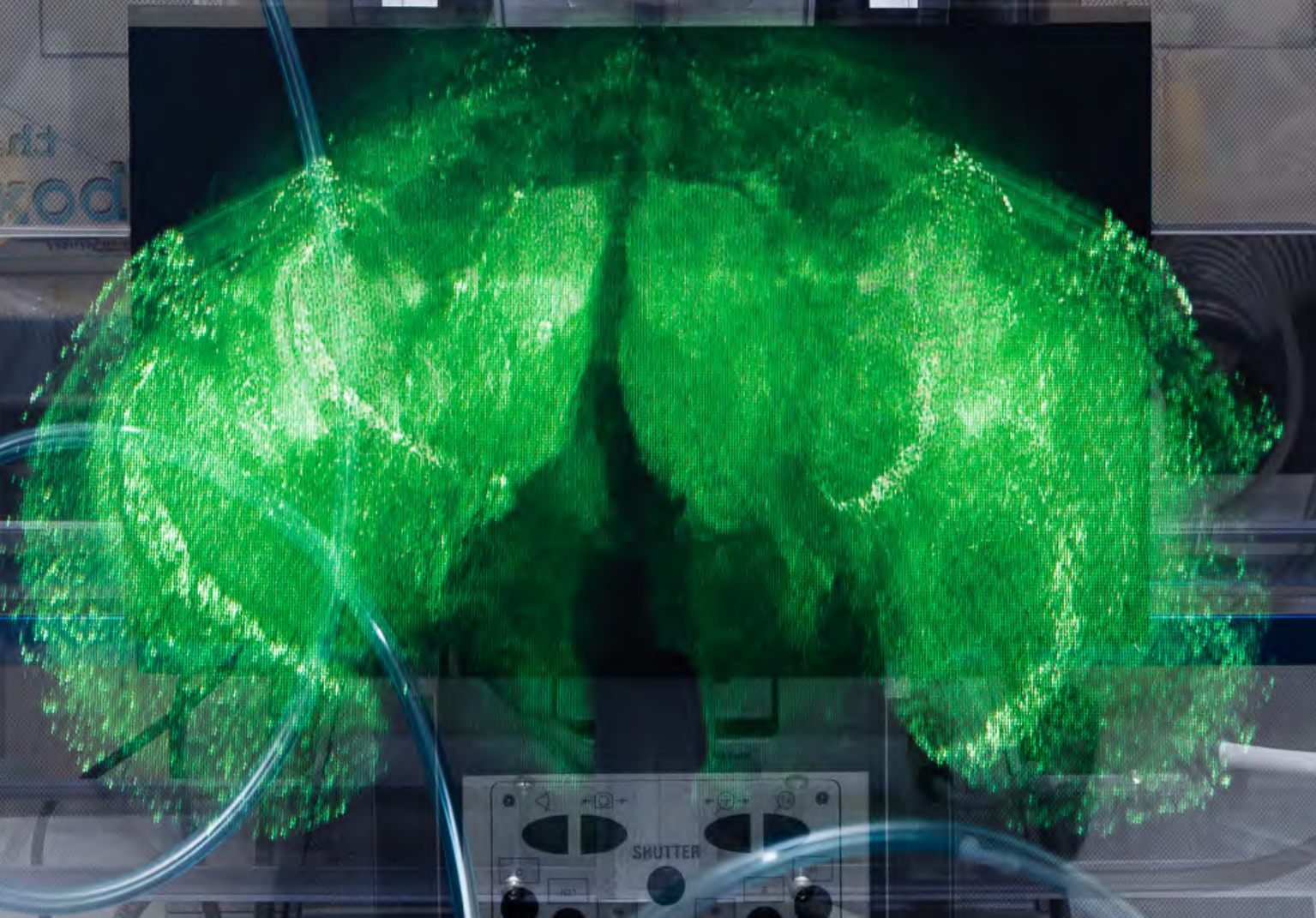
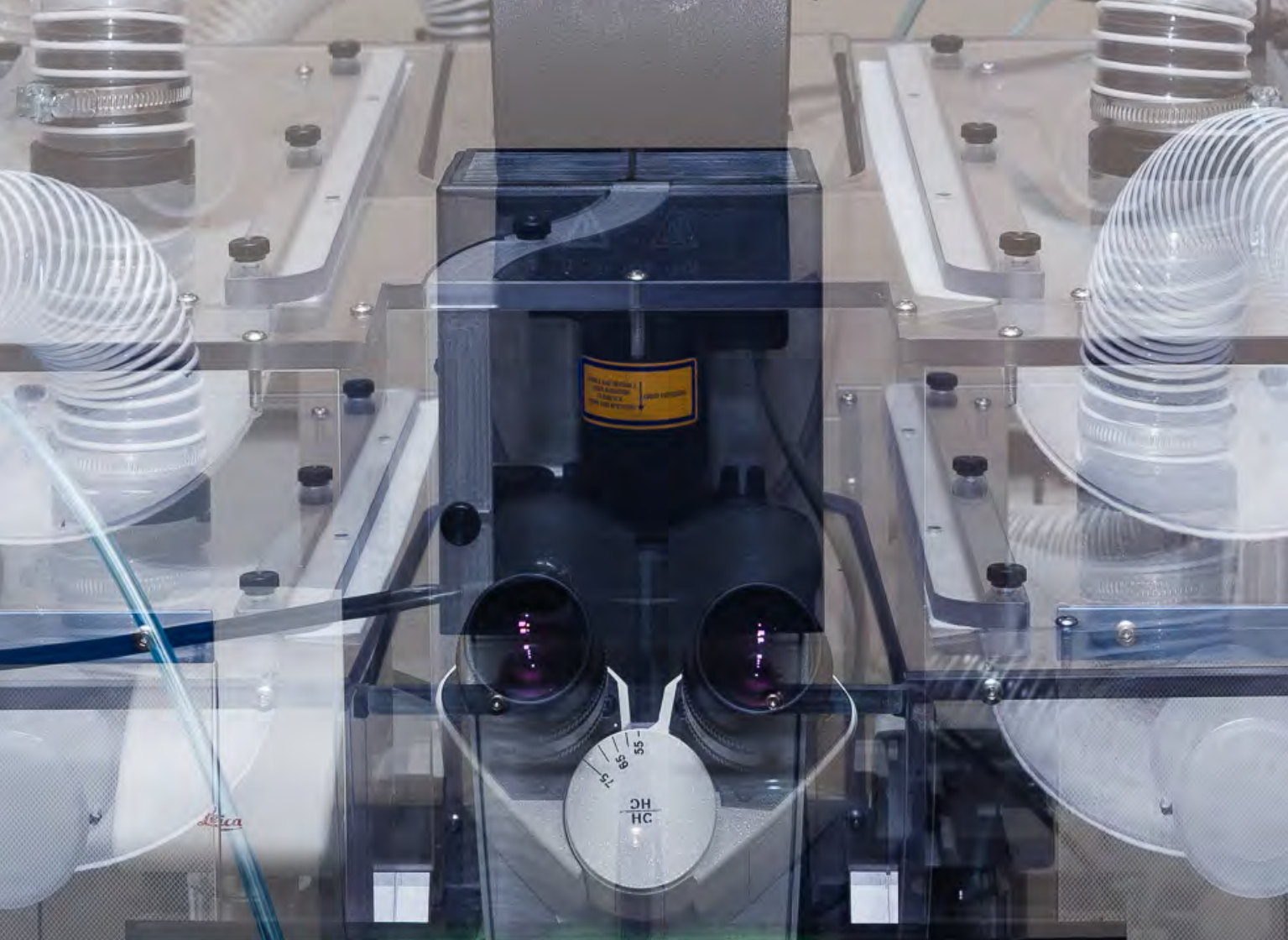
Впервые получено прямое экспериментальное доказательство протекания основополагающей термоядерной реакции на Солнце, в которой два ядра водорода образуют дейтерий:  $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$ . Эта реакция, называемая *pp*, ответственна за 99,8 % всей солнечной энергии, и до сих пор ни один эксперимент не наблюдал этот поток нейтрино напрямую. Реакция сопровождается испусканием нейтрино с граничной энергией 420 кэВ, которые и были зарегистрированы в эксперименте. Регистрация *pp*-нейтрино является наиболее трудной задачей из-за их малой энергии, самой низкой среди солнечных нейтрино, и лежащей в области высокого природного фона.

Ранее коллаборация «Борексино» опубликовала результаты измерения потоков нейтрино из вторичных солнечных реакций, дочерних по отношению к реакции *pp* и дающих неизмеримо меньший вклад в полную солнечную энергию. Сравнение результатов измерения на детекторе «Борексино» с мощностью солнечного излучения подтверждает стабильность энерговыделения Солнца на временной шкале в несколько сотен тысяч лет.

Результаты получены при активном участии российских ученых из НИЦ КИ ПИАФ (Лаборатория низкофоновых измерений ОНИ, зав. лаб. д. ф.-м. н. А. В. Дербин, к. ф.-м. н. В. Н. Муратова), ОИЯИ, НИЦ «Курчатовский институт» и НИИЯФ МГУ.



Основная ядерная цепочка превращения четырех протонов в ядро  ${}^4\text{He}$ , которая начинается реакцией слияния двух протонов в ядро дейтерия с излучением *pp*-нейтрино (слева); энергетический спектр в интервале 150–600 кэВ, измеренный детектором «Борексино», и его основные компоненты, установленные в результате исследований. Вклад *pp*-нейтрино показан красной сплошной линией (справа)



## Молекулярная и радиационная биофизика

- 78 Структура и функция бета-маннозидазы из *Trichoderma harzianum*
- 79 Повышенный уровень олигомеров белка альфа-синуклеина в плазме крови у пациентов с лизосомными болезнями накопления
- 81 Гистондеацетилаза Sin3 контролирует уровень спонтанного и УФ-индуцированного мутагенеза в дрожжах *Saccharomyces cerevisiae*
- 83 Исследование механизмов гидролиза АТФ в ДНК-зависимых АТФазах mkTIP49 гипертермофильной археобактерии *Methanopyrus kandleri*
- 85 Молекулярное моделирование и нейтронная спектроскопия мультимолекулярных комплексов белков семейства RecA
- 87 Разработка штрих-кода и получение белкового профиля глиобластомы
- 89 Синхронизация транслокации тРНК на большой и малой субчастицах рибосомы
- 91 Трансляционное шунтирование: пропуск некодирующей последовательности мРНК в процессе трансляции
- 93 Кинетический механизм программируемого сдвига рамки считывания (-1)

## Структура и функция бета-маннозидазы из *Trichoderma harzianum*

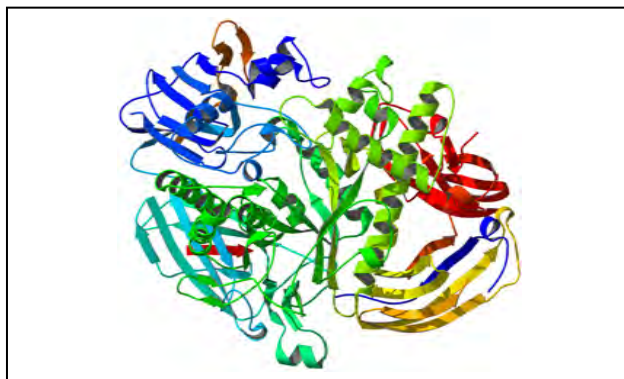
А. М. Голубев

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

В промышленно развитых странах большое внимание уделяется альтернативным видам топлива (этанол, биодизель, биопропанол). В связи с этим актуально структурное изучение ферментов, преобразующих возобновляемые ресурсы и отходы производства в сырье для выработки альтернативного топлива. Как было показано ранее, филаментные грибы из рода *Trichoderma* секретируют комплекс ферментов, обладающих высокой гидролитической активностью в отношении лигноцеллюлозы и галактоманнана – наиболее доступного природного возобновляемого сырья. Одним из важных гидролизующих ферментов такого комплекса является бета-маннозидаза. Получаемые в результате гидролиза моносахара – глюкоза, манноза, галактоза – могут быть использованы для производства биотоплива.

Нам удалось решить пространственную трехмерную структуру бета-маннозидазы из гриба *Trichoderma harzianum*. Это первая структура эукариотической бета-маннозидазы из 2-го семейства гликозид-гидролаз. На основе полученной структуры методами молекулярной динамики был изучен сайт связывания субстрата – галактоманнана, а также изучен механизм действия фермента.

Кристаллы бета-маннозидазы – гликопротеина с молекулярным весом 105 кДа – были получены ранее, и рентгеноструктурные данные с использованием синхротронного излучения были собраны для двух кристаллических форм: орторомбической и тетрагональной. Наилучшее кристаллографическое разрешение составило 1,9 Å. Структура белка была решена с использованием аномального рассеяния от атомов кадмия, в присутствии



Общий вид молекулы бета-маннозидазы – ленточное представление

которого производился рост кристаллов. Одно из ограничений метода рентгеноструктурного анализа – статичность построенной модели. Изучить динамическое поведение подвижной молекулы белка помогает сравнение моделей, построенных на основании данных от разных кристаллических форм. В нашем случае наличие двух кристаллических форм позволило оценить конформационную подвижность и гибкость молекулы белка. Молекула бета-маннозидазы состоит из 5 хорошо выраженных доменов (рис.). Сравнение со структурами других гликозид-гидролаз 2-го семейства позволило определить положение каталитического домена в центре молекулы. Для точного определения галактоманнан-связывающего сайта был использован метод молекулярной динамики, что позволило точно оценить энергию взаимодействия в фермент-субстратном комплексе и локализовать аминокислотные остатки, участвующие в катализе.

1. Horta M. A., Vicentini R., Delabona P. A. S., Laborda P., Crucello A., Freitas S., Kuroshu R. M., Polikarpov I., Pradella J. G., Souza A. P. // PLoS One. 2014. V. 9. P. e88689.

2. Nascimento A. S., Muniz J. R., Aparicio R., Golubev A. M., Polikarpov I. // FEBS J. 2014. V. 281. P. 4165–4178.

## Повышенный уровень олигомеров белка альфа-синуклеина в плазме крови у пациентов с лизосомными болезнями накопления

С. Н. Пчелина, Е. П. Нужный, А. К. Емельянов, Т. М. Букина, Т. С. Усенко,  
М. А. Николаев, Г. Т. Салозуб, А. Ф. Якимовский, Е. Ю. Захарова  
Отделение молекулярной и радиационной биофизики  
НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

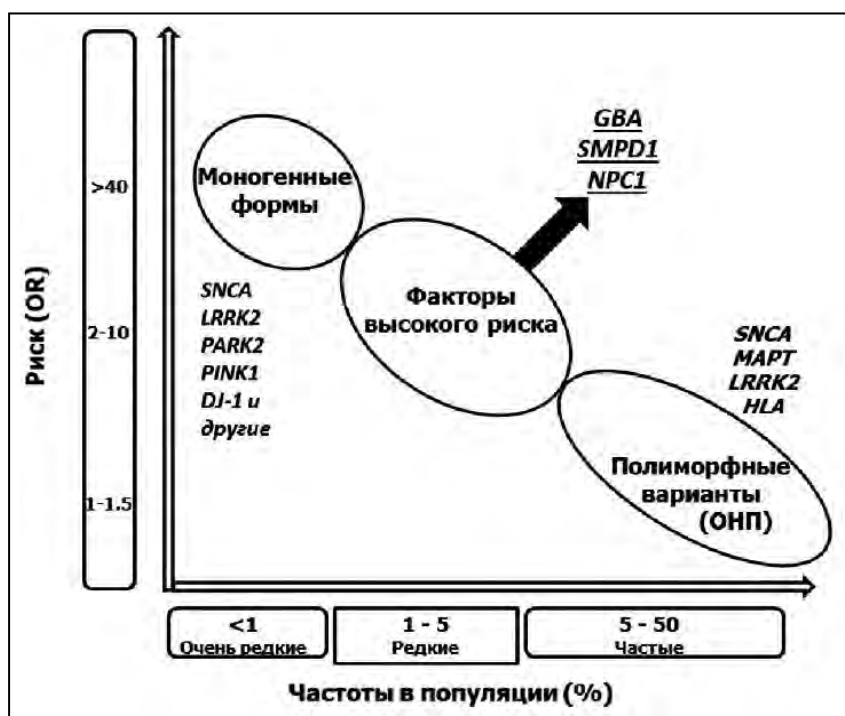
В 2014 г. нами выполнено исследование по оценке уровня олигомерных форм белка альфа-синуклеина у пациентов с лизосомными болезнями накопления. Процесс олигомеризации белка альфа-синуклеина рассматривается сегодня как основное звено патогенеза распространенного нейродегенеративного заболевания человека – болезни Паркинсона (БП). Считается, что именно олигомерные формы данного белка оказывают нейротоксическое действие, вызывая гибель группы нейронов в мозгу, что приводит к развитию заболевания. Причины, влияющие на олигомеризацию альфа-синуклеина, остаются неясными.

Около 10–15 % пациентов с БП сообщают о семейной форме заболевания. В настоящее время идентифицировано 8 генов (*SNCA*, *LRRK2*, *PINK1*, *PARK2*, *PARK7*, *PLA2G6*, *FBXO7*, *ATP13A2*), мутации в которых приводят к развитию наследственных форм заболевания, однако данные мутации являются крайне редкими. Наиболее важными с точки зрения формирования групп риска развития БП являются гены *GBA*, *SMPD1* и *NPC1*, мутации в которых повышают риск развития БП в 8–9 раз, а частота их выявления колеблется от 0,5 до 5 % в зависимости от популяции, что делает их скрининг перспективным для выявления групп риска развития заболевания (рис.). Наиболее распространенными являются мутации в гене глюкоцереброзидазы (*GBA*). Среди жителей европейской части России каждый 250-й может являться носителем мутации в гене *GBA*, а значит, иметь высокий риск развития БП. В отдельных популяциях их распространенность выше, а среди евреев-ашкенази достигает 6 %.

Чем же можно объяснить существенное увеличение риска развития БП у носителей мутаций в генах *GBA*, *SMPD1* и *NPC1*? Оказалось, что все эти гены кодируют белки, локализованные

в лизосомах и необходимые для их нормальной функции. Лизосомы – клеточные органеллы, ответственные за уничтожение ненужных клетке структур. В частности, в них происходит клеточная деградация ряда белков. Наличие одного мутантного аллеля в генах *GBA*, *SMPD1* и *NPC1* повышает риск развития БП, а наличие двух мутантных аллелей является причиной развития редких наследственных заболеваний человека, относящихся к классу лизосомных болезней накопления. Наиболее распространенной из лизосомных болезней накопления является болезнь Гоше, обусловленная мутациями в гене *GBA*. Ее частота среди новорожденных в большинстве стран мира составляет 1 на 50 000. Мы предположили, что мутации в генах лизосомных ферментов, приводящие к дисфункции лизосом, могут приводить к накоплению и олигомеризации белка альфа-синуклеина, т. е. способствовать формированию именно тех форм белка, которые являются нейротоксичными. Ранее было известно, что около половины альфа-синуклеина в клетке деградирует через лизосомы.

Для проверки выдвинутой гипотезы нами было проведено исследование уровня олигомерных форм белка альфа-синуклеина в плазме крови у 41 пациента с болезнью Гоше и у 40 лиц контрольной группы. Оценка количества белка проводили методом иммуноферментного анализа с антителами на олигомерный альфа-синуклеин, которые стали доступны на рынке только с 2012 г. Была также обследована группа пациентов с другими лизосомными болезнями накопления. Включение в исследование такой большой выборки лиц с наследственными болезнями накопления стало возможным благодаря тесному сотрудничеству с лабораторией наследственных болезней обмена Медико-генетического научного центра (Москва), где диагноз подтверждается при



Генетические факторы риска развития БП. Стрелкой показаны гены, мутации в которых являются факторами высокого риска развития заболевания

проведении биохимического и молекулярно-генетического обследования. Нами было обнаружено достоверное повышение уровня олигомерного альфа-синуклеина в плазме крови как у пациентов с болезнью Гоше, так и у пациентов с другими лизосомными болезнями накопления. Проведенное нами исследование впервые показало повышение нейротоксичных олигомерных форм белка при наличии мутаций в генах высокого риска развития БП, что позволило связать такие далекие заболевания, как БП и лизосомные болезни накопления, через агрегацию этого белка. Более того, накопление олигомеров альфа-синуклеина наблюдалось только у пациентов с болезнью Гоше,

не получавших инъекций нормального фермента *GBA* (ферментозаместительная терапия) или получавших ее менее 5 лет. В группе пациентов, получавших терапию более 5 лет, уровень олигомерных форм белка не отличался от контроля. Таким образом, собранные нами данные открывают перспективу для обсуждения стратегии лечения такого на сегодня неизлечимого нейродегенеративного заболевания, как БП. По крайней мере, данная стратегия может обсуждаться для части больных БП, имеющих мутацию в гене *GBA*.

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

1. Kovacs G. G. et al. // Acta Neuropathol. 2012. V. 124. P. 37–50.
2. Pchelina S. N., Nuzhnyi E. P., Emelyanov A. K., Boukina T. M., Usenko T. S., Nikolaev M. A., Salogub G. N., Yakimovskii A. F., Zakharova E. Y. // Neurosci. Lett. 2014. V. 583. P. 88–193.
3. Deng H. et al. // Mol. Neurobiol. 2014. Aug. 7. [Epub ahead of print].



## Гистондеацетилаза Sin3 контролирует уровень спонтанного и УФ-индуцированного мутагенеза в дрожжах *Saccharomyces cerevisiae*

В. Г. Королев, А. Ю. Черненко, И. Ю. Лебовка, Т. Н. Кожина,  
И. В. Федорова, В. Т. Пешехонов, Т. А. Евстюхина  
Отделение молекулярной и радиационной биофизики  
НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

Исследование генетических регуляций, связанных с изменениями структуры хроматина, является одним из наиболее значимых и динамично развивающихся направлений современной биологии. За последние годы получен огромный массив данных по влиянию состояния хроматина на процессы репарации генетического материала. Однако работы, посвященные влиянию структуры хроматина на мутационный процесс, практически отсутствуют.

Свойства хроматина, а точнее формирующих его структурных единиц – гистонов и нуклеосом, могут изменяться добавлением химических модификаций, таких как ацетильная, метильная, фосфатная и др. группы, которые служат для регуляции различных клеточных процессов, включая транскрипцию, репарацию, репликацию и т. д. Существует ряд ферментов, модифицирующих гистоны, каждый из которых обладает специфичностью относительно мест (сайтов) модификации. Модификации гистонов играют значительную роль в обеспечении устойчивости клеток к агентам, повреждающим ДНК, а также сигнализировании и регуляции репарационных процессов.

Примером модификации гистонов является ацетилирование, выполняемое гистонацетилтрансферазами (ГАТ), и деацетилирование за счет гистондеацетилаз (ГД). ГАТ и ГД функционируют в антагонистической манере: ацетилирование гистонов коррелирует с экспрессией генов, в то время как деацетилирование связано с их репрессией. ГД катализируют удаление ацетильных групп, делая хроматин недоступным для транскрипционных белковых комплексов. Модификация достигается действием модификатора и демодификатора совместно: ГАТ может действовать по всему геному, но ГД, селективно опознавая модифика-

ции в определенных сайтах, будет создавать специфичный профиль ацетилирования.

Продукт гена *Sin3* функционирует в дрожжах *Saccharomyces cerevisiae* как репрессор большого числа генов в составе гистондеацетилазного комплекса RPD3. Белок Sin3, взаимодействуя с другими ДНК-связывающимися белками, нацеливает комплекс RPD3 на специфические промоторы и таким образом осуществляет транскрипционную регуляцию.

Ключевым событием как для точности воспроизводства генетического материала, так и для выживаемости клеток после массивного повреждения ДНК является увеличение внутриклеточного пула дезоксирибонуклеотидтрифосфатов (дНТФ), которое достигается через регуляцию активности рибонуклеотидредуктазы (РНР). РНР катализирует стадию, ограничивающую скорость в производстве всех 4 типов дНТФ, которые требуются для синтеза как ядерной, так и митохондриальной ДНК.

Мы изучили влияние мутации *sin3* на мутагенез в дрожжах *S. cerevisiae*. В работе использовались стандартные среды для культивирования, обработка культур канаванином (учет спонтанных мутаций) и гидроксимочевинной (ингибирование функций РНР), облучение клеток УФ (учет индуцированных мутаций). В ходе исследования были сконструированы одиночные и двойные мутанты по гену *SIN3* и ключевым генам репарационных систем: *RAD1* – нуклеотидная эксцизионная репарация (НЭР), *RAD52* – гомологичная рекомбинационная репарация (ГРР).

Анализ мутантов *sin3*, *rad1* и *rad1sin3* позволил установить, что мутация *sin3* приводит к увеличению чувствительности гаплоидных клеток дрожжей при высоких дозах УФ, что связано с гибелью почкующихся клеток (рис. 1). Это свидетельствует

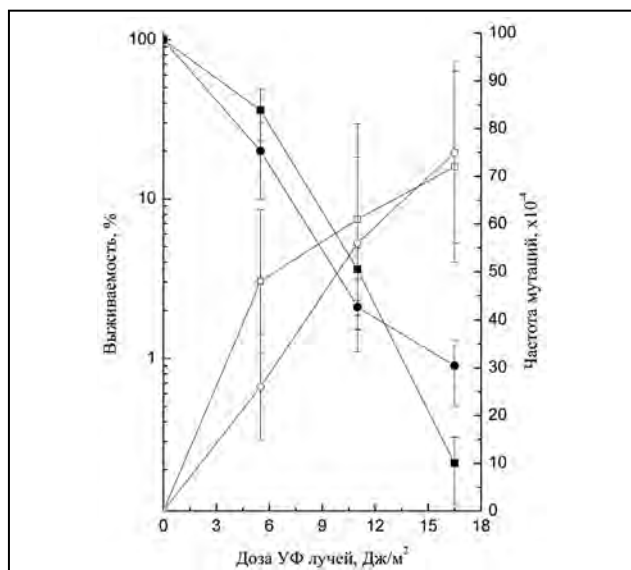


Рис. 1. Выживаемость мутантов: (■) – *rad1*, (●) – *sin3rad1*; мутагенез: (□) – *rad1*, (○) – *sin3rad1* под действием УФ

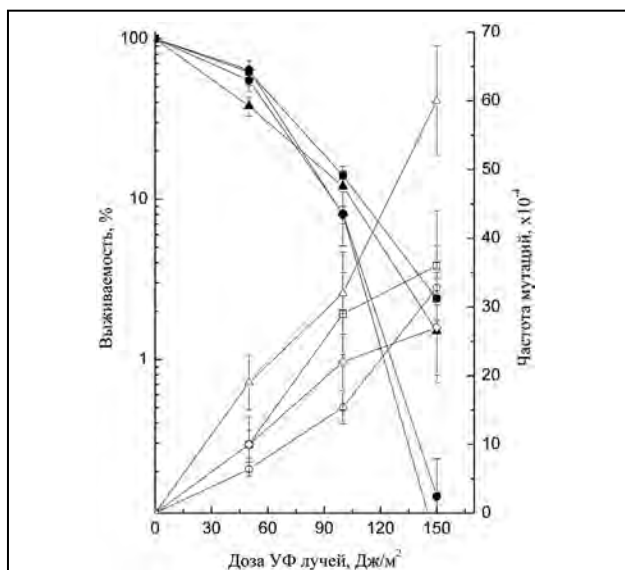


Рис. 2. Выживаемость мутантов: (■) – дикий тип, (●) – *sin3*, (▲) – *rad52*, (◆) – *sin3rad52*; мутагенез: (□) – дикий тип, (○) – *sin3*, (△) – *rad52*, (◇) – *sin3rad52* под действием УФ

о нарушениях в работе механизма ГРР и согласуется с данными литературы.

В мутанте *sin3rad52* ГРР блокирована, и все бреши, возникшие вследствие повреждения ДНК, будут заполняться с использованием пострепликативной репарации (ПРР), эффективность которой ухудшена из-за снижения концентрации дНТФ, обусловленной мутацией *sin3*. В результате значительно повысится гибель клеток и снизится уровень спонтанных мутаций, которые возникают при ошибочном обходе повреждений ДНК (рис. 2).

В клетке увеличение производства дНТФ происходит, во-первых, непосредственно перед началом репликации; во-вторых, обусловлено активацией РНР в ответ на появление относительно большого числа повреждений в ДНК. При УФ-облучении клеток дрожжей после индукции повреждений ДНК концентрация дНТФ увеличивается в 6–8 раз, и это прямо коррелирует с клеточной толерантностью к повреждениям ДНК. Увеличенная толерантность в присутствии высоких концентраций дНТФ ассоциируется с повышенной частотой мутационных событий, что объясняется более эффективным синтезом ДНК через ее повреждения (склонный к ошибкам путь репарации ДНК).

Инактивация комплекса RPD3 в клетках дрожжей приводит к нарушениям мутационного процесса. Уровень УФ индуцированного мутагенеза у мутанта *sin3* понижен (рис. 2). Это означает, что белок Sin3 негативно регулирует уровень пула дНТФ. При нарушении этой регуляции можно ожидать, что уровень индуцированного мутагенеза будет понижен, что мы наблюдали в наших экспериментах.

Аналогичным образом мутация *sin3* влияет на спонтанный мутагенез как репликативный, так и репаративный. Снижение уровней обоих типов спонтанного мутагенеза можно объяснить тем, что из-за мутации *sin3* необходимого повышения уровня дНТФ при репликации не происходит, а сниженный уровень дНТФ приводит к замедлению синтеза ДНК и блокированию работы ошибочных ДНК-полимераз. В результате частота репликативных ошибок существенно снижается. В случае учета репаративного мутагенеза также не происходит повышения концентрации дНТФ, что в свою очередь приводит к снижению числа репаративных ошибок. Таким образом, ген *SIN3* контролирует регуляцию уровня дНТФ как при репликации, так и репарации.

## Исследование механизмов гидролиза АТФ в ДНК-зависимых АТФазах mkTIP49 гипертермофильной археобактерии *Methanopyrus kandleri*

М. Г. Петухов, А. С. Афанасьева

Отделение молекулярной и радиационной биофизики

НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

Объектом исследования настоящего проекта являются белки TIP49, относящиеся к семейству ДНК-зависимых АТФаз AAA+ и являющиеся неотъемлемыми для жизнедеятельности эукариотических клеток и архей. Как часть комплексов ремодуляции хроматина TIP60, SWR1 и INO80, они оказывают существенное воздействие на большинство процессов жизнедеятельности клеток, таких как транскрипция, репарация ДНК, митоз и апоптоз. Недавно было показано, что эти белки играют ключевую роль в канцерогенезе, а селективные ингибиторы АТФазной активности этих белков являются перспективными лекарственными средствами в борьбе с несколькими видами рака человека.

Цель настоящего проекта состоит в исследовании механизмов ДНК-зависимой АТФазной активности белков семейства TIP49 с помощью комбинации теоретических методов молекулярного моделирования, молекулярной динамики в периодическом водном боксе и современных экспериментальных молекулярно-биологических и биохимических методов. Механизм гидролиза АТФ в белках может идти по нескольким альтернативным путям. В работе мы проверили один из наиболее часто предполагаемых вариантов, так называемый ассоциативный механизм, когда атакующая молекула воды предварительно активируется путем принятия протона воды полярными или отрицательно заряженными боковыми цепями АТФазы. В качестве объекта исследования был выбран белок-ортолог из гипертермофильного организма *Methanopyrus kandleri* (mkTIP49; UniProtKBID:Q8TZC3\_METKA), имеющий достаточно высокую гомологию к человеческим белкам семейства TIP49a/b (45 % и 42 % соответственно) и одновременно позволяющий достаточно простое выделение, очистку и биохимическое исследование этих белков.

Методология настоящего исследования состоит в использовании различных теоретических (молекулярная динамика) и экспериментальных молекулярно-биологических и биохимических подходов в едином комбинированном исследовании механизмов гидролиза АТФ. С этой целью нами впервые были разработаны новые методы анализа динамики активированных молекул воды в окрестности их целевых групп. Пространственная структура гексамерного комплекса белка mkTIP49 была построена по гомологии с известными кристаллическими структурами белков TIP49a/b/ab. Молекулярная динамика гексамерного комплекса проводилась на многопроцессорном высокопроизводительном вычислительном комплексе НИЦ «Курчатовский институт» HPC2 с использованием пакета программ GROMACS 4.5.5 в силовом поле AMBER99SB. Активность белка дикого типа и его мутантных форм считалась пропорциональной доступности АТФ для атакующей молекулы воды в правильной конформации. Доступность рассчитывали как накапливаемую вероятность присутствия воды в минимальном объеме, расположенной в центральной части передней полусферы  $\gamma$ -фосфатной группы АТФ. Этот объем, вмещающий только одну молекулу воды в каждый данный момент времени, был определен как сфера с радиусом 1,4 Å и помещен на расстоянии 2,5 Å от  $\gamma$ -фосфатной группы. Вероятности присутствия воды рассчитывали как долю времени, когда молекула H<sub>2</sub>O присутствует в этом объеме. Поскольку гидролиз АТФ требует активации молекулы на соседних группах белка, способных акцептировать протон воды, мы также вычисляли вероятность образования водородных связей между литической молекулой воды и несколькими отрицательно заряженными остатками белка (E297, D346 и D349), т. е. вероятность присутствия воды в правильной активированной конформации.

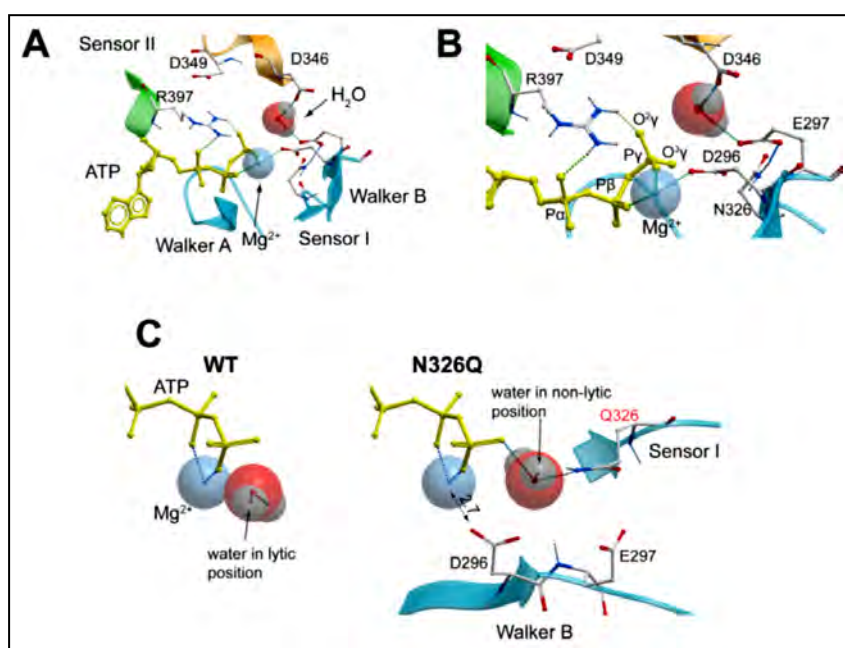
Расчеты проводились с учетом всех известных стерических ограничений для образования соответствующих водородных связей. Выделение, очистка и исследование АТФазной активности исследуемых белков проводились стандартными биохимическими методами.

В работе мы исследовали механизмы гидролиза АТФ в белках мкТIP49 путем введения точечных мутаций аминокислот в активном центре белка и их последствия теоретическими и биохимическими методами. В частности, нами впервые была предложена аминокислотная замена N326Q из соседней к каталитической субъединицы белка, которая сдвигает полярную аминогруппу ближе к АТФ по сравнению с белком дикого типа и которая, согласно нашим расчетам, может привести к образованию нового донора водородной связи для атакующей АТФ молекулы воды (рис.)

Теоретически нами было предсказано, что такая замена переориентирует атакующую молекулу воды, а также может препятствовать нормальной координации иона  $Mg^{2+}$  с D296 из Walker B. Как и предсказывалось, от такой перестановки АТФазы активность мутанта N326Q мкТIP49 была полностью потеряна в биохимических экспериментах.

Полученные экспериментальные результаты подтвердили не только наши расчеты, но и правильность выбранного нами механизма гидролиза АТФ в исследуемых белках, а также правильность пространственного расположения всех участников этой реакции в активном центре белка, включая неизвестную пока структуру его мультимерного комплекса.

Кроме того, предложенный нами мутант может быть использован для защиты АТФ от гидролиза при исследованиях различных биологических функций этих белков в клеточных процессах. Полученные нами результаты впервые показали, что гидролиз АТФ в активных центрах белков данного семейства как в археях, так и в человеческих клетках идет по ассоциативному механизму и основан на сложной сети водородных и координационных связей белка, ионов  $Mg^{2+}$  и литической воды. Впервые проведенное нами исследование динамики литических молекул воды в активном центре АТФазы открывает новые возможности для изучения ферментативной активности других белков с помощью методов молекулярного моделирования и молекулярной динамики.



Структура активного центра (АЦ) белка мкТIP49 и механизм гидролиза АТФ: общий вид АЦ (А); окружение  $\gamma$ -фосфатной группы АТФ (показано желтым цветом), ион  $Mg^{2+}$ , а также атакующая молекула воды (В); положение атакующей молекулы воды в белках мкТIP49 дикого типа (слева) и в мутанте N326Q (справа) (С)

## Молекулярное моделирование и нейтронная спектроскопия мультимолекулярных комплексов белков семейства RecA

А. В. Швецов, Д. В. Лебедев, Д. М. Байтин, В. В. Исаев-Иванов  
Отделение молекулярной и радиационной биофизики  
НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

Основными методами исследования структуры биомакромолекул с атомарным уровнем разрешения являются рентгеноструктурный анализ и ядерный магнитный резонанс (ЯМР). При этом рентгеноструктурный анализ дает информацию о структуре стационарных «замороженных» состояний макромолекул и их комплексов, хотя на самом деле биомультимолекулярные комплексы в растворе имеют значительную конформационную подвижность, которая, как правило, определяет их функцию. Кроме того, кристаллизация молекулярных «машин», которые являются нуклеопротеидными комплексами, включающими до десятка и более белков и осуществляющими в клетке такие процессы, как рекомбинация, репарация и др., практически невозможна. Метод ЯМР позволяет получать структуру биомакромолекул с атомарным разрешением в жидкости, но имеет ограничения по молекулярному весу исследуемого объекта порядка 30 кД.

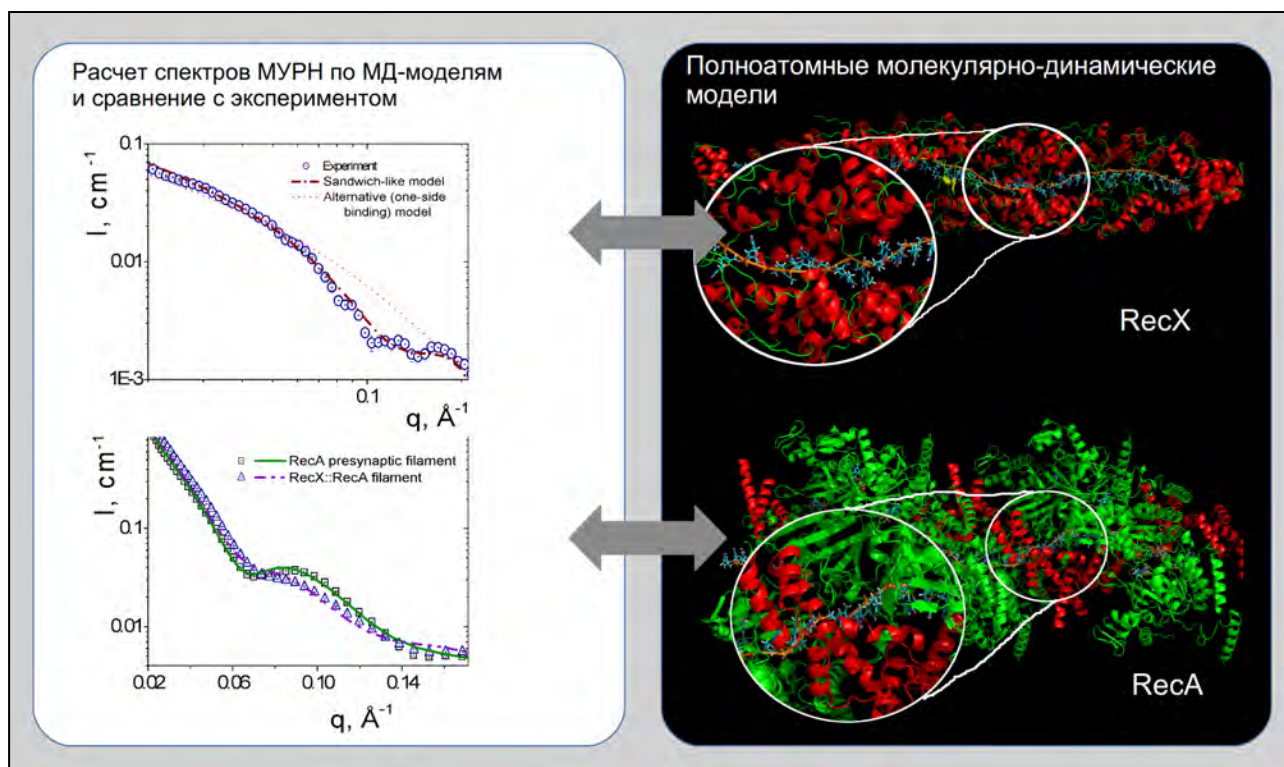
Малоугловое рассеяние рентгеновское (МУРР) и нейтронное (МУРН) практически не имеют ограничений по размерам исследуемых в растворе макромолекулярных систем вплоть до размеров клеточного ядра и позволяют получить информацию об их структуре. К сожалению, уровень разрешения этого метода невысок.

В настоящей работе при изучении структуры мультимолекулярных нуклеопротеидных комплексов, осуществляющих процесс гомологичной рекомбинации у бактерий путем совместного использования методов полноатомного молекулярно-динамического моделирования с расчетом усредненного по молекулярной траектории спектра МУРН и верификации полученных модельных расчетов путем регистрации спектров МУРН исследуемых систем, были получены структуры с полноатомным разрешением.

Белок RecA – центральный фермент гомологичной рекомбинации в бактериальной клетке. Образуя правозакрученный спиральный филамент на онДНК, он обеспечивает поиск гомологии между 2 молекулами ДНК и обмен гомологичных нитей. Синапсису гомологичных молекул предшествует пресинаптическая стадия, в ходе которой филамент RecA в присутствии АТФ и  $Mg^{2+}$  кооперативно мультимеризуется в направлении  $5' \rightarrow 3'$  вдоль онДНК. RecA-подобные белки принадлежат к большому семейству ферментов, включающему белки RecA в бактериях, белки Rad51 и Dmc1 у эукариот, в т. ч. у человека. Основной функцией этих белков является катализ спаривания и обмена нитями между однонитевой и гомологичным участком двунитевой ДНК. Этот процесс необходим как для репарации двунитевых разрывов ДНК, так и для перемешивания генетического материала в процессе образования половых клеток (мейозе) у высших.

Для изучения конформационных изменений нуклеопротеидных комплексов белков RecA в нативных условиях в работе впервые были построены полноатомные модели следующих структур: пресинаптического комплекса белка RecA из *Escherichia coli* с онДНК и АТФ длиной 33 мономера и из *Deinococcus radiodurans* длиной 12 мономера; комплекса регуляторного белка RecX на онДНК в виде сандвич-подобного филамента и комплекса белка RecX с пресинаптическим комплексом RecA из *E. coli*, включающим онДНК. Подвижность полученных модельных структур была рассчитана методами молекулярной динамики в периодическом водном боксе на временах до 100 нс.

Были разработаны программные утилиты для расчета спектров МУРН по полноатомным траекториям молекулярной динамики, позволяющие учитывать конформационную подвижность белка



Полноатомное молекулярное моделирование и малоугловое рассеяние нейтронов

при расчете спектров МУРН. Были получены экспериментальные спектры МУРН для всех рассчитанных моделей.

Результаты моделирования и результаты верификации приведены на рисунке. Анализ полученных данных может пролить свет на основные конформационные движения в исследованных комплексах и их связь с взаимодействиями «белок – ДНК» как на уровне мономерных субъединиц, так и на уровне целых филаментов.

Полученные спектры МУРН для комплекса белка RecX с оДНК находились в хорошем соответствии с расчетными спектрами, а спектры комплекса

белка RecX с пресинаптическим комплексом белка RecA оказались близки к расчетным спектрам для модели с соотношением RecA : RecX 12 : 5.

Важным результатом этого цикла работ для структурной биологии является тот факт, что использование методов молекулярной динамики позволяет получить полноатомную структуру исследуемых мультимолекулярных комплексов в нативных условиях, используя для верификации предлагаемых моделей низкоразрешающую экспериментальную методику, каковой являются МУРН и МУРР.

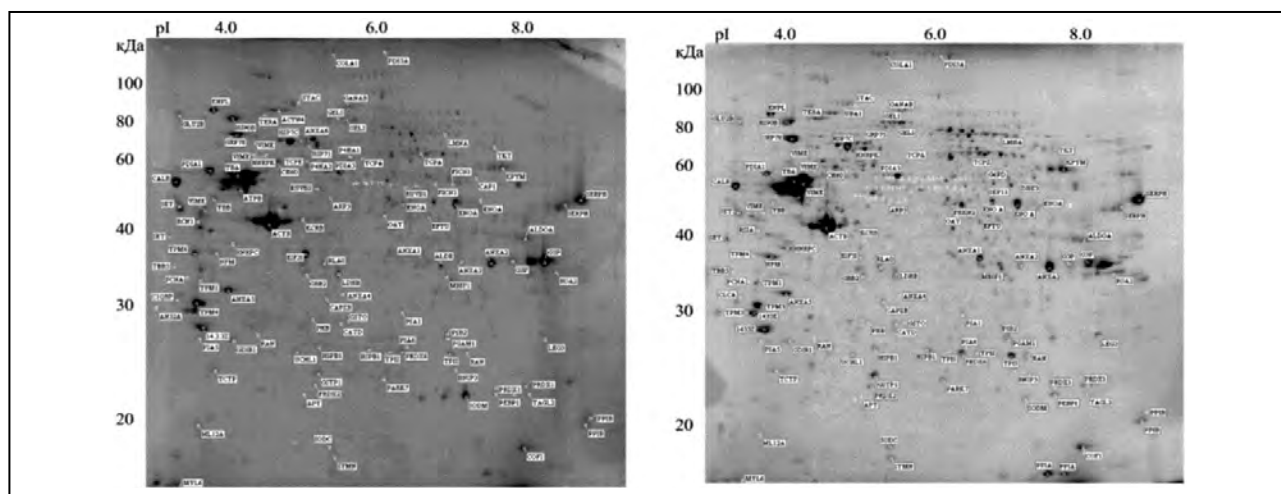
## Разработка штрих-кода и получение белкового профиля глиобластомы

*С. Н. Нарыжский, Н. Л. Ронжина, Н. В. Белякова, Р. А. Пантина, М. В. Филатов –  
Отделение молекулярной и радиационной биофизики  
НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»  
М. А. Майнсова – Научно-исследовательский институт биомедицинской химии  
им. В. Н. Ореховича*

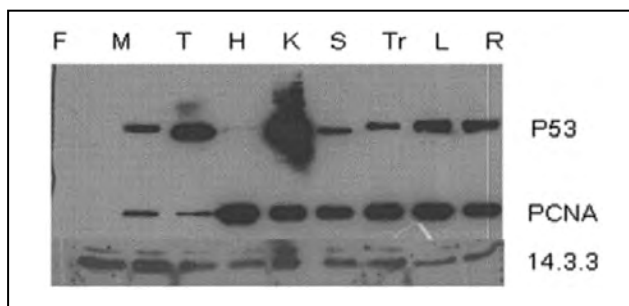
Глиобластома является наиболее часто встречающейся формой опухоли мозга. По смертности она занимает 4-е место среди раковых заболеваний. Средний период выживаемости при данном заболевании составляет один год, что подчеркивает необходимость его ранней диагностики и поиска путей лечения. В наших экспериментах мы использовали несколько глиобластомных клеточных линий для получения протеомной информации, характерной для данного заболевания. Разделение белков двумерным электрофорезом с последующим окрашиванием, анализом изображений и белковых пятен, масс-спектрометрической и иммунологической идентификацией белков позволило визуализировать более 600 белковых пятен и идентифицировать более 130 из них (рис. 1). Протеомные профили в нормальных и глиобластомных клетках очень похожи, однако уровни содержания многих белков сильно отличаются. Среди таких белков выделяются ядерный антиген делящихся клеток (proliferating cell nuclear antigen, PCNA)

и p53 (TP53) (рис. 2). Особенно интересные результаты были получены для белка p53. По сравнению с нормальными, в глиобластомных клетках уровень данного белка не только сильно повышен, но еще и сопровождается появлением множества дополнительных форм (рис. 3). Таким образом, использование иммуноферментного анализа (Вестерн-блота) 3 хаб-белков (p53, 14-3-3 и PCNA) позволило получить минимальный штрих-код глиобластомных линий (табл.).

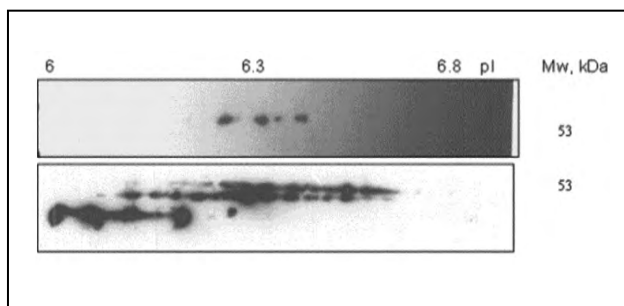
С развитием протеомики связывают большие надежды по внедрению новых подходов в диагностике различных заболеваний и создании новых лекарственных соединений. Что касается нейроналогии, то применение протеомики, хотя и находится здесь в стадии развития, чрезвычайно быстро становится популярным. Предполагается, что получение белковых профилей даст возможность объединить усилия в различных областях и окажет существенный эффект на исследования и лечение глиом. Полученные нами результаты, с одной



**Рис. 1.** Разделение белков двумерным электрофорезом с последующим программным анализом, вырезанием пятен и идентификацией белков. Слева – норма (ФЛЭЧ); справа – глиобластома (L). Положение форм p53 обозначено крестиками



**Рис. 2.** Уровень белков p53, PCNA и 14.3.3, детектируемых Вестерн-блотом в 7 разных глиобластомных клеточных линиях. Были проанализированы глиобластомные линии M, T, K, S, Tr, L, R, а также линия раковых клеток матки HeLa (H). Контролем служила линия F (ФЛЭЧ), а также нормальная ткань мозга (не показано)



**Рис. 3.** Иммунодетектирование белка p53 в нормальных и глиобластомных клетках после двумерного электрофореза (2DE Вестерн-блот). *Вверху* – норма (F), *внизу* – глиобластома (Т)

**Таблица.** Белки, содержание которых наиболее повышено в глиобластомных клетках

№	UniProtKB / Swiss-Prot	Название белка	pI / MW*	ФЛЭЧ, % V	Глиобластома / ФЛЭЧ
1	P53_HUMAN	Cellular tumor antigen p53	6,33 / 43 653	< 0,05	19 ± 18 <sup>3</sup>
2	PCNA_HUMAN	PCNA, proliferating cell nuclear antigen	4,57 / 28 769	< 0,05	14 ± 6 <sup>3</sup>
3	COF1_HUMAN	Cofilin-1	8,22 / 18 502	0,58	4,0 ± 2,3
4	КPYM_HUMAN	Pyruvate kinase PKM	7,96 / 57 936	0,34	3,2 ± 1,1
5	ANXA1_HUMAN	Annexin A1	6,57 / 38 714	0,16	3,1 ± 0,2
6	TPIS_HUMAN	Triosephosphate isomerase	5,65 / 30 791	0,20	2,8 ± 1,0
7	NPM_HUMAN	Nucleophosmin	4,64 / 32 575	0,19	2,8 ± 0,7
8	VIME_HUMAN	Vimentin	5,05 / 53 651	0,04	2,5 ± 0,9
9	ANXA2_HUMAN	Annexin A2	7,57 / 38 604	0,10	2,5 ± 0,8
10	TERA_HUMAN	Transitional endoplasmic reticulum ATPase	5,14 / 89 321	0,08	2,3 ± 0,9
11	ENOA_HUMAN	Alpha-enolase	7,01 / 47 168	0,20	2,2 ± 1,0
12	PRDX1_HUMAN	Peroxiredoxin-1	8,27 / 22 110	0,07	2,2 ± 0,7
13	SYAC_HUMAN	Alanine-tRN Aligase, cytoplasmic	5,34 / 106 810	0,05	2,2 ± 0,5
14	TCTP_HUMAN	Translationally-controlled tumor protein	4,84 / 19 595	0,15	2,1 ± 0,6

\* Значения изоточки (pI) и молекулярного веса (MW) канонической формы белка, взятые из базы данных UniProtKB / Swiss-Prot.

стороны, подтверждают опубликованные ранее данные о некоторых раковых белках-маркерах, как общих, так и связанных с глиобластомой; с другой стороны, указывают на возможность использования в глиобластомных анализах в качестве биомаркеров таких известных белков, как PCNA и p53.

Поэтому минимальный штрих-код глиобластомы может иметь вид, представленный на рис. 2. Более того, впервые показанная нами в глиобластомах чрезвычайно высокая гетерогенность белковых форм p53 сама по себе требует отдельного внимания и анализа.

1. Kalinina J. et al. // Neuro-Oncology. 2011. V. 13. P. 926–942.

2. Москалева Н. Е., Згода В. Г. // Биомед. хим. 2012. Т. 58. С. 617–634.

3. Нарыжный С. Н., Ронжина Н. Л., Майнскава М. А., Белякова Н. В., Пантина Р. А., Филатов М. В. // Биомед. хим. 2014. Т. 60. Вып. 3. С. 308–321.

4. Naryzhny S. N., Ronzhina N. L., Mainskova M. A., Belyakova N. V., Pantina R. A., Filatov M. V. // Biomed. Chem. 2014. V. 8. No. 3. P. 243–251.



## Синхронизация транслокации тРНК на большой и малой субчастицах рибосомы

А. Л. Коневега

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

Многие аспекты молекулярного механизма биосинтеза белка все еще остаются невыясненными, несмотря на титанические усилия исследователей. Среди них – молекулярный механизм реакции транслокации, в ходе которой нативные субстраты рибосомы (тРНК и мРНК) перемещаются в межсубъединичном пространстве рибосомы, уникальным образом сочетая высокую скорость и точность перемещения. На настоящий момент известна кинетическая схема транслокации, а для мно-

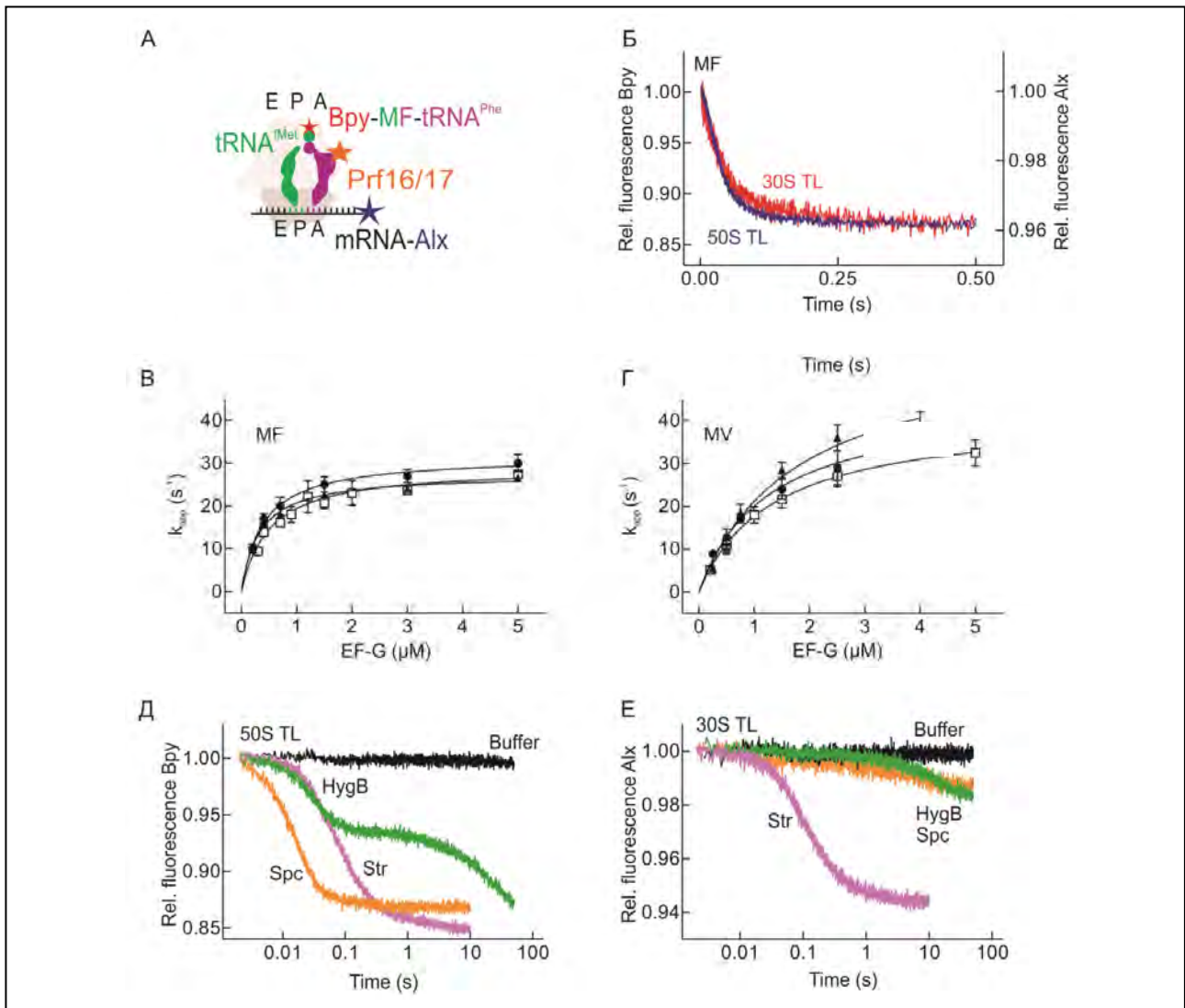


Схема расположения флуоресцентных меток на рибосомном комплексе (А); синхронная транслокация на субчастицах 30S и 50S, катализируемая элонгационным фактором EF-G – GTP (Б – Г); рассинхронизация транслокации на большой и малой субъединицах в присутствии антибиотиков: стрептомицина, спектиномицина, гигромицина (Д, Е)

гих промежуточных состояний даже определена структура рибосомных комплексов. Кинетические исследования в таких экспериментах проводятся на флуоресцентном спектрометре остановленного потока (SX20, Applied Photophysics). При этом в качестве наблюдаемой величины используется изменение интенсивности флуоресценции репортерной группы, включенной в молекулу транспортной РНК (тРНК) или матричной РНК (мРНК). Флуоресцентная метка в мРНК показывает физическое перемещение мРНК на 1 кодон, т. е. транслокацию на субчастице 30S. Транслокацию на субчастице 50S до недавнего времени наблюдать не удавалось. В данной работе благодаря использованию новой системы флуоресцентных меток нам удалось показать, что в некоторых случаях транслокация на субчастицах 50S и 30S происходит не синхронно. В том числе некоторые антибиотики приводят к селективному замедлению транслокации на субчастице 30S. Также некоторые мутанты EF-G, в т. ч. неспособные гидролизовать GTP, приводят к замедлению и десинхронизации транслокации.

Для изучения кинетики транслокации комплекса тРНК<sup>2</sup>-мРНК, катализируемой EF-G, была использована комбинация флуорофоров, расположенных на 3'-конце мРНК и на пепт-тРНК и позволяющих наблюдать транслокацию мРНК

и тРНК в одном эксперименте (рис.). Показано, что только полноразмерный вариант фактора EF-G и сопряжение с гидролизом GTP приводят к быстрой и одновременной транслокации тРНК на субъединицах 30S и 50S. Антибиотики: виомицин, спектиномицин, гигромицин Б – приводят к рассинхронизации транслокации: частичная транслокация на субчастице 50S в присутствии EF-G-GTP происходит относительно быстро, тогда как транслокация антикодоновой части тРНК и мРНК на субчастице 30S оказывается сильно замедленной. Интересно отметить, что антибиотик спектиномицин ускоряет транслокацию на субчастице 50S. При насыщающих концентрациях EF-G-GTP скорости транслокации, измеренные с помощью флуорофоров в пептидильном остатке пепт-тРНК (BPU), в мРНК (флуоресцеин, Flu, Alx405) и в D-петле тРНК (Prf, профлавин), совпадают ( $28\text{--}30\text{ с}^{-1}$ ). Кроме того, скорости транслокации совпадают также для 2 систем с различными парами тРНК (fMetPhe и fMetVal), сильно отличающихся по разности свободных энергий пре- и посттранслокационных состояний. Данная работа позволяет значительно дополнить существующую модель транслокации и убедительно демонстрирует еще один механизм действия антибиотиков, ингибирующих биосинтез белка, – рассинхронизацию транслокации.

## Трансляционное шунтирование: пропуск некодирующей последовательности мРНК в процессе трансляции

А. Л. Коневега

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

Абсолютное большинство белков синтезируется в результате равномерного поступательного движения рибосомы по матричной РНК (мРНК). Однако для синтеза субъединицы ДНК топоизомеразы (продукт экспрессии гена *60* бактериофага Т4) рибосома использует уникальный механизм: пропуск некодирующего участка мРНК длиной 50 нуклеотидов, находящегося между 2 кодирующими последовательностями. После трансляции первого участка рибосома останав-

ливается при позиционировании стоп-кодона в А-сайте, ослабляется кодон-антикодонное взаимодействие в Р-сайте, мРНК протягивается сквозь рибосому на 50 нуклеотидов, после чего синтез полипептида возобновляется. Цель данной работы – выявление механизма движения рибосомы и идентификация минимально необходимого набора элементов для шунтирования. Для этого была воссоздана система трансляционного шунтирования *in vitro*, состоящая из очищенных

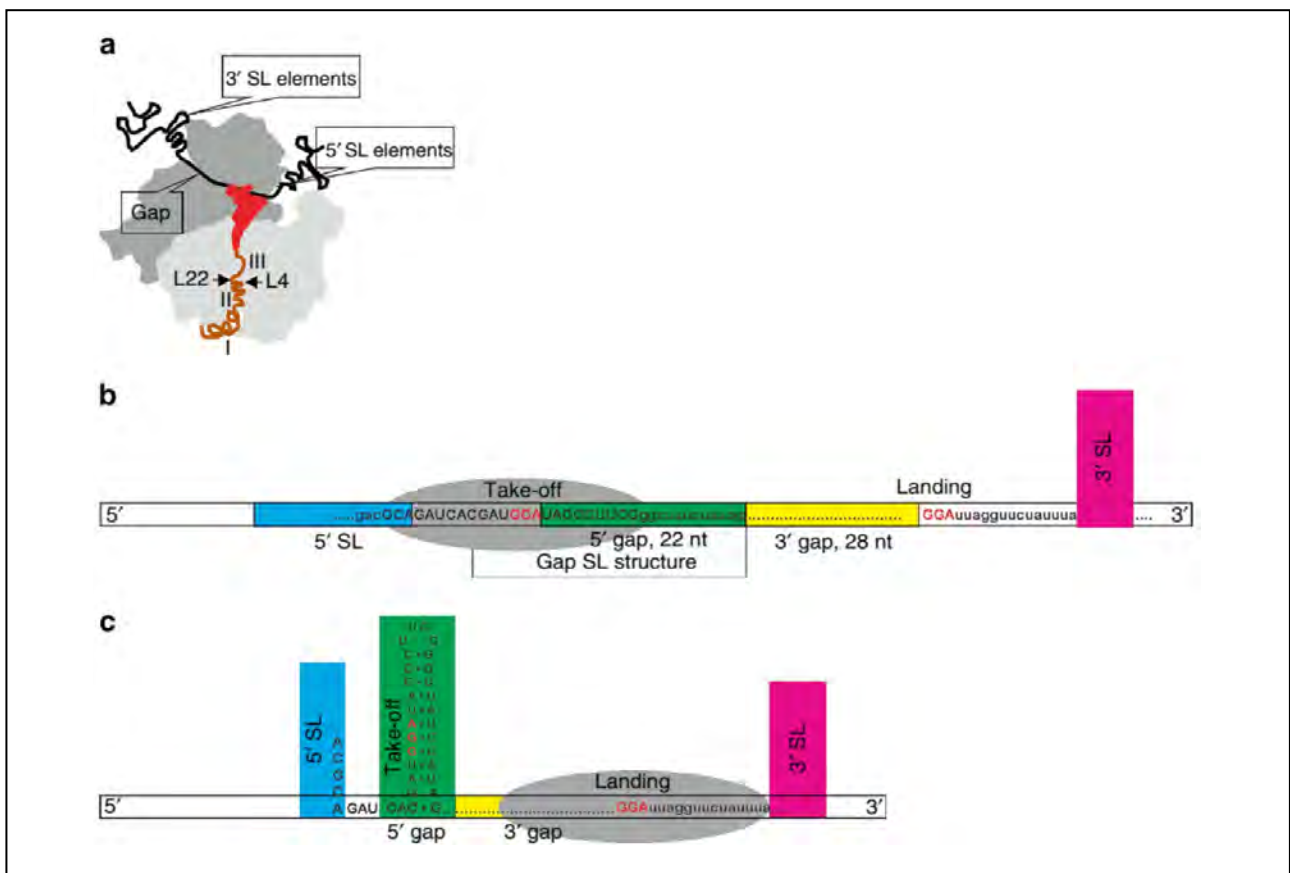


Схема структурной организации транслирующей рибосомы с элементами вторичной структуры мРНК с 5'- и 3'-стороны в момент прерывания трансляции (а); позиция рибосомы в начале процесса шунтирования (б); позиция рибосомы в момент возобновления трансляции (с)

и биохимически охарактеризованных компонентов. Применяя уникальный метод трансляции *in vitro* полипептидов с флуоресцентно-меченой N-концевой аминокислотой были охарактеризованы основные элементы мРНК, кодирующие нелинейную трансляцию. Показано, что наличие определенных элементов структуры мРНК в нетранслируемой области, а также с 5'- и 3'-стороны от нее является определяющим и достаточным для трансляционного шунтирования (рис.). Было показано, что эффективное и точное шунтирование возможно в минимальной трансляционной системе без дополнительных факторов, а все принципиально значимые элементы содержатся в самой последовательности мРНК гена *60*. Таким образом, способность к нелинейной трансляции является внутренним свойством трансляционной системы и не зависит от наличия дополнительных факторов. Систематический анализ последовательности мРНК показал важное значение вторичной структуры мРНК и последовательности аминокислотных остатков растущей полипептидной цепочки. Было также показано, что

во время шунтирования рибосома последовательно скользит вперед по мРНК до обнаружения кодона, на котором необходимо возобновить синтез белка. Похожий механизм может использоваться рибосомой не только для синтеза продукта гена *60*, но и во время трансляции обычной мРНК для поиска подходящей рамки считывания во время инициации или при транслокации транспортной РНК во время элонгации. Трансляционное шунтирование при декодировании им РНК гена *60* бактериофага Т4 является первым примером РНК-переключателя с регуляторными элементами в кодирующей области. Исследования молекулярных механизмов функционирования бактериальной рибосомы, в т. ч. редких событий трансляции, необходимы для последующего использования в биотехнологических системах, для синтетической биологии и разработки новых специфических ингибиторов биосинтеза белка для применения в качестве антибиотиков.

Работа опубликована в 2014 г. в журнале *Nature Communications*.

## Кинетический механизм программируемого сдвига рамки считывания (-1)

**В. И. Катунин**

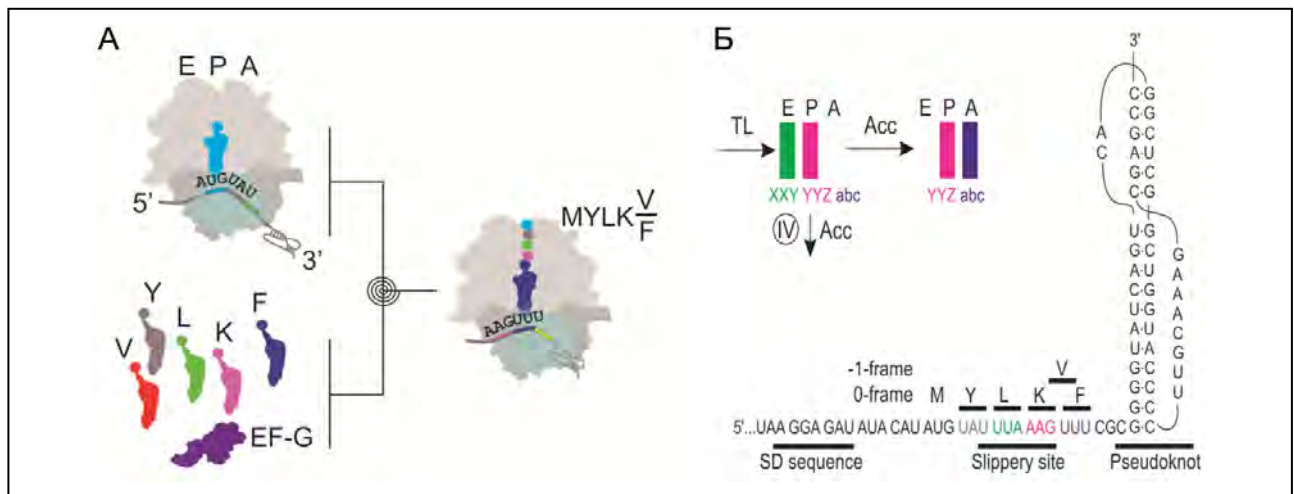
Отделение молекулярной и радиационной биофизики  
НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

Помимо равномерного поступательного движения рибосомы по матричной РНК (мРНК) существуют различные механизмы трансляционного перекодирования, например сдвиг рамки считывания вперед или назад. В данной работе изучался механизм программируемого сдвига рамки считывания на 1 нуклеотид назад посредством детального рассмотрения движения рибосомы по участку мРНК, для которого характерен вышеупомянутый сдвиг рамки считывания. Для реализации сдвига рамки считывания необходимо наличие так называемой скользящей последовательности мРНК (по которой будет происходить сдвиг рибосомы назад) и псевдоузла мРНК, временно препятствующего продвижению рибосомы вперед.

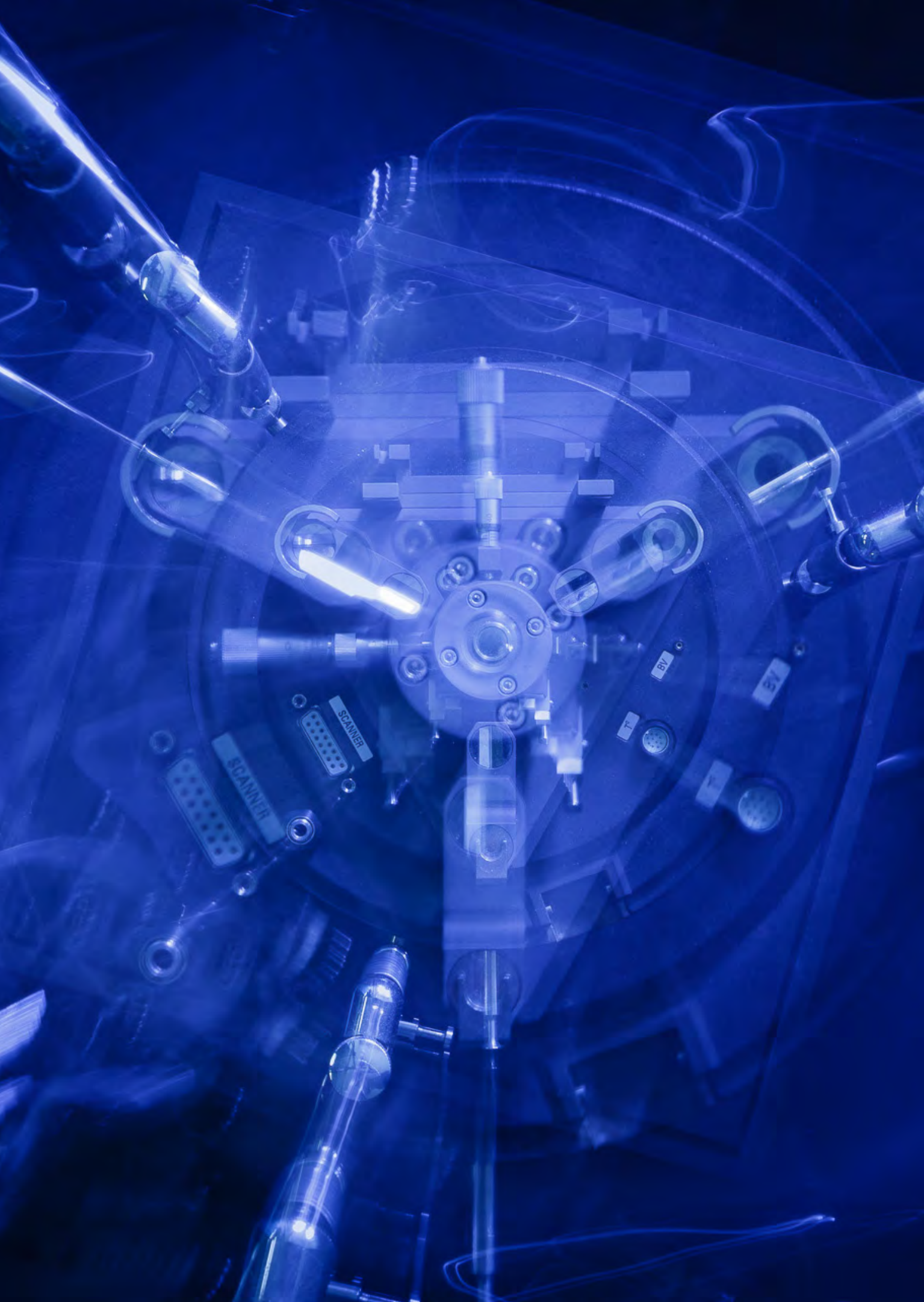
В работе представлены результаты анализа, который включает кинетические данные пошаговой трансляции «скользящей» последовательности,

встраивания аминокислот в полипептидные последовательности, соответствующие нормальному и сдвинутому положению рамки считывания, и реакции транслокации, обусловленной программируемым сдвигом рамки считывания.

Было показано, что сдвиг рамки считывания происходит на позднем этапе транслокации, когда обе молекулы транспортной РНК (тРНК) связаны со «скользящей» последовательностью мРНК (рис.). Псевдоузел мРНК препятствует закрывающему движению головы малой субчастицы рибосомы и диссоциации элонгационного фактора EF-G и тРНК с рибосомы. Перемещение рибосомы в положение на 1 нуклеотид назад ускоряет завершение процесса транслокации, делая еще более выгодным трансляцию мРНК в соответствии с новой рамкой считывания.



Схематическое изображение: эксперимента по смешиванию рибосомных комплексов с фактором EF-G и набором комплексов с тРНК (А); участка мРНК, для которого характерен сдвиг рамки считывания (slippery site – «скользящая» последовательность, pseudoknot – псевдоузел, frame – рамка считывания) (Б)



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

- 96 Многоканальное запаздывающее деление изотопов  $^{194,196}\text{At}$ ,  $^{202}\text{Fr}$
- 97 Исследование сосуществования форм для изотопов полония
- 98 Расчет системы формирования пучка в зале протонной офтальмологии
- 100 Новые эндометаллофуллерены, инкапсулирующие атомы железа
- 102 Структура и токсичность водных растворов фуллерена  $\text{C}_{60}$

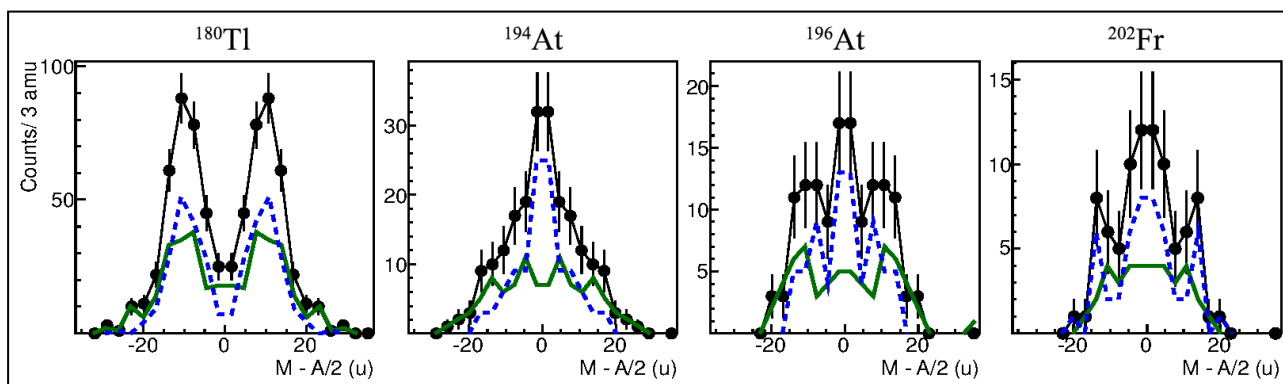
## Многоканальное запаздывающее деление изотопов $^{194, 196}\text{At}$ , $^{202}\text{Fr}$

В. Н. Пантелеев

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

Вслед за обнаружением нами асимметричного запаздывающего деления у  $^{178, 180}\text{Tl}$  появился ряд теоретических работ, где с помощью нового динамического подхода к анализу процесса деления удалось вполне удовлетворительно описать асимметричное массовое распределение при запаздывающем делении  $^{178, 180}\text{Tl}$ . В этих же работах предсказан постепенный переход от асимметричного к симметричному делению, проявляющийся в постепенном уменьшении массового расщепления между легким и тяжелым осколками. В противоречие с этими предсказаниями для ядер, лежащих между областями асимметричного ( $^{178, 180}\text{Tl}$ ) и симметричного ( $^{204}\text{Fr}$ ) деления, в наших экспериментах обнаружено трехгорбое массовое распределение осколков (рис.). Это означает, что для этих «промежуточных» ядер ( $^{194, 196}\text{At}$ ,  $^{202}\text{Fr}$ ) наблюдается так называемое многоканальное деление:

существует вероятность деления ядра как по симметричному, так и по асимметричному каналам, причем массовое расщепление между тяжелым и легким осколками в асимметричном канале практически не уменьшается при приближении к области симметричного деления, а уменьшается относительная вероятность асимметричного деления. Как уже указывалось, эти данные противоречат имеющимся теоретическим предсказаниям и для своего объяснения требуют существенного развития теоретических подходов. Отметим, что ранее сосуществование симметричной и асимметричной моды деления наблюдалось только для  $^{226}\text{Th}$ ; впервые получены данные, демонстрирующие постепенный переход от симметричного к асимметричному делению через пограничную область многоканального деления.



Массовое распределение осколков деления при распаде  $^{180}\text{Tl}$  (асимметричное деление) и  $^{194, 196}\text{At}$ ,  $^{202}\text{Fr}$  (многоканальное деление)

1. Elseviers J., Barzakh A., Fedorov D., Seliverstov M. et al. // Phys. Rev. C. 2013. V. 88. P. 044321.
2. Liberati V., Barzakh A., Fedorov D., Molkanov P., Seliverstov M. et al. // Phys. Rev. C. 2013. V. 88. P. 044322.
3. Ghys L., Barzakh A., Fedorov D., Seliverstov M. et al. // Phys. Rev. C. 2014. V. 90. P. 041301(R).



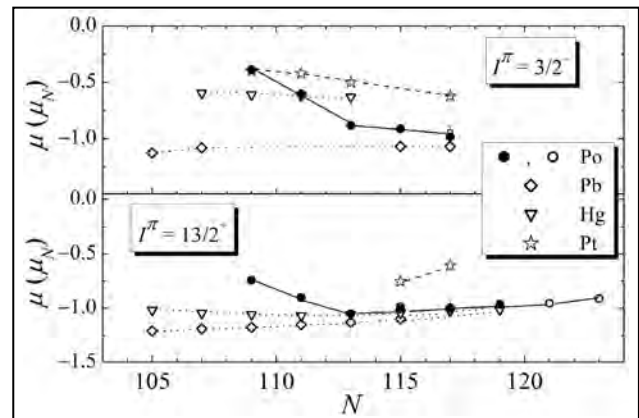
## Исследование сосуществования форм для изотопов полония

В. Н. Пантелеев

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

В 2014 г. были продолжены исследования сосуществования форм и эволюции формы у изотопов полония. Измерены магнитные дипольные ( $\mu$ ) и электрические квадрупольные ( $Q$ ) моменты изотопов Po в диапазоне  $A = 193-211$ . При  $N < 113$  наблюдается заметное отклонение значений электромагнитных моментов от почти постоянных значений для более тяжелых изотопов (рис.). Ранее при исследовании изменений среднеквадратичных зарядовых радиусов,  $\delta \langle r^2 \rangle$ , было установлено, что рост деформации у изотопов Po начинается значительно раньше (при  $N < 113$ ), чем предполагалось и предсказывалось ранее. Рост магнитных моментов для изотопов Po с  $N < 113$ , а также поведение квадрупольных моментов у этих изотопов удалось описать при учете кориолисова взаимодействия при умеренной деформации, а также смешивания деформированных и сферических конфигураций. Таким образом, учет раннего развития деформации позволяет самосогласованно объяснить как ранее полученные данные по среднеквадратичным зарядовым радиусам, так и поведение изотопических зависимостей электромагнитных моментов изотопов Po.

Проведены также измерения  $\delta \langle r^2 \rangle$ ,  $\mu$  и  $Q$  для нейтроноизбыточных изотопов Po ( $N = 132-134$ ). В этой области ядер (для изотопов Fr, Ra, Rn с тем же числом нейтронов) ранее был обнаружен инверсный четно-нечетный эффект в поведении зарядовых радиусов. Нормальный четно-нечетный эффект заключается в том, что радиус нечетно-нейтронного ядра оказывается меньше среднего арифметического радиусов соседних



Магнитные дипольные моменты для изотопов Po в сравнении с изотопами Pb, Hg и Pt

четно-нейтронных ядер. Для ядер Fr, Ra, Rn при  $N = 133$  ситуация обратная: радиус нечетно-нейтронного ядра больше соответствующего среднего арифметического. Этот эффект был проинтерпретирован как следствие наличия у этих ядер октупольной деформации, что было впоследствии подтверждено целым рядом других ядерно-спектроскопических данных. Наши измерения показали, что для ядер Po при  $N = 133$  сохраняется нормальный четно-нечетный эффект. Таким образом, установлена граница области октупольной деформации. В пользу отсутствия октупольной деформации у  $^{217}\text{Po}$  свидетельствует также измеренный в наших экспериментах магнитный момент этого ядра, удовлетворительно согласующийся с простыми оценками по оболочечной модели и не требующий для своего объяснения привлечения модели октупольно-деформированного ядра.

1. Cocolios T. E., Barzakh A., Fedorov D., Molkanov P., Seliverstov M. et al. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. P. 052503.
2. Seliverstov M. D., Barzakh A., Fedorov D., Molkanov P. et al. // Phys. Lett. B. 2013. V. 719. P. 362.
3. Seliverstov M. D., Barzakh A., Fedorov D., Molkanov P. et al. // Phys. Rev. C. 2014. V. 89. P. 034323.
4. Fink D., Barzakh A., Fedorov D., Molkanov P., Seliverstov M. et al. // Phys. Rev. X (в печати).

## Расчет системы формирования пучка в зале протонной офтальмологии

*Н. А. Иванов, Ж. С. Лебедева*

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

Для лечения онкологических заболеваний все шире применяются пучки протонов и более тяжелых ионов, облучение которыми прошли уже более 80 000 пациентов. Резкий рост ионизационных потерь в конце пробега ионов (пик Брэгга) позволяет обеспечить величину поглощенной дозы в тканях опухоли в несколько раз больше, чем в здоровых тканях, и проводить облучение вблизи органов риска. В офтальмоонкологии протонная терапия меланомы часто является единственной альтернативой удалению глаза и позволяет сохранить пациенту не только зрение, но и жизнь.

Настоящая работа проводится в рамках исследований по созданию в НИЦ КИ ПИАФ центра протонной офтальмологии на базе циклотрона Ц-80. Целью работы является математическое моделирование системы формирования пучка протонов в зале облучения с использованием программного комплекса Geant4. Основными критериями при выборе схемы формирования являются следующие:

- неравномерность величины поглощенной дозы в облучаемой области менее 2 %;
- большие значения градиентов поглощенной дозы на границах области;
- максимальная доля числа протонов, попадающих в облучаемую область, от числа протонов на входе в зал облучения.

Оценено влияние ядерных взаимодействий и химического состава материалов, близких по составу к тканям глаза, на распределение поглощенной дозы. Показано, что в этих материалах отличается как положение, так и величина поглощенной дозы в пике Брэгга. Так, например, пик Брэгга в хрусталике глаза смещен по отношению к пику Брэгга в воде на 2 мм. Учитывая наличие зон риска в глазе, такие погрешности недопустимы. Расчеты без учета ядерных реакций приводят

к погрешностям до 10 % в величинах поглощенной дозы в области пика Брэгга. Эти результаты указывают на необходимость тестирования методом Монте-Карло систем планирования лучевой терапии.

Проведено моделирование различных вариантов формирования пучка на основе традиционной методики, использующей рассеяние «узкого» пучка (2÷5 мм) протонов на фольгах с последующими коллимацией пучка и созданием модифицированной кривой Брэгга (МКБ). Основные узлы такой системы приведены на рис. 1.

Пучок протонов должен быть сформирован таким образом, чтобы он максимально равномерно покрывал опухоль с линейными размерами до 4 см. Для этого с помощью модулятора создается МКБ, которая является суммой пиков Брэгга от протонов различных энергий. Предложен метод расчета модулятора и определены параметры узлов системы формирования, которые позволяют обеспечить требуемые характеристики области облучения. Однако известно, что при использовании метода «узкого» пучка в зале облучения в процессе формирования и транспортировки до пациента теряется более 90 % протонов пучка. До 10 % от числа таких протонов вызывают ядерные реакции с ядрами атомов конструкционных материалов с образованием вторичных частиц и радионуклидов. В связи с этим предложен вариант использования «широкого» пучка, диаметр которого на входе в зал облучения соответствует размерам опухоли. Расчетные характеристики дозы в облучаемой области для такого пучка приведены на рис. 2.

Эффективность проводки пучка  $\epsilon$  определим как отношение числа протонов, дошедших до опухоли, к числу вошедших в зал облучения. В расчете «узкого» пучка с оптимизированными па-

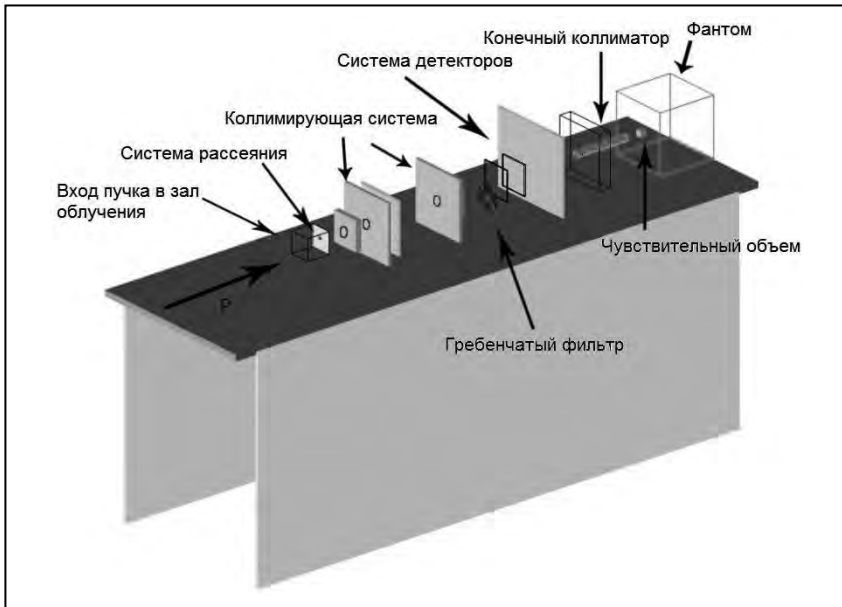


Рис. 1. Схема системы формирования протонного пучка в зале облучения

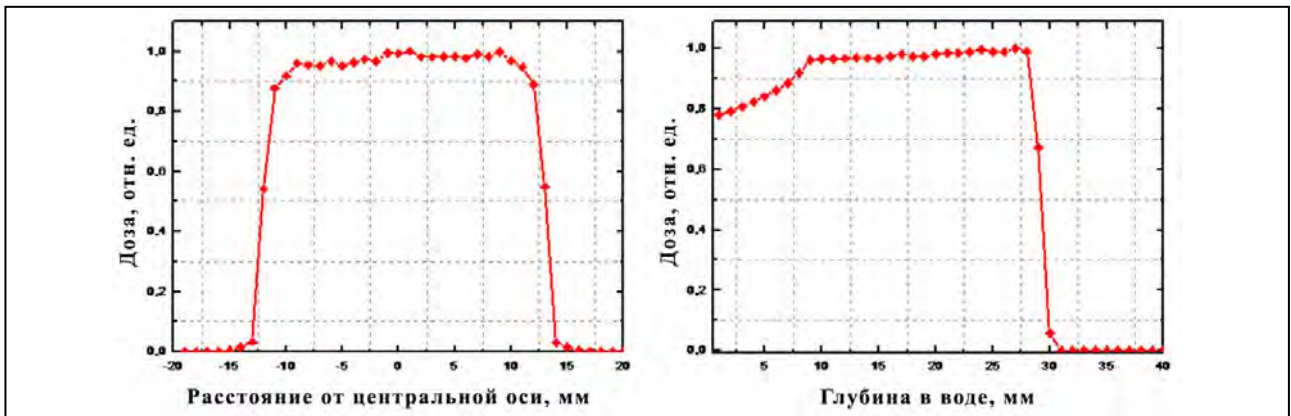


Рис. 2. Распределение поглощенной дозы в облучаемой области: длина МКБ по 90 %-ной изодозе – 20,7 мм; ширина – 25 мм; полутьнь (20–80 %) – 3,0 мм; эффективность пучка – 17 %

раметрами величина эффективности составила  $\epsilon_{уз.} = 0,06$ , а для «широкого» пучка получили  $\epsilon_{шир.} = 0,17$ . Остальная часть пучка протонов ( $1 - \epsilon$ ) поглощается в материалах зала облучения, создавая в результате ядерных реакций вторичные частицы и радионуклиды. Отношение количества таких протонов  $\eta$  для случаев «узкого» и «широкого» пучков определяется выражением

$$\eta = (\epsilon_{wide} / \epsilon_{pen}) \cdot [(1 - \epsilon_{pen}) / (1 - \epsilon_{wide})].$$

Соответственно, применение «широкого» пучка позволяет в 3 раза снизить радиационный фон в зале облучения по сравнению с использованием схемы с «узким» пучком, при этом упростив систему формирования, и тем самым сделать ее более надежной.

1. Moyers M. F., Vatnitsky S. M. Practical Implementation of Light Ion Beam Treatments. Madison: Med. Phys. Pub., 2012. P. 580.
2. Иванов Н. А., Лебедева Ж. С., Шуракова Ю. Б. // Медицинская физика. 2013. Т. 59. № 3. С. 42–47.
3. Иванов Н. А., Лебедева Ж. С. // ПЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 16. С. 36–41.
4. Particle Therapy Cooperation Group (PTCOG) // Particle Therapy Facilities in Operation. <http://ptcog.web.psi.ch/>

## Новые эндометаллофуллерены, инкапсулирующие атомы железа

В. П. Седов, А. А. Сжогина, В. Т. Лебедев, Ю. П. Черненко, В. Л. Аксенов –  
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»  
М. В. Ковальчук – НИЦ «Курчатовский институт»

Впервые методом малоуглового рассеяния нейтронов изучено поведение новой эндоэдральной структуры в водных растворах в связи с планируемыми биомедицинскими применениями. По результатам этих исследований сделано заключение, что молекулы  $\text{Fe}@C_{60}(\text{OH})_x$  начиная с концентрации  $C \sim 1\%$  масс. организуются в воде в устойчивые глобулярные структуры, имеющие корреляционный радиус  $R_c \sim 10\text{--}12\text{ нм}$ , числа агрегации  $N_c \sim 104$  (рис. 1, 2).

Превращение носит обратимый характер, но есть некоторый гистерезис: при разбавлении систем размеры кластеров и числа агрегации возвращаются к исходным значениям при низких концентрациях.

Таким образом, впервые получены нетоксичные магнитные эндометаллофуллерены, их ЯМР релаксационные свойства были испытаны в ГосНИИ особо чистых биопрепаратов ФМБА (Санкт-Петербург).

Фуллеренолы  $\text{Fe}@C_{60}(\text{OH})_x$  способны служить в качестве безопасных контрастирующих агентов для магниторезонансной томографии, т. к. включают только Fe, C, O, H.

Синтез эндофуллеренов проводили электродуговым методом в инертной атмосфере (ток дуги 130 А, давление гелия 380 мм рт. ст.), испаряя композитные стержни, включающие смесь графита и пиролизата фталоцианина железа, в котором содержание этого элемента составляло 10 % по массе, что соответствовало формуле  $\text{FeC}_x$  ( $x \approx 50$ ). Для удаления остаточного железа, не включенного в эндоэдральные комплексы, фуллереносодержащую сажу подвергали травлению разбавленной соляной кислотой. Первоначально с помощью о-ксилола из сажи экстрагировали пустые фуллерены ( $C_{60}$ ,  $C_{70}$  и высшие фуллерены). Затем из нее выделяли ЭМФ, используя N,N-диметилформамид

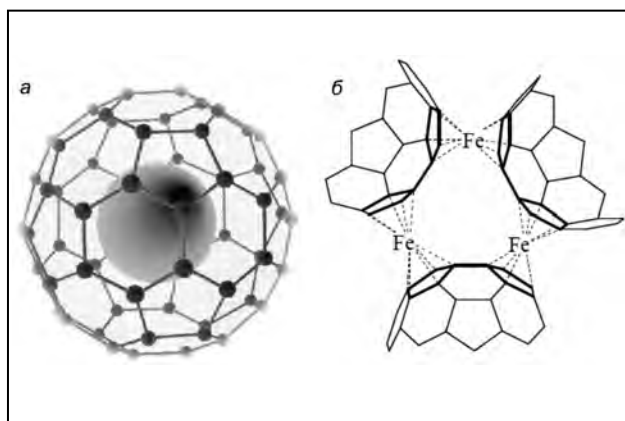


Рис. 1. Синтезирован новый эндометаллофуллерен  $\text{Fe}@C_{60}$ , разработан метод его превращения в водорастворимый фуллеренол  $\text{Fe}@C_{60}(\text{OH})_x$  ( $x \sim 30$ ); ранее были известны только экзокомплексы (б)

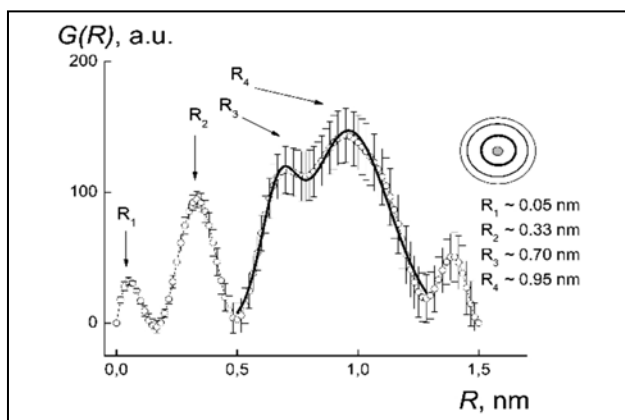


Рис. 2. Корреляционная функция  $G(R) = R^2\gamma(R)$  в зависимости от радиуса  $R$ . Концентрическое расположение атомов (радиусы  $R_1\text{--}R_4$ ) вокруг центрального атома железа

(ДМФА) с добавлением реагента-восстановителя для усиления экстрагирующей способности растворителя. После удаления растворителя и сушки твердый диметилформамидный экстракт по данным рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) содержал 2,4–4,8 % железа по массе в зависимости

от его количества в композитном электроде. Полученный продукт гидроксильнозировали разбавленным водным раствором пероксида водорода при температуре 65 °С. По данным РФА, образец водорастворимого фуллеренола содержал 3 % железа по массе. Число гидроксильных групп в расчете на молекулу фуллеренола, найденное гравиметрическим методом (термический анализ), составило  $x = 30 \pm 2$ . В пересчете на формулу  $\text{Fe}@C_{60}(\text{OH})_{30}$  полученный продукт содержал 70 % железосодержащего компонента и обладал растворимостью 46 мг/мл. Измеренный ИК-спектр водного раствора полученного молекулярного продукта демонстрировал характеристические частоты, отвечающие химическим связям фуллеренола  $\text{Fe}@C_{60}(\text{OH})_{30}$  (рис. 3).

В итоге проведенных исследований найдены условия синтеза новых эндометаллофуллеренов  $\text{Fe}@C_{60}$  за счет использования молекулярного прекурсора, фталоцианина железа, предварительно превращенного в пиролизат  $\text{FeC}_x$  ( $x \approx 50$ ) и испаренного в составе композитного углеродного электрода в электрической дуге. Выделенный из электродуговой сажи металлосодержащий компонент был переведен в водорастворимую форму – фуллеренол  $\text{Fe}@C_{60}(\text{OH})_x$  ( $x \approx 30$ ) путем реакции гидроксильнозирования. Методом ИК-спектроскопии было подтверждено наличие характерных для фуллеренола  $\text{Fe}@C_{60}(\text{OH})_x$  химических связей (C–OH, C=C, O–H).

Сравнительный анализ данных рентгеновской дифракции на порошках фуллеренолов  $C_{60}(\text{OH})_{30}$  и  $\text{Fe}@C_{60}(\text{OH})_{30}$  позволил на молекулярном уровне восстановить спектр пространственных корреляций между атомом железа и окружающими углеродными атомами, занимающими позиции вокруг атома железа на среднем расстоянии  $R_2 \approx 0,33$  нм,

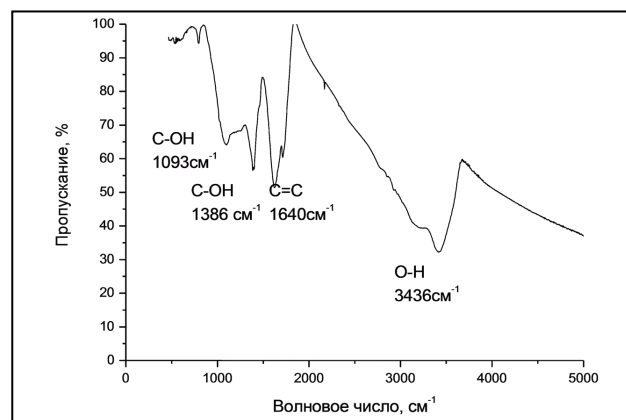


Рис. 3. ИК-спектр фуллеренола  $\text{Fe}@C_{60}(\text{OH})_{30}$  в воде

которое отвечает радиусу сфероида  $C_{60}$  (0,35 нм), что свидетельствует об эндоэдральном строении полученного соединения (рис. 2). Дополнительный пик в спектре корреляций (радиус  $R_3 \approx 0,66$  нм) подтвердил наличие гидроксильных групп, присоединенных к углеродному кейджу, в количестве  $x \approx 30$  в согласии с данными гравиметрического анализа. Кроме того, в спектре корреляций наблюдался интенсивный пик, позиция которого ( $R_4 \approx 0,90$  нм) соответствует диаметру молекулы  $\text{Fe}@C_{60}(\text{OH})_{30}$ , рассчитанному из ее строения и длин валентных связей, что характеризует ближний порядок в упаковке молекул фуллеренола в аморфном образце.

В целом полученные физико-химические и рентгеновские дифракционные данные позволили идентифицировать эндоэдральный тип структуры синтезированного железо-углеродного соединения  $\text{Fe}@C_{60}(\text{OH})_{30}$  и наличие вокруг углеродного кейджа гидроксильной оболочки, обеспечивающей высокую растворимость фуллеренола в воде, что открывает большие перспективы для биомедицинских применений.

## Структура и токсичность водных растворов фуллерена C<sub>60</sub>

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

*Е. А. Кизима, А. А. Томчук, В. И. Петренко, М. В. Авдеев – Объединенный институт ядерных исследований*

*Е. А. Кизима, Л. А. Булавин, В. И. Петренко – Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко*

*Л. Алмашу – Institute for Solid Physics and Optics Wigner Research Centre for Physics*

*М. В. Коробов, Д. С. Волков, И. В. Михеев – Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова*

*И. В. Кошлань, Н. А. Кошлань, П. Блаха – Лаборатория радиационной биологии Объединенного института ядерных исследований*

*П. Блаха – Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Czech Technical University*

В настоящее время важными являются проблемы нанотоксикологии и биобезопасности используемых и перспективных наноматериалов. Современные углеродные наноматериалы (фуллерены, наноалмазы, нанотрубки и пр.) все чаще проходят испытания в разработках комплексов для доставки лекарств, а также как основа противоопухолевых, антибактериальных и других медицинских препаратов. В связи с этим большой интерес проявляется к различным методам получения водных растворов углеродных нанообъектов, в том числе и фуллерена. Сюда следует отнести растворы фуллерена C<sub>60</sub>, включая как растворы модифицированного C<sub>60</sub> (солюбилизация, комплексы с полимерами), так и растворы без использования стабилизаторов (конденсация, метод замены растворителя). Вопрос о токсичности такого рода систем в полной мере не изучен. В какой-то степени это вызвано различиями в методиках приготовления водных растворов C<sub>60</sub>, что приводит к разным структурным параметрам растворов с точки зрения их коллоидной организации. Вместе с тем существует мнение, что наличие кластеров в водных растворах C<sub>60</sub> может быть причиной образования супероксидных анионов, которые приводят к разрушению мембран клеток. Поэтому до сих пор активно ведутся работы по усовершенствованию существующих и разработке новых методов получения водных нетоксичных растворов C<sub>60</sub> с хорошим мембранотропным действием за счет низкой полидисперсности и меньших размеров кластеров, в идеальном случае – растворов отдельных молекул C<sub>60</sub>.

Таким образом, связь структурных параметров и токсичности растворов C<sub>60</sub> определяет необходимость детального структурного описания синтезируемых систем.

Дополнительным фактором, обуславливающим интерес к поиску путей синтеза растворов C<sub>60</sub> в воде, близких к молекулярным, является то, что биологическая активность C<sub>60</sub> возрастает с приближением к молекулярному состоянию.

Следует отметить, что все без исключения существующие на сегодня методы получения водных растворов фуллерена C<sub>60</sub> дают коллоидные дисперсии, где фуллерен полностью находится в кластерном состоянии. Недавно было показано, что использование в качестве первичного растворителя N-метилпирролидона (NMP) при последующем смешивании с водой позволяет уменьшить размер агрегатов в конечной смеси. При этом в смеси наблюдаются и отдельные неагрегированные фуллерены. Из-за хорошей смешиваемости достаточно токсичного NMP с водой его экстрагирование из смеси представляет собой достаточно трудную задачу. Однако факт образования раствора с одиночными фуллеренами и возможность уменьшения размера кластеров являются мотивацией исследования смешанных (NMP/вода) растворов и сравнения их с чисто водными растворами фуллерена. Естественным способом уменьшения токсичности в этом случае оказывается сильное разбавление водой при сохранении значимых с биологической точки зрения концентраций фуллерена в смеси.

**Таблица.** Выживаемость клеток китайского хомячка линии V-79 в присутствии водных растворов  $C_{60}$ 

Концентрация $C_{60}$ в системе	Выживаемость				
	4-й день	7-й день	9-й день	11-й день	13-й день
ВДФ-60					
0,05 мкг/мл	95 %	9	9	9	8
0,5 мкг/мл	85 %	9	9	–	9
5 мкг/мл	90 %	9	9	8	–
$C_{60}/H_2O$ (NMP)					
0,05 мкг/мл	90 %	9	9	9	–
Контроль/ $H_2O$					
0	92 %	9	–	9	–

В настоящей работе исследуются водный раствор  $C_{60}$ , ВДФ-60, приготовленный методом замены растворителя, и раствор  $C_{60}/H_2O$  (NMP) с малым содержанием NMP. Структура ВДФ-60 на наноразмере (до 100 нм) анализируется с помощью малоуглового рассеяния нейтронов и сравнивается с литературными данными по аналогичным системам, а также смешанным растворам  $C_{60}/H_2O$  (NMP). Для оценки дальнейшей перспективы применения в биологии этих растворов проведены исследования их токсичности на клетках V-79 китайского хомячка, в том числе изучено влияние содержания NMP в смешанных растворах на их токсичность.

Структурные исследования растворов фуллеренов, приготовленных разными методами, показали различие размеров кластеров фуллерена в 2 раза.

Радиус инерции для раствора ВДФ-60 составил  $18,8 \pm 0,2$  нм по сравнению с  $8 \pm 1$  нм для раствора  $C_{60}/H_2O$  (NMP). Независимо от метода приготовления и размеров кластеров в растворах  $C_{60}$  в воде обе исследованные системы –  $C_{60}/H_2O$  (NMP) и ВДФ-60 – показали отсутствие токсичности в экспериментах *in vitro* на клетках линии V-79 китайского хомячка для всего исследованного диапазона концентраций  $C_{60}$  0,05–5 мкг/мл. Факт, что N-метилпирролидон не проявляет высокую токсичность при указанных концентрациях фуллерена в растворе, позволяет рассматривать его в качестве базового растворителя при дальнейших попытках получения биосовместимых водных

мономерных растворов  $C_{60}$  при условии дополнительной очистки систем.

Исследование токсичности растворов ВДФ-60 и  $C_{60}/H_2O$  (NMP) проводили в диапазоне концентраций 0,05–5 мкг/мл и 0,05 мкг/мл в соответствии с диапазоном концентраций водных растворов  $C_{60}$ . Предварительно была изучена токсичность первичного растворителя NMP при его высоких концентрациях в смеси и было определено его максимально возможное нетоксичное количество в растворе на уровне 0,1 об. %. Это в свою очередь определило выбор максимальной концентрации фуллерена в экспериментах по токсичности системы  $C_{60}/H_2O$  (NMP), которая составила 0,05 мкг/мл, с долей NMP в среде с клетками, равной 0,005 %. Рост клеток был проведен в течение 13 дней. Независимо от метода приготовления и концентрации фуллерена  $C_{60}$  была получена высокая выживаемость клеток, более 85 %, во всех образцах.

Как видно из таблицы, выживаемость клеток китайского хомячка для всех случаев сопоставима с контрольным образцом. Несмотря на то, что для аналогичных концентраций фуллерена в водных растворах были выявлены токсичные свойства, изученные нами водные растворы ВДФ-60, полученные методом замены растворителя, показали отсутствие токсичности в экспериментах *in vitro* даже для больших концентраций фуллерена (вплоть до 5 мкг/мл). Это может быть связано с достаточно длительной (23 дня) процедурой испарения органического компонента (толуол) из раствора.





## Физика ядерных реакторов и ускорителей

- 106 Нейтронные потоки в низкотемпературном канале реактора ВВР-М
- 108 Расчет эффектов реактивности реактора ПИК по кодам MCSU и MCNP для анализа аварийных ситуаций
- 110 Моделирование выгорания активной зоны реактора ПИК при энергетическом пуске
- 112 Концепция эксплуатационного комплекта ТВС реактора ПИК
- 114 Перспективы создания дополнительной системы безопасности реактора ПИК на базе промышленного фурье-спектрометра в ближней инфракрасной области
- 116 Удельные топливные затраты для реактора ПИК в зависимости от толщины лопасти твэла
- 118 Модернизация высоковольтного генератора сброса ускоренных до 1 000 МэВ протонов на нейтронообразующую мишень на синхроциклотроне НИЦ КИ ПИЯФ

## Нейтронные потоки в низкотемпературном канале реактора ВВР-М

*Г. Ф. Михеев, Е. М. Иванов, А. С. Покровский, Г. А. Рябов*

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

Работа выполнена в рамках задач, направленных на возобновление функционирования низкотемпературного канала на реакторе ВВР-М. В 1993 г. в вертикальном канале В-13 реактора ВВР-М был установлен низкотемпературный канал для изучения свойств высокотемпературных сверхпроводящих материалов в процессе облучения при криогенных температурах. В 1997 г. канал был заменен на новый с большим диаметром центральной трубы для загрузки образцов. В настоящее время канал не эксплуатируется при низких температурах по причине физического износа и демонтажа системы охлаждения. В перечень задач, направленных на возобновление работы канала при криогенных температурах, входит изучение нейтронных характеристик канала. С этой целью выполнены расчеты нейтронно-физических характеристик канала и проведены измерения нейтронных потоков по высоте канала.

Для уточнения нейтронно-физических характеристик по высоте низкотемпературного канала было проведено мониторингирование нейтронных потоков. Мониторы были размещены в 16 точках по высоте канала, как это показано на рисунке. Для экспериментального определения потоков быстрых и тепловых нейтронов по высоте канала была использована сборка следующих мониторов: In, Ni, Au и Au в Cd, закрепленных на гибкой ленте с грузом внизу. Упаковка и размещение мониторов проводились по методике, позволяющей разместить их возможно ближе к центральной оси канала, минимизировать размеры мониторов, а также исключить взаимное влияние мониторов.

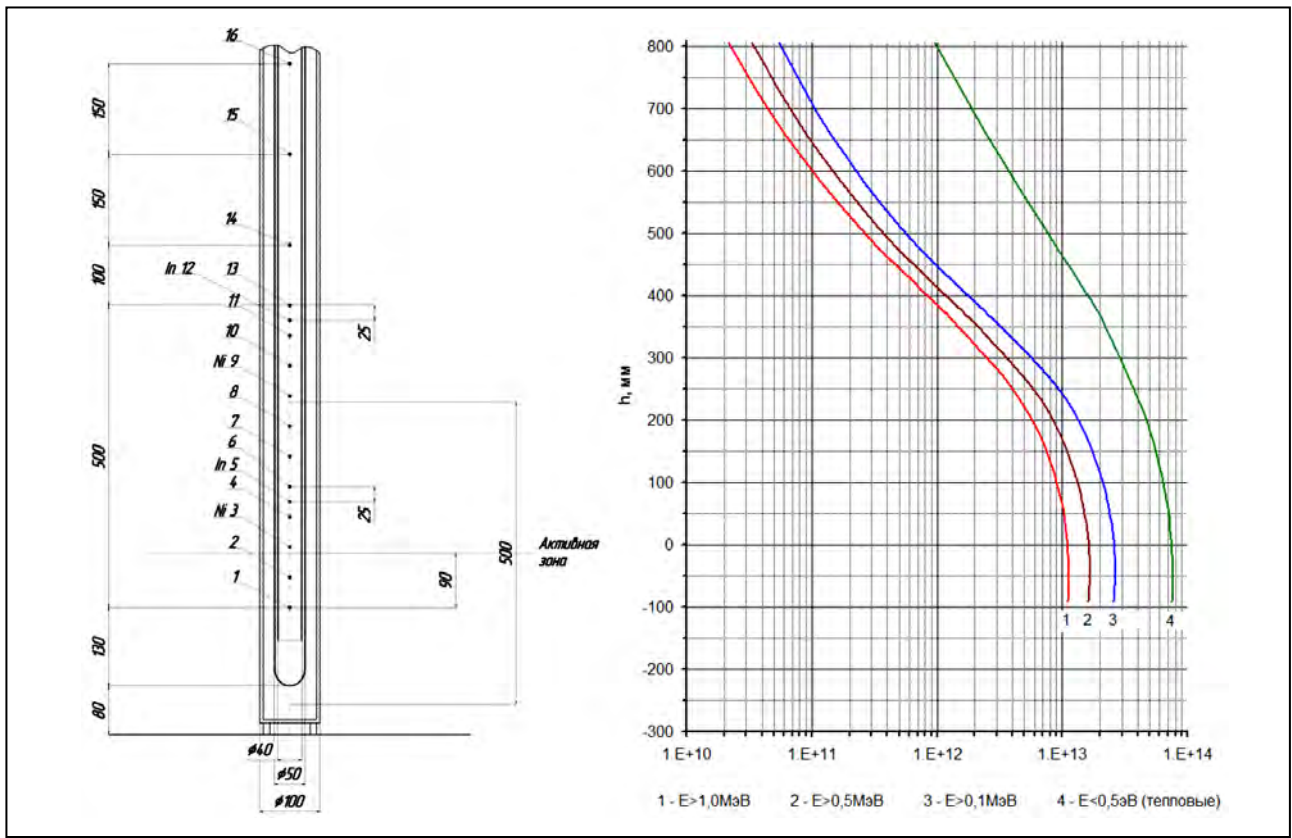
Для измерения  $\gamma$ -спектров образцов используется спектрометр фирмы CANBERRA с детектором GC2020 и многоканальным анализатором DSA-1000. Обработка спектров и получение ре-

зультатов проводились по программам Центра данных НИЦ КИ ПИАФ. Полная погрешность определения потока нейтронов не превышает 15 %. Она включает погрешность определения данных мониторов (вес, размеры и т. д.), экспериментальную погрешность измерения, погрешности калибровок спектрометра и погрешности ядерно-спектроскопических констант.

Для расчетной оценки нейтронных потоков в низкотемпературном канале использовалась компьютерная модель реактора ВВР-М, составленная с помощью аттестованного программного средства MCNP. Погрешность расчетной оценки значений нейтронных потоков по паспорту MCNP составляет 15 %. Было проведено сравнение экспериментальных и расчетных значений потоков нейтронов в энергетических интервалах до 0,5 эВ, свыше 1,2 МэВ и свыше 2,3 МэВ. Все значения совпали в пределах погрешностей.

Дополнительно было рассчитано распределение потоков нейтронов по высоте низкотемпературного канала в энергетических интервалах ниже 0,5 эВ, свыше 0,1 МэВ, свыше 0,5 МэВ и свыше 1,0 МэВ. Полученные значения нейтронных потоков внутри низкотемпературного канала, нормированные на 17 МВт мощности реактора, показаны на рисунке. Полученные данные позволяют определять набранный флюенс нейтронов для разных диапазонов энергий в зависимости от положения образца в канале.

Поток быстрых нейтронов в низкотемпературном канале реактора ВВР-М на мощности 17 МВт составляет  $1,1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  ( $E > 1,0 \text{ МэВ}$ ). Такой поток за реакторную кампанию длительностью 14 дней позволяет получить на облучаемом образце флюенс быстрых нейтронов  $1,33 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ . В настоящее время канал не имеет криогенного охлаждения.



Размещение мониторов и распределение плотности потока нейтронов ( $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) по высоте низкотемпературного канала на мощности реактора 17 МВт

При сравнении с действующими низкотемпературными каналами (например, на японских реакторах JMTR и KUR) канал на реакторе ВВР-М по своим нейтронным характеристикам выглядит более эффективным. Оснащение канала со-

временной криогенной системой охлаждения позволит создать уникальный инструмент мирового уровня для исследований в области радиационной физики твердого тела и низкотемпературного радиационного материаловедения.

## Расчет эффектов реактивности реактора ПИК по кодам MCU и MCNP для анализа аварийных ситуаций

*А. С. Полтавский, С. Л. Смольский, А. Н. Ерыкалов, А. С. Захаров, К. А. Коноплев, А. В. Коротынский, М. С. Онегин, А. П. Малков, М. В. Воронов, В. Н. Тищенко – Управление ядерной и радиационной безопасности, Отделение теоретической физики и отдел физики и техники реакторов НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ» совместно с Курчатовским ядерно-технологическим комплексом НИЦ «Курчатовский институт»*

*А. А. Балыгин, Е. В. Бурлаков, Л. В. Бидуля, И. Н. Гераскин, Г. Б. Давыдова, А. М. Дегтярев, Л. Н. Захарова, А. А. Иванов, А. В. Краушкин, А. А. Мясников, О. Н. Салтыкова, Ю. М. Семченков, Т. Е. Трофимова – Курчатовский ядерно-технологический комплекс НИЦ «Курчатовский институт»*

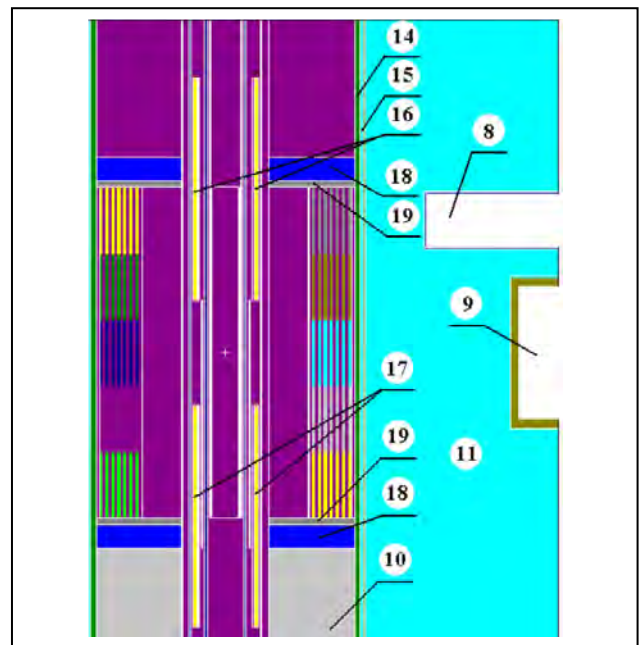
Настоящая работа проведена в рамках НИОКР НИЦ «Курчатовский институт» по теме «Обоснование безопасности эксплуатации реактора ПИК».

Целью настоящей работы являлась разработка расчетных моделей реактора ПИК с помощью программных средств MCU и MCNP, верификация этих моделей и определение с их помощью ряда нейтронно-физических характеристик реактора, необходимых для анализа аварийных режимов и безопасности реактора.

Верификация расчетных моделей проводилась по данным, полученным при физическом пуске реактора ПИК и путем сравнительных расчетов с разработанной в НИЦ КИ ПИАФ компьютерной модели по программе MCNP, аттестованной для этого реактора (рис. 1, 2).

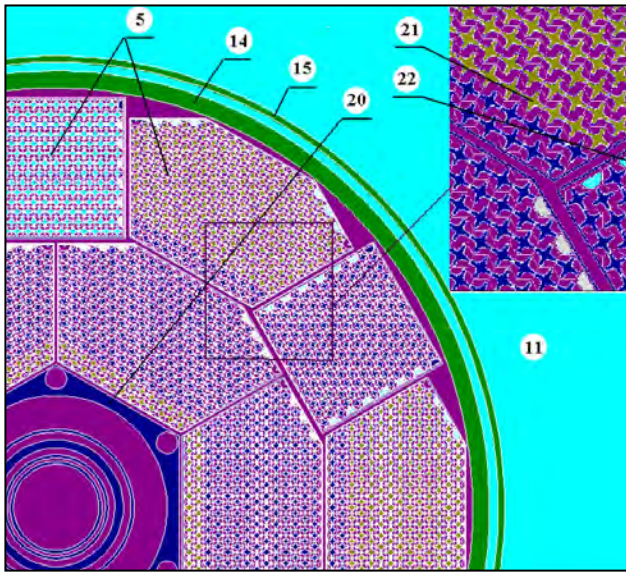
Рассматривался набор характеристик, которые в наибольшей мере определяют физическую специфику реактора и нуждаются в обосновании корректности своего расчета. К ним относятся: эффективность органов системы управления и защиты (СУЗ), эффекты реактивности при разогреве воды и ее потери по отдельным контурам реактора, поле энерговыделения. Также, с учетом необходимости рассмотрения состояний реактора с выгоревшим топливом, была проведена перекрестная проверка программ MCU и MCNP-ORI (разработка НИЦ «Курчатовский институт») по моделированию кампании однородной решетки твэлов.

Согласно полученным результатам расчетная погрешность программы MCU по критичности



**Рис. 1.** Продольный разрез активной зоны MCNP-модели реактора ПИК: 8 – ГЭК-1; 9 – ГЭК-2; 10 – опорная решетка; 11 – тяжелая вода ( $D_2O$ ); 14 – корпус; 15 – кожух корпуса; 16 – верхняя штора (РО СУЗ); 17 – нижняя штора (РО СУЗ); 18 – хвостовики твэлов; 19 – концевики твэлов

для состояний при физическом пуске не выходит за границы заявленной погрешности программы ~ 0,5 %. Отклонение от программы MCNP для широкого диапазона состояний со свежим топливом, представляющих практический интерес, не превышает 0,2 %, с выгоревшим топливом (в конце кампании) увеличивается до ~ 1 %.



**Рис. 2.** Поперечный разрез MCNP-модели реактора ПИК (с увеличенным фрагментом): 5 – ТВС; 11 – тяжелая вода ( $D_2O$ ); 14 – корпус; 15 – кожух корпуса; 20 – направляющая; 21 – твэлы; 22 – полцилиндрические вытеснители

По расчету эффективности рабочих органов СУЗ (РО СУЗ), температурных и пустотных эффектов реактивности расхождения между программами MCU и MCNP лежат в коридоре статистической погрешности расчетов. Основные эффекты реактивности, связанные с изменением состояния активной зоны (пустотный и температурный), имеют в реакторе ПИК надежное отрицательное значение.

Для корректного использования результатов экспериментов при сравнении с результатами расчетов по программам MCU и MCNP (которые

решают стационарную задачу) целесообразен предварительный анализ экспериментов с помощью их прямого расчетного моделирования и оценки роли пространственных эффектов, что возможно только с помощью модели пространственной нейтронной кинетики. Такая трехмерная расчетная модель, описывающая реактор ПИК в диффузионном приближении в пяти энергетических группах, была подготовлена в рамках настоящей работы на основе программы STEPAN, используемой и аттестованной для анализа аварий в РБМК. Проведено первоначальное тестирование модели и методики проведения расчетов.

Данная модель может быть использована для анализа реактивных аварий, а также для анализа результатов экспериментов по определению эффектов реактивности.

Дальнейшими задачами по развитию данной модели являются:

- разработка библиотеки нейтронных сечений с их зависимостями от основных параметров, определяющих обратные связи;
- включение в модель запаздывающих нейтронов от  $(\gamma, n)$ -реакции на дейтерии и оценка вклада этой реакции на бериллии;
- разработка теплогидравлической модели для описания обратных связей.

Разработанные расчетные модели реактора ПИК и полученные результаты расчета эффектов реактивности будут использованы при решении первоочередных задач по обоснованию безопасности и в дальнейших работах по подготовке реактора к энергетическому пуску.

## Моделирование выгорания активной зоны реактора ПИК при энергетическом пуске

А. С. Захаров, К. А. Коноплев, М. С. Онегин, А. С. Полтавский  
 Отдел физики и техники реакторов, Управление ядерной и радиационной безопасности,  
 Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

Целью работы являлось тестирование предназначенных для расчета выгорания топлива кодов MONTEBURNS и ORIGEN совместно с программой MCNP на примере моделирования энергетического пуска реактора ПИК. Верификация применяемых кодов обеспечивалась сравнением полученных результатов с результатами аналогичного расчета выгорания по программе MCU REA, имеющей встроенный блок расчета выгорания.

Энергетический пуск реактора ПИК предполагается осуществлять с использованием пускового комплекта тепловыделяющих сборок (ТВС). Данный комплект уже использовался при физическом пуске реактора в 2011 г. В активной зоне для энергопуска используется 15 ТВС. Вместо 3 четырехгранных ТВС устанавливаются 3 алюминиевых имитатора ТВС (вытеснителя) с целью снижения запаса реактивности и гарантированного соблюдения установленных норм на подкритичность остановленного реактора (рис. 1).

Одной из задач энергетического пуска является достройка активной зоны до полного числа 18 ТВС. Концепция энергетического пуска основана на ограничении мощности и минимизации перегрузочных работ на первом этапе эксплуатации активной зоны с неполным числом ТВС. Испытание оборудования на одной подробно исследованной топливной загрузке обеспечивает более достоверные данные измерений и в том числе упрощает верификацию применяемых программных средств. Планируется выполнить достройку активной зоны до 18 ТВС после наработки необходимого количества продуктов деления в течение одной кампании без промежуточных перегрузок активной зоны. Предварительно расчетные модели MCU и MCNP со свежими ТВС верифицированы по экспериментам на критстенде и реакторе при проведении физического пуска. Модель с выделенными зонами для расчета выгорания представлена на рис. 2.

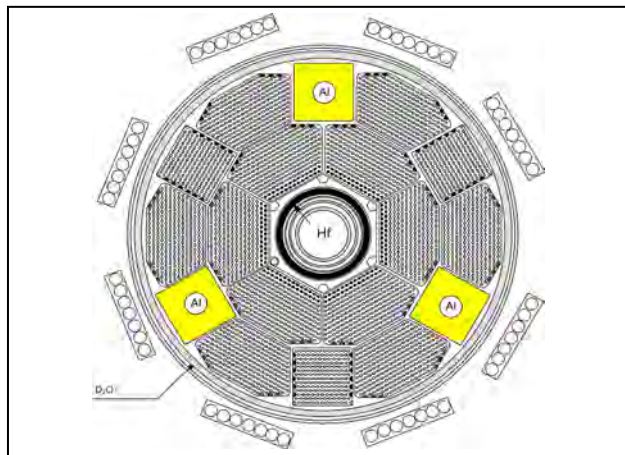


Рис. 1. Пусковая активная зона для энергетического пуска

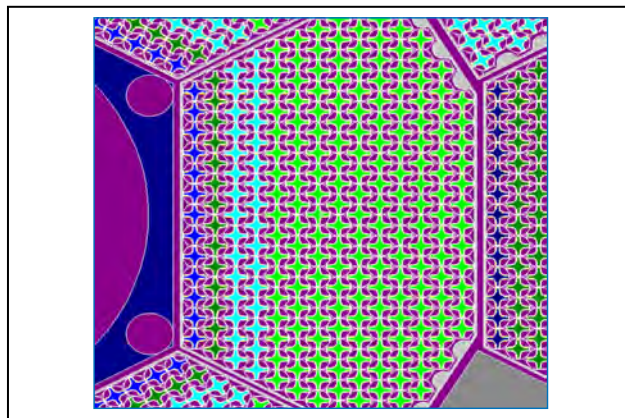
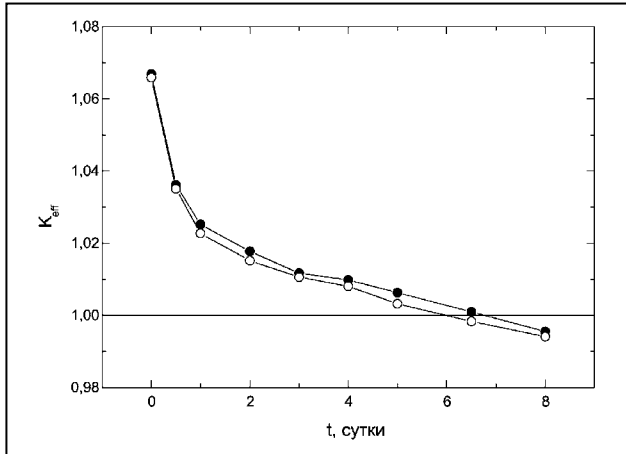
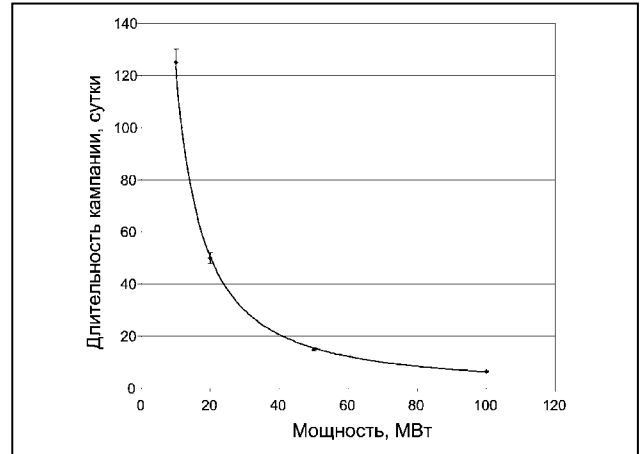


Рис. 2. Компьютерная модель шестигранной ТВС (сечение в горизонтальной плоскости по центру активной зоны)

По итогам выполненных вычислений расчетный комплекс MONTEBURNS + ORIGEN + MCNP может быть рекомендован для сопровождения расчетов выгорания активной зоны реактора ПИК. Отклонение реактивности при расчете кампании по этому комплексу от результатов расчета по программе MCU REA не превышает 0,22 %. Темп потери реактивности при энерговыработке отличается на 5 % (рис. 3).



**Рис. 3.** Сравнение изменения коэффициента размножения при выгорании активной зоны реактора ПИК с 15 ТВС. Темные маркеры – расчет по программе MONTEBURNS, светлые маркеры – по программе MCU REA



**Рис. 4.** Зависимость длительности первой кампании от мощности реактора

Выполнено расчетное моделирование энергетического пуска реактора с неполным числом 15 ТВС в активной зоне и произведен расчет эффекта реактивности при догрузке ТВС в активную зону с выгоревшим топливом. Оценено изменение эффективности поглощающих шторок и коэффициента неравномерности распределения мощности.

Расчеты выгорания выполнялись для мощности 10, 20 и 100 МВт. Определены эффекты отравления ксеноном и самарием. Оценена зависимость длительности первой кампании от уровня мощности (рис. 4) и проверена возможность описания переходных процессов между перегрузками топлива простыми аналитическими зависимостями.

На основании выполненной работы предложен оптимальный вариант проведения энергетического пуска с использованием одного комплекта ТВС. Энергетический пуск включает этап испытаний реакторного оборудования с активной зоной из 15 ТВС короткими циклами длительностью не менее 2 суток с перерывами для распада <sup>135</sup>Xe. На этой стадии мощность ограничивается величиной до 50 МВт. Далее необходимо снижение мощности до среднего значения ≈ 10 МВт для наработки продуктов деления и снижения запаса реактивности с целью последующей догрузки активной зоны до полного числа 18 ТВС. В этот период снижение мощности можно использовать для начала

испытаний экспериментальных установок с открытием шиберов на нейтронных пучках и проверки биологической защиты. Выход на полную мощность 100 МВт и демонстрация работы реактора в течение одной кампании с использованием пускового комплекта ТВС выполняются после полной догрузки активной зоны до 18 ТВС.

Найденные решения для проведения энергетического пуска могут быть применены и в случае использования других ТВС. Завершающий этап энергетического пуска должен продемонстрировать работу с модернизированными ТВС (эксплуатационный комплект).

Предварительные расчеты показали, что необходимым условием безопасной догрузки ТВС до полного числа является определенная энерговыработка на пониженной мощности, величина которой зависит от выбранного режима эксплуатации реактора во время энергетического пуска. Планируемая энерговыработка ~ 2 100 МВт · сут по программе энергетического пуска может быть обеспечена одним комплектом ТВС, если учесть необходимое снижение мощности на первом этапе эксплуатации с неполным числом ТВС. Полное время энергетического пуска, включая демонстрацию работы реактора на номинальной мощности с полностью загруженной активной зоной, может занять около 100 календарных суток.

1. Захаров А. С., Коноплев К. А., Онегин М. С., Полтавский А. С. Препринт ПИЯФ 2954. Гатчина, 2014. 32 с.  
 2. Новальчук М. В., Аксенов В. Л. // Сб. докл. III Межд. научн.-техн. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». М.: ОАО «НИКИЭТ», 2014. Т. 1. С. 103–113.

## Концепция эксплуатационного комплекта ТВС реактора ПИК

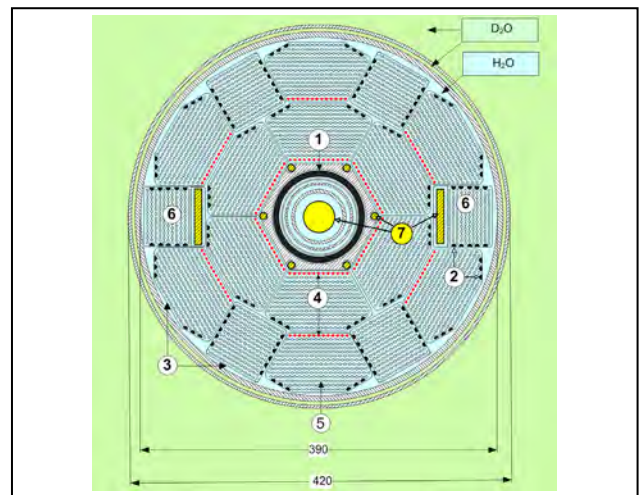
*А. С. Захаров, А. Н. Ерыкалов, К. А. Коноплев, М. С. Онегин, А. С. Полтавский, С. Л. Смольский, С. Р. Фридман, И. М. Косолапов, В. Л. Аксенов – Отдел физики и техники реакторов, Отделение теоретической физики и Управление ядерной и радиационной безопасностью НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»  
М. В. Ковальчук – НИЦ «Курчатовский институт»*

В проекте реактора ПИК использованы твэлы реактора СМ с увеличенной до 500 мм длиной активной части. Первые партии твэлов и тепловыделяющая сборка (ТВС) ПИК для пуска реактора и для критстенда «Физическая модель реактора ПИК» (ФМ ПИК) были достаточно подробно исследованы. Пусковой комплект был использован при физическом пуске реактора в 2011 г.

Для обеспечения эффективной и безопасной работы реактора на проектной мощности 100 МВт необходимо освоить производство модернизированных ТВС ПИК-2, которые должны соответствовать требованиям текущей эксплуатации реактора ПИК в части увеличенной длительности кампании реактора и размещения образцов-свидетелей корпуса активной зоны.

В базовом варианте ТВС для этих целей предусматривалось изготовление чехлов ТВС ПИК-2 из циркониевого сплава и включения стержней выгорающего поглотителя (СВП) в состав ТВС вместо стальных вытеснителей. Не исключена также возможность замены отдельных твэлов. Для размещения образцов-свидетелей в квадратной ТВС удаляются 3 ряда твэлов (рис. 1).

Согласно расчетам различных вариантов СВП и экспериментальным исследованиям выгорания СВП на реакторе ВВР-М длительность кампании реактора может быть увеличена от ~ 15 до 25–30 суток (рис. 2, 3). В качестве поглощающего материала СВП выбрана композиция на основе  $Gd_2O_3 + ZrO_2$ . Опытные сборки с чехлами из циркониевого сплава и СВП были изготовлены в заводских условиях для отработки технологии изготовления и испытаны на критическом стенде ФМ ПИК. Дополнительные исследования и расчеты выявили необходимость дополнительного повы-

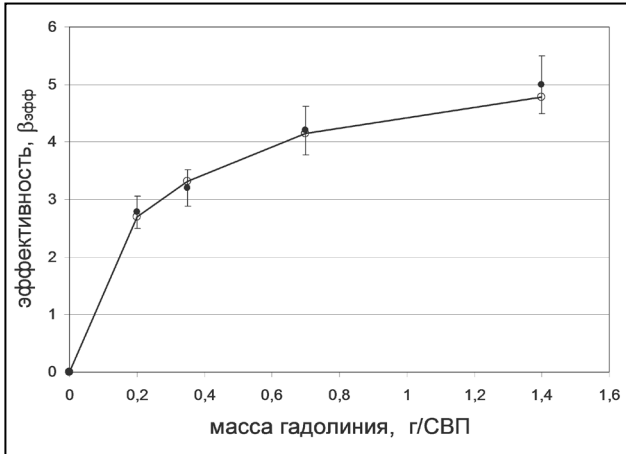


**Рис. 1.** Активная зона реактора ПИК: 1 – поглощающие шторы из гафния; 2 – стержни выгорающего поглотителя  $Gd_2O_3 + ZrO_2$ ; 3 – циркониевые чехлы ТВС; 4 – твэлы с уменьшенным содержанием топлива (0,48 номинального); 5 – твэлы с номинальным содержанием топлива; 6 – ТВС с образцами-свидетелями материала корпуса; 7 – облучаемые образцы

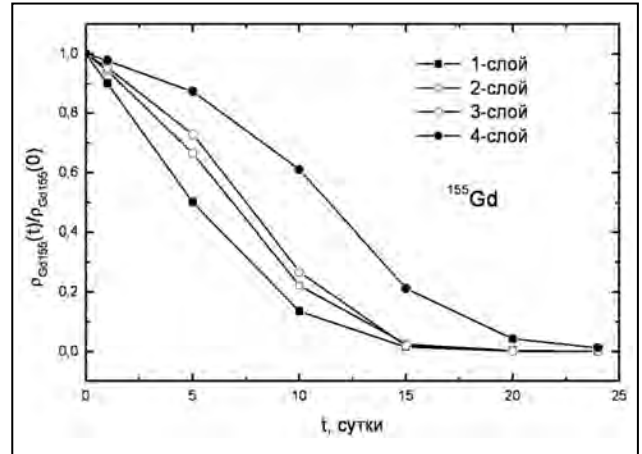
шения топливной загрузки, поскольку потребление ТВС для наиболее предпочтительного режима перегрузок по  $\frac{1}{2}$  части активной зоны остается довольно высоким.

Для сокращения затрат на НИОКР в ТВС ПИК-2 необходимо использовать твэл на основе серийно выпускаемого твэла типа СМ с повышенным на 20 % содержанием топлива, что обеспечивает заметную экономию топлива. Расчеты реактора ПИК показали возможность увеличения энерговыработки и сокращения числа потребляемых ТВС на  $\approx 30\%$  (потребление урана сокращается на 9 %). Эти возможности используются для увеличения длительности кампании до 25–30 суток с учетом выполнения программы облучений. В более экономичных режимах перегрузок с дли-

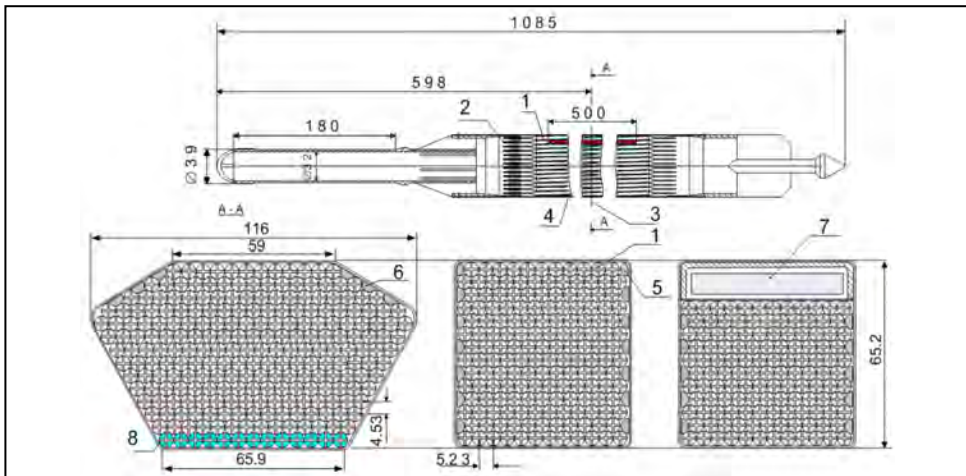




**Рис. 2.** Эффективность 144 СВП в зависимости от массы гадолиния (все рабочие органы системы управления и защиты извлечены). Темные маркеры – эксперимент, светлые маркеры – расчет (MCNP)



**Рис. 3.** Изменение концентрации <sup>155</sup>Gd в СВП в процессе кампании по слоям поглотителя для загрузки гадолиния 0,7 г в одном СВП



**Рис. 4.** Эксплуатационный комплект ТВС ПИК-2 (концепция): 1 – твэлы; 2 – дистанционирующие обоймы; 3 – центр по высоте топлива; 4 – чехол ТВС (Э-125 или Э-110); 5 – вытеснитель угловой; 6 – СВП; 7 – ампула с образцами-свидетелями; 8 – твэлы с топливной загрузкой 0,48 номинала

тельностью кампании около 20 суток можно снизить потребление урана на 20 %.

Основные параметры, определяющие безопасность эксплуатации реактора, сохраняются. В результате повышения топливной загрузки объемный коэффициент энерговыделения  $K_V$  практически не изменяется, преимущественно увеличивается энерговыделение в твэлах с пониженной загрузкой урана. Характерное значение  $K_V \sim 3,0$  обеспечивается также перестановками шестигранных ТВС при их выгорании благодаря одинаковой конструкции (рис. 1).

Для реализации новых эксплуатационных возможностей ТВС ПИК-2 (рис. 4) должны включать

следующие конструкционные изменения пускового комплекта:

- установку стержней выгорающего поглотителя;
- замену чехлов ТВС из нержавеющей стали на циркониевые;
- использование оптимального топливного профилирования;
- увеличение содержания <sup>235</sup>U в твэле с 7,14 до 8,57 г.

В состав эксплуатационного комплекта ТВС должна быть включена модификация ТВС с полостью для облучения конструкционных материалов. На критстенде исследованы варианты полостей улучшенной конструкции.

## Перспективы создания дополнительной системы безопасности реактора ПИК на базе промышленного фурье-спектрометра в ближней инфракрасной области

*Т. В. Воронина, И. В. Запитецкая  
Управление ядерной и радиационной безопасности  
НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»*

Актуальной задачей при эксплуатации любого реактора является обнаружение на ранней стадии нарушения герметичности корпуса реактора. Базовым подходом к обеспечению безопасной эксплуатации оборудования реактора в настоящее время является концепция «исключение разрушения». Такой подход требует надежного фиксирования течи для регистрации сквозных дефектов. Для исследовательского тяжеловодного реактора ПИК на базе существующих штатных датчиков (по давлению и по уровню) организовать оперативный контроль образования дефектов корпуса реактора не удастся, т. к. время их обнаружения составляет не менее часа.

Однако для реактора ПИК можно предложить более чувствительный метод контроля целостности корпуса реактора. Не имеющий аналогов на действующих реакторных установках контур жидкостного регулирования (ЖР) реактора ПИК представляет собой кольцевую полость вокруг корпуса реактора, в щелевых зазорах которой циркулирует концентрированная тяжелая вода. Данная конструктивная особенность позволяет организовать контроль целостности корпуса реактора ПИК по снижению содержания дейтерия в концентрированной тяжелой воде охлаждающего контура ЖР при появлении малой протечки легкой воды первого контура. Для этого необходимо создать систему дистанционного прецизионного мониторинга содержания протия в тяжелой воде контура ЖР на базе проточного автоматического анализатора. На сегодняшний день система непрерывного измерения содержания дейтерия в тяжелой воде контура ЖР включена в проект реактора ПИК. Датчик (13) включается байпасом между напорной и всасывающей линиями насосов ЖР, как показано на рисунке.

Ранее было показано, что решить эту задачу можно методом инфракрасной (ИК) спектроскопии на основе спектрометра, работающего в средней ИК-области  $4\ 000\text{--}400\ \text{см}^{-1}$ . Несмотря на явные преимущества такого подхода, для анализа используются самые информативные и чувствительные валентные и деформационные колебания воды; методика анализа на лабораторном ИК-спектрометре (Tensor 37) уже отработана, он имеет существенные недостатки. 1. Из-за большого поглощения для измерений требуются «тонкие» кюветы ( $< 1\ \text{мм}$ ), работать с которыми в условиях контура ЖР (давление 13–16 атм) сложно. Кроме того, для изготовления оптических окон потребуется сапфир, что сделает кюветы дорогостоящими. 2. Кюветное отделение спектрометра неотделимо от прибора, поэтому прибор придется ставить прямо в линию контура. 3. Оптоволокно в среднем ИК-диапазоне только разрабатывается. Так как оно заметно ослабляет сигнал, то использовать можно не более 2 м такого оптоволокна. 4. Спектрометры в средней ИК-области – это, как правило, однолучевые приборы, которые требуют регистрации фона перед каждым измерением.

В отличие от среднего ИК-диапазона, ближний ИК-диапазон (БИК) (от  $12\ 500$  до  $4\ 000\ \text{см}^{-1}$ ) состоит из обертонов и составных колебаний воды, коэффициенты поглощения которых в 20–50 раз слабее коэффициентов поглощения основных колебаний в среднем ИК-диапазоне. Это позволяет увеличить толщину проточной кюветы. Для кювет можно использовать дешевые оптические окна из кварца, прозрачные в этой области ИК-спектра. Для БИК разработано и используется специальное кварцевое оптоволокно, которое снижает сигнал незначительно. Сам прибор надежнее, приспособлен для длительной работы и для работы в сложных

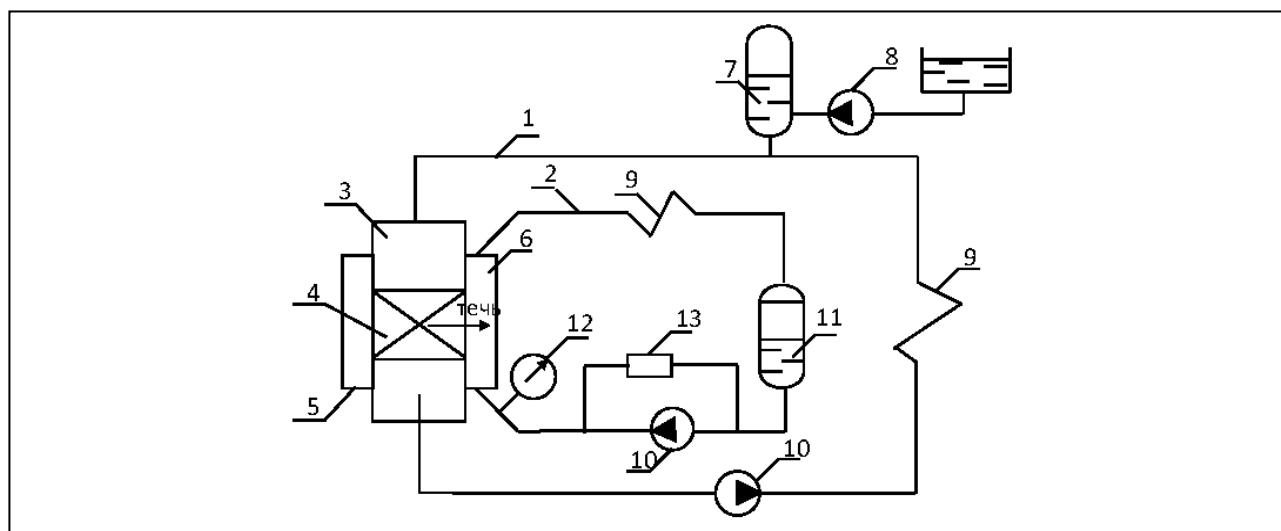


Схема контуров реактора ПИК (первого контура и контура ЖР) с технологическим оборудованием, участвующим в идентификации течи корпуса реактора: 1 – первый контур реактора; 2 – контур ЖР; 3 – корпус реактора; 4 – активная зона; 5 – кожух; 6 – кольцевой зазор; 7 – КО первого контура; 8 – подпиточные насосы; 9 – теплообменники; 10 – насосы контуров; 11 – дегазатор ЖР; 12 – прибор контроля давления в контуре ЖР; 13 – датчик прибора «Анализ-3» (пом. 022А, здание 100А)

промышленных условиях, т. к. оснащен кварцевой оптикой. Такой прибор (MATRIX-F) уже разработан и используется в промышленности для on-line-контроля. Он имеет выносное кюветное отделение и возможность одновременного контроля 6 точек анализа.

В работе показана возможность применения БИК фурье-спектроскопии для точного и воспроизводимого анализа концентрации тяжелой воды. Исследования были проведены на лабораторном спектрометре МРА. Для эксперимента была собрана герметичная проточная схема, чтобы избежать разбавления тяжелой воды, также подобраны параметры и условия измерения спектров тяжелой воды. В результате были построены градуировочные модели в двух диапазонах: для концентрированной тяжелой воды (99,0–99,9 ат. %) и в широком диапазоне концентраций. Погрешность градуировки для концентрированной тяжелой воды составила 0,002 ат. %, что совпадает с погрешностью градуировки на лабораторном фурье-спектрометре среднего ИК-диапазона Tensor 37 и лучше, чем погрешность градуировки

старого проточного датчика «Анализ-3» (0,01 ат. %). Для широкого диапазона концентраций тяжелой воды была получена градуировка, погрешность которой составила 0,01 ат. %, что на порядок лучше, чем погрешность калибровки Tensor 37 (0,4 ат. %) и чем погрешность калибровки «Анализ-3» (0,4 ат. %). Качество работы градуировочных моделей было протестировано на независимых образцах тяжелой воды. По полученным результатам рекомендована комплектация системы для on-line-измерения изотопного состава тяжелой воды в контуре ЖР.

Результаты работы были представлены в отчете НИР «Исследование перспективы создания дополнительной системы безопасности реактора ПИК на базе фурье-спектрометра в ближней инфракрасной области», инв. № 14 РК-091.00 и доложены на VII Межотраслевой научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития химического и радиохимического контроля в атомной энергетике» (Атомэнергоаналитика-2014), проходившей 16–18 сентября 2014 г. в г. Сосновый Бор.

## Удельные топливные затраты для реактора ПИК в зависимости от толщины лопасти твэла

А. Н. Ерыкалов, Э. Г. Сахновский

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

В настоящей работе продолжена тема, заявленная в отчете НИЦ КИ ПИАФ ЭР-296 «К оптимизации твэлов реактора ПИК» (Гатчина, 2013), где были рассмотрены возможные конструкции твэлов реактора ПИК, снижающие удельные топливные затраты реактора. Там было отмечено, что существующая активная зона реактора ПИК сильно недозамедлена. Поэтому добавление в активную зону доли воды приводит к уменьшению утечки нейтронов и увеличению эффективного коэффициента размножения, что можно использовать для достижения более глубокого выгорания и, как следствие, снижения удельных топливных затрат реактора. В настоящей работе предлагается уменьшить толщину лопасти твэла с целью уменьшения его объема и увеличения доли воды в активной зоне реактора ПИК.

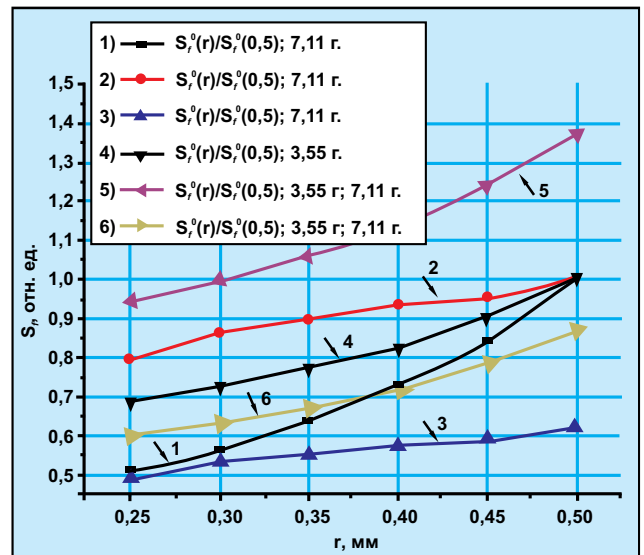
Топливная составляющая удельных затрат реактора

$$S_i \sim \frac{agP}{yn\Phi},$$

где  $a = 1,5 \cdot 10^{-5}$  г/МВт · с для  $^{235}\text{U}$ , делящегося на тепловых нейтронах;  $g$  – стоимость грамма горючего в твэлах с учетом их изготовления и конструкционных материалов;  $P$  – средняя по времени работы реактора мощность;  $y$  – глубина выгорания горючего в выгружаемых тепловыделяющих элементах (твэлах);  $n$  – число каналов;  $\Phi$  – используемый средний по времени и по каналам невозмущенный поток нейтронов.

Кривая 1 описывает относительные удельные топливные затраты при штатной загрузке 7,11 г  $^{235}\text{U}$ /твэл в бронзовой матрице. Из хода кривой 1 видно, что при уменьшении толщины лопасти твэла в 2 раза удельные топливные затраты реактора снижаются вдвое.

Как уже отмечалось, с целью увеличения коэффициента размножения реактора СМ были



опробованы твэлы с заменой бронзовой матрицы в сердечнике на силумин. Кривая 2 относится к случаю загрузки штатным количеством  $U$  7,11 г  $^{235}\text{U}$ /твэл с силуминовым сердечником. Здесь уменьшение размера сердечника в 2 раза снижает удельные топливные затраты только до 0,8. Это происходит из-за меньшего паразитного поглощения нейтронов силумином по сравнению с бронзой. Если сравнивать удельные топливные затраты на твэлах с силумином с затратами со штатными твэлами, то при штатном размере лопасти 1 мм удельные топливные затраты составят 0,6 от штатных затрат (кривая 3). При уменьшении толщины лопасти в 2 раза удельные топливные затраты плавно уменьшаются до 0,5. Очевидно, для тонкой лопасти в 0,5 мм количество шихты настолько мало, что ее паразитное поглощение мало сказывается на удельных топливных затратах, которые оказываются около 0,5 от штатных удельных топливных затрат.

Уменьшение толщины лопасти твэла увеличивает концентрацию топлива в шихте при неизмен-

ной загрузке твэла топливом. При этом повышается вероятность сосредоточения нескольких зерен топлива на границе с оболочкой твэла, что может привести к ее прогару.

Поэтому должна быть выполнена технологическая проработка этого вопроса вплоть до использования омеднения внутренней поверхности оболочки твэла. Однако можно избежать этого рассмотрения, если уменьшить одновременно с толщиной сердечника загрузку твэла  $^{235}\text{U}$ .

Если уменьшить загрузку  $^{235}\text{U}$  в 2 раза, до 3,55 г  $^{235}\text{U}$ /твэл с силуминовым сердечником, то при изменении толщины лопасти твэла от 1 до 0,5 мм относительные удельные топливные затраты снижаются от 1 до 0,7 (кривая 4). Если бы эти удельные топливные затраты были отнесены к удельным затратам при штатной загрузке 7,11 г  $^{235}\text{U}$ /твэл с силуминовым сердечником, то до толщины лопасти твэла 0,6 мм удельные затраты превышали бы затраты со штатной загрузкой (кривая 5).

Если удельные топливные затраты для начальной загрузки твэлов 3,55 г  $^{235}\text{U}$ /твэл с силумино-

вым сердечником относить к удельным топливным затратам реактора со штатными твэлами с загрузкой 7,11 г  $^{235}\text{U}$ /твэл в бронзовой матрице, то при уменьшении толщины лопасти твэла от 1 до 0,5 мм относительные удельные топливные затраты уменьшатся от 0,87 до 0,6 (кривая 6). Из кривых 2 и 3 видно, что при штатной загрузке 7,11 г  $^{235}\text{U}$ /твэл в силуминовой матрице изменение толщины лопасти твэла от 1 до 0,6 мм приводит только к снижению удельных топливных затрат на 15 %. Поэтому снижение толщины лопасти твэла с силуминовой матрицей в сердечнике большой выгоды не дает.

При уменьшении толщины лопасти твэла с бронзовым сердечником до 0,6 мм расчетная концентрация осколков в бронзовой шихте будет равна концентрации осколков в сердечнике штатного твэла при выгорании 0,8. Оказывается, такое выгорание в твэлах реактора СМ уже было реализовано.

Результаты данного исследования опубликованы, по ним поданы 2 заявки на патент (один уже получен).

1. Ерыкалов А. Н., Сахновский Э. Г. Влияние на удельные топливные затраты реактора ПИК толщины лопасти крестообразного твэла. Отчет НИЦ КИ ФГБУ «ПИЯФ» ЭР-299. Гатчина, 2014. 6 с.
2. Тепловыделяющий элемент пучкового реактора для физических исследований ПИК: пат. РФ № 14564 / А. Н. Ерыкалов, Э. Г. Сахновский; приоритет от 31.03.14.

## Модернизация высоковольтного генератора сброса ускоренных до 1 000 МэВ протонов на нейтронообразующую мишень на синхроциклотроне НИЦ КИ ПИЯФ

Е. М. Иванов, Г. Ф. Михеев, А. С. Покровский, Г. А. Рябов

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

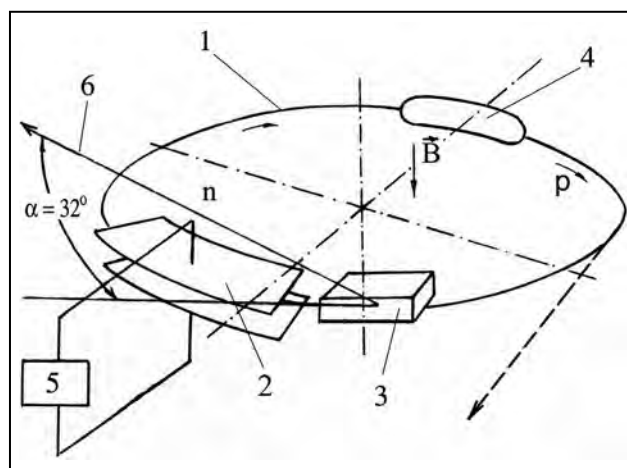
На синхроциклотроне на энергию 1 000 МэВ НИЦ КИ ПИЯФ существуют 2 нейтронных пучка широкого энергетического спектра, которые используются для спектрометрических исследований в области ядерной физики (спектрометр ГНЕЙС) и проведения исследований и испытаний на радиационную стойкость различных элементов электронной базы авиации и космоса.

Для генерации этих нейтронных пучков используется одна и та же электростатическая дефлекторная система и внутренняя мишень из свинца. На основе быстрого однооборотного сброса ускоренного протонного пучка на свинцовую мишень и использования мишени – замедлителя из полиэтилена работает нейтронный спектрометр ГНЕЙС с пролетной базой ~ 40 м, предназначенный для исследования взаимодействия нейтронов с ядрами различных элементов в диапазоне энергий от  $10^{-2}$  до 200 МэВ.

Второй нейтронный пучок с энергетическим спектром, повторяющим естественный спектр нейтронов атмосферы Земли, генерируется из свинцовой мишени под углом ~  $32^\circ$  и является единственным в Европе. Параметры этого пучка аналогичны параметрам нейтронного пучка, созданного в Лос-Аламосской национальной лаборатории США на установке LANSCE-WNR, где и проводят испытания радиоаппаратуры авиакосмические фирмы США и Европы.

На нейтронном пучке синхроциклотрона на энергию 1 000 МэВ проводят свои исследования как НИЦ КИ ПИЯФ, так и российские организации: НИИ космического приборостроения, НИИ «Электронстандарт», ОАО «Российские космические системы» и др. Поэтому надежность и стабильность работы с нейтронными пучками на синхроциклотроне НИЦ КИ ПИЯФ является важным условием их успешной работы.

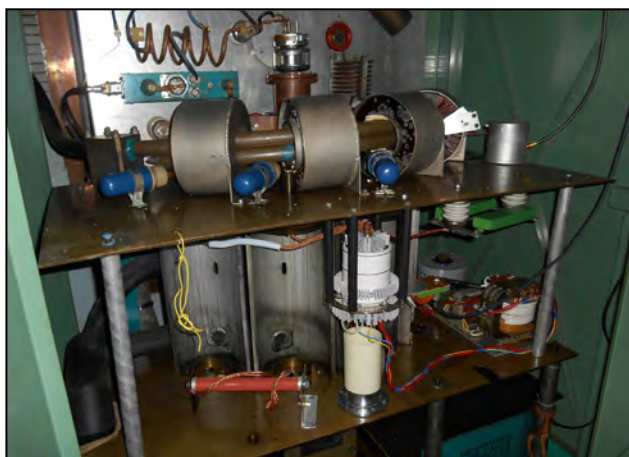
Схема нейтронного генератора приведена на рис. 1. Наведение сгустка ускоренных протонов на мишень осуществляется электростатическим дефлектором. В нужный момент, когда сгусток достигает предельной энергии и вращается по «конечной» орбите, на пластины дефлектора подается высоковольтный импульс напряжения, в результате чего он через оборот попадает на торец мишени.



**Рис. 1.** Схема нейтронного генератора: 1 – «конечная» орбита протонов; 2 – пластины дефлектора; 3 – нейтронообразующая мишень; 4 – сгусток протонов; 5 – блок питания и управления дефлектором; 6 – ось нейтронного пучка

Разработанная нами совмещенная система временной растяжки пучка и однооборотного сброса протонного пучка на внутреннюю нейтронообразующую мишень обеспечивает подачу на пластины дефлектора либо ускоряющего напряжения с частотой  $f_0 = 13,3$  МГц, либо импульса напряжения с амплитудой около 100 кВ и длительностью 120 нс. Использование дефлектора позволяет менять временную структуру протонного и нейтронного пучков.

Требования к высоковольтному генератору сброса: амплитуда импульса ~ 120 кВ с фронтом



**Рис. 2.** Оконечный каскад генератора сброса протонного пучка синхроциклотрона 1 000 МэВ НИЦ КИ ПИЯФ после его модернизации

нарастания  $\sim 50$  нс при токе в импульсе  $3 \cdot 10^3$  А. Точность привязки к фазе циркулирующего по орбите сгустка  $\sim 1$  нс.

Использование до настоящего времени генератора сброса на основе 4 параллельно работающих тиратронов типа ТГИ-700/25 не обеспечивало необходимую скорость нарастания тока в нагрузке и временную точность синхронизации по фазе пучка из-за разбросов моментов поджига тиратронов. Это в свою очередь приводило к нестабильной работе системы ГНЕИС.

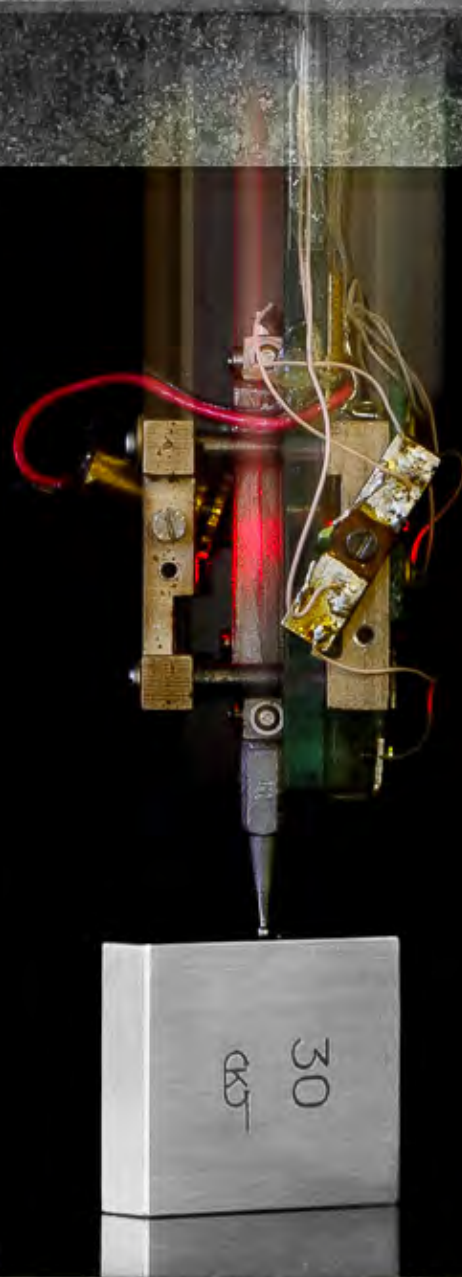
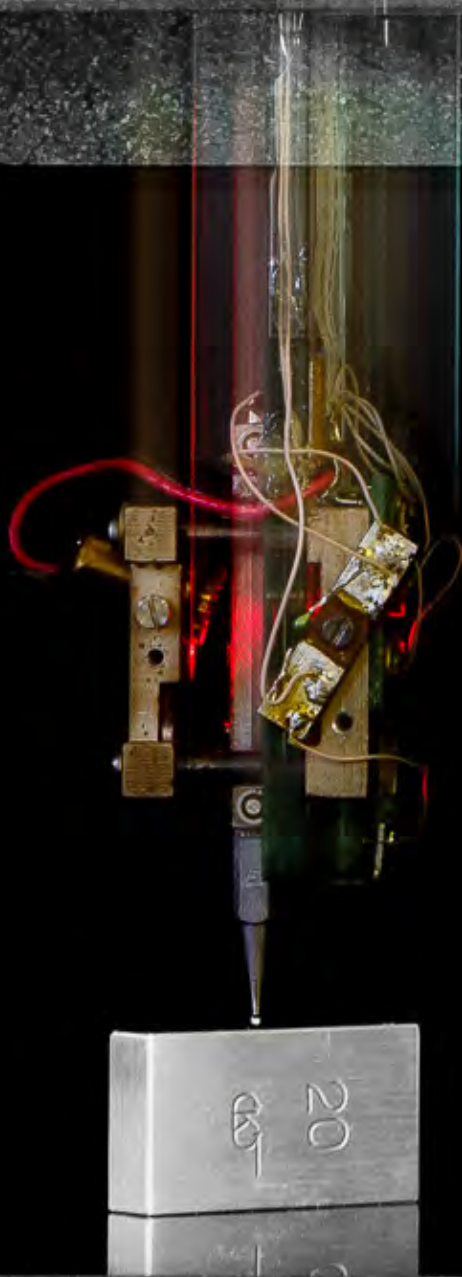
Высокая надежность и точность работы импульсного генератора необходима для реализации предложенного нами способа стабилизации импульсной интенсивности синхроциклотрона, осуществляемой за счет сброса «лишнего» числа протонов, производимого также при помощи генератора сброса.

В режиме стабилизации протонного пучка синхроциклотрона система работает следующим образом. При мониторинговании выведенного про-

тонного пучка отслеживается отклонение интенсивности пучка от его стабильной величины, и по принципу «обратной связи» вырабатывается сигнал запуска генератора сброса. Генератор сброса «выводит» ускоренные протоны из ускорителя, а генератор сброса «следит» за величиной интенсивности и сбрасывает «излишек» протонов на поглотитель, поддерживая тем самым величину интенсивности постоянной в каждом отдельном импульсе.

Необходимая точность и параметры генератора сброса были достигнуты путем модернизации генератора за счет перехода к тиратрону типа ТГИ2-5к/50, изготовленному российской фирмой «Импульсные технологии» (рис. 2). Тиратроны показали высокую степень надежности и точности параметров и успешно применяются на мощных импульсных установках научно-исследовательских центров России (ИФВЭ, ИТЭФ, ФИАН и др.) и за рубежом (США, Slac, Канада, ФРГ и др.).

1. Абросимов Н. К., Михеев Г. Ф. Радиотехнические системы синхроциклотрона Петербургского института ядерной физики. Гатчина, 2012. 340 с.
2. Устройство для стабилизации импульсной интенсивности протонного пучка синхроциклотрона с использованием С-электрода: пат. РФ № 145675 / Е. М. Иванов, Г. Ф. Михеев, А. С. Покровский, Г. А. Рябов; приоритет от 16.04.2014.





## Прикладные исследования и разработки

- 122 Определение элементного состава  $Gd_2O_2S : Pr, Ce$  сцинтилляционных керамик нейтронно-активационным методом
- 124 Разработка и изготовление позиционно-чувствительных газовых микродетекторов
- 125 Исследование взаимодействий дейтериевой плазмы с первой стенкой в сферическом токамаке «Глобус-М»
- 127 3D-наноуниверсальный измерительный микроскоп
- 128 Разработка и создание комплекса радиационных испытаний электронной компонентной базы для авиации и космоса

## Определение элементного состава $Gd_2O_2S : Pr, Ce$ сцинтилляционных керамик нейтронно-активационным методом

В. Г. Зиновьев, Ю. Е. Логинов, И. А. Митропольский, Г. И. Шуляк и др.  
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

Рентгеновская люминесцентная керамика на базе  $Gd_2O_2S : Pr, Ce$  используется как датчик ионизирующего излучения, в компьютерной томографии, например. В ней сочетается высокая эффективность конверсии с коротким временем релаксации. Концентрация легирующего элемента изменяется от 0,1 до 1 000 ppm. Примеси негативно влияют на сцинтилляционные свойства керамики.

При облучении керамики нейтронами за счет захвата и реакции ( $n, p$ ) на природной смеси серы в образце появляются изотопы фосфора  $^{32}, ^{33}P$  и серы  $^{35}S$ , которые являются мощными  $\beta$ -распадчиками. Их тормозное излучение попадает в низкоэнергетическую часть исследуемого  $\gamma$ -спектра образца. Другая проблема связана с появлением множества  $\gamma$ -линий большой интенсивности с энергией  $E_\gamma < 250$  кэВ от изотопов Gd, Eu, Sm и Tb, появляющихся при нейтронном облучении природной смеси Gd в керамике.

Разработанная методика инструментального нейтронно-активационного анализа включает ис-

пользование Cu-Cd-W-Pb-фильтров, помещаемых между образцом и детектором  $\gamma$ -излучения. Cu- и Cd-фильтры поглощали  $\beta$ - и тормозное излучение от фосфора и серы. W- и Pb-фильтры служили для поглощения рентгеновского и низкоэнергетического  $\gamma$ -излучения. Используется комбинация 2 стандартных методов нейтронно-активационного анализа: k0-метод (для определения Gd, Pr) и метод отношений (для определения следовых элементов: As, Ce, Co, Cr, Cs, Eu, Fe, La, Sc, Tb, Zn, Zr, Pr, Gd, Na). В измерениях использовался мультиэлементный стандарт сравнения IAEA 433. Для измерения нейтронного потока использовался метод двойных мониторов. Измерения  $\gamma$ -спектров проводились через 6 и 20 дней после облучения образца.

В результате предложенная методика позволила определить в исследуемых образцах сцинтилляционных керамик  $Gd_2O_2S : Pr, Ce$  содержание следовых элементов в диапазоне концентраций от  $3 \cdot 10^{-8}$  до 2,0 %. При облучении в потоке тепло-

**Таблица.** Используемые реакции, распространенность изотопов  $p$ , сечения захвата тепловых нейтронов  $\sigma_t$ , энергии  $\gamma$ -излучения  $E_\gamma$ , периоды полураспада  $T_{1/2}$  и пределы обнаружения  $DL$

Реакция	$p, \%$	$\sigma_{th},$ бн	$E_\gamma,$ кэВ	$T_{1/2},$ дни	$DL, \%$
$^{45}Sc(n, \gamma)^{46}Sc$	100	$27,2 \pm 0,2$	1 120,92	83,8	$1,3 \cdot 10^{-8}$
$^{58}Fe(n, \gamma)^{59}Fe$	0,28	$1,32 \pm 0,03$	1 099,45	44,5	$3,7 \cdot 10^{-5}$
$^{59}Co(n, \gamma)^{60}Co$	100	$37,18 \pm 0,06$	1 173,52	1 925,3	$2,9 \cdot 10^{-7}$
$^{64}Zn(n, \gamma)^{65}Zn$	48,6	$0,79 \pm 0,02$	1 115,55	243,9	$6,3 \cdot 10^{-6}$
$^{133}Cs(n, \gamma)^{134}Cs$	100	$30,3 \pm 1,1$	796,09	754,3	$3,6 \cdot 10^{-7}$
$^{139}La(n, \gamma)^{140}La$	99,91	$9,04 \pm 0,04$	1 596,65	1,68	$1,2 \cdot 10^{-7}$
$^{140}Ce(n, \gamma)^{141}Ce$	88,45	$5,8 \pm 0,02$	145,44	32,5	$5,8 \cdot 10^{-5}$
$^{141}Pr(n, \gamma)^{142}Pr$	100	$11,5 \pm 0,3$	1 575,6	0,80	$1,6 \cdot 10^{-4}$
$^{151}Eu(n, \gamma)^{152}Eu$	47,8	$9\ 200 \pm 100$	1 408,3	4 944	$7,8 \cdot 10^{-8}$
$^{159}Tb(n, \gamma)^{160}Tb$	100	$23,4 \pm 0,4$	966,42	72,3	$8,7 \cdot 10^{-8}$

вых нейтронов  $f_{th} = 6,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в течение 2 ч пределы обнаружения составили  $(0,6-1,3) \cdot 10^{-8} \%$  (табл.).

Установлено, что относительный световой выход ( $\lambda_{\text{макс.}} = 513 \text{ нм}$ ) сцинтилляционных керамик уменьшается, когда увеличивается содержание Се в образце. Максимальное значение относительного светового выхода  $\sim 40 \%$  получается, когда содержание Се достигает  $\sim 10^{-5} \%$ . Показано, что легирование керамики Tb ( $\sim 10^{-6} \%$ ) приводит к снижению

послесвечения: 0,045–0,055 % после 5 мс и 0,001 % после 500 мс.

Измерения  $\gamma$ -спектра продолжительностью от 0,5 до 3 ч проводились многократно. Время выдержки облученного образца варьировалось от 3 до 40 дней, что позволило разделить излучение короткоживущих и долгоживущих нуклидов (рис. 1–3) и заметно понизить соответствующие пределы определения содержания.

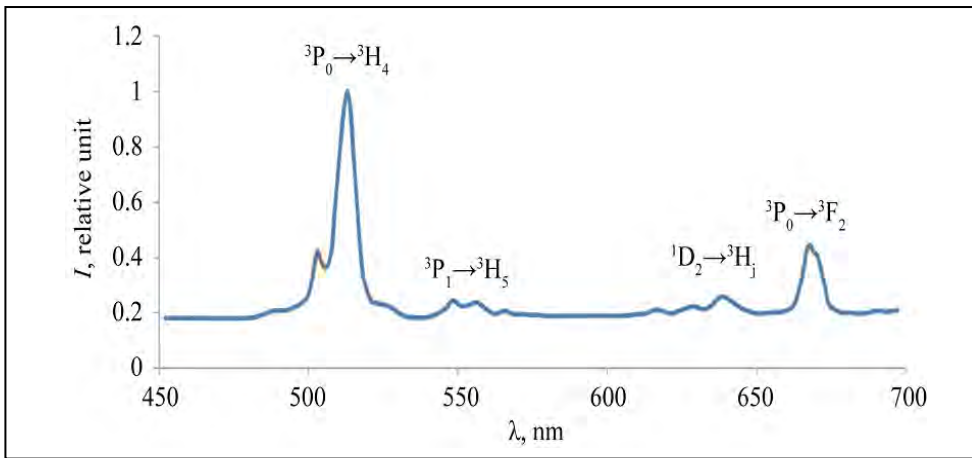


Рис. 1. Спектр люминесценции керамики  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S} : \text{Pr}, \text{Ce}$

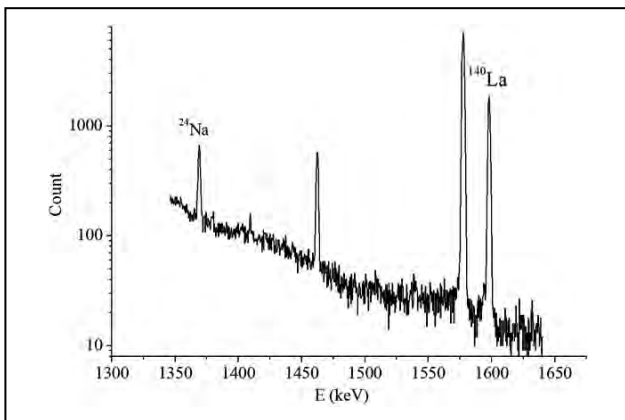


Рис. 2. Спектр через 6 дней после облучения образца

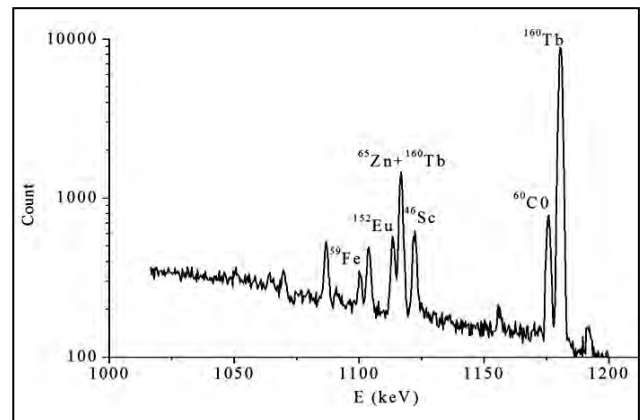


Рис. 3. Спектр через 20 дней после облучения образца

## Разработка и изготовление позиционно-чувствительных газовых микродетекторов

Л. Г. Кудин

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

За последние годы в производстве Отдела информационных технологий и автоматизации Отделения были разработаны и изготовлены опытные образцы газовых позиционно-чувствительных микродетекторов, выполненных на базе TGEM (Thick Gas Electron Multiplier), Monolithic TGEM, MICROMEGAS (Micro Mesh Gas System) (рис. 1, 2).

Цель этих работ – создание технологической базы для производства газовых микродетекторов.

Опытные образцы детекторов прошли стендовые лабораторные испытания и испытания на пучках ускорителя PS ЦЕРН и синхротронотрона НИЦ КИ ПИАФ. Проведенные испытания подтвердили полное соответствие характеристик разработанных детекторов лучшим зарубежным аналогам. Работы проводились в сотрудничестве с коллективом Лаборатории релятивистской ядерной физики ОФВЭ в рамках проекта CBM (GSI, Дармштадт, Германия).

Результаты работы периодически докладывались на международных рабочих совещаниях по проекту CBM, семинарах отделений Института, публиковались в препринтах НИЦ КИ ПИАФ, 4 статьи отосланы в журнал ПТЭ.

TGEM и Monolithic TGEM внедрены в производство на предприятиях страны.

Процесс создания новых детекторов тесно связан с построением технологии их производства: разработкой новых технологических цепочек и приемов, закупкой нового оборудования, подготовкой технологических помещений, подбором кадров – решающей силы в наших условиях. Проводимые работы являются преддверием к внедрению этих детекторов в установку ПИК.

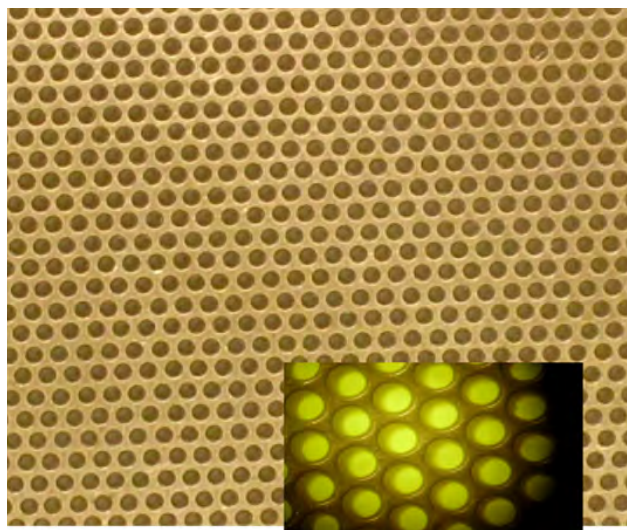


Рис. 1. TGEM, Monolithic TGEM

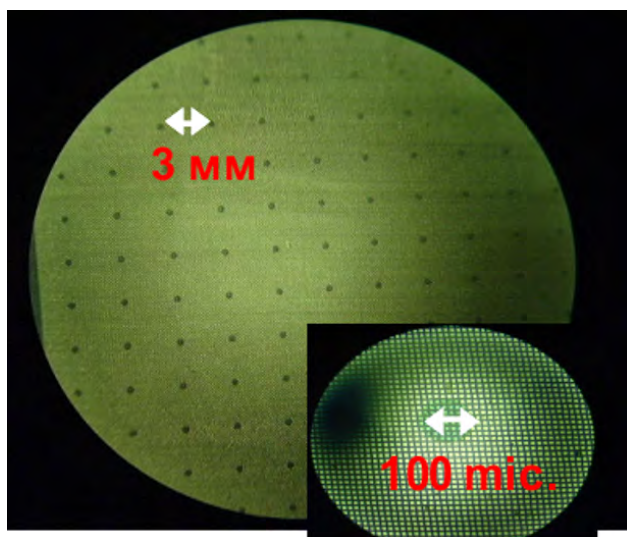


Рис. 2. MICROMEGAS

1. Волков С. С., Евсеев В. А., Иванов В. В., Комков Б. Г., Кудин Л. Г., Никулин В. Н., Роцин Е. В., Рыбаков Г. В., Самсонов В. М., Тарасенкова О. П., Ханзадеев А. В., Чернышева Е. А. Препринт ПИАФ 2929. Гатчина, 2013. 42 с.
2. Волков С. С., Жданов А. А., Иванов В. В., Комков Б. Г., Кудин Л. Г., Никулин В. Н., Роцин Е. В., Самсонов В. М., Ханзадеев А. В., Шведчиков А. В. Препринт ПИАФ 2935. Гатчина, 2014. 32 с.

## Исследование взаимодействия дейтериевой плазмы с первой стенкой в сферическом токамаке «Глобус-М»

В. М. Лебедев, В. А. Смолин

Отделение нейтронных исследований и Отделение перспективных разработок  
НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

Сферический токамак «Глобус-М», построенный в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, предназначен для проведения широкого круга исследований в области термоядерного синтеза. Большая плотность плазменного тока и высокое отношение магнитного поля к радиусу плазмы позволяют работать в области больших плотностей плазмы ( $\sim 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ), что в условиях малого зазора «плазма – стенка» создает большие нагрузки на первую стенку. Защитное покрытие внутренних стенок токамака составляет  $\sim 90\%$  и состоит из плиток, изготовленных из рекристаллизованного графита РГТ с различными присадками (Ti, Si, B) (рис. 1). Дополнительно поверхность защищалась с помощью пленок, нанесенных в процессе боронизации. После проведения длительного цикла экспериментов ( $\sim 10\,000$  разрядов дейтериевой плазмы) ряд защитных плиток с различной степенью нагружения был подвергнут анализу. Анализировалась способность РГТ-91 удерживать (накапливать) дейтерий, изучалась миграция других элементов

в камере. Элементный состав пленок, образовавшихся на поверхности, исследовался методами рентгеноспектрального анализа, обратного резерфордского рассеяния и ядерных реакций с дейтронами (табл.).

При исследовании защитных свойств внутренних покрытий (бороуглеродных пленок и углеродных тайлов) вакуумной камеры токамака «Глобус-М» установлено, что при взаимодействии с дейтериевой плазмой в них образуются смешанные слои толщиной до  $\sim 10^{19}$  ат/см<sup>2</sup>. Состав и толщина данных слоев зависят от мощности, выделяемой в этих частях вакуумной камеры. Слои состоят в основном из атомов углерода и бора и обогащены дейтерием и распыляемыми от деталей токамака элементами. Захват дейтерия происходит неравномерно по внутренней поверхности токамака и изменяется от  $< 0,01$  до  $5\%$  в диверторной области вакуумной камеры. При этом дейтерий не проникает в объем тайлов, а остается в поверхностном смешанном слое.

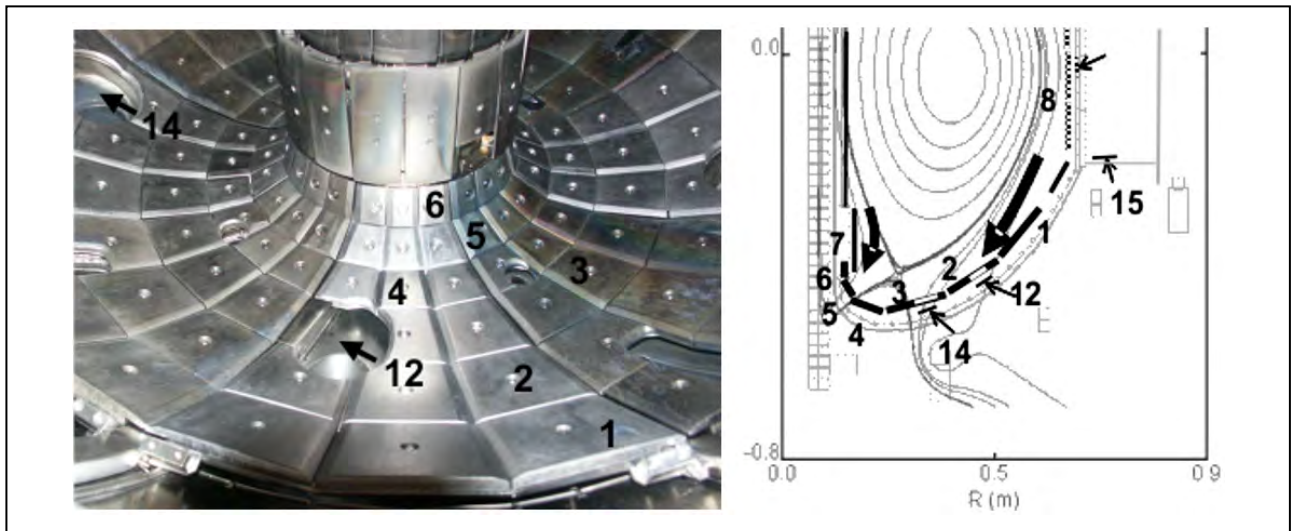


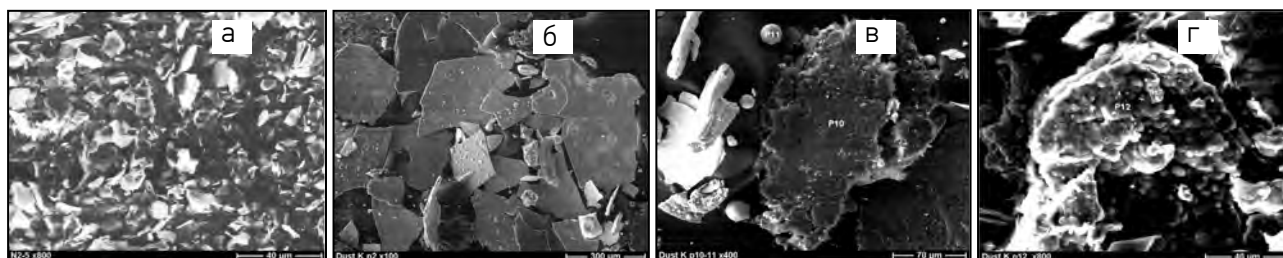
Рис. 1. Нижняя часть вакуумной камеры токамака «Глобус-М»: диверторная область (слева) и сечение камеры с вписанной в нее магнитной конфигурацией (цифры – номера образцов: 1–8 – графитовые тайлы; 12, 14, 15 – сталь 12Х18Н10Т (справа). Стрелками показаны потоки частиц и тепла на дивертор

**Таблица.** Толщины пленок элементов на различных образцах-свидетелях ( $\cdot 10^{16}$  ат/см<sup>2</sup>)

Образец	D	B	C	Si	Cr	Fe	Ni	Cu	W
1	36	83	–	6	17	44	5	1	4
2	56	63	–	1	30	75	9	3	6
3	79	660	–	0	45	112	13	3	7
4	82	650	–	2	53	139	18	7	6
5	100	200	–	8	39	102	13	4	2
6	120	94	–	0	45	120	15	5	7
7	~ 0,01	1	–	4	4	14	2	1	0
8	~ 0,01	0	–	2	2	7	0,3	0	0
12	32	5,4	90	–	–	–	–	–	–
14	31	15	80	–	–	–	–	–	–
15	19	16	28	–	–	–	–	–	–

После ~ 10 000 разрядов плазмы были исследованы образцы пыли из различных мест вакуумной камеры токамака: тайлы, поверхности под нижними диверторными пластинами и заглушками фланцев. Среди них можно выделить несколько видов частиц пыли: щебенка, крупные пластинчатые частицы размером от 10 до 1 000 мкм, сферические частицы с гладкой поверхностью диаметром от 10 до 30 мкм, губчатые частицы размером до 100 мкм (рис. 2). Эти частицы образуются в результате распыления под воздействием мощных плазменных потоков перенапыленных слоев,

осажденных на поверхности диверторных пластин. Пыль содержит в основном элементы, входящие в состав металла, из которого сделаны сама вакуумная камера и расположенные в ней устройства. Атомные отношения «бор – углерод» для измеренных образцов в пределах погрешности измерений близки:  $(B/C)_{от} = 0,007 \pm 0,001$ . Форма и элементный состав частиц пыли, образующихся и накапливающихся в вакуумной камере, зависят от места их образования и условий протекания разряда в токамаке.



**Рис. 2.** SEM-микрофотографии частиц пыли, собранных в вакуумной камере токамака «Глобус-М»: щебенка (а); пластинчатые частицы размером от 10 до 1 000 мкм (б); сферические частицы (в); губчатые частицы размером до 100 мкм (г)

## 3D-наноуниверсальный измерительный микроскоп

*Б. Г. Турухано, Н. Турухано, В. В. Добырн, С. Н. Ханов,  
Р. П. Синельщикова, Н. А. Щипунова, И. В. Ладатко, Е. А. Вилков  
Отделение перспективных разработок НИЦ «Нурчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»*

Система «3D-наноуниверсальный измерительный микроскоп» (3D НАНО УИМ) использует линейные голографические датчики (ЛГД) и предназначена для прецизионных 3-координатных измерений (3D) в ортогональной системе координат с выводом результатов измерений на экран персонального компьютера (ПК). Координаты X и Y управляются вручную, а координата Z – с педали. Величины всех координат отображаются в цифровом виде на экране ПК, а также в виде таблиц и могут быть обнулены в любой точке.

Линейные голографические датчики ЛГД-200/100/100 содержат каретку, направляющую, лазерный модуль, шлейф, защитный кожух, фотодетекторный модуль.

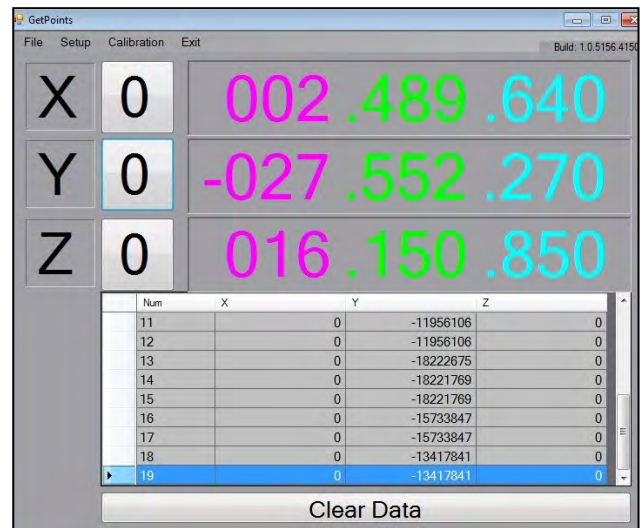
Направляющая состоит из стеклянных пластин, плоскостность поверхности которых обеспечивает постоянный зазор между измерительной и индикаторной дифракционными решетками, а также постоянный угол между их штрихами.

Измерительная дифракционная решетка расположена на стеклянной подложке, а индикаторная решетка – на каретке, жестко установленной в считывающей головке. На этой же каретке размещены лазерный и фотодетекторный модули. Каретка перемещается по направляющей на 6 шарикоподшипниках. На каретке установлены 4 магнита, а на направляющей – 3 металлических полосы. Сигналы через шлейф подаются на электрический блок управления X, Y, Z и далее через системный шлейф поступают в компьютер. Каретка имеет боковой штифт (диаметром 2,44 мм), через который передается перемещение от внешнего устройства на каретку.

Основное окно программы показывает разрешение всех датчиков 10 нм. Точность всех датчиков – ±0,2 мкм. Максимальная скорость – 100 мм/с. Все координаты считываются одновременно.



3D НАНО УИМ



Основное окно программы

Таким образом, удалось создать на базе стандартного прибора УИМ-23 3-координатный измерительный микроскоп, точность которого в несколько раз превышает точность УИМ-23.

## Разработка и создание комплекса радиационных испытаний электронной компонентной базы для авиации и космоса

С. А. Артамонов, Г. Ф. Михеев, Г. А. Рябов, Е. М. Иванов, Ж. С. Лебедева, Д. А. Амерканов, В. П. Гресь, О. А. Щербаков, А. М. Гагарский, Л. А. Вайшнине, А. С. Воробьев, Г. И. Горкин, С. В. Косьяненко, В. Г. Муратов, В. В. Пашук, В. А. Соловей  
 Отделение перспективных разработок, Отделение нейтронных исследований, Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

Прогресс космической и авиационной техники в значительной степени связан с использованием современной микро- и наноэлектроники (ЭКБ). Одним из основных требований к таким системам является возможность работать в радиационных полях в космосе и верхних слоях атмосферы. В России, как и во всем мире, действуют стандарты по обязательным испытаниям на радиаци-

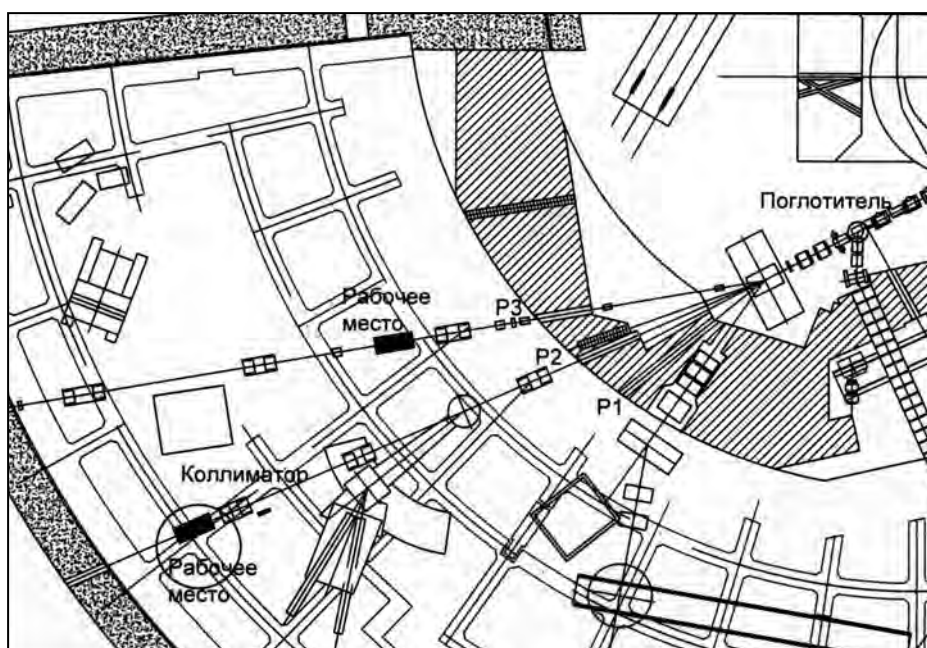
онную стойкость электроники для космических и авиационных систем.

Для этих целей в НИЦ КИ ПИАФ на базе синхротрона с максимальной энергией ускоренных протонов 1 000 МэВ разработан и создан универсальный центр для радиационных испытаний на пучках протонов и нейтронов.

### Испытания на протонном пучке с энергией 1 000 МэВ

На тракте P2 протонного пучка создан стенд для радиационных испытаний (рис. 1). Определены режимы включения линз для получения узкого (26 мм в диаметре) и широкого (230 мм) пучков. Разработаны и созданы приборы для абсолютного измерения интенсивности протонного пучка с энергией 1 000 МэВ для измерения размера

и распределения протонов в пучке. Стенд испытаний позволяет устанавливать элементы электроники на пучок и перемещать их в случае необходимости по пучку. Создана камера для проведения испытаний в широком диапазоне температур (до 125 °С).



**Рис. 1.** Схема пучков синхротрона НИЦ КИ ПИАФ и пучки для радиационных испытаний на протонах: на тракте P2 – испытания на пучке с энергией 1 000 МэВ, на тракте P3 – испытания на пучках с переменной энергией



### Испытания на пучках переменной энергии

Синхроциклотрон ускоряет протоны до фиксированной энергии 1 000 МэВ. Поэтому для создания пучков переменной энергии используется торможение исходного пучка в веществе поглотителя. Рассчитан, разработан и изготовлен прибор для дистанционного изменения длины поглотителя, что значительно облегчает переход с одной энергии пучка на другую и снижает радиационную нагрузку на персонал. В условиях многократных измерений этот фактор имеет большое значение.

Пучки после поглотителя являются вторичными пучками. Проведены расчеты параметров таких пучков переменной энергии и определены, также расчетным путем, оптимальные режимы включения линз на тракте P2 (рис. 1). Согласно расчетам можно получить пучки в диапазоне энергий 1 000 – 50 МэВ с интенсивностью от  $3 \cdot 10^{12}$  до  $\sim 10^8$  протонов в секунду. Аналогичная серия расчетов выполнена и для тракта P3.

### Создание и экспериментальное исследование пучка нейтронов для тестирования компонентов электроники на радиационную стойкость

На синхроциклотроне НИЦ КИ ПИЯФ создан единственный в Европе пучок нейтронов со спектром, повторяющим спектр атмосферных нейтронов, что и нужно для испытаний ЭКБ. В 2014 г. продолжалось совершенствование стенда (рис. 2) для испытания радиационной стойкости на нейтронах с атмосферным спектром в интервале энергий 1–1 000 МэВ. Завершено изготовление и проведены испытания всех узлов стенда, включая монитор нейтронного пучка – ионизационную камеру деления (ИКД), профилометр пучка – многопроволочный пропорциональный счетчик

(МППС), оборудование для фиксации и перемещения объекта испытаний (ОИ), а также контроля температурного режима ОИ. Выполнены работы по подготовке оборудования и технической документации для проведения комплексных испытаний и аттестации стенда. Совместно с филиалом ОАО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «НИИ космического приборостроения» (Москва) на нейтронном испытательном стенде (ИС НП) проведены 2 сеанса испытаний изделий ЭКБ, используемых в отечественном космическом приборостроении.

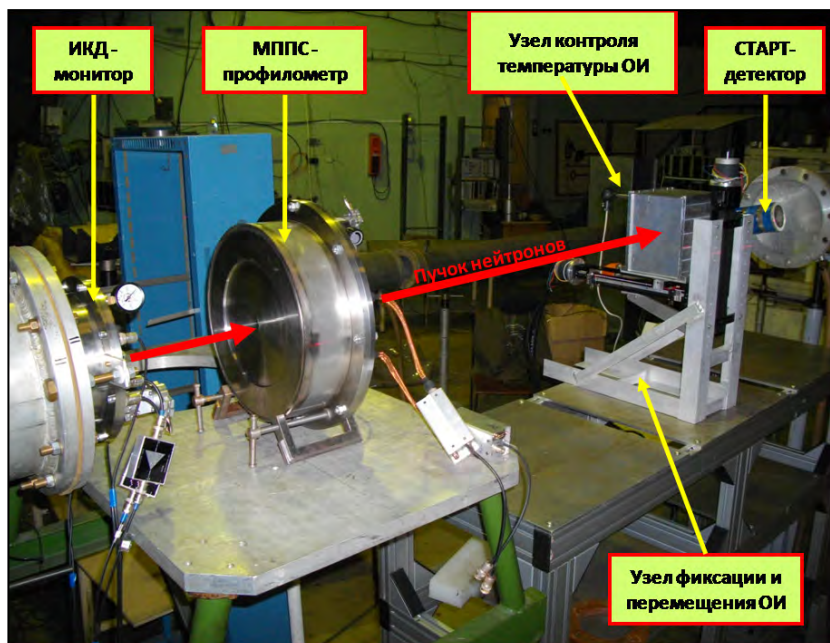
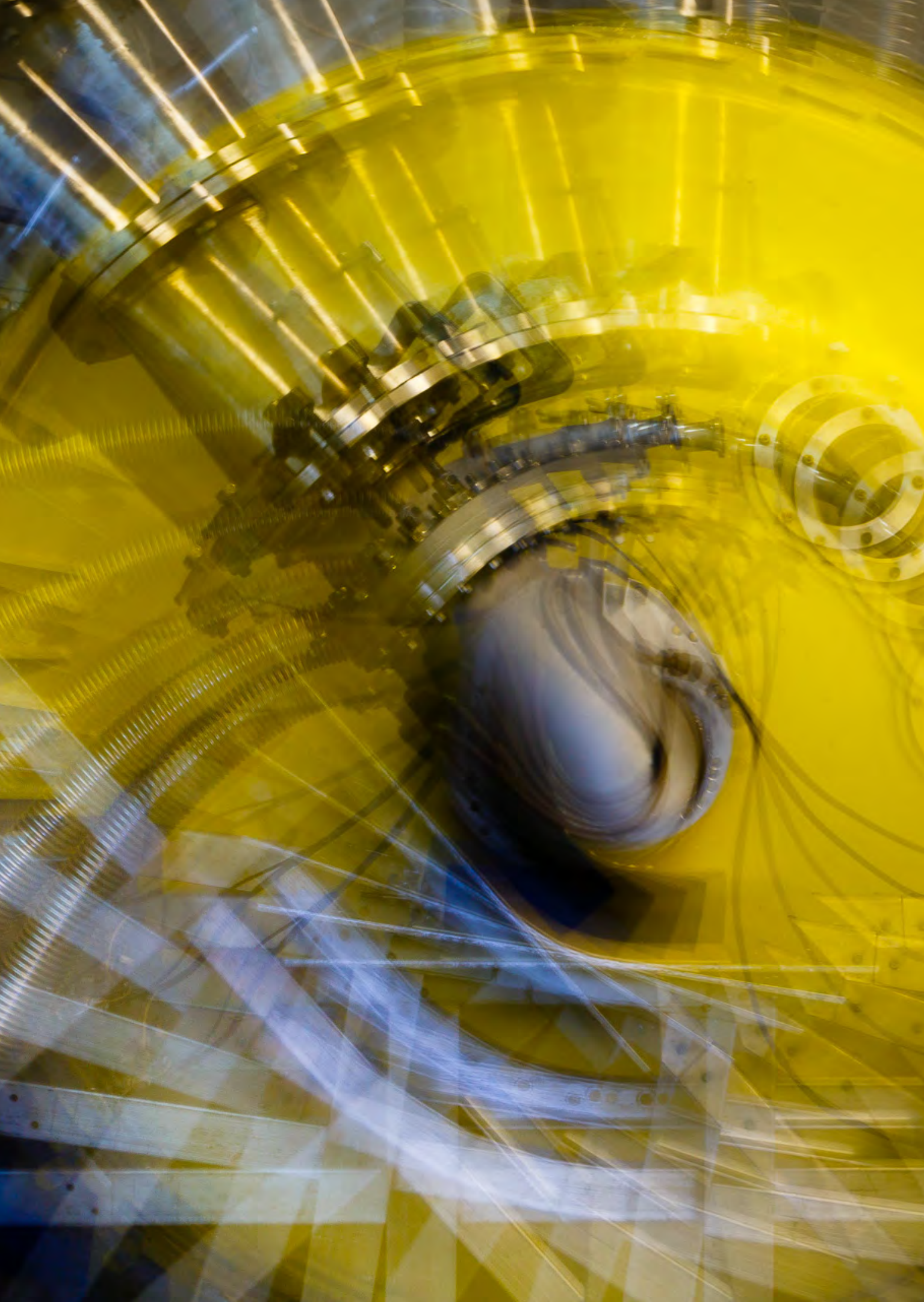


Рис. 2. Нейтронный (ИС НП) / протонный (ИС ПП) испытательные стенды



## Базовые установки

- 132 Научно-исследовательский реакторный комплекс ВВР-М
- 135 Реакторный комплекс ПИК
- 146 Протонный синхроциклотрон СЦ-1000
- 148 Циклотрон Ц-80

## Научно-исследовательский реакторный комплекс ВВР-М

В. А. Илатовский

Управление эксплуатации реактора ВВР-М НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»

Научно-исследовательский реакторный комплекс (НИРК) ВВР-М является одной из базовых установок НИЦ КИ ПИАФ, на которой ведутся фундаментальные и прикладные исследования в области ядерной физики, физики конденсированного состояния, развиваются нейтронные методы исследования вещества, радиационное материаловедение, радиобиология, производится наработка радионуклидов для медицинских целей.

НИРК ВВР-М уже более 50 лет является стабильно работающей ядерной установкой и по своим параметрам остается лучшим в России исследовательским реактором непрерывного действия. Он обладает широкими возможностями для проведения научных исследований как в активной зоне реактора, так и на экспериментальных установках, расположенных на выходе пучков нейтронов из канала реактора.

Выполнено более 20 экспериментальных работ в области ядерной физики, физики конденсированного состояния и развития нейтронных методов исследования вещества.

Таблица 1. Основные параметры ВВР-М

Наименование	Величина
Тепловая мощность	18 МВт
Плотность потока нейтронов	$4 \cdot 10^{14}$ н/см <sup>2</sup> · с
Число горизонтальных каналов	17
Число вертикальных каналов	15
Число облучательных полостей в активной зоне	6
Средняя продолжительность работы	3 600 ч в год
Средняя энерговыработка	2 500 МВт/сут. в год
Обслуживающий персонал	85



Рис. 1. Экспериментальные установки на реакторе ВВР-М

**Таблица 2.** Краткие итоги работы реактора ВВР-М в 2012–2014 гг.

№ п/п	Показатели работы реактора на мощности	2012	2013	2014
1	Выработка энергии (МВт · сут.)	2 169,0	1 890,9	2 121
2	Количество часов работы реактора на мощности	3 123	2 685	3 162
3	Максимальная мощность (МВт)	17,0	17,0	17,0
4	Средняя эффективная мощность (МВт)	16,6	16,9	16,1
5	Временной коэффициент использования реактора (%)	35,0	33,6	36,3
6	Количество облученных ампул и блок контейнеров (шт.)	123	132	157

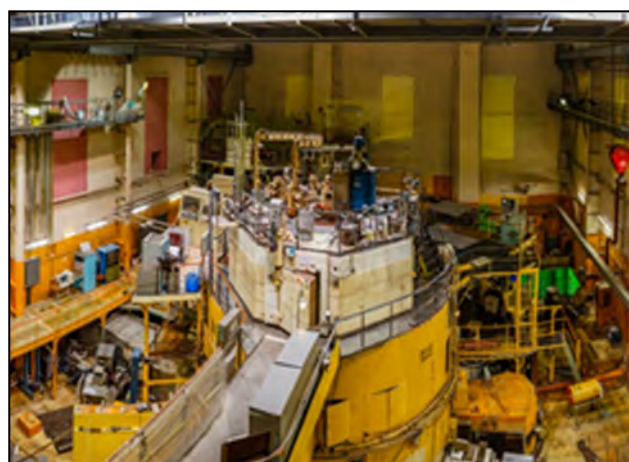
Основные облучательные работы, выполненные в активной зоне и каналах отражателя реактора ВВР-М:

- 6 поставок (около 100 кКи) на экспорт радионуклида Ir-192 с высокой удельной активностью, соответствующей требованиям заказчика;
- наработка радиоизотопов для ядерной медицины:
  - Mo-99 для получения Tc-99m общей активностью 200 Ки;
  - I-125 общей активностью 300 Ки;
- облучение 8 ампул с образцами конструкционных материалов и их сварных соединений.

В 2014 г. реакторным комплексом ВВР-М воспользовались следующие группы исследователей:

- сотрудники лабораторий и групп Отдела исследования конденсированного состояния и Отдела нейтронной физики НИЦ КИ ПИЯФ;
- студенты кафедры ядерно-физических методов исследования (физический факультет Санкт-Петербургского государственного университета);
- Лаборатория магнитных сенсоров Национального университета «Львовская Политехника»;
- Лаборатория наноматериалов и карбидных композитов ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт материалов»;
- Лаборатория прочности материалов Санкт-Петербургского государственного университета;
- Лаборатория физики пластичности и прочности Сибирского физико-технического института;
- Лаборатория нейтронных физико-химических исследований НИЦ КИ ПИЯФ;

- Санкт-Петербургский государственный университет (химический и физический факультеты), Институт высокомолекулярных соединений РАН, ГНЦ ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»;
- Санкт-Петербургский филиал Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН;
- Самарский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербургский государственный технологический институт;
- Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН;
- Институт химии Санкт-Петербургского государственного университета;
- Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, (физический факультет);
- ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению».



**Рис. 2.** Общий вид реактора ВВР-М

## На основе работ, проведенных на ВВР-М, были опубликованы следующие материалы:

1. Большакова И. А., Куликов С. А., Коноплева Р. Ф., Чеканов В. А., Васильевский И. С., Шурыгин Ф. М., Макидо Е. Ю., Duran I., Мороз А. П., Штабалик А. П. // ФТТ. 2014. Т. 56, Вып. 1. С. 156–159.
2. Беляев С. П., Гордеев С. К., Чеканов В. А., Коноплева Р. Ф., Голосовский И. В., Корчагина С. Б., Денисов И. А., Белобров П. И. // ФТТ. 2014. Т. 56, Вып. 1. С. 151–155.
3. Belyaev S., Chekanov V., Kolobanov G., Konopleva R., Nakin A., Nazarkin I., Razov A., Resnina N., Volkov A. // "Shape Memory Alloys: Properties, Technologies, Opportunities". 2015. Trans. Tech. Publications Inc. P. 429–456.
4. Лебедев В. Т., Török Gy., Виноградова Л. В. // ФТТ. 2014. Т. 56, Вып. 1. С. 180–185.
5. Кульвелис Ю. В., Кононова С. В., Ромашкова К. А., Лебедев В. Т. // ФТТ. 2014. Т. 56, Вып. 1. С. 90–93.
6. Лебедев В. Т., Грушко Ю. С., Седов В. П., Шилин В. А., Козлов В. С., Орлов С. П., Сушков П. А., Колесник С. Г., Сжогина А. А., Шабалин В. В. // ФТТ. 2014. Т. 56, Вып. 1. С. 176–179.
7. Лебедев В. Т., Török Gy., Виноградова Л. В. // ФТТ. 2014. Т. 56, Вып. 1. С. 186–193.
8. Лебедев В. М., Лебедев В. Т., Орлов С. П., Марголин Б. З., Морозов А. М. // ФТТ. 2014. Т. 56, Вып. 1. С. 160–164.
9. Лебедев В. М., Лебедев В. Т., Орлова Д. Н., Тихонов В. И. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 5. С. 5–11.
10. Лебедев В. М., Лебедев В. Т., Орлова Д. Н., Совестнов А. Е., Тихонов В. И. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 10. С. 45–52.
11. Лебедев В. Т., Кульвелис Ю. В., Рунов В. В., Седов В. П., Сжогина А. А. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 10. С. 88–99.
12. Лебедев В. Т., Кульвелис Ю. В., Орлова Д. Н. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 10. С. 100–107.
13. Lebedev V. M., Lebedev V. T., Orlova D. N., Sovestnov A. E., Tikhonov V. I. // Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2014. V. 8. No. 5. P. 1002–1009.
14. Бахметьев В., Сычев В., Орлова А., Потанин Е., Совестнов А., Кульвелис Ю. // Наноиндустрия. 2013. Т. 8. № 46. С. 46–49.
15. Козлов В. С., Суясова М. В., Лебедев В. Т. // Журнал прикладной химии. 2014. Т. 87. № 2. С. 137–143.
16. Zobkalo I. A., Gavrilov S. V., SawNyj N. Z., Barilo S. N., Shiryayev S. V. // J. Magn. Magn. Mater. 2014. V. 354, P. 85–89.
17. Зобкало И. А., Гаврилов С. В., Санина В. А., Головенциц Е. И. // ФТТ. 2014. Т. 56, Вып. 1. С. 57–62.
18. Зиновьев В. Г., Митропольский И. А., Логинов Ю. Е., Шуляк Г. И., Тюкавина Т. М., Сушков П. А. // Атомная энергия. 2014. Т. 116. № 2. С. 89–94.
19. Zinovyev V. G., Mitropolsky I. A., Loginov Yu. E., Schulyak G. I., Tyukavina T. M., Sakharov S. L., Kosianenko S. V., Gorokhova E. I., Demidenko V. A. // Word Journal of Nuclear Science and Technology. 2014. V. 4, P. 139–147.
20. Тихонова А. Е., Козлов В. С. // ФТТ. 2014. Т. 56, Вып. 1. С. 24–26.
21. Геращенко О. В., Матвеев В. А., Плешанов Н. К., Байрамуков В. Ю. // ФТТ. 2014. Т. 56, Вып. 7. С. 1386–1390.
22. Матвеев В. А., Плешанов Н. К., Геращенко О. В., Байрамуков В. Ю. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 10. С. 34.
23. Плешанов Н. К. // ЖТФ. 2014. Т. 84, Вып. 2. С. 123–130.
24. Забенкин В. Н., Аксельрод Л. А., Сумбатян А. А., Гордеев Г. П., Лазебник И. М. // ЖТФ. 2014. Т. 84, Вып. 2. С. 135–138.

### Заявки, патенты и т. п.

1. Седов В. П., Сжогина А. А. Способ получения водорастворимых производных фуллеренов: заявка на изобретение № 2014113248 / Седов В. П., Сжогина А. А.; приоритет от 26.05.14.
2. Кабина Л. П., Лисин С. С., Митропольский И. А. Программа ELENA, описывающая радиационные свойства элементов и изотопов для нейтронного анализа вещества. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014611564. Роспатент, 2014.
3. Захаров А. А. Устройство для нагружения и испытания образцов в канале ядерного реактора: пат. РФ № 2507497 / А. А. Захаров; приоритет от 20.02.2014.

## Реакторный комплекс ПИК

*М. В. Ковальчук*

*Директор НИЦ «Курчатовский институт»*

*В. Л. Аксенов*

*Директор НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»*

Нейтронный исследовательский реактор ПИК (пучковый исследовательский корпусной) призван стать основой современного исследовательского центра, способного удовлетворить национальный и международный спрос на исследования с помощью нейтронных пучков в ближайшие десятилетия.

Реакторный комплекс ПИК (РК ПИК) (рис. 1) сегодня состоит из 38 зданий общей площадью 65 000 м<sup>2</sup>. По результатам реализации проектов модернизации технологических систем и реконструкции лабораторного комплекса, которые планируется выполнить в течение 2015–2020 гг., в состав РК ПИК дополнительно войдут 13 зданий и сооружений общей площадью около 50 000 м<sup>2</sup>.

Реактор ПИК представляет собой компактный нейтронный источник с объемом активной

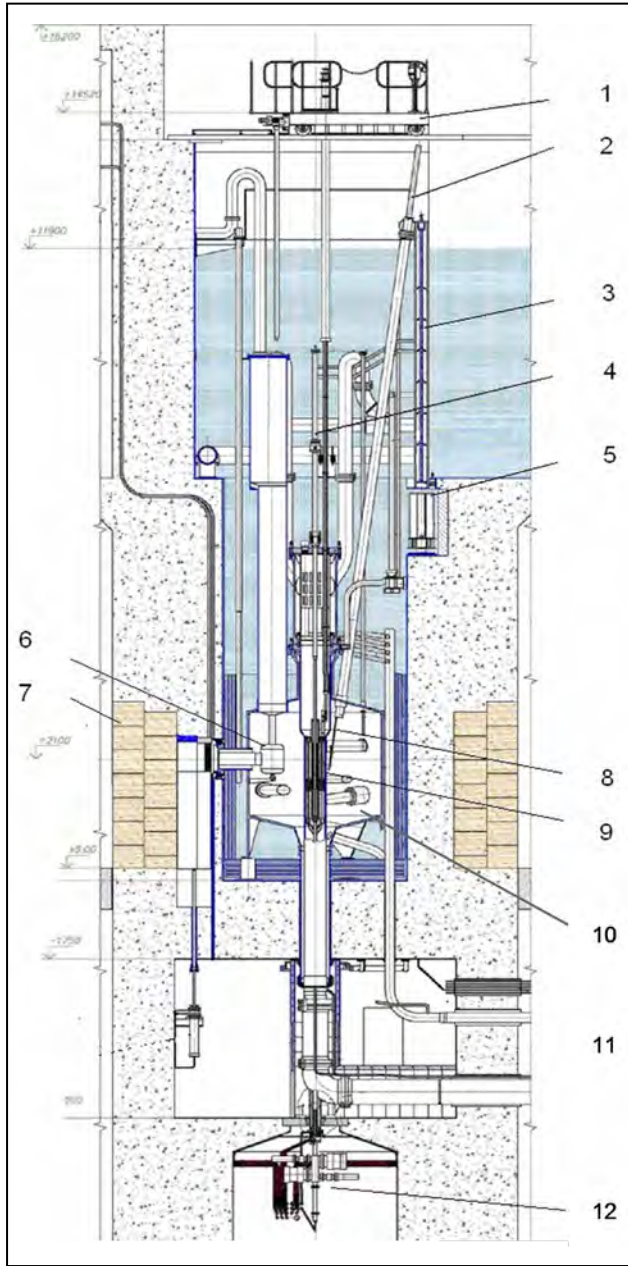
зоны ~ 50 л, окруженный тяжеловодным отражателем (рис. 2–4). Максимальная невозмущенная плотность потока тепловых нейтронов достигает  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в центральной водной полости и  $1,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в отражателе при тепловой мощности реактора 100 МВт (табл. 1).

Концепция реактора ПИК, несмотря на то, что была выработана в конце 60-х гг., до сих пор определяет современные тенденции реакторостроения.

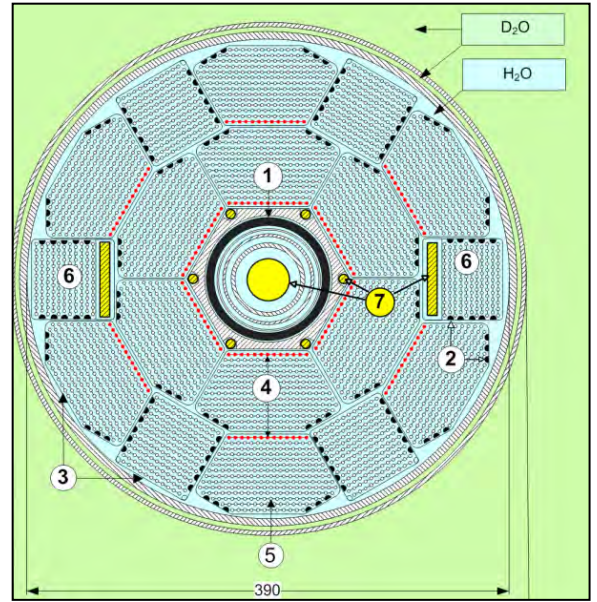
Основная схема реактора, а именно: охлаждаемая легкой водой активная зона и тяжеловодный отражатель, впервые примененная в проекте реактора ПИК (защищенная авторским свидетельством в 1976 г.), признана в настоящий момент наиболее эффективной и технологичной.



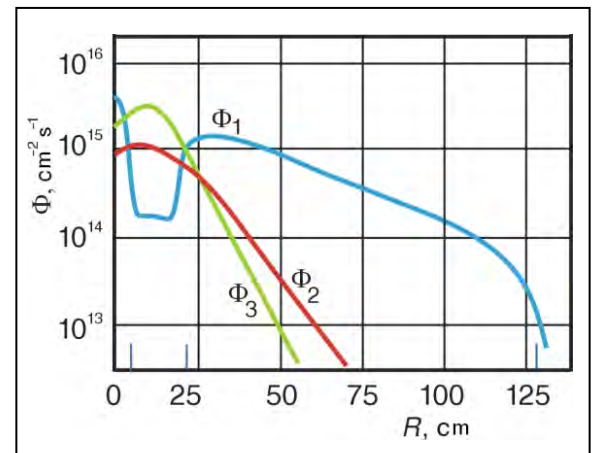
**Рис. 1.** Общий вид реакторного комплекса ПИК



**Рис. 2.** Вертикальный разрез реактора ПИК:  
 1 – машина перегрузочная;  
 2 – привод стержня;  
 3 – гидрозатвор;  
 4 – центральный экспериментальный канал;  
 5 – перегрузочный барабан;  
 6 – источник холодных нейтронов;  
 7 – защита разборная;  
 8 – поглощающий стержень;  
 9 – корпус реактора с активной зоной;  
 10 – отражатель тяжелой воды;  
 11 – горизонтальный экспериментальный канал;  
 12 – привод шторок



**Рис. 3.** Активная зона реактора ПИК (с эксплуатационным комплектом ТВС):  
 1 – поглощающие шторки из гафния;  
 2 – стержни выгорающего поглотителя  $Gd_2O_3 + ZrO_2$ ;  
 3 – циркониевые чехлы ТВС;  
 4 – твэлы с уменьшенным содержанием топлива (0,48 номинального);  
 5 – твэлы с номинальным содержанием топлива;  
 6 – ТВС с образцами-свидетелями материала корпуса;  
 7 – облучаемые образцы



**Рис. 4.** Распределение потока нейтронов в отражателе:  
 Ф1 < поток тепловых нейтронов,  $E < 0,6$  кэВ;  
 Ф2 < поток надтепловых нейтронов,  $0,6$  кэВ <  $E < 5$  кэВ;  
 Ф3 < поток быстрых нейтронов,  $E > 5$  кэВ



Таблица 1. Основные нейтронно-физические и технические характеристики реактора ПИК

Наименование	Величина
Тепловая мощность	100 МВт
Объем активной зоны	50 л
Тип твэлов	Стержневой
Топливо	UO <sub>2</sub> + Ве-бронза
Обогащение топлива	90 %
Содержание <sup>235</sup> U в активной зоне	27,2 кг
Количество ТВС в активной зоне	18 шт.
Высота активной зоны	500 мм
Замедлитель / теплоноситель	Дистиллят H <sub>2</sub> O
Отражатель: • боковой • торцевой	D <sub>2</sub> O H <sub>2</sub> O
Максимальная плотность потока тепловых нейтронов в отражателе	$1,3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Максимальная плотность потока тепловых нейтронов в ловушке	$5,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Кампания	≤ 30 сут
Расход воды I контура через активную зону	2 400 м <sup>3</sup> /ч
Давление в I контуре	5,0 МПа
Температура теплоносителя I контура: • на входе в активную зону • на выходе из активной зоны	50 °С 86 °С
Экспериментальные каналы: • центральный (ЦЭК) • горизонтальные (ГЭК) • наклонные (НЭК) • вертикальные (ВЭК)	1 шт. 10 шт. 6 шт. 6 шт.

По конструкции, физическим и техническим характеристикам реактор ПИК остается непревзойденным в реакторостроении, а с точки зрения экспериментальных целей станет, после пуска, уникальной базой научных исследований в России.

Экспериментальные возможности реактора ПИК определяются не только высокой интенсивностью нейтронных пучков, но также наличием источников холодных и ультрахолодных нейтронов. Таким образом, по отношению к существующим исследовательским реакторам реактор ПИК предоставит

уникальные возможности как для углубления исследований, проводимых сейчас в стране с использованием нейтронов, так и для проведения новых исследований, недоступных в настоящее время на отечественных исследовательских реакторах.

По своим параметрам и экспериментальным возможностям реактор ПИК превосходит все действующие исследовательские реакторы (табл. 2), в т. ч. единственный в мире аналог – реактор HFR (ИЛЛ).

Реактор ПИК имеет 1 центральный, 10 горизонтальных, 6 наклонных и 6 вертикальных каналов для вывода пучков нейтронов и облучения образцов. Нейтронные системы позволяют транспортировать нейтроны к экспериментальным установкам, расположенным в нейтронном зале в бесфоновых условиях. Всего в 3 экспериментальных залах комплекса планируется обеспечить до 50 позиций на пучках, на которых одновременно могут вести эксперименты различные исследовательские группы. На рис. 5 представлена схема экспериментальных каналов реактора ПИК; на рис. 6, 7 – экспериментальный зал горизонтальных каналов и нейтронный зал соответственно.

Расположение основных зданий РК ПИК показано на рис. 8, где желтым цветом обозначены здания

пускового комплекса № 1 (ПК-1), красным – здания пусковых комплексов № 2,3 (ПК-2, ПК-3).

Состав существующих и вновь сооружаемых зданий и сооружений в ходе реализации проекта «Модернизация инженерно-технических систем обеспечения эксплуатации реактора ПИК и работы его научных станций» приведен в табл. 3.

В проектный объем работ по модернизации (вид строительства – реконструкция с расширением) входят как существующие, введенные в эксплуатацию либо законченные строительством здания и сооружения, так и новые. Большая часть существующих зданий и сооружений построена и оснащена в настоящее время системами инженерного обеспечения. Основными направлениями модернизации являются:

**Таблица 2.** Сравнительные характеристики высокопоточных исследовательских ядерных реакторов

Установка, местоположение	Год ввода в эксплуатацию	Тепловая мощность, МВт	Максимальная плотность потока, см <sup>-2</sup> · с <sup>-1</sup>	Количество станций на пучках
ПИК Гатчина, Россия	2018 (план)	100	$5,0 \cdot 10^{15}$	50
HFR Гренобль, Франция	1971	58	$1,5 \cdot 10^{15}$	40
HFIR Окридж, США	1965 (2007 – после модернизации)	85	$3,0 \cdot 10^{15}$	15
FRM-II Мюнхен, Германия	2005	20	$0,8 \cdot 10^{15}$	27
CARR Пекин, Китай	2010	60	$0,8 \cdot 10^{15}$	6
CMRR Милян, Китай	2004	20	$0,3 \cdot 10^{15}$	15
OPAL Сидней, Австралия	2006	20	$0,4 \cdot 10^{15}$	10
ВВР-М Гатчина, Россия	1959	18	$0,4 \cdot 10^{15}$	16

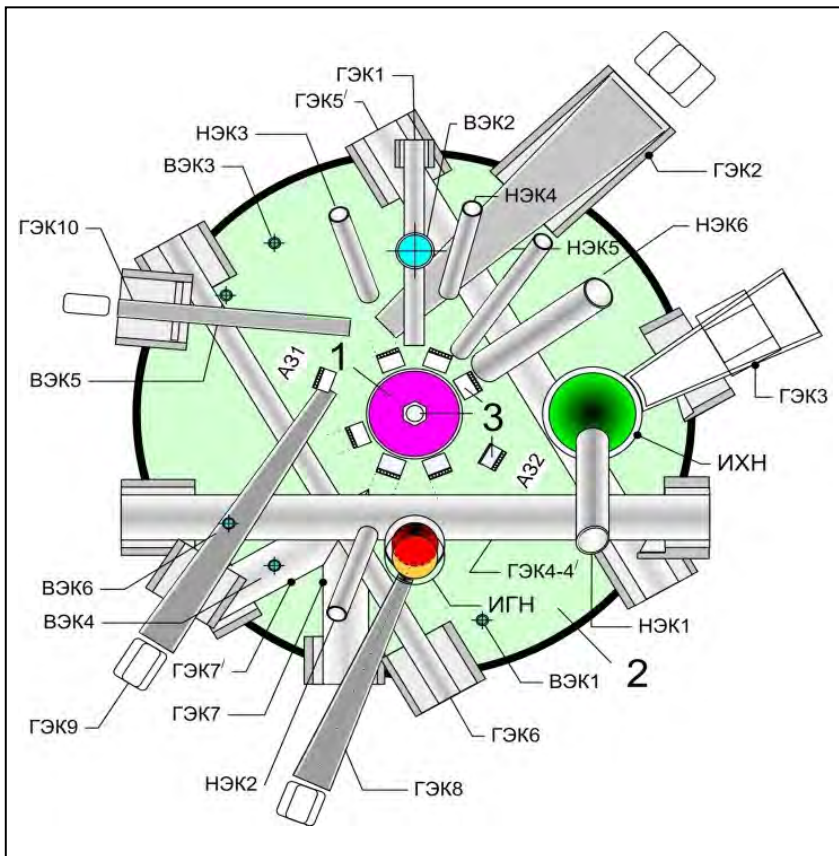
- дооборудование РК ПИК современными технологиями;
- доведение РК ПИК до требований современных норм безопасности в объеме технических заданий;
- замена морально и физически устаревшего оборудования (смонтированного более 15 лет назад), которое не соответствует федеральным нормам и правилам в области использования атомной энергии по результатам проведенных в 2010–2012 гг. специализированными организациями совместно с генеральным проектировщиком проекта технических обследований и мероприятий по подтверждению ресурса.

**Стоимость реализации проекта модернизации составляет 89,0 млн евро**, структура затрат по модернизации приведена в табл. 4.

В соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии РК ПИК классифицируется как комплекс с исследовательской ядерной установкой.

Организацией-разработчиком проекта РК ПИК – генеральным проектировщиком – является ОАО «СПИИ «ВНИПИЭТ» (Сосновый Бор Ленинградской области). Организацией – главным конструктором реакторной установки – АО «НИКИЭТ» (Москва). Генеральным подрядчиком строительства РК ПИК в составе 1, 2, 3-го пусковых комплексов – ЗАО «Концерн Титан-2» (Сосновый Бор Ленинградской области).

Генеральным проектировщиком проекта модернизации является ЗАО «Альянс-Гамма» (Павлов Посад Московской области). Функции застройщика, технического заказчика и эксплуатирующей организации выполняет НИЦ КИ ПИЯФ (Гатчина Ленинградской области). Функцию государственного заказчика строительства и главного распорядителя бюджетных средств выполняет НИЦ «Курчатовский институт», организация-учредитель – НИЦ КИ ПИЯФ.



**Рис. 5.** Схема экспериментальных каналов реактора ПИК:  
 1 – активная зона;  
 2 – отражатель D<sub>2</sub>O;  
 3 – рабочие органы СУЗ



Рис. 6. Экспериментальный зал горизонтальных каналов



Рис. 7. В рамках сотрудничества с исследовательским центром Геестхакта установка SANS-2 доставлена к месту своего назначения – в нейтроноводный зал РК ПИК

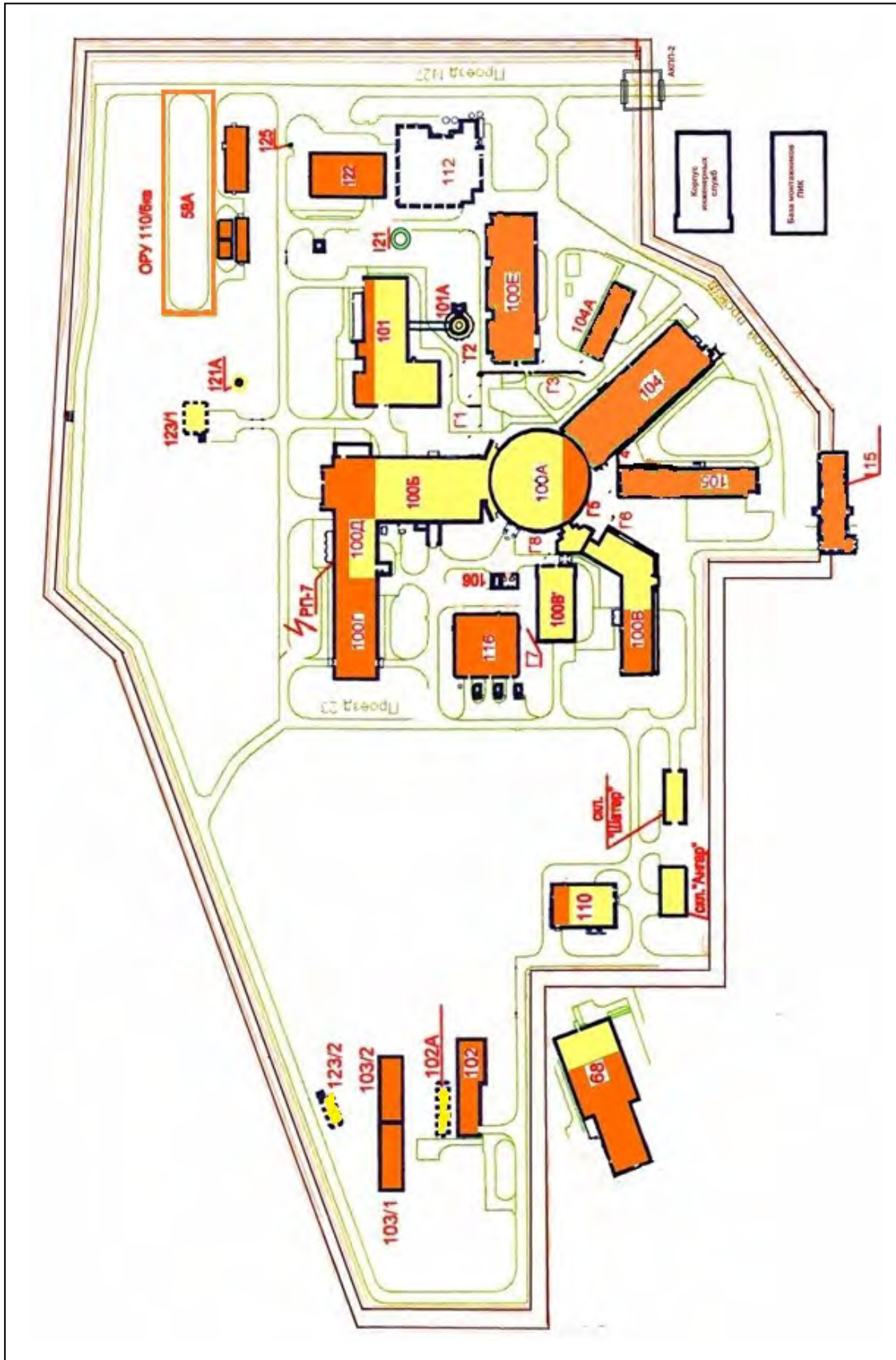


Рис. 8. Научно-техническая площадка реакторного комплекса ПИК

Таблица 3. Состав модернизируемого РК ПИК по зданиям и сооружениям

Наименование зданий	Назначение здания, сооружения	Строительные параметры здания, сооружения	Примечание
100А	Здание 100 блок «А» (блок реакторной установки) с подземным этажом	Строительный объем – 89 686,0 м <sup>3</sup> , в т. ч. подземной части – 22 760 м <sup>3</sup> , площадь застройки – 2 706,8 м <sup>2</sup> , общая площадь – 12 796,9 м <sup>2</sup>	
100Б	Здание 100 блок «Б» (технологический блок I контура)	Строительный объем – 105 600 м <sup>3</sup> , площадь застройки – 3 228,1 м <sup>2</sup> , общая площадь – 11 535,1 м <sup>2</sup>	
100В	Здание 100 блок «В» (блок санпропускника) с башней-вставкой и подземными этажами	Общий строительный объем – 21 630 м <sup>3</sup> , общая площадь застройки – 1 510,2 м <sup>2</sup> , общая площадь – 5 970,6 м <sup>2</sup>	
100В`	Здание 100 блок «В» (приточный вентцентр)	Объем – 9 202 м <sup>3</sup> , общая площадь застройки – 970,5 м <sup>2</sup> , общая площадь – 1 646,0 м <sup>2</sup>	
100Д	Здание 100 блок «Д» (энергоблок)	Строительный объем – 15 618 м <sup>3</sup> , площадь застройки – 816,4 м <sup>2</sup> , общая площадь – 2 151,7 м <sup>2</sup>	
100Г	Здание 100 блок «Г» (технологический блок промконтура)	Строительный объем – 29 376 м <sup>3</sup> , площадь застройки – 1 422,4 м <sup>2</sup>	
101, Г1, Г2	Здание 101 (блок специальной вентиляции) с подземным этажом, пристройкой, галереей	Строительный объем – 40 713 м <sup>3</sup> , площадь застройки – 2 572,3 м <sup>2</sup> , общая площадь 4 938,8 м <sup>2</sup>	
101А	Здание 101А (вентиляционная труба)	Строительный объем – 3 346 м <sup>3</sup> , общая площадь застройки – 62,5 м <sup>2</sup>	
102	Здание 102 (насосная станция оборотного водоснабжения с камерой холодной воды (сооружение 102А) и павильоном переключения арматуры)	Площадь застройки здания 102 – 787,2 м <sup>2</sup> , площадь застройки сооружения 102А – 213,2 м <sup>2</sup> , строительный объем – 8 431 м <sup>3</sup>	
103/1,2	Сооружение 103/1,2 (градирни)	Площадь застройки сооружения 103/1 – 481 м <sup>2</sup> , площадь сооружения 103/2 – 481 м <sup>2</sup>	
110	Здание 110 (блок компрессорной станции сжатого воздуха высокого и низкого давления)	Строительный объем – 10 028 м <sup>3</sup> , площадь застройки – 902,7 м <sup>2</sup> , общая площадь – 965,9 м <sup>2</sup>	
121А,123/1	Комплекс очистных сооружений. Состав: сооружение 121А – подземное сооружение; сооружение 123/1 – регулирующая емкость, декантер, пескоотделитель, бензомаслоотделитель	Сооружение 121А – подземное сооружение d = 4,0 м, h = 8,1 м; сооружение 123/1 – строительный объем – 658 м <sup>3</sup> , площадь застройки – 212,1 м <sup>2</sup>	
123/2	Сооружение 123/2. Станция № 2 локальной очистки ливневых стоков	Сооружение 123/2 – строительный объем – 357 м <sup>3</sup> , площадь застройки – 176,7 м <sup>2</sup>	
122/1	Здание 122/1 (установка извлечения трития из тяжелой воды) с пристройкой разрядных рамп	Строительный объем – 19 120 м <sup>3</sup> , в т. ч. заглубленная часть – 4 190 м <sup>3</sup> , площадь застройки – 995 м <sup>2</sup>	новое строительство
116	Здание 116 (блок РДЭС, РПУ и ТМК) с галереей (Г8)	Строительный объем – 24 336 м <sup>3</sup> , площадь застройки – 1 299,7 м <sup>2</sup> , общая площадь – 4 599,8 м <sup>2</sup>	
122	Здание 122 (временное хранилище ЖРО с блочной трансформаторной подстанцией 122А)	Строительный объем – 18 428 м <sup>3</sup> , площадь застройки – 1 067,7 м <sup>2</sup> , общая площадь – 2 823,8 м <sup>2</sup>	

Окончание табл. 3

Наименование зданий	Назначение здания, сооружения	Строительные параметры здания, сооружения	Примечание
122Б	Трансформаторная подстанция здания УИТ 122Б	Общая площадь – 61 м <sup>2</sup>	новое строительство
122/2	Сооружение 122/2 (площадка на 4 ресивера и газификатор для УИТ)	Площадь застройки – 75 м <sup>2</sup>	новое строительство
Г-9, Г-10	Галереи между зданиями 122, 122/1 и 100Е (Г-9, Г-10)	Галерея Г-9: общая площадь – 24,0 м <sup>2</sup> , площадь застройки – 27,0 м <sup>2</sup> , строительный объем – 114,48 м <sup>3</sup> . Галерея Г-10: общая площадь – 67,05 м <sup>2</sup> , площадь застройки – 74,76 м <sup>2</sup> , строительный объем – 313,56 м <sup>3</sup>	
Контрольные скважины	Контрольные скважины	5 штук, d = 89 мм, глубиной 8 м каждая	
Наружные сети	Наружные сети	Хозяйственно-питьевой противопожарный водопровод площадки НТП – 908 м, тепловая сеть на ПИК – 708,4 м, телефонная канализация – 1 054 м, канализация бытовая – 2 062,2 м, канализация ливневая – 4 884,9 м, наружные кабельные сети и наружное освещение – 24 461 м, спецканализация НТП – 1 098 м, автодороги, проезды и площадки – 40 501 м <sup>2</sup>	частично новое строительство
Здание склада «шатер»	Здание-склад «шатер»	Общая площадь 355,5 м <sup>2</sup>	
Здание склада «ангар-шатер»	Здание-склад «ангар-шатер»	Общая площадь 508,2 м <sup>2</sup>	

Проект модернизации (89,0 млн евро) состоит из следующих основных направлений его реализации:

- системы, важные для безопасности (СВБ) – модернизация инженерно-технических систем реактора с целью приведения их в соответствие требованиям современных норм безопасности (15,0 млн евро);
- системы по обращению с радиоактивными веществами (РВ) и радиоактивными отходами (РАО) – модернизация оборудования систем обращения с радиоактивными веществами и радиоактивными отходами в режимах нормальной эксплуатации и при нарушениях нормальной эксплуатации, включая проектные аварии (3,1 млн евро);

- системы по обращению с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ), свежим ядерным топливом (СЯТ), твердыми радиоактивными отходами (ТРО), модернизация комплекса «защитных» (горячих) камер и пневмопочты и грузоподъемных механизмов (27,4 млн евро);
- сети мониторинга инженерных систем (СМИС) зданий и сооружений, реакторной технологии (РАКУРС), локальных вычислительных сетей (ЛВС) (9,4 млн евро);
- установка извлечения трития (УИТ) – вновь сооружаемая установка извлечения трития и удаления протия из тяжелой воды отражателя реактора ПИК (34,1 млн евро).

Таблица 4. Состав затрат по проекту модернизации

Виды затрат	Затраты по сводному сметному расчету строительства, тыс. руб. (в ценах 3-го кв. 2014 г.)	Затраты, EUR (по курсу на 3 кв. 2014 г.)
Строительные работы	172 710	3 598 127
Электротехнические работы	681 526	14 166 530
Сантехнические работы	92 317	1 923 275
Технологический монтаж	3 294 307	68 664 155
Пусконаладочные работы (вхолостую)	29 027	604 728
<b>Итого</b>	<b>4 269 887</b>	<b>88 956 815</b>

В мае 2013 г. президент Российской Федерации В. В. Путин поддержал предложение НИЦ КИ о создании приборной базы РК ПИК (рис. 9). С июля 2013 г. НИЦ КИ ПИЯФ начал разрабатывать концепцию комплекса экспериментальных установок (станций) и его инженерной инфраструктуры.

Были образованы 12 рабочих групп из сотрудников НИЦ КИ ПИЯФ и наших коллег из исследовательских центров России и Европы. Было проведено 12 национальных и международных рабочих совещаний по тематике концепции. Деятельность рабочих групп проходила по следующим направлениям.

1. Экспериментальные станции для физики конденсированного состояния и молекулярной биологии.

- 1.1. Дифрактометры.
- 1.2. Спектрометры неупругого рассеяния.
- 1.3. Установки малоуглового рассеяния.
- 1.4. Рефлектометры.

2. Экспериментальные станции для ядерной физики.

2.1. Пучковые позиции и станции для исследований с ультрахолодными нейтронами.

2.2. Пучковые позиции и станции для исследований с холодными нейтронами.

2.3. Станции для ядерной спектроскопии.

3. Инфраструктура экспериментальных станций.

3.1. Источники холодных и ультрахолодных нейтронов второй очереди.

3.2. Создание комплекса нейтронотводов.

3.3. Детекторные технологии.

3.4. Измерительно-вычислительный центр.

3.5. Системы окружения образца и молекулярно-биологическая лаборатория.

В соответствии с общей концепцией рабочими группами были представлены рекомендации по использованию и модернизации 12 имеющихся экспериментальных установок и концептуальные и технические рекомендации, необходимые для проведения проектных работ, конструирования и создания в рамках инвестиционного проекта «Создание приборной базы реакторного комплекса ПИК» 20 экспериментальных установок.

На базе РК ПИК планируется создание Международного центра нейтронных исследований (МЦНИ). Нашим стратегическим партнером является Германия. В 2010 г. было подписано соглашение о сотрудничестве с Исследовательским центром Геестхахта, в 2014 г. – соглашение с Исследовательским центром Юлиха, который является координатором участия научных центров Германии в создании МЦНИ в Гатчине (рис. 10). Реактор ПИК, наряду с реактором HFR (ИЛЛ) и строящимся в Швеции (Лунд) импульсным источником на основе протонного ускорителя ESS, включен в качестве базы для исследований в стратегии развития нейтронных наук в Европе. Взаимодействие с научными центрами Германии было обсуждено на рабочем совещании в октябре 2013 г. в Гатчине.



Рис. 9. Визит президента Российской Федерации В. В. Путина на РК ПИК в апреле 2013 г.





**Рис. 10.** Рамочное соглашение о сотрудничестве было подписано 16 июня 2014 г. между Исследовательским центром Юлиха и НИЦ КИ. Проф. М. В. Ковальчук и проф. С. Шмидт при подписании рамочного соглашения о сотрудничестве

Формирование научной программы и программы создания приборной базы ПИК проходит в координации с другими нейтронными центрами, в первую очередь с ОИЯИ (Дубна), Исследовательским центром Юлиха на базе реактора Технического университета (Мюнхен, Германия), ILL (Гренобль, Франция) и ESS (Лунд, Швеция). Мы предполагаем участие физиков Европы, в первую очередь Германии и Венгрии, в дальнейшей разработке концепции и затем в проектировании и создании экспериментальных станций. Собственно, с реализации программы создания комплекса экспериментальных станций на реакторе ПИК и начинается создание МЦНИ.

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

В качестве международного экспертного совета будет выступать Международный консультативный комитет НИЦ КИ по фотонным и нейтронным исследованиям, сопредседателями которого являются профессор Х. Дош (DESY, Германия) и член-корреспондент РАН М. В. Ковальчук (НИЦ КИ). Председателем подкомитета по нейтронным наукам назначен профессор С. Шмидт (ИЦ Юлиха, Германия). Следующим этапом станет обсуждение предложенных экспериментальных станций и их размещение на нейтронных каналах. Первые публичные обсуждения состоялись в октябре 2014 г. на Ученом совете НИЦ КИ ПИЯФ и на Совещании по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах (27–31 октября 2014 г., Петергоф). После ряда других обсуждений подготовленные материалы поступят на утверждение Международного консультативного комитета НИЦ КИ по фотонным и нейтронным наукам. Первое заседание подкомитета по нейтронным наукам намечено провести в начале марта 2015 г.

1. Реакторный комплекс ПИК (в 4 томах). Научные редакторы М. В. Ковальчук, В. Л. Аксенов. НИЦ КИ ПИЯФ, Гатчина, 2014.  
 2. Ковальчук М. В., Аксенов В. Л. // Сб. докл. III Межд. научн.-техн. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». М.: ОАО «НИКИЭТ», 2014. Т. 1. С. 103–113.

## Протонный синхроциклотрон СЦ-1000

*Е. М. Иванов*

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

Протонный синхроциклотрон СЦ-1000 (рис. 1) на энергию протонов 1 000 МэВ с интенсивностью выведенного протонного пучка 1 мкА является одной из базовых установок НИЦ КИ ПИАФ.

Введен в действие в 1970 г. За время эксплуатации синхроциклотрон был в значительной мере модернизирован.

Научно-исследовательский комплекс на базе СЦ-1000 используется для исследований в области физики элементарных частиц, структуры атомного ядра и механизма ядерных реакций, физики твердого тела, а также в области прикладной физики и для ядерно-медицинских исследований.

В 2014 г. синхроциклотрон НИЦ КИ ПИАФ отработал 2 784 часа, и были проведены следующие работы.

1. Выполнена модернизация системы однооборотного сброса протонного пучка.

Система однооборотного сброса (рис. 2) предназначена для быстрого сброса пучка протонов с энергией 1 000 МэВ на внутреннюю нейтронообразующую мишень на выводных радиусах

синхроциклотрона. На основе системы быстрого однооборотного сброса пучка на синхроциклотроне НИЦ КИ ПИАФ создан нейтронный спектрометр по времени пролета ГНЕЙС (Гатчинский НЕЙтронный Спектрометр). Для работы системы должны выполняться следующие условия: время нарастания фронта отклоняющего напряжения должно быть менее 75 нс; амплитуда напряжения  $\sim 120$  кВ. Для получения отклоняющего импульса напряжения с такими параметрами импульс тока в первичной обмотке трансформатора должен быть больше 3 000 А при скорости нарастания тока  $\geq 10$  000 А/мкс. Используемые ранее в установке 4 тиратрона типа ТГТИ-700/25 (работающие параллельно) не позволяли получить фронт меньше

### Технические параметры синхроциклотрона СЦ-1000

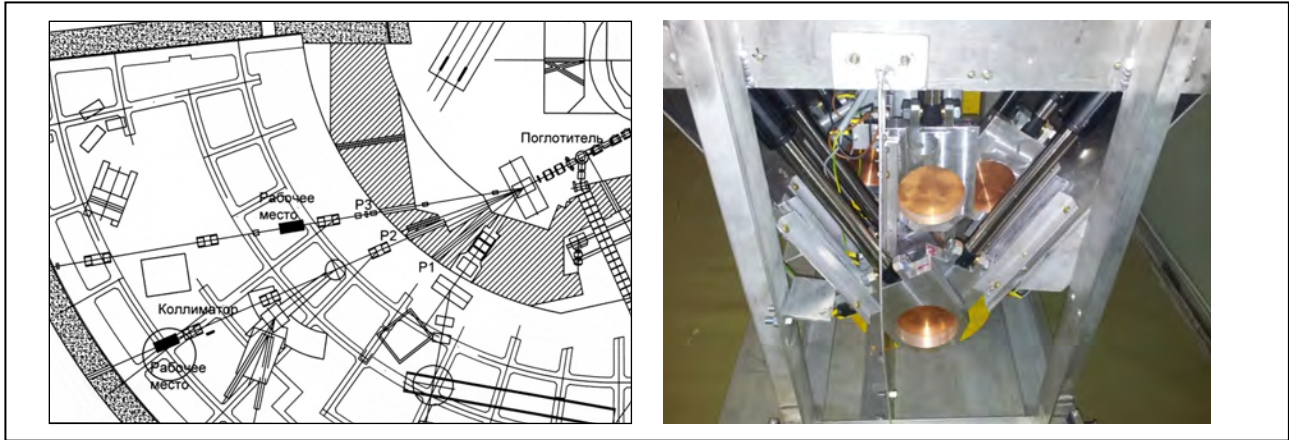
Энергия ускоренных протонов	1 000 МэВ
Число протонных пучков	3
Интенсивность протонных пучков	до $6 \cdot 10^{12}$ p/c
Пучки вторичных частиц	нейтроны, пи-мезоны, мюоны
Индукция в центре магнита	1,9 Тл
Вес магнита	7 800 т
Время работы на физический эксперимент	до 3 600 часов в год
Обслуживающий персонал	70 человек



Рис. 1. Внешний вид синхроциклотрона на энергию протонов 1 000 МэВ



Рис. 2. Система однооборотного сброса



**Рис. 3.** Тракты протонных пучков: P2 с энергией 1 000 МэВ, P3 – для пучков переменной энергией 50–1 000 МэВ (слева); конструкция для дистанционной смены длины поглотителя (справа)

100 нс из-за внутреннего разброса параметров. В модернизируемой установке используется всего лишь один тиратрон: ТГИ2-5к/50. Работа по модернизации системы однооборотного сброса пучка потребовала новых расчетов и изменения конструкции установки. Переход на современную элементную базу (тиратрон ТГИ2-5к/50) позволил получить фронт отклоняющего напряжения в требуемом диапазоне 50–60 нс при амплитуде ~ 120 кВ. Модернизация системы однооборотного сброса пучка позволила существенно упростить и ускорить настройку системы, а также увеличить ее надежность.

2. Разработан проект модернизации систем синхроциклотрона.

3. Проводится модернизация комплекса протонной терапии на пучке 1 000 МэВ.

4. Ведутся работы по созданию центра радиационных испытаний электронной компонентной базы (ЭКБ). Выполнены расчеты и оптимизированы параметры нового тракта P2 с поглотителем из меди в диапазоне энергий 50, 100–1 000 МэВ с шагом 100 МэВ, предназначенного для испытаний ЭКБ. Рассчитаны и оптимизированы параметры пучков в диапазоне энергий 50, 100–1 000 МэВ

с шагом 100 МэВ для тракта P3 (рис. 3, слева). Созданы 2 стенда для испытаний на протонах и нейтронах, системы диагностики и мониторингования для протонных и нейтронных пучков; дистанционно управляемый поглотитель энергии протонного пучка (рис. 3, справа).

Основные направления фундаментальных и прикладных исследований, выполненные в 2014 г. на СЦ-1000, представлены в табл. В 2014 г.

Ускорительным отделом ОГР выполнено 8 договорных работ по исследованию радиационной стойкости ЭКБ.

**Таблица.** Основные направления фундаментальных и прикладных работ на СЦ-1000

Основные направления	%
Исследование новых материалов методом вращения спина	20
Исследование короткоживущих изотопов (лаб. ИРИС)	14
Договорные работы	19
Усовершенствование ускорителя и трактов	14
Исследование ядерной материи на спектрометре МАП	10
Каналирование протонов	7

1. Artamonov S. A., Amerikanov D. A., Gorkin G. I., Gres V. P., Ivanov E. M., Riabov G. A. // Proceedings of XX Int. Conf. Beam Dynamics & Optimization. 2014. P. 18–19.

2. Veresov O. L., Gavrish Yu. N., Galchuk A. V., Grigorenko S. V., Grigoriev V. I., Korolev L. E., Kuzhlev A. N., Mudrolyubov V. G., Strokach A. P., Tsygankov S. S., Efremov D. V., Artamonov S. A., Ivanov E. M., Ryabov G. A. The C-80 Cyclotron System. Current Status // ВАНТ. 2014. № 3(91). С. 3–7.

3. Бакиров Л. Р., Анашин В. С., Перебейнос А. В., Чубунов П. А., Козюков А. Е., Воробьев А. С., Иванов Е. М., Щербаков О. А. // Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. «Радиационная стойкость электронных систем». М. : НИЯФ МИФИ, 2014 (в печати).

4. Воробьев А. С., Иванов Е. М., Щербаков О. А., Бакиров Л. Р., Анашин В. С., Перебейнос А. В. // Рос. науч.-техн. конф. «Пути решения задач обеспечения современной радиоэлектронной аппаратуры надежной электронной компонентной базой». 2014.

## Циклотрон Ц-80

*Е. М. Иванов*

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

В течение ряда лет в НИЦ КИ ПИАФ проводились разработка и строительство изохронного циклотрона для ускорения отрицательных Н<sup>-</sup>-ионов до энергии 80 МэВ при токе пучка до 200 мкА.

Предложение по строительству в НИЦ КИ ПИАФ циклотрона Ц-80 было сформулировано Ускорительным отделом в 1990 г., а его проект был доложен на Международной конференции по ускорителям в Ванкувере (Канада, 1992). Для того периода времени предложенная концепция Ц-80 была революционной, а идеи, положенные в основу его конструкции, достаточно оригинальны.

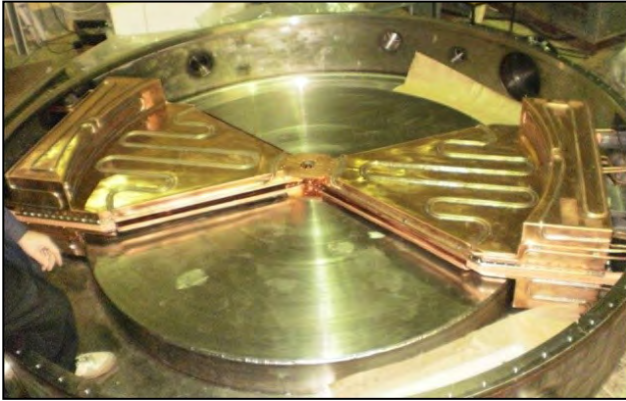
Циклотронов, ускоряющих отрицательные ионы водорода, в то время практически не существовало, а необходимые для этого ионные источники с вертикальной инжекцией еще только разрабатывались.

Отметим основные особенности Ц-80:

- крutosпиральная геометрия магнитного поля, позволяющая получить энергию 80 МэВ при диаметре полюса всего в 2 м;
- оригинальная конструкция ВЧ-ускоряющей системы с двумя дуантами, работающими на второй гармонике частоты обращения  $f_0 = 20,6$  МГц,



Рис. 1. Общий вид циклотрона Ц-80



**Рис. 2.** Вакуумная камера и ВЧ-ускоряющая система с двумя дуантами

позволила разместить ускоряющую систему полностью внутри вакуумной камеры;

- компактные габариты при рекордных соотношениях «энергия – диаметр полюса – энергопотребление»;

- источник инжектируемых H<sup>-</sup>-ионов с системой вертикального спирального инфлектора и системой транспортировки расположен под ярмом магнита;

- система 100 %-ного вывода протонов из камеры основана на принципе перезарядки на графитовой фольге. Перемещение фольги по радиусу позволяет изменять энергию вывода от 40 МэВ до 80 МэВ;

- защитный пояс из графита, размещенный по окружности внутри вакуумной камеры, защищает стенки камеры от радиационного воздействия протонов, образующихся в процессе электродиссоциации и перезарядки ускоряемых ионов;

- подъем верхней балки магнита при помощи четырех синхронно работающих домкратов, предусмотренный для доступа к внутренним устройствам вакуумной камеры;

- управление и контроль Ц-80 полностью компьютеризованы (рис. 1, 2).



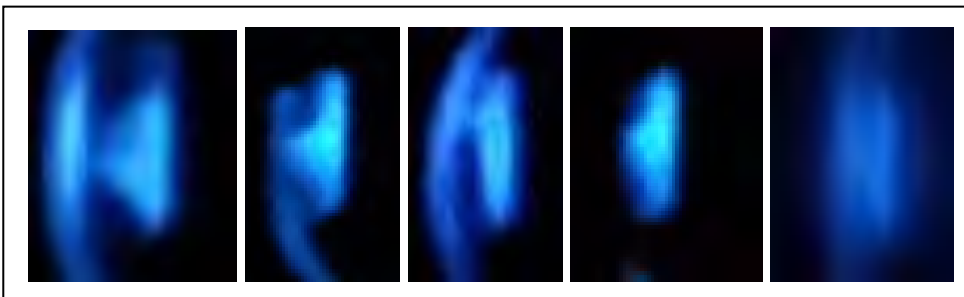
**Рис. 3.** Директор НИЦ КИ ПИЯФ В. Л. Аксенов и директор АО «НИИЭФА» О. Г. Филатов

Силами Ускорительного отдела НИЦ КИ ПИЯФ было рассчитано и сформировано магнитное поле, отмакетированы все его подсистемы и совместно с НИИЭФА разработано проектное задание. Финансирование проекта началось только в 2010 г.

В 2014 г. в Ускорительном отделе совместно с НИИЭФА проводилась настройка и оптимизация систем Ц-80 для получения проектных параметров.

В результате 5 декабря 2014 г. осуществлен запуск Ц-80, получен ускоренный пучок H<sup>-</sup>-ионов до радиуса 30 см интенсивностью 30 мкА и энергией 10 МэВ, что подтверждает работоспособность циклотрона (рис. 3, 4). Для продолжения работ требуется получение лицензии на работу с Ц-80 как с источником ионизирующего излучения.

Циклотрон Ц-80 в основном предназначен для производства радиоизотопов (для этого в подвале под Ц-80 осуществляется реализация проекта РИЦ (Радиоактивные Изотопы Циклотрона), а также для лечения онкологических заболеваний органов зрения. На пучке Ц-80 будут проводиться и испытания электронной компонентной базы для авиации и космоса.



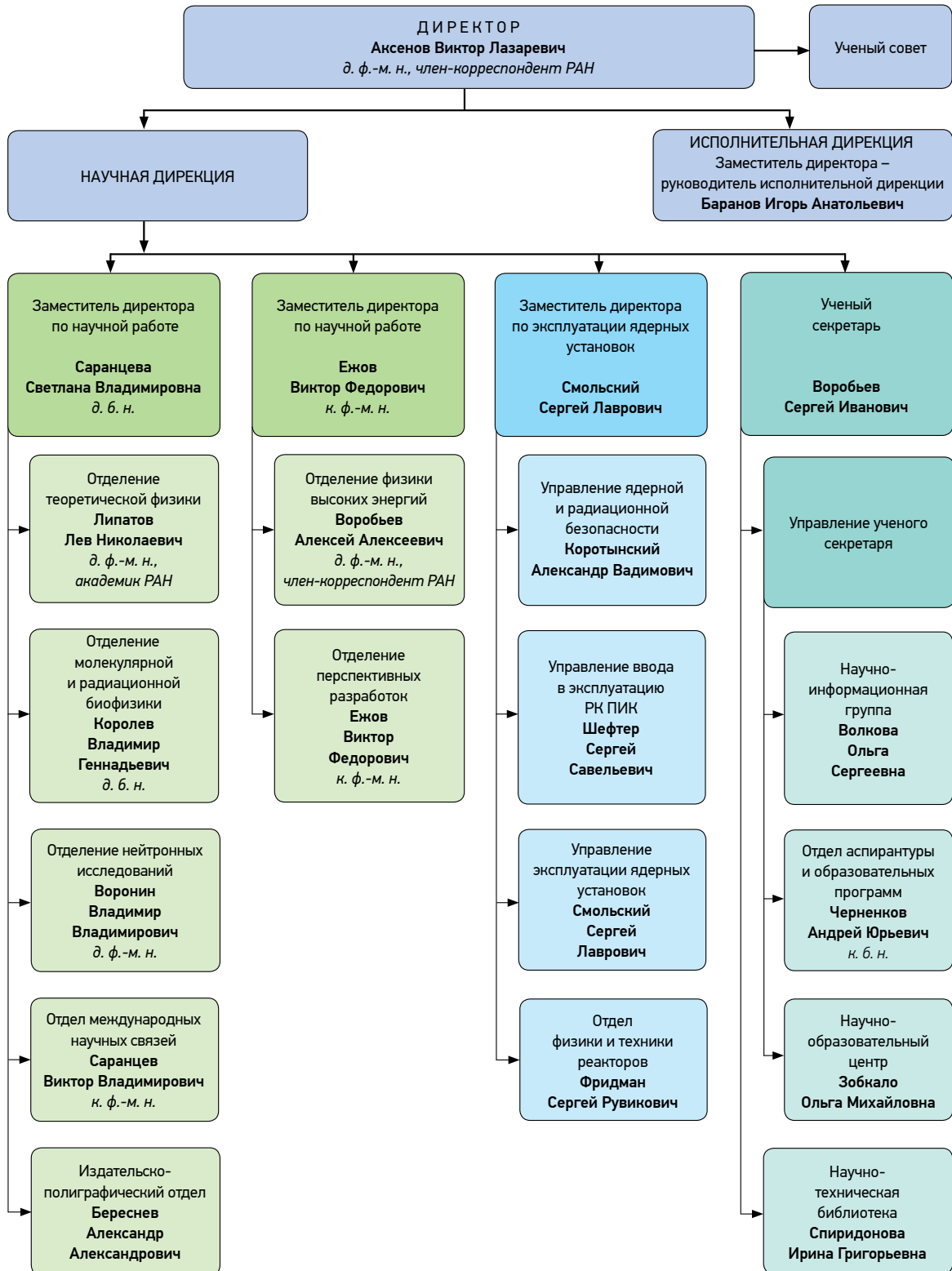
**Рис. 4.** Снимки пучка H<sup>-</sup>-ионов на кварцевом стекле внутри камеры. Получены 17.12.2014 г.



## Научно-организационная деятельность

- 152 Организационная структура управления  
НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»
- 153 Кадровый состав Института
- 156 Количественные показатели научной деятельности
- 157 Награды. Премии
- 159 Научно-технические советы, действующие в 2014 году
- 160 Семинары
- 162 Конференции
- 165 Визиты
- 167 Образовательная деятельность
- 171 Памяти ушедших в 2014 году

## Организационная структура управления НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «ПИАФ»





## Кадровый состав Института

### Численность сотрудников

Сотрудники	2014
Всего без учета совместителей	1 912
Всего научных сотрудников	511
<i>Из них с должностью</i>	
руководителя	50
главного научного сотрудника	12
ведущего научного сотрудника	54
старшего научного сотрудника	185
научного сотрудника	131
младшего научного сотрудника	55
прочие научные сотрудники	25
<i>С ученой степенью</i>	
доктора наук	76
кандидата наук	263
<i>С ученым званием</i>	
академика	1
члена-корреспондента	2
профессора	15
доцента (с. н. с.)	124

### 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	29	11	6	12
Главные научные сотрудники	12	0	5	7
Ведущие научные сотрудники	54	10	20	24
Старшие научные сотрудники	185	24	32	129
Научные сотрудники	131	23	23	85
Младшие научные сотрудники	55	48	6	1

## Численность и средний возраст научных сотрудников по должностям

Должность	2014	
	Количество	Средний возраст
Главный научный сотрудник	12	79,08
Ведущий научный сотрудник	54	67,8
Старший научный сотрудник	185	64,07
Научный сотрудник	131	56,6
Младший научный сотрудник	55	29,4
Руководитель	50	71,4
Прочие научные сотрудники	25	27

## Научный стаж сотрудников

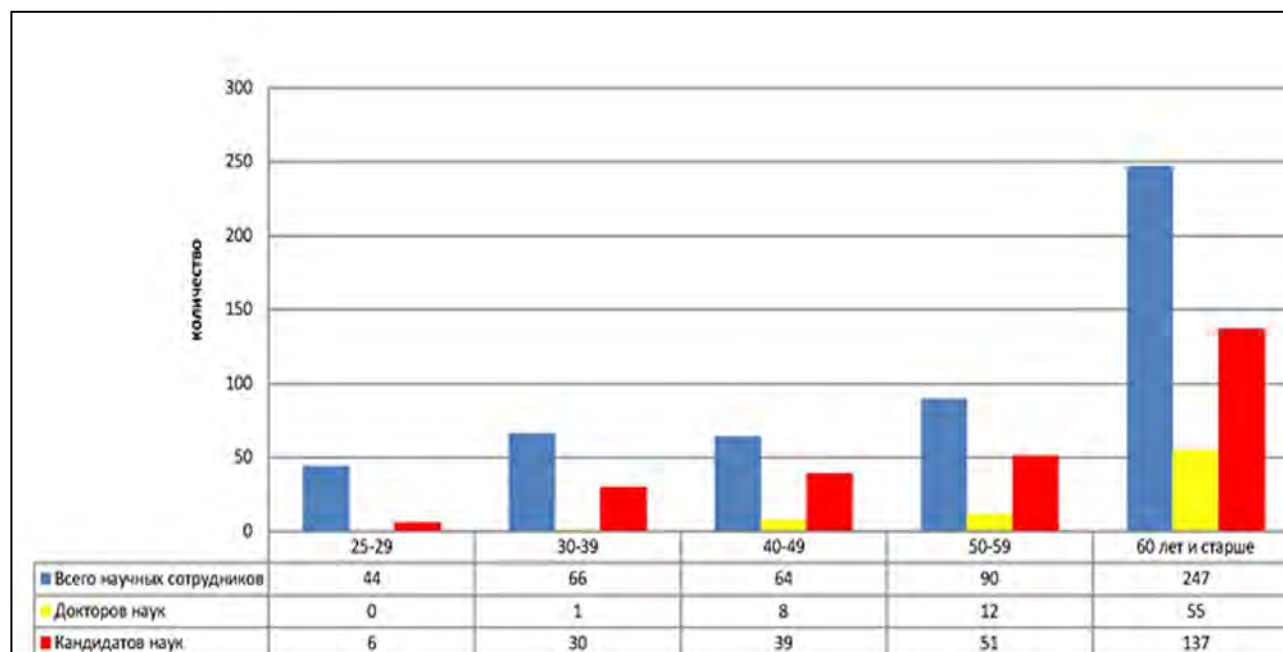
	Ставки
Научный персонал (СНИР)	479,4
Научно-технический персонал (инженеры, техники в научных отделах (ОТФ, ОНИ, ОМРБ, ОПР, ОФТР), ОМНС, УУС, библиотека)	262,8
Административно-управленческий персонал (дирекция, планово-финансовый отдел, бухгалтерия, управление по документообороту, общим и кадровым вопросам, правовое управление, первый отдел, начальники управления и т. п.)	181
Инженерно-технический персонал (инженеры, техники и специалисты всех категорий в ненаучных подразделениях)	512,4
Рабочие и младший обслуживающий персонал (рабочие всех профессий, уборщицы)	381,1
Водители	31,5
Охрана (контролеры и инспектор по режиму, оператор пульта)	94
Итого	1 942,2



### Возраст научных сотрудников

Сотрудники	Возраст, лет					
	20–29	30–39	40–49	50–59	60 и старше	средний возраст
Всего научных сотрудников	44	66	64	90	247	67,9
<i>С ученой степенью</i>						
доктора наук	–	1	8	12	55	67,4
кандидата наук	6	30	39	51	137	59,4
<i>С ученым званием</i>						
академика	–	–	–	–	1	74,5
члена-корреспондента	–	–	–	–	2	75
профессора	–	–	–	–	15	75,8
доцента (с. н. с.)	–	–	3	17	104	70,24
Не имеют ученой степени	38	35	17	27	55	49,6

### Численность научных кадров (кандидатов и докторов наук) с разбивкой по возрастам



## Количественные показатели научной деятельности

Всего Институтом ведется более 70 работ, поддержанных грантами РНФ, РФФИ, грантами Правительства РФ и т. д.

### Количество грантов

Гранты	2014
РФФИ	56
РНФ	5
Президента РФ	2
Правительства РФ	
Иные гранты	10

### Число публикаций

Публикации	2014
Отечественные	116
Зарубежные	403
Монографии	2

**Число защищенных диссертаций в 2014 г. – 8.**

### Патенты

В 2014 г. получено 13 патентов, из них патентов на изобретение – 4, патентов на полезную модель – 6, свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ – 3.

Подано заявок на выдачу патентов на изобретения, полезные модели – 10, из них на изобретение – 1, на полезную модель – 8, на программу для ЭВМ – 1.

## Награды. Премии

Общеинститутским достоянием является поддержка Российской Федерацией работ по исследованию подледникового озера Восток, что подтверждается вручением государственных наград (ордена Почета) организаторам и участникам проекта лично президентом Российской Федерации В. В. Путиным, в числе которых оказался сотрудник НИЦ КИ ПИЯФ – заместитель директора по научной работе, руководитель Отделения перспективных разработок В. Ф. Ежов.



В 2014 г. правительством Ленинградской области продолжалась поддержка 15 работ, ранее удостоенных премий и именных научных стипендий губернатора Ленинградской области, а также были удостоены 3 новые работы:

1. Премия губернатора Ленинградской области 1-й степени за лучшую научно-исследовательскую работу среди молодых ученых за исследовательскую работу «Химия элементов острова стабильности» (сотрудник Отделения нейтронных исследований Ю. А. Демидов);
2. Именная научная стипендия за работу «Агрегация альфа-синуклеина как возможный молекулярный механизм связи лизосомных болезней накопления и синуклеопатий» (д. б. н., в. н. с. Отделения молекулярной и радиационной биофизики С. Н. Пчелина);
3. Именная научная стипендия губернатора Ленинградской области за исследование «Разработка модели составной суперконформной струны и ее применение к описанию спектра мезонов» (м. н. с. Отделения теоретической физики А. Н. Семенова).

От года к году работы сотрудников Института охватывают все более разнообразные области, объединяя и применяя полученный опыт и знания в новых отраслях, формируя инновационные решения современных научных и производственных проблем. В этом году таким инновационным решением была признана разработка Б. Г. Турухано, который был награжден 2 серебряными медалями в конкурсе HI-TECH за лучшее инновационное изобретение. По пути инноваций движется и молодой сотрудник НИЦ КИ ПИЯФ О. С. Витюк, ставший победителем программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») на 2013–2014 гг.



На фото: Б. Г. Турухано

Стипендиатом Правительства Российской Федерации стал аспирант базовой кафедры НИЦ КИ ПИЯФ (кафедра ядерно-физических методов исследования СПбГУ) И. С. Дубицкий, работающий на базе НИЦ КИ ПИЯФ над диссертацией «Поведение локальной намагниченности в структурированной сети ферромагнитных наноузлов: численное моделирование и эксперимент».

## Научно-технические советы, действующие в 2014 году

### Совещательные органы дирекции

	Ученый совет	Президиум Ученого совета
Председатель	В. Л. Аксенов	В. Л. Аксенов
Зам. председателя	С. В. Саранцева	С. В. Саранцева
Секретарь	С. И. Воробьев	С. И. Воробьев
	НТС комплекса ядерных установок	НТС по информационным технологиям
Председатель	С. Л. Смольский	В. Ф. Ежов
Зам. председателя	К. А. Коноплев	Ю. Ф. Рябов
Зам. председателя	А. В. Коротынский	
Секретарь	С. Р. Фридман	С. Б. Олешко
	Редакционный совет	Библиотечный совет
Председатель	В. Л. Аксенов	С. В. Саранцева
Секретарь	С. В. Саранцева	
	Совет молодых ученых и специалистов	Инжиниринговый центр по технологическому перевооружению опытного производства
Председатель	Н. М. Чубова	Создана рабочая группа по разработке концепции организации центра. Руководитель – А. П. Булкин
Зам. председателя	С. И. Воробьев	
Зам. председателя	А. А. Дзюба	
Секретарь	О. С. Волнова	

При выработке стратегии развития Института учитываются рекомендации Совета при Президенте РФ по науке и образованию, в состав которого входит директор НИЦ КИ ПИЯФ В. Л. Аксенов, а также международного комитета по фотонным и нейтронным исследованиям НИЦ КИ.

### Состав международного комитета по фотонным и нейтронным наукам

Сопредседатели: член-корреспондент РАН М. В. Ковальчук (НИЦ КИ) профессор Х. Дош (DESY, Германия)	
Комитет по фотонным наукам	Комитет по нейтронным наукам
Франческо Сетте (ESRF, France) Жан Дайллант (Soleil, France) Мигель Анджел Гарсиа Аранда (Alba, Spain) Рафаэль Абэла (PSI, Switzerland) Кристоф Куитман (MAXIV, Sweden) Франц Пфайфер (Technical University of Munich, Germany – X-ray Imaging) Вацлав Холи (Charles University, Czech Republic – Diffraction) Наталья Новикова (Institute of Crystallography, Russia) Сергей Молодцов (EUXFEL, Russia – Germany) Дмитрий Новиков (DESY, Russia – Germany) Роберт Фейденханс (University of Copenhagen, Denmark – Surface diffraction) Марек Станкиевич (NSRC Solaris, Poland)	Председатель – Себастьян М. Шмидт (Julich Zentrum) Секретарь – Сергей Григорьев (НИЦ КИ ПИЯФ)  Анатолий Балагуров (Joint Institute for Nuclear Research) Олвин Вайрон (University of Glasgow) Андрю Харрисон (Diamond Light Source) Валерий Несвижевский (Institut Laue-Langevin) Уинфрид Петри (FRMII and MLZ) Дейтер Рихтер (Julich Centre for Neutron Science) Михаил Рычев (European XFEL) Хельмут Шобер (Institut Laue-Langevin) Андреас Шрейер (German Engineering Materials Science Centre) Ярослав Штроббах (Kurchatov Institute) Джэймс Йэк (European Spallation Source) Хартмут Цабель (Ruhr-Universitat Bochum)

## 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 по отделениям:*

- Отделение физики высоких энергий – каждый вторник;
- Отделение нейтронных исследований – 1 раз в месяц, по средам;
- семинар Отдела исследования конденсированных состояний – каждый вторник;
- Лаборатория рентгеновской и гамма-спектроскопии – 1 раз в квартал, по средам;
- семинар Отделения 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 2014 года

- **30 января.** С. М. Дунаевский (Отделение нейтронных исследований НИЦ КИ ПИЯФ) – «Зонные "ab-initio" расчеты твердых тел (обзор)».
- **5 марта.** В. Г. Королев (Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ КИ ПИЯФ) – «Хроматин, check-point, мутагенез».
- **6 марта.** В. А. Хозе (Университет Дарема, сотрудники НИЦ КИ ПИЯФ) – «Эксклюзивные процессы в центральной области в ЛНСb: мотивация и перспективы».
- **26 марта.** С. Б. Ланда (Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ КИ ПИЯФ) – «Метод динамического светорассеяния в биологии и медицине. Принципы и приложения».
- **27 марта.** В. Р. Шагинян (Отделение теоретической физики НИЦ КИ ПИЯФ) – «Ферми-конденсат и точно решаемые модели».
- **3 апреля.** Е. В. Антипов (Московский государственный университет, химический факультет) – «Новые катодные материалы для Li-ионных аккумуляторов».
- **9 апреля.** Ференц Мезей (Европейский импульсный источник нейтронов) – «Нейтронный источник ESS: состояние и концепция нового модератора».
- **10 апреля.** С. В. Григорьев (Отделение нейтронных исследований НИЦ КИ ПИЯФ) – «Киральная катастрофа модели Бака – Йенсена в  $Fe_{1-x}Co_xGe$ ».
- **23 апреля.** В. Т. Лебедев (Отделение нейтронных исследований НИЦ КИ ПИЯФ) – «Эндофуллерены: физико-химические свойства и перспективы биомедицинских применений».
- **24 апреля.** Я. В. Ракшун (Институт ядерной физики СО РАН им. Г. И. Будкера) – «Конфокальная рентгеновская микроскопия на пучках СИ» .
- **24 апреля.** А. В. Головнев (Санкт-Петербургский государственный университет) – «Инфляция и космологические возмущения: последние наблюдательные данные».
- **22 мая.** Е. В. Лычагин (Объединенный институт ядерных исследований) – «Гелиевый источник УХН на выведенном пучке тепловых нейтронов».
- **22 мая.** В. А. Щегельский (Отделение физики высоких энергий НИЦ КИ ПИЯФ) – «Исследования свойств бозона Хиггса на следующей стадии работы Большого адронного коллайдера».
- **5 июня.** С. В. Малеев (Отделение физики высоких энергий НИЦ КИ ПИЯФ) – «Циклоида в 2D-антиферромагнетике и магнитное поле».
- **26 июня.** А. П. Серебров (Отделение нейтронных исследований НИЦ КИ ПИЯФ) – «Источники ультрахолодных нейтронов на реакторах ВВР-М и ПИК».
- **25 сентября.** Торд Экелеф (ускорительный отдел Университета Упсалы) – «Эксперимент на очень интенсивном нейтринном суперпучке линейного ускорителя в ESS для открытия нарушения CP-инвариантности в лептонном секторе».
- **9 октября.** Н. М. Плакида (Объединенный институт ядерных исследований) – «Современное состояние теории высокотемпературной сверхпроводимости».
- **10 ноября.** К 80-летию академиков В. М. Лобашева и В. А. Назаренко.
- **27 ноября.** М. Г. Дудник (Отделение нейтронных исследований НИЦ КИ ПИЯФ) – «Обменное взаимодействие в димере переходных металлов на немагнитной металлической подложке».

## 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 2014 г. при участии Института было организовано 15 научных мероприятий (совещания, конференции и Школы), в которых приняло участие более 1 500 человек, из них более 500 являются представителями мирового научного сообщества (Германия, Швеция, США, Швейцария, Япония, Китай, Нидерланды, Италия, Бельгия, Ирландия и т. д.).







### Список проведенных мероприятий

1. 48-я Зимняя школа по физике ядра и элементарных частиц, теоретической физике, физике реакторов. **24 февраля – 1 марта.**
2. Зимняя школа по физике конденсированного состояния. **10–15 марта.**
3. Совещание «Дифракция нейтронов». **20–21 февраля.**
4. Совещание по неупругому рассеянию нейтронов «HePoN-2014». **19–20 июня.**
5. Международная конференция «НаноПитер-2014». **21–27 июня.**
6. Международная конференция «Структура адронов и КХД» / "Hadron Structure and QCD: HSQCD'2014". **30 июня – 4 июля.**
7. Совещание по малоугловому рассеянию нейтронов «Муромец-2014». **19–20 сентября.**
8. 11-я Международная конференция «Кварковый конфайнмент и спектр адронов» / "Quark Confinement and Hadron Spectrum". **8–12 сентября.**
9. XXIII Совещание по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах (РНСИКС-2014). **27–31 октября.**
10. Молодежная конференция в рамках Совещания по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах. **27–31 октября.**
11. Международное рабочее совещание в рамках проекта PolFusion («Поляризованный синтез»). **Ноябрь.**
12. Семинар, посвященный памяти академиков В. М. Лобашева и В. А. Назаренко. **10 ноября.**
13. Конференции молодых ученых (КМУС-2014). **13–14 ноября.**
14. Семинар, посвященный 50-летию Отделения радиационной и молекулярной биофизики. **9 декабря.**
15. Совещание «Школа поляризованных нейтронов в Гатчине» (Школа ПН-2014). **22–23 декабря.**

Также в течение 2014 г. сотрудники НИЦ КИ ПИЯФ участвовали в 44 международных и 127 российских конференциях в качестве докладчиков.

## Визиты

Развитие Института неразрывно связано с организацией сотрудничества с другими научными учреждениями, организациями и комитетами. Именно с этой целью в 2014 г. был организован ряд приемов и визитов, среди которых особо выделяются следующие.



**25 марта.** Заседание Совета директоров промышленных предприятий и предпринимателей Гатчинского района, центральным вопросом которого стало обсуждение концепции инвестиционного проекта «Императорское кольцо». Цель проекта – создание первого российского города с постиндустриальной экономикой по модели лучших малых исторических и инновационных центров мира. Также Совет обсудил ход реализации проекта по созданию Северо-Западного нанотехнологического центра в г. Гатчине, партнером которого является НИЦ КИ ПИЯФ.



**9 апреля.** Визит технического директора Европейского импульсного источника нейтронов (ESS – European Spallation Source) Ференца Мезея, который провел специальный семинар о будущем нейтронном источнике и его состоянии на сегодняшний день.



**23 мая.** Визит профессора Ричарда Йохана Шнайдера, почетного директора по науке Исследовательского центра DESY (Германия), в рамках которого были обсуждены вопросы международной экспертизы проектов экспериментальных станций РК ПИК.



**10 июня.** Визит советника по науке и технологиям посольства Франции в РФ Алексиса Мишеля, на котором были обсуждены возможности коллаборации НИЦ КИ ПИЯФ с французскими научными учреждениями.



**25 сентября.** Визит профессора Торда Эклефа, директора ускорительного отдела Университета Упсалы (Швеция) с предложением проекта постановки ускорительного нейтринного эксперимента с длинной базой, направленного на поиск нарушения  $CP$ -четности в лептонном секторе и определение иерархии масс нейтрино.



**16 октября.** Встреча членов Молодежного отделения Ядерного общества России с Советом молодых ученых и специалистов НИЦ КИ ПИЯФ. Участники встречи обменялись опытом и идеями по организации работы с молодежью на предприятиях атомной отрасли и в научно-исследовательских институтах и обсудили возможности дальнейшего взаимодействия.

Также было проведено более десятка встреч с российскими и зарубежными научными деятелями (из ОИЯИ, ИЛЛ, Rogante Engineering Office, Технического университета Мюнхена, ЦЕРН, Университета Гронингена, СПбГУ, Института цитологии РАН и др.), представившими сотрудникам НИЦ КИ ПИЯФ свои доклады и результаты проведенных ими исследований.

## Образовательная деятельность

### Взаимодействие с физическим факультетом Санкт-Петербургского государственного университета



Декан физического факультета СПбГУ  
член-корреспондент РАН  
М. В. Ковальчук

Институт имеет давние и очень тесные связи с одним из ведущих вузов России – Санкт-Петербургским государственным университетом (СПбГУ). Особое внимание уделяется работе с физическим факультетом СПбГУ. Проводятся совместные научные мероприятия, аспиранты физического факультета выполняют исследовательские работы под руководством наших ученых, а сотрудники Института ведут занятия на профильных кафедрах факультета. Так, на базовой кафедре Института – кафедре ядерно-физических методов исследования физического факультета СПбГУ – осуществляется целевая подготовка физиков для научно-исследовательской работы в нейтронных и синхротронных центрах России и Европы.

Примерами взаимодействия с физическим факультетом СПбГУ в 2014 г. могут послужить следующие мероприятия.

**19 марта, Гатчина.** Визит заведующих и сотрудников всех выпускающих кафедр физического факультета СПбГУ, руководителей ресурсных центров и студентов, в рамках которого были проведены обзорная экскурсия на реакторный комплекс ПИК, встреча с дирекцией Института и руководителями отделений.



**27 марта, Гатчина.** Семинар аспирантки кафедры квантовой механики физического факультета СПбГУ, сотрудницы ОТФ НИЦ КИ ПИЯФ Е. А. Мистоновой на тему кандидатской диссертации «Квантово-электродинамическая теория захвата электронов многозарядными ионами».



**10 июня, Петергоф.** Защита магистерских диссертаций студентов первого выпуска базовой кафедры Института – кафедры ядерно-физических методов исследования физического факультета СПбГУ. К защите было представлено 7 работ.

Заведующий кафедрой – член-корреспондент РАН М. В. Ковальчук.





**С 27 по 31 октября, Петергоф. Совещание по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах (РНСИ-КС-2014)** – совместное научное мероприятие, проводимое силами НИЦ КИ ПИЯФ, физического факультета СПбГУ и Института кристаллографии им. А. В. Шубникова.



## Работа со школьниками

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, реакторный комплекс ПИК и реактор ВВР-М) и участвует в профориентации школьников старших классов.

В 2014 г. было организовано 17 экскурсий для более чем 360 учащихся следующих учреждений:

- МБОУ «Гатчинская СОШ № 9 с углубленным изучением отдельных предметов»;
- МБОУ «Гатчинская СОШ № 1»;
- Академическая гимназия СПбГУ;
- ОАО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина»;
- Гимназия им. К. Д. Ушинского, г. Гатчина;
- Вырицкая школа, Гатчинский район;
- Школа г. Коммунара;
- МБОУ «Гатчинская СОШ № 2»;
- Лицей № 8 г. Тихвина;
- Школа № 6 г. Тихвина;

Также помимо экскурсий для учащихся в 2014 г. были организованы экскурсии для ветеранов Гатчинского района, директоров школ Гатчинского района и Совета молодых ученых Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (Москва).



Среди иных мероприятий по профориентации школьников, проводимых НИЦ КИ ПИЯФ, особо выделяются:

- участие в проекте «Открытая власть. Трудоустройство молодежи» (телеканал «Ореол-47»);
- участие Совета молодых ученых и специалистов на ярмарке профессий и вакансий, которую посетили учащиеся 39 общеобразовательных школ Гатчины и Гатчинского района;
- проведение занятий в МБОУ «Гатчинская вечерняя (сменная) общеобразовательная школа».

Сотрудниками НИЦ КИ ПИЯФ преподаются физика, информатика и такие элективные предметы, как «Прикладная физика», «Прикладная математика» и «Исследовательская деятельность». Все элективные курсы утверждены и согласованы с Методическим центром факультета естествознания и математики ЛОИРО, а также комитетом образования Гатчинского муниципального района. Также ведутся факультативные курсы и кружки для учащихся: «Физический эксперимент», «Подготовка к ЕГЭ по физике», «3D-моделирование», «Web-проектирование» и многие другие. Все курсы включены в учебный процесс и расписание работы школы. Проводятся и встречи «Научного клуба старшеклассников» (НКС), развивающего творческие способности; совершенствующего знания по определенным областям науки; расширяющего научный кругозор. В рамках НКС ведется просветительская работа через существующий лекторий «Научные пятницы», где учащиеся школы, педагоги и родители знакомятся с достижениями современной науки и техники.

## Памяти ушедших в 2014 году



**27 июня** ушел из жизни основатель советско-российской Школы поляризованных нейтронов, организатор нейтронных исследований конденсированного состояния в НИЦ КИ ПИЯФ, доктор физико-математических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР **Гильяри Моисеевич Драбкин**.



**26 августа** скончался доктор физико-математических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР **Борис Григорьевич Ерозолимский**, с 1982 по 1990 г. – старший научный сотрудник Лаборатории нейтронных исследований Ленинградского института ядерной физики им. Б. П. Константинова (ЛИЯФ, ныне НИЦ КИ ПИЯФ).



**26 октября** скоропостижно скончался старший научный сотрудник Лаборатории криогенной и сверхпроводящей техники Отделения физики высоких энергий, председатель профкома НИЦ КИ ПИЯФ **Владимир Иванович Медведев**.

# Основные результаты научной деятельности 2014

Техническое редактирование и оформление обложки *Т. А. Парфеева*  
Редакторы: *Е. Ю. Орбец, Н. В. Силинская*  
Компьютерная обработка и верстка: *Е. В. Веселовская,  
К. Д. Кашковская, А. Б. Кудрявцева*

Отпечатано в издательско-полиграфическом отделе  
НИЦ НИ ПИЯФ на Konica Minolta bizhub C552

188300, Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща  
Зак. 93, тир. 250, уч.-изд. л. 16; 10.04.2015 г.