



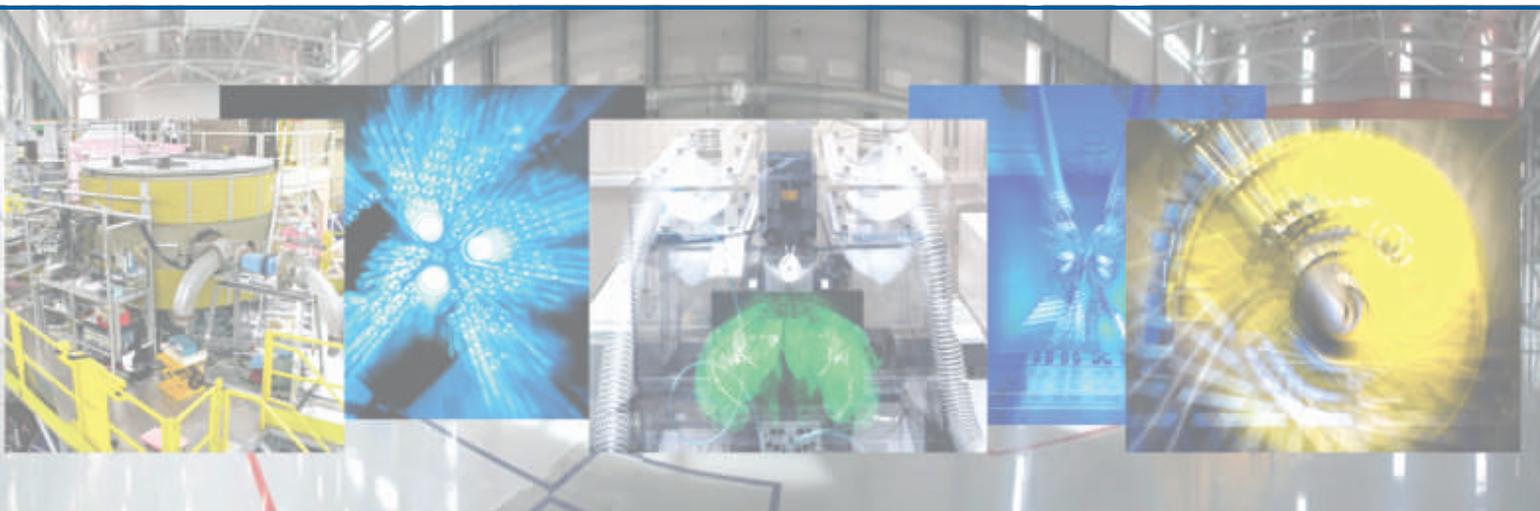
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»



Основные результаты научной деятельности 2019



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»



Основные результаты научной деятельности 2019

Гатчина • 2020

Научные редакторы:

В. В. Воронин
С. В. Саранцева
В. И. Максимов
С. И. Воробьев

Составители:

А. А. Воробьев	М. А. Матвеев
А. В. Титов	О. Л. Федин
А. И. Курбаков	С. И. Воробьев
А. Л. Коневега	С. Л. Смольский
В. В. Саранцев	С. Р. Фридман
В. Ю. Петров	Т. А. Исаев
К. А. Шабалин	Ю. П. Черненко

Ответственный за выпуск

С. И. Воробьев

Основные результаты научной деятельности – 2019. –
Гатчина Ленинградской обл.: Издательство
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2020. – 134 с.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных результатов научных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ за 2019 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 978-5-86763-447-6

© НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, 2020

Оглавление

- 5** Введение
- 9** Научные отделения
- 29** Теоретическая и математическая физика
- 37** Исследования с использованием нейтронов, фотонов и мюонов
- 55** Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино
- 73** Молекулярная и радиационная биофизика
- 87** Ядерная медицина (производство изотопов, лучевая терапия, био- и нанотехнологии для медицины)
- 93** Физика ядерных реакторов и ускорителей
- 101** Прикладные исследования и разработки
- 109** Базовые установки
- 119** Научно-организационная деятельность



КОРНЕИ ПАВЛОВИЧ
КОСТАТИНОВ

Введение

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

Научные работы сотрудников Института отмечены Ленинской и Государственными премиями, премиями Правительства РФ, академическими премиями. Три сотрудника избраны действительными членами, восемь сотрудников – членами-корреспондентами Российской академии наук. В настоящее время в Институте работают 1962 человека, из них 473 – научные сотрудники, 66 докторов и 218 кандидатов наук. Двое сотрудников являются членами-корреспондентами Российской академии наук.

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

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

Программа научных исследований на долгосрочный и краткосрочный периоды изложена в Программе деятельности НИЦ «Курчатовский институт» и в Программе Института по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам (НИОКР) согласно государственному заданию.

Как и другие научные учреждения, входящие в состав НИЦ «Курчатовский институт», НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ активно участвует в различных международных проектах и сотрудничает по основным направлениям своей дея-

тельности с крупнейшими международными научными центрами.

В Институте работают и создаются базовые установки для физических исследований. Ядерный реактор ВВР-М, построенный в 1959 г., с 31 декабря 2015 г. находится в режиме длительного останова. 29 декабря 2019 г. торжественно отмечалось 60-летие со дня физического пуска реактора ВВР-М. На нем долгое время велись фундаментальные и прикладные исследования в области ядерной физики, физики конденсированного состояния, радиационного материаловедения, радиобиологии, наработка радионуклидов для медицинских и технических целей. Протонный синхроциклотрон СЦ-1000, построенный в 1970 г., отработал в 2019 г. на эксперимент 2980 ч. Выполнялись работы по введению в эксплуатацию изохронного циклотрона Ц-80, имеющего энергию выведенного протонного пучка в диапазоне 40–80 МэВ: проводились НИОКР, необходимые для изготовления, сертификации и эксплуатации оборудования для планируемого в будущем исследовательского онкоофтальмологического комплекса протонной лучевой терапии, продолжалась разработка программного обеспечения, необходимого для проведения динамических расчетов по моделированию движения заряженных частиц в циклотроне Ц-80.

В 2019 г. продолжались работы по реализации инвестиционных проектов по модернизации и реконструкции инженерно-технических систем реакторного комплекса ПИК (РК ПИК). Этот год стал важным этапом на пути создания РК ПИК. Бюджетом Российской Федерации поддержано выполнение проектов по модернизации инженерно-технических систем обеспечения и реконструкции лабораторного комплекса научно-исследовательского РК ПИК, что позволило провести мероприятия по энергетическому пуску реактора в 2019 г. на подэтапе освоения мощности до 100 кВт. В диапазоне мощности до 100 кВт



выполнен демонстрационный эксперимент с измерениями спектра нейтронов на выходе из горизонтального экспериментального канала, что существенно, т. к. диапазон до 100 кВт является основным, на котором периодически подтверждаются проектные нейтронно-физические характеристики в ходе перегрузок топлива и экспериментальных устройств.

2019 год был насыщен событиями научной и общественной жизни. 7–8 февраля в Институте праздновался День российской науки. Совет молодых ученых и специалистов подготовил программу мероприятия: Институт посетили школьники, с ними были проведены занятия, состоялся торжественный Ученый совет, на котором были вручены именные стипендии в честь выдающихся ученых, еще не так давно трудившихся в стенах Института: стипендия им. В. Н. Грибова за работы в области теоретической физики, стипендия им. Г. М. Дробкина за работы в области физики конденсированного состояния, стипендия им. В. М. Лобашева за работы в области ядерной физики, стипендия им. С. Е. Бреслера за работы в области биологии. Завершил праздник Зимний бал.

В конце февраля – первой половине марта состоялись традиционные Зимние научные школы НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ: 53-я Зимняя школа, 53-я Зимняя школа по физике конденсированного состояния и XX Зимняя молодежная школа по биофизике и молекулярной биологии. Зимние школы включали в себя лекции известных ученых, семинары и выступления участников

по всем ключевым направлениям: физике атомного ядра и элементарных частиц, физике и технике реакторов, теоретической физике, физике конденсированного состояния, биофизике и молекулярной биологии. В работе Зимних школ приняли участие более 500 ученых и специалистов, представляющих Институт и другие ведущие научные организации России и зарубежья. Кроме того, в 2019 г. Институт организовал 12 научных конференций, среди которых можно отметить VII Европейскую конференцию по рассеянию нейтронов (ECNS-2019), V Международное совещание «Взаимодействие Дзьялошинского – Мория и экзотические спиновые структуры» (DMI-2019) и VI Всероссийский молодежный научный форум Open Science 2019.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных результатов научных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в 2019 г. Это описание предваряют обзоры руководителей научных отделений основных направлений их деятельности. Также отражена структура отделений. Далее приведены аннотации работ, представление которых обсуждено и рекомендовано учеными советами отделений. Помимо аннотации, для каждого результата в сборнике приведены ссылки на статьи ведущих отечественных и зарубежных изданий, в которых работа описана детально и где можно ознакомиться с ее полным содержанием.

Результаты работ сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ опубликованы в 714 статьях в ведущих российских и международных реферируемых журналах и представлены на 178 российских и международных конференциях.

В заключительном разделе дана общая информация об Институте.

Директор НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
С. Е. Горчаков



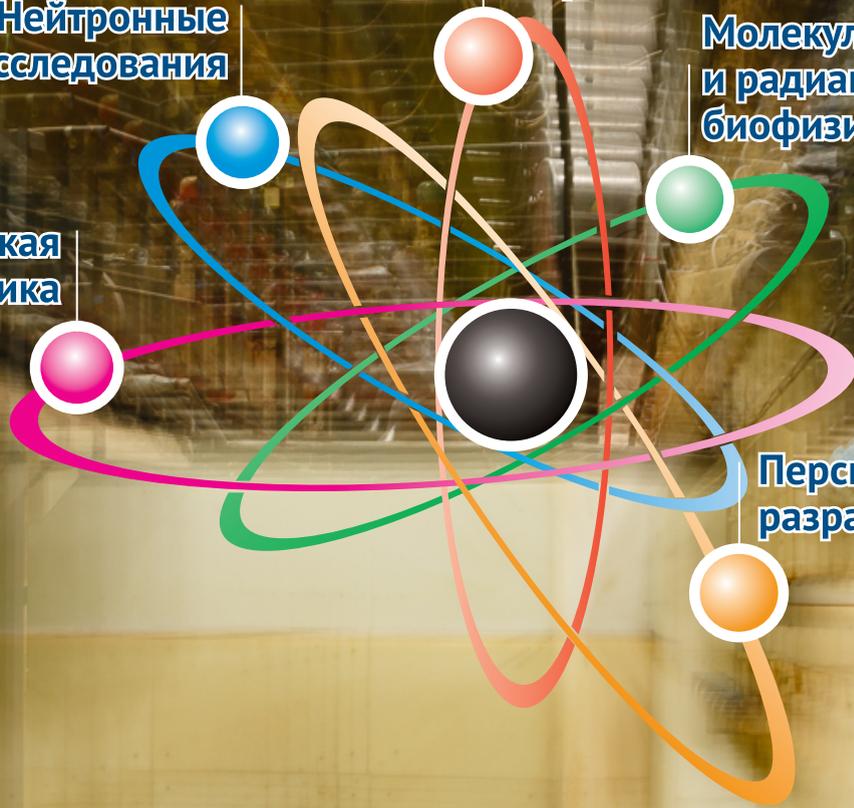
Физика высоких энергий

Молекулярная и радиационная биофизика

Нейтронные исследования

Теоретическая физика

Перспективные разработки



Научные отделения

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

Отделение теоретической физики

Отделение теоретической физики (ОТФ), руководитель – д. ф.-м. н. В. Ю. Петров, состоит из 7 секторов:

- теории электрослабых взаимодействий (и. о. заведующего – д. ф.-м. н. И. Т. Дятлов);
- теории сильных взаимодействий (заведующий – д. ф.-м. н. В. Ю. Петров);
- квантовой теории поля (заведующий – к. ф.-м. н. В. А. Кудрявцев);
- физики высоких энергий (и. о. заведующего – д. ф.-м. н. В. Ю. Петров);
- теории конденсированного состояния (заведующий – д. ф.-м. н. Д. Н. Аристов);
- теории ядра (заведующий – д. ф.-м. н. М. Г. Рыскин);
- теории атома (заведующий – д. ф.-м. н. А. И. Михайлов)

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

В ОТФ работают 62 научных сотрудника, из них 26 докторов наук и 35 кандидатов наук.



В. Ю. Петров,
д. ф.-м. н.,
руководитель
Отделения

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

и квантовой теории поля до физики ядерных реакторов.

Рассеяние при высоких энергиях – традиционная тема исследований в ОТФ. В течение долгого времени работы сотрудников Отделения определяли мировой уровень в данной области. В 2019 г. были опубликованы работы по исследованию механизма коллинеарной факторизации для эксклюзивного электророждения мезонов на нуклонах в направлении «назад» и построены амплитуды распределения для переходов «барион – мезон» на световом конусе. Также были вычислены соответствующие обобщенные партонные распределения.

Был предложен новый подход к вычислению поправок к дважды логарифмическому приближению к структурным функциям квантовой хромодинамики (КХД) при малых x . Для нелидирующих

вкладов в структурную функцию $F_1(x, Q^2/\mu^2)$ получено выражение, имеющее такой же вид, как и вклад реджевских полюсов (в частности, вклад БФКЛ-померона). Эти вклады следует учитывать наравне с вкладом полюсов. Удалось зафиксировать область применимости реджевской асимптотики $x < 10^{-6}$.

ОТФ также является одним из мировых лидеров в области так называемой AdS/CFT-дуальности (анти-де Ситтер/конформная теория поля). Дуальность означает, что нетривиальная теория поля ($N = 4$ суперсимметричная теория Янга – Миллса) в четырехмерном пространстве-времени эквивалентна некоторой теории струны в пространстве анти-де Ситтера, и оба подхода являются точно решаемыми. Фактически дуальность выражается в связи аномальных размерностей операторов в суперсимметричной теории со спектром струны в пространстве анти-де Ситтера. В работах 2019 г. сотрудниками ОТФ была предложена и точно решена новая нетривиальная теория в четырехмерном пространстве-времени, обладающая AdS/CFT-дуальностью. Важно, что это первая точно решаемая теория, которая не обладает SUSY-симметрией. Хотя она не унитарна, она оказывается очень близка к весьма популярным в настоящее время в теории конденсированного состояния SYK-теориям.

Невылетание кварков остается наиболее интересным и все еще не проясненным явлением

в КХД. Согласно современным представлениям, оно связано с линейным потенциалом (струной), который возникает между кварком и антикварком, введенным в качестве пробника в КХД. Свойства линейного потенциала можно исследовать в решеточных симуляциях, вычисляя петли Вильсона и Полякова. В работах ОТФ 2019 г. исследовались свойства треугольных петель Вильсона относительно перенормировки в двух петлях. Полученные результаты сравнивались с решеточными вычислениями, проведенными на компьютерном кластере ОТФ.

Новый способ суммирования инфракрасных логарифмов в неперенормируемых эффективных теориях поля был предложен в ОТФ в 2019 г. Подход основан только на унитарности и кроссинг-симметрии, т. е. основывается только на принципе причинности. Полученные результаты совпадают с известными ранее, но инфракрасное поведение вычислено также и в большом числе новых теорий.

В 2015 г. коллаборация LHCb объявила об открытии двух пентакварковых резонансов на Большом адронном коллайдере (БАК). В работе М. И. Эйдеса, В. Ю. Петрова и М. В. Полякова была предложена интерпретация этих резонансов, согласно которой они представляют собой связанное состояние возбужденного состояния чармония и протона. Альтернативным вариантом является слабо связанное состояние двух адронов с открытым чармом. В работах авторов анализируются обе эти возможности, вычислены свойства пентакварка в каждом из сценариев и предсказаны новые состояния пентакварков. В 2019 г. коллаборация LHCb сообщила о новых, более точных данных, в которых свойства пентакварков были существенно пересмотрены. В работе 2019 г., вошедшей в данный сборник, показано, что новые свойства пентакварков проще объяснить в рамках модели, предложенной авторами в предыдущих работах.

На ускорителе БАК продолжают поиски темной материи, в частности такой, которая связана с возможными суперсимметричными частицами. Для ее поиска было предложено искать их в эксклюзивных событиях с лидирующими протонами. Однако сечение таких процессов должно быть очень мало. В работах сотрудников ОТФ

был вычислен фон для этих событий. Показано, что главными фоновыми событиями являются: прямое рождение обычных лептонов фотонами, испускаемыми при диссоциации протонов, и *pile-up*-рождение лидирующих протонов и пары лептонов из разных событий. Выбирая соответствующую кинематику (обрезания), удается подавить фон до уровня (и менее) сигнала.

Ядерная физика в последнее время становится все более связана с КХД. В ОТФ развивается подход к теории ядра, основанный на правилах сумм, преимуществом которого является то, что он непосредственно восходит к КХД. Было найдено, что этот подход правильно воспроизводит собственные энергии, роль многочастичных сил и т. д. На этот раз был изучен вопрос, при каких условиях получаются связанные состояния ядерной материи. Было показано, что равновесные состояния возникают при значениях сигма-члена нуклона, близких к наблюдаемым.

К классической ядерной физике ближе другой цикл работ, выполненный в ОТФ в 2019 г. В нем в рамках многочастичной модели с учетом межулонных корреляций и спаривания проведены расчеты свойств нечетно-нечетных изотопов индия от ^{130}In до ^{138}In , расположенных вблизи дважды магического ядра ^{132}Sn , удаленного от линии стабильности.

В области атомной физики была вычислена для различных элементов ионизация внутренних оболочек атома при α -распаде ядра. Вычисляли вероятности $P_i(Q_\alpha)$ ионизации *K*-, *L*- и *M*-оболочек. Полученные данные важны для обработки спектров сверхтяжелых элементов, исследуемых методами объединенной α -, γ - и электронно-конверсионной спектроскопии.

Работы ОТФ в области теории конденсированного состояния представлены в сборнике статьями О. И. Утесова и А. В. Сыромятникова. Была рассмотрена модель фрустрированного антиферромагнетика с двуосной анизотропией или дипольными силами в магнитном поле, направленном вдоль легкой оси. Хорошо известны два сценария фазовых переходов при увеличении поля: спин-флоп-переход в коллинеарном антиферромагнетике и переворот плоскости спирали в спиральном фрустрированном магнетике.

В данной работе было продемонстрировано, что возможны три других сценария, причем один из них наблюдается экспериментально. Было бы интересно найти примеры и других предложенных новых сценариев фазовых переходов.

На протяжении ряда лет в ОТФ развивается теория одномерных квантовых проволок. В работах 2019 г. было показано, что эта теория тесно связана с поведением краевых состояний в вейлевских полуметаллах, и определены их характеристики. Свойства этих краевых состояний требуют дальнейшего изучения. Опубликованы также некоторые новые результаты, касающиеся точных решений в особых случаях для квантовых проволок.

Было продолжено изучение сильно коррелированных ферми-систем, в частности систем с тяжелыми фермионами в графене. Показано, что в магнитном поле сопротивление такой системы должно резко падать в соответствии с экспериментом.

Реакторная тематика в работах ОТФ 2019 г. была представлена исследованиями, посвящен-

ными реактору ПИК. Изучено выгорание тепло-выделяющих сборок (ТВС) ПИК с выгорающими поглотителями, проведена оценка потери реактивности для одиночной ТВС от использования выгорающих поглотителей. Рассчитано влияние стальной оболочки выгорающих поглотителей на реактивность реактора. Продолжена работа над кодом SERPENT для сопровождения работы реактора ПИК.

Сотрудниками ОТФ в 2019 г. опубликовано 105 исследовательских работ в рецензируемых журналах (64 – в зарубежных изданиях), представлено 30 докладов на международных и российских конференциях, прочитано 8 курсов лекций в Санкт-Петербургском государственном университете и Санкт-Петербургском национальном исследовательском Академическом университете им. Ж. И. Алферова Российской академии наук, организованы 2 конференции, приняты на работу в ОТФ 2 аспиранта Института.

Отделение нейтронных исследований

Отделение нейтронных исследований (ОНИ), руководитель – д. ф.-м. н. А. И. Курбаков, включает 4 отдела.

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

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

и 2 групп:

- исследований слабых взаимодействий (руководитель – к. ф.-м. н. А. Н. Пирожков);
- физики деления ядер (руководитель – А. М. Гагарский).

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);
- исследования материалов (заведующий – д. ф.-м. н. А. И. Курбаков);
- нейтронных физико-химических исследований (заведующий – д. ф.-м. н. В. Т. Лебедев)

и группы электромагнитных свойств конденсированных сред (руководитель – к. ф.-м. н. О. В. Герашенко).

Отдел полупроводниковых ядерных детекторов (руководитель – д. ф.-м. н. А. В. Дербин).

Отдел эксплуатации нейтронных станций на реакторе ПИК (руководитель – к. ф.-м. н. В. В. Тарнавич).

В ОНИ работают 126 научных сотрудников, из них 9 докторов наук и 47 кандидатов наук.



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

Основными направлениями деятельности ОНИ являются фундаментальные исследования в области физики ядра и элементарных частиц и физики конденсированных состояний. Цель исследований – развитие и широкое внедрение методов и технических средств, использующих в первую очередь нейтронное излучение, для изучения состава и фундаментальных свойств материи, создания и исследования свойств новых материалов и новых физических явлений в них, разработка отечественных уникальных эксперимен-

тальных установок и аналитических методик для нейтронных исследований.

Во главу угла в настоящее время ставится создание Международного центра нейтронных исследований на базе реактора ПИК.

2019 год был успешным в научном плане. Среди победителей конкурса на соискание премии им. И. В. Курчатова за 2019 г. 4 работы, выполненные сотрудниками ОНИ: 1 в области научных исследований и 3 студенческие работы.

Нейтрон представляет собой очень удобный исследовательский инструмент, поскольку он участвует во всех известных в настоящее время типах взаимодействия. В области исследований фундаментальных свойств материи с использованием нейтронов за прошедший год получены новые важные результаты. Здесь отмечены только самые последние исследования, не оформленные в данном сборнике отдельными статьями.

Впервые обнаружен, теоретически описан и экспериментально исследован эффект поворота спина нейтрона при дифракции по Лауэ в нецентросимметричном слабдеформированном кристалле, при этом реализована новая возможность определять электрические внутрикристаллические поля, действующие на нейтрон в кристаллах без центра симметрии, путем измерений одной из компонент спина в направлении, перпендикулярном первоначальной поляризации пучка, а также возможность управлять этими полями величиной (до 10^8 В/см) и знаком в экспериментах по изучению фундаментальных свойств нейтрона.

Результаты исследования динамики деления и изучение свойств изомерных состояний ядер с помощью нейтронов дают новую информацию о принципиальных особенностях атомных ядер как многочастичных систем с сильным взаимодействием, позволяют корректировать модельные представления о структуре ядерных возбужденных состояний, уточняют параметры эффективных ядерных взаимодействий. Проведена обработка данных измерений угловых распределений $FF^{237}\text{Np}$ нейтронами в диапазоне энергий до 200 МэВ на нейтронном спектрометре ГНЕИС (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ). Впервые получены угловые распределения осколков деления $^{237}\text{Np}(n, f)$ в области энергий нейтронов до 200 МэВ. Разработан метод расчета угловых распределений осколков деления нейтронами промежуточных энергий на основе программного кода TALYS, который может быть использован для получения новой информации как о реакциях при промежуточных энергиях, так и о процессе деления.

В последние годы наблюдается повышенный интерес исследователей к предсказанию, обнаружению и изучению новых необычных магнитных явлений и, в частности, к поиску новых экзотических магнитных структур. Большое внимание уделяется таким объектам, как низкоразмерные системы, в которых квантовая природа проявляется на уровне макроскопических коллективных явлений. Необычные состояния демонстрируют системы, в которых существуют фрустрации различной природы и анизотропия магнитных взаимодействий. В результате полнопрофильного

анализа низкотемпературных нейтронограмм для $\text{Na}_2\text{Ni}_2\text{TeO}_6$ предложена модель магнитной структуры типа «зигзаг». Область когерентного магнитного рассеяния нейтронов имеет дискообразную форму, сжатую вдоль оси *c*. Сделан вывод о двумерной природе спиновых корреляций, которые присутствуют в системе выше температуры фазового перехода. Результаты работы могут быть использованы при построении экспериментальной базы для теоретического обоснования общих механизмов и принципов формирования дальнего магнитного порядка в системах с пониженной размерностью, а также поиска новых систем низкоразмерных магнетиков с уникальными свойствами.

Измерение величин констант обменных взаимодействий, формирующих такие магнитные структуры, как геликоидальные магнетики со взаимодействием Дзялошинского – Мориа (ДМ), и определение знака этого взаимодействия являются актуальной задачей, решение которой позволит создавать системы с заданным значением периода и хиральности магнитной спирали в широком температурном диапазоне. Для определения величины жесткости спиновых волн в гелимагнетиках использована разработанная коллективом НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ методика неупругого малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов. продемонстрировано явление магнитохиральной невзаимности распространяющихся магнонов для нецентросимметричных гелимагнетиков $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ и Cu_2OSeO_3 . Показано, что в магнитных материалах с хиральной кристаллической структурой магноны, распространяющиеся параллельно и антипараллельно внешнему магнитному полю, имеют различный характер. Также установлено, что знак невзаимности магнитных возбуждений прямо связан с хиральностью кристаллической структуры и взаимодействием ДМ как источником наблюдаемой невзаимности.

Интерес к мультиферроикам, обусловленный богатым потенциалом практических приложений, очень велик. Работы, выполненные в 2019 г., являются частью программы, цель которой – изучение магнитной структуры и динамики этих мультиферроиков, выяснение роли разных магнитных ионов в формировании магнитных и магнито-

электрических свойств этих соединений, а также анализ соответствующих взаимодействий. Отличительной особенностью программы является комплексное исследование как однородных (терагерцевая спектроскопия), так и неоднородных магнитных возбуждений во всей зоне Бриллюэна (неупругое рассеяние нейтронов) в совокупности с нейтронографическими исследованиями магнитной структуры (упругое рассеяние нейтронов). Это дает возможность установить взаимосвязь магнитных возбуждений с характером основного состояния системы, статическими магнитными свойствами и влияние на них типа редкоземельного иона и его анизотропии в кристаллическом поле. Впервые обнаружены слабые искажения коллинеарной магнитной структуры, обусловленные антисимметричными обменными взаимодействиями ДМ в сложных ферроборатах $\text{Nd(Tb)Fe}_3(\text{BO}_4)_3$ и определены величины соответствующих взаимодействий.

Продолжены исследования фрактальной организации наноматериалов, полимеров и биологических объектов методами малоуглового рассеяния нейтронов и синхротронного излучения. Золь-гель-методом синтезирован высокодисперсный наноструктурированный ZrTiO_4 , и изучены эволюции его микро- и мезоструктуры, в т. ч. фрактальных свойств, в процессе термической обработки. Материал применим в разных областях науки и техники, в частности в качестве компонента гидрофильных мембран для ультрафильтрации, а также носителей катализаторов. Кроме того, ZrTiO_4 считается весьма перспективным материалом для оптических устройств, фотокатализаторов и для создания биосовместимых покрытий на стальных имплантах. Показано, что все образцы ZrTiO_4 обладают пористой структурой и состоят из крупномасштабных агрегатов с фрактальной границей раздела фаз с размерностью $2,13 \leq D_s \leq 2,39$. Отжиг ксерогелей, начиная с температуры 500 °С, приводит к возникновению «зародышей» кристаллической фазы, которые структурированы по типу ближнего порядка с радиусом межчастичных корреляций ξ и фактором упаковки κ .

Диоксид циркония ZrO_2 имеет множество промышленных применений благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам. Этот

материал является одним из ключевых для компонентов датчиков, катализаторов и носителей катализаторов, мембран, твердых электролитов в твердотельных окисных топливных элементах и т. д. Поэтому для различных задач важно уметь синтезировать структуры с заданными параметрами, такими как фрактальная размерность, удельная поверхность и размер частиц. Методом малоуглового рассеяния нейтронов определены параметры мезоструктуры образцов аморфного гидратированного диоксида циркония и их эволюция на разных стадиях термической обработки. Обнаружена трансформация фрактала из объемного в поверхностный. Предложена модель формирования фрактальной частицы, подразумевающая существование поверхностного фрактала на плотном ядре. Показано, что характерный радиус ядра наночастиц ZrO_2 возрастает с повышением температуры отжига от 14 до 200 Å в диапазоне 400–600 °С и насыщается при больших температурах.

Среди теоретических и расчетных работ отметим численную оценку спин-независимого P -нечетного эффекта в новой физике вне Стандартной модели. На основании представленных данных можно выбрать наиболее подходящие изотопы и пары изотопов для дальнейших экспериментов по исследованию P -нечетных эффектов. Оценен относительный вклад ядерной структуры и новых физических связей в паритетные несохраняющие спин-независимые эффекты в атомных системах как для отдельных изотопов, так и для изотопных соотношений.

Впервые теоретически исследована возможность использования молекулы моноцианида таллия (TlCN) в экспериментах по поиску шиффовского момента ядра таллия. С использованием теории связанных кластеров с одно- и двукратными кластерными амплитудами и соответствующего модуля в программном пакете DIRAC-18 были выполнены расчеты параметров основного и низколежащих возбужденных электронных состояний молекулы TlCN . В результате расчетов было установлено, что коэффициент усиления шиффовского момента в основном состоянии молекулы TlCN лишь незначительно отличается от такового в молекуле TlF . Это позволяет говорить о хороших перспективах использования

молекулы T1CN в соответствующих экспериментах. С другой стороны, выяснилось, что лазерное охлаждение данной молекулы не может быть выполнено с такой же эффективностью, как у T1F.

Сотрудниками ОНИ в 2019 г. опубликовано 72 научных статьи в рецензируемых журналах

(51 – в зарубежных изданиях), представлено 149 докладов на международных и российских научных мероприятиях (90 устных и 59 стендовых), получены 1 патент и 3 свидетельства о государственной регистрации специализированных программ и баз данных, защищена 1 кандидатская диссертация.

Отделение физики высоких энергий

Отделение физики высоких энергий (ОФВЭ), научный руководитель – член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор А. А. Воробьев; руководитель – д. ф.-м. н. О. Л. Федин, состоит из 10 лабораторий:

- физики элементарных частиц (заведующий – д. ф.-м. н. Г. Д. Алхазов);
 - релятивистской ядерной физики (заведующий – д. ф.-м. н. В. М. Самсонов);
 - короткоживущих ядер (заведующий – к. ф.-м. н. В. Н. Пантелеев);
 - мезонной физики (заведующий – к. ф.-м. н. С. И. Воробьев);
 - малонуклонных систем (заведующий – д. ф.-м. н. С. Л. Белостоцкий);
 - кристаллооптики заряженных частиц (заведующий – к. ф.-м. н. Ю. М. Иванов);
 - адронной физики (заведующий – д. ф.-м. н. О. Л. Федин);
 - физики экзотических ядер (заведующий – д. ф.-м. н. Ю. Н. Новиков);
 - барионной физики (заведующий – к. ф.-м. н. А. А. Дзюба);
 - криогенной и сверхпроводящей техники (заведующий – к. ф.-м. н. А. А. Васильев)
- и 4 научно-технических отделов:

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

В ОФВЭ работают 134 научных сотрудника, из них 16 докторов наук и 69 кандидатов наук.



А. А. Воробьев,
член-корреспондент РАН,
д. ф.-м. н.,
научный руководитель
Отделения

Деятельность ОФВЭ в основном сосредоточена на экспериментальных исследованиях в области физики элементарных частиц и ядерной физики, также проводятся исследования по физике твердого тела с использованием μ SR-метода. Как и в предшествующие годы, исследовательские работы проводились на установках НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и ускорителях ведущих мировых ядерных центров.

Эксперименты, проводившиеся в 2019 г.

На синхротроне СЦ-1000:

- производство и изучение короткоживущих ядер на лазерном масс-спектрометрическом комплексе ИРИС;
- изучение поляризационных эффектов в квазиупругом рассеянии протонов на ядрах (спектрометр МАП);
- исследование магнитных свойств материалов μ SR-методом.

В Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН):

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



О. Л. Федин,
д. ф.-м. н.,
руководитель
Отделения

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

- изучение возможностей кристаллической коллимации пучков БАК (эксперимент UA9).

На электронных ускорителях Университета Бонна (Германия):

- изучение структуры нуклонов в γ - p -рассеянии.

Завершенные эксперименты с продолжающейся обработкой данных:

- измерение скорости мюонного захвата в дейтерии (эксперимент MuSun) на мезонной фабрике Института им. Пауля Шеррера (Швейцария).

Новые проекты:

- подготовка к эксперименту «Протон» по измерению зарядового радиуса протона на ускорителе MAMI (г. Майнц, Германия);

- подготовка к экспериментам R3B, MATS, PANDA, CBM на ускорительном комплексе FAIR (Центр по изучению тяжелых ионов им. Гельмгольца, Германия);

- подготовка к эксперименту SHiP по поиску частиц скрытого сектора Стандартной модели в ЦЕРН;

- подготовка эксперимента по поиску мюонного катализа ядерного синтеза $d^3\text{He}$ на мезонной фабрике Института им. Пауля Шеррера (Швейцария);

- исследование реакции слияния поляризованных дейтронов на установке POLFUSION в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ;

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

- проект ПИТРАП по прецизионному измерению масс короткоживущих нейтроноизбыточных ядер на высокопоточном нейтронном реакторе ПИК;

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

Одним из основных направлений деятельности ОФВЭ является участие в экспериментах на БАК: CMS, ATLAS, LHCb и ALICE. НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ участвовал в этих экспериментах с начальных стадий проектирования и конструирования коллайдерных детекторов со значительным вкладом в создание их различных подсистем. После запуска БАК физики и инженеры Отделения, наряду с другими участниками экспериментов, несут ответственность за нормальное функционирование детекторов и принимают участие в обработке экспериментальных данных.

Анализ полученных в Сеансе-2 (2015–2018) экспериментальных данных дал огромное количество новых результатов. Наиболее значимые из них – это открытие трех новых узких пентакварковых состояний в эксперименте LHCb и уточнение характеристик бозона Хиггса в экспериментах ATLAS и CMS. В 2019 г. было опубликовано более 200 работ, посвященных этим исследованиям. Авторский список публикаций включает 35 ученых из ОФВЭ.

В 2019 г. большие усилия были сосредоточены на работах по модернизации детекторов в связи с тем, что в Сеансе-3 ожидается повышение светимости работы БАК. В частности, в рамках программы усовершенствования детектора CMS при активном участии специалистов ОФВЭ была сконструирована, изготовлена и введена в эксплуатацию 396-канальная система источников высоковольтного питания мюонных камер. Сотрудники ОФВЭ в 2019 г. продолжили работы по созданию тонкозаязорных мюонных камер для передней части мюонного спектрометра детектора ATLAS. Более половины камер было собрано, успешно испытано и отправлено в ЦЕРН.

Сотрудниками ОФВЭ в 2019 г. опубликовано 275 научных работ в рецензируемых журналах (270 – в зарубежных), сделано 43 доклада на российских и международных научных мероприятиях, защищена 1 кандидатская диссертация.

Отделение молекулярной и радиационной биофизики

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

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

3 центров:

- центра доклинических и клинических исследований (заведующий – к. м. н. А. П. Трашков);
 - ресурсного центра (заведующий – к. б. н. Н. А. Верлов);
 - Курчатовского геномного центра (и. о. заведующего – к. б. н. А. Ю. Конев)
- и отдела инженерно-технического обеспечения (руководитель – П. А. Сотников).

В Отделении работает 141 научный сотрудник, из них 14 докторов наук и 58 кандидатов наук.



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

В 2019 г. ОМРБ отметило 55-ю годовщину со дня своего основания. Точкой отсчета истории Отделения можно считать 25 декабря 1964 г., когда 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 «Курчатовский институт» – ПИЯФ) – первой лаборатории на базе Радиобиологического отдела. В настоящее время ОМРБ насчитывает 14 лабораторий и 3 центра, один из которых – Курчатовский геномный центр – создан в 2019 г.

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

В ОМРБ активно ведутся исследования супрамолекулярных комплексов (СК) не только методами малоуглового нейтронного рассеяния и молекулярного моделирования (лаборатория биофизики макромолекул, зав. лаб. к. ф.-м. н. В. В. Исаев-Иванов). В работах В. В. Егорова по исследованию механизма взаимодействия аналога азотистого основания триазавирина с полипептидами показано, что молекулы препарата способны к образованию линейных СК. Формирование линейных СК триазавирина происходит в т. ч. и непосредственно на поверхности полипептида. При этом взаимодействие каждой последующей молекулы триазавирина с белком происходит как за счет связывания с сайтом на поверхности полипептида, так и за счет связывания с уже сформировавшимся СК. Такой механизм открывает перспективы к модификации существующих препаратов, имеющих мно-

жественные сайты связывания на поверхности белков-мишеней, что характерно для биополимеров, имеющих периодическую пространственную структуру. Дополнение существующих терапевтических молекул функциональной группой, придающей ей способность к образованию СК, приводит к уменьшению эффективной концентрации и, соответственно, к снижению побочных эффектов. Кроме того, образование СК приводит к изменению оптических свойств флуорофоров, что открывает новые методические перспективы. В частности, формирование СК белками слияния «целевой белок – зеленый флуоресцентный белок» приводит к детектируемому изменению времени жизни флуоресценции как *in vitro*, так и *in cellulo*. Введение флуорофора в молекулу красителя, способного к формированию СК, для детекции амилоидоподобных фибрилл привело к появлению возможности детекции образования СК по увеличению квантового выхода.

Магнетосомы в бактериях были открыты несколько десятилетий назад, однако до сих пор остается открытым вопрос, существуют ли подобные биоминерализованные структуры в эукариотических клетках. В работе В. А. Рыжова (лаборатория биофизики макромолекул) представлены доказательства существования магнетосомоподобных структур на основе Fe в различных жизнеспособных эукариотических клетках. Использовалась оригинальная методика регистрации второй гармоники намагниченности продольного нелинейного отклика. Магнетосомы обнаружены в клеточных линиях мезенхимальных стволовых клеток (МСК) синовиальной ткани с хондроцитами и МСК костного мозга, индуцированные в остеоцитах (5–8 магнетосом на клетку), а также в опухолевых клетках ортотопической глиомы С6 крысы и глиомы GL261 мыши.

В работе М. Г. Петухова (лаборатория биофизики макромолекул) с помощью теоретических методов молекулярного моделирования, молекулярной динамики и докинга лигандов проведен систематический анализ структурных мотивов связывания пептидов с днДНК. Большое разнообразие коротких биологически активных пептидов обладает антиоксидантным, антибактериальным, противоопухолевым действием, антивозрастной и противовоспалительной активностью,

включая регуляцию нейро-, иммуно-, эндокринных и других системных клеточных функций. Механизмы их действия привлекают внимание не только в современной молекулярной биологии, биохимии и биофизике, но и в фармакологии и медицине.

Традиционными для ОМРБ являются исследования молекулярных механизмов ремоделирования хроматина. *Drosophila melanogaster* использует две системы регулирования экспрессии генов на уровне целой хромосомы: дозовую компенсацию, приводящую к двукратному повышению транскрипции X-хромосомных генов у самцов, и регуляцию транскрипции в преимущественно гетерохроматиновой 4-й хромосоме с помощью гена *POF* (Painting of Fourth), которые сопровождаются глобальными изменениями в структуре хроматина. Анализ роли эволюционно консервативного фактора сборки и ремоделирования хроматина CHD1 проведен в работе А. Ю. Конева (лаборатория генетики эукариот, зав. лаб. д. б. н. В. Г. Королев). Показано, что отсутствие и сверхэкспрессия CHD1 влияют на глобальную организацию хромосом дрозофилы и CHD1 является новым фактором, оказывающим влияние на организацию гиперактивного хроматина мужской X-хромосомы и структуру транскрипционно неактивного гетерохроматина.

Особое внимание в ОМРБ уделяется работам по изучению механизмов лекарственной резистентности. Лейкемические клетки разных пациентов показывают различную чувствительность к противоопухолевым препаратам. Резистентность к химиотерапии уменьшает эффективность лечения и способствует рецидивам опухоли и метастазам. Один из подходов для преодоления лекарственной устойчивости включает регуляцию посредством фактора E2F1 белка p73, принадлежащего к семейству p53. Его изоформа $\Delta Np73$ проявляет проонкогенные свойства, а TAp73 – антионкогенное действие. Цитомегаловирус человека (HCMV), часто обнаруживаемый в опухолях, подавляет проапоптотические пути и, в частности, E2F1/p73-зависимый путь. Активность транскрипционных факторов E2F1 и p73 связана с метаболизмом биогенных полиаминов. Результаты работы Г. Р. Виноградской и С. С. Емельяновой (лабора-

тория молекулярной генетики, зав. лаб. д. б. н. В. Н. Вербенко) указывают на то, что комбинация доксорубицина и MDL72.527 может представлять новую стратегию в терапии лейкемии у пациентов как с инфекцией, так и без HCMV-инфекции.

Химиотерапия опухолей традиционно направлена на ингибирование пролиферации опухолевых клеток. Снижение пролиферативной активности сопровождается блокированием прогрессии клеток по циклу и последующей гибелью клетки. В работе Н. Я. Гильяно (лаборатория медицинской биофизики, зав. лаб. д. б. н. Л. А. Носкин) показана селективная эффективность 2-дезоксид-глюкозы (2DG) в блокировании опухолевых клеток в G_2/M -фазах клеточного цикла и индукции апоптотической гибели клеток. На клетках карциномы (линия HeLa 63) и эндотелиоцитах (линия ECV304) человека было проведено сравнительное исследование эффектов низких концентраций (1,5–10 мМ) двух аналогов глюкозы: 2DG и D-глюкозамина. Показано, что 48-часовая обработка клеток 2DG в этих концентрациях приводит к снижению доли клеток в G1- и S-фазах и блокированию их в фазах G_2/M , а D-глюкозамин блокирует клетки в G_1/S -фазах клеточного цикла. При сочетанном воздействии 2DG и D-глюкозамина отмечено существенное увеличение апоптотически гибнущих клеток (sub- G_1 -популяция) по сравнению с отдельным воздействием. Таким образом, два ингибитора гексокиназы в низких концентрациях индуцируют различные чек-пойнты в клетках, что приводит к увеличению цитотоксического эффекта при сочетанной обработке опухолевых клеток. Антиканцерогенную эффективность ингибиторов гликолиза можно повысить, используя сочетанное воздействие двух ингибиторов, что позволит уменьшать дозы препаратов, сохраняя селективность.

Также особое внимание в ОМРБ уделяется работам по изучению механизмов злокачественной трансформации клеток. Злокачественная трансформация связана с потерей дифференцированного состояния клеток, или анаплазией. Транскрипционные факторы gli, необходимые для эмбрионального развития, могут также участвовать в этом процессе. В работе А. В. Волницкого (лаборатория клеточной биологии, зав. лаб. к. б. н. М. В. Филатов) исследовались активность

транскрипционных факторов gli в злокачественных глиомах и их роль в выживаемости и поддержании стволового состояния опухолевых клеток. Была обнаружена экспрессия генов-мишеней gli, включая *GLI1* и *FOXM1*, во всех исследуемых линиях клеток глиом (20 линий), но не в клетках нормальной ткани. В некоторых клеточных линиях экспрессия наблюдается на фоне высокого уровня их транскрипционного репрессора, Gli3R. Нокдаун *GLI3* в одной из этих линий приводил к снижению экспрессии генов-мишеней gli. Таким образом, Gli3R не препятствует транскрипции генов-мишеней, и gli3 действует в клетках глиом как активатор транскрипции. gli регулируют экспрессию генов *OCT4* и *SOX2*, поддерживающих стволовое состояние клеток. Инкубация клеток глиом с ингибитором GANT61 или нокдаун *GLI1*, *GLI2* и *GLI3* приводили к полной гибели опухолевых клеток. Транскрипционные факторы gli проявляют аномальную активность в злокачественных глиомах и регулируют экспрессию генов, поддерживающих стволовое состояние клеток, и тем самым вносят вклад в выживаемость опухолевых клеток.

Белок p53 – один из самых изучаемых белков. Такое внимание к нему вызвано его ключевой ролью в клеточных механизмах, связанных с канцерогенезом. Белок p53 является транскрипционным фактором, участвующим в самых разнообразных процессах: регуляции клеточного цикла и апоптоза, проведении сигналов внутри клетки, репарации ДНК, координации метаболических процессов, взаимодействиях между клетками и т. д. Обзор С. Н. Нарыжного и О. К. Легиной (лаборатория протеомики, зав. лаб. д. б. н. С. Н. Нарыжный) посвящен описанию известных на сегодняшний день протеоформ p53 и их возможной функциональной роли.

Традиционными для ОМРБ являются работы по применению биофизических подходов в медицинской практике. В работе Л. А. Носкина (лаборатория медицинской биофизики) излагается методология экспресс-диагностики функционального сопряжения сердечно-сосудистой системы и внешнего дыхания для выявления индивидуальных реакций у пациентов ревматологического профиля. Для регистрации сопряжения дыхательной и сердечно-сосудистой систем был

использован комплекс «Спироартериокардиоритмограф-01» (САКР), разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Измеряются показатели сердечно-сосудистого и дыхательного синхронизма, полученные в покое и при функциональных пробах (с фиксированным дыханием и умеренной физической нагрузкой). Анализ результатов позволяет дифференцировать адаптационные реакции у здоровых испытуемых и пациентов с аутоиммунным компонентом при ревматологической патологии, что открывает возможность применения метода для задачи индивидуального прогнозирования функционального состояния организма.

В работе Е. С. Кропотовой и М. И. Мосевичко (лаборатория биополимеров, зав. лаб. д. ф.-м. н. А. Л. Тимковский) показано, что внеклеточные экзоталлопептидазы мозга млекопитающих неспособны деградировать пептид, если на его конце-мишени находится остаток «необычной» аминокислоты бета-аланина (β Ala). С учетом этого факта было создано несколько модификаций опиоидного эндогенного пептида мет-энкефалина (Tyr-Gly-Gly-Phe-Met), две из которых – МодЭнк1 (β Ala-Tyr-Gly-Gly-Phe-Met- β Ala) и МодЭнк2 (β Ala-Tyr-Gly-Gly-Phe-NH₂) – показывают наибольшую стабильность в системе *in vitro*, сохраняют обезболивающие свойства и многократно превосходят мет-энкефалин в длительности обезболивания.

Также в ОМРБ изучается использование фуллеренов и их производных в медицине, которое может быть ограничено их токсичностью. Токсичность фуллеренов тесно связана с их окислительным действием и зависит от свойств самих частиц, величины их кластеров, стабильности в растворе и способа приготовления. Отсутствуют представления о безопасных концентрациях фуллеренов. Анализ токсичности высоководорастворимых фуллеренов (фуллеренолов), полученных новым методом, в котором в качестве гидроксильного агента был использован водный раствор перекиси водорода H₂O₂, представлен в работе О. И. Большаковой (лаборатория экспериментальной и прикладной генетики, зав. лаб. д. б. н. С. В. Саранцева). Анализ показал, что исследуемые препараты, ежедневно и в больших концентрациях поступающие в организм на *Drosophila*

melanogaster линии Canton-S с пищей, не снижали продолжительность их жизни и не изменяли форму кривой выживаемости. Также они не влияли на геотаксис мух – одну из важнейших поведенческих характеристик насекомых. Исследование подтвердило тезис о том, что метод получения фуллеренолов играет ключевую роль в их токсичности, и предложенный новый способ позволяет получать фуллеренолы высокой степени чистоты, нетоксичные или обладающие низкой токсичностью *in vitro* и *in vivo*.

В ОМРБ на протяжении многих лет ведутся работы по исследованию микробной жизни в экстремальных условиях. Ионизирующая радиация рассматривается как основной фактор, ограничивающий сохранение возможных микроорганизмов и биомаркеров в ледовых космических телах, а также в процессе межпланетного переноса (панспермии) живых клеток. Определение пределов радиоустойчивости земной жизни необходимо для оценки вероятности существования жизни вне Земли. В работе С. А. Булата (лаборатория криоастробиологии, зав. лаб. к. б. н. С. А. Булат) исследована радиоустойчивость микробных сообществ дерново-подзолистой почвы (Московский район, Россия) при γ -облучении. После экспозиции дозой 148 кГр были получены бактериальные культуры, что значительно превосходит полученные ранее значения (достаточно 15–100 кГр для полной стерилизации почвы). После экспозиции дозой 320 кГр клетки не культивируются, но наблюдается большое количество прокариотических клеток ($\sim 3 \cdot 10^6$ клеток/г) без видимых следов повреждения ДНК, что свидетельствует о переходе клеток в «живое, но некультивируемое» состояние. Полученные результаты указывают, что радиорезистентность микробных сообществ в природных местообитаниях существенно недооценена.

За 2019 г. сотрудниками ОМРБ опубликовано более 60 работ в рецензируемых журналах (38 – в зарубежных), сделано более 40 докладов на международных научных конференциях. В Отделении по программе аспирантуры НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ обучаются 18 аспирантов, 8 сотрудников ОМРБ руководят работами аспирантов из других учреждений.

Отделение перспективных разработок

Отделение перспективных разработок (ОПР), руководитель – д. ф.-м. н. А. В. Титов, состоит из 3 лабораторий:

- голографических информационно-измерительных систем (заведующий – д. ф.-м. н. Б. Г. Турухано);
- квантовой химии (заведующий – д. ф.-м. н. А. В. Титов);
- медицинской физики (заведующий – А. И. Халиков)

и 3 отделов:

- ускорительного (заведующий – к. т. н. Е. М. Иванов), в состав которого входит лаборатория физики и техники ускорителей (заведующий – к. ф.-м. н. С. А. Артамонов);
- прикладной ядерной физики (заведующий – к. т. н. В. А. Соловей), в состав которого входят 2 лаборатории:

- электронного и программного обеспечения (заведующий – к. т. н. В. А. Соловей);
- радиационной физики (заведующий – к. ф.-м. н. А. С. Воробьев);

- информационных технологий и автоматизации (заведующий – С. Б. Олешко),

в состав которого входит лаборатория информационно-вычислительных систем (заведующий – С. Б. Олешко).

В ОПР работает 61 научный сотрудник, из них 7 докторов наук и 23 кандидата наук.



А. В. Титов,
д. ф.-м. н.,
руководитель
Отделения

В ОПР сосредоточены базовые ускорительные установки НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. В первую очередь это уникальный по своим характеристикам синхротрон СЦ-1000 с энергией протонов выведенного пучка 1 000 МэВ и током 1 мкА. Он позволяет проводить широкий круг научных и прикладных исследований в различных областях: от ядерной физики до медицины.

Основными его отличительными чертами являются:

- высокоэффективная система вывода (30 %), что в 5 раз превышает эффективность стандартной регенеративной системы;
- система временной растяжки выведенного протонного пучка, которая позволяет увеличить

коэффициент временного заполнения пучка с 2 до 85 %.

Для ряда физических и прикладных исследований требуются пучки протонов других энергий. С этой целью на СЦ-1000 силами ускорительного отдела (УО) созданы пучки протонов переменной энергии от 60 до 1 000 МэВ. Диаметр полученных пучков ~ 30–80 мм, $\Delta p/p$ находится в диапазоне 1,3–14 %, а интенсивность изменяется в диапазоне 10^7 – 10^{12} с⁻¹.

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

Для проведения научных исследований имеются вторичные пучки π^\pm - и μ^\pm -мезонов, получаемые на внешней мезонообразующей мишени. В камере ускорителя в результате однооборотного сброса протонного пучка на внутреннюю нейтронообразующую свинцовую мишень генерируются нейтроны с энергиями от 0,01 эВ до 950 МэВ.

Совершенствование космической и авиационной техники в значительной степени связано с использованием элементов микро- и наноэлектроники. Одним из основных условий их успешного применения является способность длительное время надежно функционировать в радиационных полях космического пространства и верхних слоев атмосферы. В настоящее время нормативные акты РФ и стандарты ведущих стран мира включают обязательные испытания радиационной стойкости современной радиоэлектронной аппаратуры, используемой в авиационной и космической технике, относительно воздействия различных видов излучения. В 2015 г. на синхроциклотроне СЦ-1000 начал функционировать специализированный центр радиационных испытаний на протонах с энергией 60–1 000 МэВ, включающий 2 стенда с системами диагностики пучка, современными приборами дозиметрии, автоматизированной системой обработки результатов и современной инфраструктурой для пользователей.

Международный нормативный документ JEDEC STANDARD предписывает проводить испытания электронных компонент и радиоизделий в потоках нейтронов со спектром, который подобен атмосферному спектру нейтронов. На нейтронном источнике ГНЕЙС синхроциклотрона СЦ-1000 силами группы физики деления ядер ОНИ (в настоящее время – группа нейтронной спектроскопии лаборатории радиационной физики (ЛРФ) отдела прикладной ядерной физики ОПР) и УО ОПР в 2015 г. завершено создание нейтронного испытательного стенда ИСНП/ГНЕЙС.

Высокая интенсивность нейтронного пучка позволяет проводить ускоренные испытания электроники: 1 ч экспозиции изделия на пучке эквивалентен 125 тыс. ч пребывания на полетных высотах 10–12 км. Таким образом, в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ с 2015 г. действует универсальный центр испытаний радиационной стойкости элементов электронной компонентной базы, в котором отныне возможно комплексное испытание радиоэлектроники как на пучках протонов переменной энергии, так и на пучках нейтронов со спектром, повторяющим спектр атмосферных нейтронов.

В ОПР силами УО и Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова проводятся работы по запуску многоцелевого циклотронного комплекса на основе построенного изохронного циклотрона Ц-80 с переменной энергией протонов 40–80 МэВ и током выведенного пучка до 100 мкА. Высокая энергия ускоренного пучка в сочетании с высокой интенсивностью позволит производить радиоизотопы и радиофармпрепараты высокого качества, недоступные для коммерческих циклотронов, в частности генераторные изотопы. Генераторные изотопы открывают путь для проведения позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) в отдаленных от циклотрона медицинских центрах. В проекте также предусмотрено развитие метода создания сверхчистых медицинских изотопов с помощью магнитного сепаратора. Энергетический диапазон протонного пучка (60–70 МэВ) циклотрона Ц-80 позволяет создать единственный на сегодня в России офтальмологический центр для протонной терапии онкологических заболеваний органов зрения. Разработкой этого проекта давно занимается УО совместно с Институтом теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова НИЦ «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ).

При создании оборудования для кабинета офтальмологии и планирования облучений будет использован огромный опыт, накопленный в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, где до 2010 г. сеансы протонной терапии прошли около 1 400 пациентов.

Лаборатория голографических информационно-измерительных систем (ЛГИИС) ОПР является одним из мировых лидеров в области прецизионных измерений на масштабах нанометров. Для проведения этих исследований в ЛГИИС имеется современная уникальная подземная безвибрационная голографическая лаборатория. На базе этой лаборатории и уникальных стендов для синтеза линейных и радиальных голографических дифракционных решеток выпускается 14 наименований нанотехнологических устройств и приборов, среди которых: фотоэлектрические преобразователи линейных и угловых перемещений, длиномеры, двух-, трех-, четырех-

и более координатно-измерительные машины, радиусомеры, плоскомеры, поворотные столы для измерений с разрешением 10 нм и сотых долей секунды. В 2015 г. впервые в мире в ЛГИИС создана линейная голографическая решетка длиной 1300 мм и разрешением 1 нм. Работы ЛГИИС были отмечены на выставке «Армия-2015».

Основным направлением развития работ лаборатории квантовой химии ОПР является развитие методов расчета электронной структуры молекул, содержащих тяжелые элементы. Эта активность была стимулирована еще в начале 80-х гг. прошлого века необходимостью расчета *P*- и *CP*-нечетных эффектов в тяжелых двухатомных молекулах. Основой расчетов стал развиваемый лабораторией двухшаговый метод, который позволил разделить структуру расчета таких молекул на два последовательных расчета в валентной области и в области кора. К настоящему времени точность, достигнутая в этих расчетах, стала рекордной в мире. Сотрудники лаборатории не ограничились расчетами *P*- и *CP*-нечетных эффектов и перешли к более сложным структурам. Разработка методов, алгоритмов и программных пакетов для прецизионного моделирования электронной структуры и свойств соединений тяжелых элементов позволила начать систематическое исследование свойств сверхтяжелых элементов, перейти к расчетам в твердофазных системах и провести исследование химических свойств, синтезируемых в Дубне и Дармштадте сверхтяжелых элементов из «острова стабильности». Еще одно направление исследований лаборатории – развитие теории электронной структуры и расчеты свойств охлаждаемых лазером молекул. Такие молекулы обладают очень интересным свойством – способностью перерассеивать сотни и даже тысячи фотонов без «утечки заселенности», что позволяет применять к таким молекулам очень хорошо развитые методы лазерного охлаждения атомов. Также лаборатория участвует в развитии недавно появившегося направления в молекулярной спектроскопии – лазерной спектроскопии соединений радиоактивных элементов. Данное направление имеет в основе методы ISOL (Isotope Separation On-Line), хорошо зарекомендовавшие себя в спек-

троскопии нестабильных атомных изотопов. Однако перенос данных методов на радиоактивные молекулы стал возможным только после ряда теоретических исследований, в которых приняли активное участие сотрудники лаборатории.

Лаборатория медицинской физики является научно-исследовательским структурным подразделением, проводящим научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по следующим направлениям: исследование воздействия различных видов ионизирующего излучения на организм человека и биологические объекты; развитие и внедрение новых технологий лучевой терапии с использованием протонов и других видов ионизирующего излучения; разработка и создание новых приборов и систем медико-физического назначения; развитие физических и математических основ радиационной медицины, радиобиологии и радиационной безопасности; научное и инженерно-техническое обеспечение работ по практической лучевой терапии, проводимых на установках НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

Основная задача – инженерное сопровождение облучения доброкачественных и злокачественных опухолей протонами. На сегодняшний момент для данных целей лаборатория медицинской физики использует пучок протонов синхротрона СЦ-1000 (энергия 1 000 МэВ).

В состав лаборатории медицинской физики входят:

- канал транспортировки протонов (медицинский протонный тракт);
- зал облучения (с мононаправленным горизонтальным пучком протонов) с установкой для протонной стереотаксической терапии;
- комнаты временного пребывания пациентов;
- пульт дистанционного управления оборудованием;
- мехмастерская;
- рабочие места инженерно-технического и научного персонала.

Отдел информационных технологий и автоматизации ОПР уже много лет принимает активное участие в проекте ATLAS на Большом адронном коллайдере в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН). Сотрудники лаборатории ин-

формационно-вычислительных систем заняты в разработке и поддержке различных программных комплексов для систем контроля детектора (DCS) и сбора данных (DAQ) эксперимента ATLAS.

Конструкторско-технологической группой отдела разработаны и прошли тестирование ряд прототипов капельных микрочипов (droplet microarray) – приборов для одновременного параллельного проведения множества операций жидкофазного взаимодействия самоорганизующихся капель заданной формы, расположенных в строгом порядке на твердых открытых платформах (пластинах) – прямой и зеркальной. Объемы капель могут варьироваться от нескольких нанолитров до нескольких микролитров, что дает экономию дорогостоящих материалов и реагентов по сравнению с традиционными методами исследования. Тестирование прототипов проводилось в лаборатории онкоэндокринологии Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н. Н. Петрова Минздрава России.

Проводились конструкторско-технологические разработки (совместно с ОВФЭ) по изготовлению конструкционных элементов для установки с целью измерения зарядового радиуса протона (коллаборация PROTON), а также электроники для экспериментов LHCb (ЦЕРН), FAIR, R3B и ShiP (GSI).

Отдел прикладной ядерной физики образован в 2017 г., имеет научно-технический статус, включает в себя ЛРФ и лабораторию электронного и программного обеспечения (ЛЭПО).

В ЛРФ проводятся исследования:

- взаимодействия нейтронов и частиц высокой энергии с веществом и модификации структуры и свойств твердых тел при облучении;
- воздействия протонного и нейтронного облучения на электронные компоненты и приборы, а также разработка методик измерений и проведения радиационных испытаний;
- взаимодействия нейтронов различной энергии с атомными ядрами и измерения ядерных констант, а также разработка и создание новых ядерно-физических установок.

На нейтронном времяпролетном спектрометре ГНЕЙС в 2019 г. выполнены измерения

угловых распределений осколков деления ^{240}R , а также сечений деления ^{240}R и ^{237}Np нейтронами с энергиями от 1 до 200 МэВ. В области резонансных энергий нейтронов от тепловых до 300 эВ выполнены измерения множественности и энергетических спектров γ -лучей деления, а также множественности нейтронов деления ^{235}U с целью изучения (n, gf) -реакции (деления после предварительного испускания γ -кванта). Данная реакция, индуцированная в делящихся ядрах нейтронами реакторного спектра энергий, имеет важное значение для создания новейших библиотек оцененных ядерных констант, используемых в ядерной энергетике.

Основные направления деятельности ЛЭПО: разработка, комплексная подготовка и поддержка в процессе эксплуатации электронного оборудования и программного обеспечения для автоматизации научных исследований и технологических установок, детекторных систем регистрации нейтральных и заряженных частиц, обеспечение и проведение исследований в Антарктиде.

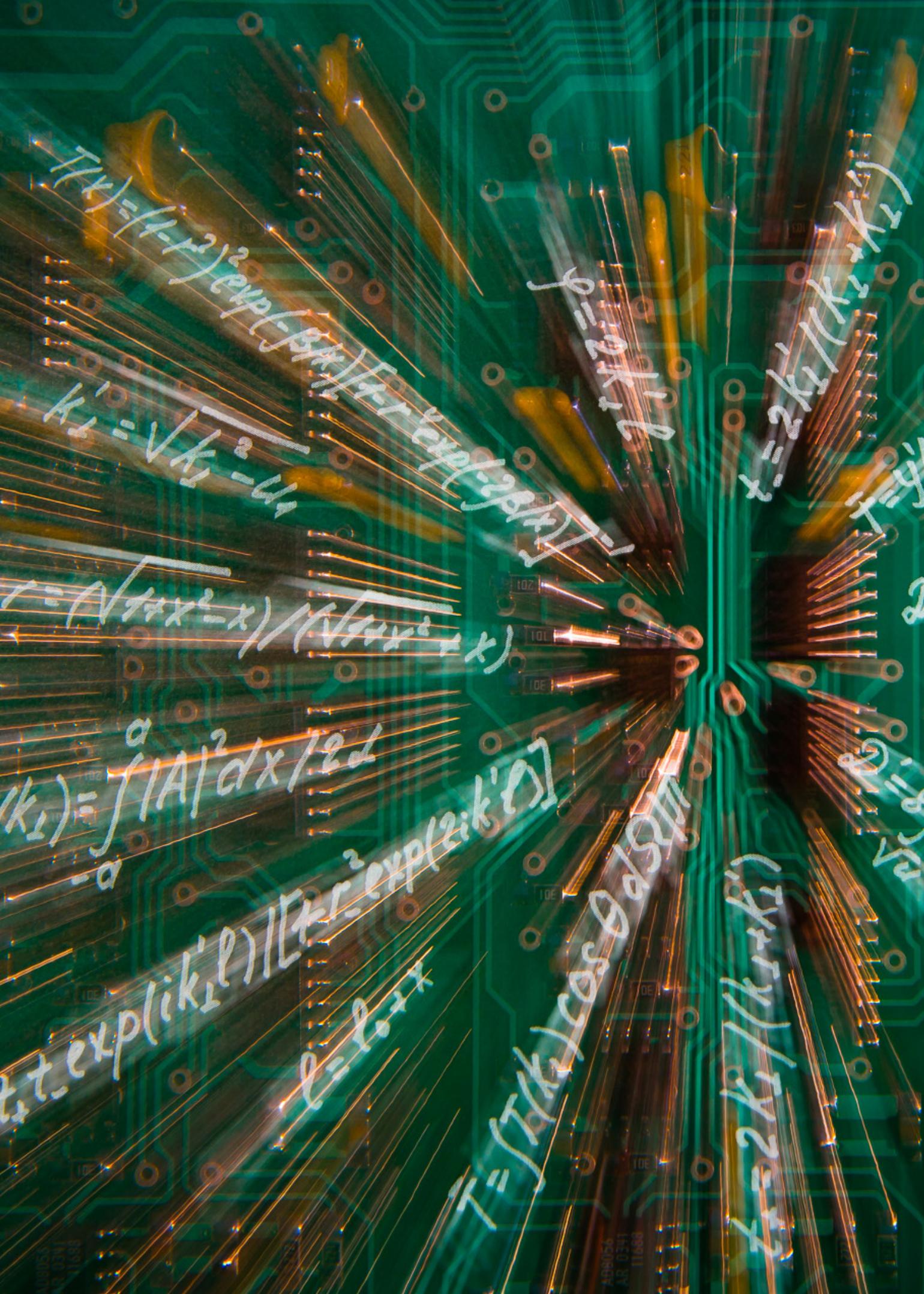
Открытие подледникового озера Восток в Антарктиде стало последним географическим открытием XX в. Его исследование позволит получить уникальные данные о происхождении и эволюции форм жизни в экосистемах, которые характеризуются крайне высокой степенью олиготрофности (т. е. низкой концентрацией питательных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

ские параметры в режиме онлайн, а также допускающих стерильный отбор проб воды и грунта в объемах, необходимых для проведения последующих лабораторных анализов.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ изготовлено оборудование, предназначенное для исследования водной толщи озера Восток.

В 2018 г. испытание созданного оборудования успешно прошло на станции «Восток».

Сотрудниками ОПр в 2019 г. опубликовано 34 работы, которые проиндексированы в WoS и Scopus, сделано более 30 докладов на российских и международных научных конференциях, получено 12 патентов.



$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\psi}(k) e^{ikx} dk$$
$$k_1' = \sqrt{k_1^2 - \epsilon_1^2}$$

$$\phi = \theta + k_1 x$$

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

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

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

$$t \cdot \exp(ik_1' l) / [t r^2 \exp(2ik_1' l)]$$
$$l = 2a + x$$

$$T = \int T(k) \cos \theta \delta l \delta l$$

$$t r = 2k_1 / (k_1 + k_1')$$

Теоретическая и математическая физика

- 30 Формирование спирального упорядочения во фрустрированных антиферромагнетиках во внешнем магнитном поле
- 31 Новые пентакварки как состояния хадрочармония
- 32 Новая физика в Стандартной модели, основанная на электроне и его симметрии
- 33 Обобщенные релятивистские псевдопотенциалы для сверхтяжелых элементов
- 35 Поиск T , P -нечетных взаимодействий в молекуле моногидроксида иттербия

Формирование спирального упорядочения во фрустрированных антиферромагнетиках во внешнем магнитном поле

О. И. Утесов, А. В. Сыромятников

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

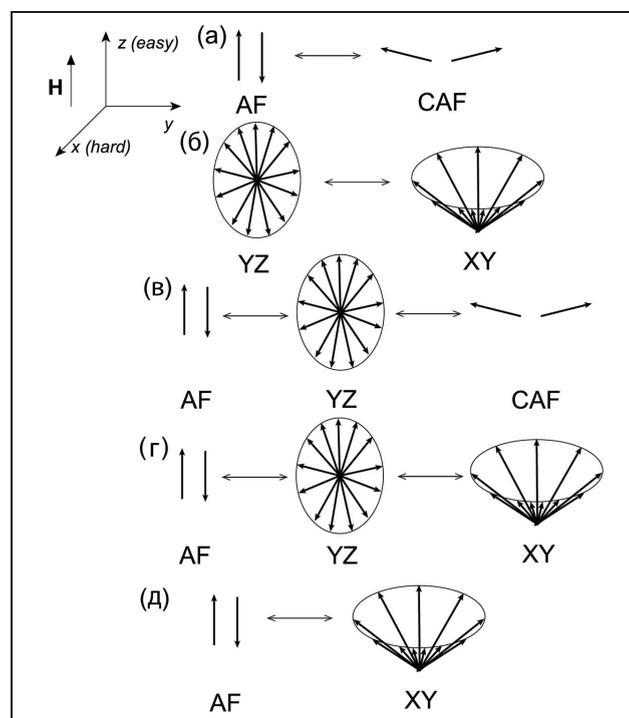
В настоящее время широко исследуются вещества, в которых одновременно есть, например, и магнитный, и сегнетоэлектрический порядки. Они называются мультиферроиками. Такие материалы считаются перспективными для нанотехнологий, т. к. в них появляется возможность контролировать магнитное упорядочение электрическим полем, и наоборот. Поиск мультиферроиков с большим магнитоэлектрическим эффектом долгое время был относительно неуспешным. Однако открытие гигантского магнитоэлектрического эффекта в так называемых мультиферроиках спиновой природы, в которых сегнетоэлектричество возникает благодаря определенному типу магнитного упорядочения, сделало их изучение одной из главных тем современной физики твердого тела.

В неколлинеарных магнетиках электрическая поляризация обычно возникает в спиральных фазах, при этом ее направление определяется плоскостью вращения спинов. Спиральный магнитный порядок, в свою очередь, может проявляться в веществе при фрустрации обменных взаимодействий.

В данной работе был использован предложенный ранее подход к описанию спиральных фаз фрустрированных магнетиков при наличии слабой двуосной одноионной анизотропии. В системах с умеренной анизотропией он также применим, однако возникает конкуренция между спиральными и соразмерными фазами. При этом считалось, что основное состояние системы в нулевом магнитном поле является коллинеарным антиферромагнитным.

Было продемонстрировано, что в вышеописанной системе в магнитных полях, много меньших

поля насыщения, помимо двух хорошо известных последовательностей фазовых переходов: спин-флоп-перехода в антиферромагнетике (рис. а) и переворота плоскости вращения спинов в спиральном магнетике (б), возникают еще три сценария. Например, первый из них может быть описан как спин-флоп-переход через промежуточную спиральную фазу (в), он наблюдался экспериментально в мультиферроике $MnWO_4$. Последовательности (г) и (д), насколько известно авторам данной работы, экспериментально еще не были обнаружены, и это представляет собой важную задачу.



Последовательности фазовых переходов во фрустрированных анизотропных антиферромагнетиках в слабых магнитных полях (а–д)

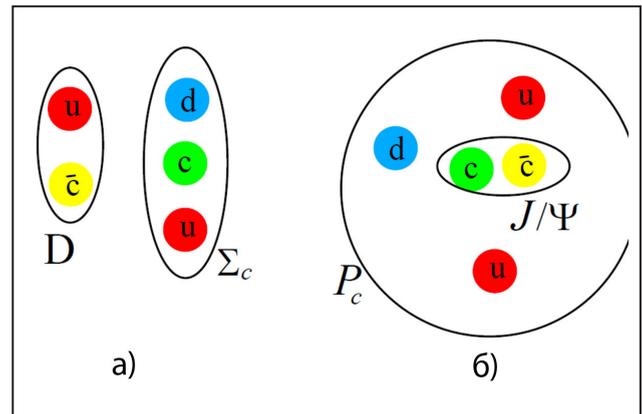
Новые пентакварки как состояния хадрочармония

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

Отделение теоретической физики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Пентакварки со скрытым чармом были открыты коллаборацией LHCb около пяти лет назад. Первые эксперименты обнаружили два пентакварка: один с массой $4\,380 \pm 8 \pm 29$ МэВ и шириной $205 \pm 18 \pm 86$ МэВ и другой с массой $4\,449,8 \pm 1,7 \pm 2,5$ МэВ и высотой $39 \pm 5 \pm 19$ МэВ. Наиболее вероятными спин-четностями J^P считались состояния противоположной четности, один из пентакварков со спином $3/2$, а другой – $5/2$. В настоящее время существует большое количество теоретической литературы по интерпретации LHCb-пентакварков. Наиболее популярными являются молекулярный сценарий и картина пентакварка как хадрочармония. Обсудим второй вариант, предложенный в наших работах.

В 2019 г. были представлены новые экспериментальные данные по LHCb-пентакваркам. Они указывают на два узких состояния, $P_c(4\,440)$ и $P_c(4\,457)$, вместо одного старого пентакварка $P_c(4\,450)$. Также в эксперименте наблюдается новый узкий резонанс $P_c(4\,312)$. Мы рассматриваем открытие двух узких состояний $P_c(4\,440)$ и $P_c(4\,457)$ как подтверждение предсказаний о двух почти вырожденных пентакварках с $J^P = 1/2^-$ и $J^P = 3/2^-$ и массой наблюдаемого пентакварка 4 450 МэВ (рис. а, б). Недавно мы



Два сценария для пентакварков (а, б)

улучшили оценки сверхтонкого расщепления между состояниями $J^P = 1/2^-$ и $J^P = 3/2^-$ пентакварков. Интерпретация расщепления $P_c(4\,440)$ и $P_c(4\,457)$ как сверхтонкого дает значения разности масс, близкие к экспериментальным данным. Эта гипотеза также естественным образом объясняет разницу ширин этих пентакварков.

Добавочный пентакварк $P_c(4\,312)$ может быть объяснен как связанное состояние чармония $\chi_{co}(1P)$ и нуклона. В этом подходе он должен иметь спин-четность $J^P = 1/2^+$. Такая модель предсказывает положение и ширину этого резонанса, близкую к эксперименту.

1. Eides M.I., Petrov V.Yu., Polyakov M.V. // Eur. Phys. J. C. 2018. V. 78. P. 36.
2. Eides M.I., Petrov V.Yu. // Phys. Rev. D. 2018. V. 98. P. 114037.
3. Eides M.I., Petrov V.Yu., Polyakov M.V. // Mod. Phys. Lett. A. 2020. V. 35. No. 18. P. 2050151.

Новая физика в Стандартной модели, основанная на электроне и его симметрии

С. И. Сухоручкин

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В работе представлен обзор новых данных, важных для развития Стандартной модели. Согласно Й. Намбу, эта модель успешно работает, но содержит слишком много параметров, связанных с массами частиц. Р. Фейнман отмечал аналогию в расчете массы частицы и ее магнитного момента, а Д. Ширков акцентировал внимание на роли физического конденсата (вакуума) в расчете радиационной поправки $\alpha/2\pi$ к магнитному моменту. Эти три аспекта были использованы в работе. Например, замеченное Й. Намбу соотношение для массы нуклона $m_n = m_\mu + 6m_\pi$ и отмечавшееся разными авторами соотношение 13:17 между массами мюона и пиона приводят к периоду 8 174 кэВ, близкому к $\delta = 16m_e = 8 176$ кэВ и величине $115\delta - m_e$ для массы нейтрона. Период $\delta = 16m_e$ был введен нами в 1972 г.

Подтверждение периода $\delta = 16m_e$ составляет первую задачу, решенную в этой работе. Используя 137 величин масс частиц из компиляции Particle Data Group – 2018, известных с точностью лучше 8 МэВ, было получено распределение разностей масс частиц, на котором в области значений до 100 МэВ оказались максимумы при 17 МэВ = 2δ и 48 МэВ = 6δ , а также максимумы при целых ($k = 1, 12, 24$) значениях массы пиона, массы конституентного кварка $M_q = 441$ МэВ в нерелятивистской модели конституентных кварков и массы b -кварка 3 960 МэВ = $9M_q$.

При использовании недавно установленного точного отношения масс нейтрона и электрона

1 838,6836605(1) было найдено точное кратное соотношение между сдвигом массы нейтрона на 161,6491(6) кэВ от целого числа m_e и разностью масс нуклонов $8 \cdot 1,0001(1)$. Величина 161 кэВ и кратные ей величины 322, 483, 644, 967 и 1 290–1 293 кэВ (близкие к разности масс нуклонов 1 293,33 кэВ) были найдены в возбуждениях и энергиях связи многих ядер. Величины, близкие к 1 293 кэВ, были обнаружены О. И. Сумбаевым в энергиях γ -переходов, в энергиях связи – В. Н. Андреевым, также Э. Уитмером отмечались величины, кратные m_e .

Точное кратное соотношение в массах нуклонов и электрона означает выделенный характер величины m_e и периода $16m_e$. Важная роль ядерных данных, особенно по околомагическим ядрам, проверялась на данных из компиляции Springer, созданной в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, где в 20 томах собрана информация о возбуждениях, энергиях связи и параметрах нейтронных резонансов всех ядер.

Работа была представлена на международной конференции QCD-18 (Монпелье, Франция) и опубликована в реферируемом журнале. Дополнительные результаты, доложенные на международных научных мероприятиях: QCD-19, 18-м Рабочем совещании по физике спина при высоких энергиях (DSPIN-19) и 27-м Международном семинаре по взаимодействию нейтронов с ядрами (ISINN-27) в 2019 г., появятся в печати в начале 2020 г.

Обобщенные релятивистские псевдопотенциалы для сверхтяжелых элементов

Н. С. Мосягин, А. В. Зайцевский, А. В. Титов

Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Концепция обобщенных релятивистских псевдопотенциалов (ОРПП) атомных остовов, развиваемая в лаборатории квантовой химии (ЛКХ) НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, предполагает, что при решении многоэлектронной задачи для молекулы или кластера из рассмотрения исключаются лишь наиболее глубоко лежащие остовные оболочки; зависимость волновых функций от координат, не только валентных, но и субвалентных (внешних остовных) электронов, описывается явно. В отличие от стандартных моделей псевдопотенциалов (эффективных потенциалов) остова модель ОРПП использует разные полулокальные потенциалы для валентных и субвалентных электронных оболочек. Как показано на рисунке, различия оптимальных остовных потенциалов для разных подоболочек тяжелого атома с одинаковыми значениями полного и пространственного угловых моментов отнюдь не пренебрежимы. Техника ОРПП позволяет с высокой точностью учитывать релятивистские эффекты, в т. ч. основную часть некулоновских электрон-электронных взаимодействий, оперируя с формально нерелятивистской кинетической энергией и обычными мгновенными кулоновскими взаимодействиями для явно рассматриваемых электронов. Простота многоэлектронных гамильтонианов с ОРПП позволяет сосредоточиться на более точном решении проблемы учета корреляций валентных и субвалентных электронов путем использования более полных атомных базисов, включении более высоких возбуждений в разложения кластерных операторов в методах связанных кластеров и т. д. Кроме того, обеспечиваются корректность решения релятивистских задач при помощи стандартных формально нерелятивистских приближений теории функционалов плотности и, следовательно, быстрое получение

полуколичественных оценок физических величин для сложных систем.

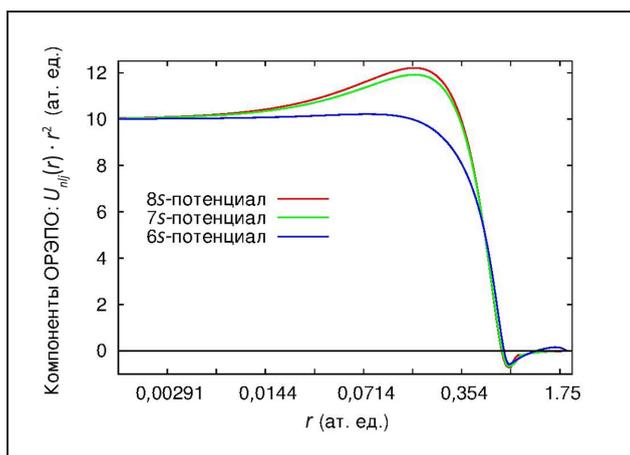
ОРПП является надежным, высокоточным и в то же время экономичным инструментом для моделирования электронной структуры с очень широкой областью применения. Однако если для соединений элементов середины периодической таблицы использование ОРПП позволяет лишь повысить экономичность вычислений, точность и надежность результатов, то при переходе к моделированию химии наиболее тяжелых элементов – актинидов и трансактинидов – конкурентоспособных альтернатив технике ОРПП пока просто не просматривается. Для количественного описания физико-химических свойств сверхтяжелых элементов необходимо принять во внимание значительные релятивистские отклонения межэлектронных взаимодействий от кулоновских за счет брейтовского взаимодействия. Возможность учесть вклад от этого взаимодействия при моделировании электронных состояний молекул посредством ОРПП без особых дополнительных затрат контрастирует с вычислительными трудностями подобного учета в сочетании с корректным описанием электронных корреляций с помощью традиционных «четырёхкомпонентных» релятивистских моделей. Эти трудности остаются неподъемными даже для современных суперкомпьютеров.

С ростом атомного номера происходит размывание оболочечной структуры, и выделение валентных и субвалентных оболочек становится крайне затруднительным и неоднозначным – ситуация, выход из которой состоит в исключении из расчета сравнительно небольшого числа электронов и явного рассмотрения нескольких субвалентных оболочек. В отличие от стандартных полулокальных псевдопотенциалов обобщенная

модель дает возможность достичь очень точного описания как валентных, так и всех субвалентных оболочек одновременно. Это обстоятельство, в частности, определяет возможность использования ОРПП при прогнозировании химии сверхтяжелых элементов после завершения восьмого периода, в частности при проверке гипотезы о суперактинидах (*g*-элементах) при помощи молекулярных расчетов. Предварительные исследования показали, что уже элемент 123 (экапротактиний) в высоких состояниях окисления может проявлять свойства, переходные от *f*- к *g*-элементам. Однако ошибка обычного полулокального приближения для псевдопотенциалов в оценке относительного положения состояний с *f*- и *g*-электронами может достигать половины электронвольта, что в условиях очень

плотных спектров делает это приближение бессмысленным.

Обзор применений модели ОРПП в расчетах электронной структуры физико-химических свойств соединений и адсорбционных комплексов, содержащих сверхтяжелые элементы, опубликован в «Международном журнале квантовой химии». Работа Н. С. Мосягина по развитию теории и систематическому построению обобщенных псевдопотенциалов была поддержана именной научной стипендией губернатора Ленинградской области. Построенные ОРПП – один из основных инструментов расчетных работ в рамках четырех грантов РФФИ № 18-12-00227, 19-72-10019, 20-13-00225, 21-42-04411, недавно выигранных сотрудниками ЛКХ НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.



Потенциалы U_{nl} для валентных (8s) и субвалентных (7s, 6s) псевдоспинов сверхтяжелого элемента E^{122} как функции расстояния r от центра ядра. По оси абсцисс использован логарифмический масштаб

Поиск T , P -нечетных взаимодействий в молекуле монооксида иттербия

Д. Е. Майсон, Л. В. Скрипников

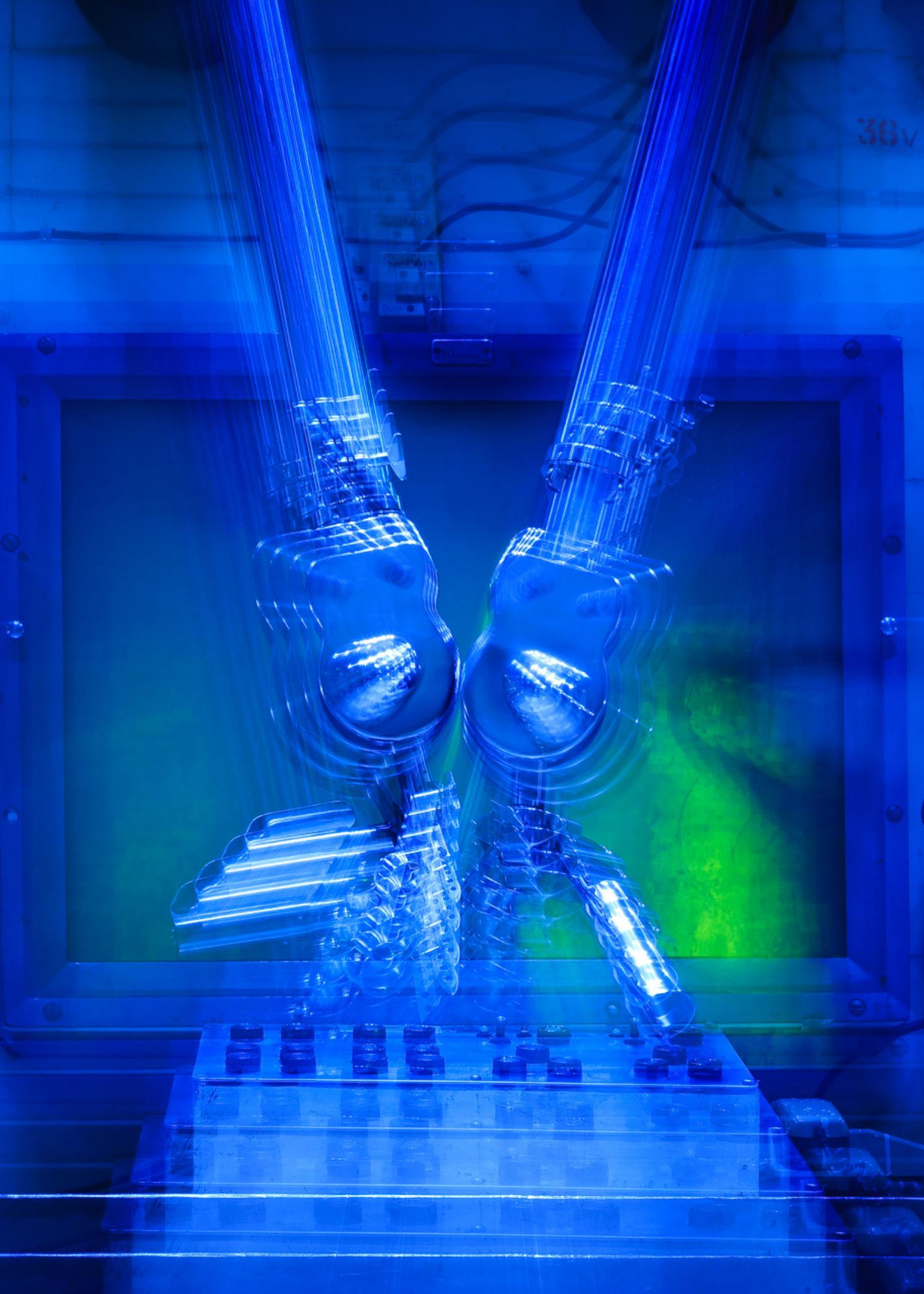
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
Санкт-Петербургский государственный университет

Одним из наиболее актуальных направлений современной теоретической физики является поиск универсальной теории фундаментальных физических взаимодействий. На данный момент предложены многочисленные расширения Стандартной модели (СМ), большинство из которых не подтверждены и не опровергнуты. Помимо исследования столкновений частиц на коллайдерах, проверка таких теорий могут служить эксперименты на атомах или небольших молекулах. Эффекты нарушения T , P -инвариантности в фундаментальных взаимодействиях могут приводить к детектируемому сдвигу энергетических уровней таких систем. Подобные эксперименты позволяют или обнаружить T , P -нечетные эффекты, или установить ограничения на соответствующие константы взаимодействия и параметры. Так, в экспериментах на молекуле ThO установлено самое строгое ограничение на электрический дипольный момент электрона d_e . Ненулевое значение d_e означает нарушение T , P -инвариантности. Из этого ограничения также следуют ограничения на параметры многих расширений СМ.

Проведено исследование другого CP -нечетного эффекта, а именно взаимодействия магнитного квадрупольного момента (МКМ) ядра ^{173}Yb

с электронами в молекуле YbOH . Ранее было показано, что линейные трехатомные молекулы, такие как YbOH , могут быть охлаждены до крайне низких температур (предварительные экспериментальные данные дают значение 600 мК) и поляризованы сравнительно малым электрическим полем ~ 100 В/см. Таким образом, чувствительность эксперимента по поиску CP -нечетных эффектов в этой молекуле ожидается на несколько порядков выше, чем в наиболее успешных на данный момент измерениях. Проведено как вычисление константы взаимодействия ядерного МКМ с электронами в молекуле методом связанных кластеров в пространстве Фока, так и оценка самой величины МКМ в рамках модели Нильссона. Приведенные в работе оценки показывают, что YbOH является очень перспективной системой для измерения МКМ ядра ^{173}Yb . Из таких измерений можно будет установить новые ограничения на такие параметры КХД, как угол θ и др.

Расчеты электронной структуры выполнены при поддержке гранта РФФИ № 18-12-00227, расчеты матричных элементов коэффициентов усиления МКМ – при поддержке фонда «Базис» (проекты № 18-1-3-55-1 и 20-1-5-76-1).



30V

Исследования с использованием нейтронов, фотонов и мюонов

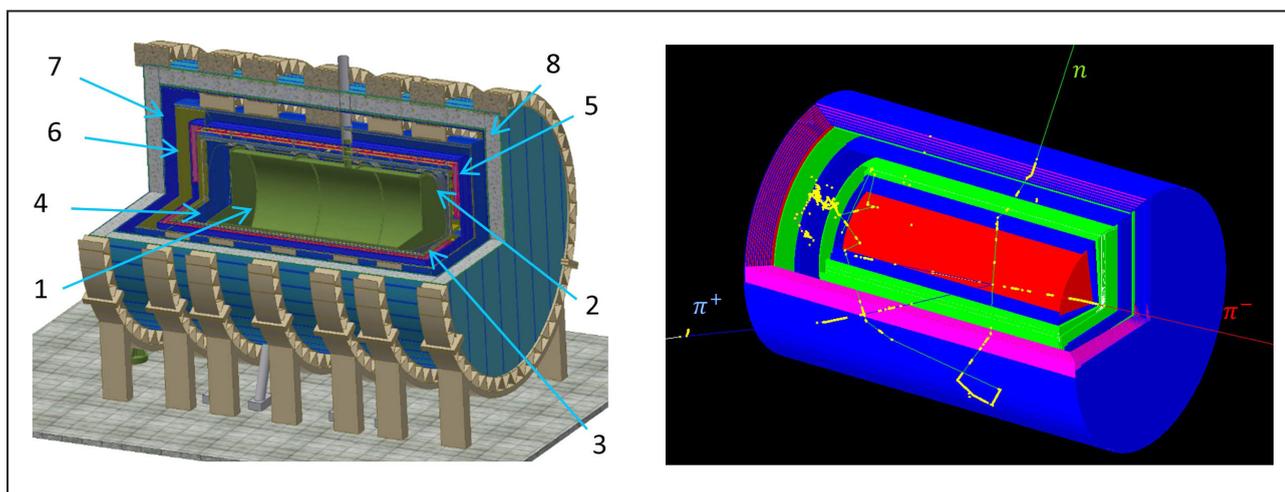
- 38 Проект эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с ультрахолодными нейтронами
- 39 Угловые распределения и анизотропия осколков деления ^{239}Pu и ^{237}Np нейтронами с энергией 1–200 МэВ
- 40 Механизм надмолекулярного упорядочения водорастворимых производных фуллеренов
- 41 Магнитный порядок в слоистых квазидвумерных магнетиках $A_3M_2\text{SbO}_6$
- 43 Электронная и магнитная структуры интеркалированных пленок графена
- 44 Определение содержания лантанидов и 3d-металлов в эндометаллофуллеренах рентгенофлуоресцентным методом
- 46 Магнитная структура инвертированных опалов по данным малоуглового рассеяния нейтронов и микромагнитного моделирования
- 47 Фазовое разделение в манганитах с половинным легированием при изовалентном замещении трехвалентных катионов на примере $\text{Sm}_{0,32}\text{Pr}_{0,18}\text{Sr}_{0,5}\text{MnO}_3$
- 49 Полная характеристика коллоидного раствора наночастиц на основе магнетита для применения в биомедицине
- 51 Кристалл $\text{Tm}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ – новый перспективный болометр для поиска солнечных аксионов
- 52 Особенности подготовки камер хранения ультрахолодных нейтронов и чувствительность ЭДМ-спектрометра
- 53 μSR -исследование динамики внутренних магнитных корреляций в мультиферроике $\text{Tb}(\text{Bi})\text{MnO}_3$ в магнитоупорядоченном и парамагнитном состояниях

Проект эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с ультрахолодными нейтронами

А. К. Фомин, А. П. Серебров, М. Е. Чайковский, О. М. Жеребцов, А. Н. Мурашкин –
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
Е. С. Голубева – Институт ядерных исследований РАН

Разработан проект эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций на основе хранения ультрахолодных нейтронов (УХН) в материальной ловушке. Такой эксперимент становится конкурентоспособным по сравнению с пучковым экспериментом благодаря созданию новых производительных источников УХН. Разработана Монте-Карло-модель транспорта и хранения УХН. Для моделирования эффективности регистрации продуктов реакции аннигиляции создана GEANT4-модель установки (рис.). Полученная эффективность регистрации составляет 68 %. Разработана электронная схема детектирующей системы. Произведен расчет, и выбра-

ны параметры магнитных экранов. Разработана конструкторская документация для изготовления установки, и произведена оценка стоимости ее производства. Разработаны план расположения и коммуникаций установки, а также схемы ее монтажа в главном зале реактора ВВР-М с учетом имеющейся инфраструктуры. При производительности источника УХН 10^8 с^{-1} в эксперименте может быть достигнуто улучшение существующей чувствительности в 10–40 раз в зависимости от модели отражения нейтронов от стенок ловушки. По сравнению с пучковым экспериментом реализация эксперимента с УХН является более компактной и менее дорогостоящей.



Дизайн установки для поиска нейтрон-антинейтронных осцилляций (слева): 1 – ловушка ультрахолодных нейтронов; 2 – вакуумный объем; 3 – магнитный экран; 4 – внутренняя часть трекового детектора; 5 – внутренний слой годоскопа; 6 – средняя часть трекового детектора; 7 – внешний слой годоскопа; 8 – внешняя часть трекового детектора; GEANT4-модель (справа) с вырезом в 90° для обзора внутренней структуры

1. Fomin A., Serebrov A., Chaikovskii M., Zherebtsov O., Murashkin A., Golubeva E. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1390. P. 012133.
2. Fomin A., Serebrov A., Chaikovskii M., Zherebtsov O., Murashkin A., Golubeva E. // EPJ Web Conf. 2019. V. 219. P. 07003.

Угловые распределения и анизотропия осколков деления ^{239}Pu и ^{237}Np нейтронами с энергией 1–200 МэВ

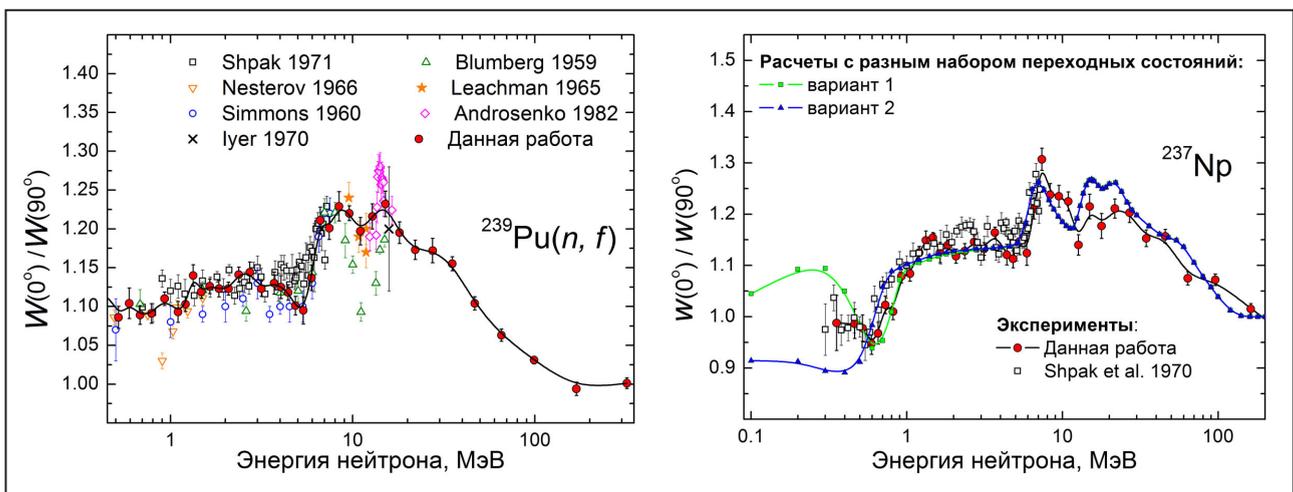
А. С. Воробьев, А. М. Гагарский, О. А. Щербаков, Л. А. Вайшнене –
 Отделение перспективных разработок, Отделение нейтронных исследований,
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
 А. Л. Барабанов – НИЦ «Курчатовский институт»

В 2019 г. на нейтронном времяпролетном спектрометре ГНЕЙС завершены измерения угловых распределений $W(\theta)$ осколков деления ^{239}Pu и ^{237}Np нейтронами с энергией 1–200 МэВ. Из экспериментальных данных вычислена величина анизотропии $W(0^\circ)/W(90^\circ)$, которая является параметром, используемым для теоретического описания угловых распределений осколков деления. Такой анализ выполнен с помощью метода расчета угловых распределений осколков, разработанного в НИЦ «Курчатовский институт» на базе кода TALYS-1.9. Результаты тестирования этого метода на экспериментальных данных, полученных для ^{237}Np , говорят о том, что он может применяться для получения новой информации о процессе деления и других реакциях, индуцированных нейтронами промежуточных

энергий. В частности, этот метод позволяет определить вклады отдельных изотопов, образующихся из ядра-мишени после поглощения нейтрона, в наблюдаемую угловую анизотропию осколков.

К настоящему времени измерения угловых распределений и анизотропии осколков деления в диапазоне энергий нейтронов 1–200 МэВ выполнены на спектрометре ГНЕЙС для большого числа ядер: ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{209}Bi , $^{\text{nat}}\text{Pb}$ (рис.). Следующими объектами исследований являются ядра ^{240}Pu и ^{243}Am . В данном направлении исследований процесса деления ГНЕЙС занимает лидирующую позицию в мире и успешно конкурирует с установками nTOF (ЦЕРН) и LANSCE (Лос-Аламос).

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-02-00571.



Анизотропия осколков деления ядер ^{239}Pu (слева) и ^{237}Np (справа) нейтронами с энергией 1–200 МэВ

1. Vorobyev A.S., Gagarski A.M., Shcherbakov O.A., Vaishnene L.A., Barabanov A.L. // JETP Lett. 2018. V. 107. Iss. 9. P. 521.
 2. Vorobyev A.S., Gagarski A.M., Shcherbakov O.A., Vaishnene L.A., Barabanov A.L. // JETP Lett. 2019. V. 110. Iss. 4. P. 242.

Механизм надмолекулярного упорядочения водорастворимых производных фуллеренов

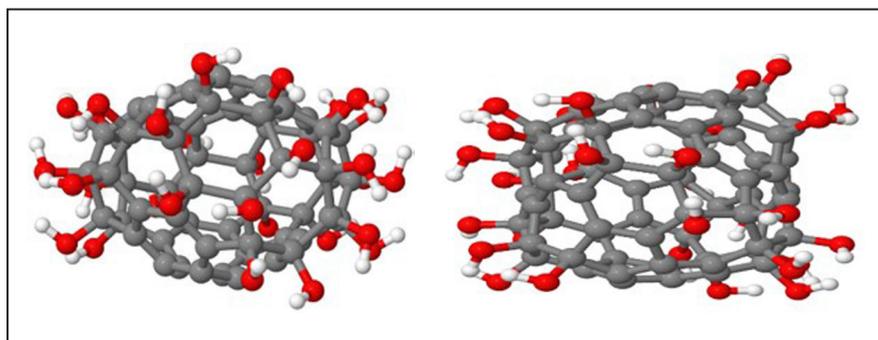
В. Т. Лебедев, Ю. В. Кульвеллис

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Фуллерены по характеру гибридизации атомных орбиталей углерода занимают положение между структурами sp^2 (графен) и sp^3 (алмаз). Это придает фуллеренам свойства, не наблюдаемые у других аллотропных форм углерода: химическую активность и акцепторные свойства, растворимость в органических средах с образованием наноструктур, что позволяет считать фуллерены кластерной формой вещества. Анализ структурирования в растворах актуален для C_{60} , C_{70} , высших гомологов C_{2n} ($n > 35$) и производных – фуллеренолов $C_{60}(OH)_X$ и $C_{70}(OH)_X$ ($X \geq 20$), перспективных для биомедицины.

До настоящего времени исследования в этой области были фрагментарными и не позволяли понять закономерности формирования наноструктур фуллеренолов в зависимости от различных факторов (концентрации, температуры, pH раствора). Авторами систематически изучена природа упорядочения $C_{60}(OH)_X$ и $C_{70}(OH)_X$ ($X \sim 30$) в водных средах, от сильно разбавленных растворов до гелей с концентрациями 0,05–22 % масс., в нейтронных и рентгеновских экспериментах с применением квантово-химических моделей конфигураций гидроксидов

на поверхности фуллеренов (рис.). Установленные из расчетов распределения гидроксидов на поверхностях фуллеренов позволили объяснить молекулярную сборку фуллеренолов, определяемую их гидрофобными и гидрофильными взаимодействиями в растворах. Квантово-химические данные для C_{60} при минимизации молекулярной энергии для конфигураций OH-групп на углеродной поверхности показали их предпочтительную локализацию в экваториальной зоне и на полюсах сфероидов C_{60} (см. рис.). В то же время на поверхности C_{70} гидроксиды с менее симметричным расположением не формируют замкнутых цепей. Вследствие этих различий молекулы $C_{60}(OH)_X$ в воде создают первичные цепочечные агрегаты (~ 20 единиц размером несколько нанометров) с большей вероятностью, чем молекулы $C_{70}(OH)_X$, которые менее агрегированы. Эти различные конфигурации гидроксидов влияли на интеграцию первичных групп во вторичные и третичные структуры на масштабах ~ 5–30 нм при концентрациях выше 5 и 10 % соответственно. Установленный механизм сборки фуллеренолов в водных средах позволит направленно использовать их в химии и биомедицине.



Конфигурация гидроксидов на поверхности C_{60} (слева) и их распределение на поверхности C_{70} (справа) при минимальных энергиях образования связей

Магнитный порядок в слоистых квазидвумерных магнетиках $A_3M_2SbO_6$

А. И. Курбаков, А. Н. Коршунов

Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Сейчас наблюдается повышенный интерес исследователей к предсказанию, обнаружению и изучению необычных магнитных явлений и, в частности, к поиску новых экзотических магнитных состояний вещества. Физика низкоразмерного магнетизма представляет собой огромное поле для современных исследований, которые возможны благодаря применению передовых экспериментальных и теоретических методов, успешно дополняющих друг друга. В отличие от треугольной решетки или решетки КагOME, где присутствуют геометрические фрустрации, в сотовообразной геометрии фрустрации возникают за счет конкуренции ферромагнитных (ФМ) и/или антиферромагнитных (АФМ) взаимодействий, соотношения между которыми определяют конечное спиновое состояние. Теоретические модели пока не позволяют предсказывать тип и температуру магнитного упорядочения соединения даже при детально известной атомной структуре, поэтому решающая роль здесь остается за прямым экспериментом по установлению спинового упорядочения. Связано это с тем, что даже самые малые изменения в кристаллической структуре могут приводить к радикальным изменениям в магнитных свойствах вещества.

Изучены особенности формирования дальнего магнитного порядка в ряде новых слоистых квазидвумерных магнетиков $A_3M_2SbO_6$ (A – щелочной, M – переходный $3d$ -металл) с сотовообразной сверхструктурой магнитных слоев. В результате полнопрофильного анализа данных дифракции высокого разрешения нейтронов и синхротронного излучения установлено, что кристаллическая структура соединений $Li_3Ni_2SbO_6$, $Li_3Co_2SbO_6$ и $Na_3Co_2SbO_6$ описывается в рамках моноклинной пространственной группы $C2/m$, а не тригональной $R\bar{3}_12$, как предполагалось ранее. Определены детали кристаллической структуры.

Обнаружены АФМ фазовые переходы, и получены значения критических температур в $Li_3Ni_2SbO_6$, $Li_3Co_2SbO_6$ и $Na_3Co_2SbO_6$ по явлению дополнительных магнитных отражений на низкотемпературных нейтронограммах (табл.). Установлено, что тип спинового упорядочения в слоистых магнетиках с сотовообразной решеткой крайне чувствителен к исходному атомному составу. В результате полнопрофильного анализа нейтронограмм были предложены модели спиновой структуры типа «зигзаг» для $Li_3Ni_2SbO_6$ и $Na_3Co_2SbO_6$, но с существенными отличиями в типе зигзага (рис.). Основное состояние магнитной подсистемы в $Na_3Co_2SbO_6$ описывается суперпозицией двух векторов пространства, $\mathbf{k}_1 = (1/2, 1/2, 0)$ с неприводимым представлением Γ_1 и $\mathbf{k}_2 = (1, 0, 0)$ с неприводимым представлением Γ_4 , и соответствует сложной неколлинеарной магнитной структуре. Наличие единицы в \mathbf{k}_2 приводит к добавлению дополнительной фазы $e^{2\pi i \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_n}$ у магнитного атома, образованной за счет вектора трансляции $\mathbf{t}_n = (1/2, 1/2, 0)$.

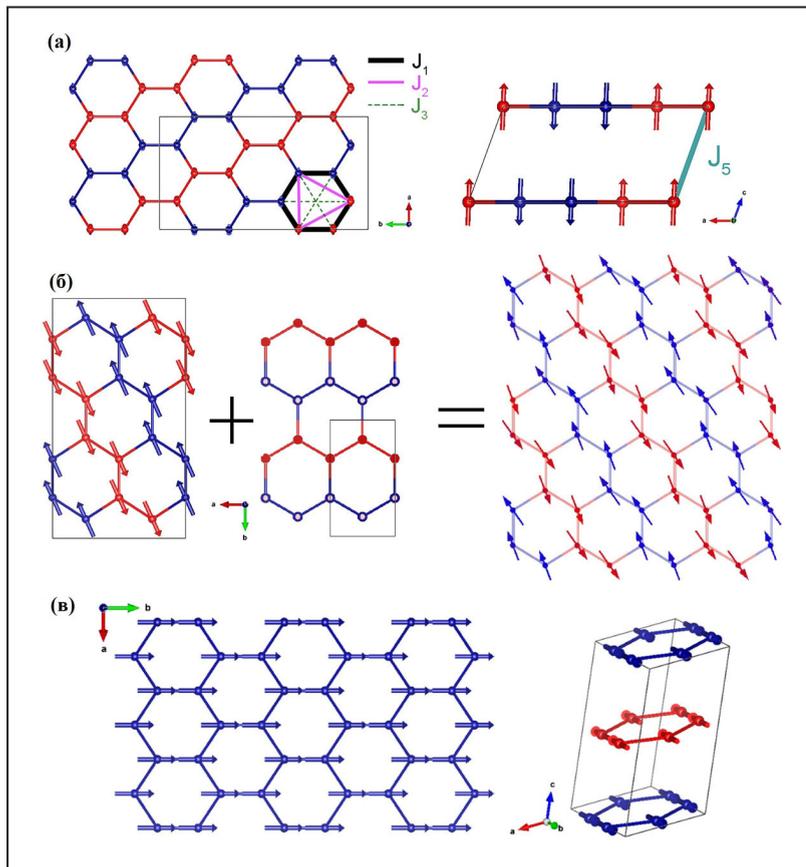
Для соединения $Li_3Co_2SbO_6$ спиновая структура не является зигзагообразной и может быть представлена как ФМ сотовообразные слои, АФМ-образом связанные друг с другом (так называемая магнитная структура типа А). Это наблюдается впервые для сотовообразных соединений. Все упорядочение является результатом сложной конкуренции обменных взаимодействий на гексагональной решетке магнитных атомов.

Установлено, что преимущественное направление магнитных моментов в упорядоченном состоянии существенным образом зависит от типа магнитного иона. В исследуемых кобальтатах спины Co^{2+} демонстрируют плоскостную анизотропию и лежат в плоскости ab . С другой стороны, для никелевых соединений характерно упорядо-

Таблица. Сравнение полученных результатов для соединений $A_3M_2SbO_6$ *

Соединение	T_N , К	Θ , К	$\mu_n, \mu_B/M^{2+}$	Преимущественное направление магнитного момента	\mathbf{k}	Магнитная структура
$Li_3Ni_2SbO_6$	15	8	1,62	Перпендикулярно магнитным слоям	$(1/2, 1/2, 0)$	Зигзаг
$Li_3Co_2SbO_6$	9,9	15	3,74	Внутри слоя ab	$(0, 0, 1/2)$	Ферромагнитные слои
$Na_3Co_2SbO_6$	6,7	-10	2,2	Внутри слоя ab	$(1/2, 1/2, 0)$ и $(1, 0, 0)$	Зигзаг

* T_N – температура Нееля из магнитной восприимчивости; Θ – температура Вейсса из аппроксимации парамагнитной восприимчивости $\chi = \chi_0 + C/(T - \Theta)$; μ_n – магнитный момент, определенный из нейтронограммы, измеренной при минимальной экспериментальной температуре ($\sim 1,5$ К).



Модели магнитной структуры для ряда соединений $A_3M_2SbO_6$: а – спиновая структура типа «зигзаг» для $Li_3Ni_2SbO_6$ (противоположные направления спинов обозначены красным и синим цветами соответственно) и схема обменных магнитных взаимодействий $J_1 - J_2 - J_3$ в слое и J_5 между соседними магнитоактивными слоями; б – неколлинеарная зигзагообразная спиновая структура для $Na_3Co_2SbO_6$; в – ферромагнитное слоистое упорядочение с антиферромагнитным взаимодействием между соседними слоями для $Li_3Co_2SbO_6$.

чение с магнитными моментами Ni^{2+} , которые направлены практически перпендикулярно слоистым слоям. Прослежена и совместно про-

анализирована температурная эволюция данных нейтронной дифракции, магнитной восприимчивости и теплоемкости.

Электронная и магнитная структуры интеркалированных пленок графена

С. М. Дунаевский, Е. К. Михайленко – Отделение нейтронных исследований
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,

И. И. Пронин, Е. Ю. Лобанова – Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

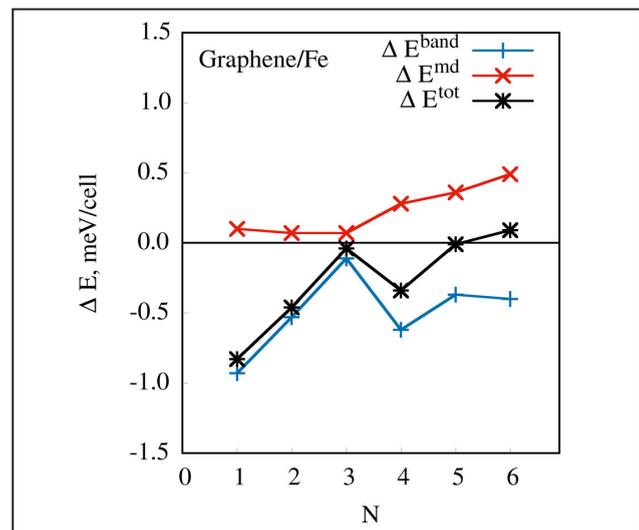
Интеркаляция систем «графен – подложка» атомами переходных металлов перспективна для создания устройств спинтроники на основе туннельных магнитных переходов и наноструктур с перпендикулярной магнитной анизотропией (ПМА).

Выполнен цикл работ, посвященных современным теоретическим *ab initio* и экспериментальным исследованиям электронных и магнитных свойств ультратонких слоев железа, интеркалированных под графен на поверхность никеля с ориентацией (111) Gr/Fe(Co)/Ni(111). Выбор системы обусловлен тем, что, в силу малого отличия постоянных решетки графена и никеля, высококачественный графен может быть получен на поверхности Ni(111) методом химического осаждения из газовой фазы.

Нами получены теоретические зависимости положения конуса Дирака от числа интеркалированных под графен слоев Fe, Co и Si на поверхности гранецентрированной кубической решетки Ni(111), хорошо описывающие экспериментальные данные по фотоэмиссии с угловым разрешением ARPES. Кроме того, впервые была вычислена анизотропия полной энергии системы Gr/Fe/Ni(111). Для этого была рассчитана разность полных энергий системы для направлений оси квантования магнитных моментов перпендикулярно и вдоль поверхности (111): $\Delta E^{\text{tot}} = \Delta E^{\text{band}} + \Delta E^{\text{md}}$, $\Delta E^{\text{band}} = E_{\perp}^{\text{band}} - E_{\parallel}^{\text{band}}$ и $\Delta E^{\text{md}} = E_{\perp}^{\text{md}} - E_{\parallel}^{\text{md}}$. Зависимость ΔE^{tot} от числа магнитных монослоев N показана на рисунке. В случае никеля магнитным моментам 1–3 монослоев всегда выгодно ориентироваться вдоль

поверхности, а для железа при числе монослоев $N \leq 3$ атомные магнитные моменты, наоборот, упорядочиваются перпендикулярно поверхности. В случае более толстых пленок ($N \geq 4$) магнитодипольное взаимодействие всегда меняет перпендикулярную ориентацию магнитного момента системы Fe(111) на продольную. Расчеты показали, что наличие графена уменьшает атомные магнитные моменты Fe на границе раздела и способствует ПМА.

Все компьютерные вычисления выполнены с использованием ресурсов центра обработки данных ПИК. Результаты исследований были представлены в 2019 г. на международной конференции 26th Assembly of Advanced Materials Congress в Швеции.



Зависимость изменения энергий ΔE^{band} , ΔE^{md} и ΔE^{tot} от числа монослоев железа N , покрытых монослоем графена

1. Dunaevskii S.M., Lobanova E.Yu., Mikhailenko E.K., Pronin I.I. // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchr. Neutr. Tech. 2018. V. 12. No. 6. P. 1199–1203.
2. Dunaevskii S.M., Lobanova E.Yu., Mikhailenko E.K., Pronin I.I. // Phys. Solid State. 2018. V. 60. P. 1214–1218.
3. Dunaevsky S.M., Mikhailenko E.K., Pronin I.I. // Advanc. Mater. Lett. 2019. V. 10. P. 633–636.
4. Dunaevskii S.M., Lobanova E.Yu., Mikhailenko E.K., Pronin I.I. // Phys. Solid State. 2019. V. 61. P. 1310–1315.
5. Grebenyuk G.S., Dunaevsky S.M., Lobanova E.Yu., ..., Pronin I.I. // Appl. Surf. Sci. 2019. V. 470. P. 840–845.

Определение содержания лантанидов и 3d-металлов в эндометаллофуллеренах рентгенофлуоресцентным методом

В. Г. Зиновьев, В. Т. Лебедев, И. А. Митропольский, Г. И. Шуляк,
П. А. Сушков, Т. М. Тюкавина, И. С. Окунев, К. В. Ершов, Д. В. Балин
Отделение нейтронных исследований, Отделение физики высоких энергий,
Отдел физики и техники реакторов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Эндоэдральные фуллерены – молекулы фуллеренов, внутрь которых заключены одна или несколько частиц: атомов или молекул. Они представляют собой новый класс нанообъектов с уникальными физико-химическими свойствами. Эти свойства делают эндометаллофуллерены перспективными для практического применения в биологии и медицине, в первую очередь для ЯМР-томографии, контролируемой доставки лекарств к внутренним органам, создания противораковых препаратов на основе эндометаллофуллеренов с радионуклидами.

Оригинальные методы синтеза эндометаллофуллеренов были ранее предложены и запатентованы в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. В данной работе разработана и опробована рентгенофлуоресцентная методика количественного определения содержания Fe, Co, Ni, Mn, Mo, Sc, Gd, Tb и Pr в водных растворах эндометаллофул-

леренов. Такой анализ позволяет контролировать и совершенствовать процесс их получения, увеличивать содержание металлов в продукте.

Для анализа использовался рентгеновский спектрометр с разрешением 200 эВ для $K_{\alpha 1}$ -линии железа с энергией 6,4 кэВ. В качестве источников возбуждения были взяты препараты ^{109}Cd с активностью 0,36 ГБк и ^{241}Am с активностью 83 ГБк. Полученные калибровочные графики для определения содержания лантанидов и 3d-металлов в растворе представлены на рис. 1. На рисунке 2 показаны рентгеновские спектры стандартных растворов Gd и Mn, соответствующие калибровочным графикам, приведенным на рис. 1. В таблице представлены результаты определения концентрации C лантанидов и 3d-металлов в водных растворах эндометаллофуллеренов и нижние пределы их определения DL.

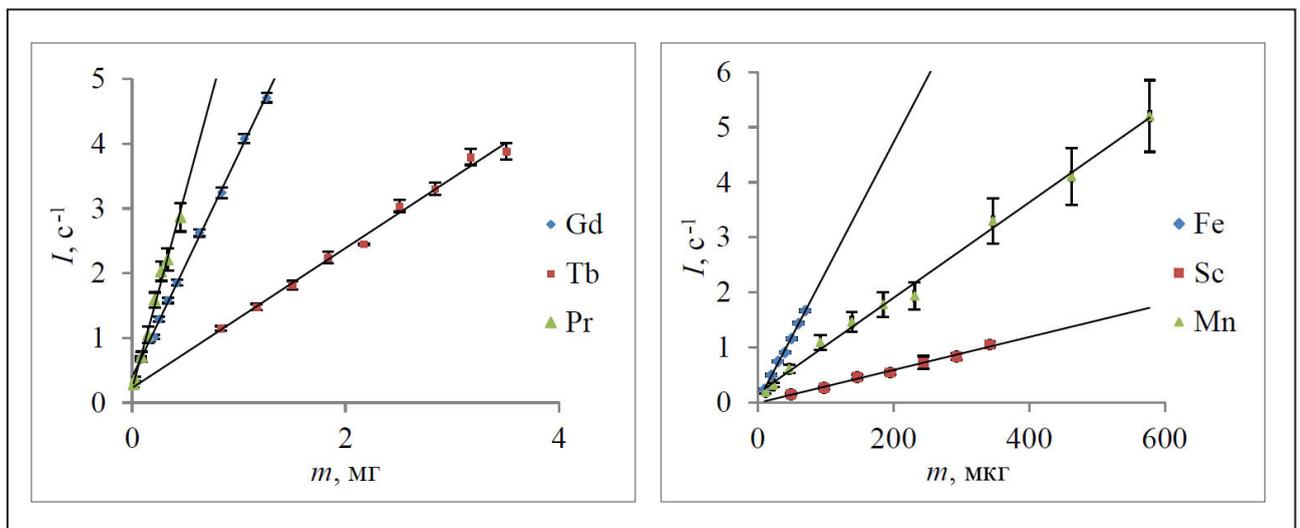


Рис. 1. Калибровочные графики для определения содержания лантанидов (слева) и 3d-металлов (справа) в растворах эндометаллофуллеренов рентгенофлуоресцентным методом

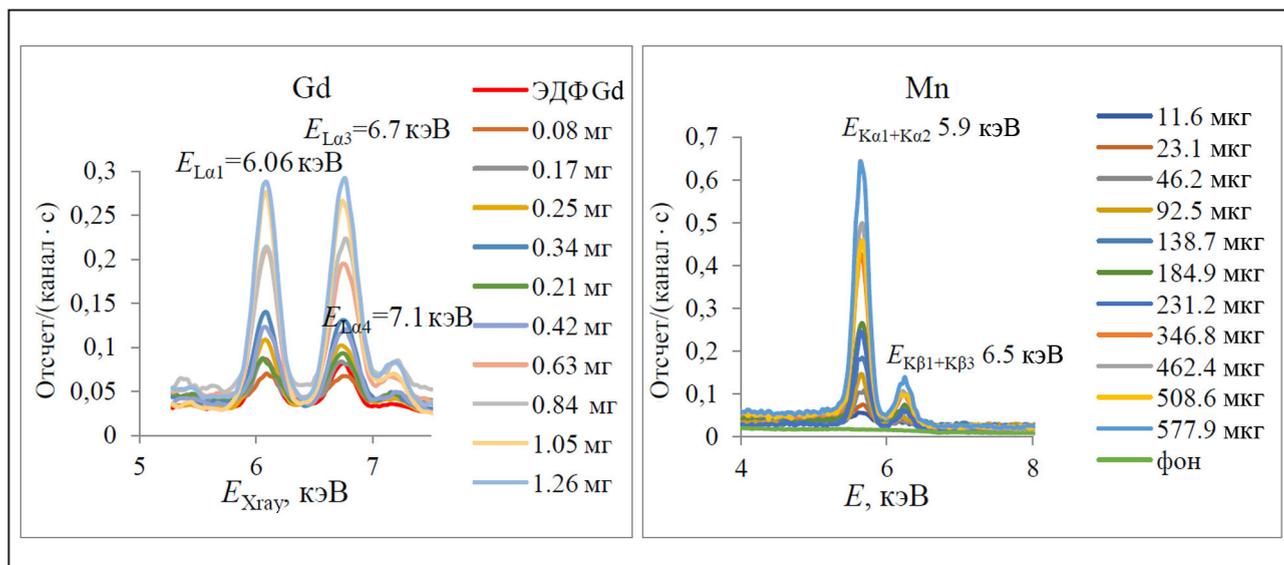


Рис. 2. Рентгеновские спектры стандартных растворов Gd и Mn с различной концентрацией

Таблица. Результаты определения концентрации С лантанидов и 3d-металлов в водных растворах эндометаллофуллеренов и нижние пределы их определения DL

Элемент	Эндометаллофуллерен	С, мкг/мл	DL, мкг
Gd	Gd@C _{2n} (OH) ₃₈₋₄₀	47,9 ± 2,0	1,0
Fe	Fe@C _{2n} (OH) ₃₈₋₄₀	2,6 ± 0,1	1,0
Sc	Sc@C _{2n} (OH) ₃₈₋₄₀	13,8 ± 0,6	0,1
Tb	Tb@C _{2n} (OH) ₃₈₋₄₀	14,7 ± 0,6	0,1
Pr	Pr@C _{2n} (OH) ₃₈₋₄₀	-	0,1
Mn	Mn@C _{2n} (OH) ₃₈₋₄₀	1,7 ± 0,1	0,1

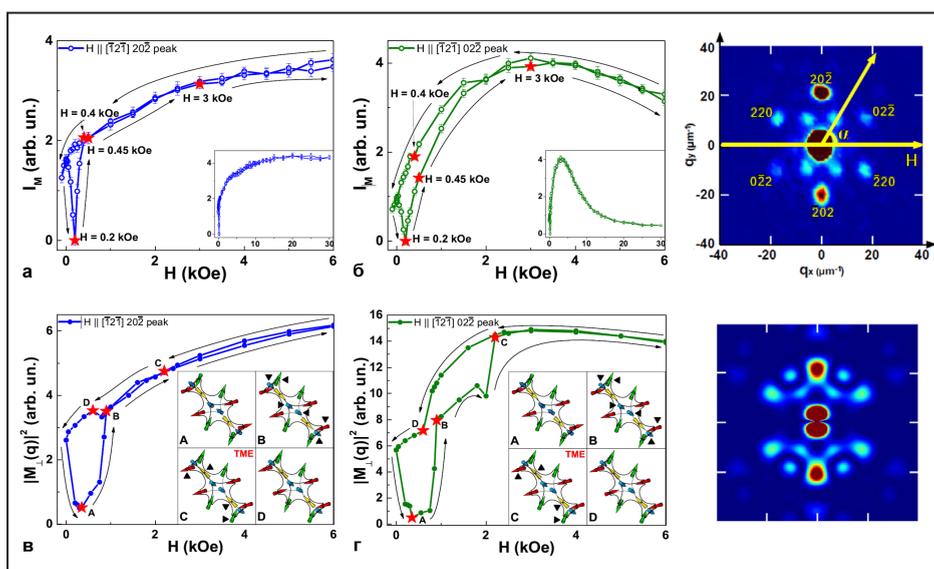
Магнитная структура инвертированных опалов по данным малоуглового рассеяния нейтронов и микромагнитного моделирования

И. С. Дубицкий, И. С. Шишкин, С. В. Григорьев – Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
 А. А. Мистонов, Н. А. Григорьева, Г. А. Вальковский – Санкт-Петербургский государственный университет,
 A. Heinemann – Helmholtz-Zentrum Geesthacht,
 Н. А. Саполетова – Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Быстрое развитие технологий синтеза магнитных наноструктур привело к возможности создания трехмерных систем с наперед заданными геометрическими характеристиками. Ожидается, что данные объекты могут найти применение в принципиально новых устройствах хранения и передачи информации. Однако методики изучения магнитных свойств таких систем сейчас только начинают разрабатываться. Наиболее полную информацию о системе можно получить при помощи малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН), но для корректной интерпретации результатов экспериментов по МУРН на трехмерно упорядоченных объектах необходимо вычислить магнитный формфактор, который определяется распределением намагниченности в образце. Данная программа была реализована в настоящей работе

для инвертированных опалов (ИО), выполненных из кобальта (рис.). ИО могут быть получены заполнением пустот между микросферами, образующими гранецентрированную кубическую решетку, ферромагнитным металлом с последующим удалением самих сфер. В результате образуется трехмерная периодическая сеть нанозулов, соединенных тонкими контактами. Период структуры составляет 700 нм.

Проведенный анализ экспериментальных данных при помощи микромагнитного моделирования показал, что направление намагниченности в контактах определяется правилом спинового льда, и ИО, таким образом, относятся к классу трехмерных искусственных спиновых льдов. К настоящему моменту были известны только двумерные искусственные спиновые льды.



Экспериментальные (а, б) и вычисленные (в, г) зависимости интенсивности дифракционных максимумов $20\bar{2}$ и $02\bar{2}$ от величины внешнего магнитного поля. На вставках приведены магнитные конфигурации, реализующиеся в различных полях. Справа показаны измеренные и рассчитанные карты распределения интенсивности малоуглового рассеяния нейтронов, а также направление поля, приложенного вдоль оси $[1\bar{2}1]$ гранецентрированной кубической структуры инвертированных опалов

Фазовое разделение в манганитах с половинным легированием при изовалентном замещении трехвалентных катионов на примере $\text{Sm}_{0,32}\text{Pr}_{0,18}\text{Sr}_{0,5}\text{MnO}_3$

А. И. Курбаков, В. А. Рыжов, В. В. Рунов, Э. О. Быков, И. И. Ларионов, В. В. Дериглазов
Отделение нейтронных исследований, Отделение молекулярной и радиационной биофизики
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Фазовое разделение (ФР) – характерное явление в редкоземельных манганитах, легированных двухвалентными ионами, обуславливающее их необычные транспортные, магнитные, магнитокалорические и иные свойства. Неустойчивость к ФР возрастает вблизи фазовых границ, одна из которых соответствует половинному легированию. Замещение редкоземельного иона другим ионом той же валентности позволяет мягко воздействовать на ФР лишь за счет изменения ионных радиусов катиона без изменения электронной концентрации, при этом варьируя свойства манганита в широких пределах.

В данной работе особенности температурной эволюции ФР для таких манганитов исследованы на примере соединения $\text{Sm}_{0,32}\text{Pr}_{0,18}\text{Sr}_{0,5}\text{MnO}_3$ методами порошковой дифракции нейтронов высокого разрешения, деполяризации нейтронного пучка, нелинейного магнитного отклика на второй гармонике, а также методом измерения намагниченности и сопротивления. Впервые наблюдался необычно широкий температурный диапазон магнитно-электронного ФР с верхней границей выше комнатной температуры. При этом макроскопическое магнитно-электронное ФР является многофазным.

Определены кристаллическая симметрия, параметры решетки, типы магнитного порядка и их изменение при варьировании температуры. При понижении температуры $T_{\text{ФР}}$ ниже 200 К из исходной орторомбической фазы $Pbnm$ выделяется моноклинная фаза $P2_1/m$ (рис. 1, верхняя панель). Обе фазы проявляют эффект Яна – Теллера, причем в моноклинной фазе он значительно сильнее. Ниже 110 К кристаллическое ФР стабилизируется с объемным соотношением фаз 1 : 3 с преобладанием моноклинной. Моноклинная фаза возникает с антиферромагнитной (АФ)

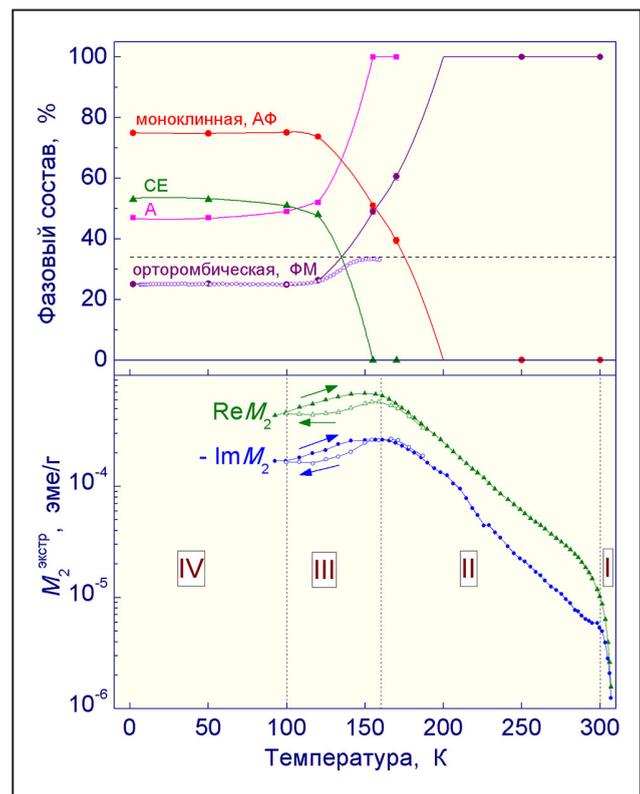


Рис. 1. Объемные доли орторомбической и моноклинной кристаллических фаз, антиферромагнитных структур типа А и СЕ в моноклинной фазе и ферромагнитной структуры в орторомбической фазе (сверху). Температурные зависимости величин экстремумов действительной и мнимой частей сигнала нелинейного магнитного отклика (снизу)

орбитально упорядоченной структурой типа А (ферромагнитные (ФМ) плоскости, упорядоченные антиферромагнитно), а ниже 150 К частично переходит в АФ-состояние со структурой типа СЕ (зигзагообразные ФМ-цепочки, упорядоченные антиферромагнитно, с разделением заряда), характерной для половинного легирования, в соотношении А/СЕ ниже 120 К примерно 1 : 1.

В орторомбической фазе уже при температуре 307 К наблюдается микроскопическое маг-

нитно-электронное ФР в виде электронных суперпарамагнитных кластеров в парамагнитной матрице с фрактальным распределением по размерам. Их концентрация экспоненциально растет с понижением температуры (см. рис. 1, нижняя панель, область I). Ниже 300 К начинается коалесценция кластеров с одновременным появлением новых (область II). При достижении $T_{\text{ФР}}$ коалесценция ускоряется, что связано с дрейфом электронов из возникающей моноклинной фазы в орторомбическую, усиливая тем самым ФМ-тенденцию в орторомбической фазе и стабилизируя АФ-состояние моноклинной. При 160 К коалесценция насыщается, и начинается перколяционный фазовый переход с образованием «бесконечного» ФМ-кластера, сопровождающийся температурным гистерезисом (область III), а ниже 100 К фазовый переход заканчивается формированием доменной ФМ-структуры во всей области орторомбической фазы (область IV).

При всех температурах сохраняется диэлектрическое поведение (рис. 2). В отсутствие магнитного поля переход в проводящее ФМ-состояние не сопровождается появлением металлического температурного поведения удельного сопротивления образца, т. к. концентрация самой орторомбической фазы становится ниже перколяционного предела (см. рис. 1, верхняя панель). Выше $T_{\text{ФР}}$ транспортные свойства определяются прыжковой поляронной проводимостью (ППП).

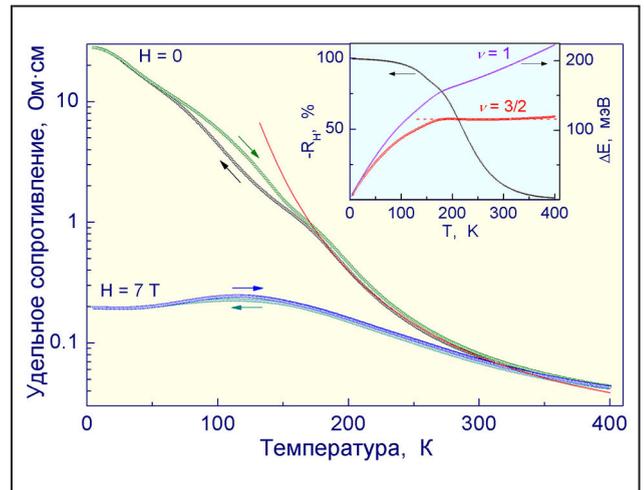


Рис. 2. Температурные зависимости удельного сопротивления, измеренного в нулевом магнитном поле и в поле 7 Т при охлаждении и нагревании с подгонкой по методу наименьших квадратов моделью прыжковой поляронной проводимости (красная линия). На вставке – магнитосопротивление (черная линия) и активационная энергия в зависимости от температуры для адиабатического, $\nu = 1$ (фиолетовая линия), и неадиабатического, $\nu = 3/2$ (красная линия), режимов, где ν – показатель степени в предэкспоненциальном множителе температурной зависимости сопротивления в модели прыжковой поляронной проводимости

Анализ температурной зависимости энергии активации выявил неадиабатический характер ППП (см. рис. 2, вставка). Внешнее магнитное поле 7 Т значительно уменьшает удельное сопротивление ниже 300 К, порождая эффект колоссального магнитосопротивления, возрастающий с понижением температуры.

Полная характеристика коллоидного раствора наночастиц на основе магнетита для применения в биомедицине

В. А. Рыжов, И. А. Киселев, О. П. Смирнов, Ю. П. Черненко, В. В. Дериглазов

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

Наночастицы окислов железа используются в медицине для отработки адресной доставки лекарств к больным органам, включая онкотерапию, а также в качестве контрастирующего агента для магнитно-резонансной томографии. Для приготовления препаратов с заданными свойствами необходимо уметь контролировать важные для применения характеристики наночастиц и осуществлять контроль их состояния во вводимом препарате. В данной работе развит новый подход к изучению магнитных коллоидных растворов, позволяющий достичь полноты их характеристики, недоступной в рамках других методик, и получить новую физическую информацию о таких системах.

Наночастицы магнетита (Fe_3O_4), покрытые гидрофильной органической оболочкой (декстраном), были изготовлены в Государственном научно-исследовательском институте особо чистых биопрепаратов (Санкт-Петербург). Измерения по рентгеновской дифракции показали, что наночастицы являются монокристаллами. На их основе были приготовлены водные коллоидные растворы с концентрациями 0,02–2 ммоль/л. Образцы растворов были исследованы методами просвечивающей электронной микроскопии, динамического светорассеяния, нелинейного магнитного отклика на второй гармонике в параллельных постоянном и переменном магнитных полях и электронного магнитного резонанса. Данные по нелинейному магнитному отклику и магнитному резонансу обработаны с применением формализма, основанного на численном решении кинетического уравнения Фоккера – Планка для стохастической динамики намагниченности суперпарамагнитных частиц с произвольными направлениями магнитных моментов. Проведено комплексное сопоставление данных всех экспериментальных методик. Оказалось, что

наночастицы в растворе находятся в агрегированном состоянии с логнормальным распределением агрегатов по размерам.

Получены следующие результаты: 1) агрегаты окружены слоем связанной с ними воды толщиной 6 нм; 2) восстановлено распределение по объемам магнитной компоненты агрегатов (рис. 1), разделены магнитная (магнетит) и немагнитная (декстран) составляющие коллоида; 3) определены геометрические, магнитные и магнитодинамические характеристики агрегатов, такие как намагниченность насыщения, средние значения объема и магнитного момента, а также ширина распределения по размерам, средняя энергия и поле анизотропии, характерная энергия диполь-дипольного взаимодействия между наночастицами в агрегате, постоянная затухания и среднее время продольной релаксации намагниченности, среднее количество наночастиц в агрегате и ряд других; 4) обнаружено нарушение корневой скейлинговой зависимости между магнитным моментом и намагниченностью агрегата с одной стороны и количеством составляющих его наночастиц – с другой; 5) выявлена причина этого нарушения, заключающаяся в корреляциях ориентаций магнитных моментов наночастиц из-за диполь-дипольного взаимодействия, стремящегося минимизировать магнито-статическую энергию агрегата при его формировании; 6) при этом корреляции, смоделированные функцией обрезания намагниченности, логарифмически спадают с увеличением расстояния и имеют конечный радиус порядка среднего размера агрегатов; 7) обнаружен кроссовер в резонансном спектре, связанный с разрывом диполь-дипольного взаимодействия в агрегатах внешним магнитным полем (рис. 2), при этом поле кроссовера $H = 1,43$ КЭ попадает в рассчитанный интервал его значений.

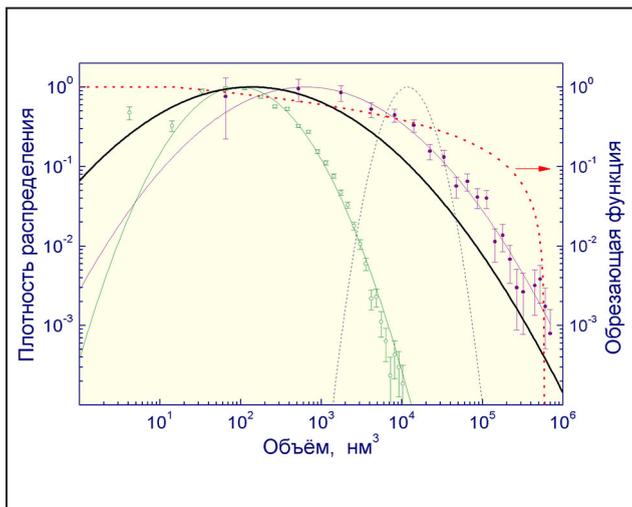


Рис. 1. Распределения по объемам, нормированные в максимумах на единицу: 1) распределение наночастиц магнетита из электронной микроскопии с центром в 10^2 нм^3 (пустые зеленые кружки) и его подгонка по методу наименьших квадратов (тонкая зеленая линия); 2) распределение агрегатов из электронной микроскопии с центром в $8 \cdot 10^2 \text{ нм}^3$ (фиолетовые сплошные кружки) и его подгонка по методу наименьших квадратов (тонкая фиолетовая линия); 3) распределение, восстановленное из данных по нелинейному отклику без учета магнитных корреляций (узкий пунктирный пик с центром в 10^4 нм^3); 4) распределение для магнитной компоненты агрегатов, восстановленное из нелинейного отклика с поправкой на магнитные корреляции (жирная черная линия); 5) обрезающая функция, имитирующая магнитные корреляции внутри агрегата, с сингулярностью в $6 \cdot 10^5 \text{ нм}^3$, соответствующей корреляционному радиусу (красные точки)

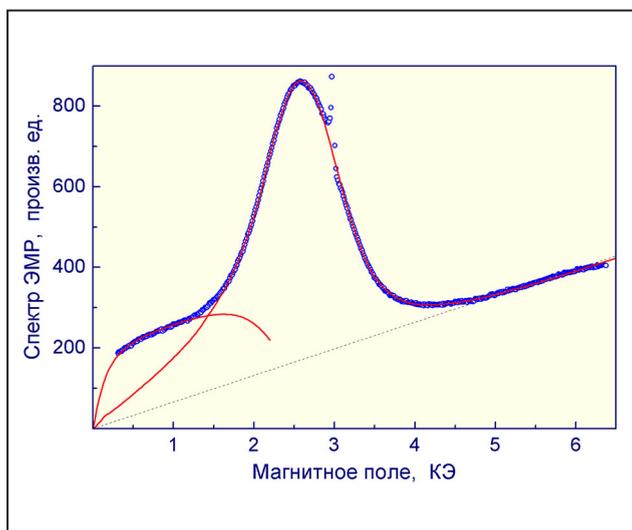


Рис. 2. Результаты обработки данных электронного магнитного резонанса: синие кружки – спектр электронного магнитного резонанса; острый пик на 3 КЭ – сигнал от радикалов нитроксила для калибровки магнитного поля H ; красные кривые – подгонки по методу наименьших квадратов для магнитно скоррелированных ($H < 1,25 \text{ КЭ}$) и независимых ($H > 1,65 \text{ КЭ}$) наночастиц; прямая пунктирная линия – фоновый сигнал Холла, пропорциональный магнитному полю

Кристалл $Tm_3Al_5O_{12}$ – новый перспективный болометр для поиска солнечных аксионов

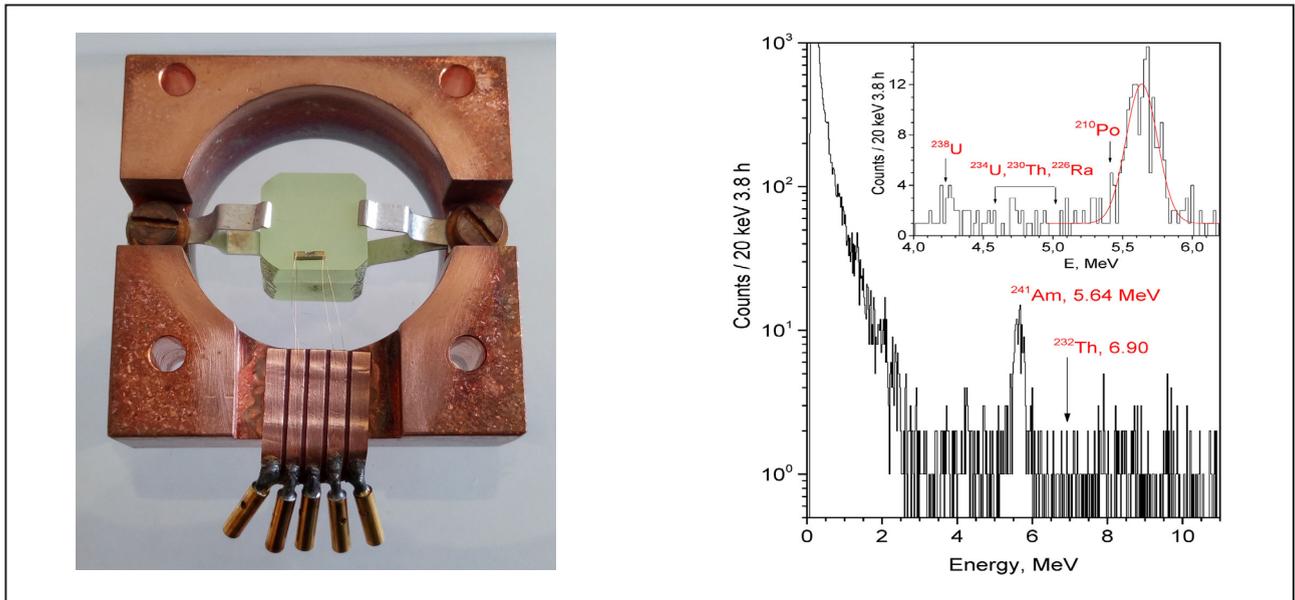
А. В. Дербин, И. С. Драчнев, В. Н. Муратова, Д. А. Семенов, Е. В. Унжаков
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Проблема экспериментального обнаружения аксионов и аксионоподобных частиц продолжает оставаться крайне актуальной, что связано как с тем, что их обнаружение свидетельствовало бы в пользу предложенного решения *CP*-проблемы сильных взаимодействий, так и с возможностями аксиона составлять всю или существенную часть темной материи.

По предложению сотрудников отдела полупроводниковых ядерных детекторов Отделения нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в сотрудничестве с отечественными и зарубежными институтами проведены исследования свойств тулиевого граната $Tm_3Al_5O_{12}$ с целью использования его для поиска резонансного возбуждения первого ядерного уровня изо-

топа ^{169}Tm (8,4 кэВ) солнечными аксионами: $A + ^{169}Tm \rightarrow ^{169}Tm^* \rightarrow ^{169}Tm + \gamma$ (8,41 кэВ). Регистрация рентгеновских и γ -квантов, конверсионных и оже-электронов, возникающих при разрядке уровня с энергией 8,4 кэВ, будет производиться тем же кристаллом. Установлено, что $Tm_3Al_5O_{12}$ при температуре 10 мК может работать как болометрический детектор, исследованы радиационная чистота кристалла, его оптические свойства, получен первый спектр фононных сигналов с термистором NTD (рис.). Ожидаемая чувствительность эксперимента с экспозиций 1 кг · год к константам связи аксиона с веществом превысит достигнутую на 2–3 порядка.

Работа поддержана грантами РФФИ № 17-02-00305 и 16-29-13014.



Кристалл $Tm_3Al_5O_{12}$ внутри медного держателя, охлаждаемого до температуры 10 мК; золотые проволочки обеспечивают электрические контакты (слева). Спектр *Tm*-болометра, измеренный с NTD-термистором, и результаты подгонки α -пика ^{241}Am (справа)

Особенности подготовки камер хранения ультрахолодных нейтронов и чувствительность ЭДМ-спектрометра

М. С. Ласаков, А. Н. Пирожков, А. П. Серебров
Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Эксперимент по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона является одним из важнейших в неускорительной физике элементарных частиц и дает ограничения на различные модели нарушения CP - и T -инвариантности в теоретической физике. Лучшее экспериментальное ограничение на величину ЭДМ нейтрона было получено на высокопоточном реакторе Института им. Лауэ – Ланжевена (ИЛЛ, англ. ILL) в Гренобле международной коллаборацией RAL–Sussex–ILL на установке с ультрахолодными нейтронами (УХН) методом их хранения в магниторезонансном объеме: $|d_n| < 2,9 \cdot 10^{-26} \text{ е} \cdot \text{см}$ (90 % CL). В дифференциальном магниторезонансном ЭДМ-спектрометре НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ используются две камеры хранения УХН с электрическими полями противоположных направлений. Это позволяет контролировать возможные систематические эффекты и снижать итоговый разброс результатов измерений практически до уровня, определяемого статистикой счета нейтронов. Чувствительность прибора пропорциональна времени хранения нейтронов в резонансе, напряженности электрического поля и имеет корневую зависимость от полного счета нейтронов.

В работе рассмотрены основные факторы, влияющие на качество покрытий камер удержания УХН и, как следствие, на время хранения нейтронов и величину напряженности электрического поля. Выбраны последовательность и режимы технологических процессов при подготовке

рабочих поверхностей камер удержания УХН для их долговременной работы в условиях максимальной напряженности электрического поля, определены покрытия, имеющие высокую граничную скорость отражения УХН. Сформулированы некоторые практические рекомендации, которые могут быть полезны всем, кто работает с высоким напряжением и УХН.

В результате выполненных работ и исследований в рабочих камерах ЭДМ-спектрометра была получена величина напряженности электрического поля около 27 кВ/см, ограничение определилось возможностями источника питания. Токи утечки по изоляторам в конце периода тренировки составляли 3–5 нА, при этом пробоев и разрядов не было. В действующих до настоящего времени экспериментальных ЭДМ-установках при их долговременной работе средние значения напряженности электрического поля достигали величин 10–14 кВ/см при токах утечки по изоляторам от десятков до сотен наноампер.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об увеличении чувствительности существующего ЭДМ-спектрометра НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ практически вдвое. При работе этой установки на пучке турбины УХН реактора ИЛЛ статистическая погрешность измерений величины ЭДМ за сутки будет рекордной: $\delta d_n < 1 \cdot 10^{-25} \text{ е} \cdot \text{см}$, и за 100 сут накопления данных в таких условиях может быть достигнута точность измерения величины ЭДМ нейтрона лучше, чем $\delta d_n = 1 \cdot 10^{-26} \text{ е} \cdot \text{см}$.

μ SR-исследование динамики внутренних магнитных корреляций в мультиферроике Tb(Vi)MnO₃ в магнитоупорядоченном и парамагнитном состояниях

С. И. Воробьев, А. Л. Геталов, Е. Н. Комаров, С. А. Котов, Г. В. Щербаков –
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
Е. И. Головенциц, В. А. Санина – Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

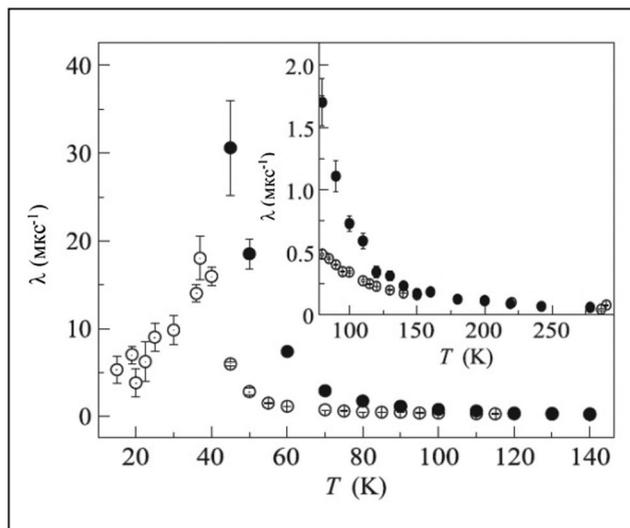
С помощью μ SR-метода изучена динамика внутренних магнитных корреляций в мультиферроике Tb_{0,95}Vi_{0,05}MnO₃ в диапазоне температур 10–290 К.

При исследовании мультиферроика Tb_{0,95}Vi_{0,05}MnO₃ с помощью μ SR-метода был обнаружен ряд особенностей, которые не наблюдались при изучении других мультиферроиков-манганитов, в т. ч. и TbMnO₃.

В интервале температур 80–150 К в поперечном магнитном поле 290 Гс обнаружено расслоение образца на две фазы (рис.). Фаза с временем магнитных корреляций больше времени наблюдения (10 мкс), что потребовало гауссовой формы функции релаксации, составляет примерно 50 % и относится к областям фазового расслоения, содержащим пары ионов Mn³⁺ и Mn⁴⁺, а также перезаряжающие их электроны. Вторая фракция формируется парными корреляциями

ионов (Mn³⁺–Mn³⁺) в областях ближнего магнитного порядка в матрице исходного кристалла, на которые магнитное поле 290 Гс слабо влияет.

В области температур магнитоупорядоченного состояния $T < T_N = 40$ К наблюдались два мюониевых канала релаксации поляризации мюонов. Первый канал связан с образованием мюонных ферромагнитных комплексов (Mn³⁺–Mn–Mn⁴⁺) в областях фазового расслоения. В этих комплексах мюон теряет поляризацию в результате сверхтонкого взаимодействия в мюонии за время меньше 10⁻⁸ с. Второй канал возникает из-за образования мюонии с разорванной сверхтонкой связью в исходной матрице образца. В этом случае скорость релаксации поляризации большая, но мюон остается квазисвободным при взаимодействии с локальными магнитными полями циклоиды. Вклады в деполяризацию мюонов этих двух каналов примерно одинаковы.



Температурная зависимость скорости релаксации поляризации мюона: λ_s – светлые точки ($H = 0$); λ_f – темные точки ($H = 290$ Гс)

1. Воробьев С. И., Геталов А. Л., Головенциц Е. И., Комаров Е. Н., Котов С. А., Санина В. А., Щербаков Г. В. // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 110. Вып. 2. С. 118–125.
2. Программа MNK2018 для обработки данных μ SR-эксперимента. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019663498 / А. Л. Геталов, С. И. Воробьев, Е. Н. Комаров, С. А. Котов, Г. В. Щербаков; дата гос. рег. 17.10.2019.



Исследования с использованием протонов и ионов. Физика нейтрино

- 56 Поиск «невидимых» каналов распада бозона Хиггса Стандартной модели в эксперименте ATLAS
- 57 Изучение свойств бозона Хиггса в экспериментах ATLAS и CMS
- 58 Обнаружение трех новых пентакварковых состояний
- 59 Поиск тяжелых векторных бозонов в эксперименте ATLAS
- 60 Открытие нарушения CP -инвариантности в распадах D^0 -мезонов
- 61 Измерение спектра поперечного импульса $p_{\ell\ell}$ ($\ell = e, \mu$) и угловой переменной ϕ^* в процессе распада Z -бозона на лептонную пару в эксперименте ATLAS
- 62 Хронометрия эволюции плотной адронной среды в центральных столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ядер на Большом адронном коллайдере
- 63 Эксклюзивное фоторождение J/Ψ на ядре в ультрапериферических столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ ТэВ
- 64 Фоторождение J/Ψ -мезонов в ультрапериферических протон-ядерных столкновениях на Большом адронном коллайдере
- 65 Высокопрецизионные измерения масс нуклидов на ловушке PENTATRAP
- 66 Измерения масс сверхтяжелых элементов на установке SHIPTRAP
- 67 Исследование нейтроноизбыточных ядер астата в лазерном ионном источнике на установке ISOLDE: оболочечный эффект и инверсия четно-нечетного эффекта
- 69 Распределения ядерной материи в протоноизбыточных ядрах ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$ из данных по упругому рассеянию протонов промежуточной энергии в инверсной кинематике
- 70 Первое наблюдение эффекта осцилляций в эксперименте «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино
- 71 Прецизионный анализ спектра детектораorexino с совместным включением солнечных pp -, ${}^7\text{Be}$ - и pep -нейтрино

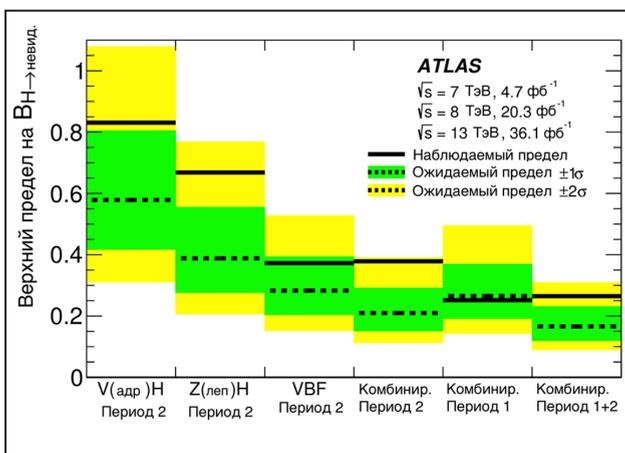
Поиск «невидимых» каналов распада бозона Хиггса Стандартной модели в эксперименте ATLAS

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

В эксперименте ATLAS на Большом адронном коллайдере (БАК) выполнен поиск «невидимых» каналов распада бозона Хиггса Стандартной модели (СМ) с целью обнаружения процессов новой физики. «Невидимыми» каналами называются распады бозона Хиггса на частицы, которые не могут быть зарегистрированы детектором, такие как нейтрино, гравискаляр, майорон, нейтрино, или частицы темной материи (ТМ). Признаком таких событий является наличие большой недостающей поперечной энергии.

В данной работе проводился поиск «невидимых» распадов бозона Хиггса для процессов его рождения через слияния векторных бозонов и ассоциативного рождения с W - и Z -бозонами ($Z \rightarrow \ell\ell + H$ и $W/Z \rightarrow \text{адроны} + H$). По результатам анализа данных, накопленных в первом периоде работы БАК (2011–2012) при энергии pp -столкновений $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ и полной светимости 4,7 и 20,3 fb^{-1} и части второго периода набора данных (2015–2016) при энер-

гии pp -столкновений $\sqrt{s} = 13$ ТэВ и светимости 36,1 fb^{-1} , получены ограничения для вероятности распада бозона Хиггса СМ по «невидимому» каналу (рис.). На основе комбинирования результатов для разных механизмов рождения бозона Хиггса и периодов набора данных получен наблюдаемый (ожидаемый) предел вероятности распада бозона Хиггса СМ по «невидимому» каналу $0,26$ ($0,17^{+0,07}_{-0,05}$) с уровнем достоверности (CL) 95 %, а также установлен предел на сечение распада бозона Хиггса на частицы ТМ. При использовании модели, в которой считается, что только бозон Хиггса является медиатором между частицами СМ и ТМ, были получены ограничения на сечения рассеяния частиц ТМ на ядрах, которые в интервале масс частиц ТМ 0–10 ГэВ оказались более строгими в эксперименте ATLAS, $\sigma < (0,9-3,0) \cdot 10^{-7}$ фб, чем в экспериментах по прямому поиску частиц ТМ.



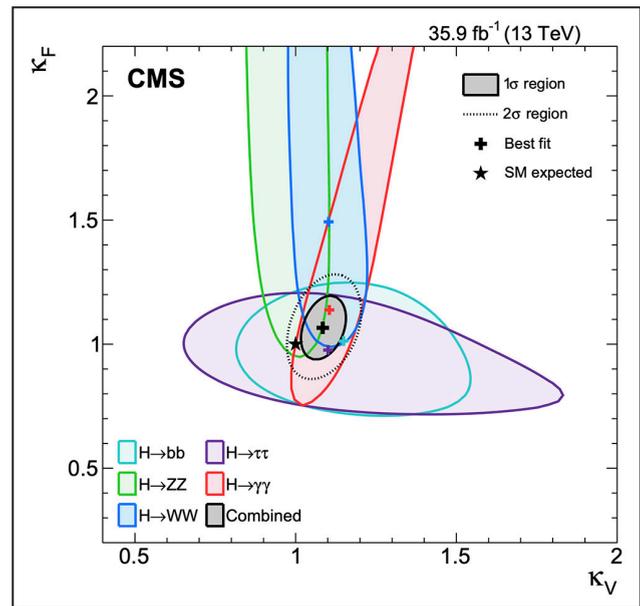
Верхние пределы для вероятности распада бозона Хиггса Стандартной модели по «невидимому» каналу, полученные в эксперименте ATLAS

Изучение свойств бозона Хиггса в экспериментах ATLAS и CMS

А. А. Воробьев, В. Л. Головцов, В. Т. Грачев, А. Е. Ежилов, Ю. М. Иванов, В. Т. Ким, Е. В. Кузнецова, М. П. Левченко, П. М. Левченко, В. П. Малеев, В. А. Мурзин, Ю. Г. Нарышкин, В. А. Орешкин, Д. Пуджа, И. Б. Смирнов, В. М. Соловьев, Д. Е. Соснов, В. В. Сулимов, Л. Н. Уваров, О. Л. Федин, Л. А. Щипунов
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборации ATLAS, CMS

Одной из основных задач современной физики высоких энергий является исследование свойств бозона Хиггса Стандартной модели (СМ), открытого в экспериментах ATLAS и CMS в 2012 г. С целью уточнения характеристик бозона Хиггса в 2019 г. был продолжен анализ данных, накопленных в экспериментах ATLAS и CMS за первый (2011–2012) и второй (2015–2018) периоды работы Большого адронного коллайдера. В эксперименте ATLAS были измерены парциальные сечения рождения бозона Хиггса в процессах слияния глюонов и векторных бозонов с последующим его распадом $H \rightarrow \tau\tau$: $\sigma(gg \rightarrow H) \cdot Br = 3,1 \pm 1,0$ (стат.) $\pm^{1,6}_{1,3}$ (сист.) пб и $\sigma(WW \rightarrow H) \cdot Br = 0,28 \pm 0,09$ (стат.) $\pm^{0,11}_{0,09}$ (сист.) пб соответственно. В эксперименте CMS были выполнены измерения полного сечения рождения бозона Хиггса $\sigma_H = 61,1 \pm 6,0$ (стат.) $\pm \pm 3,7$ (сист.) пб и силы сигнала $\mu = 1,17 \pm 0,10$ с улучшением точности в два раза. Также CMS и ATLAS уточнили константы связи бозона Хиггса в основных каналах распада: $H \rightarrow ZZ, WW, \gamma\gamma, \tau\tau, bb$. На рисунке показаны значения масштабных факторов k_V и k_F в векторном и фермионном каналах, полученные в CMS.

Важную роль в исследовании свойств бозона Хиггса играют торцевой мюонный детектор



Значения масштабных факторов k_V и k_F констант связи для различных каналов распадов бозона Хиггса

(EMU) экспериментальной установки CMS и центральная трековая система экспериментальной установки ATLAS – детектор переходного излучения (TRT), в разработку и создание которых весомый вклад внес НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

1. Fedin O., Ezhilov A., Levchenko M., Maleev V., Naryshkin Yu., Pudza D., Schegelsky V., Solovyev V. (ATLAS Collab.) // Phys. Rev. D. 2019. V. 99. P. 072001.
2. Chtchipounov L., Golovtsov V., Ivanov Yu., Kim V., Kuznetsova E., Levchenko P., Murzin V., Oreshkin V., Sмирнов I., Sosnov D., Sulimov V., Uvarov L., Vorobyev A. (CMS Collab.) // Phys. Lett. B. 2019. V. 792. P. 369–396.
3. Chtchipounov L., Golovtsov V., Ivanov Yu., Kim V., Kuznetsova E., Levchenko P., Murzin V., Oreshkin V., Sмирнов I., Sosnov D., Sulimov V., Uvarov L., Vorobyev A. (CMS Collab.) // Eur. Phys. J. C. 2019. V. 79. P. 421–396.
4. Fedin O., Ezhilov A., Levchenko M., Maleev V., Naryshkin Yu., Pudza D., Schegelsky V., Solovyev V. (ATLAS Collab.) CERN-EP-2019-097 // Phys. Rev. D. 2020. V. 101. P. 012002.

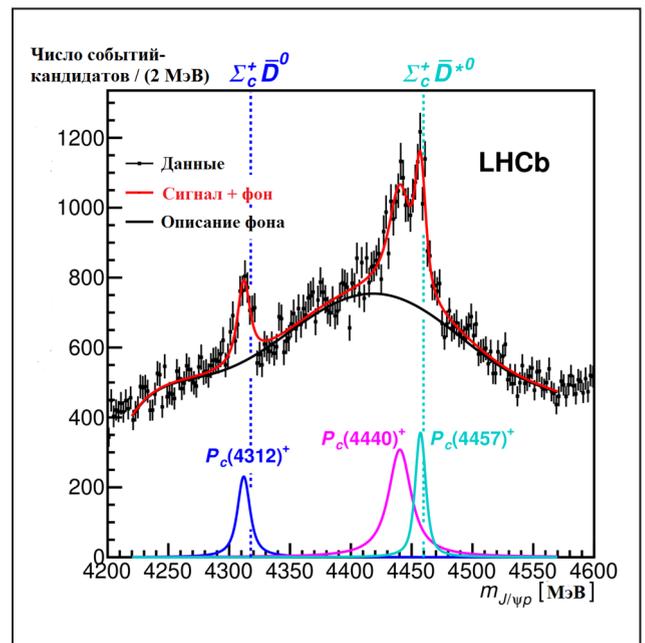
Обнаружение трех новых пентакварковых состояний

Г. Д. Алхазов, Н. Ф. Бондарь, А. А. Воробьев, Н. И. Воропаев, А. А. Дзюба, К. А. Ившин, А. Г. Инглесси, С. Н. Котряхова, О. Е. Маев, Д. А. Майсузенко, Н. Р. Сагидова, А. Д. Чубыкин
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация LHCb

Вследствие конфайнмента кварки и антикварки образуют строго определенные (синглетные по цвету) связанные состояния. Два самых широко распространенных типа адронов – это барионы (три валентных кварка) и мезоны (пары «кварк – антикварк»). Теоретически возможно существование и других комбинаций, например тетракварка (два кварка и два антикварка) или пентакварка (четыре кварка и один антикварк). Большим достижением эксперимента LHCb в 2015 г. стало открытие тяжелых пентакварков – частиц, состоящих из четырех кварков и одного антикварка, причем в их состав входит пара тяжелых кварков – с и анти-с. Изучался распад $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^-J/\psi$. Результаты модельного и модельно-независимого анализов данных свидетельствовали о наличии промежуточных каналов распада типа $\Lambda_b^0 \rightarrow K^-P_c^+(\rightarrow J/\psi p)$.

В 2019 г. коллаборация LHCb опубликовала анализ данных, посвященный поиску промежуточных резонансных пентакварковых состояний со скрытым очарованием в распаде $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^-J/\psi$, используя данные, набранные в ходе второго этапа работы Большого адронного коллайдера (2015–2018). Набранная статистика увеличилась в 10 раз благодаря возросшей интегральной светимости, увеличению сечения рождения очарованных барионов при переходе к энергии взаимодействия протонов 13 ТэВ, а также благодаря улучшенным алгоритмам отбора событий.

В спектре масс $J/\psi p$ наблюдаются три узких пика (рис.), которые соответствуют узким резонансам $P_c(4312)^+$, $P_c(4440)^+$ и $P_c(4457)^+$. В результате одномерной аппроксимации спектра



Спектр массы системы $J/\psi p$. Синими, розовыми и голубыми линиями показаны вклады трех узких состояний; вертикальные пунктирные линии соответствуют энергетическим порогам для распада прелестного бариона с испусканием частиц с открытым очарованием

масс системы $J/\psi p$ были получены массы, ширины и вклады узких резонансов в распад прелестного бариона. Обнаруженные резонансы имеют массы чуть ниже энергетических порогов образования частиц с открытым очарованием: $\Sigma_c^+ \bar{D}^0$ и $\Sigma_c^+ \bar{D}^{*0}$. Такая близость к энергетическим порогам позволяет интерпретировать эти резонансы как слабо связанные мезон-барионные состояния. Однако также не исключена возможность интерпретации открытых резонансов как сильно связанных кластеров.

Поиск тяжелых векторных бозонов в эксперименте ATLAS

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

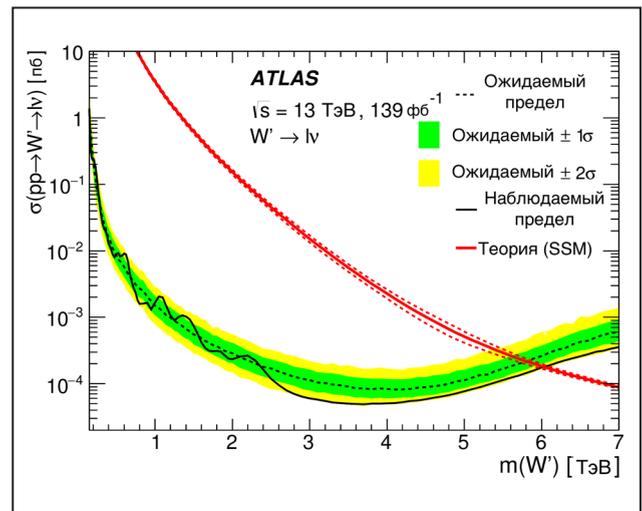
В эксперименте ATLAS с целью поиска явлений новой физики продолжен поиск тяжелых, с массами более 1 ТэВ, заряженных W' и нейтральных Z' векторных бозонов, существование которых предсказывается в ряде моделей, расширяющих Стандартную модель (СМ).

Поиск W' - и Z' -бозонов осуществлялся в каналах их распада $W' \rightarrow \ell\nu$ и $Z' \rightarrow \ell\ell$, где ℓ обозначает электрон или мюон, а ν – нейтрино. Для исследования использовались данные, накопленные в эксперименте ATLAS за второй период работы (2015–2018) Большого адронного коллайдера при энергии сталкивающихся протонов 13 ТэВ и соответствующие интегральной светимости 139 fb^{-1} .

В случае отсутствия сигнала для оценки верхних пределов на сечения рождения таких бозонов в качестве базовой модели использовалась Sequential Standard Model (SSM). В этой модели константы взаимодействия W' - и Z' -бозонов с фермионами совпадают с аналогичными константами взаимодействия для W - и Z -бозонов СМ. Ширина распада W' - и Z' -бозонов Γ в данной модели линейно возрастает с их массой m . При этом величина отношения Γ/m составляет 3 %, что соответствует случаю W - и Z -бозонов СМ.

В результате проведенного исследования статистически значимого отклонения данных от предсказания СМ обнаружено не было. В отсутствие

зарегистрированного сигнала от распада тяжелых векторных бозонов были установлены пределы на сечения процессов $pp \rightarrow W' \rightarrow \ell\nu$ (рис.) и $pp \rightarrow Z' \rightarrow \ell\ell$ в зависимости от масс бозонов W' и Z' на уровне достоверности 95 %. Существование SSM W' - и Z' -бозонов с массами ниже 6,0 и 5,1 ТэВ соответственно было исключено на уровне достоверности 95 %. Результаты измерений опубликованы в зарубежных журналах.



Наблюдаемые и ожидаемые верхние пределы на сечения рождения SSM W' -бозонов в зависимости от их массы, установленные на уровне достоверности 95 %, для объединения электронного и мюонного каналов. Также показано теоретическое сечение (с ошибками) рождения SSM W' -бозонов

1. Fedin O., Ezhilov A., Levchenko M., Maleev V., Naryshkin Yu., Schegelsky V., Solovyev V. (ATLAS Collab.) // Phys. Rev. D. 2019. V. 100. No. 5. P. 052013.
2. Fedin O., Ezhilov A., Levchenko M., Maleev V., Naryshkin Yu., Schegelsky V., Solovyev V. (ATLAS Collab.) // Phys. Lett. B. 2019. V. 796. P. 68–87.

Открытие нарушения CP -инвариантности в распадах D^0 -мезонов

Г. Д. Алхазов, Н. Ф. Бондарь, А. А. Воробьев, Н. И. Воропаев, А. А. Дзюба, К. А. Ившин, А. Г. Инглесси, С. Н. Котряхова, О. Е. Маев, Д. А. Майсузенко, Н. Р. Сагидова, А. Д. Чубыкин
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация LHCb

Поиски новых источников нарушения CP -четности важны для понимания эволюции Вселенной в первые секунды после Большого взрыва. Отличие частиц от античастиц, проявляющееся в нарушении CP -инвариантности, является одним из условий, сформулированных А. Д. Сахаровым и необходимых для объяснения образования барионной асимметрии Вселенной. В Стандартной модели (СМ) физики частиц CP -инвариантность нарушается в кварковом секторе. Этот эффект связан с ненулевой комплексной фазой элементов матрицы кваркового смешивания (матрицы Кабиббо – Кобаяши – Маскавы). До 2019 г. было экспериментально известно лишь о процессах CP -нарушения для превращений кварков «нижнего» типа: d , s , b . Очарованные кварки относятся к кваркам «верхнего» типа: u , c , t . СМ предсказывает малые (порядка 10^{-3} – 10^{-4}) величины эффекта CP -нарушения для очарованных частиц.

В 2019 г. эксперимент LHCb объявил об обнаружении нарушения CP -инвариантности в распадах очарованных D^0 -мезонов. Для того чтобы экспериментально зафиксировать эффект, необходимо было найти различие вероятностей распадов D^0 -мезонов и анти- D^0 -мезонов для какого-либо

канала распада. Подсчет начального числа частиц и античастиц осуществлялся при помощи процедуры тегирования. В работе LHCb использовались D -мезоны из распадов D^* (заряд π -мезона определял аромат начального состояния) и полупертоновых распадов B -мезонов (аромат D^0 -мезона определялся по заряду мюона). Для того чтобы свести к нулю асимметрию детектирования частиц конечного состояния, регистрировались так называемые CP -четные распады: $D^0 \rightarrow K^- K^+$ и $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$. Для устранения влияния асимметрии рождения D^0 -мезонов и асимметрии детектирования тегированной частицы измерялась разница асимметрий для $K^- K^+$ - и $\pi^- \pi^+$ -каналов. Отличие от нуля соответствующей наблюдаемой ΔA_{CP} свидетельствовало о нарушении CP -симметрии.

В результате измерения получено следующее значение: $\Delta A_{CP}^{\text{exp}} = (-15,4 \pm 2,9) \cdot 10^{-4}$, где статистические и систематические погрешности объединены. Таким образом, CP -нарушение зафиксировано на уровне 5,3 стандартных отклонения, что позволяет говорить о первом экспериментальном наблюдении этого эффекта в распадах очарованных частиц.

Измерение спектра поперечного импульса $p_{\ell\ell}$ ($\ell = e, \mu$) и угловой переменной ϕ^* в процессе распада Z-бозона на лептонную пару в эксперименте ATLAS

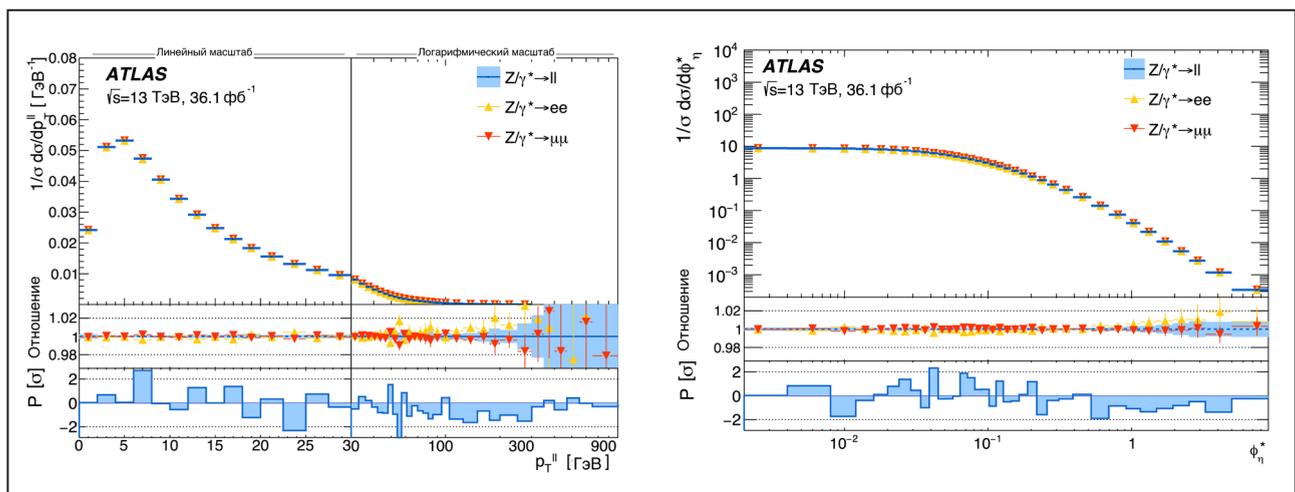
А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев, Ю. Г. Нарышкин, Д. Пуджа, В. М. Соловьев, О. Л. Федин – Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация ATLAS

Прецизионное измерение спектров поперечного импульса Z-бозона p_T и угловой переменной ϕ^* позволяет выполнить их сравнение с теоретическими расчетами, полученными с учетом поправок различных порядков пертурбативной квантовой хромодинамики (КХД), и тем самым проверить расчеты в рамках пертурбативной КХД.

Для анализа использовались данные, соответствующие интегральной светимости $36,1 \text{ фб}^{-1}$, накопленные в 2015 и 2016 гг. работы Большого адронного коллайдера на детекторе ATLAS. Для измерений отбирались события распадов Z-бозонов на электрон-позитронную (ee) и мюонную ($\mu\mu$) пары. Измерения выполнялись в области инвариантных масс пар лептонов, близких к массе Z-бозона (66–116 ГэВ). Для восстано-

вления неискаженных (за счет отбора событий и конечного разрешения детектора) спектров по p_T и ϕ^* осуществлялась процедура обратной свертки.

В результате были измерены дифференциальные (рис.) и интегральные сечения в ограниченном фазовом пространстве (fiducial phase space) в электронном и мюонном каналах распада Z-бозона. Измеренные сечения были объединены с помощью χ^2 -минимизации, а также выполнено сравнение полученного объединенного результата с теоретическими предсказаниями. Измеренное интегральное сечение распада Z-бозона в лептоны составило $\sigma_{\text{fid}}(pp \rightarrow Z/\gamma^* \rightarrow \ell\ell) = 736,2 \pm 0,2 \text{ (стат.)} \pm \pm 6,4 \text{ (сист.)} \pm 14,7 \text{ (свет.) пб}$.



Измеренные дифференциальные сечения для электронного и мюонного каналов распада Z-бозона, а также комбинированный результат для сечения распада в лептоны как функция p_T (слева) и ϕ^* (справа). P – разница в измеренных сечениях между электронным и мюонным каналами, деленная на ошибку к сечению комбинированного результата

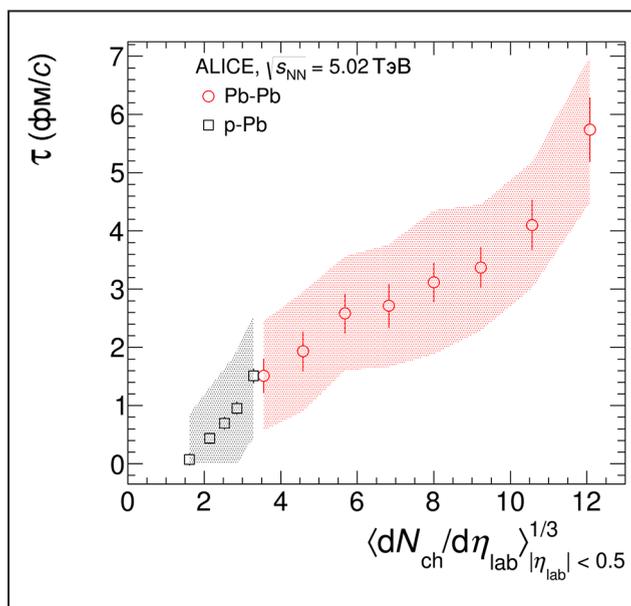
Хронометрия эволюции плотной адронной среды в центральных столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ядер на Большом адронном коллайдере

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

Одним из ключевых параметров при описании эволюции высокотемпературной кварк-глюонной плазмы (КГП), которая формируется в зоне взаимодействия при центральном столкновении ультрарелятивистских ядер, является время жизни τ_A адронной среды, возникающей в процессе адронизации КГП. Оценку этой характеристики можно получить, сравнивая в центральных и периферических столкновениях ядер выходы адронных резонансов, имеющих разное время жизни: ρ -мезонов, каонов, ϕ -мезонов, пионов. Такой анализ был проведен при доминирующем вкладе группы НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ при изучении столкновения ядер свинца

при энергиях $\sqrt{s_{NN}}$, равных 2,76 и 5,02 ТэВ, в эксперименте ALICE.

На рисунке показано полученное время жизни адронной среды в ядро-ядерном и протон-ядерном столкновениях при $\sqrt{s_{NN}}$, равной 5,02 ТэВ, в зависимости от множественности рожденных заряженных адронов. Видно, что время жизни адронной фазы между химической и кинетической заморозками возрастает с ростом размера сформированной в процессе взаимодействия системы. При большой множественности, характерной для событий с формированием КГП, время жизни достигает значений 6 фм/с, сравнимых с временем жизни КГП.



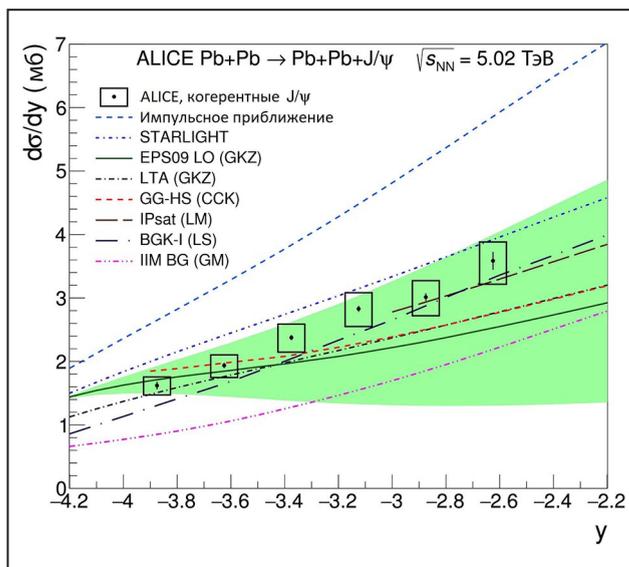
Зависимость нижнего предела на время жизни адронной фазы в процессе эволюции горячей среды, созданной в Pb-Pb- и p-Pb-столкновениях при 5,02 ТэВ, от множественности заряженных частиц в области центральных быстрой

Эксклюзивное фоторождение J/Ψ на ядре в ультрапериферических столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ ТэВ

В. В. Иванов, Е. Л. Крышень, А. В. Ханзадеев, М. В. Малаев, В. Н. Никулин, В. Г. Рябов, Ю. Г. Рябов, **В. М. Самсонов**, М. Б. Жалов, В. А. Гузей
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация ALICE

Плотность мягких глюонов в ядрах $G_A(x, \mu^2)$ является ключевым параметром, характеризующим свойства высокотемпературной кварк-глюонной среды, формирующейся в центральных столкновениях ультррелятивистских ядер. Одним из способов исследования $G_A(x, \mu^2)$ при малых x является изучение процессов фоторождения кваркониев. Эксклюзивное фоторождение векторных мезонов J/Ψ в ультрапериферических столкновениях ядер свинца при $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ ТэВ, показанное на рисунке, измерено коллаборацией ALICE в области быстрот $-4 < y < -2,5$. Полученные сечения фоторождения J/Ψ с разумной точностью согласуются с теоретическими предсказаниями модели GKZ (Гузей – Крышень – Жа-

лов), полученными в лидирующем порядке теории возмущения квантовой хромодинамики. Анализ этих данных позволил практически безмодельно определить фактор ядерной экранировки $R_g \approx 0,8-0,9$ в области $0,03 < x < 0,07$ при $\mu^2 \approx 3,0$ ГэВ². Кроме того, измеренное отношение сечений фоторождения $\Psi(2S)$ и J/Ψ в этой области $x R = 0,150 \pm 0,018$ (стат.) $\pm \pm 0,021$ (сист.), что в пределах ошибок фактически совпадает с предсказаниями и соответствующим отношением сечений на нуклоне, измеренным в эксперименте HERA. Исходя из этого, можно сделать вывод, что в фоторождении векторных мезонов J/Ψ и $\Psi(2S)$ величины ядерных экранировок отличаются незначительно.



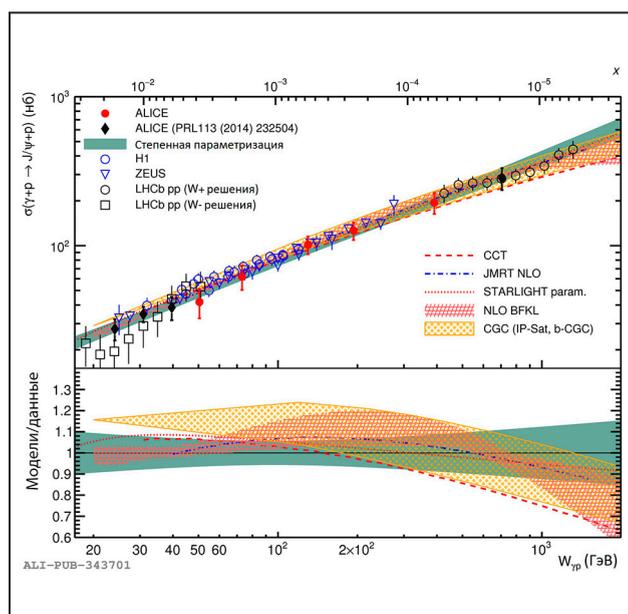
Сравнение измеренных сечений фоторождения J/Ψ в области быстрот $-4 < y < -2,5$ в ультрапериферических столкновениях ядер свинца при 5,02 ТэВ с рядом теоретических предсказаний. Зеленая область отражает неопределенность вычислений с EPS09-моделью ядерных экранировок

Фоторождение J/Ψ -мезонов в ультрапериферических протон-ядерных столкновениях на Большом адронном коллайдере

В. В. Иванов, Е. Л. Крышень, А. В. Ханзадеев, М. В. Малаев, В. Н. Никулин, В. Г. Рябов, Ю. Г. Рябов, **В. М. Самсонов**, М. Б. Жалов, В. А. Гузей
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация ALICE

Ультрапериферические протон-ядерные столкновения, в которых релятивистское ядро является интенсивным источником квазиреальных фотонов, а протон – мишенью, позволяют изучать на Большом адронном коллайдере фотон-протонные взаимодействия при беспрецедентно высоких энергиях. При использовании уникальных возможностей детектора ALICE и при значительном вкладе группы НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ из анализа накопленных данных в 2019 г. было определено сечение фоторождения J/Ψ на протонах в интервале фотон-протонных энергий от 50 до 500 ГэВ (рис., красные точки). В рамках пертурбативной квантовой хромодинамики сечение этого процесса определяется плотностью глюонов в протоне. Представленное на рисунке сравнение полученного сечения с теоретическими расчетами, основанными на приближениях NLO BFKL (Балицкий – Фадин – Кураев – Липатов), Color Glass Condensate с учетом насыщения глюонных плотностей, позволяет не только существенно ограничить коридор неопределенности в поведении глюонной плотности в нуклоне при малых x , но и способствует прогрессу в понимании фундаментальных свойств физики сильных взаимодействий.

В частности, оказалось, что степенной рост сечения этого процесса с энергией близок к поведению, предсказанному в рамках приближения NLO BFKL, а заметного замедления роста,



Сечение эксклюзивного фоторождения J/Ψ на протоне в зависимости от энергии фотон-протонного взаимодействия в системе центра масс. Красными и черными точками представлены значения сечения этого процесса, извлеченные из данных, полученных на детекторе ALICE. Показано сравнение этих результатов с сечениями, измеренными в экспериментах на HERA и LHCb, а также с предсказаниями теоретических моделей (верхняя панель). На нижней панели представлено отношение теоретических предсказаний сечения данного процесса к аппроксимации экспериментальных значений степенной зависимостью от энергии

характерного для проявления эффектов насыщения глюонной плотности, даже при столь высоких энергиях, не наблюдается.

Высокопрецизионные измерения масс нуклидов на ловушке PENTATRAP

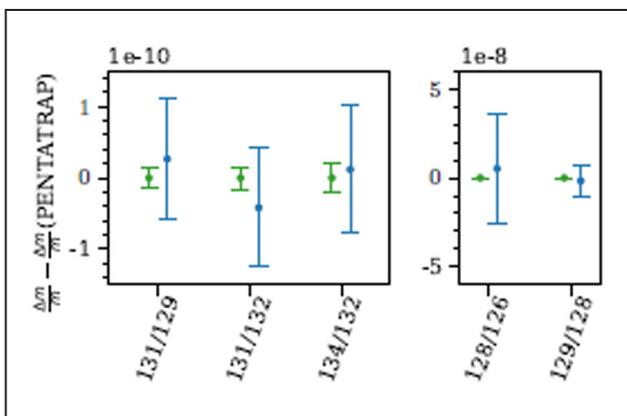
С. А. Елисеев, Ю. Н. Новиков, П. Е. Филянин, О. И. Безроднова
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
коллаборация PENTATRAP

Для измерений весьма тонких эффектов, необходимых для решения ряда фундаментальных вопросов современной физики, требуется гораздо большая точность определения физических величин, чем та, которую обеспечивают существующие ионные ловушки. Одной из этих проблем является изучение свойств нейтрино, которой была посвящена деятельность нашей группы в проекте SHIPTRAP в предыдущие годы.

В 2018 г. в Институте ядерной физики Общества Макса Планка в Гейдельберге была запущена новая система PENTATRAP, состоящая из пяти ловушек Пеннинга, в создании которой активно участвовала лаборатория физики экзотических ядер Отделения физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Первые стартовые эксперименты показали, что точность прямого измерения масс $\delta M/M$ составляет величину $3 \cdot 10^{-11}$ (рис.), что на два порядка улучшает точность, достигнутую на SHIPTRAP и других аналогичных установках ($\approx 10^{-9}$).

В 2019 г. были начаты рабочие измерения масс различных изотопов ксенона, призванные впоследствии быть использованными для калибровочных измерений в ультрапрецизионной масс-спектрометрии.

Эксперимент по измерению разницы масс $^{187}\text{Re} - ^{187}\text{Os}$ на PENTATRAP в 2019 г. привел к точности 3 эВ, что закладывает хороший фундамент для определения массы антинейтрино. Дальнейшее уточнение этого значения в полномасштабном эксперименте коллаборации ECHO позволит рассматривать эту пару нуклидов как дополняющую тритиевый эксперимент KATRIN. Полученные нами на PENTATRAP значения разности масс совпадают с измерениями энергий распада для ^{187}Re , выполненными методами криогенной микрокалориметрии, и еще раз подтверждают возможность определения массы нейтрино с использованием болометров.



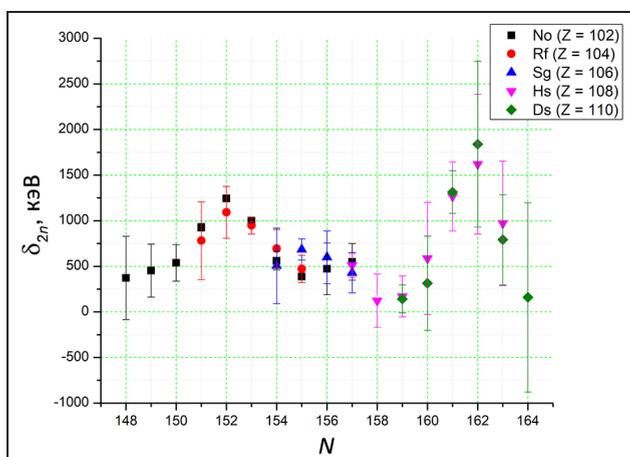
Сравнение разностей относительных погрешностей для набора изотопов ксенона с массовыми числами от $A = 126$ до $A = 132$ с литературными данными (и самыми точными в масс-спектрометрии), свидетельствующее о достижении ультрапрецизионной точности. Слева в каждой паре показаны данные PENTATRAP

Измерения масс сверхтяжелых элементов на установке SHIPTRAP

С. А. Елисеев, Н. С. Мартынова, Ю. Н. Новиков, П. Е. Филянин, С. В. Ченмарев
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
колаборация SHIPTRAP

Прямые измерения масс нуклидов трансурано-вых элементов – основное направление деятельности на установке SHIPTRAP, которая является единственной в мире системой, на которой можно осуществить такие измерения. Эта установка базируется на линейном ускорителе UNILAC, с помощью которого в реакции слияния ионов синтезируются нуклиды сверхтяжелых элементов. Селектор скоростей SHIP выделяет интересные для измерений масс нуклиды. В появившейся возможности выхода на пучок ускорителя летом 2018 г. были выполнены эксперименты по прямому измерению масс трансфермиевых нуклидов No, Lr и Rf. Эксперимент проходил в модифицированной конфигурации расположения всей системы по отношению к направлению пучка с использованием криогенной камеры торможения пучка, разработанной нашей группой, и нового метода фазового отображения, внедренного ранее С. А. Елисеевым, для определения резонансной частоты. В 2019 г. выполнены обработка и анализ данных, которые привели к получению

конкретных количественных результатов. Полученные значения масс нуклидов $^{251-254}\text{No}$, $^{254-256}\text{Lr}$ и ^{257}Rf позволили по известным цепочкам α -распадов воспроизвести часть ландшафта сверхтяжелых нуклидов вплоть до элемента дармштадтия ($Z = 110$). Это привело к возможности определения величин щелей в оболочечной структуре, ответственной за стабилизирующие факторы в нуклидах сверхтяжелых элементов. Данные о ландшафте массовой поверхности, полученные нами и отраженные на рисунке, показывают выделенность чисел нейтронов $N = 152$ и 162 в нуклидах, которые характеризуют «квазимагичность» с этим числом нейтронов и приводят к выводу о наличии малых островов стабильности, возникающих на подступах к предполагаемому острову устойчивости сверхтяжелых элементов, что получило прямое экспериментальное подтверждение опытами на SHIPTRAP. Другим интересным результатом было прямое измерение масс ряда изомерных состояний.



Величины оболочечной щели для трансфермиевых нуклидов в зависимости от числа нейтронов

Исследование нейтроноизбыточных ядер астата в лазерном ионном источнике на установке ISOLDE: оболочечный эффект и инверсия четно-нечетного эффекта

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

Методом лазерной ионизационной спектроскопии в ионном источнике установки ISOLDE (ЦЕРН) проведены измерения изотопических сдвигов и сверхтонкого расщепления атомных уровней радиоактивных изотопов $^{217, 218, 219}\text{At}$ на атомном переходе $\lambda = 795,4$ нм. Получены значения изменений среднеквадратичных зарядовых радиусов ($\delta\langle r^2 \rangle$) магнитных дипольных и электрических квадрупольных моментов исследованных ядер.

На рисунке 1 показаны изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов ядер астата в окрестности $N = 126$. Хорошо виден излом в изотопической зависимости $\delta\langle r^2 \rangle$ при $N = 126$. Это явление называется оболочечным эффектом, а его описание в последнее время рассматривается как важнейший критерий состоятельности ядерных моделей. Полученная информация об оболочечном эффекте у изотопов астата позволит наложить дополнительные ограничения на выбор модели ядра.

Четно-нечетный эффект в зарядовых радиусах ядер – отличие радиуса нечетно-нейтронного ядра от среднего значения радиусов его четно-нейтронных соседей – описывается параметром γ_N :

$$\gamma_N = \frac{2\delta\langle r^2 \rangle_{N-1, N}}{\langle r^2 \rangle_{N-1, N+1}},$$

где N – нечетное число нейтронов. Если этот параметр меньше 1, то имеет место нормальный четно-нечетный эффект (наблюдаемый для подавляющего большинства ядер), если больше 1 – обратный четно-нечетный эффект.

Как видно из рис. 2, для изотопов Fr, Ra и Rn с $133 < N < 137$ ранее был обнаружен обратный четно-нечетный эффект ($\gamma_N > 1$). Нами установлено, что для изотопов $^{217-219}\text{At}$ ($N = 132-134$) также наблюдается обратный четно-нечетный эффект. Было показано, что обратный четно-нечетный эффект скоррелирован с октупольной деформированностью соответствующих ядер.

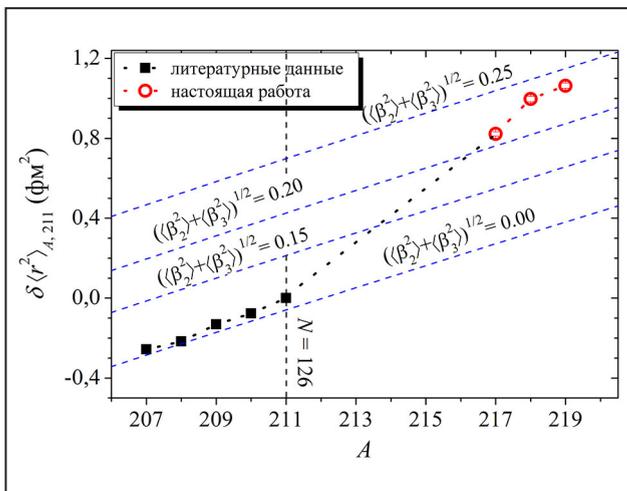


Рис. 1. Изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов изотопов астата вблизи $N = 126$

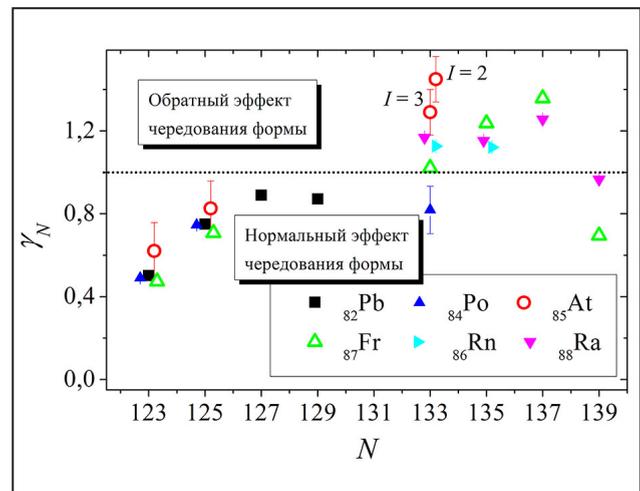


Рис. 2. Параметр четно-нечетного эффекта для ядер в районе свинца

Таким образом, новые данные указывают на возможное наличие октупольной деформации, по крайней мере у ^{218}At . Этот вывод подтверждается также анализом магнитных моментов ядер астата, измеренных в нашем эксперименте. Ранее ядра астата считались лежащими вне предполагаемой области октупольной деформации. Исследование октупольно деформированных ядер – одно из актуальных направлений современной ядерной физики в связи с использованием этих ядер для поиска T - и P -нечетных эффектов, описание которых выходит за рамки Стандартной модели.

Наряду с изменениями среднеквадратичных зарядовых радиусов были измерены также магнитные моменты $^{217-219}\text{At}$. На рисунке 3 показаны g -факторы (отношения магнитного момента ядра к его спину) четно-нейтронных ядер рассматриваемой области. Все экспериментальные g -факторы, показанные на рис. 3, попадают в интервал между шмидтовским значением для под оболочки $\pi h_{9/2}$ и g -фактором для основного состояния ядра ^{209}Bi с одним протоном сверх заполненной оболочки $Z = 82$. Это свидетельствует о том, что основной конфигурацией для всех этих ядер является конфигурация $\pi h_{9/2}$, несмотря на изменение спина с $9/2$ на $5/2$ для ^{221}Fr и $3/2$ для $^{223, 225}\text{Fr}$ и ^{227}Ac .

Рисунок 3 демонстрирует поразительную схожесть изотопического поведения g -факторов четно-нейтронных ядер при $N \geq 126$ для различных изотопических цепочек. С увеличением N g -факторы уменьшаются с одинаковой скоростью независимо от Z . При $N = 136$ для изотопов франция наблюдается скачок, после которого восстанавливается та же тенденция: постепенное уменьшение g -фактора с увеличением N с той же скоростью, что и до скачка. Этот скачок может объясняться примесью $\pi f_{7/2}$ -конфигурации с большим значением одночастичного g -фактора.

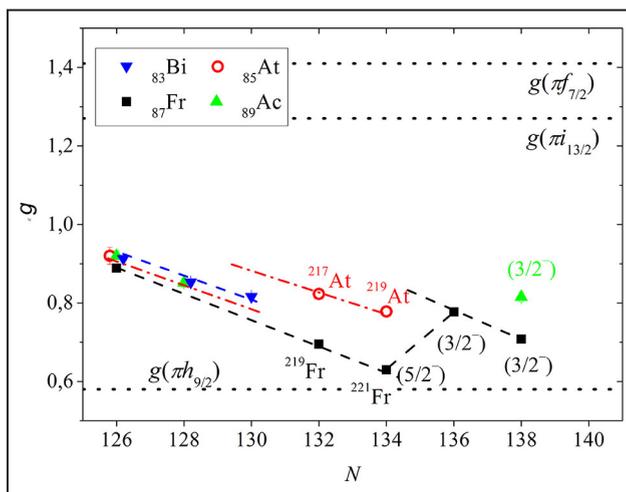


Рис. 3. Факторы g (отношения магнитного момента ядра к его спину) четно-нейтронных ядер

Действительно, предполагается, что основное состояние ^{223}Fr с $I^\pi = 3/2^-$ определяется деформированной нильссоновской конфигурацией $3/2^- [521]f_{7/2}$, для которой характерно сильное смешивание с вращательной полосой на нильссоновском состоянии $1/2^- [521]h_{9/2}$.

Хотя g -факторы нечетных изотопов астата, исследованных в настоящей работе, уменьшаются при переходе от $N = 132$ к $N = 134$ с той же скоростью, как и у изотопов франция, с тем же числом нейтронов, их абсолютные значения заметно больше, чем у $^{219, 221}\text{Fr}_{132, 134}$ (см. рис. 3). Это увеличение не может быть объяснено за счет примеси $f_{7/2}$ -конфигурации из-за того, что ее спин меньше, чем спин рассматриваемых ядер астата. Однако, если предположить наличие октупольной деформации, смешивающей орбитали с разной четностью, становится возможной примесь состояний конфигурации $i_{13/2}$, которая приводит к увеличению магнитного момента. Таким образом, отклонение $g(^{217, 219}\text{At})$ от систематики также может указывать на наличие октупольной деформации у этих ядер.

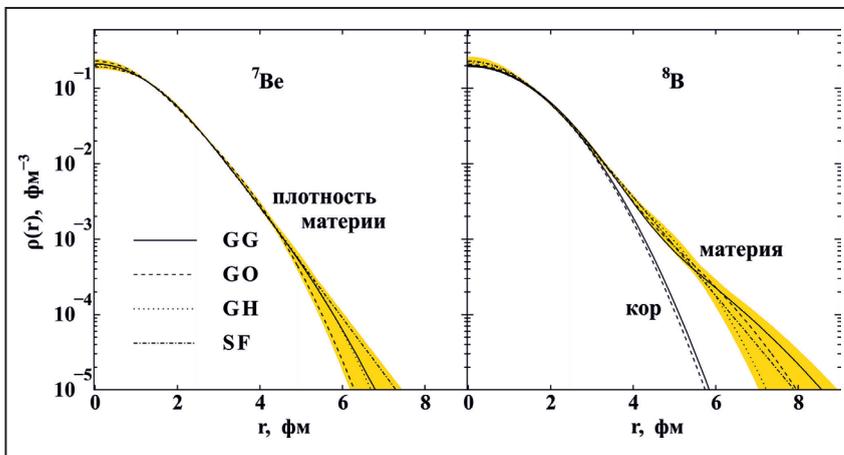
Распределения ядерной материи в протоноизбыточных ядрах ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$ из данных по упругому рассеянию протонов промежуточной энергии в инверсной кинематике

Г. Д. Алхазов, А. А. Воробьев, А. В. Добровольский, А. Г. Инглесси, Г. А. Королев, Г. Е. Петров, Л. О. Сергеев, А. В. Ханзадеев, В. И. Яцюра
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация IKAR

С целью изучения пространственных распределений материи в протоноизбыточных экзотических ядрах ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$ были измерены абсолютные дифференциальные сечения упругого рассеяния $p{}^7\text{Be}$ и $p{}^8\text{B}$ в области малых углов в инверсной кинематике при энергии 0,7 ГэВ/нуклон. Эксперимент проводился в Центре по изучению тяжелых ионов им. Гельмгольца (GSI) в Дармштадте. Основной частью экспериментальной установки была ионизационная камера ИКАР, наполненная водородом при давлении 10 бар, которая служила одновременно газовой мишенью и детектором протонов отдачи. Активная мишень ИКАР была разработана в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и первоначально использовалась в экспериментах по малоугловому адронному упругому рассеянию. Протоны отдачи регистрировались в ИКАР в совпадении с рассеянными частицами пучка. Анализ формы измеренных дифференциальных сечений позволяет определить распределения ядерной материи и радиусы ядерных кор и гало.

Измеренные сечения были проанализированы с использованием теории многократного рассеяния Глаубера и применением четырех параметризаций феноменологических распределений ядерной плотности, обозначенных как SF (симметризованное распределение Ферми), GH (гауссиан – гало), GG (гауссиан – гауссиан), GO (гауссиан – осциллятор). Были определены среднеквадратичные радиусы (СКР) ядерной материи $R_m = 2,42(4)$ фм у ${}^7\text{Be}$ и $R_m = 2,58(6)$ фм у ${}^8\text{B}$. Полученные распределения плотности показаны на рисунке. ${}^7\text{Be}$ является довольно компактным ядром, тогда как протяженное радиальное распределение плотности ядра ${}^8\text{B}$ указывает на наличие у этого ядра протонного гало с СКР $R_h = 4,24(25)$ фм. Определен также СКР распределения протонов $R_p = 2,76(9)$ фм.

Отметим, что полученные результаты для ядер ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$ важны для ядерной астрофизики, т. к. эти ядра играют существенную роль в образовании солнечных нейтрино.



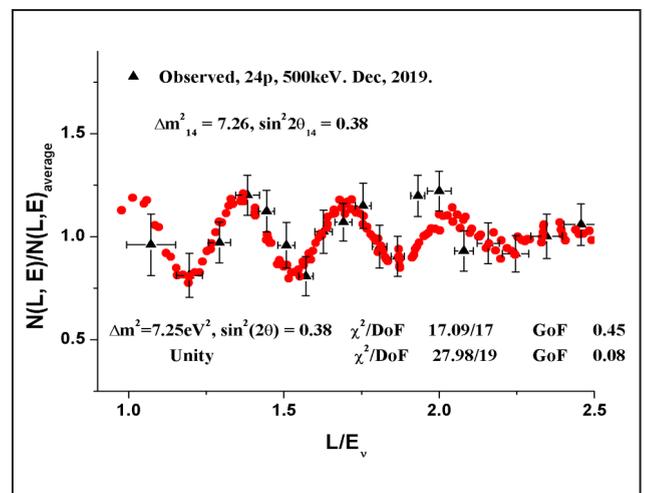
Распределения плотности материи ядер ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$, полученные в результате анализа измеренных сечений с использованием параметризаций распределений плотности SF, GH, GG и GO

Первое наблюдение эффекта осцилляций в эксперименте «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино

А. П. Серебров, В. Г. Ивочкин, Р. М. Самойлов, А. К. Фомин, В. Г. Зиновьев, П. В. Неустроев, В. Л. Головцов, А. В. Черный, О. М. Жеребцов, М. Е. Чайковский, М. Е. Зайцев, А. А. Герасимов – Отделение нейтронных исследований, Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, А. Л. Петелин, А. Л. Ижutow, А. А. Тузов, С. А. Сазонтов, М. О. Громов, В. В. Афанасьев – ГИЦ «Научно-исследовательский институт атомных реакторов», М. Е. Зайцев – Димитровградский инженерно-технологический институт НИЯУ МИФИ, коллаборация «Нейтрино-4»

Сегодня широко распространена дискуссия о возможном существовании стерильного нейтрино. Предполагается, что из-за возможного перехода реакторных антинейтрино в стерильное состояние может наблюдаться эффект осцилляций на коротких расстояниях от реактора. Стерильное нейтрино может рассматриваться как кандидат в темную материю.

Эксперимент «Нейтрино-4» проводился на реакторе SM-3, имеющем компактную активную зону $42 \times 42 \times 35$ см и работающем на высокообогащенном ^{235}U при тепловой мощности 90 МВт. Задача состояла в измерении потока антинейтрино от реактора и его спектральной зависимости от расстояния в диапазоне 6–12 м от центра активной зоны. Используя полученные данные, мы выполнили анализ на параметры осцилляций Δm_{14}^2 и $\sin^2 2\theta_{14}$. Был разработан метод когерентного сложения результатов измерений. Это позволило непосредственно наблюдать процесс осцилляций – переход реакторных антинейтрино в стерильное состояние и обратно (рис.) на уровне достоверности $3,5\sigma$ с параметрами $\Delta m_{14}^2 \approx 7,26$ эВ² и $\sin^2 2\theta_{14} \approx 0,38$. Объединяя результат нашего эксперимента и галиевой аномалии, мы получили значение $\sin^2 2\theta_{14} \approx 0,35 \pm 0,07$ на уровне достоверности $5,0\sigma$, что позволяет сделать оценку на массу нейтрино $m_\beta \approx 0,8$ эВ, не противоречащую ограничению на массу нейтрино из эксперимента KATRIN $m_\beta \leq 1$ эВ. Результаты определения параметров стерильных нейтрино позволяют предсказать значение $m_\beta \approx 0,8$ эВ, которое может быть получено в эксперименте KATRIN.



Эффект осцилляций реакторных антинейтрино в стерильное нейтрино. Пространственный период осцилляций для энергии нейтрино 4 МэВ составляет 1,4 м

У эксперимента «Нейтрино-4» есть преимущества в чувствительности к осцилляциям с малым периодом благодаря компактной зоне реактора, минимальному расстоянию детектора нейтрино от реактора и широкому диапазону перемещения детектора. На ИР с компактной зоной в экспериментах STEREO и PROSPECT наблюдение нами обнаруженного явления возможно, но пока недостаточно их чувствительности. У эксперимента BEST, начатого в 2019 г. в Баксанской нейтринной обсерватории, есть хорошая чувствительность к $\Delta m_{14}^2 > 5$ эВ², и он может подтвердить результат нашего эксперимента в определении значения $\sin^2 2\theta_{14}$.

Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ № 20-12-00079.

Прецизионный анализ спектра детектора Borexino с совместным включением солнечных pp -, ${}^7\text{Be}$ - и $p\text{er}$ -нейтрино

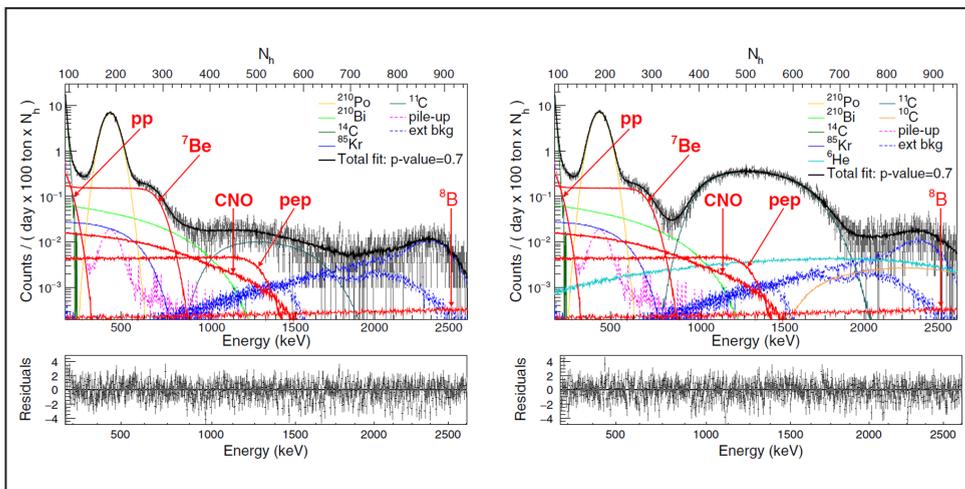
А. В. Дербин, И. С. Драчнев, И. С. Ломская, В. Н. Муратова, Н. В. Ниязова, Д. А. Семенов, Е. В. Унжаков – Отделение нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, коллаборация Borexino

Коллаборацией Borexino впервые проведен анализ спектра, измеренного за 1292 сут, в широком энергетическом интервале 0,19–2,93 МэВ с совместным включением спектров электронов отдачи от рассеяния солнечных pp -, ${}^7\text{Be}$ - и $p\text{er}$ -нейтрино и фоновых спектров, обусловленных α - и β -распадами ядер ${}^{11}\text{C}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{210}\text{Bi}$ и ${}^{210}\text{Pb}$. Подгонка выполнена до и после отбора событий, вызванных распадом ${}^{11}\text{C}$, в разработку алгоритма обнаружения которого сотрудники отдела полупроводниковых ядерных детекторов Отделения нейтронных исследований (ОПЯД ОНИ) НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ внесли существенный вклад. Установлен целый ряд важнейших результатов для солнечных нейтрино, таких как рекордная точность, превышающая теоретические предсказания, для потока ${}^7\text{Be}$ -нейтрино; регистрация в режиме реального времени наиболее интенсивного потока pp -нейтрино; регистрация $p\text{er}$ -нейтрино на уровне, отличающемся от нуля более чем на 5 стандартных отклонений.

Определенное ограничение на скорость счета CNO-нейтрино составляет 8,1 события на 100 т скintиллятора Borexino для 95 % у. д., что соответствует верхнему пределу на поток CNO-нейтрино $7,9 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Данный предел всего в 1,6 раза превышает поток, предсказываемый солнечной моделью B16(GS98) с высокой металличностью. Для выделения сигнала от CNO-нейтрино крайне важно знание β -спектра ${}^{210}\text{Bi}$, измерения которого проводят сотрудники ОПЯД ОНИ.

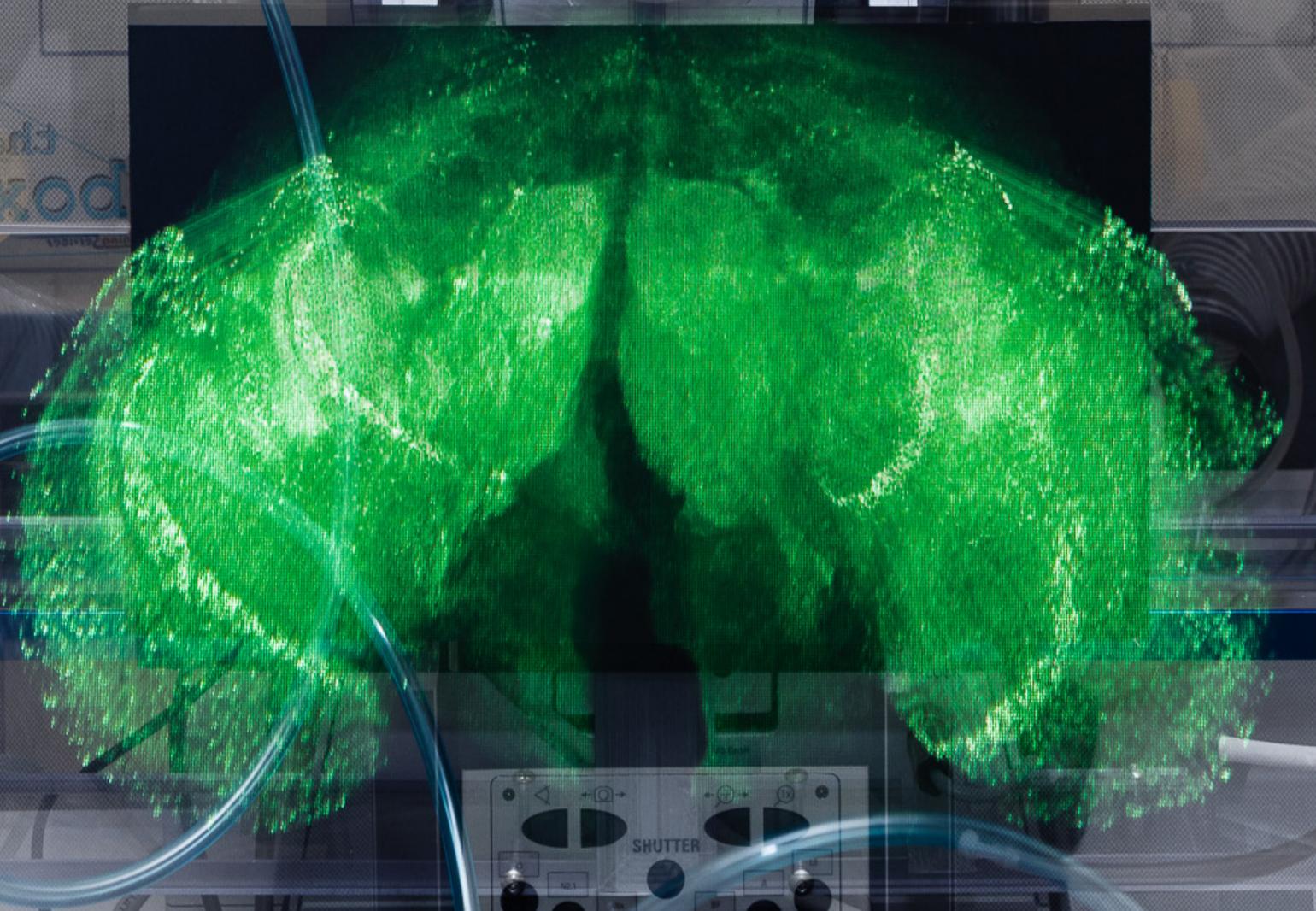
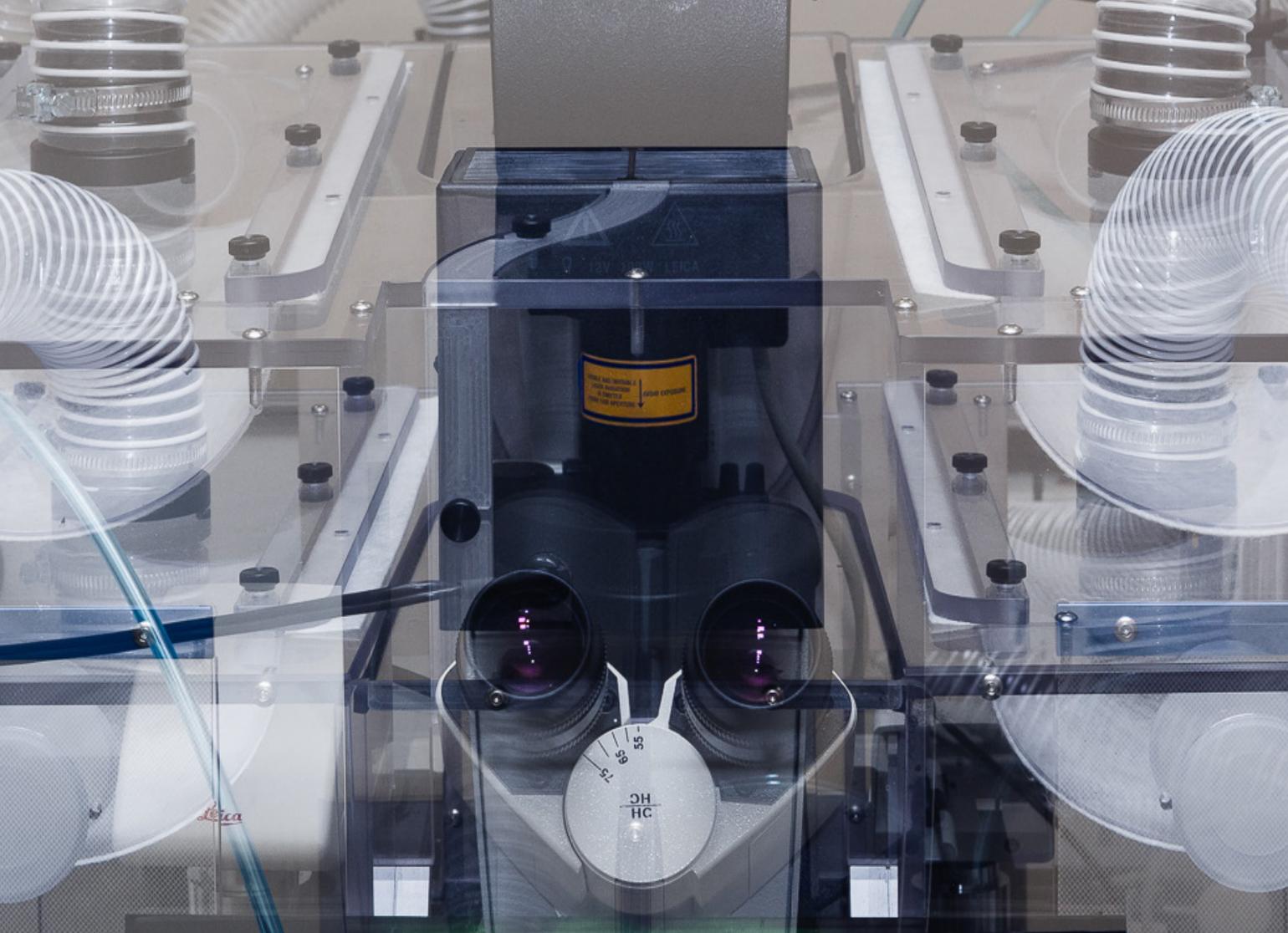
Результаты получены при активном участии российских ученых из НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Курчатовского института, Объединенного института ядерных исследований и Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Работа поддержана грантами РФФИ № 19-02-00097 и 16-29-13014.



Подгонка спектра сигналов, зарегистрированных детектором Borexino: справа – до отбора событий, связанных с распадом космогенного ${}^{11}\text{C}$; слева – после удаления событий ${}^{11}\text{C}$. Красные кривые показывают вклад, связанный с рассеянием солнечных нейтрино на электроны

1. Borexino Collab. // Nature. 2018. V. 562. No. 7728. P. 505.
2. Borexino Collab. // Phys. Rev. D. 2019. 100. P. 082004.



Молекулярная и радиационная биофизика

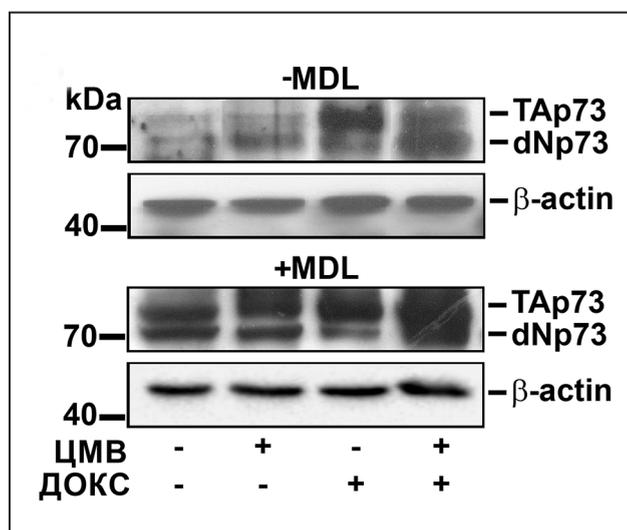
- 74 Ингибитор полиаминового катаболизма MDL72.527 восстанавливает чувствительность клеток моноцитарной лейкемии THP-1, инфицированных цитомегаловирусом человека, к доксорубину
- 75 Аномальная активность транскрипционных факторов gli в злокачественных глиомах
- 76 Дифференциация функциональных критериев кардиореспираторной регуляции при ревматологической патологии
- 77 Анализ времени жизни флуоресценции белка слияния SF-IAPP
- 78 Обоюдоострый меч: влияние на образование агрегатов многоцентрового связывания надмолекулярных комплексов триазавирина
- 79 Обнаружение магнетосомоподобных структур в эукариотических клетках
- 80 Систематический поиск структурных мотивов связывания пептидов с двухцепочечной дННК
- 81 Модификации природного опиоидного пептида энкефалина, оказывающие длительное обезболивание без проявления токсичности
- 82 Роль фактора ремоделирования хроматина CHD1 в глобальной организации хромосом дрозофилы
- 83 Структурно-функциональное многообразие протеоформ белка p53
- 84 Задачи и проблемы хромосомотцентричного проекта «Протеом человека» (С-HPP): десятилетний опыт российского консорциума

Ингибитор полиаминового катаболизма MDL72.527 восстанавливает чувствительность клеток моноцитарной лейкемии ТНР-1, инфицированных цитомегаловирусом человека, к доксорубину

Г. Р. Виноградская, С. С. Емельянова, В. Н. Вербенко – Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
Н. Е. Федорова, Я. Ю. Чернорыж, К. И. Юрлов, А. А. Куш –
Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии им. Н. Ф. Гамалеи
Министерства здравоохранения РФ,
Л. Е. Завалишина – Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования
Министерства здравоохранения РФ,
Н. Ф. Закирова, С. Н. Кочетков, А. В. Иванов – Институт молекулярной биологии
им. В. А. Энгельгардта РАН

Лейкемические клетки разных пациентов демонстрируют различную чувствительность к противоопухолевым препаратам, включая доксорубин (DOX). Резистентность к химиотерапии уменьшает эффективность лечения и способствует рецидивам опухоли и метастазам. Один из подходов для преодоления лекарственной устойчивости включает регуляцию посредством фактора E2F1 белка p73, принадлежащего к семейству p53. Его изоформа ΔNp73 проявляет проонкогенные свойства, а TAp73 – антионкогенные. Цитомегаловирус человека (HCMV), часто обнаруживаемый в опухолях, подавляет проапоптотические пути и, в частности, E2F1/p73-зависимый путь. Активность транскрипционных факторов E2F1 и p73 связана с метаболизмом биогенных полиаминов. Можно предположить, что соединения, нацеленные на ферменты, метаболизирующие полиамины, могут сенсibilизировать HCMV-инфицированные гематологические новообразования к доксорубину.

Мы установили, что инфекция HCMV в моноцитарных лейкемических клетках ТНР-1 значительно поднимает уровень E2F1 и сдвигает баланс между изоформами p73 в пользу ΔNp73, что приводит к выживанию лейкемических клеток, обработанных доксорубином. Напротив, MDL72.527 – ингибитор полиаминового катаболизма – уменьшает соотношение ΔNp73/TAp73 (рис.) и восстанавливает чувствительность



Клетки ТНР-1, инфицированные HCMV. Через 4 ч после инфекции культуральная среда была заменена на свежую, дополненную DOX в отсутствие или в присутствии 20 мМ MDL72.527. Анализ изоформ с N-терминальной модификацией в клетках ТНР-1 вестерн-блотом

клеток к DOX. Показано, что комбинация доксорубина и MDL72.527 может представлять новую стратегию в терапии лейкемии у пациентов как с инфекцией, так и без HCMV-инфекции.

Несмотря на то что механизм действия может нуждаться в дальнейших исследованиях, ясно, что метаболизм полиаминов ассоциирован не только с пролиферацией клеточного роста, но также с чувствительностью к противоопухолевым агентам.

1. Емельянова С. С., Чернорыж Я. Ю., Юрлов К. И., Федорова Н. Е., Иванов А. В., Кочетков С. Н., Вербенко В. Н., Куш А. А., Виноградская Г. Р. // Цитология. 2018. Т. 60. № 7. С. 527–530.

2. Fedorova N.E., ..., Vinogradskaya G.R., Emelianova S.S., ..., Verbenko V.N. et al. // Biochimia. 2019. V. 158. P. 82–89.

Аномальная активность транскрипционных факторов gli в злокачественных глиомах

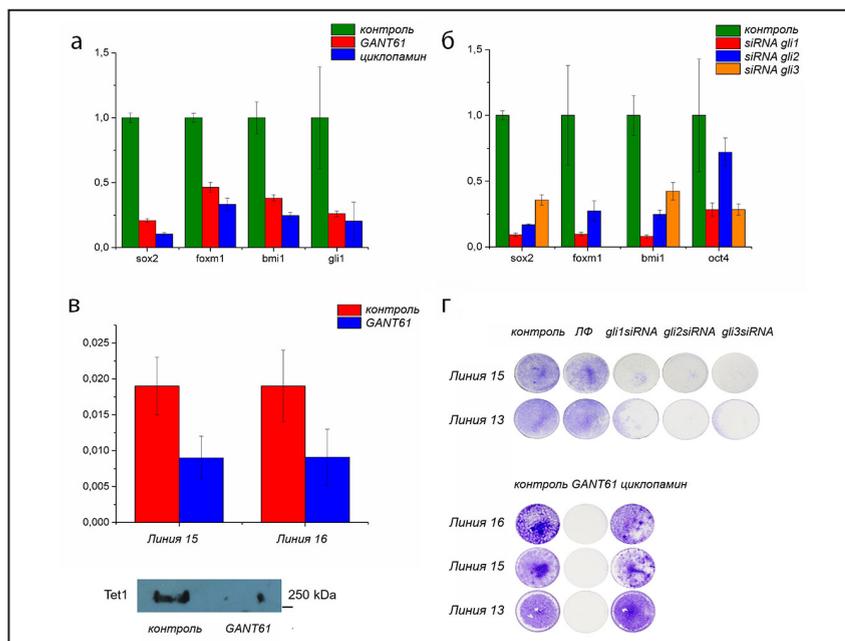
А. В. Волницкий, Т. А. Штам, В. С. Бурдаков, Р. А. Ковалев, А. Ю. Конев, М. В. Филатов
 Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Злокачественная трансформация связана с потерей дифференцированного состояния клеток, или анаплазией. Транскрипционные факторы gli, необходимые для эмбрионального развития, могут участвовать в этом процессе. Мы изучали активность транскрипционных факторов gli в злокачественных глиомах и их роль в выживаемости и поддержании стволового состояния опухолевых клеток.

В представленном исследовании было использовано 20 линий глиом и один образец нормальной ткани взрослого головного мозга. Мы обнаружили экспрессию генов-мишеней gli, включая *GLI1* и *FOXM1*, во всех исследуемых линиях клеток глиом, но не в нормальной ткани. Интересно, что в некоторых линиях глиом экспрессия генов-мишеней gli наблюдалась на фоне высокого уровня их транскрипционного репрессора – Gli3R. Нокадаун *GLI3* в одной из этих линий приводил к снижению экспрессии генов-мишеней

gli. Эти данные показывают, что Gli3R не препятствует транскрипции генов-мишеней и gli3 действует в клетках глиом больше как активатор, чем репрессор транскрипции. Мы наблюдали, что gli регулируют экспрессию таких генов, как *OCT4* и *SOX2*, которые поддерживают стволовое состояние клеток, а также *TET1*, который участвует в деметилировании ДНК (рис. а–в). Инкубация клеток глиом с GANT61 или нокадаун *GLI1*, *GLI2* и *GLI3* приводили к полной гибели опухолевых клеток, тогда как циклопамин действовал более слабо, с различной эффективностью влияя на выживаемость разных линий глиом (рис. г).

Таким образом, транскрипционные факторы gli проявляют аномальную активность в злокачественных глиомах, регулируют экспрессию генов, поддерживающих стволовое состояние клеток, и вносят вклад в выживаемость опухолевых клеток.



Подавление активности gli в клетках глиом ингибиторами или интерференцией РНК. Относительные уровни мРНК исследуемых генов после инкубации некоторых линий глиом: а – с GANT61 или циклопамин (линия 16); б – siRNA против *GLI1*, *GLI2* или *GLI3* (линия 15); в – анализ экспрессии *TET1* в некоторых линиях глиом по мРНК (сверху, линии 15 и 16) и по белку (снизу, линия 15); г – выживаемость опухолевых клеток после инкубации с GANT61, циклопамин или siRNA против *GLI1*, *GLI2* и *GLI3* (линии 13, 15 и 16)

Дифференциация функциональных критериев кардиореспираторной регуляции при ревматологической патологии

Л. А. Носкин – Отделение молекулярной и радиационной биофизики
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,

А. В. Рубинский, А. А. Потапчук, В. Н. Марченко – Первый Санкт-Петербургский
государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова
Министерства здравоохранения РФ

В работе излагается методология экспресс-диагностики функционального сопряжения сердечно-сосудистой системы и внешнего дыхания для выявления индивидуальных реакций у пациентов ревматологического профиля. Сравниваются показатели сердечно-сосудистого и дыхательного синхронизма, полученные в покое и при функциональных пробах (с фиксированным дыханием и умеренной физической нагрузкой). Проанализированные результаты позволяют дифференцировать адаптационные реакции у здоровых испытуемых и пациентов с аутоиммунным компонентом при ревматологической патологии, что предопределяет возможность применения метода для задач индивидуального прогнозирования функционального состояния организма.

Использованная методология спироартериокардиоритмографии позволила одновременно регистрировать частотные характеристики показателей функционального состояния сердечно-сосудистой системы и объемные характеристики функционального аппарата внешнего дыхания на каждом сердечном и дыхательном циклах.

Цель выполненного исследования заключается в совершенствовании диагностики индивидуальных адаптационных потенциалов у пациентов ревматологического профиля на пробах с гиперкапнической (6 дыханий в минуту) и умеренной физической нагрузками.

Для регистрации сопряжения дыхательной и сердечно-сосудистой систем был использован комплекс «Спироартериокардиоритмограф-01» (САКР), разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, который сертифицирован и лицензирован (регистрационное удостоверение № 29/03020703/5869-04, сертификат соответствия № 7569782).

Использование ультразвуковой пневмотахографии позволяет проводить измерения как малых объемов воздуха (менее 0,5 л на один цикл) при средней длительности цикла около 4 с, так и больших потоков (до 8–10 л/с при определении максимальной вентиляции легких у спортсменов).

Совокупность проанализированных показателей позволяет утверждать, что методология оценки сердечно-сосудистого и легочного сопряжений как многокомпонентной системы позволяет дифференцировать адаптационные реакции у здоровых испытуемых и пациентов с аутоиммунным компонентом при ревматологической патологии. Сочетание проб с фиксированным дыханием и умеренной физической нагрузкой с методом спироартериокардиоритмографии повышает диагностическую эффективность и предопределяет возможность применения метода для задач индивидуального прогнозирования функционального потенциала организма при различных синдромальных вариантах ревматологической патологии.

1. Носкин Л. А., Рубинский А. В., ..., Марченко В. Н. и др. // Патогенез. 2018. Т. 16. № 4. С. 90–96.

2. Рубинский А. В., Носкин Л. А. и др. // Ученые записки СПбГМУ им. акад. И. П. Павлова. 2019. Т. 26. № 1. С. 47–53.

3. Носкин Л. А., Рубинский А. В., Марченко В. Н. и др. // Патогенез. 2019. Т. 17. № 3. С. 65–73.

4. Носкин Л. А., Марченко В. Н., Рубинский А. В. и др. // Ученые записки СПбГМУ им. акад. И. П. Павлова. 2020. Т. 27. № 2. С. 46–56.

Анализ времени жизни флуоресценции белка слияния SF-IAPP

Д. В. Лебедев, Я. А. Забродская, А. Л. Тимковский, В. В. Егоров

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

Изменение конформации некоторых белков и образование ими амилоидоподобных фибрилл приводят к развитию большого числа заболеваний (так называемых конформационных заболеваний), считающихся в настоящее время неизлечимыми. Сегодня для детекции образования фибрилл при помощи оптической микроскопии используются различные красители, способные к образованию комплексов с такими агрегатами. Использование красителей требует сложной подготовки образцов и не позволяет наблюдать процесс фибриллогенеза в живой клетке. Известно, что образование супрамолекулярных комплексов флуорофорами приводит к изменению их оптических свойств. При изучении флуоресцентных свойств белков слияния амилоидогенных белков с флуоресцентными белками мы обнаружили, что происходит изменение времени жизни флуоресцентных белков в составе агрегата.

Островковый амилоидный полипептид – пептидный гормон, изменение конформации и фибриллогенез которого связаны с развитием диабета 2-го типа. Мы показали, что формирование супрамолекулярных комплексов белками слияния «островковый амилоидный полипептид – зеленый флуоресцентный белок» приводит к детектируемому изменению времени жизни флуоресценции по сравнению с мономером зеленого флуоресцентного белка *in vitro*. Это позволяет при экспрессии данного белка слияния *in cellulo* наблюдать процесс образования амилоидоподобных фибрилл непосредственно в живой клетке. Клетки, экспрессирующие такие белки слияния, могут быть использованы в качестве модельных систем при начальном скрининге антиамилоидогенных субстанций при разработке терапевтических средств для борьбы с конформационными заболеваниями.

Обоюдоострый меч: влияние на образование агрегатов многоцентрового связывания надмолекулярных комплексов триазавирина

Я. А. Забродская, А. В. Швецов, В. В. Егоров

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

При исследовании механизма взаимодействия аналога азотистого основания триазавирина с полипептидами (мелиттин и пептид GDIRIDIRIDIRG) было показано, что молекулы препарата способны к образованию линейных супрамолекулярных комплексов. Взаимодействие супрамолекулярных комплексов с основными аминокислотными остатками на поверхности приводит к экранированию положительного заряда боковых цепей и таким образом модулирует ионные белок-белковые взаимодействия. Это приводит к индукции образования (для мелиттина) или диссоциации уже сформировавшихся (для пептида GDIRIDIRIDIRG) полипептидных комплексов. Таким образом, действие изучаемых супрамолекулярных комплексов может оказывать диаметрально противоположное воздействие на четвертичную структуру полипептидных комплексов в зависимости от роли ионных взаимодействий в процессе олигомеризации. В случае когда ионные взаимодействия стабилизируют олигомерные формы полипептидов, супрамолекулярные комплексы триазавирина разобщают

их; в случае когда мономерная форма стабилизируется за счет поверхностного заряда и электростатического отталкивания, комплексы индуцируют образование агрегатов.

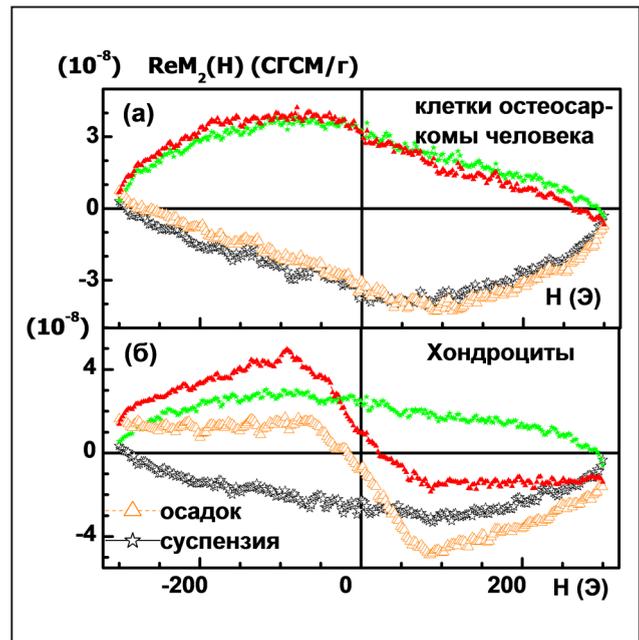
Также было показано, что формирование линейных супрамолекулярных комплексов триазавирина происходит как в растворе, так и непосредственно на поверхности полипептида. При этом взаимодействие каждой последующей молекулы триазавирина с белком происходит не только за счет связывания с сайтом на поверхности полипептида, но и за счет связывания с уже сформировавшимся супрамолекулярным комплексом.

Обнаруженный эффект изменения характера связывания низкомолекулярных соединений в форме супрамолекулярных комплексов с белком может быть использован при дизайне новых препаратов и увеличении эффективности существующих, например при создании препаратов, имеющих множественные сайты связывания с белком, в частности ингибиторов полимераз.

Обнаружение магнетосомоподобных структур в эукариотических клетках

В. А. Рыжов, И. И. Ларионов – Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
 G. Multhoff, M. A. Шевцов – Technische Universität München,
 M. A. Шевцов – Институт цитологии РАН

Хотя магнетосомы в бактериях были открыты несколько десятилетий назад, до сих пор остается открытым вопрос, существуют ли подобные биоминерализованные структуры в эукариотических клетках. В данной работе представлены доказательства существования магнетосомоподобных структур на основе Fe в различных жизнеспособных эукариотических клетках. Использовалась оригинальная методика регистрации второй гармоники намагниченности продольного нелинейного отклика $M_2(H)$ на слабое ас магнитное поле в зависимости от величины dc поля H . Особенности зарегистрированных сигналов (экстремумы в слабом поле в обеих фазовых компонентах отклика $ReM_2(H)$ и $ImM_2(H)$, разные знаки этих сигналов, полевой гистерезис) являются «отпечатками пальцев» присутствующих в клетках магнитных наночастиц, входящих, по-видимому, в магнетосомоподобные структуры. Влияние контактов клеток на состояние этих структур изучалось на клеточных культурах в суспензии и в осадке. Отличие полевого (H -) гистерезиса реальной части M_2 -отклика $ReM_2(H)$ для некоторых культур в этих состояниях предполагает такое влияние (рис.). Зависимости H -гистерезиса M_2 -отклика от частоты сканирования H свидетельствуют о многодоменном состоянии таких структур в некоторых типах клеток и однодоменном состоянии в других клеточных линиях. Оценки показывают, что количество магнетосом в клетках составляет $\leq 5-8$ магнетосом на клетку в двух клеточных линиях, дающих наибольший сигнал (мезенхимальные стволовые клетки (МСК) синовиальной ткани с хондроцитами и МСК костного мозга, индуцированные в остеоцитах), и $\leq 1-2$ магнетосомы на клетку во всех остальных. Присутствие магнетосомоподобных структур изучалось также



Реальная компонента $M_2(H)$ -отклика от клеток остеосаркомы человека и хондроцитов в суспензии и в осадке

в нормальных тканях, полученных от крыс породы Wistar и мышей линии C57Bl/6. Дополнительно исследовались ткани опухоли (ортотопическая С6-глиома крысы и GL261-глиома мыши), в них также было обнаружено присутствие магнетосом. Сигналы от определенных тканей (мозг, сердце, легкие) соответствовали наночастицам магнетита в однодоменном состоянии, для других органов характеристики M_2 -отклика лучше соответствовали Fe(0)-составу их магнитного ядра в многодоменном состоянии.

Работа была частично поддержана грантом РФФИ № 19-08-00024 и грантом ID № 277386067 Британского совета в рамках российско-британского партнерства.

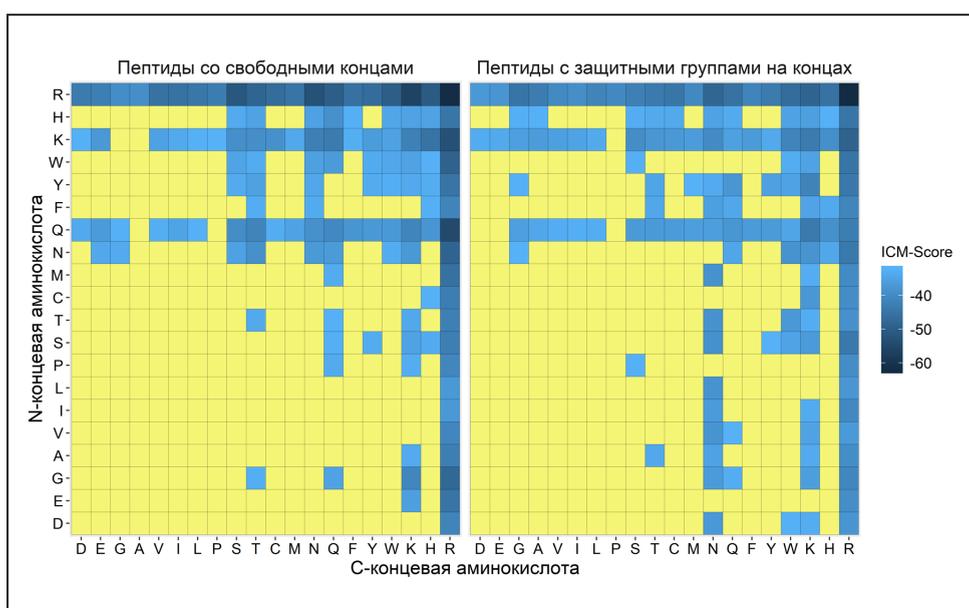
Систематический поиск структурных мотивов связывания пептидов с двухцепочечной днДНК

Н. В. Колчина, А. П. Якимов, Д. М. Байтин, А. С. Афанасьева, М. Г. Петухов –
 Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
 Н. В. Колчина – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
 В. Х. Хавинсон, Н. С. Линькова – Санкт-Петербургский институт биорегуляции и геронтологии

Большое разнообразие биологически активных коротких пептидов обладает антиоксидантным, антибактериальным, противоопухолевым действием, антивозрастной и противовоспалительной активностью, включая регуляцию нейро-, иммуно-, эндокринных и других системных клеточных функций. Механизмы их действия привлекают все большее внимание не только в современной молекулярной биологии, биохимии и биофизике, но также в фармакологии и медицине. В этой работе мы с помощью теоретических методов молекулярного моделирования, молекулярной динамики и докинга лигандов, а также экспериментальных биофизических и биохимических методов впервые систематически исследовали

способность дипептидов (все возможные комбинации 20 стандартных аминокислот) связывать все возможные комбинации тетра nukлеотидов днДНК в классической В-форме.

Было показано, что подавляющее большинство дипептидов не способно специфически связывать днДНК. Тем не менее мы смогли идентифицировать 57 комплексов дипептидов с днДНК, обладающих высокой селективностью, хотя и с умеренными константами связывания ДНК. Анализ связывания дипептидов с заблокированными N- и C-концами показал, что селективность связывания пептидов с днДНК может резко усиливаться с длиной пептида (рис.).



Распределение лучших значений ICM-Score для 400 пептидов со свободными и заблокированными N- и C-концами. Пептиды, способные связываться с днДНК, имеют значения ICM-Score ≤ -32

Модификации природного опиоидного пептида энкефалина, оказывающие длительное обезболивание без проявления токсичности

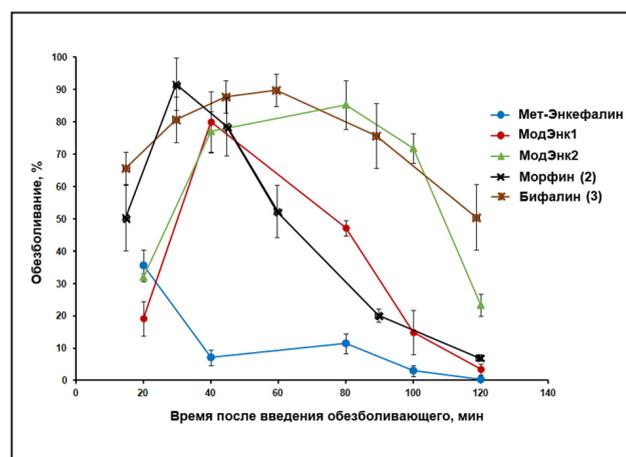
Е. С. Кропотова, И. С. Ивлева, М. Н. Карпенко, М. И. Мосевичкий

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

Ранее нами было показано, что внеклеточные экзоталлопептидазы мозга млекопитающих неспособны деградировать пептид, если на его конце-мишени находится остаток «необычной» аминокислоты бета-аланина (β Ala). С учетом этого результата были созданы несколько модификаций опиоидного эндогенного пептида мет-энкефалина (Tyr-Gly-Gly-Phe-Met). Две из этих модификаций представляются предпочтительными. Это МодЭнк1 (β Ala-Tyr-Gly-Gly-Phe-Met- β Ala) и МодЭнк2 (β Ala-Tyr-Gly-Gly-Phe-NH₂), показавшие наибольшую стабильность в системе *in vitro*, имитирующей внеклеточную среду мозга. Были проведены опыты на животных (крысах) по схеме стандартного теста tail flick (отдергивание хвоста). Результаты представлены в форме графиков на рисунке.

Эти графики показывают, что МодЭнк1 и МодЭнк2 сохраняют обезболивающие свойства и многократно превосходят мет-энкефалин в длительности обезболивания. МодЭнк2 действует дольше, чем МодЭнк1. На рисунке приведены для сравнения взятые из литературы данные таких же тестов, где обезболивающими были морфин или циклический аналог бифалина.

Сопоставление представленных на рисунке графиков показывает, что в примененном тесте отдергивания хвоста графики МодЭнк1 и мор-



Графики, демонстрирующие эффективность и длительность обезболивающего действия энкефалина и его модификаций. Для сравнения приведены данные таких же тестов, где обезболивающими были морфин или циклический аналог бифалина

фина практически совпадают. Дольше анестезирующее действие оказывает МодЭнк2, график которого близок к графику циклического аналога бифалина.

Важным преимуществом показавшего наиболее длительное обезболивание МодЭнк2 является отсутствие токсичности, что было проверено в специально поставленных экспериментах. Детально эти результаты описаны и обсуждены в журнале *Bioorganic & Medicinal Chemistry*.

Роль фактора ремоделирования хроматина CHD1 в глобальной организации хромосом дрозофилы

А. А. Тютюнник, И. Л. Барановская, Я. А. Кучинская, Ю. А. Гненная, А. В. Шалаев, А. Ю. Конев
Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Хроматин состоит из эу- и гетерохроматина. *Drosophila melanogaster* использует две системы регулирования экспрессии генов на уровне целой хромосомы: дозовую компенсацию, приводящую к двукратному повышению транскрипции X-хромосомных генов у самцов, и регуляцию транскрипции в преимущественно гетерохроматиновой 4-й хромосоме с помощью гена *POF*. Формирование гетерохроматина и дозовая компенсация сопровождаются глобальными изменениями в структуре хроматина. Эволюционно консервативный фактор сборки и ремоделирования хроматина CHD1 – эухроматический белок, локализующийся в политенных хромосомах с РНК-полимеразой II. Целью исследования был анализ роли CHD1 дрозофилы в контроле глобальной организации политенных хромосом. Для изучения влияния CHD1 на глобальную организацию хромосом мы исследовали последствия отсутствия и сверхэкспрессии белка CHD1 дикого типа либо его доминант-негативной формы на организацию политенных хромосом слюнных желез.

В политенных хромосомах нуль-мутантных особей мы наблюдали специфическую деконденсацию и укорочение X-хромосомы у самцов, размывание ее дискового рисунка. Морфология женских X-хромосом не отличается от аутосом и морфологии хромосом особей дикого типа. У мутантных самцов *Chd1* белок CHD1 материнского происхождения локализуется исключительно в X-хромосоме. У личинок дикого типа мы наблюдали специфическое обогащение CHD1 в X-хромосоме самцов. Дополнительные сайты локализации CHD1 полностью совпадают с сайтами локализации белков комплекса дозовой компенсации MSL, специфически связывающимся с мужской X-хромосомой. Привлечение CHD1 к X-хромосоме самцов зависит

от наличия функционального комплекса дозовой компенсации. Мутации *Chd1* приводят к нарушению жизнеспособности самцов. *Chd1* становится жизненно важным в сочетании с делецией одного из двух генов, кодирующих вариантный гистон H3.3, His3.3B. Влияние *Chd1* на морфологию X-хромосомы у самцов усиливается в присутствии делеции His3.3B. Сверхэкспрессия белка CHD1 дикого типа или его доминант-негативной формы приводит к сильной декомпактизации определенных эухроматиновых районов политенных хромосом. Иммуноокрашивание антителами к CHD1 и элонгирующей форме РНК-полимеразы II показывает яркое окрашивание всех участков с измененной структурой хроматина. Сверхэкспрессия CHD1 дикого типа, но не его доминант-негативной формы приводит к сильной деконденсации хромоцентра и 4-й хромосомы. Деконденсированный гетерохроматин хромоцентра ярко окрашивается антителами к CHD1, но не к РНК-полимеразе II, гетерохроматиновый белок HP1 и гистон H1 не выявляются в деконденсированных участках хромоцентра. С помощью полимеразной цепной реакции в реальном времени мы показали, что сверхэкспрессия CHD1 повышает уровень репликации гетерохроматиновых X-хромосомных повторов – сателлита 1.688 и *Stellate*, но не влияет на недорепликацию гетерохроматиновых генов в аутосомах.

Выявлено, что отсутствие и сверхэкспрессия CHD1 специфически влияют на глобальную организацию хромосом дрозофилы. CHD1 – новый фактор, оказывающий влияние на организацию гиперактивного хроматина мужской X-хромосомы и структуру транскрипционно неактивного гетерохроматина.

Работа была частично поддержана грантом РФФИ № 15-04-99583.

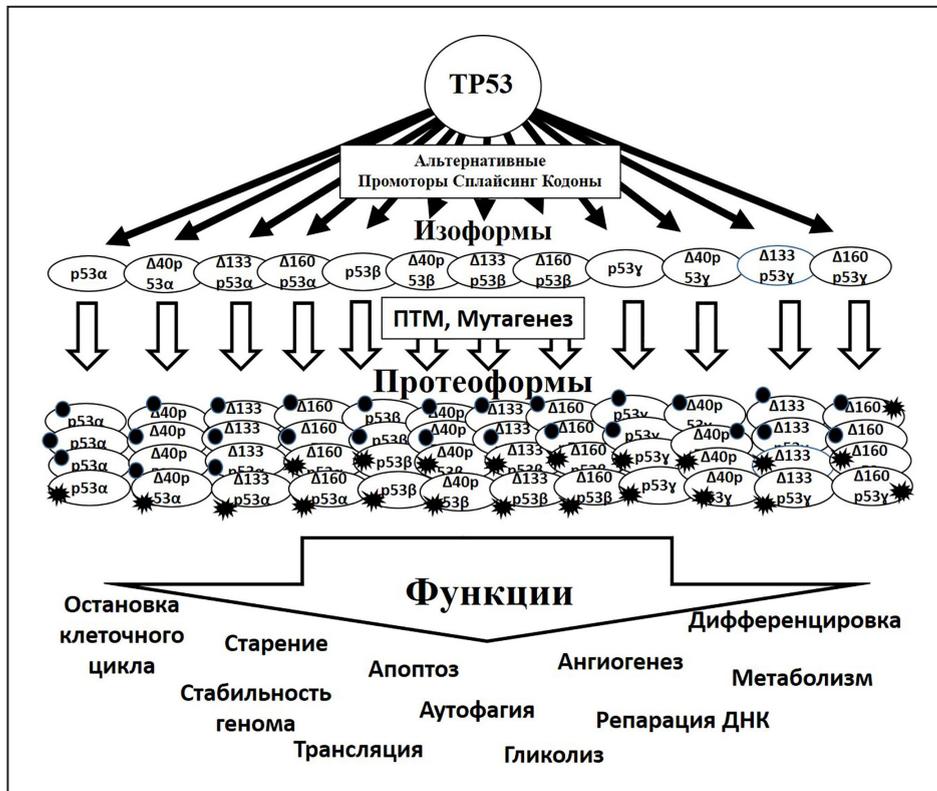
Структурно-функциональное многообразие протеоформ белка p53

С. Н. Нарыжный, О. К. Легина

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

Белок p53 является одним из самых изучаемых белков. По-видимому, такое повышенное внимание к нему вызвано прежде всего его ключевой ролью в клеточных механизмах, связанных с канцерогенезом. Белок p53 является транскрипционным фактором, участвующим в самых разнообразных процессах: регуляции клеточного цикла и апоптоза, проведении сигналов внутри клетки, репарации ДНК, координации метаболических процессов, взаимодействиях между клетками и т. д. Эта многофункциональность, скорее всего, определяется тем, что p53 может быть представлен в виде протеоформ, несущих совершенно разную функциональную нагрузку. Путем альтернативного сплайсинга, ис-

пользования различных промоторов и сайтов инициации трансляции ген TP53 дает начало не менее 12 изоформам, которые дополнительно могут подвергаться многочисленным (> 200) посттрансляционным модификациям. В эту сложную картину добавляются еще и протеоформы, которые образуются за счет точечных мутаций в гене TP53. Полученные в результате протеоформы участвуют в различных процессах, таких, например, как регуляция транскрипционной активности p53 в ответ на разнообразные факторы (рис.). Данная работа и посвящена описанию известных на сегодняшний день протеоформ p53, а также их возможной функциональной роли.



Графическое отображение механизмов возникновения изоформ и протеоформ p53. Указаны процессы, в которых функционирует p53

Задачи и проблемы хромосомотцентричного проекта «Протеом человека» (С-НРР): десятилетний опыт российского консорциума

*С. Н. Нарыжный – Отделение молекулярной и радиационной биофизики
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,*

*А. И. Арчаков, Е. В. Ильгисонис, Ю. Д. Иванов, О. И. Киселева, А. Т. Копылов, А. В. Лисица,
С. Н. Нарыжный, Т. О. Плешакова, Е. А. Пономаренко, Е. В. Поверенная,
М. А. Пятницкий, В. Г. Згода – Научно-исследовательский институт биомедицинской химии
им. В. Н. Ореховича,*

*А. Л. Асеев – Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
В. А. Быков – ООО «НТ-МДТ»,*

А. И. Григорьев – Институт медико-биологических проблем РАН,

В. М. Говорун – Федеральный научно-клинический центр физико-химической медицины,

В. Т. Иванов – Институт биоорганической химии им. акад. М. М. Шемякина

и Ю. А. Овчинникова РАН,

С. Н. Мазуренко – Объединенный институт ядерных исследований,

А. А. Макаров – Институт молекулярной биологии им. В. А. Энгельгардта РАН,

Р. З. Сагдеев – Международный томографический центр СО РАН,

К. Г. Скрябин – ФИЦ «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН

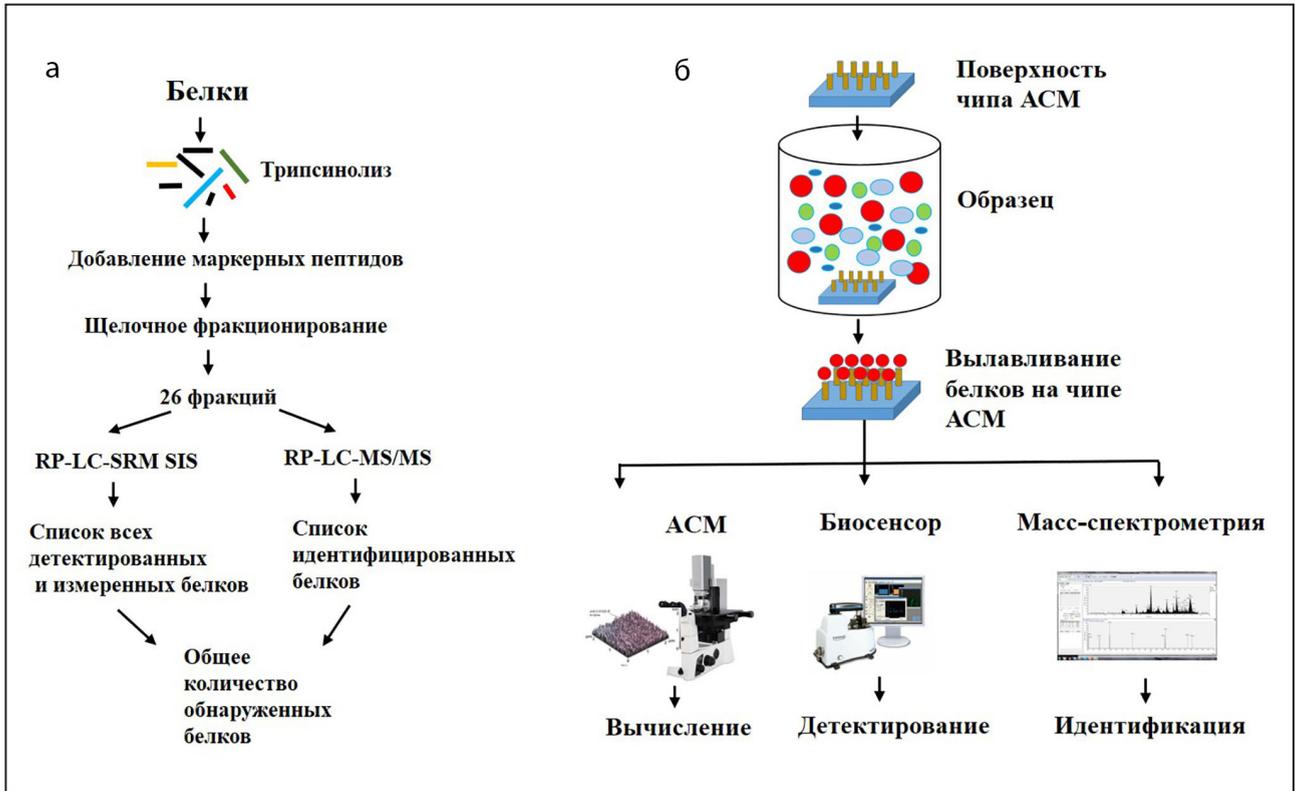
Хромосомно-ориентированный проект «Протеом человека» (Human Proteome Project, С-НРР) направлен на создание молекулярной карты человеческого тела, основанной на получении информации обо всех белках (полипептидах), кодированных человеческим геномом. Эта карта будет содержать как минимум один белковый продукт для каждого гена (так называемый мастерный белок), а также варианты сплайсинга и полипептиды с одиночными аминокислотными полиморфизмами и посттрансляционными модификациями (ПТМ). Благодаря огромным усилиям участников проекта С-НРР большая часть человеческих белков уже охарактеризована. Однако информация об 11 % белков протеома человека, даже на уровне мастерных белков, все еще отсутствует.

В представленной работе отражены усилия российского консорциума, показаны узкие места и пути их преодоления при реализации проекта «Протеом человека». На основе анализа различных биологических образцов (наборов белков, кодируемых хромосомой 18) из плазмы крови, клеток печени и клеточной линии HepG2 были выявлены некоторые биологические и технические

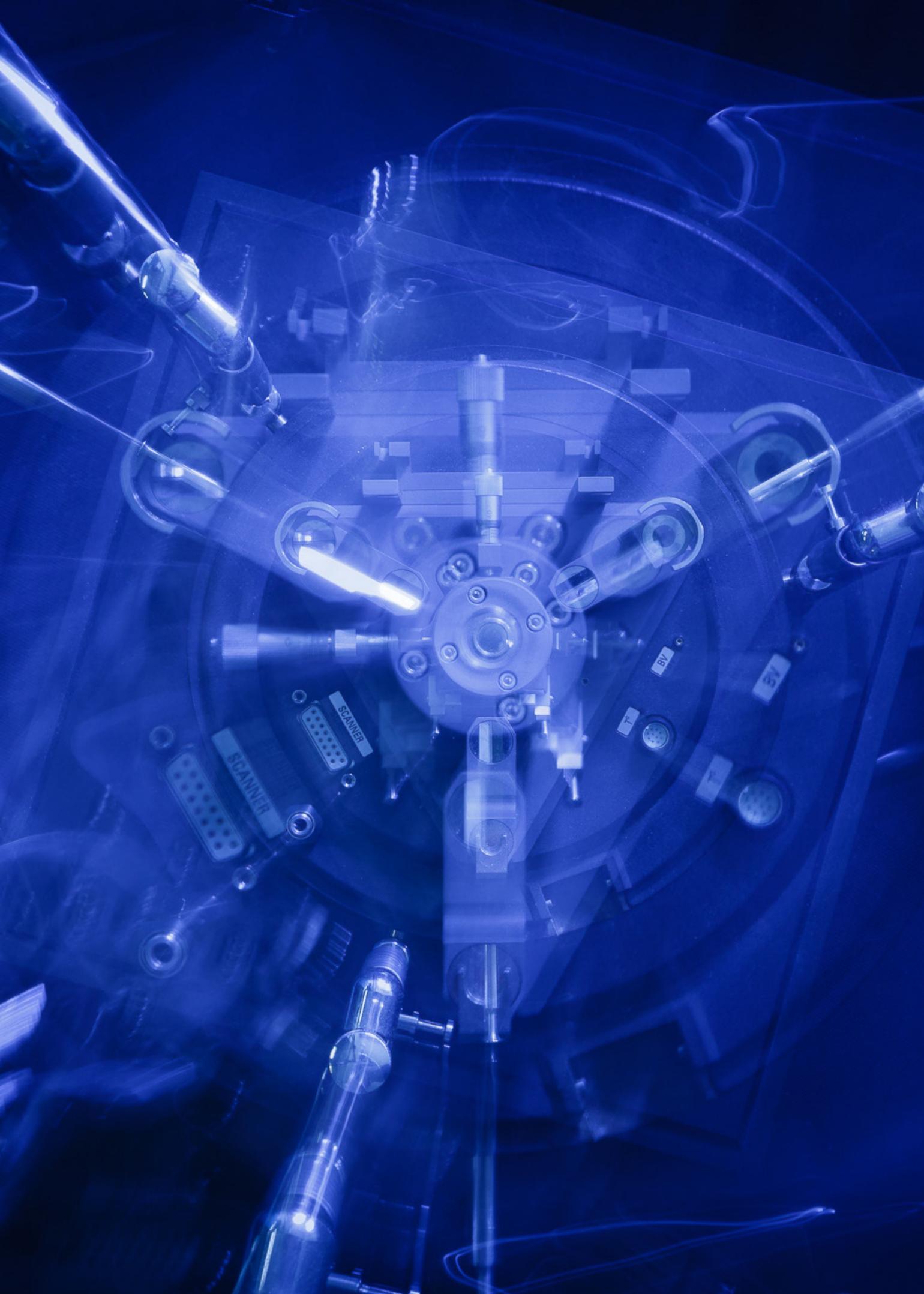
ограничения. Одним из узких мест здесь является недостаточная чувствительность протеомных технологий, затрудняющих обнаружение белков с низким и сверхнизким количеством копий (так называемая темная часть протеома человека). Для увеличения охвата мы предлагаем экспериментальный рабочий процесс, основанный на комбинации технологии дробовика (shotgun) и выбранного мониторинга реакции с двумерным щелочным фракционированием. Кроме того, для обнаружения белков, которые не могут быть идентифицированы такими технологиями, могут быть полезны нанотехнологии, такие как комбинированная атомно-силовая микроскопия с молекулярной рыбалкой и/или обнаружение на нанопроволоке. Эти технологии обеспечивают мощный инструмент для анализа одной молекулы по аналогии с секвенированием нанопор во время анализа генома.

Согласно нашим данным, мы должны ожидать около 100 000 различных протеоформ в ткани печени и клеточной линии HepG2. Разнообразие белков, образующих весь протеом человека, значительно превосходит эти результаты благодаря ПТМ. Поскольку ПТМ определяют

функциональную специфичность белка, мы предлагаем использовать комбинацию генно-ориентированного транскриптомно-протеомного анализа с предварительным фракционированием с помощью двумерного электрофореза для идентификации химически модифицированных протеоформ (рис.). Такие интеграционные подходы могут быть полезны для решения задач С-НРР.



Протеомные подходы для глубокого протеомного поиска: а – комбинация RP-LC-MS/MS и RP-LC-SRM SIS с двумерным щелочным фракционированием; б – основанный на атомно-силовой микроскопии подход для поиска белков



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

- 88 Комбинация низких доз D-глюкозамина и 2-дезоксид-глюкозы, усиливающая цитотоксический эффект в опухолевых клетках человека в культуре
- 89 Жизнеспособность микробного сообщества дерново-подзолистой почвы при γ -облучении дозами 148–1 250 кГр
- 90 Исследование токсичности фуллеренолов C_{60} , C_{70} и $C_{120}O$, полученных оригинальным способом, *in vitro* и *in vivo*
- 91 Разработка высокотемпературного метода выделения радионуклидов α -эмиттеров из мишени карбида тория

Комбинация низких доз D-глюкозамина и 2-дезоксид-глюкозы, усиливающая цитотоксический эффект в опухолевых клетках человека в культуре

Н. Я. Гильяно, Л. А. Носкин, Е. В. Журишкина, С. И. Степанов, Ф. М. Ибатуллин
Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Химиотерапия опухолей традиционно направлена на ингибирование пролиферации опухолевых клеток. Снижение пролиферативной активности сопровождается блокированием прогрессии клеток по циклу и последующей гибелью клетки. Ранее нами была показана селективная эффективность 2-дезоксид-глюкозы (2DG) (концентрация 20–40–80 мМ) в блокировании опухолевых клеток в G_2/M -фазах клеточного цикла и в индукции апоптотической гибели клеток. Была также показана зависимость эффективности обработки клеток 2DG от уровня глюкозы в питательной среде. В данной работе на клетках карциномы (линия HeLa 63) и эндотелиоцитах (линия ECV304) человека проведено сравнительное исследование эффектов низких концентраций (1,5–10 мМ) двух аналогов глюкозы: 2DG и D-глюкозамина.

Оценка эффективности действия этих агентов проводилась по таким параметрам, как: 1) снижение жизнеспособности по МТТ-тесту; 2) изменение проницаемости клеточных мембран (флуоресцентный зонд); 3) изменение прогрессии по клеточному циклу (распределение клеток по фазам клеточного цикла); 4) включение апоптотической гибели клеток, оцененной по появлению sub- G_1 -популяции и морфологически при микроскопировании препаратов и культивировании клеток в питательной среде с различным содержанием глюкозы.

Показано, что 48-часовая обработка клеток 2DG в этих концентрациях приводит к снижению доли клеток в G_1 - и S-фазах и блокированию их в фазах G_2/M . D-глюкозамин, в отличие от 2DG,

при тех же концентрациях блокировал клетки в G_1/S -фазах клеточного цикла. При сочетанном воздействии 2DG и D-глюкозамина регистрировали существенное увеличение апоптотически гибнущих клеток (sub- G_1 -популяция) по сравнению с отдельным воздействием. Так, сочетанная обработка 5 мМ 2DG + 5 мМ D-глюкозамина значительно превышала цитотоксичность отдельной обработки 10 мМ 2DG или 10 мМ D-глюкозамина. Более эффективны были 10 мМ 2DG + 10 мМ D-глюкозамина, чем 20 мМ 2DG или 20 мМ D-глюкозамина отдельно. Эффективность обработки увеличивалась при снижении концентрации глюкозы в питательной среде и/или с увеличением дозы агентов. Эндотелиоциты были менее чувствительны как к действию D-глюкозамина, так и 2DG, и сочетанное воздействие этих двух агентов, даже при концентрациях 10 мМ, не отличалось от отдельного воздействия. Следует отметить, что обработка клеток 10 мМ 2DG и D-глюкозамином также существенно увеличивала проницаемость клеточных мембран, что может быть дополнительным фактором, усиливающим цитотоксичность этих агентов.

Таким образом, два ингибитора гексокиназы в низких концентрациях индуцируют различные чек-пойнты в клетках, что приводит к увеличению цитотоксического эффекта при сочетанной обработке опухолевых клеток. Очевидно, что антиканцерогенную эффективность ингибиторов гликолиза можно повысить, используя сочетанное воздействие двух ингибиторов, что позволит уменьшить дозы препаратов, сохранить селективность и избежать возможных побочных эффектов.

Жизнеспособность микробного сообщества дерново-подзолистой почвы при γ -облучении дозами 148–1 250 кГр

С. А. Булат

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

Ионизирующая радиация рассматривается как основной фактор, ограничивающий сохранение возможных микроорганизмов и биомаркеров в ледовых космических телах, а также межпланетный перенос (панспермию) живых клеток. Определение пределов радиоустойчивости земной жизни проблематично, но необходимо для оценки вероятности существования жизни вне Земли с точки зрения планируемых космических миссий и разработки методов обнаружения жизни. Жизнеспособность природных почвенных микробных сообществ при воздействии ионизирующей радиации изучена недостаточно.

Согласно предыдущим исследованиям, почва должна быть простерилизована γ -радиацией, в зависимости от условий облучения, дозами 15–100 кГр. Нами проведено γ -облучение обычной дерново-подзолистой почвы (Московский район, Россия) в ранге доз 148–1 250 кГр (рис.) для ус-

тановления радиорезистентности микробных сообществ с использованием методов культивирования, эпифлуоресцентной микроскопии (ЭФМ), мультисубстратного тестирования и газовой хроматографии – масс-спектрометрии липидов. Почвенные микробные сообщества показали высокую устойчивость к γ -радиации (табл.). Бактериальные культуры были получены после экспозиции дозой 148 кГр. После экспозиции дозой 320 кГр культуры не были получены, но наблюдалось много прокариотических клеток ($\sim 3 \cdot 10^6$ клеток/г) без видимых следов повреждения ДНК методом ЭФМ, что свидетельствует о переходе клеток в живое, но некультивируемое состояние.

Таким образом, полученные результаты указывают, что радиорезистентность микробных сообществ (и микроорганизмов в целом) в природных местообитаниях существенно недооценена.



Гамма-установка «Исследователь» – источник излучения ^{60}Co

Таблица. Клеточные концентрации в облученных образцах

Доза, кГр	Интенсивность облучения, кГр/ч	Количество культивируемых бактерий*, КОЕ/г	Общее число прокариот*, клеток/г
0 (контроль)	0	$4,7 \cdot 10^7 \pm 2 \cdot 10^7$	$5,7 \cdot 10^8 \pm 0,7 \cdot 10^8$
148	3,44	$1,4 \cdot 10^{7/8} \pm 0,8 \cdot 10^{7/8}$	$6,1 \cdot 10^7 \pm 1,5 \cdot 10^7$
320	3,44	н/в**	$2,9 \cdot 10^6 \pm 1,6 \cdot 10^6$
320	7,44	н/в	$3,1 \cdot 10^6 \pm 1,5 \cdot 10^6$
430	3,44	н/в	н/в
430	10,0	н/в	н/в
692	7,44	н/в	н/в
930	7,44	н/в	н/в
930	10,0	н/в	н/в
1 250	10,0	н/в	н/в

* Ошибка выражения как стандартное отклонение, $p < 0,05$.

** н/в – не выявлено.

Исследование токсичности фуллеренолов C_{60} , C_{70} и $C_{120}O$, полученных оригинальным способом, *in vitro* и *in vivo*

О. И. Большакова, А. А. Борисенкова, М. В. Суясова, В. П. Седов, А. Д. Слободина, С. И. Тимошенко, Е. Ю. Варфоломеева, И. М. Голомидов, В. Т. Лебедев, С. В. Саранцева – Отделение молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, В. Л. Аксенов – Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований

Использование наночастиц, в т. ч. фуллеренов и их производных, в медицине может иметь революционное значение, но имеющиеся в литературе данные об их цитотоксических эффектах очень противоречивы. Токсичность фуллеренов тесно связана с их окислительным действием, зависит от свойств самих частиц, величины их кластеров и стабильности в растворе. Она может появляться в процессе их модификации в растворимые формы, зависеть от способа приготовления, в частности от используемого растворителя. Нет в настоящее время и четкого представления о безопасных концентрациях фуллеренов.

Цель работы – анализ токсичности высоководорастворимых фуллеренолов (фуллеренолов), полученных новым двухстадийным методом, в котором в качестве гидроксилующего агента был использован водный раствор перекиси водорода – H_2O_2 . Полученные фуллеренолы были охарактеризованы различными методами, определен размер агрегатов, показано, что $C_{60}(OH)_{30}$ сильнее агрегирует в водных растворах, чем $C_{70}(OH)_{30}$. С помощью антител к фуллерену C_{60} и сканирующего конфокального микроскопа продемонстрирована интернализация исследуемых фуллеренолов в клетки V79. $C_{60}(OH)_{30}$ был обнаружен в ядре и цитоплазме, $C_{70}(OH)_{30}$ и $C_{120}O$ – преимущественно в цитоплазме. Токсичность $C_{60}(OH)_{30}$ и $C_{70}(OH)_{30}$ анализировали в диапазоне концентраций 0,1–1 мг/мл, используя МТТ-тест, и показали, что доля жизнеспособных клеток (%) при добавлении к ним фуллеренолов не отличалась от контроля. $C_{120}(OH)_n$ в максимальной концентрации (0,1 мг/мл) оказался токсичным: приводил к нарушению морфологии клеток, прекращению их роста и гибели. Причем

этот препарат был более токсичен для клеток HeLa (опухолевых клеток), чем для V79 (нормальных клеток).

Методом проточной цитометрии проанализировано влияние фуллеренолов на апоптотическую гибель клеток и клеточный цикл и показано, что даже высокие концентрации, такие как 1 мг/мл для $C_{60}(OH)_{30}$ и $C_{70}(OH)_{30}$ и 0,5 мг/мл $C_{120}(OH)_n$, не вызвали достоверного увеличения уровня апоптоза в клетках по сравнению с контролем и не повлияли на клеточный цикл. Применение технологии xCELLigence позволило показать, что большие дозы фуллеренолов могут нарушать клеточную адгезию, но это происходит только в случае, когда препарат добавляют в клетки до того, как последние прикрепятся к поверхности флакона и начали расти. Эффект зависел от препарата, его концентрации, типа клеток, времени инкубации с препаратом. Согласно полученным этим методом данным, $C_{120}(OH)_n$ в концентрации 0,5 мг/мл был токсичен для клеток HeLa, что подтвердили визуальные наблюдения, а также данные, полученные с помощью МТТ-теста.

Токсичность фуллеренолов *in vivo* была проверена на *Drosophila melanogaster* линии Canton S. Анализ показал, что исследуемые препараты, ежедневно и в больших концентрациях поступающие в организм животных с пищей, не снижали продолжительность их жизни и не изменяли форму кривой выживаемости. Также они не влияли на геотаксис мух – одну из важнейших поведенческих характеристик насекомых.

Таким образом, исследование подтвердило тезис о том, что метод получения фуллеренолов играет ключевую роль в их токсичности.

Разработка высокотемпературного метода выделения радионуклидов α -эмиттеров из мишени карбида тория

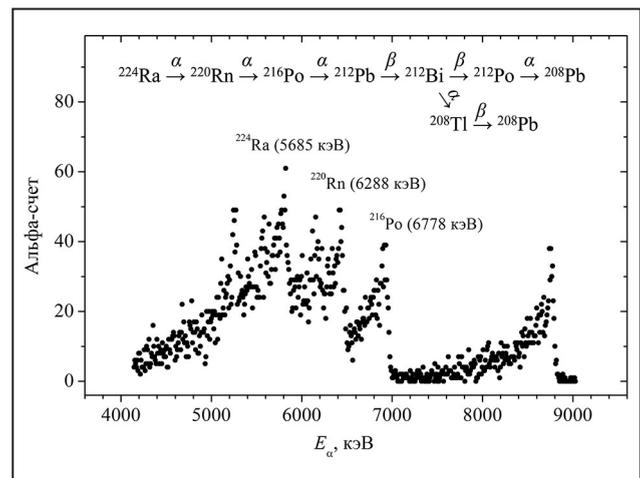
В. Н. Пантелеев, А. Е. Барзах, [Л. Х. Батист], Ю. М. Волков, В. С. Иванов, С. Ю. Орлов, Д. В. Федоров, П. Л. Молканов, М. Д. Селиверстов
Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Радионуклиды α -эмиттеры являются хорошим инструментом для лечения различных злокачественных образований на раннем этапе их развития. Среди используемых радионуклидов можно выделить изотопы ^{223}Ra , ^{224}Ra , ^{225}Ac . Указанные изотопы предполагается получать при облучении мишени из карбида тория (ThC) высокой плотности на радиоизотопном комплексе РИЦ-80. Эксперименты по получению и выделению радионуклида ^{224}Ra проводились на пучке синхроциклотрона СЦ-1000. Альфа-спектр ^{224}Ra , высаженного на охлаждаемый коллектор, показан на рисунке.

Разработанный высокотемпературный метод выделения обеспечивает следующие преимущества по сравнению с используемыми в настоящее время радиохимическими методами: 1) высокую изотопическую чистоту ^{224}Ra ; 2) отсутствие жидких радиоактивных отходов; 3) многократное использование одной и той же мишени.

В настоящих исследованиях определены температурные параметры, при которых данное мишенное вещество будет использовано для селективного выделения ^{224}Ra масс-сепараторным методом. Получены следующие результаты: при рабочей температуре мишенного вещества

1550–1700 °С атомы радия выделяются из мишенного вещества с эффективностью около 80 % за время нагрева, равное 1 ч. Рабочий вакуум в вакуумной камере в процессе выделения составляет величину более 10^{-5} мбар, что гарантирует высокоэффективное функционирование мишенно-ионного устройства масс-сепаратора.



Альфа-спектр распада нуклида ^{224}Ra с α -линиями его дочерних изотопов, измеренный на охлаждаемом коллекторе при температуре мишенного вещества 1500 °С



Физика ядерных реакторов и ускорителей

- 94 Разработка программного обеспечения для сопровождения эксплуатации реактора ПИК
- 95 Проектирование и изготовление навесок с образцами-свидетелями и нейтронно-активационными индикаторами для эксплуатационного комплекта ТВС реактора ПИК
- 96 Автоматизированная система пробоотбора и анализа тяжелой воды (АСПА ТВ) реактора ПИК
- 98 Мембраны на каналах и радиационная защита установок в зале горизонтальных экспериментальных каналов
- 99 Уменьшение потерь в системе медленного вывода пучка протонов 400 ГэВ/с из ускорителя SPS в ЦЕРН путем каналирования части пучка изогнутым кристаллом

Разработка программного обеспечения для сопровождения эксплуатации реактора ПИК

А. С. Захаров, М. С. Онегин

*Отдел физики и техники реакторов, Отделение теоретической физики
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ*

В 2019 г. продолжалась работа над адаптацией кода SERPENT для сопровождения работы реактора ПИК. В препринте «Расчет кампании реактора ПИК с использованием кода SERPENT-2 на этапе энергетического пуска» анализируется процесс догрузки тепловыделяющих сборок (ТВС), выход и работа на мощности 100 МВт с использованием выгоревших ТВС пускового комплекта. Был разработан специальный теплогидравлический модуль, который позволяет на основе нейтронно-физических расчетов по программе SERPENT-2 рассчитывать температуру топлива и теплоносителя и синхронно изменять их в процессе реакторной кампании. Расчет температурных эффектов реактивности учитывает пространственные эффекты, связанные с изменением распределения нейтронных потоков в ходе извлечения рабочих органов системы управления и защиты (РО СУЗ), и пространственную зависимость локальных плотностных (пустотных) коэффициентов реактивности по объему активной зоны.

Кроме расчета длительности кампании реактора и положения РО СУЗ в процессе кампании реактора, разработанная модель позволяет вычислить коэффициент запаса мощности до кри-

зиса теплоотдачи с учетом выгорания топлива и перемещения РО СУЗ. Расчет выполняется по рекомендованным эмпирическим формулам в отчете по обоснованию безопасности исследовательского реактора ПИК и учитывает опыт эксплуатации высокопоточного реактора СМ, а также конструкционные различия в компоновке активных зон.

Согласно классификации программных средств (ПС) нейтронно-физического расчета, по назначению разрабатываемая на основе кода SERPENT-2 модель с дополнительными модулями может быть отнесена к ПС – имитаторам активной зоны и позволяет обеспечивать расчетное сопровождение эксплуатации реактора при формировании рабочих загрузок активной зоны. В то же время в разработанной модели сохраняются все возможности основанной на методе Монте-Карло программы для прецизионного расчета реактора с детальным описанием геометрии и состава активной зоны и отражателя.

Полная верификация разрабатываемого расчетного комплекса может быть выполнена в ходе экспериментов, запланированных в программе энергетического пуска реактора.

Проектирование и изготовление навесок с образцами-свидетелями и нейтронно-активационными индикаторами для эксплуатационного комплекта ТВС реактора ПИК

С. Р. Фридман

Отдел физики и техники реакторов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Осуществление контроля за состоянием металла конструктивных узлов реактора ПИК в течение всего срока службы является одним из условий обеспечения надежной и безопасной эксплуатации реактора в целом.

В соответствии с НП-089-15 «Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» на основании типовой программы «Исследования образцов-свидетелей реактора ПИК в процессе эксплуатации» № 240.2180 совместно с главным конструктором реактора ПИК АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежаля» и Центральным научно-исследовательским институтом конструкционных материалов «Прометей» им. И. В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт» изготовлены образцы-свидетели (ОС) (рис. 1) и навески (рис. 2) из стали 08Х18Н10Т и сплава Э-125 для обоснования ресурса корпуса реактора ПИК и центрального экспериментального канала.

При помощи ОС контролируются изменение механических свойств при кратковременном растяжении, характеристики сопротивления хрупкому разрушению, структурное состояние металла, наводороживание Zr и размеры образцов. Основной целью работ является подтверждение принятых при обосновании назначенного срока службы реакторной установки значений и кинетических зависимостей изменения механических свойств металла под воздействием эксплуатационных факторов (температурного воздействия, нейтронного облучения, теплоносителя).

Совместно со специалистами НИЦ «Курчатовский институт» изготовлены нейтронно-активационные индикаторы, предназначенные для определения флюенса быстрых нейтронов, воздействующих на ОС в течение времени их пребывания в реакторе при его эксплуатации.

Образцы и индикаторы размещены в навесках и готовы к загрузке в реактор ПИК в составе эксплуатационного комплекта тепловыделяющих сборок.



Рис. 1. Внешний вид: образцов-свидетелей для испытаний на вязкость разрушения (а, б) и на кратковременные механические характеристики (в); нейтронно-активационных индикаторов (г). Образец (а) выполнен из стали 08Х18Н10Т; образцы (б, в) – из сплава Э-125



Рис. 2. Внешний вид навесок с образцами-свидетелями

Автоматизированная система пробоотбора и анализа тяжелой воды (АСПА ТВ) реактора ПИК

Т. В. Воронина, А. А. Каверзина

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

В состав реакторной установки (РУ) ПИК входят два тяжеловодных контура: тяжеловодного отражателя (ТВО) и жидкостного регулирования. При эксплуатации тяжеловодных РУ значительная часть (до 40 %) дозовой нагрузки на персонал обусловлена тритием. Работы с тяжелой водой, включая водно-химический контроль, являются радиационно опасными. Кроме того, D_2O – это специальный неядерный материал, который нельзя сливать в спецканализацию, а необходимо возвращать после измерений обратно в контур ТВО.

Основными недостатками лабораторного контроля тяжелой воды посредством ручного отбора проб в помещении химпробоотбора реактора ПИК являются:

- отбор, транспортирование до лаборатории и выполнение анализа тритиевой тяжелой воды (активностью до 2 Ки/кг) персоналом лаборатории, что может привести к дополнительной дозовой нагрузке на персонал и загрязнению оборудования лаборатории;
- образование значительного количества тритиевых жидких радиоактивных отходов.

Перечисленные недостатки могут быть устранены за счет непрерывного дистанционного мониторинга тяжеловодного теплоносителя ТВО. В связи с этим актуальной задачей на реакторе ПИК стала организация автоматизированной системы контроля тяжелой воды. На сегодняшний день отечественного аналога такой системы нет.

В результате многолетней работы специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ была создана автоматизированная система пробоотбора и анализа тяжелой воды – АСПА ТВ (рис.). Для контроля химической чистоты тяжелой воды в системе АСПА ТВ использовали отечественные

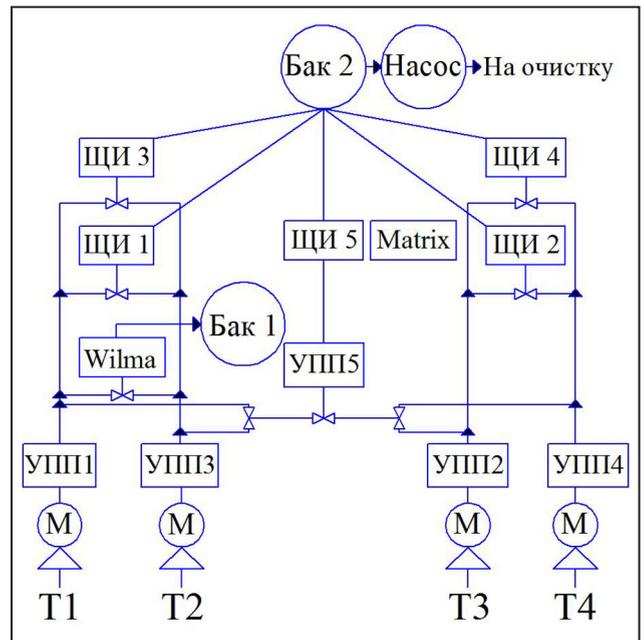


Схема АСПА ТВ: ЩИ – щиты измерения; УПП – устройства пробоподготовки; Т 1-4 – точки отбора проб тяжелой воды; М – мутномеры

проточные анализаторы, которые эксплуатируются на объектах атомной энергетики: производства ООО «Взор» – для контроля удельной электропроводимости, рН, концентрации растворенного кислорода и водорода; производства ООО «ЭЛП» – для измерения содержания хлоридов-ионов; производства ООО «НПП «Аквастандарт» – для контроля мутности. С целью онлайн-мониторинга изотопного состава были адаптированы: для контроля дейтерия – NIR-фурье-спектрометр Matrix-F, для контроля трития – проточный радиометр Wilma.

Лабораторный анализ концентрации дейтерия в тяжелой воде был разработан на MIR-спектрометре (средний ИК-диапазон), где нахо-

дятся самые чувствительные валентные и деформационные колебания воды. Для проточного анализатора такой подход имел свои недостатки: требуются тонкие кюветы (толщиной менее 1 мм); для изготовления оптических окон необходим дорогостоящий сапфир; нужна регистрация фона перед каждым измерением, что крайне затруднительно при онлайн-измерениях. Поэтому было решено использовать NIR-фурье-спектрометр (дальний ИК-диапазон). В этом случае толщина проточной кюветы может быть увеличена до 5 мм, прибор имеет выносное кюветное отделение, которое может быть установлено в трубопровод контура. В лаборатории производственного химического контроля на лабораторном приборе была показана возможность применения NIR-фурье-спектроскопии для точного и воспроизводимого анализа D_2O и предложена комплектация системы для онлайн-измерения содержания дейтерия в тяжелой воде на основе промышленного спектрометра Matrix-F. В настоящее время в лабораторных условиях создан макет проточного анализатора тяжелой воды и отработана методика его градуировки перед установкой в контур реактора ПИК.

Для создания проточного анализатора содержания трития был использован сцинтилляцион-

ный радиометр. Использование жидкого сцинтиллятора имело очевидный недостаток – образование невозвратных отходов тяжелой воды. Поэтому для реактора ПИК производителями проточного радиометра Wilma прибор был укомплектован проточными кюветами с твердым сцинтиллятором (мелкодисперсным порошком CaF_2). Сотрудниками лаборатории отработан алгоритм измерения проб на проточных кюветах с твердым сцинтиллятором, который заложен в программное обеспечение радиометра; установлена эффективность регистрации Wilma по тритию, которая для кювет с твердым сцинтиллятором составила не менее 9 %, для кювет с жидким сцинтиллятором – не менее 14 %.

АСПА ТВ позволит:

- непрерывно и автоматизированно контролировать изотопный и химический составы тяжелой воды, возвращая тяжелую воду после измерений обратно в контур ТВО;
- снизить дозовую нагрузку на персонал лаборатории;
- сигнализировать о выходе параметров ТВО за пределы нормальной эксплуатации и тем самым повысить оперативность химического контроля тяжелой воды.

1. Voronina T.V. et al. // Progr. Cryogen. Isotop. Separat. 2018. V. 21. Iss. 2. P. 5–14.

2. Voronina T.V. et al. // Progr. Cryogen. Isotop. Separat. 2019. V. 22. Iss. 1. P. 29–36.

Мембраны на каналах и радиационная защита установок в зале горизонтальных экспериментальных каналов

К. А. Коноплев

Отдел физики и техники реакторов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Внутренний объем горизонтальных каналов – более 360 л. По проекту этот объем заполнен воздухом, в котором максимально возможная скорость образования ^{41}Ar равна $2,4 \cdot 10^{12}$ Бк/ч.

Для предотвращения выхода аргона в зал утечка воздуха из каналов отсасывается вентиляцией, которая эффективно забирает вытекающий из канала воздух при закрытомшибере, но может не обеспечить протечку в зал при открытомшибере (рис.).

В проекте предусмотрена установка мембран, но нет смысла требовать полной герметичности – достаточно сократить утечку до приемлемого уровня с учетом вентиляции.

Зал горизонтальных экспериментальных каналов герметизирован и имеет отдельную вентиляцию. Он служит контейнментом для управления последствиями аварии, связанной с разрушением экспериментальных каналов, а также для управления последствиями запроектной аварии с разрывом корпуса реактора и бака-отражателя.

В зале постоянных рабочих мест нет. Наладка, монтаж и обслуживание установок на пуч-

ках производятся при остановленном реакторе. Управление осуществляется дистанционно из лабораторных помещений.

Вход в зал при работе реактора на мощности производится по наряду-допуску. Радиационная защита в зале для определения времени пребывания должна соответствовать требованиям «Основных санитарных правил обеспечения радиационной безопасности 99/2010», где доза излучения H мкЗв/ч на поверхности защиты определяется по формуле

$$H = \frac{1000 \cdot D}{kT},$$

где D – предел годовой дозы для персонала, мЗв/год; T – время работы, ч/год; k – коэффициент запаса.

При мощности реактора 100 МВт следует ограничить время пребывания в зале для отдельного человека до 85 ч/год при допустимой дозе на поверхности радиационной защиты установок 120 мкЗв/ч в зале и при соблюдении мощности дозы за его стенами не выше 6 мкЗв/ч.

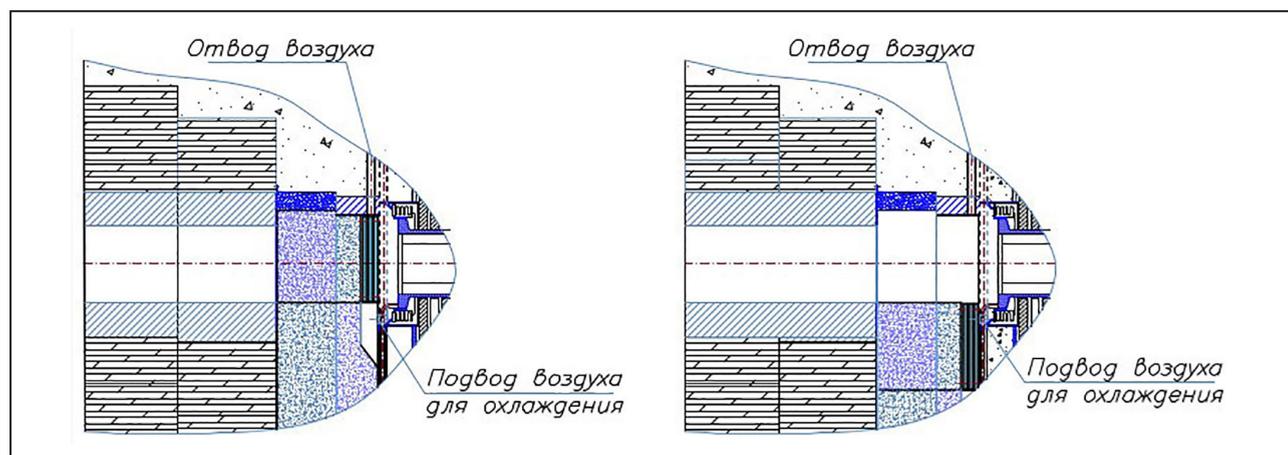


Схема вентиляции в зале горизонтальных экспериментальных каналов

Уменьшение потерь в системе медленного вывода пучка протонов 400 ГэВ/с из ускорителя SPS в ЦЕРН путем каналирования части пучка изогнутым кристаллом

Ю. М. Иванов, Ю. А. Гавриков, Б. Л. Горшков, А. С. Денисов, М. А. Кознов, Л. Г. Маляренко
 Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Совместно с сотрудниками Института физики высоких энергий им. А. А. Логунова НИЦ «Курчатовский институт» и Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН) подготовлен и выполнен эксперимент по применению изогнутого кристалла для снижения потерь на электродах электростатического септума при выводе пучка из ускорителя SPS. Актуальность работы связана с повышением интенсивности выведенного пучка для проекта SHiP по поиску темной материи.

Предложенное решение проблемы заключается в отклонении узкой области пучка изогнутым кристаллом и создании таким образом тени в области проволочных электродов септума (рис. 1).

Для проведения эксперимента были разработаны кристаллические deflectоры с оптимальными характеристиками изогнутых кремниевых кристаллов: длина вдоль пучка – 2,0 мм; ширина поперек пучка – 0,8 мм; угол изгиба атомных (110) плоскостей – 175 мкрад (см. рис. 1).

Анализ экспериментальных данных проводочного профилометра, расположенного между кристаллом и септумом, показал, что в режиме каналирования пучка изогнутым кристаллом образуется тень (рис. 2), существенно снижающая потери. Результаты работы представлены на Международной конференции по ускорителям частиц IPAC2019.

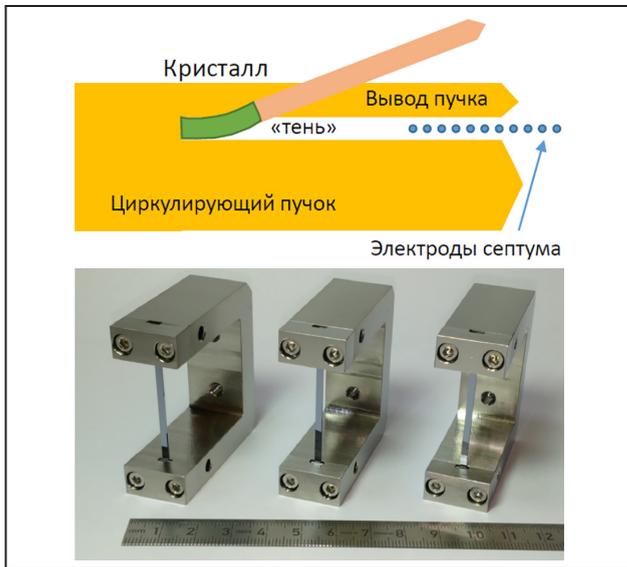


Рис. 1. Схема эксперимента по снижению потерь пучка на электродах электростатического септума ускорителя SPS путем каналирования части пучка изогнутым кристаллом (слева); кристаллы с антикластическим изгибом, подготовленные в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ для эксперимента (справа)

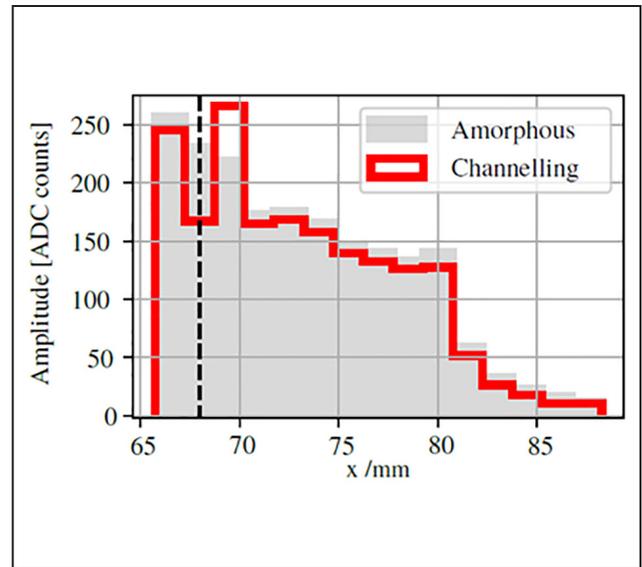
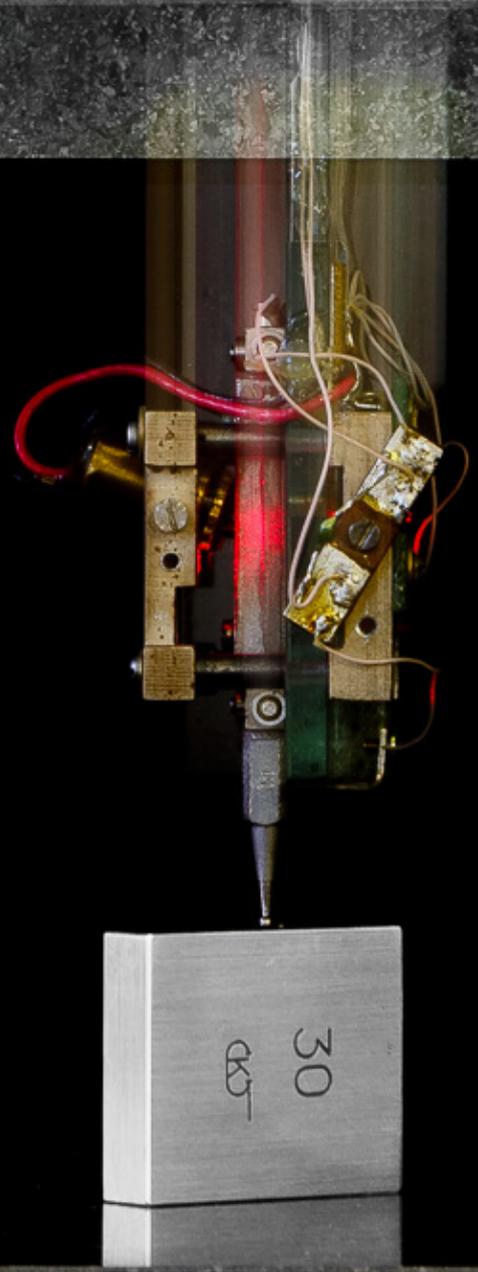
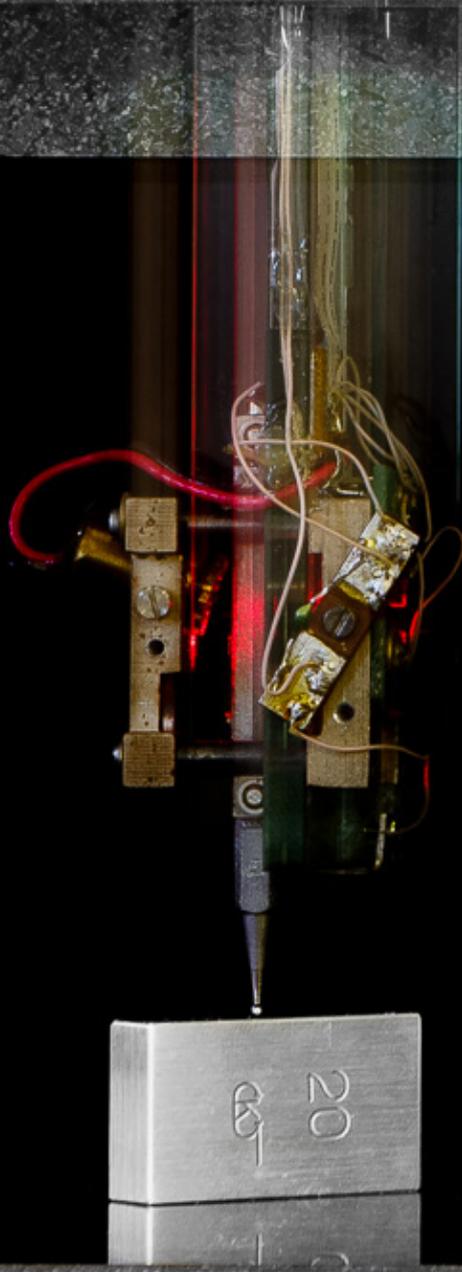


Рис. 2. Изменение профиля пучка при установке кристалла в положение каналирования (красный график). Провал, отмеченный пунктирной линией, соответствует тени кристалла

1. Esposito L.S., ..., Gavrikov Yu.A., ..., Denisov A.S., Ivanov Yu.M., Koznov M.A., Malyarenko L.G. et al. // Proc. 10th Int. Part. Accel. Conf. 2019. doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-WEPMPO28.
2. Velotti F.M., ..., Denisov A.S., Gavrikov Yu.A., Ivanov Yu.M., Koznov M.A., Malyarenko L.G. et al. // Proc. 10th Int. Part. Accel. Conf. 2019. doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-THXXPLM2.



Прикладные исследования и разработки

- 102** Разработка проекта масс-сепараторного лазерно-ядерного комплекса ИРИНА
- 103** Комплекс протонной терапии на СЦ-1000. Текущее состояние и приведение к современным стандартам высокотехнологичной медицинской помощи
- 105** Множественные сбои в изделиях электроники под действием нуклонов
- 106** Отечественные голографические наноизмерительные системы линейных и угловых перемещений
- 107** Программный комплекс Shifter Assistant

Разработка проекта масс-сепараторного лазерно-ядерного комплекса ИРИНА

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

Создание масс-сепараторного лазерно-ядерного комплекса ИРИНА (Исследование Радиоактивных Изотопов на Нейтронах) производится в рамках реализации проекта «Создание приборной базы реакторного комплекса ПИК». На рисунке показана часть комплекса, включающая масс-сепаратор, ионные тракты, детектирующие системы и установку ПИТРАП (PITRAP – Petersburg Institute TRAP) – систему ловушек Пеннинга для прецизионного измерения масс удаленных ядер.

Комплекс ИРИНА на канале реактора ПИК позволит проводить уникальные эксперименты по исследованию свойств крайне удаленных от полосы β -стабильности экзотических ядер, получать и использовать радиоактивные изотопы для исследований по физике твердого тела и разрабатывать новые методы получения изотопов высокой чистоты для медицины. Данная установка будет обеспечивать самые высокие в мире выходы нейтроноизбыточных ядер. Комплекс ИРИНА представляет собой совокупность высокотехнологичного оборудования, размещенного в канале и экспериментальном зале реактора ПИК.

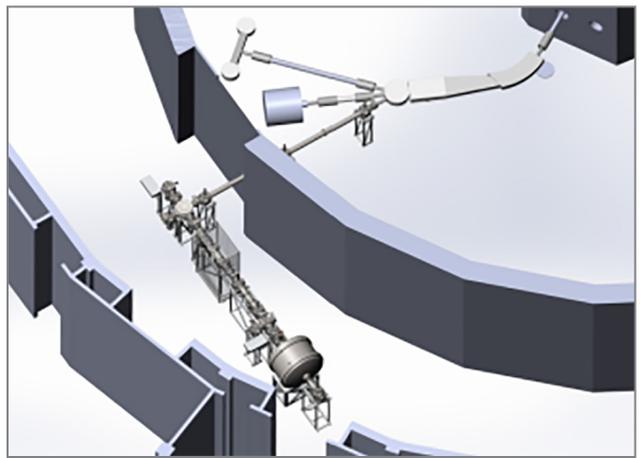


Схема комплекса ИРИНА

В настоящее время подготовлены и согласованы с потенциальными изготовителями технические задания на все основные узлы установки: внутриканальную ионооптическую систему масс-сепаратора, масс-сепаратор с ионными трактами, систему ловушек Пеннинга для прецизионного измерения масс нейтроноизбыточных ядер, лазерную установку и горячую камеру специальной конструкции.

Комплекс протонной терапии на СЦ-1000. Текущее состояние и приведение к современным стандартам высокотехнологичной медицинской помощи

Д. С. Брожик, О. М. Жидкова, Е. М. Иванов, Д. Л. Карлин, Н. А. Кузора,
В. И. Максимов, Н. И. Мамедова, Ф. А. Пак, А. И. Халиков
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В Ленинградском институте ядерной физики им. Б. П. Константинова (сейчас НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ) совместно с Центральным научным исследовательским рентгено-радиологическим институтом (сейчас РНЦРХТ) с 1973 г. велись работы по исследованию возможности применения генерируемого синхротроном СЦ-1000 пучка протонов в медицинских целях. Был разработан и внедрен метод облучения «напролет», особенность которого заключается в применении горизонтального мононаправленного пучка с энергией протонов 1 000 МэВ в сочетании с подвижной техникой двухосевого маятникового облучения на установке для протонной стереотаксической терапии (УПСТ). Разработанный метод оказался эффективен для лечения аденом гипофиза, мальформаций сосудов головного мозга и при паллиативном облучении аденогипофиза при гормонозависимых формах рака. С апреля 1975 г. по май 2013 г. было проведено 1 394 сеанса протонного облучения. В связи с введением более жестких, в т. ч. и международных, технических требований к аппаратуре для лучевой терапии в настоящее время проводится модернизация комплекса протонной терапии для дальнейшего возобновления лечения пациентов. Далее описаны ключевые этапы проводимой модернизации и достигнутые результаты по каждому этапу.

Замена рентгеновского центратора (РЦ). РЦ предназначен для наведения изоцентра мишени на ось протонного пучка. Была проведена замена основных элементов РЦ на новую технику, соответствующую современным требованиям проведения рентгенологических исследований. В частности, был установлен плоскочувствительный цифровой детектор рентгеновского

излучения (рис. 1). К основным преимуществам нового оборудования относятся: высокое пространственное разрешение, большой динамический диапазон, высокая стойкость к прямому рентгеновскому излучению, отсутствие пространственных искажений и чувствительности к магнитным полям, дистанционное управление, уменьшение радиационной нагрузки на персонал и пациентов, возможность дополнительной компьютерной обработки изображений, сохранение результатов исследований в системе. Также было организовано автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора для управления режимами работы РЦ и АРМ врача для работы с результатами исследований.



Рис. 1. Рентгеновский центратор

Создание автоматизированной системы управления (АСУ). При реализации планов облучения для управления лечебной установкой и одновременного контроля параметров протонного пучка создано специализированное программное обеспечение, предоставляющее дополнительные возможности оперативного реагирова-

ния на любые изменения параметров облучения и способствующее стандартизации протоколов лечения. АСУ позволяет точно позиционировать исполнительные механизмы УПСТ. Оператор может наблюдать за заданными параметрами во время процесса облучения: количеством проходов стола и прибора – фиксатора головы и текущим положением угла отклонения; параметрами пучка; данными, полученными с мониторинговых камер (данное нововведение позволило уйти от частотомеров и проводить работы на одной рабочей станции). Все характеристики пучка контролируются программой в автоматическом режиме для обеспечения безопасности пациента.

Разработка системы планирования протонной терапии и системы верификации планов облучения. Поскольку представляемый метод облучения отличается от общепринятой протонной терапии с использованием пика Брэгга, требуется разработать собственную уникальную систему планирования (СП). СП будет предназначена для расчета дозовых распределений внутри области интереса, помещения планируемой мишени в пределах заданной изодозы и подбора оптимального плана облучения. Главными критериями выбора оптимального плана облучения являются охват 95 % облучаемого объема 90%-ной изодозой и минимизация побочных эффектов в здоровых тканях и критических структурах. Главными особенностями разрабатываемой СП будут являться: реконструкция трехмерной модели тела по исходному набору топометрических данных, оконтуривание объемов мишеней и органов риска, трехмерное дозовое распределение, рассчитанное с помощью компьютерного моделирования с наложением на анатомические изображения.

Верификация планов облучения является одной из важнейших процедур гарантии качества лучевой терапии. Основные цели, которые преследуются при проведении верификации: выяв-

ление и минимизация погрешностей при расчете дозового распределения, минимизация погрешностей во время использования ускорителя, определение пределов возможностей модели и алгоритма расчета дозового распределения. При верификации проводится γ -анализ, который заключается в сравнительном анализе теоретических и экспериментальных распределений поглощенной дозы. В результате сравнения определяется γ -индекс. План облучения проходит проверку, когда 95 % точек имеют $\gamma \geq 1$.

Разработка УПСТ нового поколения. В настоящее время, ввиду конструктивных особенностей УПСТ, возможно проводить облучение исключительно внутричерепных мишеней. Поэтому совместно с АО «Равенство» был разработан дизайн-проект роботизированного терапевтического стола (рис. 2), с помощью которого возможно будет расширить нозологическое применение метода протонной терапии «напролет». Конструкторскими особенностями терапевтического стола являются: наличие 8 степеней свободы, возможность крепления средств для иммобилизации пациента, наличие в подголовнике системы рентгеноконтрастных меток для создания единой системы навигации.



Рис. 2. Дизайн-проект роботизированного терапевтического стола

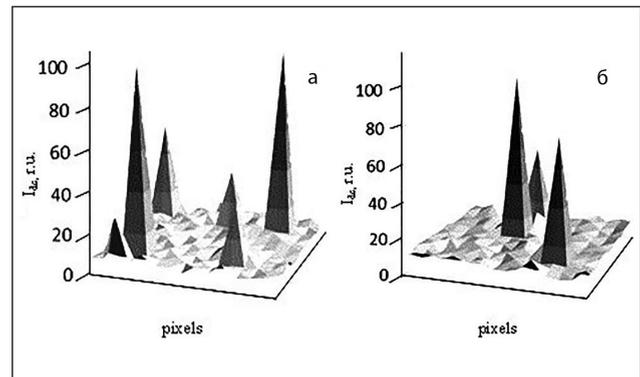
Множественные сбои в изделиях электроники под действием нуклонов

К. Н. Ермаков, Н. А. Иванов, О. В. Лобанов, В. В. Пашук –
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
М. О. Прыгунов – ООО «Радиоавтоматика»,
К. Г. Сизова – ООО «НПЦ «Гранат»

Выполнен цикл исследований эффекта повреждения изделий микроэлектроники под действием отдельных быстрых протонов и нейтронов. Данный эффект является наиболее существенным фактором, определяющим нормальную работу космической и авиационной электронной аппаратуры. В последние годы основное внимание было уделено исследованию множественных сбоев (МС) в интегральных схемах (ИС) памяти и кластеров спайков в оптоэлектронных изделиях.

ПЗС- и КМОП-матрицы были облучены на синхротронном ускорителе СЦ-1000 протонами с энергией 1000 МэВ и нейтронами на установке ГНЕЙС. Применение матриц для исследования МС обусловлено тем, что они имеют простую топологию расположения пикселей, что позволяет получать данные о количестве и пространственном распределении повреждений. В качестве примера на рисунке приведены типичные рельефы кластеров спайков после облучения КМОП-матрицы протонами и нейтронами.

ИС памяти типа SRAM с технологической нормой 90 нм облучены протонами с энергией 1000 МэВ. Установлено, что существуют группы сбоев с малой разницей во времени регистрации и в адресе байтов. Число таких последовательных сбоев в группе может достигать 10. Разработанный метод статистического анализа распределения интервалов времени между двумя последовательными сбоями показал, что значительная часть сбоев не является случайными независимыми событиями и входит в состав МС.



Кластеры спайков в КМОП-матрице, облученной протонами (а) и нейтронами (б)

Проведенные исследования показали, что – под действием быстрых протонов и нейтронов в ПЗС- и КМОП-матрицах образуются кластеры (аналог МС), включающие до 14 соседних спайков, а под действием быстрых протонов в изделиях памяти SRAM возникают МС, включающие до 10 байтов;

– образование кластеров в матрицах и МС в ИС памяти происходят под действием продуктов ядерных реакций нуклонов с конструкционными материалами изделий;

– в исследованных матрицах и изделиях памяти SRAM значительная часть повреждений (до 50 %) входит в состав кластеров и МС;

– в облученных матрицах размеры кластеров и величины темновых токов спайков, входящих в их состав, практически не зависят от типа нуклонов.

Отечественные голографические наноизмерительные системы линейных и угловых перемещений

Б. Г. Турухано, Н. Турухано

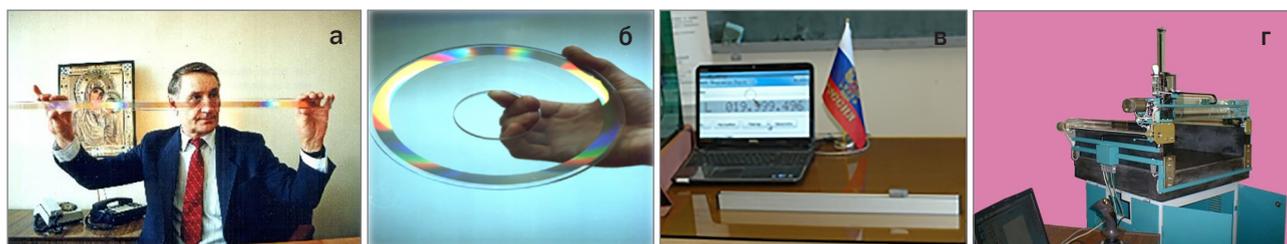
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Фундаментальные исследования лаборатории голографических и измерительных систем (ЛГИИС) позволили создать линейные и радиальные интерференционные поля с высокой частотой и равномерностью линий при их линейном или радиальном расположении, а также метрологические линейные и радиальные голографические дифракционные решетки – МЛГДР и МРГДР (рис. а, б) с высокой частотой штрихов на миллиметр и большой их равномерностью, а также измерительные системы на их основе. На базе метода фазированного синтеза решеток еще в 80-е гг. прошлого столетия успешно были записаны МЛГДР с длиной до 1200 мм и частотой 1000 лин/мм и МРГДР с 540 000 штрихов/360°. Сейчас лаборатория может записывать решетки без ограничения по длине. Линейные и радиальные голографические датчики перемещений – ЛДГ (рис. в) и РДГ – на базе этих решеток были аттестованы во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева.

Согласно этой аттестации их характеристики превосходят все мировые аналоги.

На протяжении всей своей деятельности ЛГИИС занималась внедрением своих разработок в промышленность и военно-промышленный комплекс России, а также поставляла их за рубеж. Вот лишь некоторые из ее разработок: наноизмерительные длиномеры голографические ДГ-30/100/200, плоскомеры, радиусомеры, поворотные столы для сертификации космических систем наведения, ультрапрецизионная трехкоординатная наноизмерительная машина 3D НАНО КИМ (рис. г), поставленная самой крупной в мире японской станкостроительной фирме MAZAK.

ЛГИИС владеет 65 патентами РФ и других стран, в числе которых США, Германия, Япония, Швейцария, Франция, Канада, и является лауреатом российских и международных выставок, а также награждена золотой медалью и дипломом «Росстандарта» (2018) в номинации «За лучшие наноизмерительные системы России».



Разработки лаборатории: метрологическая линейная голографическая дифракционная решетка (а); метрологическая радиальная голографическая дифракционная решетка (б); линейный голографический датчик ЛДГ-300 (в); трехкоординатная наноизмерительная машина 3D НАНО КИМ (г)

Программный комплекс Shifter Assistant

*А. Г. Казаров – Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ,
 А. Корсо-Раду – University of California, Irvine,
 Дж. Аволио – European Organization for Nuclear Research*

Система триггера и сбора данных (TDAQ) эксперимента ATLAS – сложная распределенная вычислительная система, обеспечивающая сложную работу большого количества приложений на кластере из 2500 вычислительных узлов и управляемая сменным составом операторов из 7–8 человек в режиме 24/7. Важное требование к системе управления (СУ) TDAQ и ее программному обеспечению – минимизация времени простоя, неизбежно возникающего в результате программных или аппаратных сбоев и человеческих ошибок.

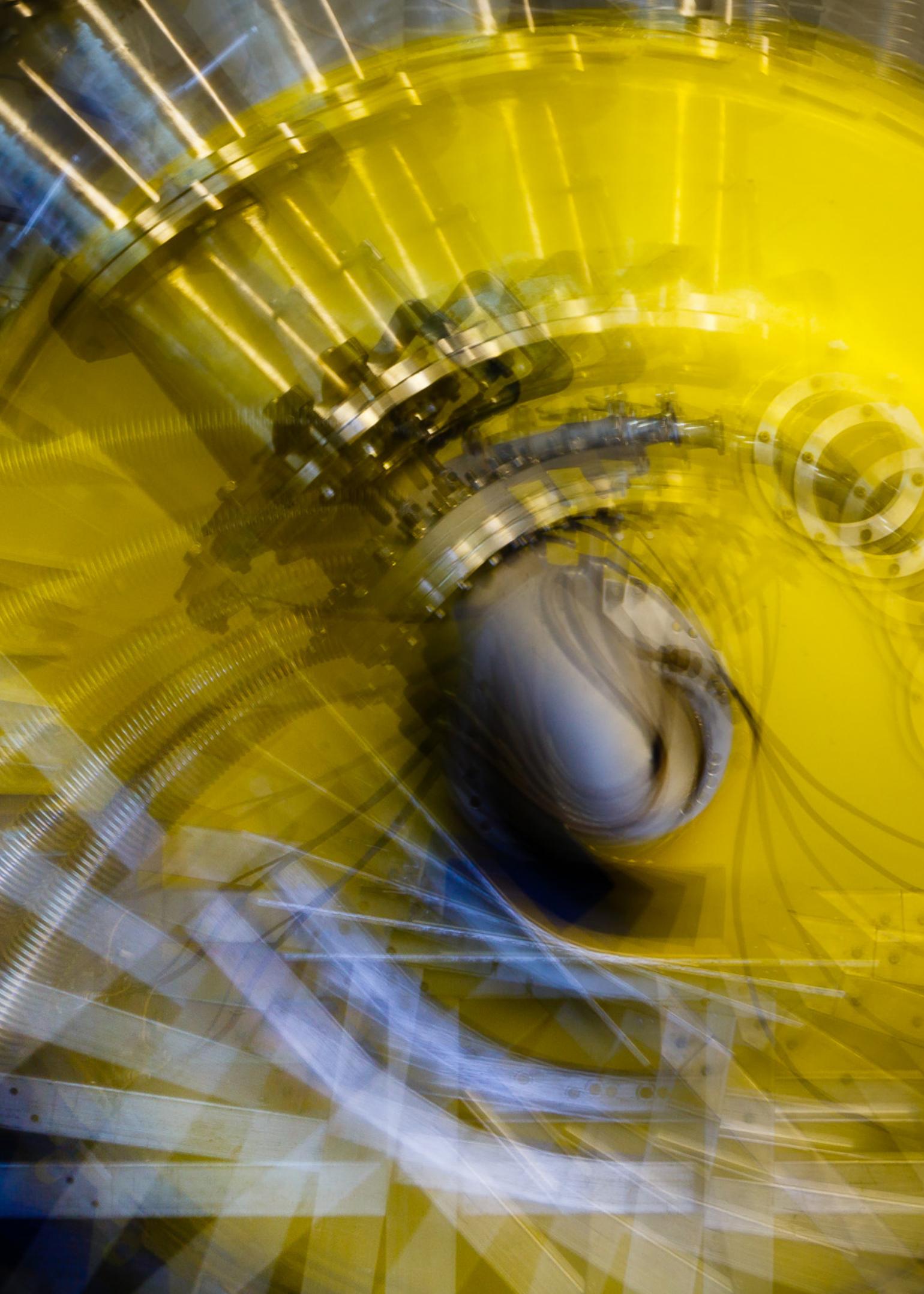
Интеллектуальный программный комплекс Shifter Assistant (SA – помощник операторов) был разработан в составе СУ TDAQ для автоматизации помощи ее операторам. Это расширяемая и наполняемая система применения операционных правил, которая автоматизирует регулярные проверки индикаторов работоспособности и успешного функционирования TDAQ и детекторов ATLAS, определяет ошибочные состояния компонентов систем, тенденции к их развитию, может предупреждать появление и диагностировать причины сбоев, коррелировать различные события в СУ. SA построен на основе технологии обработки сложных событий CEP (Complex Event Processing), реализованной

на java-библиотеке ESPER. SA в реальном времени обрабатывает поток событий операционного мониторинга ATLAS с частотой порядка 100 кГц и применяет к нему набор правил на языке EPL из базы знаний, разработанной экспертами. В результате обработки операторы ATLAS получают короткие текстовые экспертные сообщения, содержащие актуальную информацию о состоянии системы, ошибках и рекомендованных действиях по их устранению, доступные в веб-приложении (рис.), через e-mail и SMS. Комплекс SA включает приложение для отладки и верификации разрабатываемых правил SA Replay, позволяющее в режиме симуляции применить их к любому периоду времени из прошлого, используя систему архивации данных операционного мониторинга.

SA являлся важной частью программных средств СУ в ходе сбора данных ATLAS в Сеансе-2 на Большом адронном коллайдере (2015–2018), когда более 200 правил были разработаны экспертами TDAQ и ATLAS из различных подсистем. Комплекс SA был задействован на каждом рабочем месте в зале управления ATLAS и позволил добиться высокой эффективности сбора данных и значительно снизить нагрузку на экспертов и операторов.

Read	Name	Message	Action	ELISA
	triggershifter-signin-check Created on 09/17/2017, 15:05:00	Dear Trigger Shifter, welcome on shift! Have you read the start of shift checklist and read the whiteboard?	See the page printed onto the desk and refresh the TriggerWhiteBoard	Log to ELISA
Read by Christian 5 hours ago	check-bunch-group Created on 09/17/2017, 9:13:47	LHC has finished injecting for physics.	Check that Bunch Group setting is correct. Also make sure that Trigger keys match the expected luminosity.	Log to ELISA
Read by Christian 6 hours ago	many-events-in-calibration-LAr Created on 09/17/2017, 7:43:14	WARNING High rate of events seen in calibration_LArCellsEmpty stream. Current avg. rate in this stream: 99.6	Check target rate and note the current stream rate in your shifter summary (including run number and prescale keys).	Log to ELISA
Read by Christian 6 hours ago	many-events-in-physics-cos... Created on 09/17/2017, 7:43:14	WARNING High rate of events seen in physics_CosmicCalo stream. Current avg. rate in this stream: 100.6	Check target rates and note the stream rates in your shifter summary (including run number and prescale keys).	Log to ELISA

Окно веб-приложения Shifter Assistant с примерами сообщений



Базовые установки

- 110** Энергетический пуск реактора ПИК.
Подэтап «Испытания в режиме освоения мощности до 100 кВт»
- 112** Первые измерения нейтронного спектра
на горизонтальном канале реактора ПИК
- 114** Работа синхроциклотрона СЦ-1000
и обеспечение научной и экспериментальной деятельности
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в 2019 г.

Энергетический пуск реактора ПИК. Подэтап «Испытания в режиме освоения мощности до 100 кВт»

А. С. Захаров, А. С. Полтавский

Отдел физики и техники реакторов, Управление ядерной и радиационной безопасности
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В 2019 г. коллективами:

- головной научной организации НИЦ «Курчатовский институт»,
- головной конструкторской организации АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежаля»,
- головной проектной организации ЗАО «Научно-производственное объединение «Спецпроект»,
- эксплуатирующей организации НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

в рамках Программы ввода ИЯУ ПИК в эксплуатацию и Программы энергетического пуска исследовательской ядерной установки ПИК (ПЭП) 28.12.2018 была набрана активная зона и достигнуто критическое состояние реактора. С 11.01.2019 по 19.02.2019 проведены нейтронно-физические эксперименты в диапазоне до 100 Вт и выполнен переход в диапазон мощности до 100 кВт при работе с охлаждением активной зоны с помощью вспомогательного циркуляционного электронасоса.

Выход на мощность сопровождался γ -спектрометрическими измерениями активности нейтронно-активационных детекторов с целью контроля фактической мощности реактора.

Дополнительный контроль был обеспечен измерением мощности дозы γ -излучения облученной тепловыделяющей сборки и сравнением с аналогичными измерениями на этапе физического пуска с определением нейтронной мощности по активности продуктов деления. Суммарная энерговыработка активной зоны составила 147 кВт · ч с погрешностью около 10 %, что подтвердила независимая оценка энерговыработки по активности золотых фольг в точках с известной плотностью потока тепловых нейтронов на единицу мощности.

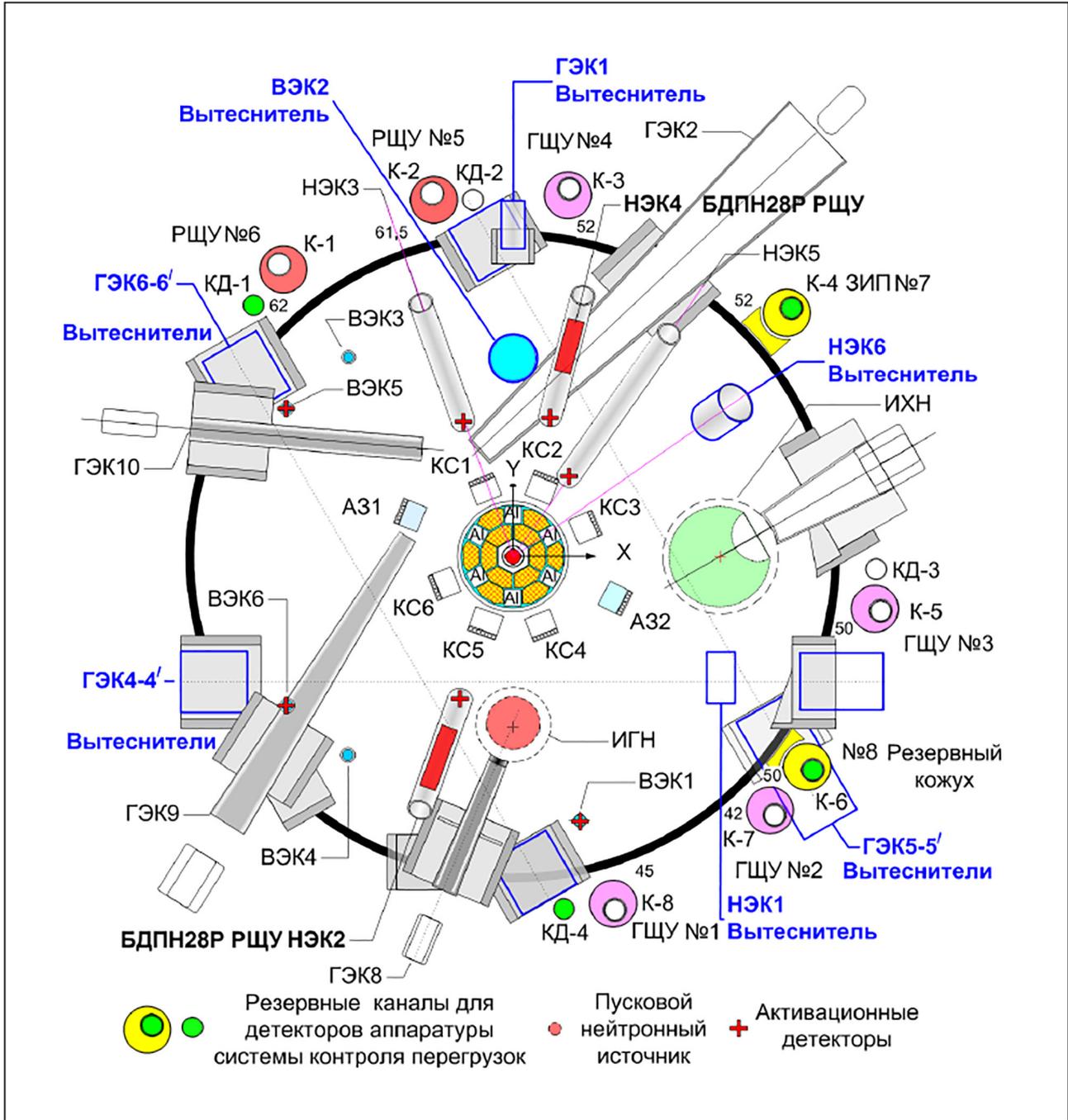
В соответствии с ПЭП и перечнем физических и динамических измерений и испытаний, проводимых на этапе энергетического пуска ИЯУ ПИК, выполнены эксперименты с определением барометрического коэффициента реактивности и расходного эффекта реактивности. Определены эффект реактивности от перемещения ампулы с пусковыми нейтронными источниками в центральном канале и эффект реактивности в результате изменения конфигурации каналов в отражателе (рис.).

Выполнены измерения спектра тепловых нейтронов на выходе из горизонтального канала ГЭК-9 на средней мощности 22,5 кВт (измерения спектра осуществлялись с помощью времяпролетной методики), проведена интерполяция полученных экспериментальных данных для определения значений нейтронного потока выведенного пучка на мощности 100 МВт.

Эксперименты на выведенном нейтронном пучке совмещались с градуировкой каналов измерения мощности реактора с помощью облучения нейтронно-активационных детекторов.

Предварительно выполнены расчеты нормированных на единицу мощности плотности потока тепловых нейтронов Φ_T ($E \leq 0,625$ эВ) в контролируемых каналах НЭК и ВЭК с помощью аттестованной программы MCNP. Нейтронно-активационные детекторы устанавливались в разные каналы по всему объему отражателя. Полномасштабная компьютерная модель реактора ПИК позволила учесть все изменения в составе и геометрии отражателя, по сравнению с физическим пуском, и получить дополнительные данные о взаимном влиянии экспериментальных каналов на нейтронные потоки в них.

В марте – апреле 2019 г. проведены гидравлические испытания с имитаторами топливных



Расположение экспериментальных каналов и блоков детектирования при проведении энергетического пуска

сборки, в ходе которых проведены измерения характеристик первого контура и его основного оборудования при различных конфигурациях загрузки активной зоны для валидации расчетных моделей ИЯУ ПИК.

Подготовлены отчеты о верификации всех программ для ЭВМ, используемых при обосновании безопасности следующего этапа энергопуска – достижения мощности 10 МВт.

Первые измерения нейтронного спектра на горизонтальном канале реактора ПИК

В. А. Ульянов, В. В. Тарнавич, В. Г. Сыромятников, В. В. Воронин, С. О. Сумбаев, М. Р. Колхидашвили, В. А. Соловей, А. В. Гартвик, Ю. М. Кириенко, М. В. Дьячков, Д. А. Ипатов
Инжиниринговый центр «Нейтронные технологии», Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Впервые проведены измерения спектра пучка нейтронов, выведенных из горизонтального канала реактора ПИК. Измерения проводились с помощью времяпролетной методики (TOF) на канале ГЭК-9. TOF-спектрометр (рис. 1) собран по стандартной схеме и состоит из следующих основных компонентов: коллиматора внутри реакторного канала, прерывателя пучка, детектора. Также в состав TOF-спектрометра входят юстировочные устройства (столы) с электронным управлением, электроника для регистрации и предварительной обработки результатов измерений. Для фильтрации быстрых нейтронов и γ -излучения от падающего пучка дополнительно использовалось суперзеркало Ni/Ti ($m = 2$). Мощность реактора составляла несколько десятков киловатт, и с учетом потерь на всех элементах TOF-спектрометра результаты показали, что спектр нейтронов

может быть измерен за несколько десятков минут с достаточно хорошей точностью.

Для сравнения экспериментального спектра с теоретическим были выполнены расчеты в программном пакете McStas с использованием метода Монте-Карло при мощности реактора несколько десятков киловатт и с учетом потерь на всех элементах TOF-спектрометра. Интегральный поток взят для мощности реактора 100 кВт, что равно $3,04 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ при температуре 330 К. Значение получено по данным препринта ПИЯФ 2976 А. Н. Ерыкалова, А. С. Захарова, К. А. Коноплева, И. М. Косолапова, А. С. Полтавского, С. Л. Смольского «Возмущения нейтронных потоков в отражателе реактора ПИК» (2015).

Основные геометрические параметры ГЭК-9 и TOF-спектрометра для расчета указаны на рис. 2.

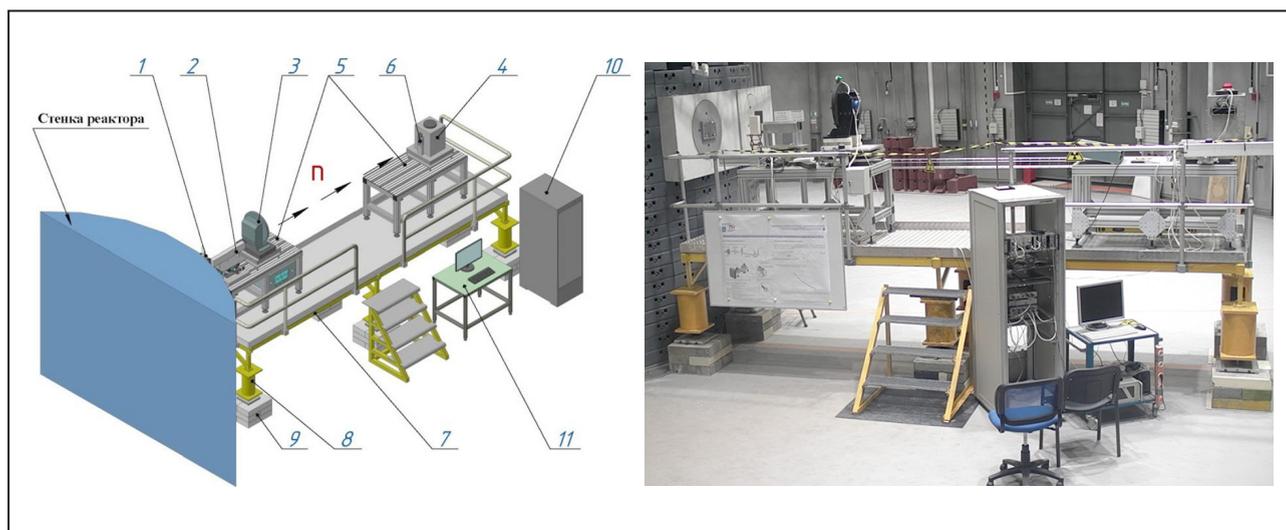


Рис. 1. Времяпролетный (TOF) спектрометр на канале ГЭК-9. Схема (слева): 1 – формирователь пучка; 2 – отражающее зеркало; 3 – прерыватель; 4 – детектор; 5 – юстировочные столы; 6 – коллиматор; 7 – платформа; 8 – юстировочные опорные столбы; 9 – виброопоры спектрометра; 10 – управляющий модуль; 11 – рабочее место оператора установки. Фотография (справа)

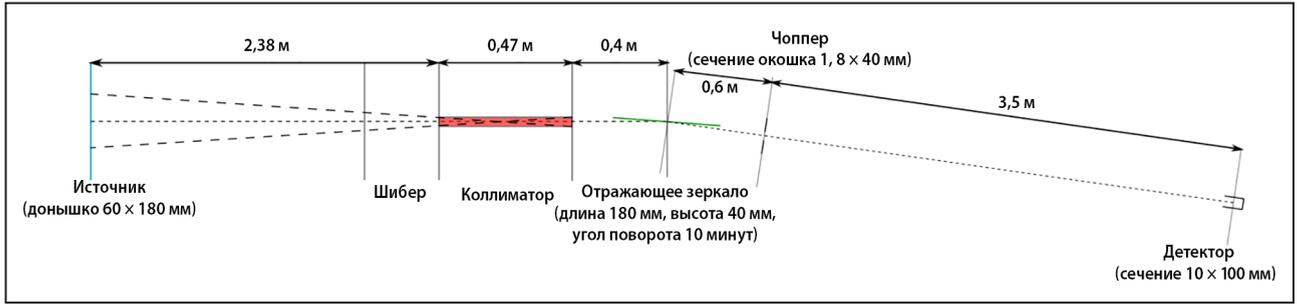


Рис. 2. Схема канала ГЭК-9 и TOF-спектрометра с геометрическими параметрами, которые использовались для расчета

В расчете учитывалось рассеяние на циркониевой мембране толщиной 6 мм, а также на воздухе, заполняющем промежуток от доньшка канала до детектора. Циркониевая мембрана рассеивает ~ 17,5 % потока на всех длинах волн. Воздух рассеивает нейтроны в зависимости от длины волны по экспоненциальному закону, при общей

длине прибора в 7 250 мм уменьшение нейтронного потока ≈ 35 %.

Как видно из рис. 3, экспериментальные результаты хорошо совпали с расчетными.

Результаты были представлены на 7-й Европейской конференции по рассеянию нейтронов ECNS-19.

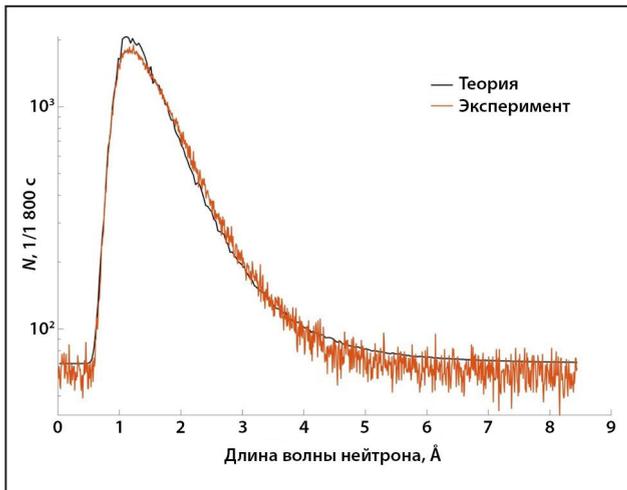


Рис. 3. Сравнение теоретического и экспериментального спектров тепловых нейтронов канала ГЭК-9 реактора ПИК

Работа синхроциклотрона СЦ-1000 и обеспечение научной и экспериментальной деятельности НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в 2019 г.

Е. М. Иванов, С. А. Артамонов, Л. А. Сухоруков
Отделение перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Синхроциклотрон СЦ-1000 (рис. 1) является базовой установкой НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Запущен в эксплуатацию в 1970 г. Основные параметры синхроциклотрона приведены в таблице.



Рис. 1. Синхроциклотрон СЦ-1000

Таблица. Основные параметры СЦ-1000

Характеристика	Величина
Диаметр полюса	7,0 м
Ток обмотки	5 400 А
Ускоряемая частица	Протоны
Энергия пучка	1 000 МэВ
Ток выведенного пучка	До 1 мкА

Синхроциклотрон СЦ-1000 предназначен как для фундаментальных исследований в области физики элементарных частиц, структуры атомных ядер и механизмов ядерных реакций в них, физики твердого тела, так и прикладных работ по радиационным испытаниям и ядерно-медицинским исследованиям. СЦ-1000 является надеж-

ной, постоянно и стабильно работающей установкой в РФ в диапазоне энергий 100–1 000 МэВ. В 2019 г. синхроциклотрон отработал на эксперимент 2 980 ч. На рисунках 2 и 3 показано распределение времени работы СЦ-1000 в период с ноября 2018 г. по ноябрь 2019 г.

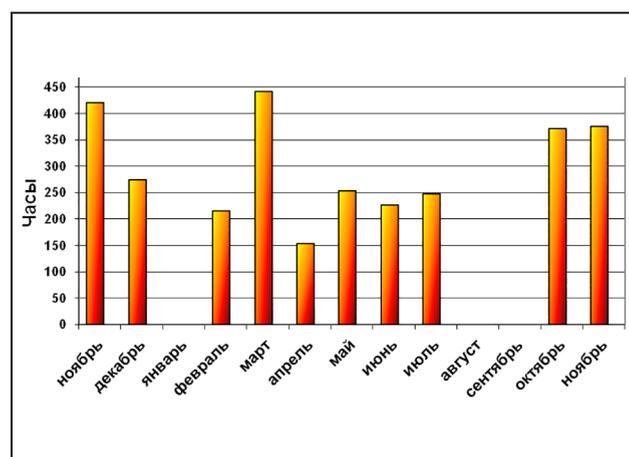


Рис. 2. Время работы СЦ-1000 в 2018–2019 гг.

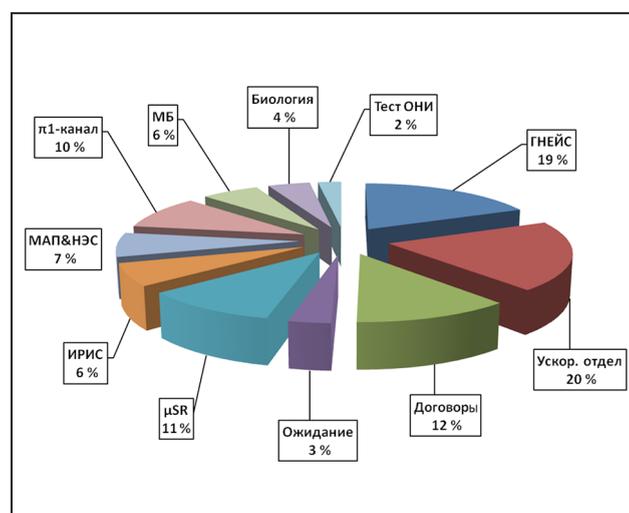


Рис. 3. Распределение времени работы СЦ-1000 по различным направлениям исследований

На протонных пучках СЦ-1000 в 2019 г. выполнены следующие исследования

1. В рамках гранта РФФИ № 19-02-00005 проведены онлайн- и офлайн-тесты нового мишенно-ионного устройства с ионным источником, изготовленным из монокристаллического вольфрама с повышенной работой выхода. Работа проводилась на масс-сепараторе ИРИС на пучке протонов с энергией 1 ГэВ. Тесты показали высокую эффективность ионизации нового мишенно-ионного устройства.

2. В рамках научно-исследовательской работы (НИР) на двухплечевом магнитном спектрометре МАП&НЭС:

- выполнялась абсолютная нормировка сечений реакции $A(p, p')X$ с ядрами ${}^9\text{Be}$, ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{56}\text{Fe}$ и ${}^{90}\text{Zr}$ под углом рассеяния $24,5^\circ$;
- измерялись поляризация и дифференциальное сечение реакции $A(p, p')X$ с ядрами под углом рассеяния $24,5^\circ$ в зависимости от импульса вторичного протона.

3. В рамках НИР по комплексной теме «Биомедицинские технологии» (подтема «Апробация на биомоделях потенциальных сенсibiliзирующих соединений для повышения эффективности и безопасности лучевой терапии») выполняется работа по исследованию влияния препаратов, содержащих ${}^{11}\text{B}$, на эффективность терапевтического воздействия протонного пучка на животных моделях злокачественных опухолей.

4. В рамках договорной деятельности выполнены работы:

- разработка и создание моделей рака предстательной железы, экспрессирующего ПСМА (простатспецифического мембранного антигена), и плоскоклеточного рака головы и шеи у экспериментальных животных для нужд Российского научного центра радиологии и хирургических технологий им. акад. А. М. Гранова;
- «Методическое и техническое обеспечение радиационных исследований и испытаний опухолей гипофиза на пучках протонов» на синхротронном спектрометре НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ.

5. В рамках НИР «Модернизация УПСТ» выполнены следующие работы:

- измерение дозных полей с использованием термолюминесцентного дозиметра;

- эксплуатационные испытания нового дозиметрического оборудования.

6. В соответствии с тематическим планом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в рамках государственного задания на 2019 г. и на плановый период 2020–2021 гг. на синхротронном спектрометре СЦ 1000 выполнялись работы по исследованию радиационной стойкости фуллеренов и их производных, а именно: C_{60} , C_{70} , фуллеренолов $\text{C}_{60}(\text{OH})_{30}$, $\text{Fe@C}_{60}(\text{OH})_{30}$ и $\text{Me@C}_{82}(\text{OH})_{38-40}$ ($\text{Me} = \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Ho}$) и комплексов $\text{Sm@C}_{82}(\text{C}_6\text{H}_9\text{NO})_n$, $\text{Gd@C}_{82}(\text{C}_6\text{H}_9\text{NO})_n$, $\text{Fe@C}_{60}(\text{C}_6\text{H}_9\text{NO})_n$, $\text{Fe@C}_{60}(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$. Актуальность данных исследований обусловлена тем, что существующие в настоящее время методы химиотерапии не обеспечивают селективную доставку и адекватную концентрацию лечебных агентов в ткани опухоли при ограниченных возможностях мониторинга результата лечебных процедур, что нередко ведет к осложнениям, а также снижает лечебный эффект. В свою очередь, облучение эндометаллофуллеренов в потоке ионизирующих излучений открывает возможности создания радиофармпрепаратов для диагностики и лечения онкологических заболеваний с помощью эндометаллофуллеренов.

7. В соответствии с тематическим планом НИОКР в рамках государственного задания на 2019 г. была продолжена разработка проекта комплекса РИЦ-80 по производству радиоизотопов медицинского назначения на базе циклотрона Ц-80. Протестирован инновационный высокотемпературный метод выделения медицинских радионуклидов – α -эмиттеров ${}^{212}\text{Pb}$ и ${}^{224}\text{Ra}$ из мишени карбида тория высокой плотности.

8. Было продолжено выполнение программы сотрудничества с ГК «Роскосмос» и Министерством обороны РФ в области испытаний электро-радиоизделий на радиационную стойкость к тяжелым заряженным частицам.

На нейтронных пучках СЦ-1000 выполнены следующие исследования

На времяпролетном спектрометре ГНЕИС проведены работы в области фундаментальной и прикладной ядерной физики:

- в рамках гранта РФФИ № 18-02-00571 выполнены измерения угловых распределений

и анизотропия осколков деления ^{240}Pu в интервале энергий нейтронов 1–200 МэВ. Результаты для ^{239}Pu и ^{237}Np опубликованы и представлены в докладах на международных конференциях ISINN-27 и «Ядро-2019»;

- в рамках гранта РФФИ № 19-02-00116 проведены измерения спектров и выходов γ -квантов и нейтронов деления ^{235}U резонансными нейтронами с энергией 1–300 эВ. Работа представлена в докладе на конференции «Ядро-2019»;

- в рамках договора с АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского» выполнены измерения сечений деления ^{240}Pu и ^{237}Np нейтронами промежуточных энергий 1–200 МэВ. Актуальность данных исследований обусловлена непрерывно растущими требованиями к точности и полноте систем ядерных данных, которые используются при разработке новейших ядерных технологий, прежде всего в ядерной энергетике;

- в рамках федеральной целевой программы № 14.607.21.0200 «Создание инновационной технологии производства новейших систем регистрации нейтронного излучения для решения задач по физике конденсированного состояния» (2018–2020) проведены испытания трансмиссионного монитора потока тепловых нейтронов с энергией 0,01–1 эВ для экспериментов на пучках реактора ПИК.

На пучках π - и μ -мезонных каналов СЦ-1000 выполнены следующие исследования

На мюонном канале СЦ-1000 с помощью μSR -установки в 2019 г. проводились работы в области физики конденсированных сред:

- μSR -исследование мультиферроика $\text{Tb}_{0,95}\text{V}_{0,05}\text{MnO}_3$. Обнаружен ряд особенностей, которые не наблюдались при изучении других мультиферроиков-манганитов, в т. ч. и TbMnO_3 ;

- исследование магнитных свойств феррожидкости с наночастицами CoFe_2O_4 с объемной концентрацией 3 %. Подтверждена возможность прямого измерения намагниченности наноразмерного объекта.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ в рамках тематического плана НИР запланирована се-

рия экспериментов по изучению изотопической инвариантности в процессах образования η -мезона около порога и CUSP-эффекта в реакции перезарядки. Для этих целей создается магнитный спектрометр на базе π -мезонного канала синхроциклотрона СЦ-1000. Планируется получить импульсное разрешение канала 0,5 %. Проведено Монте-Карло-моделирование оптики π -мезонного канала. Выполнена экспериментальная настройка протонного триплета для фокусировки протонного пучка на мезонообразующую мишень. Получена фокусировка в горизонтальной плоскости $\sigma = 2$ мм. Работы по созданию магнитного спектрометра будут продолжены.

На основе работ, проведенных на СЦ-1000, были опубликованы следующие материалы

1. Panteleev V.N., Barzakh A.E., Batist L.Kh., Fedorov D.V., Ivanov V.S., Moroz F.V., Molkanov P.L., Orlov S.Yu., Seliverstov M.D., Volkov Yu.M. // Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.04.059>

2. Дубовский И. М., Лебедев В. Т., Шилин В. А., Сжогина А. А., Суясова М. В., Седов В. П. // Кристаллография. 2018. Т. 63. № 1. С. 144–151.

3. Suyasova M.V., Borisenkova A.A., Shilin V.A., Sedov V.P., Orlova D.N. // Nanosyst.: Phys. Chem. Math. 2019. V. 10. No. 4. P. 447–455.

4. Суясова М. В., Борисенкова А. А., Шилин В. А., Седов В. П., Орлова Д. Н. // Сб. тезисов VI Всерос. молодежн. научн. форума Open Science 2019. Гатчина, 2019.

5. Panteleev V.N., Barzakh A.E., Batist L.Kh., Fedorov D.V., Ivanov V.S., Molkanov S.A., Orlov S.Yu., Seliverstov M.D., Volkov Yu.M. // Book of Abstracts Int. Conf. on Radiat. Applicat. 2019. P. 127.

6. Panteleev V.N., Barzakh A.E., Batist L.Kh., Fedorov D.V., Ivanov V.S., Molkanov S.A., Orlov S.Yu., Seliverstov M.D., Volkov Yu.M. // RAP Conf. Proc. 2019. V. 4. P. 18–22.

7. Vorobyev A.S. et al. // JETP Lett. 2018. V. 107. Iss. 9. P. 521.

8. Vorobyev A.S. et al. // JETP Lett. 2019. V. 110. Iss. 4. P. 242.

9. Воробьев С. И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 110. Вып. 2. С. 118–125.

10. Vorobyev S.I. et al. // JETP Lett. 2019. V. 110. Iss. 2. P. 133–139.

11. Американов Д. А., Иванов Е. М., Иванов Н. А., Лобанов О. В., Пашук В. В. // Научн.-техн. сб. «Радиационная стойкость электрон. сист.». Вып. 22. М., 2019. С. 73–74.

12. Американов Д. А., Иванов Е. М., Иванов Н. А., Лобанов О. В., Пашук В. В. // Научн.-техн. сб. «Радиационная стойкость электрон. сист.». Вып. 22. М., 2019. С. 77–78.

13. Американов Д. А., Горкин Г. И., Иванов Е. М., Косьяненко С. В., Лобанов О. В., Муратов В. Г., Пашук В. В., Щербаков О. А., Тонких В. А., Воробьев А. С., Анашин В. С., Чубунов П. А. // Научн.-техн. сб. «Радиационная стойкость электрон. сист.». Вып. 22. М., 2019. С. 75–76.

14. Артамонов С. А., Иванов Е. М., Рябов Г. А., Тонких В. А. // Сб. тезисов VI Всерос. молодежн. научн. форума Open Science 2019. Гатчина, 2019.

15. Kotb O.M., Paston S.V., Ezhov V.F., Gulevich E.P., Brozhik D.S., Karlin D.L., Pak F.A., Khalikov A.I. // Program and Abstract Book “Modern Problems of Polymer Science” 15th Int. Saint Petersburg Conf. of Young Scientists. 2019. P. 195.

16. Котб О. М., Пастон С. В., Гулевич Е. П., Брожик Д. С., Карлин Д. Л., Пак Ф. А., Халиков А. И. // Сб. научн. трудов VI Съезда биофизиков России. Т. 2. Краснодар, 2019. С. 231.

17. Иванов Е. М., Карлин Д. Л., Максимов В. И., Пак Ф. А., Халиков А. И., Корытов О. В., Майстренко Д. Н. // Исслед. и практика в мед. 2018. Т. 5. № S2. С. 82.

18. Korytova L.I., Vinogradova Yu.N., Korytov O.V., Yalynich N.N., Gerasimov S.V., Kartashov A.V., Shalek R.A., Maksimov V.I., Ivanov E.M., Karlin D.L., Khalikov A.I. // Book of Abstracts NRF Special Session on Hadron Therapy. 2018. P. 3.

19. Колхидашвили М. Р., Савельева Т. В., Лазарев В. И., Лысенко В. В., Пак Ф. А., Карлин Д. Л., Кузора Н. А., Иванов Е. М., Брожик Д. С., Максимов В. И., Мамедова Н. И., Халиков А. И. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ 3040. 2019. 12 с.

Патенты и программы

1. Способ измерения частот поперечных некогерентных колебаний заряженных частиц, ускоряемых в синхроциклотроне: пат. РФ на изобретение № 2687083 / Иванов Е. М., Михеев Г. Ф.; дата приоритета 28.06.2018.

2. Устройство для радиационного облучения электроники авиакосмического назначения протонами с использованием синхроциклотрона: пат. РФ на изобретение № 2680151 / Иванов Е. М., Михеев Г. Ф., Артамонов С. А., Анашин В. С., Козюков А. Е., Бакиров Л. Р.; дата приоритета 12.02.2018.

3. Способ авторегулирования и стабилизации интенсивности синхроциклотрона при протонно-лучевом облучении больных и устройство для его осуществления: пат. РФ на изобретение № 2704012 / Иванов Е. М., Максимов В. И., Михеев Г. Ф.; дата приоритета 11.02.2019.

4. Устройство защиты дуантной системы синхроциклотрона от электрических разрядов и пробоев: пат. РФ на полезную модель № 187624 / Иванов Е. М., Михеев Г. Ф.; дата приоритета 19.10.2018.

5. Устройство защиты подшипников вариатора синхроциклотрона: пат. РФ на полезную модель № 190041 / Иванов Е. М., Михеев Г. Ф.; дата приоритета 15.04.2019.

6. Устройство для радиационного экспресс-облучения электроники авиакосмического назначения протонами с использованием синхроциклотрона: пат. РФ на изобретение № 2710205 / Иванов Е. М., Максимов В. И., Михеев Г. Ф., Анашин В. С., Козюков А. Е., Бычков А. С.; дата приоритета 07.06.2019.

7. Способ получения радионуклида Lu-177: пат. РФ на изобретение № 2704005 / Пантелеев В. Н., Кротов С. А.; дата приоритета 26.04.2019.

8. Программа для расчета статических равновесных орбит и параметров движения в изохронном циклотроне на элементе периодичности. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019663358 / Артамонов С. А.; дата гос. рег. 15.10.2019.

9. Программа управления установкой протонной стереотаксической терапии. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019613375 / Колхидашвили М. Р., Савельева Т. В., Лазарев В. И., Лысенко В. В., Пак Ф. А.; дата гос. рег. 15.03.2019.



Научно-организационная деятельность

- 120** Кадровый состав
- 122** Количественные показатели научной и образовательной деятельности
- 126** Награды. Премии
- 128** Научные мероприятия

Кадровый состав

Численность сотрудников

Профессиональные квалификационные группы должностей	2018	2019
Всего без учета совместителей	1 973	1 962
Всего научных сотрудников	490	473
<i>Из них с должностью</i>		
руководителя	65	68
главного научного сотрудника	9	9
ведущего научного сотрудника	43	42
старшего научного сотрудника	157	151
научного сотрудника	97	86
младшего научного сотрудника	55	58
прочие научные сотрудники	64	59
<i>С ученой степенью</i>		
доктора наук	66	66
кандидата наук	230	218
<i>С ученым званием</i>		
академика	-	-
члена-корреспондента	2	2
профессора	12	9
доцента (с. н. с.)	90	87

Сведения о научном стаже сотрудников

Должность	Численность	В том числе со стажем		
		до 5 лет	более 5 лет	более 10 лет
Зав. лабораториями и отделами	40	-	-	40
Главные научные сотрудники	9	-	-	9
Ведущие научные сотрудники	42	2	1	39
Старшие научные сотрудники	151	2	8	141
Научные сотрудники	86	4	17	65
Младшие научные сотрудники	58	30	18	10

Численность научных сотрудников по возрастным группам

Профессиональные квалификационные группы должностей	Возраст, лет					
	20–29	30–39	40–49	50–59	60 и старше	средний возраст
Всего научных сотрудников	75	85	50	63	200	53
<i>С ученой степенью</i>						
доктора наук	-	-	6	9	51	69
кандидата наук	4	34	31	39	110	58
<i>Не имеют ученой степени</i>	71	51	13	15	39	41
<i>С ученым званием</i>						
академика	-	-	-	-	-	-
члена-корреспондента	-	-	-	-	2	81
профессора	-	-	-	-	9	80
доцента (с. н. с.)	-	-	-	6	81	72

Численность и средний возраст научных сотрудников по должностям

Должность	2018		2019	
	Количество	Средний возраст	Количество	Средний возраст
Главный научный сотрудник	9	81	9	82
Ведущий научный сотрудник	43	68	42	69
Старший научный сотрудник	157	61	151	62
Научный сотрудник	97	51	86	51
Младший научный сотрудник	55	31	58	32
Руководитель	65	64	68	63
Прочие научные сотрудники	64	26	59	27

Структура и штатная численность за 5 лет

Категория персонала	2015	2016	2017	2018	2019
Научный персонал	514,9	529,4	503,9	489,2	435,5
Научно-технический персонал	277,1	244,5	241,8	251,8	290,7
Административно-хозяйственный персонал	1 190,7	1 158,8	1 121,9	1 181,4	1 253,1
Младший обслуживающий персонал	22,5	24,5	32,5	32,5	32,5
Всего	2 005,2	1 957,2	1 900,1	1 954,9	2 011,8

Количественные показатели научной и образовательной деятельности

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ выполнены все мероприятия, а также достигнуты все целевые индикаторы и показатели, запланированные на 2019 г., в т. ч. за счет субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на 2019 г.

Сотрудники Института в 2019 г. были авторами и соавторами 714 статей, из них 465 публикаций, индексируемых в базе данных WEB of Science и ассоциированных с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, что составляет 65 % от общего количества опубликованных статей.

Динамика числа публикаций, ассоциированных с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, за 5 лет

Год	Общее число публикаций / публикации, проиндексированные в базе данных WEB of Science
2015	565/395
2016	569/398
2017	592/426
2018	689/507
2019	714/465

Динамика участия в научных мероприятиях за 5 лет

Год	Количество фактов участия в выставочной деятельности, конференциях, на форумах и т. д.
2015	340
2016	350
2017	466
2018	420
2019	422

Число полученных в 2019 г. международных и российских патентов, правообладателем которых является НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, по виду охранных документов

Объекты патентного права по виду охранных документов			
Патент на изобретение	Патент на полезную модель	Свидетельство на программу для ЭВМ	Всего
10	2	12	24

Динамика числа охранных документов, правообладателем которых является НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, за 5 лет

Вид правоохранительного документа	2015	2016	2017	2018	2019
Патенты на изобретения	5	3	4	7	10
Патенты на полезные модели	4	4	5	4	2
Свидетельства на программы для ЭВМ	6	5	6	25	12
Свидетельства на базы данных	–	2	1	1	0
Зарегистрированные ноу-хау	–	1	–	3	0
Всего	15	15	16	40	24

В 2019 г. научные исследования сотрудников Института были поддержаны грантами РФФИ (38) и РНФ (13), также имелась поддержка Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса РФ на 2014–2020 гг.».

В 2019 г. в рамках выполнения Программы деятельности НИЦ «Курчатовский институт» на 2018–2022 гг. сотрудники Института защитили 7 кандидатских диссертаций.

Подготовка кадров высшей квалификации за 5 лет

Год	Общее число диссертаций / диссертации на соискание ученой степени доктора наук
2015	6/–
2016	13/2
2017	11/1
2018	8/2
2019	7/–

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ на основании лицензии от 02.06.2017 № 2599 на осуществление образовательной деятельности, выданной Федеральной службой по надзору в сфере образования и науки, ведет обучение по программам высшего образования – программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре в соответствии с требованиями федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования по направлениям подготовки:

- 03.06.01 «Физика и астрономия»
по направленностям 01.04.02 «Теоретическая физика», 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц», 03.01.02 «Биофизика»;
- 06.06.01 «Биологические науки»
по направленности 03.02.07 «Генетика».

В 2019 г. на обучение в аспирантуру (очная форма) было зачислено 15 человек: 4 человека по направлению подготовки 06.06.01 «Биологические науки» (направленность 03.02.07 «Генетика») и 11 человек по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» (направленности

01.04.02 «Теоретическая физика», 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц», 03.01.02 «Биофизика»).

Общая численность аспирантов на конец 2019 г. составляла 40 человек.

В 2019 г. НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ участвовал в открытом конкурсе Минобрнауки России по распределению контрольных цифр приема (КЦП) граждан на обучение по программам аспирантуры за счет бюджетных ассигнований федерального бюджета на 2020/21 учебный год. Были получены КЦП по направлениям подготовки: 03.06.01 «Физика и астрономия» – 8 мест, 06.06.01 «Биологические науки» – 4 места.

В 2019 г. доля молодых ученых (исследователей без ученой степени, кандидатов наук до 35 лет и докторов наук до 40 лет) в общем количестве сотрудников Института, занятых в исследованиях и разработках, составила 28 %.

В лабораториях Института в 2019 г. выполняли учебно-исследовательские и научные работы, проходили практику, готовили выпускные квалификационные работы бакалавров и специалистов, а также магистерские диссертации более 127 студентов вузов страны.

Динамика численности студентов профильных вузов, проходивших практику в Институте в рамках выполнения Программы деятельности НИЦ «Курчатовский институт», за 5 лет

Год	Количество студентов
2015	85
2016	105
2017	101
2018	122
2019	127

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, стремясь популяризировать науку и заинтересовать молодежь в получении профильного физического и биологического образования, занимается организацией и проведением экскурсий по территории Института (в частности, на ускорительный комплекс СЦ-1000, реакторный комплекс ПИК, реактор ВВР-М и в Отделение молекулярной и радиационной биофизики) и участвует в профориентации школьников старших классов. В 2019 г. было организовано более 30 экскурсий для более чем 600 учащихся школ Гатчины и Гатчинского района, а также школ Ленинградской области и Санкт-Петербурга.

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

Сотрудниками Института проводятся лекционные и лабораторные занятия по физике, химии и биологии для учащихся 10-го класса «К» и 11-го класса «К» Академической гимназии им. Д. К. Фаддеева Санкт-Петербургского государственного университета, в рамках которых гимназисты выполняют свои научно-исследовательские проекты.

В научно-образовательном центре НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ читаются лекции и проводятся факультативные занятия по углубленному изучению отдельных тем по физике, математике, биологии для учащихся школ Гатчины и Гатчинского района, в рамках которых ученики знакомятся с достижениями современной науки и техники. Активно ведется профориентационная работа с учащимися ведущих школ Санкт-Петербурга и Ленинградской области, а также со студентами вузов всего Северо-Западного региона. Проводятся научно-популярные лекции на территории школ, экскурсии

в ведущие отделения НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, где пропагандируются достижения российской науки и тем самым повышается интерес к научным профессиям и Институту в целом.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ ведется уникальный проект по программе «Школьная экологическая инициатива» – «Молодые таланты», направленный на экологическое воспитание детей и подростков. В 2019 г. прошли творческие конкурсы, олимпиады, экологические акции и праздники. Летом 2019 г. работал традиционный летний экологический лагерь для школьников «ЭКО-2019». В течение года проводилась акция по раздельному сбору мусора, к которой присоединились практически все детские сады и школы Гатчины и Гатчинского района. В этом году в мероприятиях данного проекта приняли участие около 5 000 юных жителей города и района.



Награды. Премии

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



Старший научный сотрудник лаборатории квантовой химии Отделения перспективных разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ Леонид Скрипников включен в «Периодическую таблицу молодых химиков». Список был составлен по инициативе Международного союза теоретической и прикладной химии (IUPAC) и Международной сети молодых химиков (IYCN). Поводом для его создания послужило празднование 150-летия с момента открытия периодического закона Д. И. Менделеева и столетие IUPAC. Леонид Скрипников занимает 114-ю ячейку в символической таблице молодых химиков, т. к. этот номер соответствует элементу флеровию, который был получен в 1998 г. группой российских ученых под руководством Ю. Ц. Оганесяна (Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ). IUPAC отметил достижения Леонида Скрипникова в области поиска электрического дипольного момента электрона и разрешения загадки сверхтонкой структуры висмута.



В 2019 г. правительством Ленинградской области продолжалась поддержка 10 работ сотрудников НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, ранее удостоенных именных научных стипендий губернатора Ленинградской области: два сотрудника получали именные научные стипендии губернатора Ленинградской области в категории «молодые ученые», а восемь сотрудников – в категории «ведущие ученые».

Накануне Нового года стали известны имена лауреатов премий губернатора Ленинградской области за вклад в развитие науки и техники и за лучшую научно-исследовательскую работу в 2019 г. Соответствующее распоряжение губернатор А. Ю. Дрозденко подписал 25 декабря 2019 г.



В номинации «Естественные и технические науки» победителем признан ведущий научный сотрудник Отделения молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ доктор физико-математических наук Михаил Геннадьевич Петухов. Результаты его научной работы открывают новые возможности получения высокостабильных пептидов и глобулярных водорастворимых белков для решения задач биотехнологии и биомедицины.

В номинации «Естественные и технические науки» победителем признан ведущий научный сотрудник Отделения молекулярной и радиационной биофизики НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ доктор физико-математических наук Михаил Геннадьевич Петухов. Результаты его научной работы открывают новые возможности получения высокостабильных пептидов и глобулярных водорастворимых белков для решения задач биотехнологии и биомедицины.

За лучшую научно-исследовательскую работу премию второй степени получил старший научный сотрудник лаборатории физики кристаллов отдела исследования конденсированного состояния Отделения нейтронных исследований Алексей Анатольевич Быков. Результаты его исследований расширяют представления о методах синтеза сверхпроводников и могут применяться при изготовлении датчиков магнитного поля, детекторов заряженных частиц, приемников низкочастотных электромагнитных колебаний и деталей силовых машин, использующих сверхпроводящие элементы.

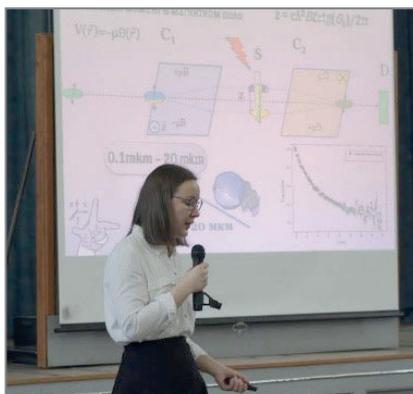


Для молодых ученых и специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, демонстрирующих существенные успехи в научных исследованиях, были учреждены ежегодные именные стипендии в знак признания заслуг и в память о выдающихся ученых: С. Е. Бреслере, В. Н. Грибове, Г. М. Драбкине и В. М. Лобашеве, чья научная деятельность была неразрывно связана с Институтом:

- стипендия им. С. Е. Бреслера за работы в области биологии;
- стипендия им. В. Н. Грибова за работы в области теоретической физики;
- стипендия им. Г. М. Драбкина за работы в области физики конденсированного состояния;
- стипендия им. В. М. Лобашева за работы в области ядерной физики.

В 2019 г. четыре молодых сотрудника НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ получали именные стипендии.

Стипендией им. В. Н. Грибова за работы в области теоретической физики был удостоен лаборант-исследователь Отделения теоретической физики В. Е. Тимофеев («Эффективная теория скирмионного кристалла»). Лучшей в конкурсе на соискание стипендии им. Г. М. Драбкина стала работа младшего научного сотрудника Отделения нейтронных исследований Е. Г. Яшиной («Исследование структурной организации хроматина в ядре биологической клетки методами малоуглового рассеяния нейтронов»).



Лаборант-исследователь Отделения физики высоких энергий С. А. Насыбулин («Исследование дифракционных процессов в центральной области на детекторе CMS при энергиях БАК») был удостоен стипендии им. В. М. Лобашева. Победителем конкурса на соискание стипендии им. С. Е. Бреслера за работы в области биологии стала младший научный сотрудник Отделения молекулярной и радиационной биофизики Е. М. Максимова («Молекулярный механизм ингибирования трансляции антибиотиком амикумацином А»).



Победителем конкурса на соискание стипендии им. С. Е. Бреслера за работы в области биологии стала младший научный сотрудник Отделения молекулярной и радиационной биофизики Е. М. Максимова («Молекулярный механизм ингибирования трансляции антибиотиком амикумацином А»).



Научные мероприятия

Общеинститутские семинары

- 10 января. Теоретический семинар по ФКС.** И. В. Голосовский. «Исследования магнитной структуры в замещенных мультиферроиках-ферроборатах $\text{Nd}(\text{Tb})\text{Fe}_3(\text{BO}_4)_3$. Нейтронная дифракция на монокристаллах».
- 15 января. Ядерный семинар ОФВЭ.** Ю. А. Гавриков. «Первое применение кристаллов в системе медленного вывода пучка SPS CERN».
- 17 января. Семинар ОМРБ:**
Г. М. Бутрович. «МикроРНК в диагностике колоректального рака»;
Е. А. Алексеева. «Роль гена *HIM1* в индуцированном мутагенезе».
- 17 января. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** В. А. Щегельский, М. Г. Рыскин. «Первое прямое наблюдение плотной и горячей расширяющейся адронной материи и измерение размера излучающего пионного облака».
- 22 января. Ядерный семинар ОФВЭ.** А. В. Саранцев. «Спектроскопия барионов: методы и последние результаты».
- 29 января. Ядерный семинар ОФВЭ.** В. А. Кузнецов. «Спектроскопия легких барионов II: экспериментальные установки и методы, поиск возможных экзотических состояний».
- 30 января. Семинар ОПР.** А. Л. Барабанов (НИЦ «Курчатовский институт»). «Исследования угловых распределений и анизотропии осколков деления тяжелых ядер нейтронами промежуточных энергий 1–200 МэВ. (Теоретические аспекты процесса деления под действием нейтронов промежуточных энергий)».
- 2 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ.** Д. Е. Соснов. «Дифракционные процессы в CMS на БАК».
- 4 февраля. Семинар ОИКС.** В. Т. Лебедев. «Упорядочение смесей парамагнитных и диамагнитных фуллеренолов».
- 5 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ.** Г. Д. Шабанов. «Шаровая молния – форточка в другой мир».
- 13 февраля. Семинар ОМРБ.** Д. М. Спельников. «Построение интерпретируемых моделей в машинном обучении».
- 14 февраля. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ.** В. А. Хозе. «БАК как фотон-фотонный коллайдер».
- 14 февраля. Теоретический семинар по ФКС.** М. А. Просников (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН). «Магнитная и решеточная динамика сложноструктурных антиферромагнитных оксидов $3d$ переходных металлов».
- 19 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ.** И. Б. Смирнов. «Обзор методов анализа данных в физике нейтрино (по материалам PHYSTAT-v 2019)».
- 21 февраля. Теоретический семинар ОПР.** А. Н. Петров. «Ультрахолодные атомы Dy и Er».
- 26 февраля. Ядерный семинар ОФВЭ.** В. Г. Рябов. «Экспериментальная программа ускорительного комплекса NICA».
- 7 марта. Теоретический семинар по ФКС.** В. Е. Тимофеев (Санкт-Петербургский государственный университет). «Эффективная теория скирмионного кристалла».
- 12 марта. Ядерный семинар ОФВЭ.** И. А. Митропольский. «Сечение захвата тепловых нейтронов ядрами ^{88}Zr ».

19 марта. Ядерный семинар ОФВЭ. А. Е. Шевель. «Разработка системы интегрированного управления географически распределенными центрами обработки данных».

26 марта. Ядерный семинар ОФВЭ. Р. Петти (Университет Южной Каролины, США). «Прецизионные измерения фундаментальных взаимодействий с помощью (анти)нейтрино».

28 марта. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. М. Г. Рыскин. «Оддерон: статус и перспективы».

2 апреля. Ядерный семинар ОФВЭ. С. А. Артамонов. «Пучки протонов переменной энергии на СЦ-1000 ПИЯФ».

4 апреля. Теоретический семинар по ФКС. Р. А. Ниязов. «Туннельный интерферометр Ааронова – Бома на основе геликоидальных краевых состояний».

9 апреля. Ядерный семинар ОФВЭ. В. Т. Грачев. «Телескоп из трех пропорциональных камер с катодным съемом информации».

11 апреля. Теоретический семинар по ФКС. А. Цыпильников (Санкт-Петербургский государственный университет). «Обзор диаграммного метода Монте-Карло (Diagrammatic Monte Carlo)».

17 апреля. Теоретический семинар ОПР. А. В. Олейниченко. «Релятивистский метод связанных кластеров для модельных пространств с несколькими квазичастицами: на пути к эффективной реализации».

23 апреля. Ядерный семинар ОФВЭ. А. А. Дзюба. «Наблюдение CP-нарушения в распадах очарованных частиц».

24 апреля. Семинар ОМРБ. М. Д. Голубовский (Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН). «Третий тип близнецов и странности оплодотворения».

14 мая. Ядерный семинар ОФВЭ. А. А. Фетисов. «Парадокс Ольберса, или Почему небо черное».

15 мая. Общеинститутский семинар. М. М. Филатов (Elsevier Science and Technology). «Использование Scopus и ScienceDirect в исследовательской работе».

16 мая. Теоретический семинар по ФКС. А. О. Сорокин. «Функциональная ренормгруппа».

28 мая. Ядерный семинар ОФВЭ:

П. Г. Шаров (Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ). «Изучение энергетических спектров экзотических ядер ^{10}He и ^{17}Ne »;

Л. В. Григоренко (Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ). «Статус и перспективы исследований с пучками радиоактивных изотопов в ЛЯР ОИЯИ».

30 мая. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. В. Ю. Петров, А. А. Дзюба. «Пентакварки со скрытым чармом. Эксперимент и теория».

30 мая. Теоретический семинар по ФКС. П. Носов, Л. В. Штаркман. «Модель SYK: от нефермижидкости до AdS/CFT-дуальности».

5 июня. Общеинститутский семинар. Ю. Ц. Оганесян (Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ). «Периодическая таблица через 150 лет: сверхтяжелые элементы».

6 июня. Семинар ОМРБ. А. Г. Мясников (St. Jude Children's Research Hospital, USA; Centre for Integrative Biology, IGBMC, CNRS, Inserm, Université de Strasbourg, France). «Перспективы развития метода криоэлектронной микроскопии в исследовании биологических комплексов».

6 июня. Теоретический семинар по ФКС. С. В. Коняхин (Institut Pascal, France). «Модуляционная нестабильность солитонных возбуждений квантовой жидкости на основе экситон-поляритонов при резонансной накачке».

11 июня. Ядерный семинар ОФВЭ:

Г. Д. Шабанов. «Тридцатая годовщина поиска холодного ядерного синтеза и три статьи в Nature»;

В. А. Щегельский. «Выделение сигнала двухчастичных корреляций из данных по эксклюзивному рождению пар пионов в протон-протонных столкновениях на БАК».

18 июня. Ядерный семинар ОФВЭ. P. di Nezza (Laboratori Nazionali di Frascati Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Italia). «Internal Gas Targets at the LHC».

25 июня. Ядерный семинар ОФВЭ. И. Кресло (Университет Берна, Швейцария). «Argon Cube – архитектура масштабируемых нейтринных детекторов большой массы».

2 июля. Ядерный семинар ОФВЭ. Н. Ф. Бондарь. «Пропорциональные камеры мюонного детектора повышенной гранулярности для центральных регионов M2 и M3».

18 июля. Теоретический семинар по ФКС. С. В. Слизовский. «Поверхностные состояния в АВА (Бернал) и АВС (ромбоэдрическом) графите».

25 июля. Семинар ОМРБ:

А. М. Каганский (Школа биомедицины Дальневосточного федерального университета). «Регуляторные РНК из пищи: краткий обзор текущей литературы и перспективы для Bio2bio»;

Т. А. Штам. «Перспективы использования везикул растительного происхождения в качестве систем доставки биомолекул в клетки млекопитающих».

5 сентября. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. М. Класен (Вестфальский университет им. Вильгельма в Мюнстере, Германия). «Перспективы фотонной физики на будущих коллайдерах».

12 сентября. Теоретический семинар по ФКС. Д. Семенов, А. Квашнин (Сколковский институт науки и технологий). «Гидридная сверхпроводимость: современное состояние. Компьютерный дизайн новых материалов с оптимальными свойствами».

18 сентября. Теоретический семинар ОНР:

С. В. Козлов (Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова). «Functionalized Graphenes: Synthesis, Properties, Applications»;

М. К. Рабчинский (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН). «Моделирование энергетических и радиационных характеристик электронно-возбужденных состояний гетероядерного димера KRb».

26 сентября. Теоретический семинар по ФКС. В. И. Сбитнев. «Кватернионная алгебра на 4D сверхтекучем квантовом пространстве-времени».

1 октября. Ядерный семинар ОФВЭ. В. М. Соловьев. «Исследование свойств t -кварка в эксперименте ATLAS».

8 октября. Ядерный семинар ОФВЭ. А. А. Дзюба. «Изучение свойств J/ψ на установке КЕДР (по материалам диссертации Харламовой Т. А., Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск)».

9 октября. Семинар отдела нейтронной физики Отделения нейтронных исследований. O. Zimmer (Institut Laue–Langevin, France). «UCN Sources at ILL».

15 октября. Ядерный семинар ОФВЭ. Г. Е. Гаврилов. «Ресурсные исследования катодных стриповых камер CMS. Результаты и планы».

22 октября. Ядерный семинар ОФВЭ. С. В. Ченмарев. «Ядерно-физические исследования на реакторе TRIGA в Майнце (Германия)».

29 октября. Ядерный семинар ОФВЭ. Л. Х. Батист. « β -распад ядра ^{100}Sn ».

5 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ. Ю. А. Гавриков. «Методы прецизионного ориентирования кристаллов для коллимации пучков LHC».

12 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ. И. А. Митропольский. «Измерение времени жизни ^{124}Xe ».

19 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ. Д. Е. Соснов. «Конференция “Quark Matter 2019” и измерения эксклюзивных Y - и ρ -мезонов в ультрапериферических p -Pb-соударениях на БАК в эксперименте CMS».

26 ноября. Ядерный семинар ОФВЭ. А. П. Кашук. «Газонаполненные детекторы новейшего поколения».

3 декабря. Ядерный семинар ОФВЭ. В. В. Кольцов (Радиевый институт им. В. Г. Хлопина). «Стимуляция девозбуждения ядерных изомеров в плазме электрического взрыва проводников как составная часть плазменных технологий».

5 декабря. Теоретический семинар по ФКС. Ю. О. Четвериков. «Перколяционный фазовый переход в конгеляционном льду подледниковых водоемов».

10 декабря. Ядерный семинар ОФВЭ. В. В. Саранцев. «Ранние образования астрофизических объектов (по работам А. Д. Долгова)».

17 декабря. Ядерный семинар ОФВЭ. А. Е. Барзах. «Октуполярная деформация ядер».

18 декабря. Семинар ОМРБ. С. В. Григорьев. «Классификация фрактальных объектов методом малоуглового рассеяния нейтронов».

19 декабря. Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ. М. Г. Рыскин. «Физика высоких энергий (теория) до КХД-эры».

Конференции

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

В 2019 г. при участии Института было организовано 12 научных мероприятий (совещания, конференции и школы), в которых приняло участие более 1500 человек, из которых более 400 являются иностранными представителями мирового научного сообщества из таких стран, как Германия, Швеция, США, Швейцария, Япония, Китай, Нидерланды, Италия, Бельгия, Ирландия и т. д.





Проведенные мероприятия

1. XX Зимняя молодежная школа НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ по биофизике и молекулярной биологии. **25 февраля – 2 марта.**
2. 53-я Зимняя школа ПИЯФ. **2–7 марта.**
3. 53-я Зимняя школа по физике конденсированного состояния «Школа ФКС – 2019». **11–16 марта.**
4. Международное рабочее совещание «Холодные молекулы. Новая физика и фундаментальные симметрии». **3 апреля.**
5. Рабочее совещание коллаборации PREFER. **4–6 июня.**
6. Семинар, посвященный 85-летию профессора А. А. Ансельма. **13 июня.**
7. Пятый Международный симпозиум по теоретической и математической физике. **15–20 июня.**
8. VII Европейская конференция по рассеянию нейтронов (European Conference on Neutron Scattering (ECNS-2019)). **30 июня – 5 июля.**
9. V Международное совещание «Взаимодействие Дзялошинского – Мория и экзотические спиновые структуры» (DMI-2019). **8–12 июля.**
10. VI Всероссийский молодежный научный форум Open Science 2019. **13–15 ноября.**
11. Международное рабочее совещание «Квантовая химия материалов и молекул, содержащих переходные металлы, лантаноиды и актиноиды». **13–15 ноября.**
12. VIII Школа по физике поляризованных нейтронов «ФПН-2019». **12–13 декабря.**

Также в течение 2019 г. сотрудники НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ участвовали в 178 международных и российских конференциях в качестве докладчиков более 420 докладов.



Основные результаты научной деятельности 2019

Оформление обложки *Т. А. Парфеевой*
Корректоры: *Н. В. Силинская, Е. С. Степовая*
Компьютерная обработка, верстка: *Е. В. Веселовская, А. О. Павлова*

Отпечатано в издательско-полиграфическом отделе
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ на Konica Minolta bizhub PRO C1060L

188300, Гатчина Ленинградской обл., мкр. Орлова роща, д. 1
Зак. 324, тир. 100, уч.-изд. л. 12,5; 09.12.2020 г.