



Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова

Основные результаты научной деятельности 2010–2013



Основные результаты научной деятельности 2010–2013. – Гатчина Ленинградской обл.: Издательство ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт», 2014. – 132 с.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных результатов научных исследований ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт» за 2010–2013 гг. 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.

Ответственная за выпуск
Н. Е. Савицкая

Редакционная коллегия:
С. А. Артамонов
В. В. Воронин
Г. Ф. Михеев
В. Ю. Петров
В. В. Саранцев
С. В. Саранцева

ISBN 978-5-86763-332-5

© ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт», 2014

Оглавление

5	Введение
9	Теоретическая и математическая физика
23	Фундаментальные междисциплинарные исследования в нано-, био-, инфо- и когнитивных науках на базе рентгеновского, синхротронного и нейтронного излучений
37	Фундаментальные и прикладные исследования с использованием нейтронов
63	Фундаментальные и прикладные исследования с использованием протонов. Нейтринная физика
89	Фундаментальные и прикладные исследования с использованием тяжелых ионов
95	Физика ядерных реакторов и ускорителей
111	Ядерная медицина (производство изотопов, лучевая терапия, нанобиотехнологии для медицины)
125	Количественные показатели



Введение

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

В 2010 г. институт вошел в состав Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». С этого времени научные исследования и научно-технические разработки в ПИЯФ осуществляются в соответствии с Программой совместной деятельности организаций, участвующих в пилотном проекте по созданию НИЦ «Курчатовский институт».

В сентябре 2011 г. ПИЯФ был передан из Российской академии наук в ведение НИЦ «Курчатовский институт».

В рамках Программы совместной деятельности в ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт» ведутся исследования по следующим направлениям:

- теоретическая и математическая физика;
- фундаментальные междисциплинарные исследования в нано-, био-, инфо- и когнитивных науках на базе рентгеновского, синхротронного и нейтронного излучений;
- фундаментальные и прикладные исследования с использованием нейтронов (по данному направлению ПИЯФ в НИЦ «Курчатовский институт» является координирующей организацией);
- фундаментальные и прикладные исследования с использованием протонов; нейтринная физика;
- фундаментальные и прикладные исследования с использованием тяжелых ионов;
- физика ядерных реакторов и ускорителей;
- ядерная медицина (производство изотопов, лучевая терапия, нанобиотехнологии для медицины).

Научные работы сотрудников отмечены Ленинской и Государственными премиями, премиями Правительства РФ, академическими премиями. Три сотрудника избраны действительными членами, семь сотрудников – членами-корреспондентами Российской академии наук. в настоящее время в ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт» работает 1 878 человек, из них 529 научных сотрудников, 79 докторов и 266 кандидатов наук. Один сотрудник является членом, двое сотрудников – членами-корреспондентами Российской академии наук.

В ПИЯФ пять научных отделений, объединенных общей инфраструктурой:

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

Базовыми установками института являются исследовательский реактор ВВР-М (физический пуск осуществлен в декабре 1959 г., в эксплуатацию введен в конце 1961 г.) и протонный синхротрон СЦ-1000 на энергию 1 ГэВ (введен в эксплуатацию в 1970 г.). 2013 г. стал годом завершения строительства второго и третьего пусковых комплексов научно-исследовательского реакторного комплекса ПИК в соответствии с Постановлением РФ от 19 ноября 2012 г. № 1194. В завершающую стадию вошло создание изохронного циклотрона ионов Ц-80.

ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт» активно развивает научно-образовательные программы совместно с вузами России. В 2012 г. по инициативе М. В. Ковальчука, ставшего к тому времени деканом физического факультета СПбГУ, в университете была открыта новая кафедра нейтронной и синхротронной физики. В 2013 г. в СПбГУ была образована новая объединенная кафедра ядерно-физических методов исследования, в состав которой вошла и кафедра нейтронной и синхротронной физики.

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

- Европейским центром ядерных исследований (ЦЕРН, Швейцария);

- Европейским центром нейтронных исследований – Институтом Лауэ – Ланжевена (ILL, Франция);

- Исследовательским центром DESY (Германия);

- Институтом им. Пауля Шеррера (PSI, Германия);

- Объединенным институтом ядерных исследований (ОИЯИ, Россия) и др.

2010–2013 гг. были для института временем перемен, корректировки планов, открытия широких перспектив и выработки новых стратегий развития. Подводя итоги этих лет, в первую очередь следует отметить традиционно высокий уровень научно-исследовательских работ, проводимых в ПИЯФ. По всем перечисленным направлениям в институте получены значительные результаты, во многом определяющие уровень мировой науки в этих областях.

Особо следует отметить работы, связанные с реакторным комплексом ПИК. Строительство реактора ПИК началось в 1976 г. После чернобыльской аварии проект реактора был подвергнут полной ревизии и переработке к 1991 г. с учетом новых норм безопасности. Строительство было возобновлено, однако средства выделялись нерегулярно и с перерывами, графики строительных работ не выполнялись. Тем не менее благодаря самоотверженному труду сотрудников института под руководством директоров академика В. А. Назаренко (1934–2006) с 1994 по 2006 г. и профессора В. М. Самсонова с 2006 до 2012 г. реакторный комплекс ПИК удалось сохранить.



Визит президента Российской Федерации В. В. Путина на РК ПИК 30 апреля 2013 г.



В 2009 г. был сдан в эксплуатацию первый пусковой комплекс зданий и сооружений, а в 2011 г. был осуществлен физический пуск. Однако недостатки проекта и просчеты предыдущего периода в планировании и организации работ явно не позволяли достичь цели Распоряжения Правительства РФ от 11 августа 2007 г. № 1039-р – сдачи в 2012 г. реакторного комплекса ПИК в эксплуатацию на проектной мощности 100 МВт.

Ситуация кардинально изменилась после перевода ПИЯФ из РАН в НИЦ «Курчатовский институт». Была обеспечена стабильность получения выделяемых Правительством РФ на сооружение реакторного комплекса средств, из Программы совместной деятельности было в 2 раза увеличено финансирование института, была утверждена в государственных органах экспертиза-корректировка исходного проекта с учетом изменений, возникших в результате длительного строительства. В соответствии с этим проектом корректировки в декабре 2013 г. завершилось строительство второго и третьего пусковых комплексов. Сдача работ строителями (генеральный подрядчик – ЗАО «Концерн Титан-2», генеральный директор В. С. Рябов) происходила системно и поэтапно в течение 2013 г. и завершилась 20 декабря. Весь комплекс из 38 зданий и сооружений общей площадью 66 тыс. кв. м предъявлен в Ростехнадзор для получения заключения о соответствии построенных объектов проекту.

После окончания оформительских процедур и сдачи построенного комплекса в эксплуатацию начнутся работы по наладке, испытанию и аттестации систем на соответствие нормативам в области использования атомной энергии, оформление разрешений на этапы энергетического пуска реактора и ввода его в эксплуатацию. В декабре 2013 г. сданы на экспертизу два проекта по модернизации и реконструкции ряда технологических систем с их реализацией в 2014–2019 гг. В рамках этих проектов будет построен необходимый для эксплуатации ПИК комплекс изотопной очистки тяжелой

воды отражателя, будет проведено совершенствование построенных объектов, технологических систем и инженерной инфраструктуры реакторного комплекса ПИК в целях обеспечения возросших требований к безопасности ядерных установок, а также к подготовке комплекса для использования физиками.

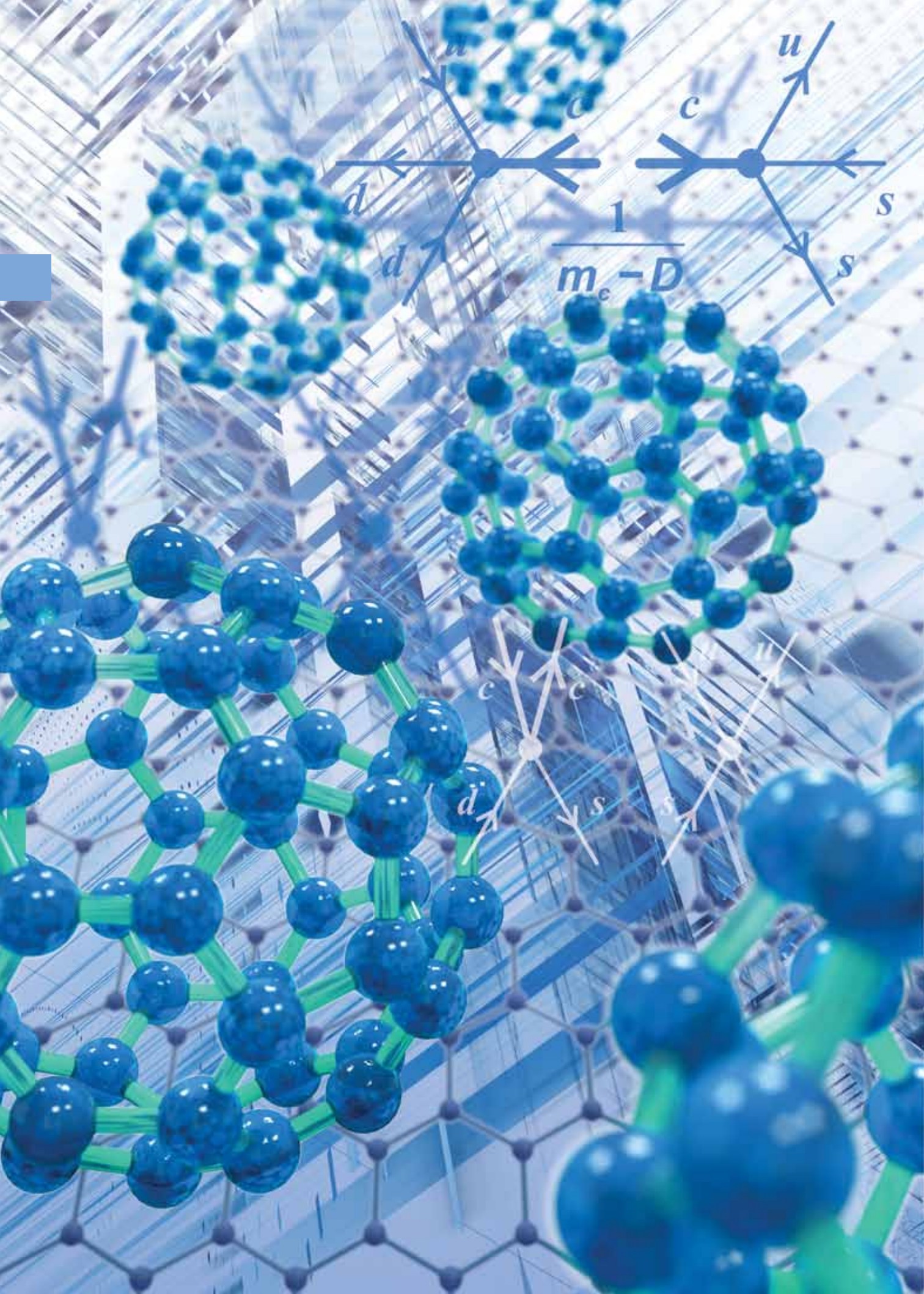
Кроме того, в период 2014–2020 гг. планируется разработка и реализация проекта оснащения реакторного комплекса ПИК современными экспериментальными станциями для проведения научных исследований.

Проект реактора ПИК является современным и востребованным – сейчас в мире есть три подобных по классу работающих «пучковых» реактора: HFR (Франция), модернизированный HFIR (США) и FRM II (Германия).

В настоящее время по поручению Правительства РФ проводятся мероприятия по организации Международного центра нейтронных исследований на базе высокопоточного реактора ПИК. Важной составляющей проекта является привлечение пользователей широкого круга – физиков, химиков, биологов, материаловедов, инженеров. Реализация данного проекта позволит скоординировать и объединить усилия больших международных научных коллективов для работы на территории России, даст возможность молодежи принимать участие в исследованиях и в инновационных процессах во многих областях, будет способствовать росту престижа российской науки в мире.

Данное издание представляет собой сборник кратких описаний наиболее существенных результатов научных исследований ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт» за 2010–2013 гг. 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.

*Директор ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт»
член-корреспондент РАН В. Л. Аксенов*



Интегрируемость и AdS/CFT-соответствие	10
Спектроскопия низколежащих барионов.	11
Процессы на Большом адронном коллайдере.	12
Многочетные вычисления в теории суперструны.	13
Новый механизм электрического дипольного момента нейтрона.	14
Проводимость квантовых проволок	15
Электрические и магнитные свойства графена	16
Bulk-SQUID-эффект в дискретном сверхпроводнике.	17
Фотоэлектроны в фуллеренах	18
Интерференция когерентного пучка наночастиц	19
Ионы в накопительных кольцах.	20
Источники энергии ветра.	21

Гипотеза AdS/CFT-соответствия, предложенная Н. Maldacena в 1997 г., говорит о том, что конформная теория поля (CFT) эквивалентна некоторой теории струны в пространстве анти-де Ситтера (AdS), т. е. существует соответствие, которое позволяет перевести величины одной теории в величины другой. В четырехмерной суперсимметричной теории ($N = 4$ SUSY теория) – это аномальные размерности, в струнной теории – энергия возбужденных состояний. Эта симметрия была впервые найдена в $N = 4$ SUSY теории Янга – Миллса и в настоящее время становится одним из основных инструментов в квантовой теории поля, непрерывно захватывая новые области (такие как AdS/QCD – в квантовой хромодинамике (QCD), интенсивно используется и в теории конденсированного состояния). Благодаря работам последних лет выяснилось, что исходная теория является вполне интегрируемой и допускает точное решение. Это первый пример нетривиальной квантовой теории поля в четырех измерениях, которая может быть точно решена. Отделение теоретической физики (ОТФ) ПИЯФ можно считать одним из мировых лидеров в области AdS/CFT-соответствия.

$N = 4$ SUSY теория Янга – Миллса – конформная теория, характеристиками которой являются размерности операторов (критические индексы). Как оказалось, вычисление этих размерностей может быть проведено в некоторой эквивалентной теории суперструны, причем если в теории поля размерности вычисляются при малой константе связи, то в струнной теории – при большой, и наоборот. В этом и состоит смысл AdS/CFT-соответствия. Точное решение позволяет найти решение одновременно двух теорий: теории Янга – Миллса и соответствующей теории струны.

В работах ОТФ указанное решение было проверено с обеих сторон – как со стороны теории Янга – Миллса, так и со стороны струны. В теории поля было использовано уравнение БФКЛ, суммирующее, по существу, все графики теории возмущений и позволяющее установить поведение аномальных размерностей вблизи их сингулярных точек. Систематическое разложение уравнения БФКЛ позволяет определить критические индексы во всех порядках теории возмущений. Аномальные размерности были вычислены и непосредственно. Высокая симметрия теории позволила достичь рекордного уровня в 5–6 петель.

Со стороны струны проверка точного решения была основана на квазиклассическом разложении, справедливом для длинных струн. Были развиты, однако, методы, которые позволяют найти все порядки разложения при сильной константе связи. Удалось показать, что рассмотренная теория является только одним из примеров точно решаемых теорий, и были найдены другие примеры AdS/CFT-соответствия.

Все проверки подтвердили найденное ранее точное решение и полную интегрируемость AdS/CFT-теории, которую в настоящее время можно считать доказанной. Развитые методы были уже с успехом применены к другим задачам: вычислению многопетлевых поправок в Стандартной модели, а также к поведению амплитуд рассеяния при высоких энергиях. В частности, в самой $N = 4$ SUSY теории Янга – Миллса удалось установить поведение при высоких энергиях не только при малых, но и при больших константах связи.

1. Velizhanin V. N. // Phys. Lett. B. 2011. V. 696. P. 560–562.

2. Gromov N. et al. // JHEP. 2011. V. 1109. P. 029.

3. Fadin V. S., Lipatov L. N. // Phys. Lett. B. 2012. V. 706. P. 470–476.

Спектроскопия низколежащих барионов

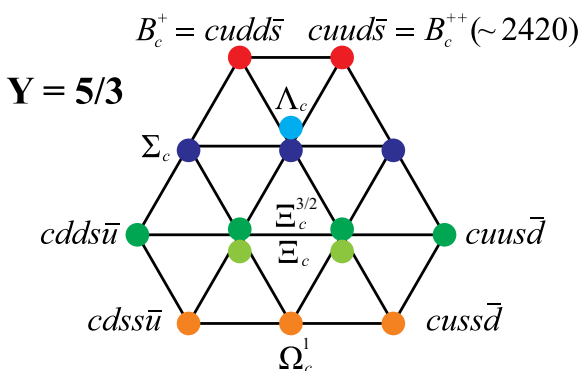
Адронная спектроскопия при низких энергиях является традиционной темой для теоретиков ПИЯФ. В 2011–2013 гг. были получены новые важные результаты, относящиеся как к анализу свойств барионных резонансов, следующих из экспериментальных данных, так и к описанию этих свойств в рамках теоретических подходов, восходящих к квантовой хромодинамике (КХД).

Впервые был проведен полный парциальный фазовый анализ, одновременно описывающий реакции упругого рассеяния, реакции неупругого рассеяния и реакции фоторождения на нуклоне. Включение всего массива доступных экспериментальных данных сильно повысило надежность определения барионных резонансов и их свойств, поскольку резонансы одновременно наблюдались во всех доступных каналах, и те резонансы, брэнчинги которых в некоторых каналах были малы, не могли ускользнуть от анализа в других каналах.

Проведенный фазовый анализ в настоящее время считается наиболее надежным из существующих, и его результаты составляют значительную часть данных Particle Data Group в области легких барионов. Результатом анализа является значительное уточнение свойств известных барионных результатов, а также открытие нескольких новых резонансов с интересными свойствами.

Одновременно свойства барионов были рассмотрены с теоретической точки зрения в рамках приближения среднего поля. Это приближение может быть выведено в КХД в пределе большого числа цветов и основано на идее использования эффективного низкоэнергетического лагранжиана, включающего в себя мезоны и конститuentные кварки. Даже не специфицируя его вида (он может быть, однако, выведен в моделях, мотивированных КХД, например в модели инстантонного вакуума), можно получить значительное число соотношений между свойствами барионных резонансов и провести их полную классификацию. Анализ всех резонансов с массами до 2 ГэВ показал, что они полностью укладываются в эту схему, причем никаких лишних состояний не должно быть. Эта теория имеет ряд преимуществ по сравнению с кварковой моделью и призвана ее заменить. Выведенные модельно-независимые соотношения выполняются здесь гораздо лучше, чем в кварковой модели. Если задан мезонный лагранжиан, то можно вычислить любые характеристики барионных резонансов последовательным и самосогласованным образом с точностью, значительно лучшей, чем в кварковой модели.

Одним из следствий рассматриваемого подхода является сделанное в 2011 г. в Отделении теоретической физики предсказание 15-плета экзотических барионов, состоящих из одного чармованного кварка или ботом-кварка. Массы новых барионов предсказываются однозначно, они должны быть очень узкими или стабильными по сильному взаимодействию. Грубые оценки показывают, что новые барионы должны рождаться в экспериментах на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРН со скоростью ~ 1 млн в год.



1. Anisovich A. V., Beck R., Klempf E., Nikonov V. A., Sarantsev A. V., Thoma U. // Eur. Phys. J. A. 2012. V. 48. P. 15.
2. Diakonov D., Petrov V., Vladimirov A. // Phys. Rev. D. 2013. V. 88. P. 074030.

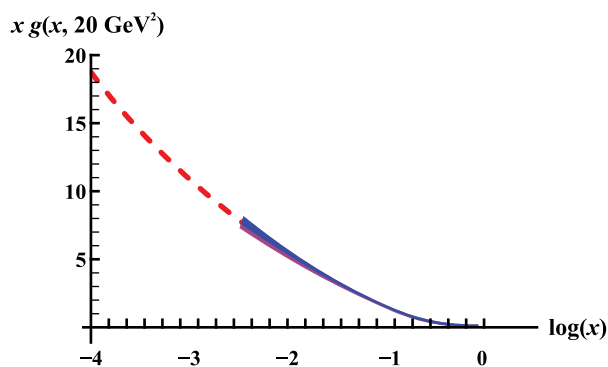
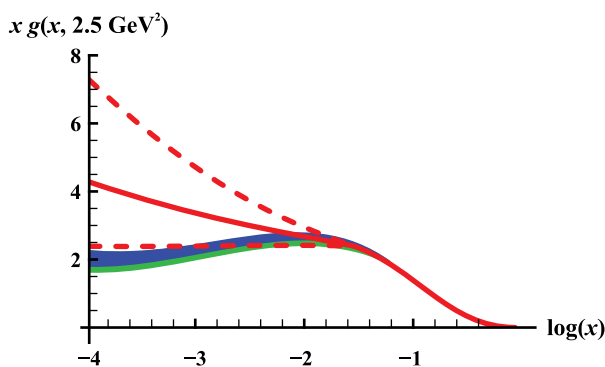
Процессы на Большом адронном коллайдере

Многие работы Отделения теоретической физики (ОТФ) связаны с Большим адронным коллайдером (БАК) в ЦЕРН. В последние три года благодаря исследованиям ОТФ была разработана модель, описывающая взаимодействия адронов высоких энергий как на малых, так и на больших расстояниях. Модель восходит к квантовой хромодинамике (КХД), но включает в себя также дифракционные процессы, учитывает абсорбционные поправки и позволяет проследить непрерывный переход от жестких к мягким взаимодействиям. Впервые стало возможно надежно рассчитывать сечения дифракционных процессов, которые составляют основной фон к поиску новой физики на БАК. С помощью указанной модели были предложены несколько новых экспериментов на БАК с рождением частиц в эксклюзивных процессах из центральной области.

БАК предоставляет уникальные возможности по измерению партонных распределений при больших переданных импульсах. Однако, как было показано в работах ОТФ в последнее время, коэффициентные функции, вычисленные в приближении, следующем за главным логарифмическим

приближением (NLO), содержат нефизические вклады бесконечно больших расстояний. В результате стандартные распределения партонов в NLO смешивают партоны разных сортов. В работах ОТФ была предложена новая, физическая, схема факторизации и регуляризации, свободная от этих недостатков и не смешивающая партоны разных сортов. Новая схема позволяет точнее учитывать влияние массы тяжелых кварков в процессе эволюции и более удобна для сравнения результатов теоретических расчетов с экспериментом.

Был предложен также новый метод измерения глюонной партонной функции при очень малых x , основанный на инклюзивном рождении C -четных чармониев и боттониев со спином 0 и 2. Метод дает возможность прецизионно измерить глюонную структурную функцию нуклона в широком диапазоне x от 10^{-2} вплоть до рекордных 10^{-6} . Эта структурная функция особенно интересна, поскольку для нее имеются предсказания, основанные на БФКЛ-помероне. Ее изучение в области малых x позволит детально судить о применимости БФКЛ-теории при энергиях БАК.



Функция распределения глюонов, соответствующая рождению чармониев (справа) и соответствующая рождению боттониев (слева)

1. Ryskin M. G., Martin A. D., Khoze V. A. // Eur. Phys. J. C. 2011. V. 71. P. 1617.
2. Khoze V. A., Martin A. D., Ryskin M. G. // Eur. Phys. J. C. 2013. V. 73. P. 2503.
3. Diakonov D. I., Ryskin M. G., Shuvaev A. G. // JHEP. 2013. V. 1302. P. 069.

Многопетлевые вычисления в теории суперструны

Тот или иной вариант теории суперструн является в настоящее время основным кандидатом на роль теории, объединяющей все взаимодействия. Предполагается, что в десяти измерениях эта теория свободна от расходимостей. Тем не менее до последнего времени в данной теории не был даже известен рецепт для построения многопетлевых диаграмм в теории возмущений.

В работах Отделения теоретической физики, выполненных в последние годы, эта задача была решена, и показано, что в критической размерности в рамках теории возмущений теория суперструны может быть сделана конечной. Был развит совершенно новый подход к теории возмущений, использующий чрезвычайно высокую симметрию, имеющую место в теории суперструны. Эта симметрия приводит к набору тождеств Уорда, которые полностью (с точностью до множителя) определяют вклад диаграмм с данной топологией.

Традиционный подход предполагает, что многопетлевые диаграммы вычисляются интегрированием по модулям римановых поверхностей с данной топологией и определенной на них спиновой структурой. Эта стратегия, во-первых, встречается

с концептуальными трудностями, по крайней мере на уровне трех петель. Во-вторых, такие вычисления приводят к нарушению суперсимметрии на мировом листе, поскольку амплитуды явно зависят от двумерного поля гравитино.

Как показано в данной работе, нарушение суперсимметрии связано в традиционном подходе с неопределенностью, появляющейся в типичном интеграле по супермодулям. Эта неопределенность может быть разрешена, если интеграл дополнить интегралом по границе супермодулярного пространства. С учетом доопределения выражение для вклада римановой поверхности с данной топологией суперсимметрично и не содержит расходимостей. Оно полностью удовлетворяет также системе тождеств Уорда.

Таким образом, в настоящих работах впервые указан способ вычисления многопетлевых диаграмм в теории суперструны. В качестве примера в них приведено выражение для вклада двухпетлевой диаграммы. Это выражение конечно и удовлетворяет всем требованиям симметрии.

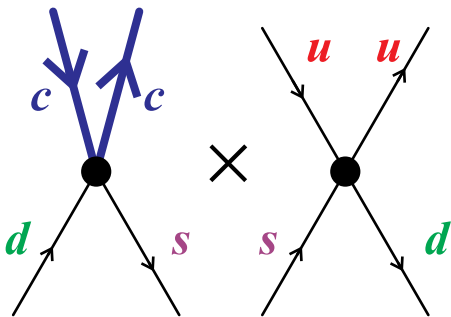
Новый механизм электрического дипольного момента нейтрона

Процессы с нарушением CP -симметрии, хотя и разрешены в Стандартной модели, доступны наблюдению только в ограниченном числе случаев. Поэтому наблюдение CP -нарушения в новых процессах, например наблюдение электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона, являлось бы чрезвычайно интересным. Кроме того, ЭДМ нейтрона представляет собой объект, чувствительный к новой физике, например к проявлению суперсимметрии.

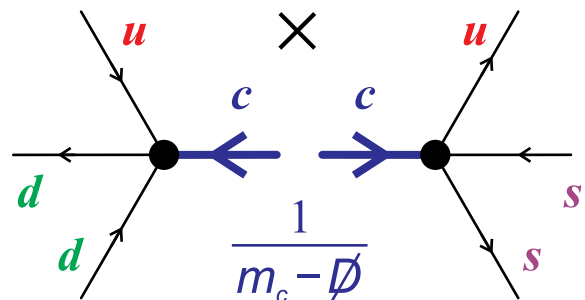
Стандартный механизм появления ЭДМ нейтрона в Стандартной модели был разработан много лет назад и основан на так называемых пингвинных диаграммах. Поскольку такие диаграммы содержат петли, они оказываются сильно подавленными, и ЭДМ в Стандартной модели считается очень малым.

В 2011–2012 гг. в Отделении теоретической физики был предложен другой механизм

появления ЭДМ, основанный на рассмотрении вклада c -кварка. Хотя этот вклад подавлен массой c -кварка (и потому не рассматривался ранее), соответствующая ему диаграмма не содержит петель и потому велика. Кроме того, в отличие от обычного, он не обращается в нуль в киральном пределе (т. е. когда массы легких кварков обращаются в нуль). В результате новый механизм приводит в Стандартной модели к ЭДМ, который примерно на полтора порядка больше ранее рассматривавшегося. Более точное вычисление требует знания адронных матричных элементов. Такое вычисление сейчас проводится. Хотя ЭДМ в Стандартной модели, вычисленный согласно новому механизму, все еще недоступен наблюдению современными экспериментальными средствами, он должен играть принципиальную роль в ее расширении, например в минимальной суперсимметричной модели.



Стандартный вклад

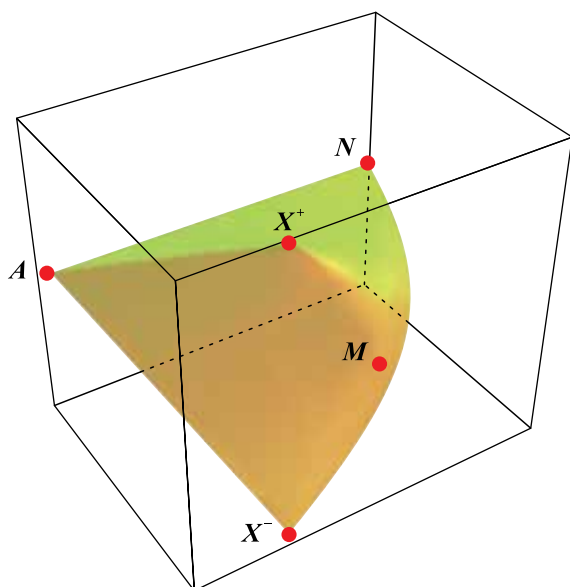


Новый вклад

1. Mannel T., Uraltsev N. // Phys. Rev. D. 2012. V. 85. P. 096002.
 2. Mannel T., Uraltsev N. // JHEP. 2013. V. 1303. P. 064.

Проводимость квантовых проволок

В последние годы происходит быстрый прогресс в области создания микро- и наноструктур, проводящих электрический ток. По этой причине теория квантовых проволок привлекает значительное внимание. Известно, что проводимость квантовой проволоки обладает поразительными свойствами: в присутствии хотя бы одной примеси она равна нулю, если электроны отталкиваются, и, напротив, максимально возможному – баллистическому, если они притягиваются. От температуры кондактанс зависит степенным образом.



Трехмерный объект, координаты точек в котором соответствуют трем возможным значениям кондактансов для стыка трех проволок. Символами обозначены стационарные точки для решения уравнений перенормировки

Новый подход к теории этого явления был развит в Отделении теоретической физики в последнее время, как в рамках теории возмущений (методом ренормгруппы), так и для случая не малого потенциала. Возникающие явления рассмотрены на языке исходных электронов, что позволяет дать ясную физическую интерпретацию происходящим явлениям. В общем случае поведение кондактанса определяется квантовой нульмерной теорией поля, которая описывает временную динамику разницы фаз отраженных и прошедших электронов в точке контакта (примеси). Эта теория обладает своеобразной дуальностью, которая дает возможность связать кондактанс для притягивающихся и отталкивающихся электронов.

Свойства кондактанса в точке контакта (примеси) можно связать с дальним порядком, существующим в системе. Показано, что система находится в фазе Березинского – Костерлица – Таулесса: для притягивающихся электронов – в фазе, отвечающей сверхпроводимости, а для отталкивающихся – в фазе с нарушенной киральной симметрией. Указаны условия исчезновения дальнего порядка, при этом и кондактанс остается конечным.

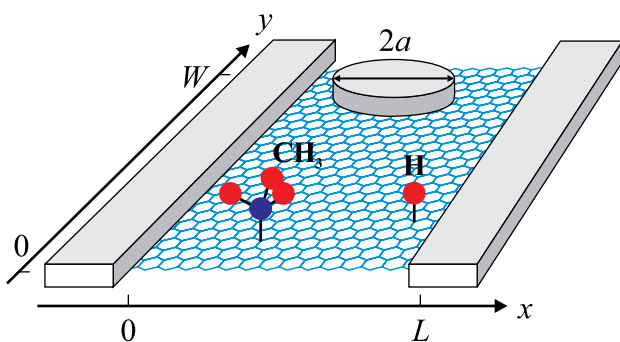
Очень интересная ситуация возникает, если рассматривается стык трех (и более) проволок. Возникающая теория носит черты теории поля с $SU(3)$ -симметрией. Были найдены стационарные точки ренормгруппы, которые определяют возможные значения кондактанса.

Развита также общая теория кинетических явлений в квантовых проволоках, находящихся в состоянии теплового равновесия. Эта теория сильно отличается от обычной, что связано с тем, что волновой пакет в одномерной системе не расплывается. Большую роль играет и дальний порядок, имеющийся в системе при нулевой температуре.

1. Aristov D. N., Wolfle P. // Phys. Rev. B. 2013. V. 88. P. 075131.
2. Protopopov I. V., Gutman D. B., Mirlin A. D. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 216404.
3. Afonin V., Petrov V. // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 97. С. 587–591.

Электрические и магнитные свойства графена

Сравнительно недавно открытое новое вещество (за открытие была присуждена Нобелевская премия) – графен интенсивно изучается во всем мире, и в частности в Отделении теоретической физики. Графен продолжает удивлять необычными свойствами, некоторые из которых отмечены в данной серии работ.



Подвешенный образец графена может продемонстрировать баллистическую проводимость и квантовый эффект Холла вплоть до комнатных температур. Несмотря на примеси, минимальная проводимость в дираковской точке остается равной e^2/h в широком интервале температур, поскольку дираковские фермионы «защищены» от локализации.

Основным механизмом возникновения сопротивления становится электрон-электронное взаимодействие и взаимодействие с фононами, отвечающими изгибу плоскости образца графена (последние представляют собой особо мягкую моду, поскольку закон дисперсии для них, в отличие от обычных фононов, $\omega \sim q^2$). Теория этих эффектов была построена в рассматриваемой работе. Оказалось, что проводимость за счет фононов

изгиба ведет себя как некоторая степень температуры с критическим индексом $\eta \sim 0,7$. Электрон-электронное взаимодействие также играет важную роль, экранируя потенциал деформации.

Транспортные свойства графена изучались также для двух близко расположенных слоев. На основе выведенного квантового кинетического уравнения была построена теория кулоновского увлечения (когда ток течет по одному из слоев и за счет кулоновского взаимодействия с носителями в другом слое создает в этом слое некоторую разность потенциалов в другом) и был вычислен коэффициент увлечения. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Коэффициент увлечения зависит от температуры и плотности носителей и имеет характерные особенности вблизи дираковской точки.

Чрезвычайно интересный эффект возникает при наложении сравнительно слабого магнитного поля (перпендикулярно двум слоям графена) на систему вблизи от точки нейтральности (где количество электронных и дырочных носителей совпадает). Неожиданно сопротивление увлечения сильно возрастает (это явление получило название Giant Magneto-Drift in Graphene), в то время как вдали от точки нейтральности наблюдается лишь обычное холловское увлечение. Как было показано, природа этого явления близка к аномальному эффекту Нернста в графене. Похожий механизм может объяснить также гигантское магнетосопротивление в точке нейтральности в графене.

1. Schutt M., Ostrovsky P. M., Titov M., Gornyi I. V., Narozhny B. N., Mirlin A. D. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 026601.

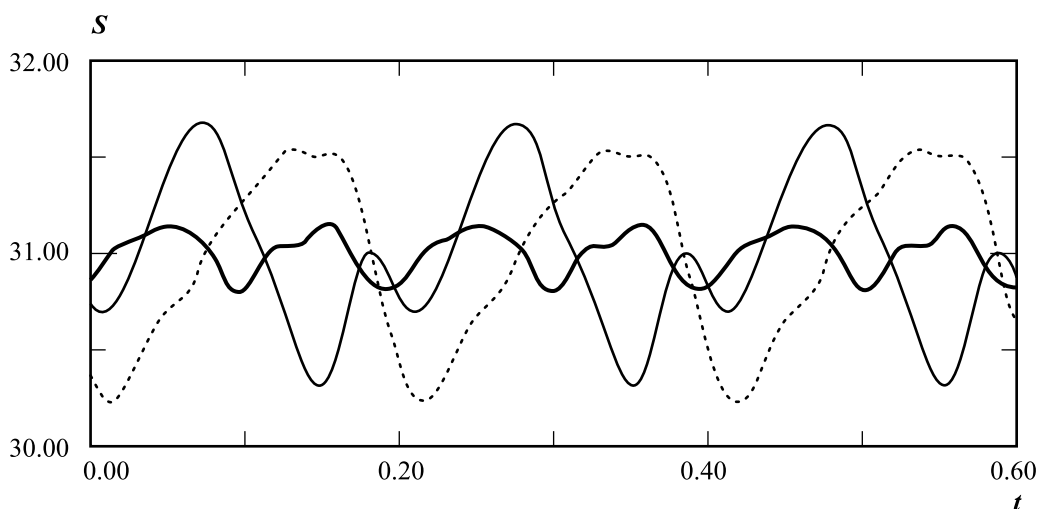
2. Titov M., Gorbachev R. V., Narozhny B. N., Tudorovskiy T., Schuett M., Ostrovsky P. M., Gornyi I. V., Mirlin A. D., Katsnelson M. I., Novoselov K. S., Geim A. K., Ponomarenko L. A. arXiv:1303.6264.

Bulk-SQUID-эффект в дискретном сверхпроводнике

Целый ряд высокотемпературных сверхпроводящих материалов реализуется в виде керамики, которую можно представить как систему сверхпроводящих гранул, связанных между собой джозефсоновскими контактами (дискретный сверхпроводник). Начавшиеся более двух десятилетий назад интенсивные экспериментальные исследования таких материалов обусловлены, в частности, поиском возможностей создания на их основе точных магнитометрических приборов (СКВИДов), работающих при температуре жидкого азота. В создаваемых радиочастотных СКВИДах (rf-squid) наблюдалось явление, получившее название bulk-SQUID-эффекта. Оно состоит в том, что, как можно было судить по отклику системы на внешнее воздействие, вся совокупность джозефсоновских переходов в исследуемом образце керамики начинала работать как единый джозефсоновский

контакт, т. е. генерировать периодическое напряжение. Несмотря на важность явления bulk-SQUID для практического применения дискретных сверхпроводников, до сих пор не было дано теоретического объяснения данного эффекта.

Нами впервые была построена теория bulk-SQUID-эффекта в дискретных сверхпроводниках. На примере двумерного дискретного сверхпроводника с внутренней пространственной стохастичностью (т. е. в случае, когда критические токи контактов и коэффициенты взаимодействия между контактами являются случайными величинами) было показано, что возникновение bulk-SQUID-эффекта в изученной системе обусловлено синхронизацией частот генерации всех составляющих СКВИД контактов. Продемонстрировано, что явление bulk-SQUID реализуется в широкой области изменения случайных параметров системы (рис.).

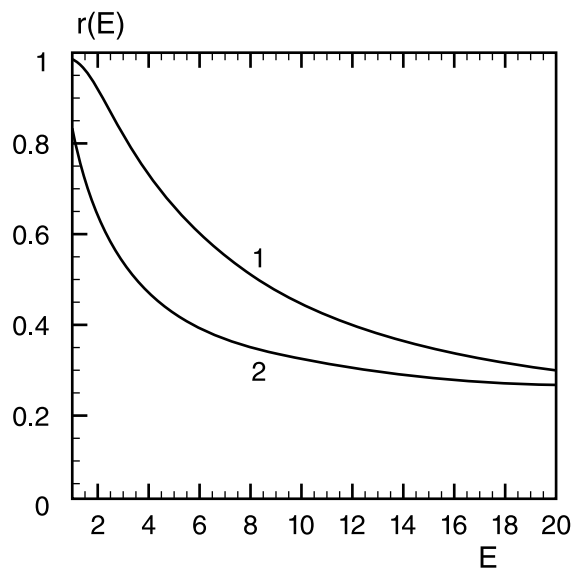


Зависимость напряжения, усредненного по всем контактам исследуемого СКВИДа, от времени при разных значениях случайных параметров системы. Из рисунка видно, что во всех рассмотренных случаях напряжение периодически, что говорит о реализации в системе эффекта bulk-SQUID

Фотоэлектроны в фуллеренах

В настоящее время интенсивно изучается, как экспериментально, так и теоретически, фотоионизация атома, находящегося внутри фуллеренной оболочки. Заранее было неясно, какова вероятность неупругих процессов в фуллерене при большой энергии фотоэлектронов. С одной стороны, вероятность взаимодействия с каждым электроном фуллеренной оболочки мала, с другой стороны, электронов там много (в наиболее исследованном фуллерене C^{60} их 360).

В данной работе удалось ответить на этот вопрос, т. к. большой размер оболочки позволил просуммировать ряд теории возмущений. Отметим, что это первый случай, когда в такого рода задаче удалось выйти за рамки учета только первых членов ряда теории возмущений. В результате показано, что начиная с энергий порядка 150 эВ и до энергий порядка 4 кэВ вероятность неупругих процессов в фуллеренной оболочке C^{60} при ионизации внутреннего атома близка к единице. Результат имеет следствия как для объяснения экспериментальных данных, так и для дальнейшего развития теории. Потери энергии фотоэлектрона в фуллеренной оболочке объясняют наблюдающееся резкое расхождение теоретических расчетов с экспериментальными данными в области 200 эВ. Кроме того, одним из следствий является то, что часто используемое описание влияния фуллеренной оболочки на фотоэлектрон с помощью «эффективного потенциала» является физически некорректным, и становится понятным, как это исправить.



Вероятность неупругих процессов в фуллеренной оболочке при фотоионизации внутреннего атома. По горизонтальной оси – энергия фотоэлектрона в кэВ; кривые 1 и 2 соответствуют фуллеренам C^{60} и C^{20}

Интерференция когерентного пучка наночастиц

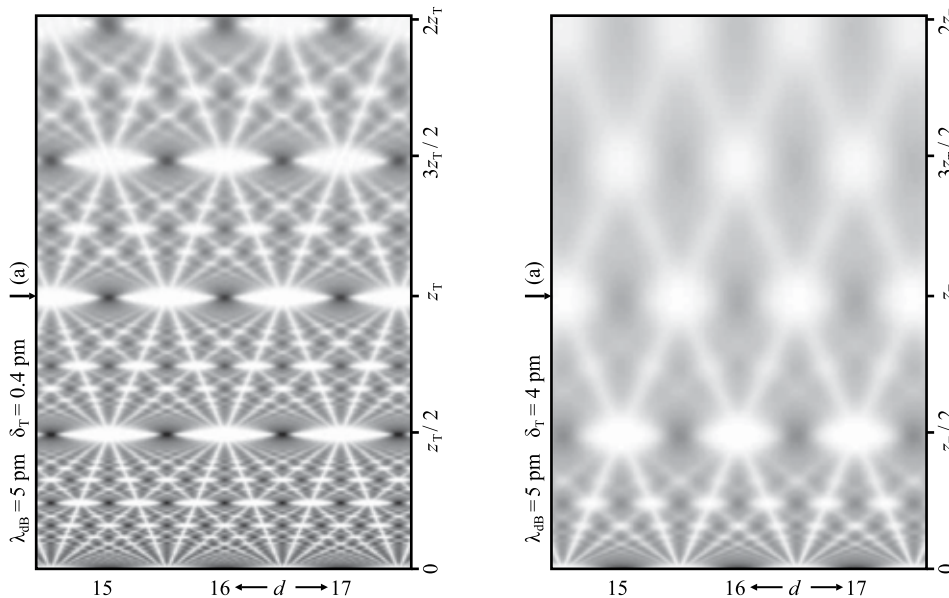
Изучено рассеяние когерентного пучка наночастиц (молекул фуллерена) на решетке, содержащей $N \gg 1$ щелей. Молекула фуллерена включает 60 атомов углерода. Атомы совершают тепловые колебания, обусловленные их рождением на тепловой пушке при температуре порядка 1 000 К. После впрыскивания молекул фуллерена в вакуумную камеру через сепаратор, оставляющий молекулы с желаемой длиной волны де Бройля (для молекул, движущихся со скоростью порядка 100 м/с, длина волны $\lambda_{dB} = 0,005$ нм), тепловые колебания атомов углерода сохраняются. (Подобное удержание температуры имеет место при залипании горячей жидкости в сосуд – термос, помещенный в вакуум.) Вычисление интеграла Фейнмана по путям, проходящим через все щели решетки, дает ясную картину появления интерференционного паттерна, возникающего по другую сторону

решетки. Для решеток, содержащих сколь угодно большое количество щелей, с расстояниями между щелями d , значительно превышающими длину волны частиц, возникающий интерференционный паттерн известен как ковер Тальбота, впервые наблюдаемый Генри Тальботом в 1836 г. В частности, имя Тальбота присвоено единице длины

$$z_T = 2 \frac{d^2}{\lambda_{dB}}$$

удобной при маркировке интерференционных паттернов в ближней зоне.

Из-за тепловых колебаний атомов фуллерена интерференционная картина размывается по причине разброса длин волн де Бройля от их среднего значения.



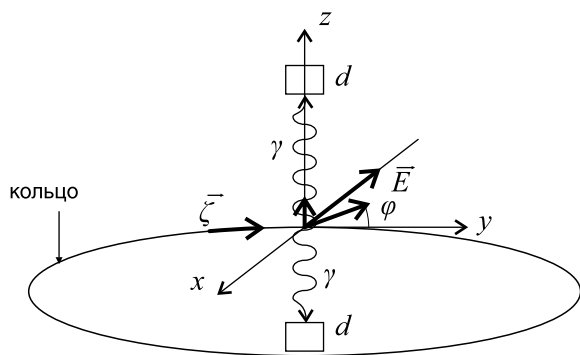
Слева показан частично размытый ковер Тальбота. Справа видно уже довольно сильное размытие ковра, при котором исчезают его тонкие узоры

Sbitnev V. I. Advances in Quantum Mechanics / Ed. by Paul Bracken. Rijeka: InTech, 2013. P. 183–211.

Ионы в накопительных кольцах

Предлагается теоретическая концепция создания, сохранения и контроля поляризации пучков многозарядных ионов в накопительных кольцах. Приводятся аргументы в пользу того, что водородоподобные ионы могут быть эффективно поляризованы путем оптической накачки зеемановских подуровней основного сверхтонкого уровня основного электронного состояния и что максимально достижимая поляризация ядер при этом может превосходить 90 %.

Для изучения возможности сохранения поляризации в процессе движения иона сквозь магнитную систему кольца оказалось полезным использовать понятие мгновенной оси квантования. Утверждается, что применение специальных магнитов, предложенных в Новосибирске и называемых сибирскими змеями, может помочь сохранить поляризацию пучка в кольце. Контроль за поляризацией пучка может осуществляться различными методами: путем измерения параметров Стокса излученных фотонов или путем измерения угловой зависимости вероятностей перехода для поляризованных ионов.



Важной мотивацией для создания пучков поляризованных ионов является возможность наблюдения эффектов несохранения пространственной четности в открываемых сверхтонким взаимодействием переходах в гелиеподобных многозарядных ионах. В таких переходах эффекты несохранения четности могут быть беспрецедентно велики для атомной физики. Также обсуждается возможность наблюдения эффектов несохранения четности, связанных с анапольным моментом ядер. Наконец, обсуждается возможный метод наблюдения электрического дипольного момента электрона на пучках поляризованных водородоподобных многозарядных ионов в накопительных кольцах (рис.).

Схема возможного эксперимента по наблюдению электрического дипольного момента электрона. E – радиальное электрическое поле, d – детекторы циркулярно поляризованных квантов, ζ – вектор поляризации, φ – угол прецессии электрона при наличии ЭДМ. Наличие ЭДМ можно наблюдать как асимметрию вылета циркулярно поляризованных фотонов относительно плоскости кольца

Labzowsky L. et al. // Phys. Rep. 2011. V. 507. P. 1.

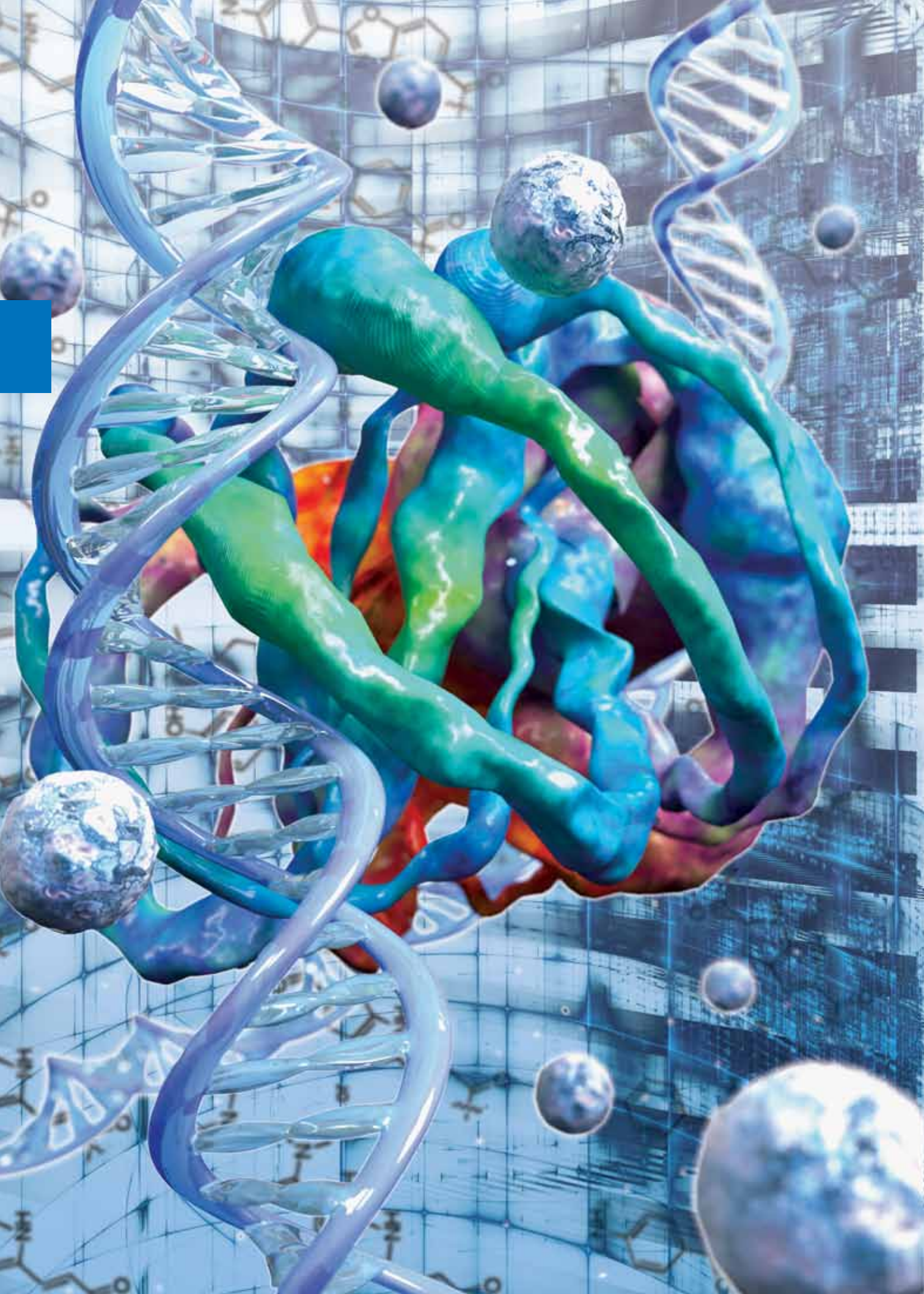
Теоретическое описание динамических процессов, связанных с фазовыми переходами воды (конденсация и испарение), в атмосфере Земли, представляет собой главную проблему современной теории атмосферной гидродинамики. Примерно одна сотая потока солнечной энергии, достигающего Земли, расходуется на компенсацию потерь трения и на поддержание мощности ветровой циркуляции атмосферы нашей планеты. Как отмечал еще в 1960-х гг. пионер теории хаоса Э. Н. Лоренц, выяснение вопроса о том, что определяет этот «коэффициент полезного действия» преобразования солнечной энергии в ветровую, представляет собой одну из основных проблем динамики атмосферы. Вплоть до недавнего времени не было предложено никаких теоретических концепций, которые позволили бы оценить мощность атмосферной циркуляции на основе наблюдаемых планетарных параметров.

В настоящей работе в рамках разработанного ранее теоретического подхода конденсационной гидродинамики впервые показано, что среднеглобальная мощность выделения потенциальной

энергии при конденсации водяного пара в атмосфере Земли хорошо совпадает с наблюдаемой мощностью атмосферной циркуляции, составляя порядка одного процента от мощности солнечной радиации. Эта оценка получена с использованием наблюдаемой средней величины осадков и температуры поверхности Земли. Также показано, что полученное выражение для мощности циркуляции остается справедливым в широком интервале величины скорости конденсации (осадков), которая меняется на четыре порядка при переходе от широкомасштабной глобальной циркуляции, характеризующейся линейными масштабами, превышающими 10^3 км, к компактным интенсивным вихрям (циклонам, торнадо).

Полученные результаты вызвали горячие дискуссии в научном сообществе, т. к., по признанию специалистов (в частности, редколлегии журнала *Atmospheric Chemistry and Physics* – ведущего мирового журнала в области физики атмосферы), представляют собой «фундаментально новый взгляд» на природу атмосферной динамики, нуждающийся в дальнейшем развитии.

1. Makarieva A. M., Gorshkov V. G., Nefiodov A. V. // *Phys. Lett. A*. 2011. V. 375. P. 2259–2261.
2. Makarieva A. M., Gorshkov V. G. et al. // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 1039–1056.



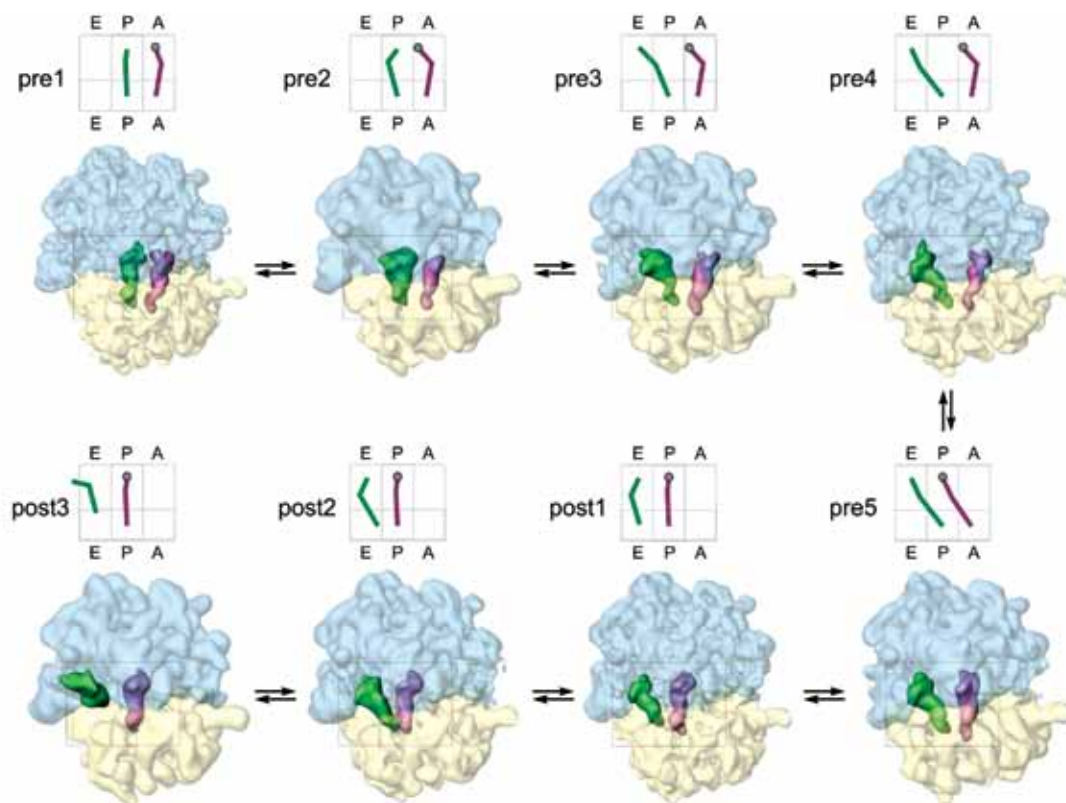
Фундаментальные междисциплинарные исследования в нано-, био-, инфо- и когнитивных науках на базе рентгеновского, синхротронного и нейтронного излучений

Динамика рибосомы и траектории движения тРНК в процессе транслокации.	24
Новый АТФ-зависимый фактор сборки хроматина	25
Фрактальная модель организации хроматина.	26
Механизм включения check-point у дрожжей <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	27
Связанные с нейронами внеклеточные металлопептидазы мозга и защита от них лекарственных пептидов	27
О механизмах координации внутриклеточных процессов.	28
На пути познания внутриклеточного протеома	29
мРНК гена <i>ABCA1</i> и уровень белка <i>ABCA1</i> в макрофагах, активированных М-CSF, у пациентов с артериальным стенозом	30
Определение перспективной мишени для терапии синдрома приобретенного иммунодефицита (СПИД)	31
Механизм энзиматического контроля гомологической рекомбинации и гиперрекомбинации в <i>Escherichia coli</i>	32
Особенности регуляции синтеза рибофлавина у активного продуцента – <i>Bacillus subtilis</i>	33
Изменение трансгликозилирующих свойств альфа-галактозидазы методами белковой инженерии.	34
Структура и механизмы действия человеческих белков TIP49A/B	35

Динамика рибосомы и траектории движения тРНК в процессе транслокации

Явление спонтанной обратной транслокации, впервые обнаруженное и детально изученное сотрудниками лаборатории биосинтеза белка Отделения молекулярной и радиационной биофизики А. Л. Коневагой и Ю. П. Семеновым, было применено для постановки элегантного эксперимента по изучению новых важнейших промежуточных состояний в процессе транслокации. Замедленная реакция обратной транслокации позволила получить образцы рибосом на различных этапах транслокации для изучения методами криоэлектронной микроскопии (крио-ЭМ). После реконструкции полученных изображений и компьютерного анализа были получены 50 различных

структур транслоцирующей рибосомы и впервые воссозданы детальные траектории движения тРНК внутри рибосомы. Полученные данные внесли существенный вклад в понимание молекулярного механизма самого сложного этапа цикла элонгации – транслокации и в глобальную теорию функционирования одного из важнейших наномеханизмов живой клетки – рибосомы. Изучение транслокации является не только фундаментальной научной задачей, знание детального молекулярного механизма транслокации позволит усовершенствовать существующие и разработать новые классы антибактериальных агентов (антибиотиков).



Структуры рибосомных комплексов, полученные методом крио-ЭМ, классифицированные по положениям тРНК. Обозначены пре- и посттранслокационные состояния, над структурами схематически изображены положения тРНК

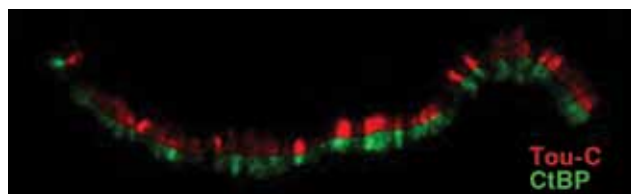
Fischer N., Konevega A. L., Wintermeyer W., Rodnina M. V., and Stark H. // Nature. 2010. V. 466. P. 329–333.

Новый АТФ-зависимый фактор сборки хроматина

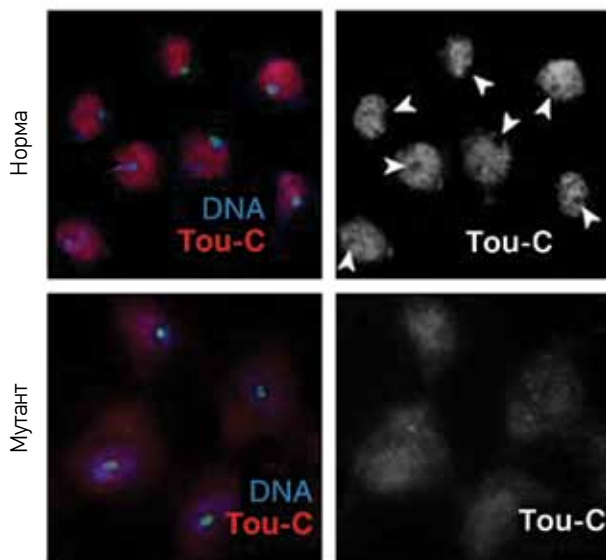
В лаборатории генетики эукариот Отделения молекулярной и радиационной биофизики выявлен новый АТФ-зависимый фактор сборки хроматина – комплекс ToRC, образованный белками Toutatis, CtBP и ISWI. Наличие всех трех компонентов комплекса ToRC необходимо для его оптимальной ферментативной активности. Комплекс ToRC является консервативным в эволюции: аналогичный комплекс hToRC, состоящий из белков hCtBP, TIP5 и SNF2h, был выделен и из клеток человека. Показано, что именно белок – корепрессор CtBP отвечает за привлечение этого комплекса

к специфическим сайтам хромосом. Показано, что Tou и CtBP функционируют как репрессоры генов пронеурального комплекса Achaete-Scute и что Tou необходим для осуществления репрессорной функции CtBP. Таким образом, мы показали, что участие CtBP в репрессии генетической активности по крайней мере частично опосредовано привлечением фактора сборки и ремоделирования хроматина ToRC к сайтам его активности.

Исследование является частью цикла работ, удостоенного премии им. И. В. Курчатова за лучшую работу в области научных исследований 2012 г.



Нами выявлен новый фактор сборки хроматина – ToRC, состоящий из трех белков – Tou, CtBP и ISWI. Показана колокализация белков Tou и CtBP в хромосоме (флюоресцентная микроскопия)



Белок – репрессор CtBP необходим для направленной локализации собирающего хроматин комплекса ToRC в ядре

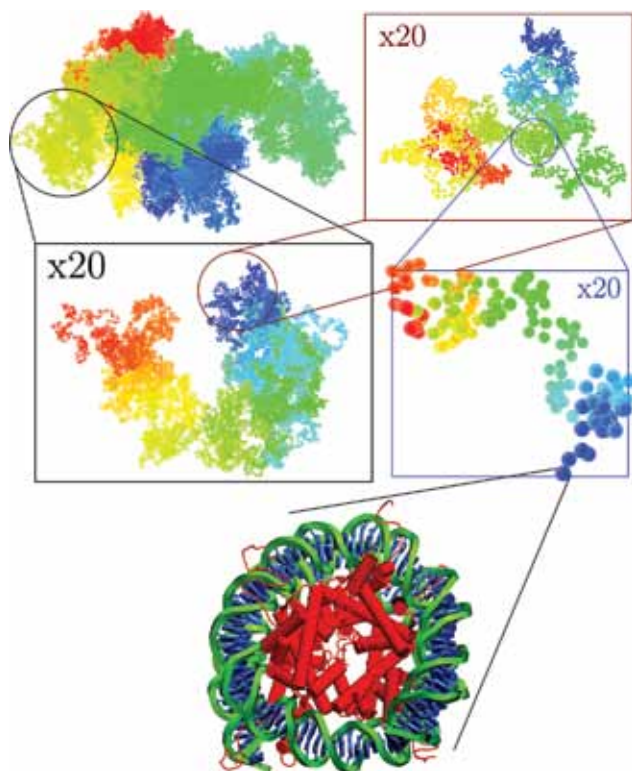
У нормальных особей комплекс ToRC выявляется в ядрах клеток (показано стрелками). У мутантов по гену *CtBP* локализация комплекса в клетках изменена – он не привлекается специфически в ядра клеток

Emelyanov A. V., Vershilova E., Ignatyeva M. A., Pokrovsky D. K., Lu X., Konev A. Y., and Fyodorov D. V. // Genes Dev. 2012. V. 26. No. 6. P. 603–614.

Фрактальная модель организации хроматина

Генетический материал высших организмов (в т. ч. человека) представляет собой сложный комплекс белков и ДНК – хроматина, который очень плотно заполняет ядро клетки, при этом позволяя работать механизмам синтеза белков и деления клетки. В 1970-х гг. был открыт структурный элемент хроматина – нуклеосома, в 1997 г. ее структура стала известна на атомном уровне. Несмотря на многолетнее изучение, существует тысячекратный разрыв между нуклеосомой (10 нм) и структурами, наблюдаемыми в оптический микроскоп (10 мкм). В лаборатории биофизики макромолекул Отделения молекулярной и радиационной

биофизики с помощью рассеяния нейтронов была получена уникальная информация о недостающих звеньях структурной иерархии хроматина. Было установлено, что хроматин является фракталом. Фракталы – это самоподобные структуры с поистине универсальной встречаемостью, от атомных процессов до самой Вселенной. Наши исследования добавили в этот ряд хроматин. Используя математический анализ полученных данных, мы создали трехмерную фрактальную модель хроматина, которая поможет объяснить, каким образом устроено клеточное ядро (рис.).



Трехмерная фрактальная модель наднуклеосомной структуры хроматина (последовательные увеличения). Каждый элемент структуры – нуклеосома, состоящая из 24 тыс. атомов

1. Lebedev D., Filatov M., Kuklin A. et al. // FEBS Lett. 2005. V. 579. P. 1465.
2. Isaev-Ivanov V., Lebedev D., Lauter H. et al. // Phys. Solid State. 2010. V. 52. P. 1063.
3. Ilatovskiy A., Lebedev D., Filatov M. et al. // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. No. 10. P. 102217.
4. Илатовский А., Лебедев Д., Филатов М. и др. // Цитология. 2012. Т. 54. Вып. 4. С. 298.
5. Ilatovskiy A., Lebedev D., Filatov M. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2012. V. 351. P. 012007.

Механизм включения check-point у дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*

Клетки эукариот обладают специализированным ответом на повреждения ДНК, названным check-point, который задерживает прохождение клеточного цикла и облегчает репарацию повреждений ДНК. Активация check-point осуществляется каскадом фосфорилирования белков, ключевым из которых является киназа Rad53. После завершения процесса удаления повреждения ДНК необходимо выключить check-point, что позволяет клетке продолжить движение по циклу. Как осуществляется этот процесс, не было известно. В лаборатории генетики эукариот Отделения молекулярной и радиационной биофизики была выделена коллекция мутантов дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, нарушающих метаболические процессы в хроматине. Мы изучили свойства мутации *hsm6-1*. Генетический анализ показал, что данная мутация является аллелем гена *PSY4*. Белок Psy4 входит в состав фосфатазного комплекса Pph3-Psy2-Psy4,

биохимическая функция которого состоит в дефосфорилировании гистона γ H2A. Другой комплекс, состоящий из двух субъединиц Pph3-Psy2, дефосфорилирует белок Rad53. Впервые показано, что между этими комплексами существует равновесие, регулируемое концентрацией гистона γ H2A в ядре клетки. При завершении репарации субстрат комплекса Pph3-Psy2-Psy4 гистон γ H2A исчезает, комплекс диссоциирует, освобождая субъединицу Psy4. Концентрация комплекса Pph3-Psy2 резко возрастает, и он быстро дефосфорилирует белок Rad53, останавливая тем самым check-point. Таким образом, показано, что ген *PSY4* играет ключевую роль в регуляции выхода клеток из остановки клеточного цикла, вызванного повреждениями ДНК.

Исследование является частью цикла работ, удостоенного премии им. И. В. Курчатова за лучшую работу в области научных исследований 2012 г.

Федоров Д. В., Ковальцова С. В., Евстюхина Т. А., Пешехонов В. Т., Черненко А. Ю., Королев В. Г. // Генетика. 2013. Т. 49. № 3. С. 328–336.

Связанные с нейронами внеклеточные металлопептидазы мозга и защита от них лекарственных пептидов

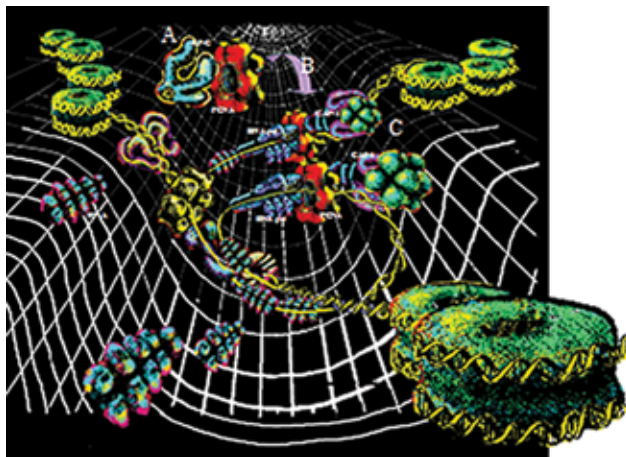
В лаборатории биополимеров Отделения молекулярной и радиационной биофизики в 2012–2013 гг. Е. С. Кропотовой и М. И. Мосевичим при мягкой обработке детергентом выделенных аксонных окончаний (синапсом) получены в растворимой форме и охарактеризованы четыре пептидазы (ферменты, гидролизующие пептиды). Два из этих ферментов (NEMP1 и NEMP3) обнаружены впервые. Определены активаторы ферментов. В естественном состоянии пептидазы прикреплены к внешней стенке аксонных окончаний нейронов. В межклеточной среде мозга они могут участвовать в физиологически обусловленном контроле пептидных

нейромедиаторов, но могут также разрушать пептиды, вносимые в мозг в терапевтических целях. Это разрушение нежелательно, и пептиды могут быть защищены их специфической модификацией. В работе авторами установлено, что лекарственный пептид может быть защищен от действия пептидаз NEMP1 и NEMP2 введением на концах пептида аминокислоты бета-аланина, что открывает путь к повышению терапевтической эффективности лекарственных пептидов – прежде всего в лечении нейродегенеративных заболеваний.

1. Mosevitsky M. I., Kropotova E. S., Nikiforova Y. L. // FENS Abstract. 2012. V. 6. P. 052.18.
2. Kropotova E. S., Mosevitsky M. I. // FEBS Journal. 2013. V. 280 (Suppl. 1). P. 483.3.

О механизмах координации внутриклеточных процессов

Обеспечение координации внутриклеточных процессов чрезвычайно важно для правильного функционирования клетки. Такая координация обеспечивается различными межмолекулярными взаимодействиями. Нами всесторонне изучен белок PCNA (ядерный антиген делящихся клеток), который отличается большим количеством взаимодействующих с ним белков-партнеров. Собственные экспериментальные, а также литературные данные дали возможность показать, что полная четвертичная структура PCNA имеет вид двойного кольца, в котором кольца взаимодействуют своими обратными сторонами. Таким образом, лицевые стороны остаются открытыми для взаимодействия с другими белками. Предложена структурная модель, согласно которой PCNA играет роль белка-организатора с широкими координирующими функциями, связывающими многие процессы, идущие в клеточном ядре при репликации и репарации ДНК (рис.). Впервые показано участие PCNA в процессах гликолиза и его роль в канцерогенезе, что подтверждает ключевую роль данного белка в интерактоме. Все эти данные были обобщены в монографии и докторской диссертации С. Н. Нарыжного.



Модель координирующего действия PCNA при репликации хроматина. (А) Репликативный фактор RFC связывается с PCNA (двойное кольцо красного цвета) и (В) загружает его на ДНК, которая в месте репликации с помощью других белков расплетена и освобождена от нуклеосом. (С) RFC отделяется от PCNA, ДНК-полимераза присоединяется к комплексу PCNA со стороны направления полимеразной реакции репликации. При этом хроматиновый фактор CAF-1 взаимодействует с другой стороной двойного кольца PCNA, загружая нуклеосомы на ДНК и восстанавливая исходную структурную организацию хроматина

1. Нарыжный С. Н. // Креативная хирургия и онкология. 2010. № 4 (Приложение). С. 43.
2. Naryzhny S. N., Lee H. // FEBS Lett. 2010. V. 584. No. 20. P. 4292–4298.

На пути познания внутриклеточного протеома

После завершения программы «Геном человека» схожая задача стоит и в получении информации обо всех белках человека, т. е. его протеоме. Соответственно в 2010 г. стартовал международный проект «Протеом человека», цель которого – инвентаризация всех белков человека и выяснение взаимодействий между ними. Из-за своего огромного объема данный проект носит хромосомотцентричный подход, т. е. разные страны в проекте отвечают за белки, кодируемые разными хромосомами. Россия взяла ответственность за белки 18-й хромосомы. Лаборатория протеомики Отделения молекулярной и радиационной биофизики работает в тесном контакте с ФГБУ «ИБМХ» РАН, головной организацией в проекте «Протеом человека». В рамках этого проекта нами был разработан уникальный подход для оценки количества различных белковых молекул (размера протеомов)

в отдельных клетках на основе двумерного электрофореза. С его помощью проведена оценка количества разных видов белковых молекул в простейшей клетке бактерии и в клетке человека (рис.). По нашим оценкам, каждая отдельная специализированная клетка человека содержит как минимум 70 000 разных видов белковых молекул. Подсчет детектируемых с его помощью белковых пятен, представляющих различные белковые молекулы с использованием красителей разной чувствительности, получение формулы этой зависимости и экстраполяция ее в область максимальной чувствительности при условии анализа белков от единичной клетки позволяют оценить, сколько всего разных видов белковых молекул присутствует в клетке. Современные методы детектирования белков по своей чувствительности не позволяют это сделать в реальном эксперименте.

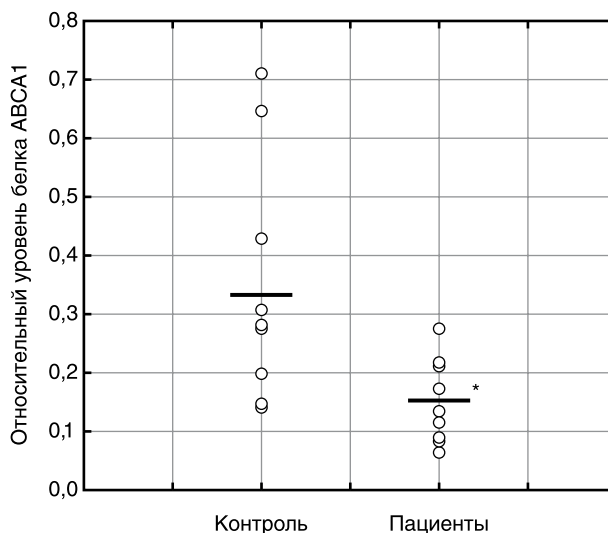


Двумерный электрофорез белков высокого разрешения

1. Archakov A., Zgoda V., Kopylov A., Naryzhny S., Chernobrovkin A., Ponomarenko E., Lisitsa A. // *Expert Rev. Proteomics*. 2012. V. 9. No. 6. P. 667–676.
2. Ponomarenko E., Naryzhny S., Poverennaya E. et al. // *HUPO 12th Annual World Congress*, 2013. P. 126.
3. Naryzhny S., Lisitsa A., Zgoda V., Ponomarenko E., Archakov A. // *HUPO 12th Annual World Congress*, 2013. P. 274.
4. Ponomarenko E., Naryzhny S., Poverennaya E. et al. // *FEBS*. 2013. V. 280 (Suppl. 1). P. 635.
5. Naryzhny S., Lisitsa A., Zgoda V., Ponomarenko E., Archakov A. // *FEBS*. 2013. V. 280 (Suppl. 1). P. 633.
6. Zgoda V., Kopylov A., Tikhonova O. et al. // *J. Proteome Res*. 2013. V. 12. No. 1. P. 123–134.

мРНК гена *ABCA1* и уровень белка *ABCA1* в макрофагах, активированных M-CSF, у пациентов с артериальным стенозом

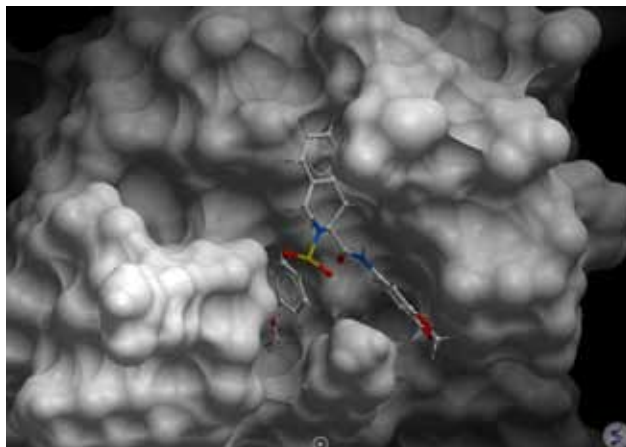
В лаборатории молекулярной генетики человека Отделения молекулярной и радиационной биофизики проведено исследование экспрессии гена – транспортера холестерина *ABCA1* при атеросклерозе. Данное исследование выполнялось при сотрудничестве с ПСПбГМУ им. акад. И. П. Павлова. Объектом исследования были макрофаги, полученные путем дифференцировки моноцитов, выделенных из периферической крови пациентов с атеросклерозом коронарных артерий. В ходе эксперимента было определено содержание мРНК гена *ABCA1* и белка *ABCA1* в макрофагах у пациентов с атеросклерозом, а также в контрольной группе лиц без сердечно-сосудистых заболеваний. В результате было выявлено увеличение уровня экспрессии гена *ABCA1* и одновременное снижение содержания белка *ABCA1* в макрофагах больных атеросклерозом (рис.). Такой интересный эффект может быть связан с тем, что при атеросклеротическом поражении сосудов макрофаги накапливают большое количество холестерина, что в свою очередь может ускорять деградацию белка *ABCA1*. Удаление избыточного холестерина из макрофагов сосудистой стенки, которое происходит при участии *ABCA1*-транспортера, имеет первостепенное значение для защиты сердечно-сосудистой системы от развития атеросклероза. Поэтому зафиксированное в данном исследовании снижение содержания белка *ABCA1* может отражать нарушения транспорта холестерина, которые имеют место у пациентов с атеросклерозом.



Уровни белка *ABCA1* в макрофагах для группы пациентов и контрольной группы, (*) – $p = 0,01$

Определение перспективной мишени для терапии синдрома приобретенного иммунодефицита (СПИД)

В работе в рамках многостороннего, в том числе международного, сотрудничества в 2010–2011 гг. участвовала лаборатория биополимеров Отделения молекулярной и радиационной биофизики. Актуальность исследования определяется тем, что опасное вирусное заболевание – синдром приобретенного иммунодефицита (СПИД) находится в центре внимания современной молекулярной медицины. Антиретровирусная терапия с применением, в частности, аномальных нуклеозидов существенно снизила смертность от вируса иммунодефицита человека (ВИЧ), но в то же время привела к появлению широкого спектра мутантных вирусов, устойчивых к терапии. Разработка анти-ВИЧ-вакцин пока не увенчалась существенным успехом из-за чрезвычайной вариабельности вируса и наличия ряда внутриклеточных депо для его укрытия. Чтобы преодолеть проблему вирусной устойчивости, необходимо выявить белки и белковые регуляторные факторы клетки-хозяина, участвующие в репликации ВИЧ, и использовать их в качестве терапевтических мишеней. В работе впервые показано, что белок NIPP1, являющийся регуляторной субъединицей PP1, влияет на дефосфорилирование РНК-полимеразы II клетки-хозяина, вероятно, путем вытеснения PP1 из полимеразного комплекса, и тем самым NIPP1 может быть перспективной мишенью для терапии ВИЧ-инфекции.



Наиболее низкоэнергетическая конформация F3 активатора транскрипции ВИЧ-1 в сайте D4 белка PP1

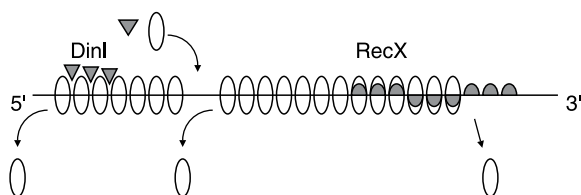
Jerebtsova M. ..., Egorov V. V. ..., Petukhov M. G. ..., Orlov Yu. N. et al. // Mol. Cell. Biochem. 2011. V. 347. P. 79–87.

Механизм энзиматического контроля гомологической рекомбинации и гиперрекомбинации в *Escherichia coli*

В лаборатории молекулярной генетики Отделения молекулярной и радиационной биофизики установлен механизм энзиматического контроля гомологической рекомбинации и гиперрекомбинации в бактерии *Escherichia coli*.

Белок RecA – ключевой фермент гомологической рекомбинации в бактериях. Формируя филамент на однонитевой ДНК, RecA обеспечивает поиск гомологии между двумя молекулами ДНК и обмен нитями. Некоторые мутантные формы RecA вызывают гиперрекомбинацию. Эта функция не всегда дает преимущество клетке и ограничена различными механизмами, которые представляют интерес.

Белок RecX действует как негативный регулятор. Показано, что он непосредственно взаимодействует с RecA, предотвращая удлинение филамента и вызывая диссоциацию с онДНК. Наиболее интересная функция у белка DinI. Хотя он существенно стабилизирует филамент, его ключевая роль – блокировать ДНК-трансферазную активность RecA (рис.). Сверхэкспрессия DinI ведет к почти восьмикратному уменьшению рекомбиногенной активности. Наибольшее увеличение частоты рекомбинации, а именно в 52 раза, наблюдается при экспрессии мутантного белка RecAD112R (табл.). Установлено, что происходит это за счет улучшения поиска гомологии и образования синаптического комплекса.



Сборка и разборка филамента RecA. DinI стабилизирует сборку. RecX вызывает диссоциацию филамента с ДНК.

- – RecA,
- ▽ – DinI,
- ▲ – RecX

Таблица. Относительная скорость рекомбинационных обменов и изменение экспрессии SOS-системы для разных RecA

RecA variant	ΔRER	ΔSOS
Wt	1,0	1,0
X21	2,9	1,7
Pa	8,3	1,8
E38K	7,8	8,8
X53	8,9	1,3
D112R	52,6	2,3
$\Delta 17Ec$	4,3	–
$\Delta recF$	0,5	–
<i>recO::Tn5</i>	0,6	–
<i>recR::Tn10-9</i>	0,6	–
$\Delta recX$	1,1	–
$\Delta dinI$	1,7	–
<i>recX ind</i>	0,76	–
<i>dinI ind</i>	0,13	–

Байтин Д. М., Дудкина А. В., Бахланова И. В. // Мол. биол. 2013. Т. 47. № 2. С. 181–191.

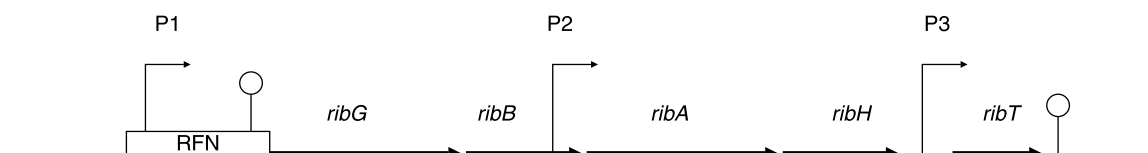
Особенности регуляции синтеза рибофлавина у активного продуцента – *Bacillus subtilis*

В лаборатории биополимеров Отделения молекулярной и радиационной биофизики в 2012 г. получены важные новые данные о взаимодействии структурных элементов оперона биосинтеза незаменимого витамина – рибофлавина (rib-оперон) у сенной палочки *Bacillus subtilis*. Методом удлинения праймера определена структура стартов транскрипции внутренних промоторов оперона P2 и P3, каждый из которых регулирует считывание генетической информации (транскрипции) своей части оперона.

Методами тонкого генетического манипулирования промоторы P1, P2 и P3 вместе с их стартами транскрипции выделены, клонированы и помещены порознь в выбранную область генома *B. subtilis* (ген *amy*) таким образом, что по активности экспрессии регулируемого ими репортерного гена (точнее, по активности продукта этого гена – фермента бета-галактозидазы) удалось измерить относительную силу промоторов. При этом было обнаружено парадоксальное явление: промоторы P2 и P3 при автономном испытании их порознь в составе соответствующих фрагментов

оперона значительно различаются по транскрипционной активности. Промотор P3, регулирующий транскрипцию концевой гена *ribT*, в несколько раз превосходит по активности основной промотор P1. Промотор P2, наоборот, в десятки раз слабее промотора P1. При этом ни P2, ни P3 не регулируются флавином. Однако известно, что при транскрипции всего *rib*-оперона под контролем основного промотора P1 все элементы этого оперона транскрибируются согласованно в полицистронную мРНК. И это несмотря на наличие нескольких промоторов, различающихся по транскрипционной активности и механизму регуляции.

Неожиданно самым сильным промотором оказался P3, регулирующий транскрипцию «таинственного» гена *ribT*, функция которого до сих пор неясна. Это дает основания для поиска продукта, кодируемого этим геном, и для определения его функциональной активности и роли в регуляции всего оперона. Такая программа открывает дополнительные возможности в создании новых промышленно перспективных суперпродуцентов рибофлавина.



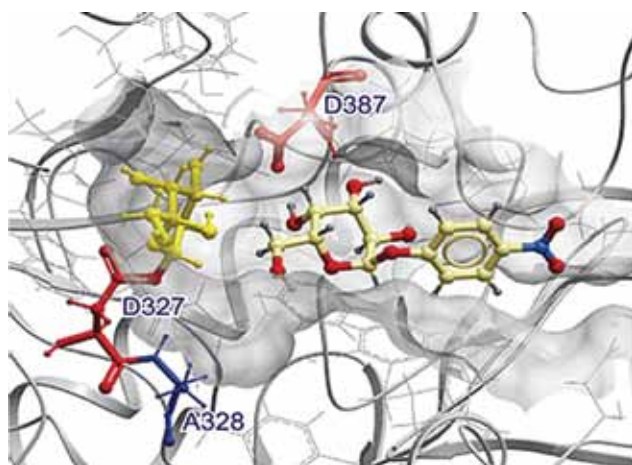
Структура *rib*-оперона *Bacillus subtilis*

Изменение трансгликозилирующих свойств альфа-галактозидазы методами белковой инженерии

Известно, что ферменты – самые эффективные катализаторы (ускорители) химических реакций, изобретенные Природой. Они ускоряют химические процессы (например, гидролиз, т. е. разрушение каких-либо полимеров) в 10^{17} раз и позволяют им проходить в очень мягких условиях (без жестких органических кислот, щелочей и растворителей и при физиологических температурах). Альфа-галактозидазы, в частности, «откусывают» концевые сахарные остатки (галактозы), быстро укорачивая галактозосодержащие полимеры. Фермент альфа-галактозидаза из термофильной бактерии *Thermotoga maritima*, который был предметом исследований в лаборатории энзимологии Отделения молекулярной и радиационной биофизики, оказался способным не только расщеплять все возможные связи между галактозами ($\alpha 1,2$ -, $\alpha 1,3$ -, $\alpha 1,4$ - и $\alpha 1,6$ -), но и катализировать реакцию, обратную природной. Было показано, что альфа-галактозидаза может синтезировать новые олигогалактозиды, что существенно проще

и дешевле методов органической химии, традиционно используемых для этих целей.

Специалистами лаборатории была разработана стратегия изменения этого фермента с целью снижения его способности гидролизовать галактозные связи и увеличения способности направленно синтезировать заданные альфа-дигалактозиды. Благодаря использованию компьютерных методов, наличию информации о трехмерной структуре этого фермента и его природных свойств удалось найти те структурные элементы (аминокислотные остатки) внутреннего устройства альфа-галактозидазы, которые необходимо заменить, чтобы фермент оказался способным синтезировать строго определенные галактозиды с повышенным выходом. Теоретические расчеты были успешно подтверждены экспериментально, и был получен эффективный инструмент для направленного и дешевого синтеза альфа-галактозосодержащих соединений с высокими выходами.



Стереорепрезентация активного центра мутантной формы альфа-галактозидазы из *Thermotoga maritima*

Бобров К. С., Борисова А. С., Энейская Е. В., Иванен Д. Р., Шабалин К. А., Кульминская А. А., Рычков Г. Н. // Биохимия. 2013. Т. 78. Вып. 10. С. 1422–1435.

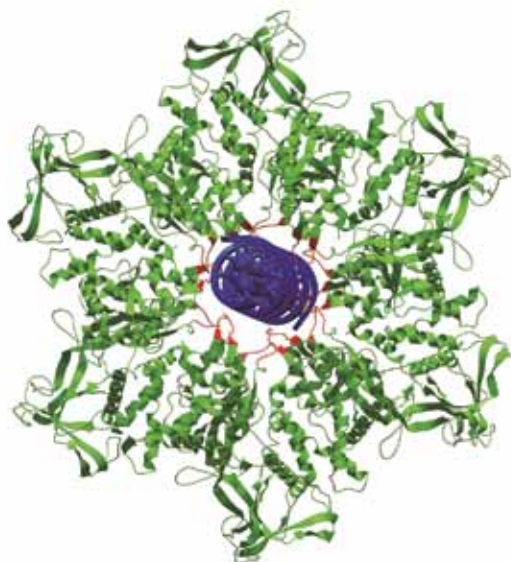
Структура и механизмы действия человеческих белков TIP49A/B

В лаборатории биофизики макромолекул Отделения молекулярной и радиационной биофизики совместно с коллегами, студентами и аспирантами Петербургского государственного политехнического университета, университета Поля Сабатье (Тулуза) и колледжа Биркбек (Лондон) проводились широкомасштабные теоретические и экспериментальные исследования механизмов действия белков TIP49A и TIP49B человека, являющихся неотъемлемыми для жизнедеятельности эукариотических клеток. Эти белки относятся к семейству АТФаз класса AAA+, входят в ремоделирующие хроматин комплексы TIP60, SWR1 и INO80 и играют важнейшую роль в большинстве процессов жизнедеятельности человеческих клеток, таких как транскрипция, репарация ДНК, митоз и апоптоз, и поэтому вовлечены во многие заболевания человека, особенно в канцерогенез.

В этой работе были разработаны оптимальные методы клонирования, экспрессии и очистки рекомбинантных белков семейства TIP49, а также впервые была получена кристаллическая структура гексамерных комплексов белков TIP49B (код

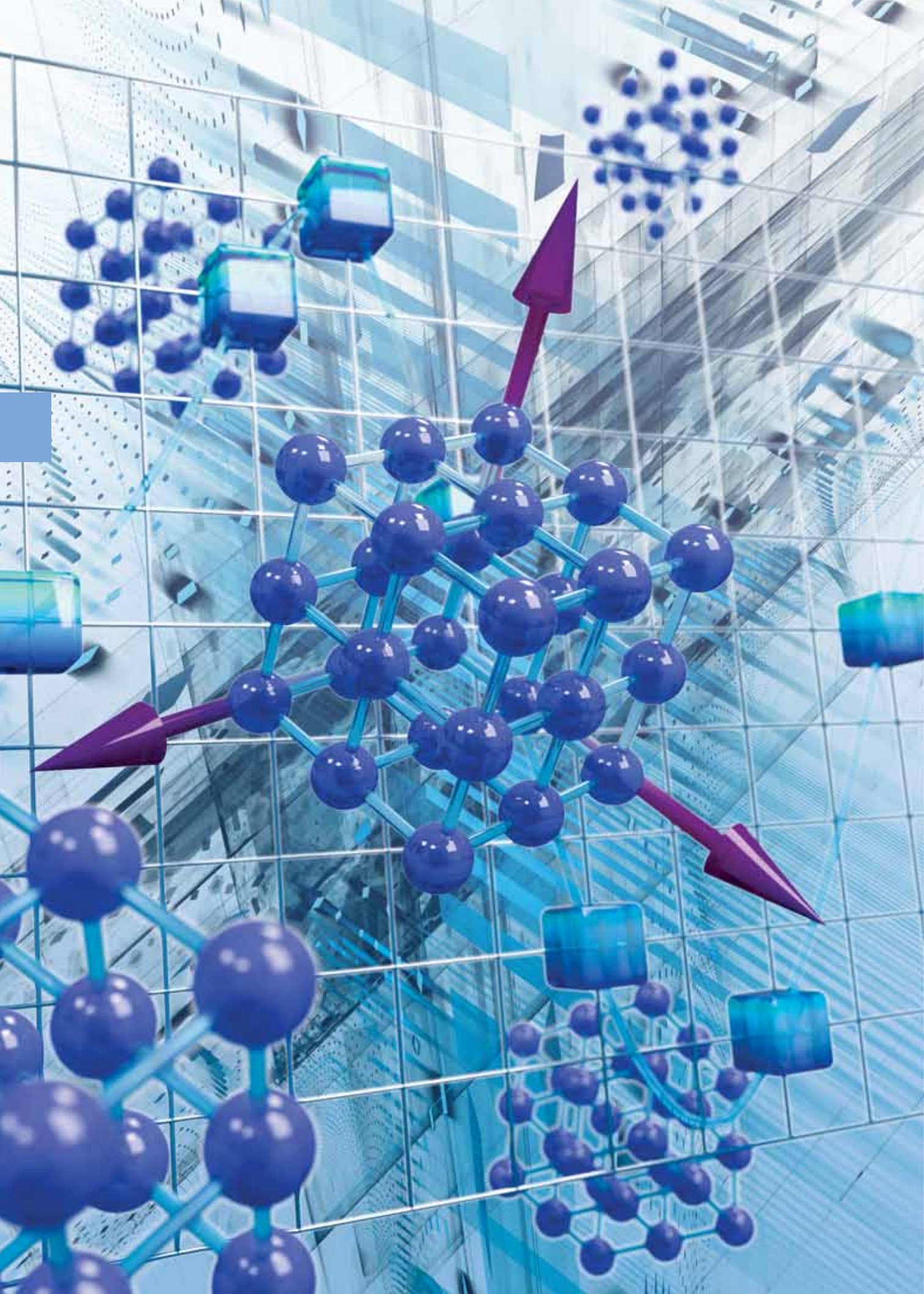
PDB: 3UK6). На этой основе по гомологии были построены полноатомные модели комплексов белков TIP49A, смешанных комплексов TIP49A / TIP49B и их мутантных форм. Была исследована крупномасштабная подвижность этих комплексов с помощью вычислительных методов молекулярной динамики и предложены альтернативные структуры мультимерных комплексов белков TIP49, включая кольцевые (от 5 до 11 субъединиц), а также большое разнообразие спиральных филаментов.

С помощью методов малоуглового рассеяния нейтронов и рентгеновского излучения, а также динамического светорассеяния впервые показано, что белки TIP49A и TIP49B при определенных условиях способны образовывать два различных типа устойчивых филаментных структур, которые, вероятно, имеют биологическое значение при их взаимодействии с ДНК. Кроме того, с помощью молекулярного докинга было впервые показано, что центральный канал гексамерной кольцевой формы белков TIP49A и TIP49B человека имеет достаточные размеры для связывания днднк в классической Б-форме (рис.).



Структура гексамерного кольцевого комплекса белка TIP49A с днднк (Б-форма) в центральном канале

Petukhov M. ..., Yakimov A. ..., Shvetsov A. et al. // Structure. 2012. V. 20. No. 8. P. 1321–1331.



Фундаментальные и прикладные исследования с использованием нейтронов

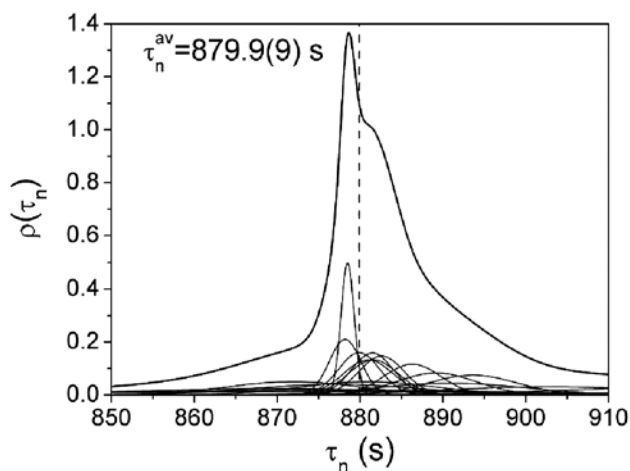
Новое время жизни нейтрона	39
Новое измерение электрического дипольного момента нейтрона	40
Ограничение на <i>CP</i> -нарушающее псевдомагнитное взаимодействие из нейтронооптического эксперимента	41
Эффект аномального прохождения нейтронов при дифракции по Лауэ	42
Первое прямое наблюдение обратного эффекта близости в бислое сверхпроводник / ферромагнетик	43
Исследование эффектов близости в наноструктурированных бимагнитных системах	44
Переход «алмаз – графен» в детонационном наноалмазе	45
Магнитная киральность моногерманидов переходных металлов	46
Кристаллографическая и магнитная киральность моносилицидов переходных металлов	47
Модель распределения намагниченности в инвертированных опалоподобных кристаллах на основе ферромагнитных материалов	48
Свойства ядерных возбужденных состояний	49
Изучение механизма эмиссии «мгновенных» нейтронов деления	50
Поисковые исследования «разрывных» γ -квантов и нейтронов деления	51

Динамика разрыва делящихся ядер при низких энергиях возбуждения	52
Экспериментальное наблюдение изменения времени жизни ядерных уровней в резонансном окружении	53
Программа исследований в области физики фундаментальных взаимодействий и наноструктур	54
Новый метод относительного измерения межплоскостных расстояний	55
Суперполяризующие нейтронные покрытия	56
Изучение перемагничивания нанослоев CoCu/Co (гранулированный ферромагнетик / ферромагнетик)	56
Электрофизические свойства углеродных нанокомпозитов на основе наноалмазов, облученных быстрыми нейтронами	57
Определение содержания золота в углеродистых породах методом нейтронно-активационного анализа	58
Поиск макроскопических <i>CP</i> -нарушающих сил с использованием магнитно-резонансного спектрометра с ультрахолодными нейтронами.	59
Создание стенда для исследований радиационной стойкости электронной компонентной базы на базе нейтронного времяпролетного спектрометра ГНЕЙС (синхроциклотрон, Гатчина)	60
Механизм намагничивания образцов при термомагнитной обработке	61

Новое время жизни нейтрона

Данная работа была проведена в связи с тем, что результат эксперимента ПИЯФ по измерению времени жизни нейтрона с гравитационной ловушкой $878,5 \pm 0,8$ с отличался от среднемирового значения Particle Data Group–2008 $885,7 \pm 0,8$ с на 6,5 стандартного отклонения. В работе был произведен анализ и Монте-Карло-моделирование эксперимента MAMBO I и эксперимента Курчатовского института. Найдены систематические ошибки около -6 с в обоих экспериментах. Представлен анализ результатов измерений времени жизни нейтрона после поправок и добавлений. Получено новое среднемировое значение для времени жизни нейтрона, которое составило $879,9 \pm 0,9$ с (см. рис.). Исследование получило первую премию на конкурсе лучших работ ПИЯФ 2011 г.

В дальнейшем экспериментальные группы обоих смоделированных нами экспериментов поправили свои результаты. В 2012 г. результат эксперимента MAMBO I был изменен с $887,6 \pm 3,0$ с на $882,5 \pm 1,4 \pm 1,5$ с, а результат эксперимента Курчатовского института был изменен с $885,4 \pm 0,9 \pm 0,4$ с на $881,6 \pm 0,8 \pm 1,9$ с. Среднемировое значение Particle Data Group–2013 составило $880,0 \pm 0,9$ с, что фактически совпадает с нашим результатом.



Распределение результатов по измерению времени жизни нейтрона после поправок и добавлений, дающее среднемировое значение $879,9 \pm 0,9$ с

1. Serebrov A. P., Fomin A. K. // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. С. 607–611.
2. Fomin A. K., Serebrov A. P. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 92. С. 16–21.
3. Serebrov A. P., Fomin A. K. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 92. С. 307–311.
4. Serebrov A. P., Fomin A. K. // Phys. Rev. C. 2010. V. 82. P. 035501.
5. Serebrov A. P., Fomin A. K. // Phys. Procedia. 2011. V. 17. P. 199–205.
6. Serebrov A. P., Fomin A. K. // Crystallogr. Rep. 2011. V. 56. P. 1248–1252.

Новое измерение электрического дипольного момента нейтрона

Поиск электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона в физике низких энергий является альтернативой поиску новых частиц в физике высоких энергий на адронных коллайдерах. Величина или новое ограничение на величину ЭДМ нейтрона является очень чувствительным тестом для выбора теории с CP -нарушением. Представлены результаты измерений ЭДМ нейтрона, выполненные на реакторе ILL в 2012–2013 гг. на экспериментальной установке ПИЯФ. Данные измерения

на уровне достоверности 90 % устанавливают предел на величину ЭДМ нейтрона $5,5 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{см}$. Эта точность измерений находится на уровне современного экспериментального предела на величину ЭДМ нейтрона. Новый результат и подтверждение существующего ограничения в независимом эксперименте на другой установке является принципиально важным для данной фундаментальной проблемы. Планируется увеличение точности измерений в 3–4 раза.



Спектрометр ПИЯФ для поиска ЭДМ нейтрона на пучке ультрахолодных нейтронов реактора в институте Лауэ – Ланжевена

Serebrov A. P., Kolomenskiy E. A., Pirozhkov A. N., Krasnoschekova I. A., Vassiljev A. V., Polushkin A. O., Lasakov M. S., Fomin A. K., Shoka I. V., Solovey V. A., Zherebtsov O. M. et al. // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 99. Вып. 1. С. 7–11.

Ограничение на CP -нарушающее псевдомагнитное взаимодействие из нейтронооптического эксперимента

Установлено прямое ограничение на CP -нечетное короткодействующее псевдомагнитное взаимодействие, обусловленное обменом легким псевдоскалярным бозоном, введенным в теорию для решения проблемы CP -нарушений в сильных взаимодействиях.

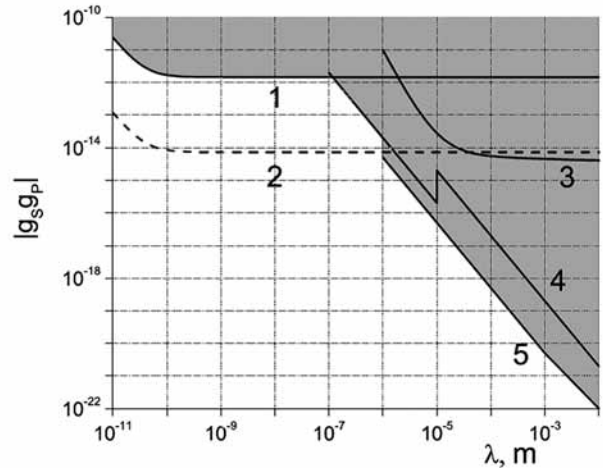
Данное взаимодействие обычно параметризуется как

$$V_{sp}(\mathbf{r}) = \frac{\hbar^2 g_s g_p}{8\pi m} \left(\frac{\mathbf{r}}{r} \cdot \boldsymbol{\sigma} \right) \left(\frac{1}{r\lambda} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-\frac{r}{\lambda}},$$

где g_s и g_p – скалярная и псевдоскалярная константы связи между нейтроном и бозоном, λ – комптоновская длина волны бозона, описывающая радиус действия силы.

Ограничение получено в оптическом эксперименте при прохождении нейтрона через нецентросимметричный кристалл вблизи брэгговского отражения. Схема эксперимента аналогична используемой для поиска ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом.

В диапазоне $\lambda < 10^{-7}$ м получено лучшее ограничение на данное взаимодействие (см. рис.).



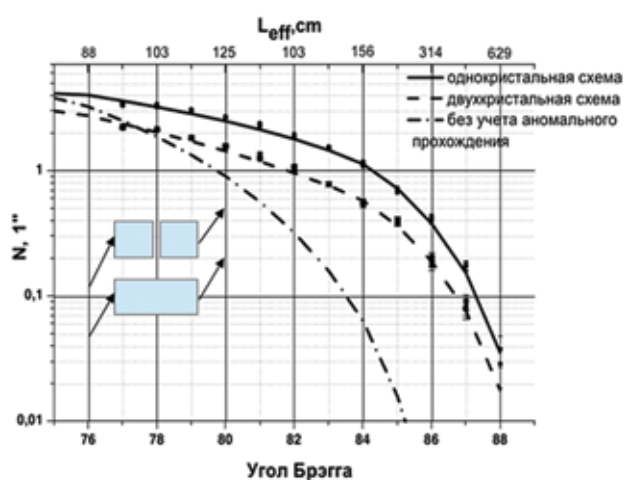
Сравнение различных методов. Кривая (1) – ограничение из кристалл-дифракционного эксперимента и (2) – возможность по повышению точности данного метода; (3) – эксперимент, основанный на использовании гравитационных уровней нейтрона; (4) – эксперимент по хранению ультрахолодных нейтронов (УХН); (5) – эксперимент по хранению ^3He

1. Baessler S., Nesvizhevsky V. V., Protasov K. V., Voronin A. Yu. // Phys. Rev. D. 2007. V. 75. P. 075006.
2. Serebrov A. P. // Phys. Lett. B. 2009. V. 680. P. 423.
3. Serebrov A. P. et al. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. Вып. 1. С. 8–11.
4. Petukhov A., Pignol G., Jullien D., and Andersen K. // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 105. P. 3.
5. Fedorov V. V., Kuznetsov I. A., Voronin V. V. // C. R. Physique. 2011. V. 12. P. 755–778.
6. Fedorov V. V., Kuznetsov I. A., Voronin V. V. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2013. V. 309. P. 237–239.

Эффект аномального прохождения нейтронов при дифракции по Лауэ

Обнаружен эффект аномального прохождения нейтронов (эффект Бормана) при дифракции по Лауэ в совершенном кристалле кремния толщиной 20 см при углах Брэгга, близких к 90° (эффективная толщина 400 см). Впервые показано, что при выполнении дифракционных условий длина поглощения одной из блоховских волн превосходит 300 см, т. е. половина нейтронов проходит через кристалл практически без поглощения (а вторая половина полностью поглощается), см. рис.

Данное обстоятельство позволяет исследовать эффекты, возникающие при дифракции по Лауэ при углах Брэгга, близких к 90° , и размерах кристаллов в несколько десятков сантиметров. В частности, появляется возможность увеличить чувствительность развиваемого в ПИЯФ метода проверки эквивалентности инертной и гравитационной масс нейтрона примерно в 300 раз, в сравнении с углами Брэгга $\sim 45^\circ$.



Зависимость интенсивности отражения на кристалле кремния для плоскости (220) от угла дифракции. По верхней оси отложена эффективная толщина кристалла, определяющая поглощение нейтронов

Первое прямое наблюдение обратного эффекта близости в бислое сверхпроводник / ферромагнетик

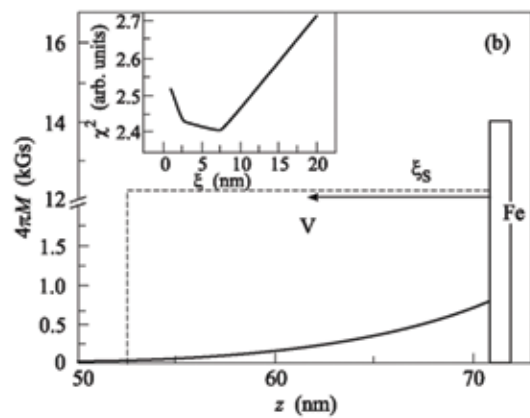
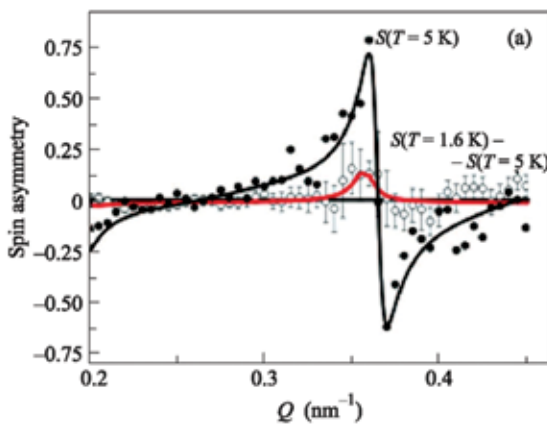
Контакт на наноразмерном уровне очень тонких слоев сверхпроводника (СП) и ферромагнетика (ФМ) приводит к целому ряду новых для сильно коррелированных стоячих волн, который позволяет увеличить магнитное рассеяние в 10–100 раз. Чтобы отличить появление индуцированного магнетизма в СП от изменения магнитного состояния в ФМ, нами предложено использование спиновой асимметрии отражения нейтронов выше и ниже температуры СП перехода T_c . Эксперименты были выполнены со структурой Cu (40 нм) / V (40 нм) / Fe (1 нм) / MgO. В отличие от предыдущих работ, где изучались многослойные системы, что затрудняет интерпретацию данных, мы исследовали единичный бислой СП / ФМ.

Прямой метод изучения пространственного распределения намагниченности является рефлектометрия поляризованных нейтронов (PRN). Попытки использования этого метода предпринимались неоднократно, однако они не дали желаемого результата ввиду слабости магнитного рассеяния нейтронов в СП.

Разработан новый метод в рефлектометрии, основанный на резонансном усилении нейтронами стоячих волн, который позволяет увеличить магнитное рассеяние в 10–100 раз. Чтобы отличить появление индуцированного магнетизма в СП от изменения магнитного состояния в ФМ, нами предложено использование спиновой асимметрии отражения нейтронов выше и ниже температуры СП перехода T_c . Эксперименты были выполнены со структурой Cu (40 нм) / V (40 нм) / Fe (1 нм) / MgO.

В отличие от предыдущих работ, где изучались многослойные системы, что затрудняет интерпретацию данных, мы исследовали единичный бислой СП / ФМ.

Проведенное исследование позволяет впервые определить глубину проникновения магнитного момента в СП висмут – она равна 7 нм; намагниченность проникшего слоя равна 0,8 кГс. Толщина индуцированного слоя сравнима с сверхпроводящей данной когерентности $s = 9,3 \pm 0,1$ нм, что свидетельствует о наличии обратного эффекта близости (см. рис.).



Показаны экспериментальные данные (черные точки) для спиновой асимметрии $T = 5 \text{ K} > T_c$; кружками показана разница асимметрий при $T < T_c$ и $T > T_c$; линиями – модельный расчет (а). Показан модельный расчет для пространственного профиля намагниченности в СП. На вставке показан параметр подгонки в зависимости от глубины проникновения магнитного момента в СП (б)

1. Khaydukov Yu. N., Aksenov V. L., Nikitenko Yu. V. et al. // J. Supercond. Nov. Magn. 2011. V. 24. P. 961.
2. Khaydukov Yu. N., Aksenov V. L., Nagy D. et al. // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 98. Вып. 2. С. 116–120.

Исследование эффектов близости в наноструктурированных бимагнитных системах

Системы «ядро – оболочка» $\text{FeO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ и $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Mn}_3\text{O}_4$ исследовались разными методами: нейтронной и рентгеновской дифракцией, малоугловым рассеянием нейтронов, рассеянием поляризованных нейтронов, измерением спектров энергетических потерь электронов (EELS), электронной микроскопией (TEM), магнитометрией (SQUID).

Показано, что:

- спиновый порядок в ядре FeO и температура магнитного перехода зависят от размеров ядра и отличаются от обычного оксида;

- в системе $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Mn}_3\text{O}_4$ обнаружен анизотропный размерный эффект и показано, что моменты в ядре и оболочке противоположно направлены.

В системе, где ядро – реплика Co_3O_4 мезопористой матрицы, а оболочка – магнетит Fe_3O_4 ,

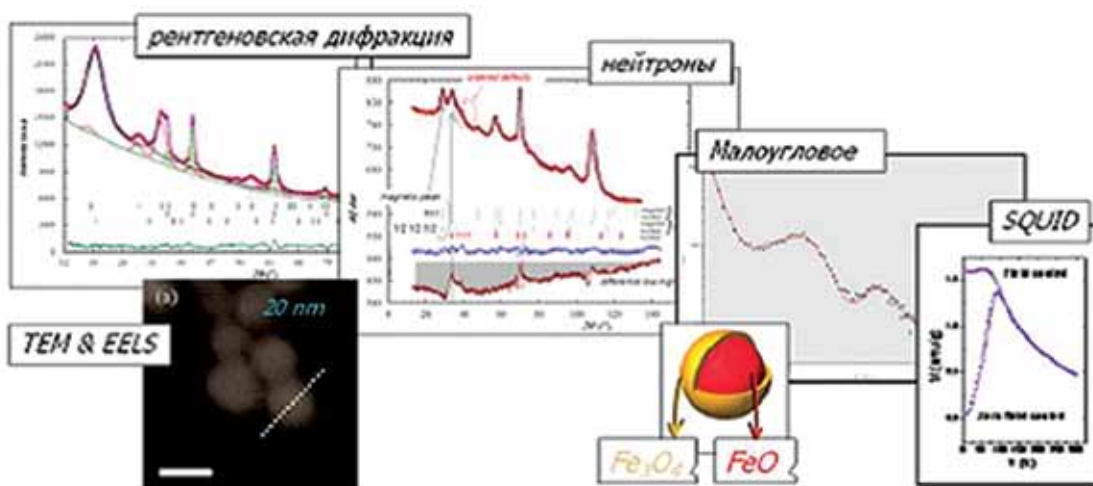
из малоуглового нейтронного рассеяния определены диаметр «нити» – $91(2) \text{ \AA}$ и параметр ячейки – 228 \AA . С помощью нейтронографии определена магнитная структура реплики Co_3O_4 .

Исследована система с распределенным интерфейсом – «твердые растворы» мультиферроиков (BiFeO_3)_{1-x}(PbTiO_3)_x:

- установлено, что система является смесью двух наноразмерных фаз с ромбоэдрической и тетрагональной структурой на базе оксидов BiFeO_3 и PbTiO_3 соответственно;

- определены морфология, фазовый состав, структура, магнитный порядок и температурная эволюция всех параметров;

- наблюдались эффекты обменного подмагничивания.

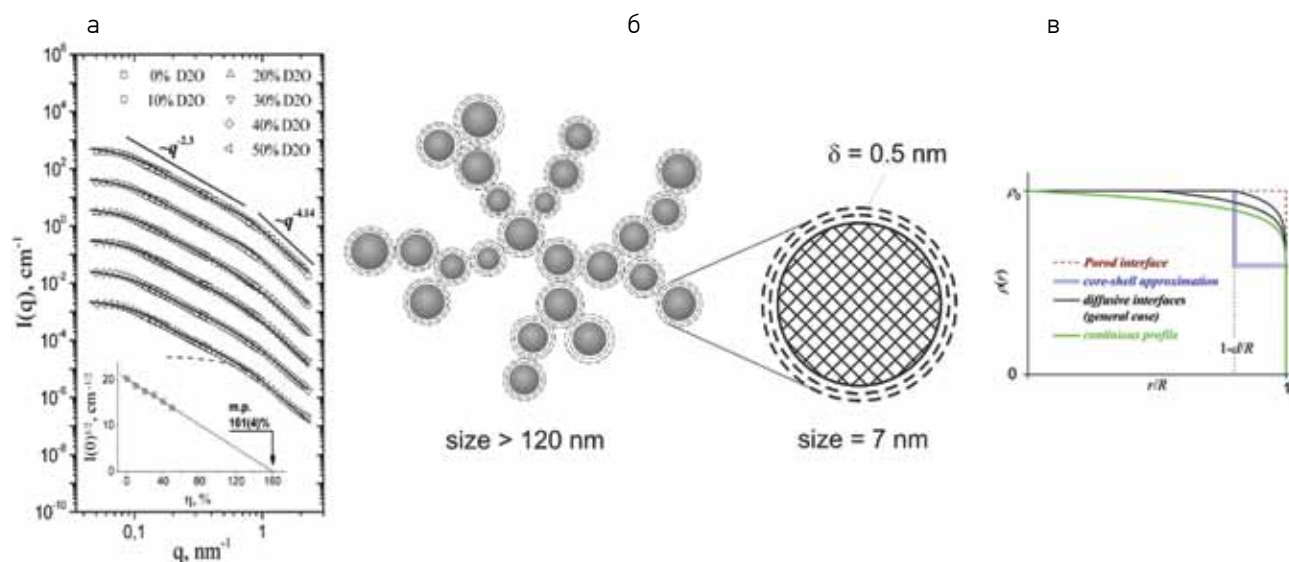


1. López-Ortega A., Estrader M. ..., Golosovsky I. V. et al. // *Nanoscale*. 2012. V. 4. P. 5138.
2. Pellicer E., Cabo M. ..., Golosovsky I. V. et al. // *Nanoscale*. 2013. V. 5. P. 5561.
3. Estrader M., Lopez-Ortega A., Estrade S., Golosovsky I. V. et al. Robust Antiferromagnetic Coupling in Heterostructured Bi-magnetic Core / Shell Nanoparticles. Accepted in *Nature Comm.*, 2013.
4. Golosovsky I. V., Vakhrushev S. B., Brunelli M. et al. Neutron Diffraction Study of the Nanostructured Multiferroic System – Solid Solutions (BiFeO_3)_{1-x}(PbTiO_3)_x. Submitted to PRB, 2013.

Переход «алмаз – графен» в детонационном наноалмазе

На основе анализа данных малоуглового рассеяния нейтронов (включая вариацию контраста) на жидких дисперсиях детонационных наноалмазов (ДНА) обнаружен непрерывный пространственный переход углеродных состояний от кристаллического алмаза (sp^3 -гибридизация) внутри частиц к графитоподобному состоянию (sp^2 -гибридизация) на поверхности (рис.). Такой переход позволяет совместить экспериментально наблюдаемый сдвиг в средней плотности длины рассеяния частиц от плотности кристаллического алмаза (свидетельство наличия неалмазной компоненты в составе частиц) и диффузный характер поверхности, проявляющийся в специфическом отклонении от закона Порода в рассеянии. Предложенный профиль имеет простое степенное поведение и, благодаря ряду особенностей, объясняет равномерное

спадание общей интенсивности при вариации контраста, свойственное однородным частицам. Использованная ранее при описании структуры частиц организация типа «сферическое ядро – графеновая оболочка», дающая для толщины неалмазной компоненты на поверхности частиц значение 0,5 нм, может быть рассмотрена как приближение к данному профилю, который естественным образом отвечает переходу «алмаз – графен» в терминах усредненной плотности длины рассеяния. При этом неалмазные переходные связи (предположительно sp^{2+x} -связи) располагаются преимущественно ближе к поверхности частиц. Рассмотренный профиль также позволяет напрямую определить параметры функции распределения наноалмазов по размерам.



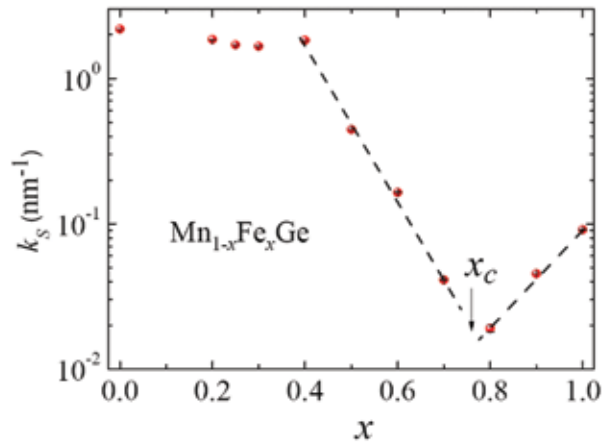
Кривые малоуглового рассеяния нейтронов на жидких дисперсиях детонационных наноалмазов, измеренные с вариацией контраста (а). Схематический вид кластера ДНА в жидких дисперсиях с выделением его основной структурной единицы – частицы, составленной из кристаллического алмаза и графеновой оболочки (б). Рассмотрены различные приближения такой оболочки. Наилучшим образом экспериментальные данные малоуглового рассеяния нейтронов описывает диффузный непрерывный профиль – зеленая линия (в)

1. Аксенов В. Л. // Российские нанотехнологии. 2011. Т. 6. № 7–8. С. 1–10.

2. Avdeev M. V., Aksenov V. L., Tomchuk O. V., Bulavin L. A., Garamus V. M., Osawa E. // J. Phys.: Condens. Matter. 2013. V. 25. P. 445001–445008.

Методом малоугловой дифракции нейтронов и СКВИД-магнитометрии исследована магнитная структура нецентросимметричных кубических магнетиков – моногерманидов переходных металлов – $Mn_{1-x}Fe_xGe$. Установлено, что соединения магнитно упорядочены во всем диапазоне концентраций $x = [0,0-1,0]$. Обнаружена плоская спиновая спираль с волновым вектором, который меняется от максимального значения $|k| = 2,3 \text{ нм}^{-1}$ для $MnGe$, через минимум при $x_c = 0,75$ ($|k| \rightarrow 0$), к величине $|k| = 0,09 \text{ нм}^{-1}$ для $FeGe$. Данные СКВИД-магнитометрии подтверждают ферромагнитную природу соединения с $x_c = 0,75$.

Наблюдаемое превращение спиновой спирали в ферромагнетик объясняется разным знаком магнитной киральности для соединений с $x > x_c$ и $x < x_c$. Эксперименты по монокристалльной дифракции синхротронного излучения на монокристалле $FeGe$ показали, что знак спиновой киральности оказывается противоположным знаку кристаллической киральности. Поскольку знак спиновой киральности меняется при $x = x_c$ (см. рис.), мы заключили, что для $MnGe$ знаки спиновой и кристаллической киральности совпадают. Таким образом, впервые обнаружен переворот спиновой киральности с концентрацией при $x_c = 0,75$ в соединениях $Mn_{1-x}Fe_xGe$. Это открытие требует пересмотра феноменологической теории, которой до сих пор описывали магнитную структуру этих магнетиков.

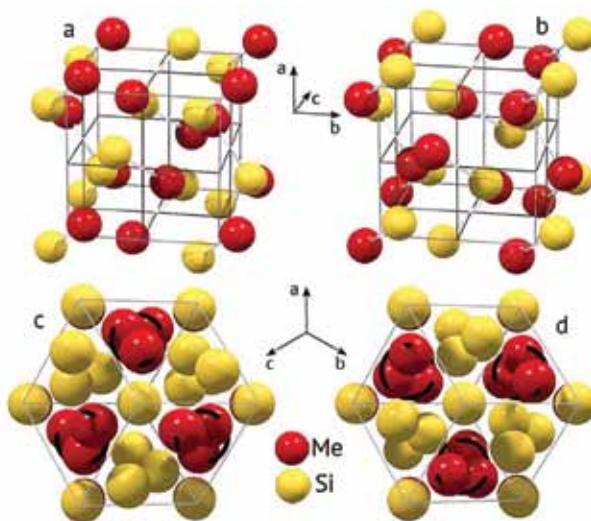


Волновой вектор спирали при $T = 5 \text{ К}$ для соединений $Mn_{1-x}Fe_xGe$

1. Moskvin E., Grigoriev S., Dyadkin V. et al. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 077207.
2. Grigoriev S. V., Potapova N. M. ..., Dyadkin V. A., Moskvin E. V. et al. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 207201.

Кристаллографическая и магнитная киральность моносилицидов переходных металлов

Обнаружено явление преобладания киральных свойств выращиваемых кристаллов со структурой типа B20 (пространственная группа $P2_13$) от свойств кристалла-зародыша при росте методом Чохральского. Это открывает новые возможности роста кристаллов с наперед заданными киральными свойствами (рис.). В качестве примеров были синтезированы левые и правые кристаллы моносилицида марганца MnSi и смешанных соединений $Fe_{1-x}Co_xSi$ с $x = 0; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,50$. Исследовалась кристаллическая киральность методом монокристаллической дифракции синхротронного излучения, и было показано, что в 90 % случаев можно получить кристалл той же киральности, что и киральность кристалла-затравки. Известно, что магнитная структура в этих кристаллах представляет собой плоскую спиновую спираль. Спиновая киральность исследовалась методом малоугловой дифракции поляризованных нейтронов. Установлено, что спиновая киральность определяется кристаллической киральностью, однако если для MnSi знаки спиновой и кристаллической киральности совпадают, то для смешанных соединений $Fe_{1-x}Co_xSi$ знак спиновой киральности оказывается противоположным знаку кристаллической киральности. Получение кристаллов с определенной киральностью является очень важным при работе с биологическими объектами, а изучение явления спиновой киральности служит базой для создания устройств спинтроники.



Элементарная ячейка кристаллов MnSi с левой (a) и правой (b) кристаллической киральностью; (c), (d) – вид вдоль оси [111]

1. Grigoriev S. V., Chernyshov D., Dyadkin V. A., Dmitriev V., Moskvina E. V. et al. // Phys. Rev. B. 2010. V. 81. P. 012408.
2. Dyadkin V. A., Grigoriev S. V., Menzel D., Chernyshov D., Dmitriev V., Schoenes J., Maleyev S. V., Moskvina E. V., and Eckertbe H. // Phys. Rev. B. 2011. V. 84. P. 01443.

Модель распределения намагниченности в инвертированных опалоподобных кристаллах на основе ферромагнитных материалов

Спиновый лед – вид упорядочения магнитных моментов, возникающий в системах с решеткой пирохлора, содержащей атомы редкоземельных элементов (например, Ho и Dy). Благодаря имеющимся в такой системе взаимодействия магнитные моменты этих редкоземельных ионов, расположенных в узлах обобщенных тетраэдров, подчиняются так называемому правилу льда: два момента направлены внутрь тетраэдра, а два – вне его, совпадая с осями типа $\langle 111 \rangle$ гранецентрированной кубической структуры.

Инвертированная опалоподобная структура (ИОПС) представляет собой совокупность заполненных материалом (в данном случае ферромагнетиком) пор искусственного опала – системы из плотноупакованных сферических частиц диаметром порядка 400–500 нм, поэтому ИОПС – это квазитетраэдры и квазикубы, соединенные перемычками вдоль осей типа $\langle 111 \rangle$. Вид элемента ИОПС представлен на рис. 1.

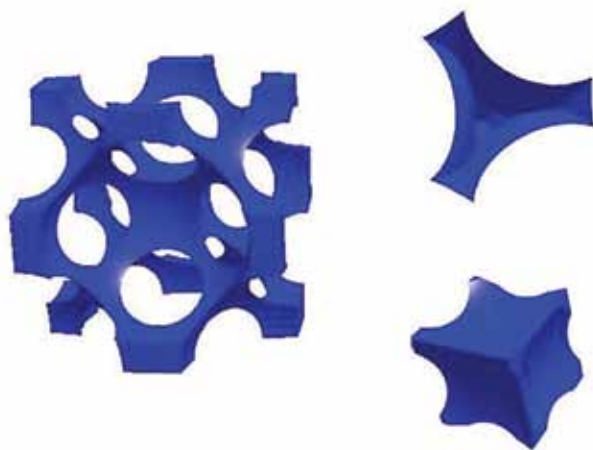


Рис. 1. Элемент ИОПС и его составляющие – псевдотетраэдр и псевдокуб

Так как магнитный поток должен сохраняться во всех элементах ИОПС, для описания распределения намагниченности была построена модель, предполагающая, что намагниченность ИОПС определяется направлениями намагниченностей перемычек. При этом для квазитетраэдров и квазикубов количество намагниченностей, входящих внутрь и выходящих наружу, должно быть одинаково, аналогично «правилу льда». На основании данной модели были построены картины различных этапов перемагничивания ИОПС при приложении магнитного поля вдоль направления $[1-21]$ (рис. 2). Рассчитанные интенсивности магнитного рассеяния нейтронов хорошо согласуются с результатами эксперимента по малоугловому рассеянию нейтронного излучения. Показано, что при таком направлении поля должна возникать перпендикулярная полю и образцу компонента намагниченности.

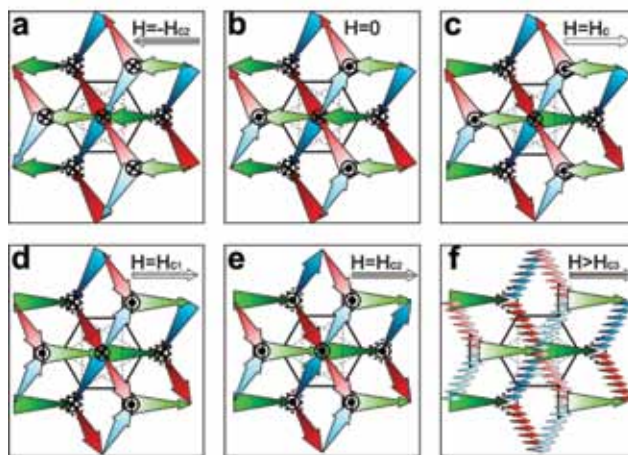


Рис. 2. Направления намагниченностей перемычек в ИОПС на различных этапах перемагничивания образца при приложении поля вдоль направления $[1-21]$

Mistonov A. A., Grigoryeva N. A., Chumakova A. V., Eckerlebe H., Sapoletova N. A., Napolskii K. S., Eliseev A. A., Menzel D., Grigoriev S. V. // *Physi. Rev. B*. 2013. V. 87. P. 220408(R).

Свойства ядерных возбужденных состояний

Монографический обзор С. И. Сухоручкина и З. Н. Сороко с соавторами в 5 томах, опубликованный в серии Landolt-Börnstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, V. 25:

Sukhoruchkin S. I., Soroko Z. N., Sukhovej A. M., Khitrov V. A. // Nuclear Excited States. Sub-V. A: Nuclei with $Z = 1-29$. Springer, 2012. 547 p.

Sukhoruchkin S. I., Soroko Z. N., Descouvemont P., Kneissl U., Zilges A. // Nuclear Excited States. Sub-V. B: Nuclei with $Z = 30-47$. Springer, 2012. 553 p.

Sukhoruchkin S. I., Soroko Z. N., Tomandl I. // Nuclear Excited States. Sub-V. C: Nuclei with $Z = 48-60$. Springer, 2013. 515 p.

Sukhoruchkin S. I., Soroko Z. N., Grosse E., Junghans A. R. // Nuclear Excited States. Sub-V. D: Nuclei with $Z = 61-73$. Springer, 2013. 493 p.

Sukhoruchkin S. I., Soroko Z. N. // Nuclear Excited States. Sub-V. E: Nuclei with $Z = 74-103$. Springer, 2013. 545 p.

В обзоре приводятся:

– методы возбуждения ядер и регистрации излучения;

– сечения возбуждения для различных реакций;

– квантовые числа возбужденных ядерных состояний;

– теоретические модели, описывающие основные моды ядерных возбуждений.

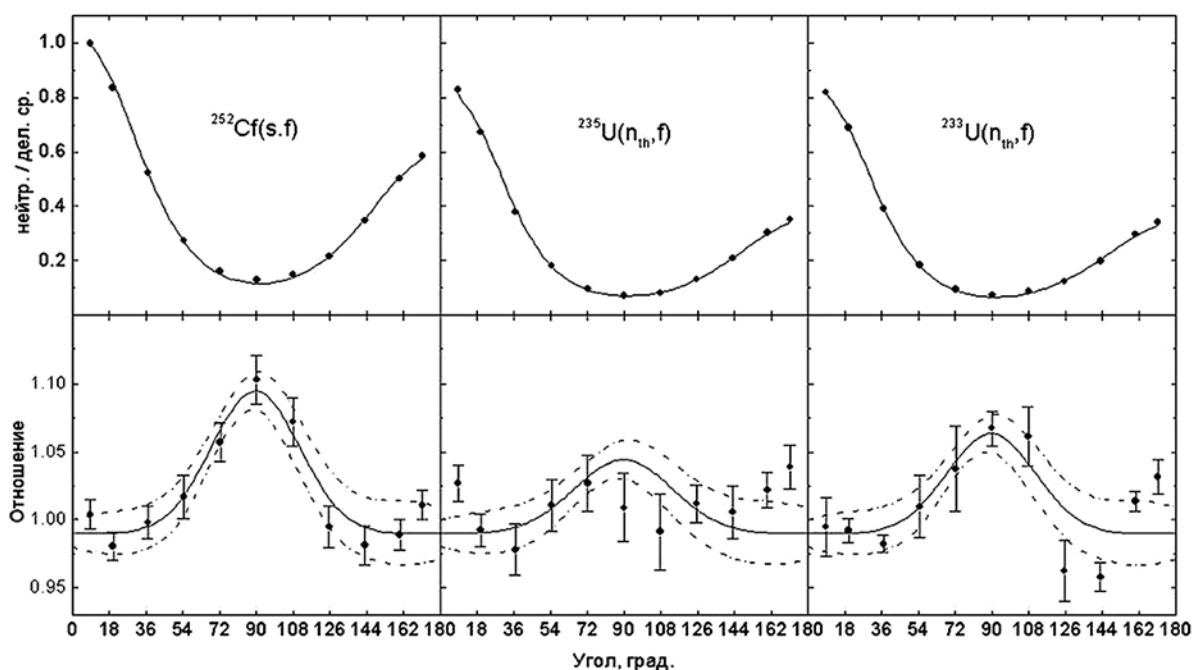
Работа получила первую премию на конкурсе лучших работ ПИЯФ 2012 г.



Изучение механизма эмиссии «мгновенных» нейтронов деления

Несмотря на значительные успехи современной теории деления, предсказать наблюдаемые на практике величины с необходимой точностью не удастся. При этом экспериментальные данные об угловых и энергетических распределениях «мгновенных» нейтронов и гамма-квантов деления являются средством для отладки и проверки модельных представлений. Такая информация позволяет определять основные характеристики делящейся системы, такие как: параметры плотности уровней для нейтрон-избыточных ядер; деформации обоих осколков вблизи «точки разрыва»; свойства «разрывных» нейтронов.

Анализ измеренных угловых и энергетических распределений «мгновенных» нейтронов деления $^{252}\text{Cf}(sf)$ и $^{233,235}\text{U}(n, f)$, пучок № 7, ВВР-М, ПИЯФ, (рис.) показал, что любые модели, используемые для расчета спектров «мгновенных» нейтронов деления с точностью лучше 5 %, должны учитывать существование «scission» нейтронов. При этом также должна быть учтена анизотропия испускания нейтронов из осколков, обусловленная наличием у осколков конечных угловых моментов.



Выходы нейтронов в зависимости от их углов вылета относительно осколков деления: точки – эксперимент, сплошная кривая – расчет. Внизу: угловая зависимость отношения экспериментальных и расчетных выходов нейтронов с учетом анизотропии их эмиссии в системе центра масс

1. Vorobyev A. S., Shcherbakov O. A., Gagarski A. M., Val'ski G. V., Petrov G. A. // EPJ Web of Conferences. 2010. V. 8: EFNUDAT – Measurements and Models of Nuclear Reactions. Art. 03004. 7 p.
2. Vorobyev A. S., Val'skii G. V., Gagarskii A. M., Guseva I. S., Petrov G. A., Petrova V. I., Serebrin A. Yu., Sokolov V. E., Shcherbakov O. A. // Crystallogr. Rep. 2011. V. 56. No. 7. P. 1253–1257.

Поисковые исследования «разрывных» γ -квантов и нейтронов деления

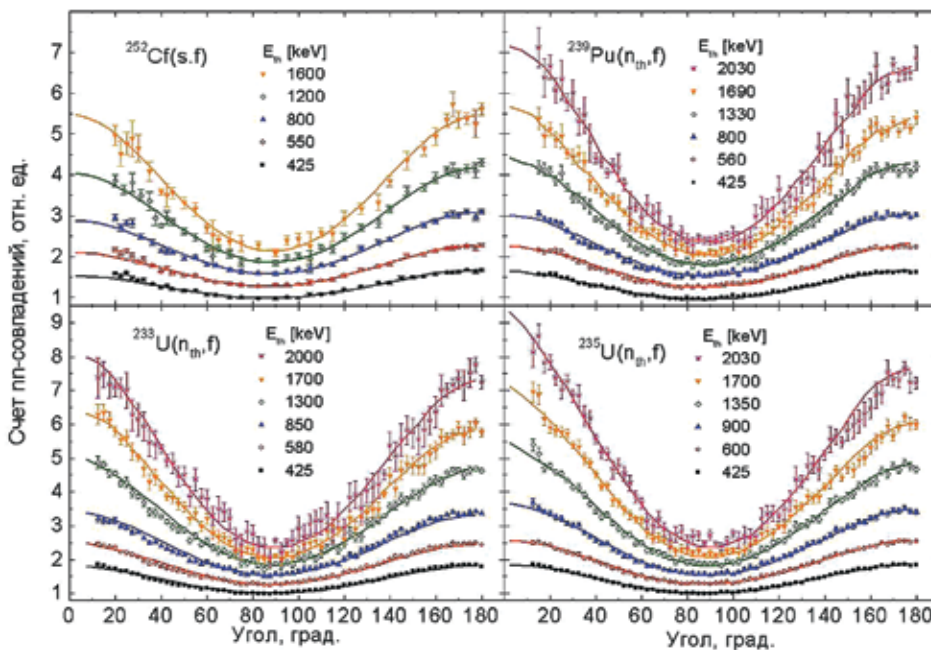
Одной из наиболее интересных проблем современной физики деления является вопрос о существовании «разрывных» нейтронов и γ -квантов. Поскольку на сегодняшний день надежного экспериментального подтверждения существования таких нейтронов и γ -квантов не было получено, все модельные расчеты выполняются без их учета. И это, в свою очередь, может приводить к наблюдаемому различию между экспериментом и теорией.

На пучке нейтронов № 1 реактора ВВР-М впервые проведены систематические исследования по поиску «разрывных» нейтронов в делении для широкого набора исследуемых ядер: $^{252}\text{Cf}(sf)$, $^{233}\text{U}(n, f)$ и $^{239}\text{Pu}(n, f)$. Для этого исследовалась

зависимость выхода пар нейтронов при делении в зависимости от энергетических порогов их регистрации и относительных углов их разлета. В результате анализа полученных данных была собрана уникальная информация о выходах «разрывных» нейтронов деления.

Для поиска «разрывных» γ -квантов деления $^{235}\text{U}(n, f)$ исследовалась угловая зависимость коэффициента T -нечетной асимметрии (см. рис.).

Впервые было показано, что наблюдаемый эффект в основном связан с γ -квантами, испускаемыми осколками с большими ориентированными угловыми моментами.



Угловая зависимость выхода мгновенных нейтронов деления при определенном пороге регистрации: точки с ошибками – экспериментальные данные; линии – расчет, выполненный в предположении существования $8 \pm 2\%$, $14 \pm 3\%$, $5 \pm 2\%$ и $7 \pm 2\%$ «разрывных» нейтронов для ^{252}Cf , ^{239}Pu , ^{233}U и ^{235}U соответственно

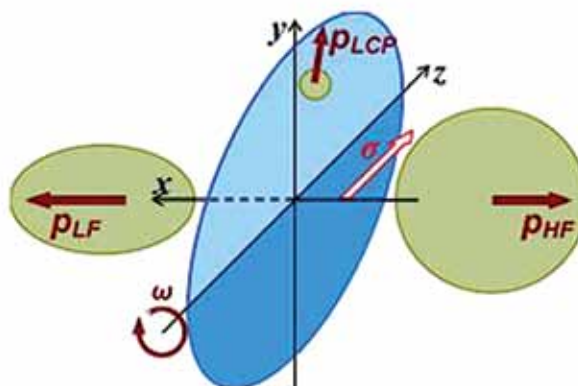
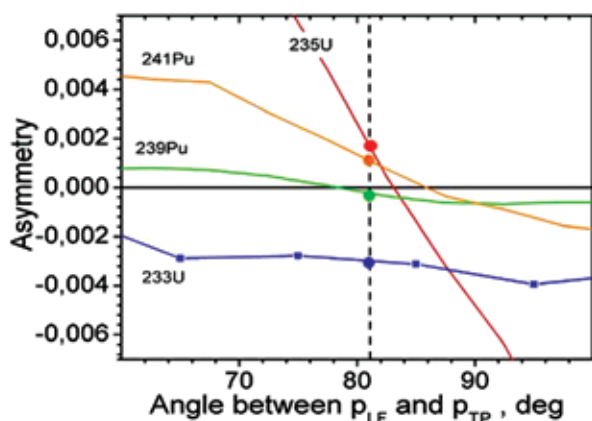
1. Sokolov V. E., Petrov G. A., Guseva I. S., Val'sky G. V., Gagarski A. M., Nikolaev D. V., Krinitsin D. O., Petrova V. I., Zavarukhina T. A. // ISINN-18 Proc. Dubna: JINR, 2011. E3-2011-26. P. 108–118.
2. Valsky G. V., Gagarski A. M., Guseva I. S., Krinitsin D. O., Petrov G. A., Pleva Yu. S., Sokolov V. E., Petrova V. I., Zavarukhina T. A., Kuzmina T. E. // Bull. Rus. Acad. Sci. 2012. V. 76. No. 6. P. 767–771.

Динамика разрыва делющихся ядер при низких энергиях возбуждения

Впервые обнаруженные нами корреляции в угловых распределениях легких заряженных частиц (ЛЗЧ) в тройном делении $^{233}\text{U}(n, f)$, $^{235}\text{U}(n, f)$, $^{239}\text{Pu}(n, f)$ и $^{241}\text{Pu}(n, f)$ холодными поляризованными нейтронами (так называемые TRI- и ROT-эффекты T-нечетной асимметрии эмиссии легких заряженных частиц) связаны с ориентированным вращением компаунд-ядра перед разрывом и оказываются очень чувствительными к параметрам конфигурации ядра в точке разрыва и к параметрам переходных состояний над барьером деления. Нами предложены модели возникновения

этих эффектов, которые, несмотря на их полуклассический характер, способны дать количественные оценки эффектов, согласующиеся с экспериментом. Это открывает новые возможности для изучения процесса деления, а именно: наименее изученной стадии процесса – разрыва ядерной материи.

Рисунок иллюстрирует ROT- и TRI-эффекты: ROT- (слева) представляет собой небольшой поворот углового распределения ЛЗЧ вокруг оси поляризации (z); TRI- (справа) есть разница в общей вероятности испускания ЛЗЧ вверх и вниз относительно плоскости (xz).



Угловая зависимость экспериментальной асимметрии выхода ЛЗЧ, возникающей при перевороте спина нейтрона, для четырех изученных изотопов. Наклоны кривых характеризуют величины ROT-эффекта, а значения асимметрии при 81° дают параметры TRI-эффекта

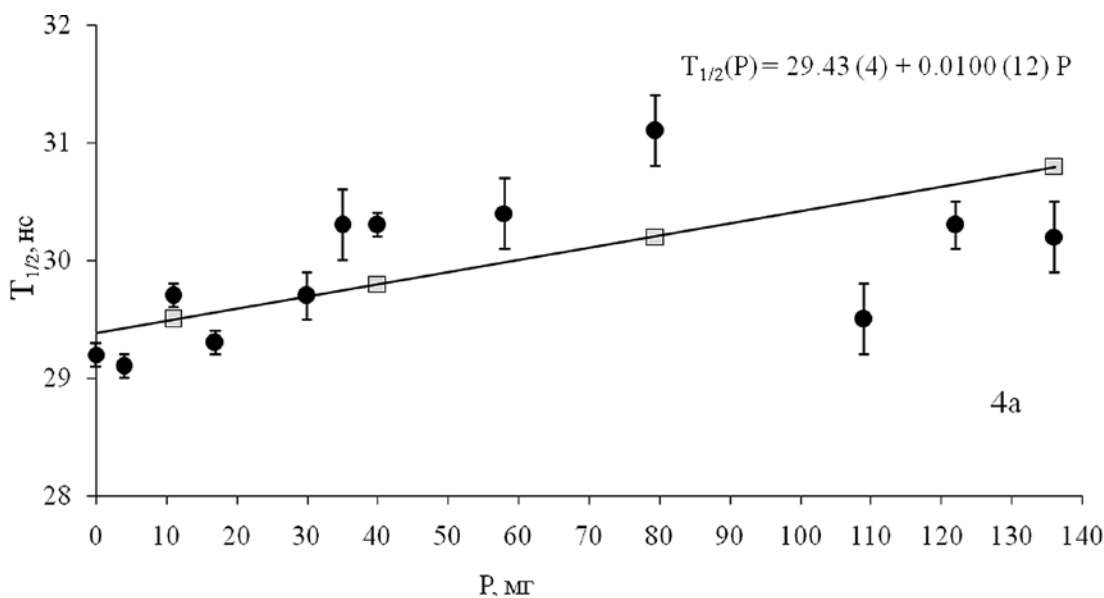
1. Gagarinskii A. M., Guseva I. S., Goennenwein F., Kopach Yu. N., Mutterer M., Kuz'mina T. E., Petrov G. A., Tyurin G., Nesvizhevsky V. // Crystallogr. Rep. 2011. V. 56. No. 7. P. 1238–1242.
2. Guseva I. S., Gagarinski A. M., Gusev Yu. I., Petrov G. A., Valsky G. V. // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10. № 4(181). С. 532–539.

Экспериментальное наблюдение изменения времени жизни ядерных уровней в резонансном окружении

Исследовано влияние резонансного окружения на изменение наблюдаемого времени жизни ядерных изомерных состояний.

Экспериментально показано, что в условиях резонансного окружения наблюдаемый период полураспада (время жизни $T_{1/2}$) ядерных возбужденных состояний может увеличиваться, т. е. эта величина не является «мировой константой», а зависит от внешних условий, в данном случае от концентрации «резонансных» добавок P .

Это явление указывает на принципиальную возможность создания резонансной емкости, в которой короткоживущие ядерные препараты будут сохраняться дольше своего табличного времени жизни.



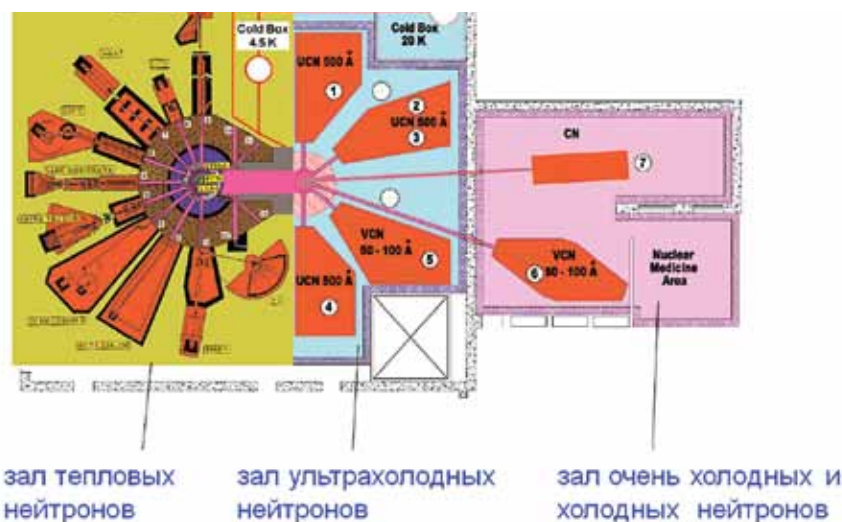
1. Логинов Ю. Е., Егоров А. И., Малютенков Э. И., Малютенкова С. Э., Мартынов В. В. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 87. Вып. 1. С. 7–9.
2. Логинов Ю. Е. // ЯФ. 2010. Т. 73. № 1. С. 36–40.
3. Логинов Ю. Е., Зиновьев В. Г., Кабина Л. П., Лисин С. С., Малютенков Э. И. // ЯФ. 2013. Т. 76. № 6. С. 715–718.

Программа исследований в области физики фундаментальных взаимодействий и наноструктур

На базе действующего исследовательского реактора ВВР-М в ПИЯФ создается высокоинтенсивный источник ультрахолодных нейтронов (УХН) и очень холодных нейтронов (ОХН) для научных исследований в области фундаментальной физики и изучения наноструктур.

В источнике будет использоваться сверхтекучий гелий, который позволит достичь плотности УХН

10^4 см^{-3} , что примерно в 1 000 раз превышает плотность существующих в мире источников УХН. Обладая самым интенсивным источником УХН, реактор ВВР-М станет международным центром фундаментальных исследований с УХН.



Экспериментальные залы реактора ВВР-М. Схема размещения источника холодных и ультрахолодных нейтронов, комплекса экспериментальных установок в главном зале реактора и комплекса экспериментальных установок в нейтронных залах: 1–4 – установки для фундаментальных исследований на УХН; 5 – ОХН-дифрактометр; 6 – ОХН-спектрометр; 7 – установки для фундаментальных исследований с холодными нейтронами

1. Serebrov A. P., Mityuklyayev V. A., Zakharov A. A., Erykalov A. N., Onegin M. S., Fomin A. K., Ilatovskiy V. A., Orlov S. P., Konoplev K. A., Krivshitch A. G., Samsonov V. M., Ezhov V. F., Fedorov V. V., Keshyshev K. O., Boldarev S. T., Marchenko V. I. // NIMA. 2009. V. 611. P. 276–279.
2. Серебров А. П., Митюхляев В. А., Захаров А. А., Ерыкалов А. Н., Онегин М. С., Фомин А. К., Илатовский В. А., Орлов С. П., Коноплев К. А., Крившич А. Г., Самсонов В. М., Ежов В. Ф., Федоров В. В., Кешышев К. О., Болдарев С. Т., Марченко В. И. // ФТТ. 2010. Т. 52. Вып. 5. С. 969–973.
3. Serebrov A. P. // Crystallogr. Rep. 2011. V. 56(7). P. 1230–1237.
4. Serebrov A. P., Boldarev S. T., Erykalov A. N., Ezhov V. F., Fedorov V. V., Fomin A. K., Ilatovskiy V. A., Keshyshev K. O., Konoplev K. A., Krivshitch A. G., Marchenko V. I., Mityuklyayev V. A., Onegin M. S., Orlov S. P., Samsonov V. M., Zakharov A. A. // Physics Procedia. 2011. V. 17. P. 251–258.

Новый метод относительного измерения межплоскостных расстояний

Разработан новый метод относительного измерения межплоскостных расстояний монокристаллов, основанный на использовании дифракции нейтронов под углом Брэгга $\sim 90^\circ$, рис. 1, обладающий следующими достоинствами:

- относительная точность измерения может быть на уровне $\Delta d/d \sim 10^{-7}$, рис. 2;

- возможно проводить тестирование по всему объему кристалла, размер исследуемого кристалла ограничен длиной поглощения нейтрона (для кварца ~ 50 см);

- не требуется предварительная подготовка кристалла, можно исследовать образцы любой формы и огранки;

- не требуется высокая точность предварительной угловой юстировки кристаллов.

Данный метод может быть использован для контроля объемного распределения примесей и напряжений в монокристаллах (например, для контроля за однородностью распределения легирующей примеси в полупроводниках или остаточных напряжений в готовых оптических элементах, изготовленных из монокристаллов).

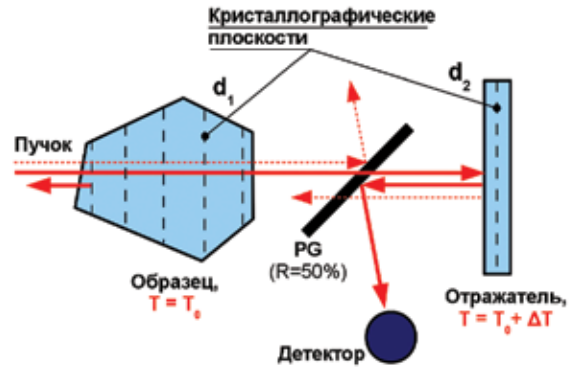


Рис. 1. Схема эксперимента

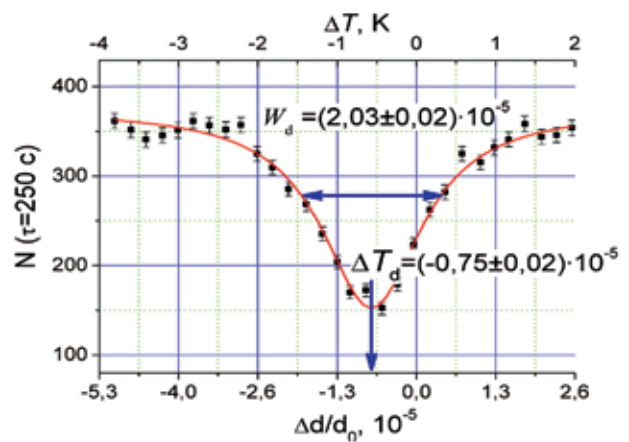
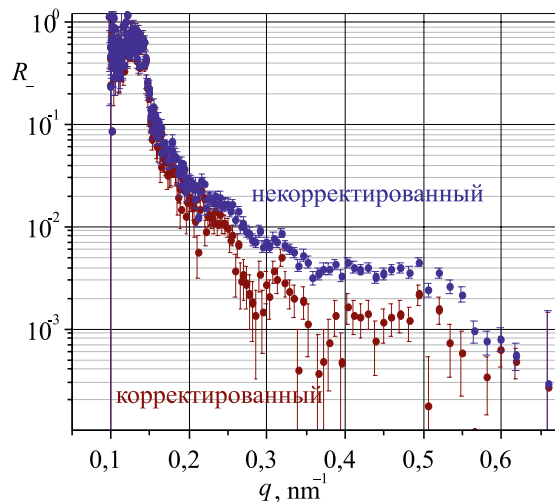


Рис. 2. Двухкристальная линия

1. Способ определения относительного изменения межплоскостных расстояний совершенных кристаллов: пат. РФ № 2394228 / В. В. Федоров, И. А. Кузнецов, Е. Г. Лапин, С. Ю. Семенихин, В. В. Воронин, Ю. П. Брагинец, К. Ю. Амосов; приоритет от 3.02.2009; зарегистрировано в Гос. реестре 10.07.2010; патентообладатель УРАН «ПИЯФ РАН».
2. Семенихин С. Ю., Брагинец Ю. П., Воронин В. В., Кузнецов И. А., Лапин Е. Г., Федоров В. В., Бердников Я. А., Бердников А. Я., Вежлев Е. О. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 3. С. 71–79.

Суперполяризующие нейтронные покрытия

Был предложен, обоснован и экспериментально проверен метод улучшения поляризующих нейтронных покрытий с помощью нанослоев с отрицательным потенциалом для подавления (до двух порядков величины) отражения нейтронов с нежелательным спином R_- от потенциальных барьеров, образованных структурными несовершенствами. Уже в первых экспериментах удалось на порядок уменьшить R_- (см. рис.), и покрытия получили название суперполяризующих. В дальнейшем был добавлен подслой TiZrGd и проведены измерения в схеме с двумя флипперами и анализатором. Эксперименты подтвердили эффективность нанопрослоек Ti для подавления отражения нейтронов со спином «вниз» как по каналу без спин-флипа (– –), так и со спин-флипом (+ –).



Коэффициент отражения $R_-(q)$ для суперзеркала CoFe/Ti/TiZr/Ti без подслоя с прослойками Ti (1,5 нм) на каждой межслойной границе: некорректированный и корректированный на поляризацию падающего пучка P_0 и эффективность флиппера f

1. Pleshanov N. K. // Nucl. Instrum. Methods A. 2010. V. 613. P. 15.

2. Pleshanov N. K., Bulkin A. P., Syromyatnikov V. G. // Nucl. Instrum. Methods A. 2011. V. 634. P. S63.

Изучение перемагничивания нанослоев CoCu/Co (гранулированный ферромагнетик / ферромагнетик)

Исследовалось перемагничивание обменно-связанных слоев гранулированного ферромагнетика (ГФ) $\text{Co}_{0,5}\text{Cu}_{0,5}$ (5 нм) и ферромагнетика Co. Были определены основные структурные параметры и намагниченность насыщения слоев GF и Ф. При малых толщинах слоя Co (6 нм) основной механизм его перемагничивания – смещение доменных границ; при этом из-за обменной связи «Ф – GF» коэрцитивное поле увеличивается на порядок. При больших (ок. 20 нм) толщинах Co стадии перемагничивания можно характеризовать тремя полями.

При приближении к полю H_1 в слое Co возникают области с перевернутой намагниченностью, которые обратимым образом исчезают при уменьшении поля. Поле H_1 характеризует начало переворота моментов гранул, которое сопровождается пиннингом областей слоя Co с уже перевернутой намагниченностью (возникает необратимость). Поля H_2 и H_3 характеризуют завершение переворота намагниченности слоя Co и моментов гранул соответственно.

Pleshanov N. K., Aksenov V. L., Bulkin A. P. ..., Matveev V. A. ..., Syromyatnikov V. G. et al. // J. Physics: Conf. Ser. 2012. V. 340. P. 012085.

Электрофизические свойства углеродных наноконпозитов на основе нанодалмазов, облученных быстрыми нейтронами

Интерес к исследованию нанодалмазов во многом связан с возможностью создания в структуре алмаза NV-центров. Такие центры состоят из атома азота, замещающего атом углерода в кристаллической решетке алмаза, и вакансии, близко расположенной к атому азота. NV-центры способны излучать поток одиночных фотонов. На таком центре локализуется спин, управляемый оптическими, радиочастотными и микроволновыми воздействиями. Вакансии в структуре алмаза могут быть созданы путем облучения частицами высокой энергии. Цель работы состояла в изучении влияния нейтронного облучения на структурно-чувствительные электрофизические свойства углеродного композита на основе нанодалмаза.

Авторами разработан способ, позволяющий создавать объемные углеродные наноструктурные материалы, основой которых является нанодалмаз (рис. 1). Облучение образцов проводили в реакторе ВВР-М ПИЯФ быстрыми нейтронами ($E > 0,5$ МэВ). Установлено, что сопротивление изменяется немонотонно с ростом флюенса нейтронов и может возрастать более чем в 10 раз (рис. 2).

Предполагается, что в условиях нейтронного облучения происходит превращение «пироглерод – алмаз» на границе контакта этих структурных составляющих. Кроме того, облучение нейтронами сильно возмущает поверхность частиц алмаза за счет постоянной генерации точечных дефектов и их миграции к поверхности. Спектр поверхностных «таммовских» состояний изменяется, что приводит к изменению электротранспортных свойств.

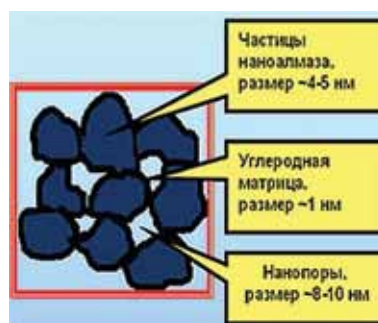


Рис. 1. Структура исследуемых образцов

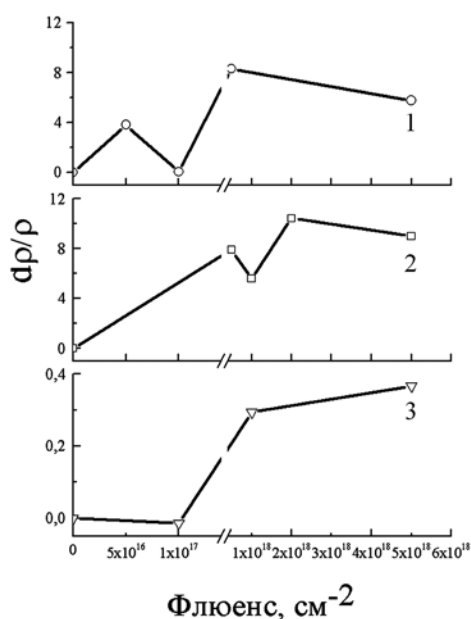


Рис. 2. Зависимость электросопротивления от флюенса нейтронов для образцов, содержащих 5 % (1, 2) и 20 % (3) пироглерода и облученных в воде (1, 3) и в атмосфере гелия (2)

1. Гордеев С. К., Коноплева Р. Ф., Чеканов В. А. ..., Беляев С. П., Голосовский И. В. и др. // ФТТ. 2013. Т. 55. Вып. 7. С. 1380–1385.
2. Беляев С. П., Гордеев С. К., Чеканов В. А., Коноплева Р. Ф., Голосовский И. В. и др. // ФТТ. 2014. Т. 56. Вып. 1. С. 151–155.

Определение содержания золота в углеродистых породах методом нейтронно-активационного анализа

В графитовых рудах, где содержание углерода в породе в целом достигает 10–30 % и более, при химическом анализе обнаруживали до 0,02–4,0 г/т золота, поэтому геологи их относили к неперспективным. Однако с помощью ионной масс-спектрометрии удалось обнаружить, что золота и платиноидов в графитовых рудах гораздо больше.

Методы, предполагающие кислотное и пробирное разложение образцов, показывают очень низкое содержание драгметаллов, в то время как неразрушающие физические методы и метод с термохимическим разложением обнаруживают существенно более высокие их концентрации. Эти особенности, по-видимому, связаны с ролью углерода, который «бронирует» выделения благородных металлов, защищая их от кислотного растворения. Возможно, что часть их находится в неопределяемом стандартными методами нанокластерном состоянии внутри графита. Наличие углерода и кислорода принципиально отличает эти микровключения от традиционных (самородных) форм выделения золота и платиноидов, обуславливает их исключительную устойчивость к внешним воздействиям (обжиг, окисление, кислотное разложение), что создает трудности в анализе валового содержания обычными методами и в создании технологий обогащения и переработки таких руд.

В лаборатории ядерной спектроскопии предложена методика нейтронно-активационного анализа содержания золота в этом типе горных пород. Результаты, приведенные в таблице, подтвердили содержание золота в образцах и были положены в основу оценки перспективности месторождений.

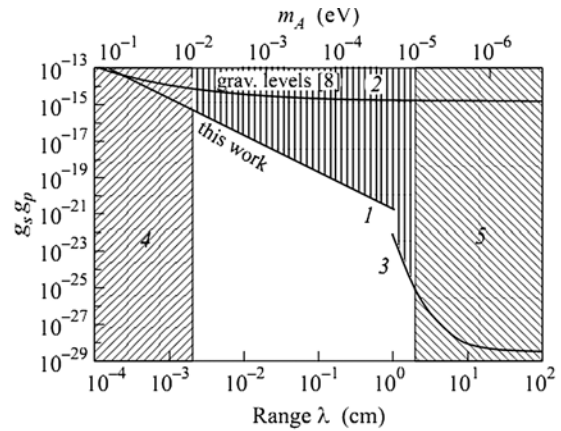
Работа представлена на Международной конференции «Золото Фенноскандинавского щита», Петрозаводск, 1–4 октября 2013 г.

Таблица. Результаты исследования образцов методом инструментального нейтронно-активационного анализа

Образец	C %, Au
704 месторождение Союзное	2.78E-07
706 месторождение Союзное	8.99E-07
709 месторождение Союзное	9.70E-07
721 месторождение Союзное	0,00
713 месторождение Союзное	1.47E-06
717 месторождение Союзное	0,00
637 кимканская толща	1.86E-06
679 кимканская толща	5.77E-07
694 кимканская толща	0,00
562-Т сутырская толща	9.82E-07
653 сутырская толща	0,00
6530 сутырская толща	5.15E-05

Поиск макроскопических CP -нарушающих сил с использованием магнитно-резонансного спектрометра с ультрахолодными нейтронами

Одним из возможных механизмов, ответственных за возникновение CP -нарушения, можно считать существование аксионоподобных частиц. При взаимодействии нейтрона с поверхностью массивного тела может возникать псевдоманнитное поле, являющееся следствием обмена нейтрона и нуклонов вещества легкими – аксионоподобными – частицами. В коллаборации российских физиков из ПИЯФ и ФТИ с физиками из ИЛЛ (Франция) были проведены эксперименты по поиску CP -нарушающих сил в так называемом аксионном окне от $2 \cdot 10^{-3}$ до 2 см. Окно обусловлено отсутствием экспериментальных данных для таких масс (длин) аксионоподобных частиц. Эксперименты были проведены с использованием магнитно-резонансного спектрометра. В результате удалось получить ограничение на безразмерные константы связи аксионоподобных частиц с нуклонами. На рисунке приведены ограничения на произведение констант связи $g_s g_p$ в зависимости от радиуса действия сил. Для величины $0,1 < \lambda < 1$ см ограничения на $g_s g_p$, полученные в данной работе, на 4–5 порядков сильнее, чем полученные ранее.



Ограничения на произведение констант связи $g_s g_p$ в зависимости от радиуса действия сил: 1 – результат измерений с магнитно-резонансным спектрометром ПИЯФ; 2 – ограничения из гравитационных уровней; 3 – область ограничений из измерений ртутными и цезиевыми магнетометрами изменений магнитного поля в зависимости от относительного положения большой свинцовой массы; 4 – исключенная область (из астрофизических наблюдений); 5 – исключенная область (из космологии)

Serebrov A. P. ..., Fomin A. K., Ivanov S. N., Kolomensky E. A., Krasnoshekhova I. A., Lasakov M. S., Lobashev V. M., Pirozhkov A. N., Varlamov V. E., Vasiliev A. V., Zhrebtsov O. M. et al. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. Вып. 1. С. 8–11.

Создание стенда для исследований радиационной стойкости электронной компонентной базы на базе нейтронного времяпролетного спектрометра ГНЕЙС (Синхроциклотрон, Гатчина)

Завершен первый этап по созданию на базе нейтронного времяпролетного спектрометра ГНЕЙС (Гатчинский НЕйтронный Спектрометр) синхроциклотрона ПИЯФ стенда для испытаний радиационной стойкости электронного оборудования на нейтронах с атмосферным спектром (1–1 000 МэВ). За это время были созданы следующие узлы стенда: система коллимации пучка, профилометр пучка, монитор интенсивности пучка, электронно-измерительная система стенда и программное обеспечение. Совместно с ООО «НПЦ

„Гранат“ и ОАО «НИИ КП» проведены испытания. В 2012 г. работа «Создание и экспериментальное исследование на синхроциклотроне пучка нейтронов со спектром, подобным атмосферному, для радиационных испытаний электронной компонентной базы» (авторы: А. С. Воробьев, Е. М. Иванов, Г. Ф. Михеев, Г. А. Рябов, О. А. Щербаков) была признана победителем конкурса им. И. В. Курчатова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» в области инженерных и технологических разработок.



Испытания электронной компонентной базы на нейтронном пучке ГНЕЙС (ПИЯФ)

Абросимов Н. К., Вайшнине Л. А., Воробьев А. С., Иванов Е. М., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А., Тверской М. Г., Щербаков О. А. // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 4. С. 5–12.

Механизм намагничивания образцов при термомагнитной обработке

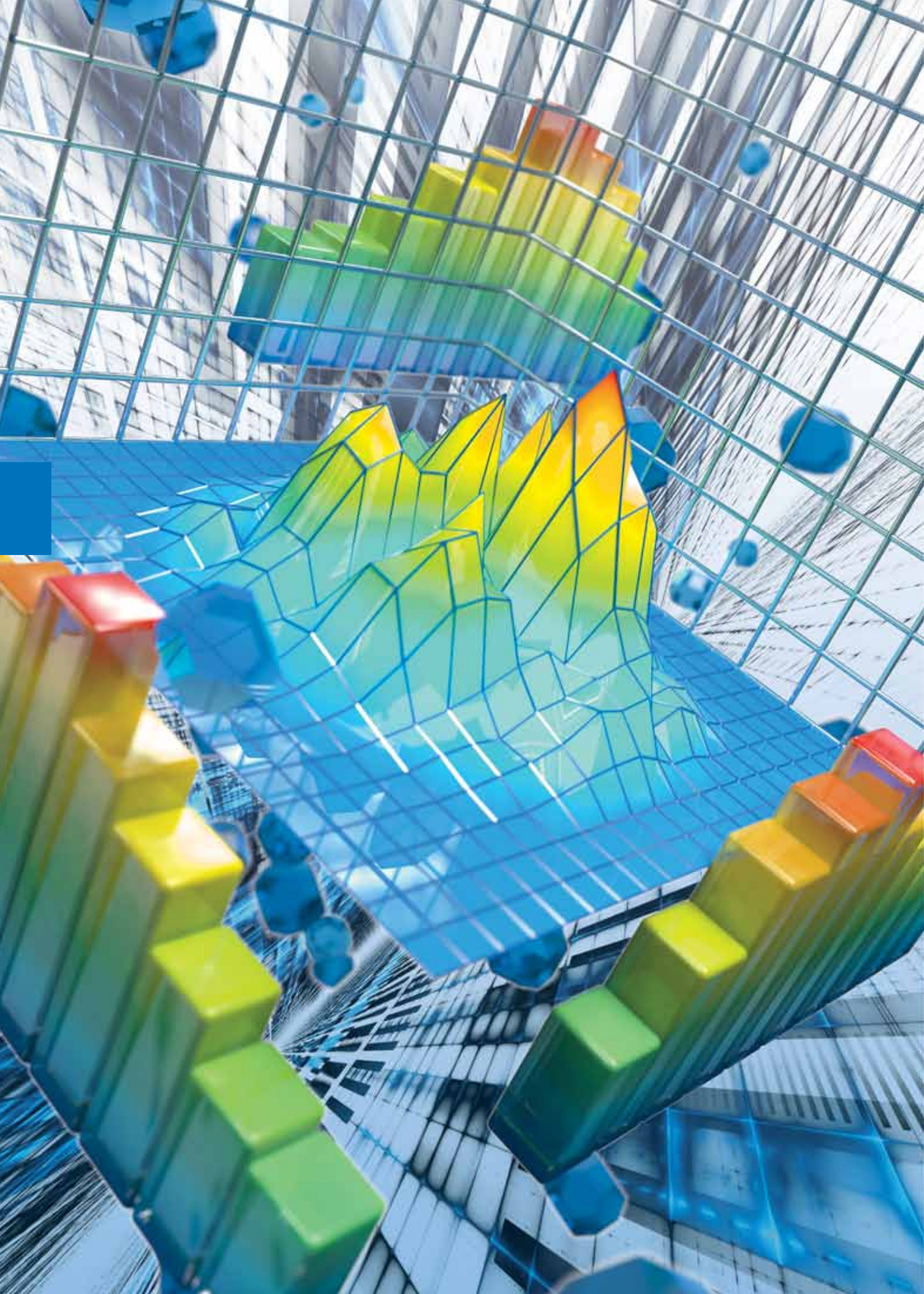
Термомагнитная обработка некоторых ферромагнитных сплавов используется для получения постоянных магнитов. Для изучения механизма этого явления были выполнены измерения на пленках сплава $\text{Co}_{67}\text{Fe}_{31}\text{V}_2$ толщиной 3 мкм. Разработанная нами методика рентгенодифракционных измерений позволила впервые определить кристаллическую симметрию «типичного кубического ферромагнетика» и показать, что причиной магнитной анизотропии пленок является кристаллическая текстура моноклинной фазы $2/m$. После отжига образцов при температурах до 300 °С наблюдались изменения формы гистерезисных кривых (сильный рост остаточной намагниченности) и упорядочение направлений осей b фазы $2/m$.

Взаимосвязь магнитных и кристаллических текстур учитывалась при трактовке экспериментальных данных, полученных на пленках методами рассеяния поляризованных нейтронов: трехмерный векторный анализ, малоугловое рассеяние и рефлектометрия. В процессе отжига пленок

и массивных образцов до температуры ~ 350 °С наблюдались одинаковые результаты малоуглового рассеяния. Основной причиной их качественного отличия при более высоких температурах отжига оказалось формирование мелкодисперсной фазы, связанной с наличием в сплаве V. При больших размерах кристаллитов этой фазы обнаружена сильная интерференция частей рассеянных и первичных нейтронных волн, которая не дает заметного вклада в результаты измерений на пленках. Нами, по-видимому, впервые обнаружен такой эффект и показаны необходимые условия его реализации. Причиной других особенностей поведения намагниченности при отжиге пленок является упорядочение атомов Co и Fe при $t \approx 350$ °С.

Таким образом, принципиальных отличий результатов измерений на разных типах образцов не обнаружено. Однако на анизотропных пленках можно получить более полный набор экспериментальных данных. В частности, удалось объяснить механизм «старения» постоянных магнитов.

1. Ковалев А. В. // Сб. докл. Междунар. научн. конф. «Актуальные проблемы физики твердого тела». Минск, 2011. Т. 2. С. 45–47.
2. Ковалев А. В. Препринт ПИЯФ 2857. Гатчина, 2011. 30 с.
3. Ковалев А. В. // Конденсированные среды и межфазные границы. 2012. Т. 13. Вып. 3. С. 310–316.
4. Ковалев А. В., Смирнов О. П. // ФТТ. 2013. Т. 55. Вып. 1. С. 81–87.
5. Ковалев А. В. // Сб. докл. Междунар. научн. конф. «Актуальные проблемы физики твердого тела». Минск, 2013. Т. 2. С. 97–98.



Фундаментальные и прикладные исследования с использованием протонов. Нейтринная физика

Прецизионное измерение скорости мюонного захвата в водороде и определение псевдоскалярного формфактора нуклона	65
Открытие бозона Хиггса в эксперименте ATLAS на ускорителе Большого адронного коллайдера	66
Открытие бозона Хиггса в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере	67
Наблюдение эффекта «хребта» (“ridge” effect) в эксперименте CMS в протонных соударениях на Большом адронном коллайдере	68
Обнаружение распада $B_s \rightarrow 2\mu$ в эксперименте LHCb на Большом адронном коллайдере	69
Кварк-глюонная, сильновзаимодействующая, почти идеальная жидкость в протон-ядерных столкновениях на Большом адронном коллайдере	70
Экранировка ядерной глюонной плотности из данных по J/ψ -рождению в ультрапериферических столкновениях на Большом адронном коллайдере	71
Кристаллическая коллимация пучков Большого адронного коллайдера	72
Аномалия сверхтонкой структуры и магнитные моменты нейтронодефицитных изомеров Tl со спином $I = 9/2$	73
Асимметричное деление нейтроноизбыточных ядер в районе $Z = 82$	74
Эксперимент D0	75
Передача спина и структура Λ -гиперона	76

Лазерная установка УЛИСС для исследования радиоактивных ядер	77
Модификация матрицы нуклон-нуклонного рассеяния в ядерной среде при энергии 1 ГэВ	78
Методика экспериментального исследования диффузионно-эффузионных свойств урановых мишеней. Измерение вклада вторичных реакций в производство нейтроноизбыточных изотопов при бомбардировке урановой мишени протонами с энергией 1 ГэВ	79
Исследование мультиферроика $GdMn_2O_5$ μ SR-методом	80
Исследование отказов изделий микроэлектроники под действием отдельных нуклонов	81
Ионизационные камеры для измерения параметров пучков протонов	82
Обнаружение геонейтрино детектором «Борексина»	83
Регистрация солнечных <i>пер</i> -нейтрино в эксперименте «Борексина».	84
Поиск распада тяжелого стерильного нейтрино $\nu_H \rightarrow e^+ e^- \nu_L$ в детекторе «Борексина»	85
Поиск солнечных аксионов по их взаимодействию с электронами	86
Эксперимент «Нейтрино-4» по поиску переходов реакторных антинейтрино в стерильное состояние.	87

Прецизионное измерение скорости мюонного захвата в водороде и определение псевдоскалярного формфактора нуклона

В соответствии со Стандартной моделью слабое взаимодействие с участием нуклонов описывается четырьмя формфакторами. Три из них – векторный, аксиальный и магнитный формфакторы – определены с достаточно высокой точностью экспериментальными данными (рассеяние электронов и нейтрино на протоне, магнитные моменты нуклонов, бета-распад нейтрона) с использованием симметрий Стандартной модели и гипотезы сохранения векторного тока. До сих пор не измеренным оставался четвертый – псевдоскалярный – формфактор.

Эту задачу удалось, наконец, решить в эксперименте MuCap, выполненном на мюонном канале «швейцарской мезонной фабрики» института им. Пауля Шеррера с использованием разработанного в ПИЯФ нового экспериментального метода. В этом эксперименте с высокой точностью было измерено время жизни отрицательно заряженного мюона в сверхчистом водороде, что дало возможность определить скорость захвата мюона из состояния $1S$ мезоатома μ^-p :

$$\Lambda_S^{\text{MuCap}} = 714,9 \pm 5,4_{\text{стат.}} \pm 5,1_{\text{сист.}} \text{ с}^{-1}.$$

Отсюда была впервые определена величина псевдоскалярного формфактора нуклона при величине переданного импульса $q_c^2 = -0,88 \text{ м}_\mu^2$, где m_μ – масса мюона:

$$g_p^{\text{MuCap}}(q_c^2) = 8,06 \pm 0,48 \pm 0,28.$$

Знание всех четырех формфакторов нуклона позволяет теперь проводить надежные расчеты любых процессов слабого взаимодействия с участием нуклонов.

Помимо этого, измерение величины псевдоскалярного формфактора нуклона является критическим тестом развиваемой в настоящее время киральной пертурбативной теории (ChPT) нуклона. Эта теория предсказывала следующее значение псевдоскалярного формфактора нуклона: $g_p^{\text{теор.}}(q_c^2) = 8,26 \pm 0,23$. Хорошее согласие этого предсказания с результатом эксперимента MuCap свидетельствует в пользу заложенных в теорию фундаментальных принципов.

Мюон останавливается и регистрируется в чувствительном объеме времяпроекционной камеры – TPC (рис.), наполненной сверхчистым (10^{-9}) водородом при давлении 10 атм. Электрон от распада мюона регистрируется окружающей TPC-системой пропорциональных камер (ePC) и сцинтилляционных счетчиков (eSC).

Время жизни мюона определяется по разности между временем остановки мюона и временем регистрации электрона. Всего зарегистрировано более 10 млрд остановок мюонов.

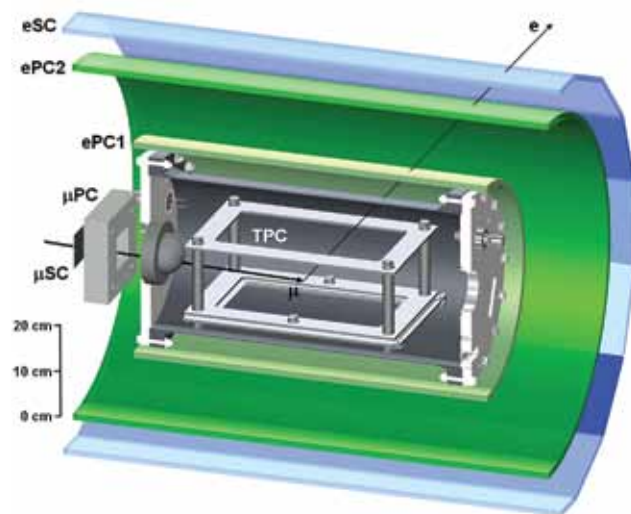


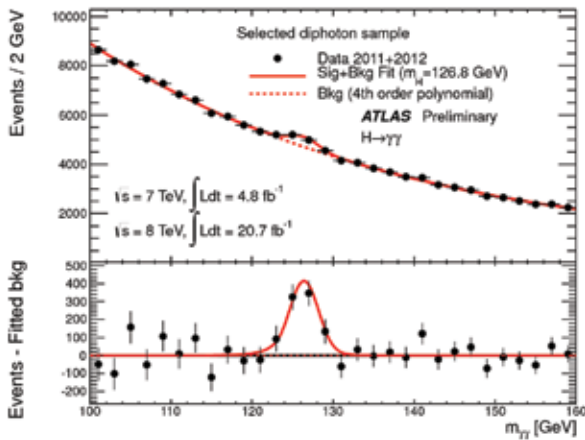
Схема установки MuCap

Andreev V. A. ..., Ganzha V. A. ..., Kravtsov P. A., Krivshich A. G. ..., Maev E. M., Maev O. E. ..., Petrov G. E. ..., Schapkin G. N., Semenchuk G. G., Soroka M. A. ..., Vasilyev A. A., Vorobyov A. A., Vznuzdaev M. E. et al. (MuCap Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 012504.

Открытие бозона Хиггса в эксперименте ATLAS на ускорителе Большого адронного коллайдера

Открытие бозона Хиггса с массой ~ 125 ГэВ в эксперименте ATLAS на ускорителе Большого адронного коллайдера имеет выдающееся значение для физики, т. к. оно подтверждает механизм генерации масс всех элементарных частиц, заложенный в Стандартную модель (СМ) более 40 лет назад. Кроме того, впервые открыта элементарная частица со спином ноль. Несмотря на то, что поиск бозона Хиггса выполнялся для всех возможных мод распадов, надежно бозон Хиггса пока зарегистрирован в распадах на четыре лептона, на два фотона и на пару W -бозонов. Измеренное распределение по инвариантной массе в каналах распада $H \rightarrow \gamma\gamma$ и $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ показано на рисунке. Существенное значение в открытии бозона Хиггса в распадах на электроны сыграл детектор переходного излучения (Transition Radiation Tracker), в разработке

и создании которого участвовало Отделение физики высоких энергий ПИЯФ. В каналах распада $H \rightarrow \gamma\gamma$ и $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ наблюдается превышение сигнала над фоном на уровне $\sim 7\sigma$ стандартных отклонений, что соответствует вероятности флуктуации фона $\sim 3 \cdot 10^{-11}$. Измеренная масса бозона в канале распада на два фотона $H \rightarrow \gamma\gamma$ (четыре электрона $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$) равна $126,8 \pm 0,2$ (стат.) $\pm 0,7$ (сист.) ГэВ ($124,3^{+0,6}_{-0,5}$ (стат.) $^{+0,5}_{-0,3}$ (сист.) ГэВ). Отношение измеренного сечения к сечению ожидаемого из предсказаний СМ (интенсивность сигнала) составила $\sim 1,7$ для обоих каналов, что соответствует $\sim 2,3\sigma$ стандартного отклонения от предсказаний СМ. Анализ четности и спина хорошо согласуется с гипотезой для частицы со спином ноль и отрицательной четностью.



Распределения по массе двух фотонов (слева) и четырех электронов (справа), измеренные в эксперименте ATLAS

Aad G. et al. (ATLAS Collaboration) // Phys. Lett. B. 2012. V. 716. P. 1.

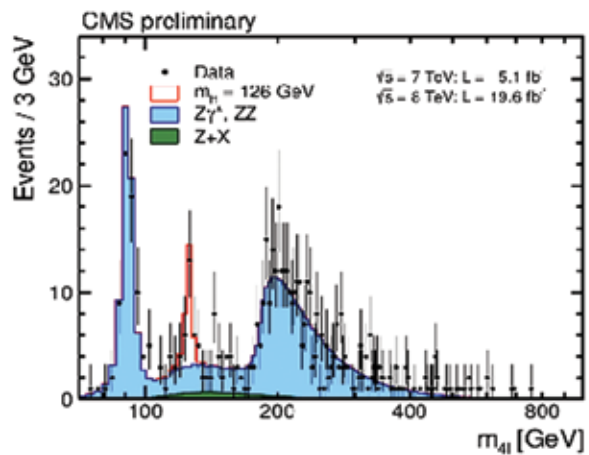
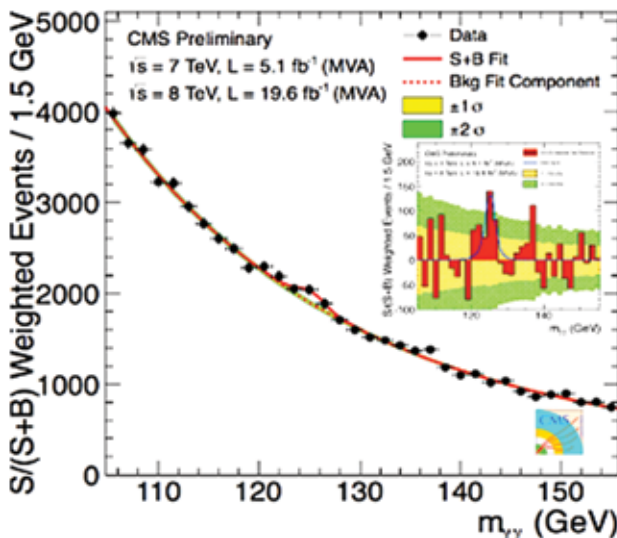
Открытие бозона Хиггса в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере

Эксперимент CMS, один из самых амбициозных проектов физики высоких энергий, уже на первом этапе работы ускорителя Большого адронного коллайдера продемонстрировал уникальные возможности по расширению границ наших знаний в области фундаментальной физики элементарных частиц. Основным результатом CMS на данный момент является открытие бозона Хиггса с массой ~ 125 ГэВ – кванта фундаментального скалярного поля вакуума, отвечающего в Стандартной модели за спонтанное нарушение симметрии электрослабых взаимодействий и происхождение масс элементарных частиц. В CMS бозон Хиггса был зарегистрирован в распадах на два Z -бозона с последующим распадом на четыре лептона ($H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$, где $l = \mu, e$), а также в распадах на два фотона, на два W -бозона, на два τ -лептона и на b -кварки. Измеренные распределения по инвариантной массе

в каналах распада $H \rightarrow \gamma\gamma$ и $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ показаны на рисунке.

В каналах распада $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ и $H \rightarrow \gamma\gamma$ наблюдается превышение сигнала над фоном на уровне $6,8\sigma$ и $3,3\sigma$ соответственно. Масса бозона, измеренная в канале $H \rightarrow \gamma\gamma$, равна $125,4 \pm 0,8$ ГэВ, а в канале $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ равна $125,8 \pm 0,6$ ГэВ. Отношение измеренного сечения к ожидаемому сечению в Стандартной модели для этих каналов составило $0,91 + 0,30 - 0,24$ и $0,78 + 0,28 - 0,26$ соответственно. Анализ четности и спина согласуется с гипотезой для частицы со спином ноль и положительной четностью, в согласии с предсказаниями Стандартной модели.

Важную роль в обнаружении бозона Хиггса сыграл торцевой мюонный детектор (Muon Endcap Detector), в разработку и создание которого большой вклад внес ПИЯФ.



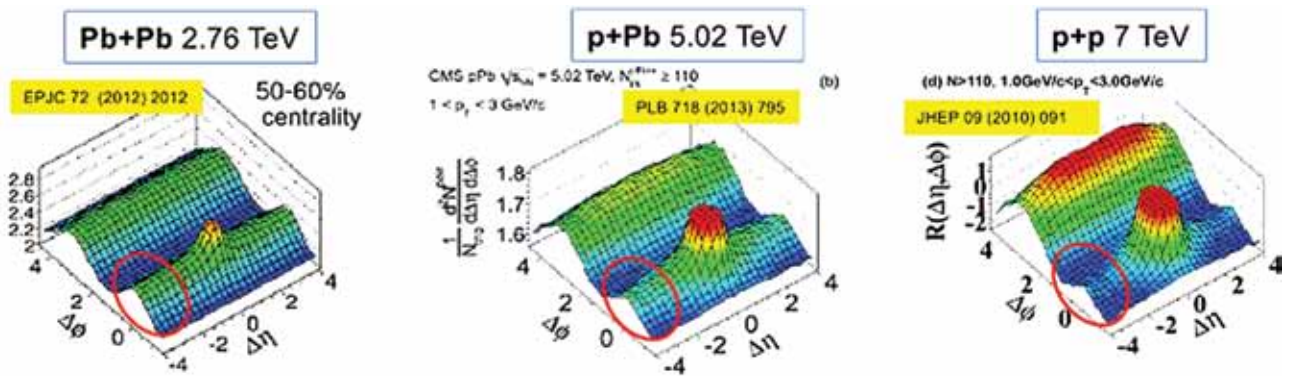
Распределения по инвариантной массе двух фотонов (слева) и четырех лептонов (справа), измеренные в эксперименте CMS

Chatrchyan S. ..., Golovtsov V., Ivanov Yu., Kim V., Levchenko P., Murzin V., Oreshkin V., Smirnov I., Sulimov V., Uvarov L., Vavilov S., Vorobyev A., Vorobyev An. et al. // Phys. Lett. B. 2013. V. 716. P. 30.

Наблюдение эффекта «хребта» (“ridge” effect) в эксперименте CMS в протонных соударениях на Большом адронном коллайдере

Первым результатом, полученным на Большом адронном коллайдере (БАК), вызвавшим большой интерес, было обнаружение эффекта «хребта» (“ridge” effect), который был обнаружен в 2010 г. в эксперименте CMS при столкновениях протонов с большой множественностью образованных частиц при энергии 7 ТэВ. При измерении двухчастичных корреляций по быстройте ($\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$, где θ – полярный угол) и азимутальному углу были обнаружены дальние быстротные корреляции на той же стороне по азимуту, где выбиралась триггерная частица. Измеренная двухчастичная корреляционная функция имеет следующие характерные особенности (см. рис.): область в районе триггерной частицы имеет форму башни, а характерная выпуклость на противоположной триггерной частице стороне имеет форму «хребта», причем обе формы

ожидаются из кинематических условий. В то же время появление «хребта» на стороне триггерной частицы при больших быстротах в pp -соударениях с большой множественностью (более 110 заряженных частиц) оказалось весьма неожиданным. Этот эффект, ранее наблюдавшийся только в центральных соударениях тяжелых ионов на RHIC в BNL, интерпретировался как проявление нового состояния кварк-глюонной материи при большой температуре и барионной плотности. Эффект «хребта» наблюдается также в pPb - и $PbPb$ -соударениях на БАК и до сих пор не имеет однозначных теоретических интерпретаций.



Двухчастичные корреляционные функции для $PbPb$ - (слева), pPb - (центр) и pp - (справа) соударений, измеренные в эксперименте CMS

Chatrchyan S. ..., Golovtsov V., Ivanov Yu., Kim V., Levchenko P., Murzin V., Oreshkin V., Smirnov I., Sulimov V., Uvarov L., Vavilov S., Vorobyev A., Vorobyev An. et al. (CMS Collaboration) // JHEP. 2010. V. 1009. P. 091.

Обнаружение распада $B_s \rightarrow 2\mu$ в эксперименте LHCb на Большом адронном коллайдере

В Стандартной модели нейтральные токи, меняющие ароматы кварков, подавлены на три порядка, что приводит к исключительно малой ожидаемой вероятности распадов $B_{s,d} \rightarrow 2\mu$: $\text{Br}(B_s \rightarrow 2\mu) = (3,35 \pm 0,28) \cdot 10^{-9}$ и $\text{Br}(B_d \rightarrow 2\mu) = (1,07 \pm 0,1) \cdot 10^{-10}$. Однако присутствие «новой физики», например SUSY (суперсимметричное расширение Стандартной модели), может существенно увеличить вероятности этих распадов. Поэтому измерение вероятности распадов $B_{s,d} \rightarrow 2\mu$ является критическим тестом различных гипотез «новой физики». В настоящее время в LHCb получены следующие результаты измерения вероятности распадов $B_{s,d} \rightarrow 2\mu$:

$$\text{Br}(B_s \rightarrow 2\mu) = (2,9^{+1,1}_{-1,0} \text{ (стат.) } +^{0,3}_{-0,1} \text{ (сист.)}) \cdot 10^{-9}$$

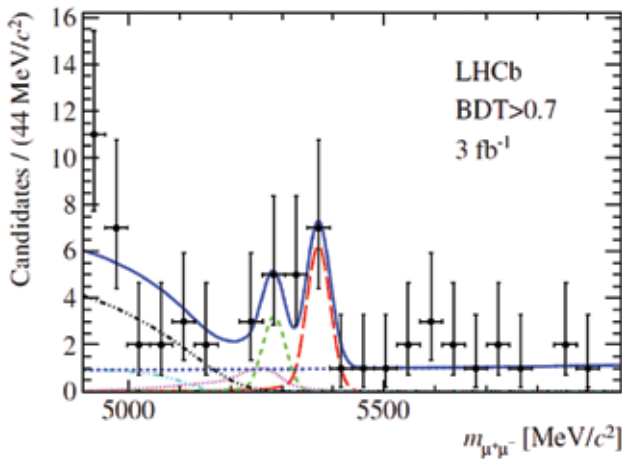
$$\text{и } \text{Br}(B_d \rightarrow 2\mu) < 7,4 \cdot 10^{-10}$$

с вероятностью 95 %.

На спектре инвариантных масс (рис.), полученном в результате анализа экспериментальных

данных, наблюдается отчетливое превышение данных над фоном в районе массы B_s -мезона. Величина превышения составляет 4 стандартных отклонения от фоновой гипотезы. Привлечение дополнительно данных о вероятности распада $B_s \rightarrow 2\mu$, полученных в эксперименте CMS, позволило объявить об открытии распада B_s -мезона на два мюона. Измеренная вероятность распада согласуется со значением, вычисленным в Стандартной модели. Тем самым исключается ряд моделей «новой физики».

Мюонная система LHCb, с использованием которой регистрировались мюоны от распада $B_s \rightarrow 2\mu$, разработана и в значительной части изготовлена в ПИЯФ. Группа ПИЯФ принимала участие в анализе экспериментальных данных по поиску распада $B_{s,d} \rightarrow 2\mu$. Предложенный этой группой метод анализа, позволивший повысить чувствительность к сигналу, был принят коллаборацией как стандартный.



Экспериментальный спектр инвариантных масс ди-мюонов в районе массы B_s - и B_d -мезонов LHCb

Кварк-глюонная, сильновзаимодействующая, почти идеальная жидкость в протон-ядерных столкновениях на Большом адронном коллайдере

Яркое явление обнаружено в эксперименте ALICE при изучении протон-ядерных столкновений с энергией 5,02 ТэВ, в которых триггером, регистрирующим лидирующую частицу струи с поперечными импульсами в интервале 2–4 ГэВ, были отобраны события с высокой множественностью. При анализе корреляций триггерных частиц с пионами и протонами в таких событиях обнаружена двухриджевая структура, показанная на рис. 1.

Такая структура означает существование дальнедействующих корреляций между двумя частицами, отделенными большим интервалом по быстроте и азимутальным углом, близким к π . Похожая картина была ранее обнаружена в центральных столкновениях тяжелых ядер, в которых в объеме, существенно превышающем объем нуклона, формировалась кварк-глюонная среда с температурой около 300 МэВ, обладающая свойствами

сильновзаимодействующей, почти идеальной жидкости. Одним из наиболее характерных признаков такой среды являются значительные эллиптические потоки частиц с разной массой. Параметр v_2 , характеризующий величину эллиптических потоков в PbPb-столкновениях, показан на рис. 2 (слева).

Результат аналогичного фурье-анализа угловых корреляций триггерной частицы с пионами и протонами в протон-ядерном взаимодействии с высокой множественностью (рис. 2, справа) демонстрирует удивительное сходство с поведением в PbPb-столкновении. Это наблюдение можно рассматривать как первое указание, что в протон-протонном взаимодействии с высокой множественностью в объеме, близком к объему нуклона, формируется горячая сверхплотная кварк-глюонная среда с признаками сильновзаимодействующей, почти идеальной жидкости.

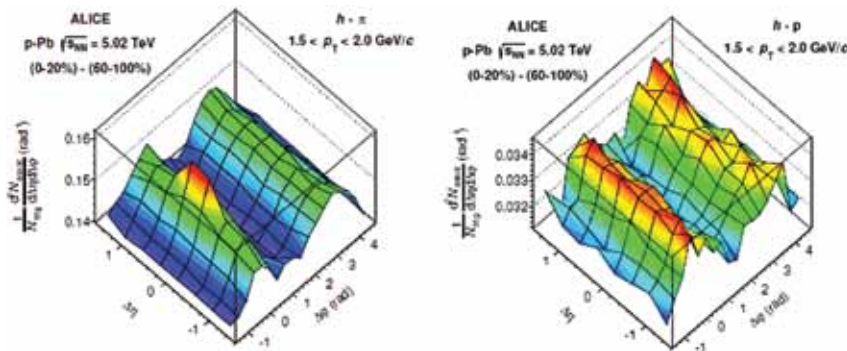


Рис. 1. Корреляции триггерной частицы с пионом (слева) и протоном (справа)

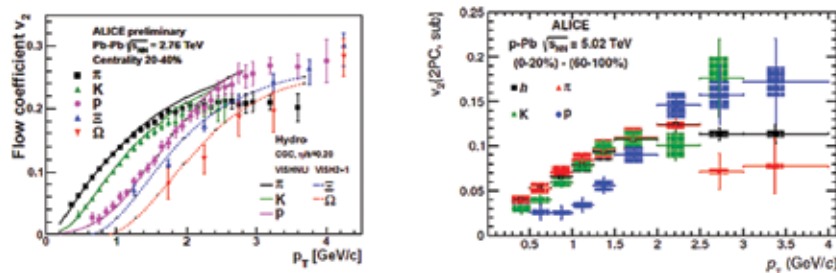


Рис. 2. Параметр эллиптического потока в PbPb-столкновениях (слева) и pPb-столкновениях (справа)

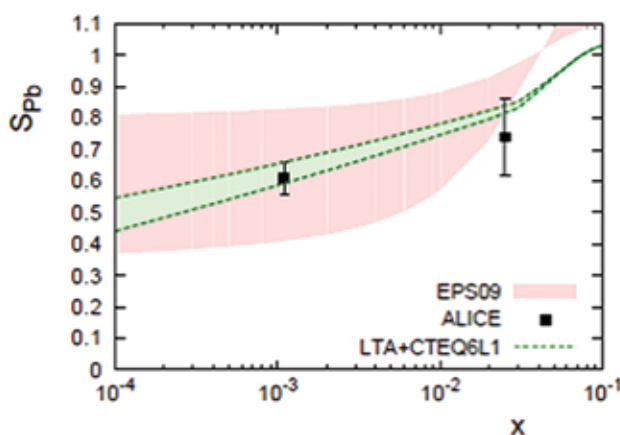
Ivanov V., Khanzadeev A., Kryshen E., Malaev M., Nikulin V., Samsonov V., Zhalov M. (ALICE Collaboration) // Phys. Lett. B. 2013. V. 726. P. 164–177.

Экранировка ядерной глюонной плотности из данных по J/ψ -рождению в ультрапериферических столкновениях на Большом адронном коллайдере

Впервые получена фактически прямая экспериментальная оценка фактора $R_A(x, Q^2)$ экранировки ядерных глюонов, несущих малую долю x нуклонного импульса в ядре. Поскольку плотности глюонов в ядрах $G_A(x, Q^2)$ и в нуклоне $G_N(x, Q^2)$ определяются непертурбативными эффектами, их невозможно вычислить в КХД. В то же время величина $R_A(x, Q^2) = G_A(x, Q^2)/AG_N(x, Q^2)$ является одним из ключевых параметров, важных не только для оценки сечений жестких процессов в ядерных взаимодействиях, но и для понимания механизма формирования и эволюции кварк-глюонной материи в столкновении ультрарелятивистских ионов на RHIC и Большом адронном коллайдере. Фактически поведение $R_A(x, Q^2)$ при малых x определяет, при каких энергиях происходит переход на новый режим КХД, характеризуемый сильными когерентными глюонными полями при малой константе сильного взаимодействия, и реализуется новое состояние материи – насыщенная глюонная плазма. Оценка $R_A(x, Q^2)$ из данных по глубоко неупругому рассеянию электронов на ядрах приводит к большим неопределенностям в величине $R_A(x, Q^2)$ при малых x , где неопределенность превышает

фактор 2 (розовый цвет на рисунке – пример области неопределенности $R_A(x, Q^2)$ в одном из глобальных анализов – EPS09).

Из измеренных на детекторе ALICE сечений фоторождения чармония на ядре в ультрапериферических столкновениях ядер свинца модельно-независимым способом найдена величина фактора ядерного подавления S_{Pb} при двух значениях x (черные квадраты на рисунке). В лидирующем порядке теории возмущения КХД ядерное подавление определяется эффектом экранировки ядерных глюонов. На рисунке приведено сравнение значений S_{Pb} и величины $R_A(x, Q^2)$, рассчитанной без привлечения свободных параметров в приближении лидирующих твистов, основанном на использовании уравнений эволюции ДГЛАП. Разумное согласие позволяет считать извлеченные из анализа данных значения S_{Pb} первой, фактически прямой, экспериментальной оценкой эффекта экранировки ядерных глюонов в области малых x , а использованный в анализе теоретический подход – адекватным методом вычисления плотности глюонов в ядрах при x в интервале 0,01–0,001.



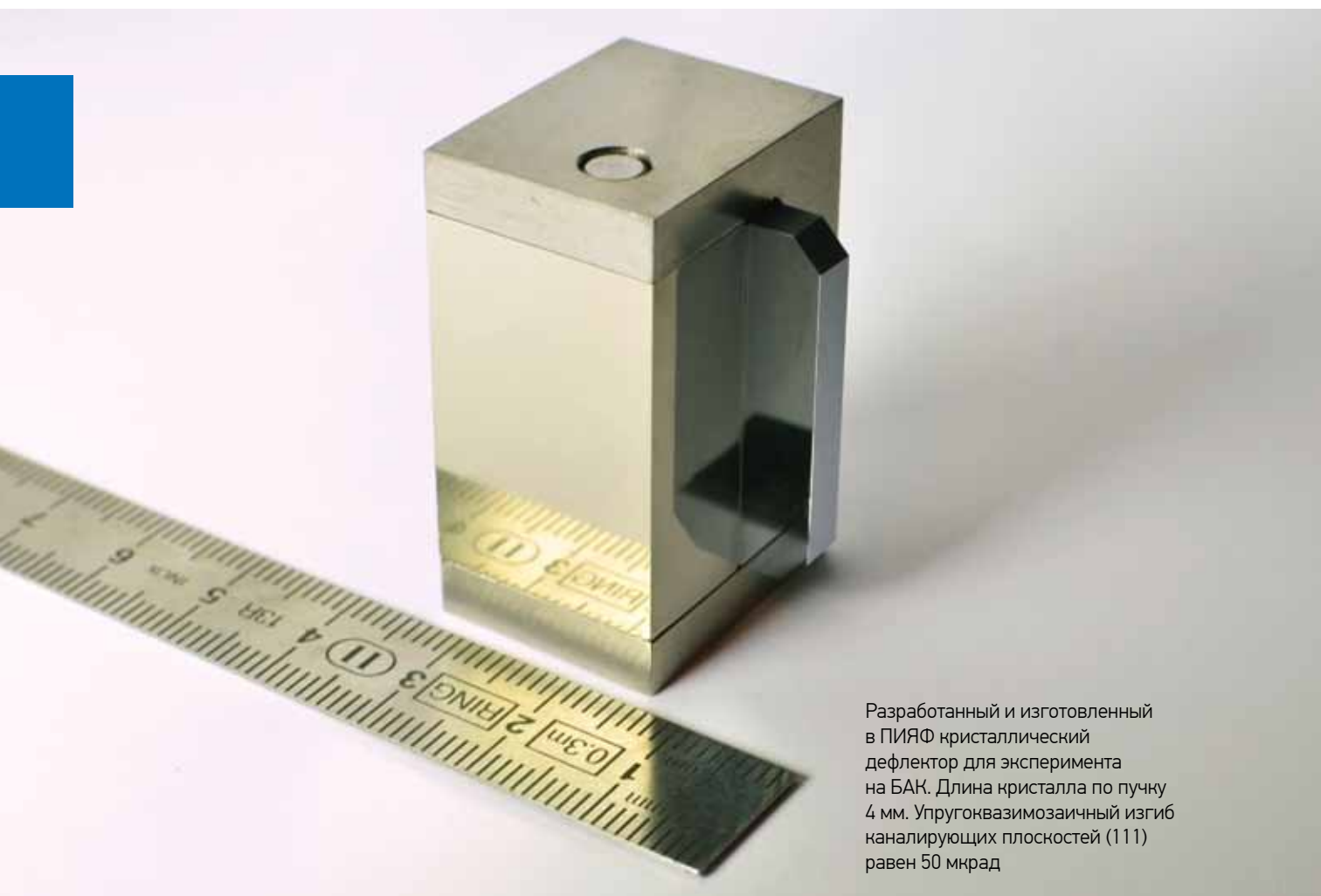
Экранировка глюонной плотности в ядре Pb

1. Ivanov V., Kryshen E., Khanzadeev A., Malaev M., Nikulin V., Samsonov V., Zhalov M. (ALICE Collaboration) // Phys. Lett. B. 2013. V. 718. P. 1273–1283; Eur. Phys. J. C. 2013. V. 73. Art. 2617.
2. Guzey V., Kryshen E., Zhalov M., Strikman M. // Phys. Lett. B. 2013. V. 726. P. 290.
3. Guzey V., Zhalov M. // JHEP. 2013. V. 1013. P. 20.

Кристаллическая коллимация пучков Большого адронного коллайдера

Сотрудничество ИФВЭ – ПИЯФ занимает лидирующие позиции в мире в исследовании и практическом применении кристаллов для управления протонными пучками. С участием ПИЯФ и ИФВЭ в 2011–2013 гг. выполнены международные эксперименты H8RD22 и UA9 на ускорителе SPS в ЦЕРН, подтвердившие перспективность применения кристаллов для коллимации пучков Большого

адронного коллайдера (БАК) с целью повышения светимости. На основе полученных результатов принято решение об установке пробной системы кристаллической коллимации непосредственно в кольце БАК. В 2013 г. выполнено проектирование и начато изготовление узлов экспериментальной установки для БАК (см. рис.).



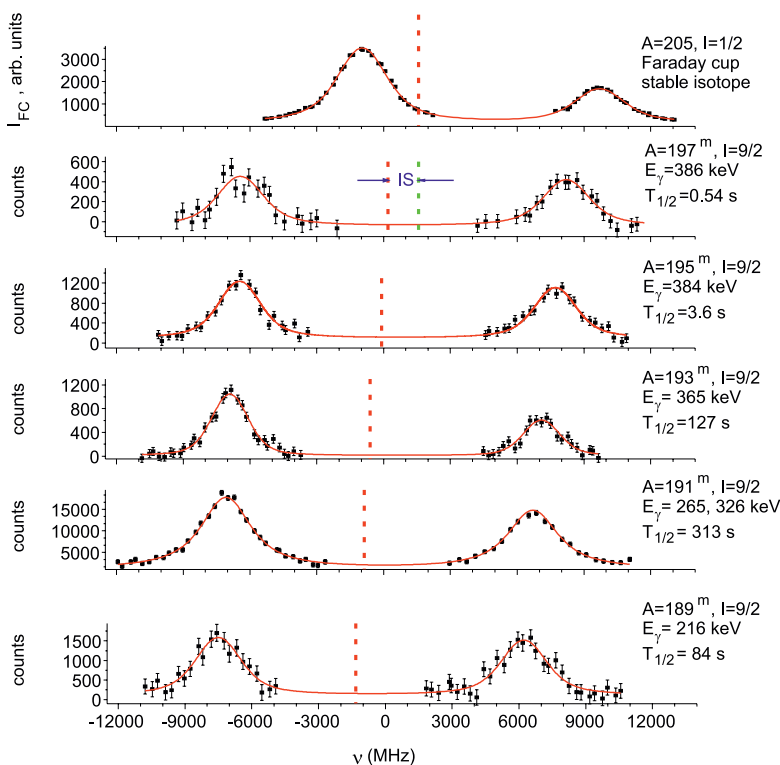
Разработанный и изготовленный в ПИЯФ кристаллический дефлектор для эксперимента на БАК. Длина кристалла по пучку 4 мм. Упругоквазимозаичный изгиб наналирующих плоскостей (111) равен 50 мкрад

1. Scandale W., Arduini G., Assmann R. et al. // Phys. Lett. B. 2010. V. 692. P. 78.
2. Scandale W., Arduini G., Assmann R. et al. // Phys. Lett. B. 2011. V. 703. P. 547.
3. LUA9 Collaboration (CERN, IHEP, Imperial College, INFN, JINR, LAL, PNPI, SLAC) // CERN-LHCC-2011-007/LHCC-I-019 10/06/2011.
4. Scandale W., Arduini G., Assmann R. et al. // Phys. Lett. B. 2012. V. 714. P. 231.
5. Scandale W., Arduini G., Butcher M. et al. // Phys. Lett. B. 2013. V. 726. P. 182.

Аномалия сверхтонкой структуры и магнитные моменты нейтронодефицитных изомеров Tl со спином $I = 9/2$

Методом резонансной лазерной фотоионизации в ионном источнике проведена серия экспериментов по измерению сверхтонкого расщепления оптической линии 276,9 нм в нечетных нейтронодефицитных изомерах Tl ($A = 187, 189, 191, 193, 195, 197$) со спином $I = 9/2$ (см. рис.). Из сравнения с измеренным ранее для линии 535,2 нм сверхтонким расщеплением определена дифференциальная аномалия сверхтонкой структуры (АСТС) для атомных уровней $6p^2P_{1/2}$ и $7s^2S_{1/2}$. АСТС связана с неточностью распределения магнетизма по объему ядра. Анализ этой характеристики позволяет делать выводы о характере этого распределения, а также о конфигурационном смешивании. Ранее АСТС измерялась только для стабильных и долгоживущих изотопов, потому систематический

анализ экспериментальных данных был невозможен. В данной работе применен новый метод измерения АСТС, пригодный и для короткоживущих удаленных изотопов. Нам удалось существенно уточнить ранее измеренные магнитные моменты изомеров Tl со спином $I = 9/2$. Проведено сравнение с расчетом АСТС в рамках многоконfigurационного метода Хартри – Фока. Удовлетворительное описание экспериментальных данных свидетельствует о применимости данного подхода для расчета атомных факторов, необходимых для извлечения информации о распределении намагниченности в ядре из экспериментальных данных об АСТС. Впервые определены магнитные моменты $^{195m, 197m}Tl$. Предложены новые измерения АСТС для нечетно-нечетных изотопов Tl.



Спектры сверхтонкой структуры нечетных изомеров Tl со спином $9/2$

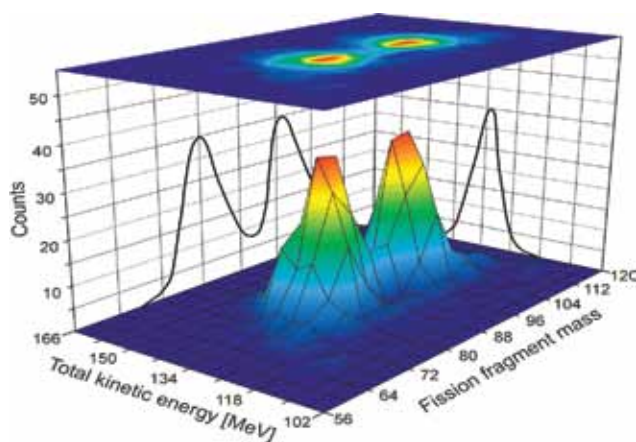
Асимметричное деление нейтроноизбыточных ядер в районе $Z = 82$

В экспериментах, проведенных на установке ISOLDE в ЦЕРН, обнаружено новое неожиданное явление: асимметричное запаздывающее деление ядра ^{180}Tl . Впервые надежно установлено существование запаздывающего деления у ядер со столь малым отношением $N/Z = 1,25$ (в урановой области $N/Z = 1,55-1,59$). Измерена ветка запаздывающего деления ($3,6(7) \cdot 10^{-3} \%$), и определено массовое распределение осколков, показывающее, что осколки группируются в районе $A = 80$ и 100 (см. рис.). Эта асимметрия полностью противоречит всем имеющимся данным по низкоэнергетичному делению ядер легче $A_{с}$. Данное явление тем более неожиданно, что при симметричном делении образовывались бы два «почти магических» ядра ^{90}Zr , $N = 50$, что энергетически значительно выгоднее, чем асимметричное деление. Объяснение наблюдаемой аномалии требует создания динамической

модели деления с детальным учетом как макроскопических, так и микроскопических степеней свободы. Эксперименты по исследованию запаздывающего деления в этой области нуклидной карты были продолжены (^{178}Tl , ^{182}Tl , ^{200}Fr и т. д.).

О значимости полученного результата свидетельствуют, в частности, публикации об этом эксперименте в целом ряде интернет-изданий и журналов, специализирующихся на популяризации физики: NatureNews, 1 December 2010; Scientific American, 1 December 2010; ScienceNews, 1 January 2011. V. 179. No. 1; PhysicsWorld.com, 10 December 2010; PhysOrg.com, 6 December 2010.

В экспериментах принимали участие исследователи из ведущих ядерных лабораторий Европы. Одним из определяющих стал вклад группы сотрудников лаборатории короткоживущих ядер Отделения физики высоких энергий ПИЯФ.



Массовое распределение осколков деления ^{180}Hg в зависимости от полной кинетической энергии осколков

1. Andreyev A. N. ..., Barzakh A. ..., Fedorov D. ..., Seliverstov M. et al. // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 105. P. 252502.
2. Elseviers J. ..., Barzakh A. ..., Fedorov D. ..., Seliverstov M. et al. // Phys. Rev. C. 2013. V. 88. P. 044321.
3. Liberati V. ..., Barzakh A. ..., Fedorov D. ..., Molkanov P. ..., Seliverstov M. et al. // Phys. Rev. C. 2013. V. 88. P. 044322.

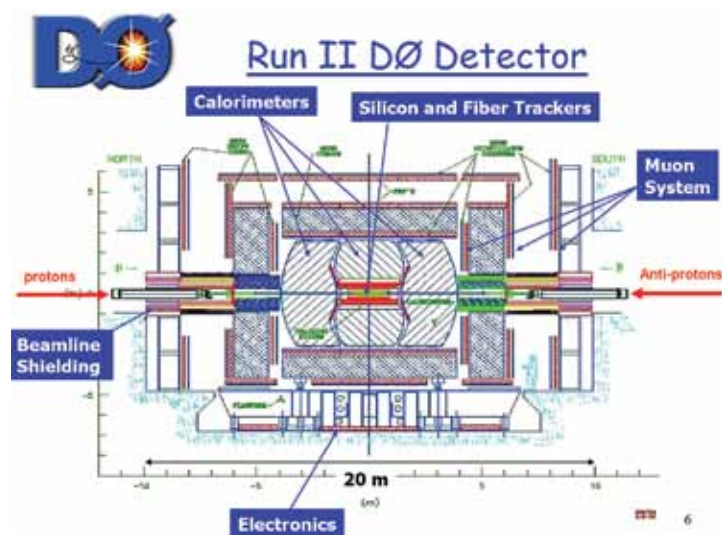
Эксперимент D0

ПИЯФ участвовал в международном эксперименте D0, посвященном физике элементарных частиц, проводившемся в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (FNAL, США) на коллайдере «Тэватрон» с самой высокой в мире энергией (1 ТэВ) сталкивающихся пучков ускоренных протонов и антипротонов. На рисунке приводится схематическое изображение экспериментальной установки D0.

Физики ПИЯФ разработали и создали электронику для считывания информации с 50 тыс. каналов мини-дрейфовых трубок мюонного детектора D0, участвовали в сеансах по набору данных и в их анализе. Набор экспериментальных данных был завершен в 2011 г.; в 2011–2013 гг. продолжался анализ данных. В эксперименте D0 был получен большой объем новых сведений о свойствах и превращениях элементарных частиц, опубликованных в более чем трех сотнях научных статей. Открыт ряд

новых элементарных частиц, предсказанных Стандартной моделью, в том числе и один из базисных компонентов Стандартной модели – топ-кварк.

Здесь мы отметим лишь несколько важных результатов, полученных в последнее время. В совместном анализе данных экспериментов D0 и CDF, проводившемся с целью поиска бозона Хиггса, в спектре масс искомой частицы обнаружено превышение количества событий над фоном более чем на 3 стандартных отклонения. Наблюдаемый спектр соответствует предположению о рождении в столкновениях протонов с антипротонами бозона Хиггса с массой $\sim 125 \text{ ГэВ}/c^2$. В экспериментах D0 и CDF получены наиболее точные значения масс топ-кварка и W -бозона. В данных эксперимента D0 обнаружен сигнал, соответствующий частице с массой $M = 4140 \text{ МэВ}/c^2$. Природа этой частицы пока не выяснена. Предполагается, что она имеет необычную структуру – состоит из 4-х кварков.



Схематическое изображение детектора D0

1. Aaltonen T. A. ..., Alkhazov G. D., Lobodenko A. A., Neustroev P. V., Scheglov Yu. A., Uvarov L. N., Uvarov S. L. et al. // Phys. Rev. D. 2012. V. 86. P. 092003.
2. Aaltonen T. A. ..., Alkhazov G. D., Lobodenko A. A., Neustroev P. V., Scheglov Yu. A., Uvarov L. N., Uvarov S. L. et al. // Phys. Rev. D. 2013. V. 88. P. 052014.
3. Aaltonen T. A. ..., Alkhazov G. D., Lobodenko A. A., Neustroev P. V., Scheglov Yu. A., Uvarov L. N., Uvarov S. L. et al. // Phys. Rev. D. 2013. V. 88. P. 052018.
4. Abazov V. M. ..., Alkhazov G. D., Lobodenko A. A., Neustroev P. V., Scheglov Yu. A., Uvarov L. N., Uvarov S. L. et al. // Fermilab-pub-13-405-E, arXiv:1309.6580[hep-ex].

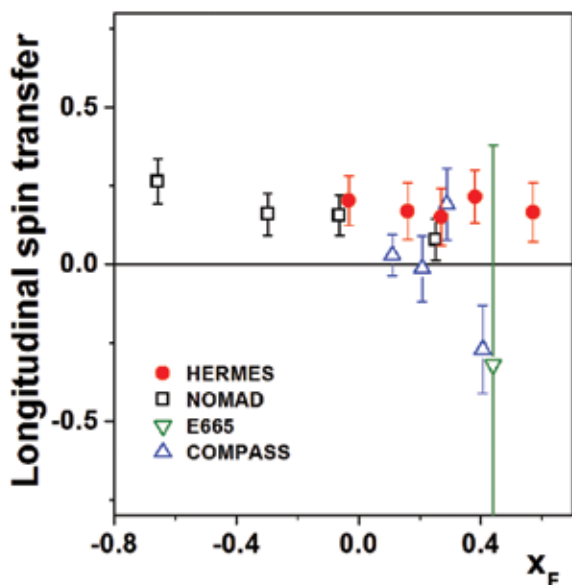
Передача спина и структура Λ -гиперона

Эксперимент ГЕРМЕС на позитронном кольце коллайдера ГЕРА (Гамбург) был нацелен на изучение спиновой структуры нуклона. Поляризованный пучок позитронов с энергией 27,6 ГэВ рассеивался на внутренней мишени поляризованных протонов (дейтронов). Взаимодействие происходило фактически с кварками в поляризованном нуклоне, что и позволяло по асимметрии рассеяния судить о его «спиновой» структуре. Эти исследования привели в конечном счете к решению проблемы так называемого спинового кризиса. Ближайшим «родственником» протона и нейтрона является Λ -гиперон, в состав которого помимо легких u - и d -кварков входит более массивный «странный» s -кварк.

Какова спиновая структура Λ -гиперона и других, более тяжелых, барионов? Идея решения этой задачи в эксперименте ГЕРМЕС была предложена группой ПИЯФ. Измерялась передача поляризации D_{LL}^{Λ} от кварка в мишени Λ -гиперону, которая

тесно связана с его спиновой структурой. Полученные результаты предварительно опубликованы.

На рисунке показаны современные мировые данные по D_{LL}^{Λ} в зависимости от относительной энергии Λ -гиперона x_F . Это полученные нами данные на поляризованных позитронах (ГЕРМЕС) и данные экспериментов на нейтринном (NOMAD) и мюонном (COMPASS, E665) пучках. Существенно, что нам удалось пройти в область токовой фрагментации ($x_F > 0,4$), где механизм реакции становится более прозрачным. Вопреки предсказаниям теории, измеренная (интегральная) передача спина оказалась положительной: $D_{LL}^{\Lambda} = 0,15 \pm 0,03_{stat} \pm 0,02_{syst}$. Последнее соответствует положительной поляризации u -кварка в Λ -гипероне на уровне 0,1–0,2, что означает *сильное* нарушение $SU(3)_f$ -симметрии, положенной в основу представлений о структуре барионов, входящих в $SU(3)_f$ -спин 1/2 октет и спин 3/2 декуплет.



Данные по D_{LL}^{Λ} в зависимости от относительной энергии Λ -гиперона x_F

1. Belostotsky S., Veretennikov D., Naryshkin Y. // J. Phys.: Conf. Ser. 2011. V. 295. P. 012114.
2. Naryshkin Y. (HERMES Collaboration) // Nucl. Phys.: Proc. Suppl. 2011. V. 210–211. P. 111–114.

Лазерная установка УЛИСС для исследования радиоактивных ядер

Метод резонансной лазерной фотоионизации в ионном источнике впервые был предложен и реализован на масс-сепараторе ИРИС (Отделение физики высоких энергий ПИЯФ). Здесь же данная методика была впервые использована для исследования размеров и формы ядер. Этот метод стал одним из основных инструментов в лазерно-спектроскопических исследованиях атомных ядер во всем мире, прежде всего на установке ISOLDE в ЦЕРН. В 2010 г. лазерная установка, основанная на данном методе и действовавшая на масс-сепараторе ИРИС, была существенно модернизирована. Новая Ультрафиолетовая Лазерно-Ионизационная Спектроскопическая Система (УЛИСС) для получения изобарно-чистых ионных токов и спектроскопических исследований, дающих информацию о размере и формах ядер, позволила значительно расширить круг доступных для исследования элементов. Целый ряд

нововведений позволил также увеличить стабильность и эффективность системы.

Были проведены первые тесты установки: резонансная ионизация и исследование нейтронodefицитных изотопов In и Tl. Полученная эффективность ионизации для Tl не уступает эффективности ионизации Tl на установке ISOLDE. Скоординированная работа по исследованию зарядовых радиусов и магнитных моментов изотопов Tl на ИРИС и ISOLDE позволила с максимальной эффективностью использовать преимущества каждой из установок. На установке ИРИС измерения проводились для изотопов $^{183-197}\text{Tl}$, на ISOLDE (с активным участием сотрудников ПИЯФ) – для изотопов $^{179-184}\text{Tl}$. Полученные данные имеют принципиальное значение для понимания феномена сосуществования форм ядра в области, близкой к свинцу ($Z = 82$).

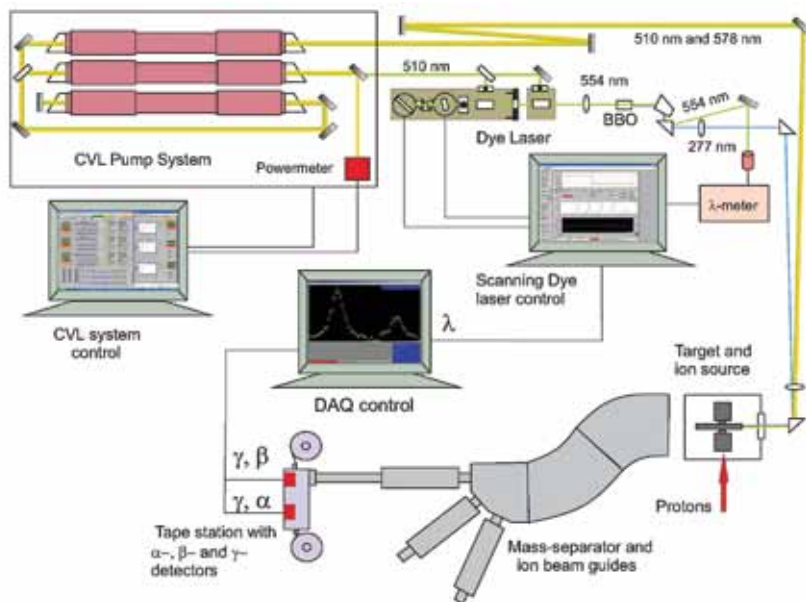
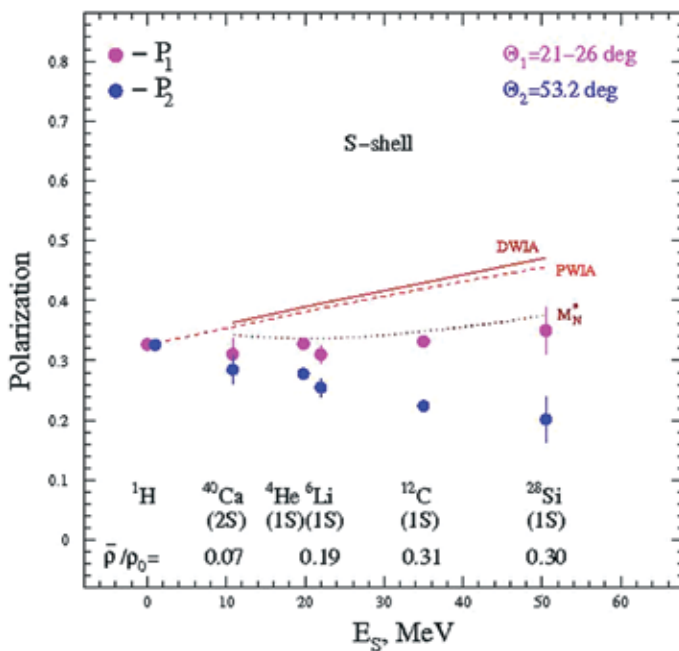


Схема лазерной установки УЛИСС

Модификация матрицы нуклон-нуклонного рассеяния в ядерной среде при энергии 1 ГэВ

Интересным направлением современной физики является исследование влияния ядерной среды на свойства и взаимодействия адронов, в частности на параметры рассеяния протонов относительно высоких (по ядерным масштабам) энергий нуклонами ядра. Для изучения природы этого явления на протонном пучке синхротрона ПИЯФ измеряются поляризационные характеристики реакции ($p, 2p$) на ядрах. Измерения проводятся с помощью двухплечевого магнитного спектрометра с высоким энергетическим разрешением, позволяющим разделять оболочки исследуемых ядер. С помощью поляриметров в каждом плече спектрометра измеряются поляризации протонов, детектируемых на совпадение. Впервые были измерены параметры корреляции спинов в реакции ($p, 2p$).

На рисунке приводятся экспериментальные данные по поляризации рассеянного протона (P_1), протона отдачи (P_2) и результаты теоретического анализа. Совершенно очевидно, что «классический» подход (DWIA) не описывает данные. Кривая M_N^* , полученная с учетом модификации нуклонного спинора Дирака в ядерной среде, близка к экспериментальным данным для рассеянного протона. В то же время этот теоретический подход дает практически равные значения поляризаций вторичных протонов P_1 и P_2 , тогда как наблюдается более заметное уменьшение поляризации протонов отдачи. Предварительный анализ показывает, что этот эффект может быть связан с взаимодействием протона отдачи с плотными нуклонными объединениями в остаточном ядре.



Данные по поляризации P_1, P_2 и результаты теоретического анализа.
 E_s – средняя энергия связи протонов S-оболочки ядра;
 $\bar{\rho}/\rho_0$ – средняя эффективная ядерная плотность в единицах плотности насыщения ядерной материи ($\rho_0 = 0,18 \text{ фм}^{-3}$);
 PWIA – импульсное приближение с плоскими волнами;
 DWIA – импульсное приближение с искаженными волнами;
 M_N^* – DWIA с учетом модификации нуклонного спинора Дирака в ядерной среде

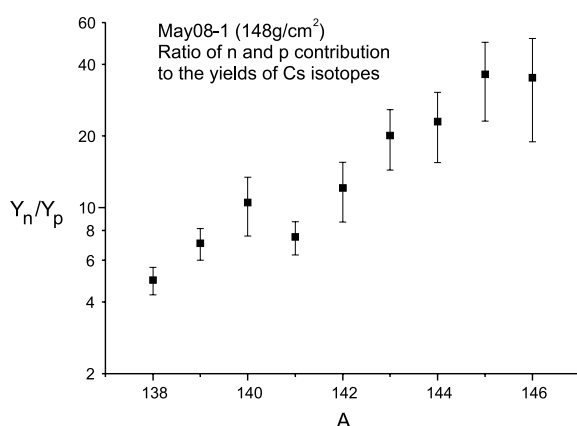
Miklukho O. V. et al. // Phys. At. Nucl. 2013. V. 76. P. 871.

Методика экспериментального исследования диффузионно-эффузионных свойств урановых мишеней. Измерение вклада вторичных реакций в производство нейтроноизбыточных изотопов при бомбардировке урановой мишени протонами с энергией 1 ГэВ

В серии экспериментов, проведенных на масс-сепараторе ИРИС, впервые разработана методика измерения диффузионных и эффузионных характеристик мишеней. Знание этих характеристик позволяет оценивать возможности и перспективы использования того или иного мишенного материала на будущих ISOL-установках. Нами были существенно уточнены или впервые определены брэнчинги для гамма-линий целого ряда изотопов. Были также измерены ранее неизвестные изомерные отношения. В результате получен самосогласованный массив данных, подвергнутый дальнейшему анализу.

Анализ зависимостей выходов изотопов различных элементов от времени показал, что, в противоречие господствовавшим прежде представлениям, основной реакцией, производящей нейтроноизбыточные изотопы в урановой мишени, является

не прямая реакция $(p, {}^{238}\text{U})^A\text{X}$, а реакция деления урана высокоэнергетичными вторичными нейтронами, образовавшимися в прямой реакции. Впервые измерено отношение вкладов реакции с вторичными нейтронами и прямой реакции в образование нейтроноизбыточных изотопов Cs: оно растет от 2-х вблизи полосы стабильности до 10–40 (в зависимости от геометрии мишени) для удаленных ядер (см. рис.). Учет вклада вторичных нейтронов позволил устранить противоречия, возникавшие прежде при использовании описания выделения продуктов реакций из урановой мишени, и, таким образом, обеспечил получение надежных данных о временах диффузии и эффузии атомов различных элементов из карбида урана. Эти данные необходимы как для планирования экспериментов на существующих установках, так и для оценки возможностей будущих установок.



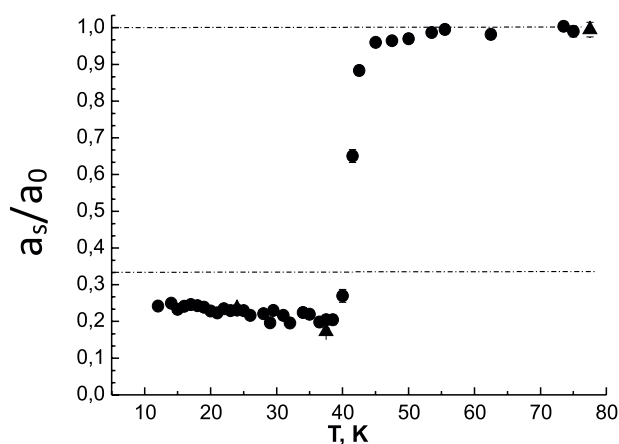
Отношение вклада вторичных нейтронов к вкладу прямой реакции в образование изотопов Cs в урановой мишени

Barzakh A. E., Lhersonneau G., Batist L. Kh. et al. // Eur. Phys. J. A. 2011. V. 47. Art. 70.

Исследование мультиферроика $GdMn_2O_5$ μ SR-методом

С помощью μ SR-метода на μ SR-установке, расположенной на выходе мюонного канала синхротрона ПИЯФ, были исследованы образцы $GdMn_2O_5$ (керамический и составленный из набора монокристаллов). Обнаружены три аномалии в температурном поведении параметров функции релаксации поляризации мюонов: вблизи фазового перехода, обусловленного возникновением дальнего магнитного порядка в подсистеме ионов Mn ($T_{N1} = 40\text{--}41$ K); вблизи перехода lock-in, обусловленного скачкообразным изменением волнового вектора магнитного порядка ($T_L = 35$ K); вблизи температуры упорядочения ионов Gd^{3+} ($T_{N2} = 15$ K). Впервые установлено, что ниже температуры формирования дальнего магнитного порядка $T_{N1} = 40$ K в системе ионов Mn имеет место потеря полной остаточной асимметрии (см. рис.), что, возможно, связано с образованием мюония и указывает на важную роль процессов переноса заряда между парами ионов $Mn^{3+}\text{--}Mn^{4+}$ при формировании дальнего порядка в мультиферроике $GdMn_2O_5$.

Определены две частоты прецессии мюона во внутреннем поле образцов. Их температурное поведение существенно различается. Более низкая частота F_1 появляется в области $T_{N1} < 40$ K, и она почти не зависит от температуры. Прецессия спина мюона на этой частоте обусловлена цепочками ионов $Mn^{4+}\text{--}O\text{--}Mn^{4+}$, образованием изолированных ферромагнитных мюониевых комплексов и упорядоченной подсистемой ионов Gd^{3+} . Вторая, более высокая, частота прецессии F_2 появляется при температуре $T < T_L = 35$ K и связана с локализацией мюона вблизи цепочки ионов $Mn^{3+}\text{--}O\text{--}Mn^{3+}$. Особенности температурного поведения скорости динамической релаксации λ и парциальных вкладов a_1 и a_2 в полную остаточную асимметрию вблизи $T = T_{N2} = 15$ K обязаны магнитному упорядочению в системе ионов Gd^{3+} .



Температурная зависимость остаточной асимметрии a_s , нормированной к полной асимметрии a_0 . Уровни нормированной асимметрии $a_s/a_0 = 1/3$ ($T < T_{N1}$) и $a_s/a_0 = 1$ ($T > T_{N1}$) отмечены штрих-пунктирными линиями; темные точки относятся к измерениям при нагревании, треугольные – к измерениям во внешнем магнитном поле $H = 280$ Oe

1. Барсов С. Г., Воробьев С. И., Коптев В. П., Котов С. А., Микиртычян С. М., Щербаков Г. В. // ПТЭ. 2007. Т. 50. С. 36.
2. Воробьев С. И., Геталов А. Л., Головенчиц Е. И., Комаров Е. Н., Коптев В. П., Котов С. А., Павлова И. И., Санина В. А., Щербаков Г. В. // ФТТ. 2013. Т. 55. Вып. 3. С. 422.

Исследование отказов изделий микроэлектроники под действием отдельных нуклонов

В современных интегральных схемах возможно ухудшение параметров или полная потеря работоспособности изделий микроэлектроники под действием протонов и ионов космического излучения и нейтронов ближней атмосферы. Такие эффекты исследовались при воздействии протонов с энергией 1 000 МэВ и нейтронов атмосферного спектра с максимальной энергией 1 000 МэВ на:

- датчики изображения на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-матрицы), которые широко используются в авиакосмической аппаратуре для изучения и контроля электромагнитного излучения в рентгеновском, видимом и инфракрасном диапазонах;

- мощные МОП- (металл-оксид-полупроводник) транзисторы, которые являются ключевыми элементами источников питания в космической электронике.

Для анализа механизмов повреждения таких устройств были разработаны программы расчета массовых и энергетических спектров продуктов ядерных реакций протонов с ядрами кремния и пространственного распределения энергии, выделяемой этими продуктами в полупроводниковых материалах.

Основные результаты проведенных исследований сводятся к следующему:

- на базе синхроциклотрона разработаны методики проведения экспериментальных исследований радиационного воздействия протонов и нейтронов на характеристики ПЗС-матриц и мощных МОП-транзисторов;

- установлено, что возникновение в ПЗС-матрицах пикселей с большими темновыми токами обусловлено структурными нарушениями в чувствительном объеме изделий, создаваемыми продуктами ядерных реакций нуклонов с ядрами атомов кремния;

- в матрицах, облученных нейтронами и протонами, обнаружены области (кластеры), включающие до 14 пикселей с большими темновыми токами;

- установлено, что возникновение пробоя в мощных МОП-транзисторах обусловлено остаточными ядрами, образующимися в эпитаксиальном слое в результате ядерных реакций протонов с ядрами атомов кремния.

На основе результатов исследований разработаны предложения по совершенствованию нормативной базы и установок для радиационных испытаний изделий электронной техники.

1. Ермаков К. Н., Иванов Н. А., Лобанов О. В., Пашук В. В., Тверской М. Г., Любинский С. М. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 13. С. 54–60.

2. Иванов Н. А., Митин Е. В., Пашук В. В., Тверской М. Г. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 2. С. 12–21.

3. Иванов Н. А., Лобанов О. В., Митин Е. В., Пашук В. В., Тверской М. Г. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 17. С. 35–43.

Ионизационные камеры для измерения параметров пучков протонов

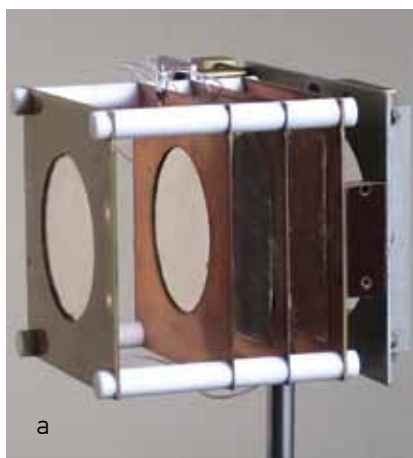
На основе принципа действия двухсекционной ионизационной камеры (ИК) разработан и испытан ряд новых мониторов, позволяющих в режиме реального времени проводить измерения абсолютных величин и радиальных распределений потоков, плотности потоков и флюенсов протонов.

Основными достоинствами данных мониторов являются:

- возможность измерения параметров пучков протонов с различными пространственно-временными характеристиками без их предварительной градуировки абсолютными детекторами;
- работа на воздухе при минимальных толщинах электродов на пути пучка в ИК с продольным электрическим полем и без электродов на пути пучка в ИК с поперечным электрическим полем;
- возможность измерения параметров пучков протонов различных энергий.

Мониторы испытаны в экспериментах по изучению воздействия протонов на изделия электронной техники в диапазоне потоков $10^6 - 5 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ при диаметрах пучков до 15 см. Результаты измерений в пределах погрешностей согласуются с данными, полученными методом наведенной активности. Указанный диапазон потоков протонов может быть изменен как в одну, так и в другую сторону путем модификации измерительной аппаратуры и технологии изготовления ИК. Особенно перспективным представляется их использование для контроля параметров пучков в протонной терапии при энергиях протонов 60–250 МэВ.

В настоящее время проводится испытание опытного образца монитора для измерения потока и флюенса протонов на синхроциклотроне ПИЯФ с целью его включения в состав штатного оборудования.



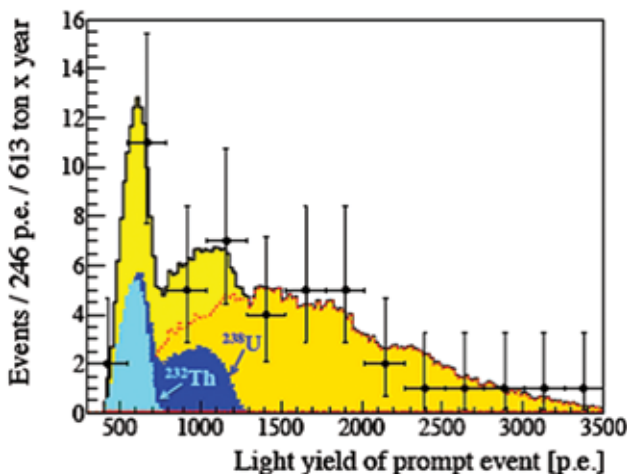
Двухсекционная ИК (а); профилومتر (б); угловая ИК (в)

1. Иванов Н. А., Лобанов О. В., Пашук В. В. // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 6. С. 5–10.
2. Двухсекционная ионизационная камера: пат. РФ № 100850 / О. В. Лобанов, В. В. Пашук; заявка № 2010117648; приоритет от 04.05.2010.
3. Ионизационная камера: пат. РФ № 110540 / О. В. Лобанов, В. В. Пашук; заявка № 2011100405; приоритет от 11.01.2011.

Обнаружение геонейтрино детектором «Борексино»

Геонейтрино – это электронные антинейтрино, возникающие при бета-распадах долгоживущих радиоактивных элементов (^{40}K , ^{238}U и ^{232}Th) в Земле. Антинейтрино обнаружены по их взаимодействию с протонами в жидком органическом сцинтилляторе детектора «Борексино». Среди 46 зарегистрированных антинейтрино около 30 % идентифицированы как геонейтрино. Вместе с геонейтрино зарегистрировано 31 антинейтрино от атомных электростанций по всему миру (см. рис.). Этот результат хорошо согласуется с теорией нейтринных осцилляций.

Измерение потока геонейтрино в различных точках земного шара позволит определить вклад радиоактивных элементов в тепловой баланс Земли, измерить распространенность урана и тория в мантии, протестировать гипотезу о существовании ядерного реактора в центре Земли и проверить различные модели строения Земли. Результаты получены при активном участии российских ученых из ПИЯФ (лаборатория низкофонового измерений Отделения нейтринных исследований, зав. лаб. д. ф.-м. н. А. В. Дербин, к. ф.-м. н. В. Н. Муратова), ОИЯИ и Курчатовского института.



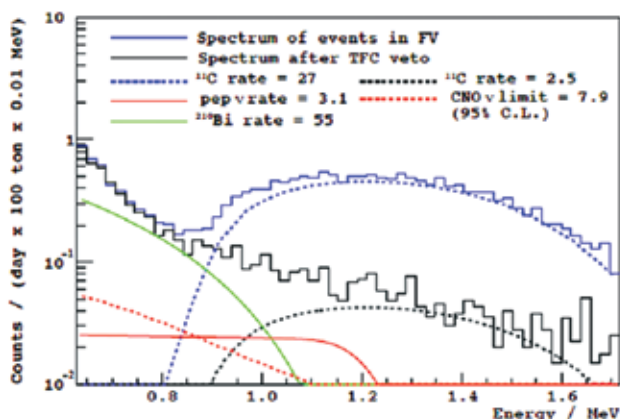
Энергетический спектр 46 зарегистрированных событий от взаимодействия антинейтрино (500 р. е. соответствуют выделившейся энергии 1 МэВ). Область, отмеченная желтым цветом, показывает вклад от геонейтрино, который является суммой сигналов U- и Th-антинейтрино. Оранжевая область, ограниченная красной пунктирной линией, обусловлена регистрацией реакторных антинейтрино

1. Bellini G. ..., Derbin A., Muratova V. et al. (Borexino Collaboration) // Phys. Lett. B. 2010. V. 687. P. 299.
2. Bellini G. ..., Derbin A., Muratova V. et al. (Borexino Collaboration) // Phys. Lett. B. 2013. V. 722. P. 295.

Регистрация солнечных *per*-нейтрино в эксперименте «Борексино»



Впервые получено экспериментальное доказательство протекания термоядерной *per*-реакции на Солнце, в которой два ядра водорода и электрон образуют дейтерий: $p + p + e \rightarrow d + \nu$. Реакция сопровождается испусканием нейтрино с энергией 1,44 МэВ, которые и были зарегистрированы в эксперименте. Одновременно получены наиболее строгие экспериментальные ограничения на вклад углеродно-азотного цикла CNO в энергетический баланс Солнца, которые всего в полтора раза превышают современные теоретические предсказания. Результаты получены при активном участии российских ученых из ПИЯФ (лаборатория низкофоновых измерений Отделения нейтронных исследований, зав. лаб. д. ф.-м. н. А. В. Дербин, к. ф.-м. н. В. Н. Муратова), ОИЯИ и Курчатовского института.



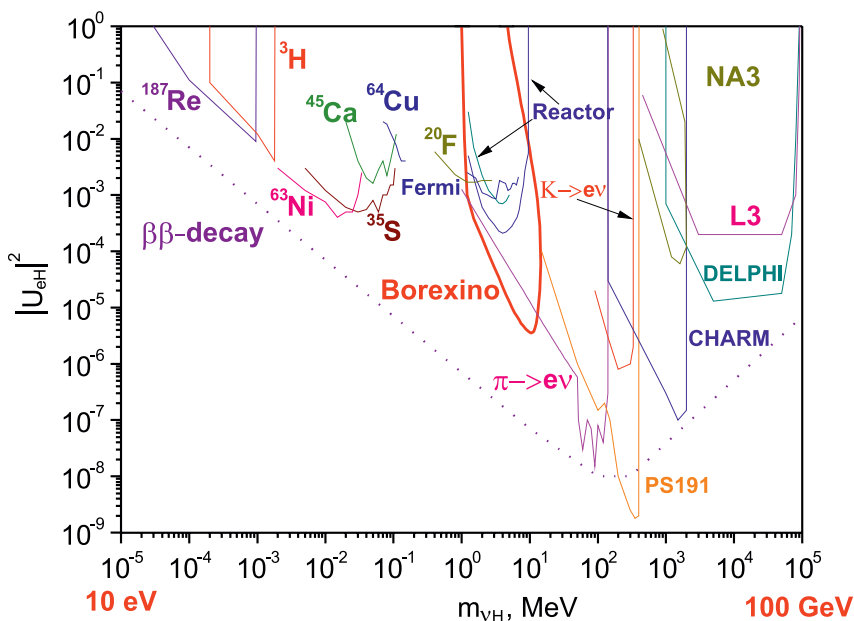
Энергетические спектры до и после введения запрета на тройные пространственно-временные совпадения, связанные с основной фоновой реакцией $\mu(^{12}\text{C}, ^{11}\text{C})n$: прохождение мюона, регистрация нейтрона, распад ядра ^{11}C и образование ортопозитрония (сплошная синяя и черная линии соответственно). Синяя пунктирная линия показывает вклад, связанный с распадами ^{11}C , до введения запрета. Вклад *per*-нейтрино показан красной сплошной линией, предел на CNO нейтрино – красной пунктирной линией

Bellini G. ..., Derbin A., Muratova V. et al. (Borexino Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. P. 051302.

Поиск распада тяжелого стерильного нейтрино $\nu_H \rightarrow e^+ e^- \nu_L$ в детекторе «Борексино»

Многие теоретические расширения Стандартной модели предсказывают существование стерильных нейтрино ν_H . Стерильные нейтрино возникают в распадах и реакциях, но значительно реже, чем три известных активных нейтрино (электронное ν_e , мюонное ν_μ и τ -нейтрино ν_τ). Вероятность появления стерильного нейтрино определяется параметром смешивания U_{eH} . В настоящей работе был проведен поиск стерильных нейтрино, которые рождаются в β -распаде ядер ^8B внутри Солнца. Достигнув Земли, стерильное нейтрино распадается на электрон, позитрон и электронное нейтрино. Данный распад должен быть зарегистрирован детектором «Борексино». За 446 дней измерений не получено убедительных данных о существовании таких распадов. Это позволило

установить новые ограничения на параметр смешивания тяжелого стерильного нейтрино U_{eH} , которые в 1,5–1 000 раз, в зависимости от массы стерильного нейтрино $m_{\nu H}$, более строгие, чем достигнутые в реакторных и ускорительных экспериментах. Работа выполнена при активном участии российских ученых из ПИЯФ (лаборатория низкофоновых измерений Отделения нейтронных исследований, зав. лаб. д. ф.-м. н. А. В. Дербин, к. ф.-м. н. В. Н. Муратова, аспирант И. С. Драчнев), ОИЯИ и Курчатовского института.



Области исключенных значений масс $m_{\nu H}$ и параметров смешивания $|U_{eH}|^2$ стерильного нейтрино, полученные в различных экспериментах (внутри и выше указанных контуров). Для масс $m_{\nu H}$ от 1 эВ до 1 МэВ наиболее строгие пределы на $|U_{eH}|^2$ получены из изучения формы β -спектров. Для масс $m_{\nu H}$ в интервале 1–300 МэВ наиболее чувствительными к стерильным нейтрино оказываются эксперименты по измерению спектра электронов, возникающих при распадах пионов и каонов. Для масс $m_{\nu H} > 300$ МэВ пределы на параметр смешивания получены в экспериментах CHARM, L3, DELPHI и др., выполненных на ускорителях. Результат «Борексино» показан красной линией

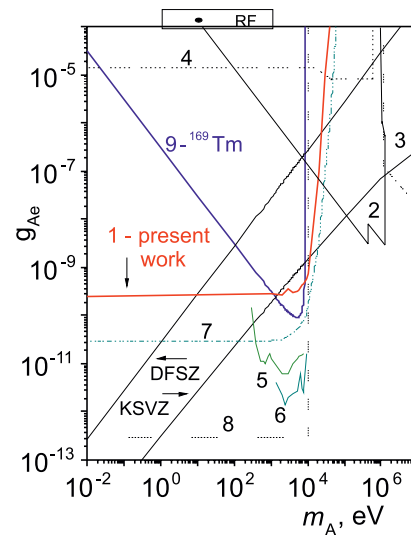
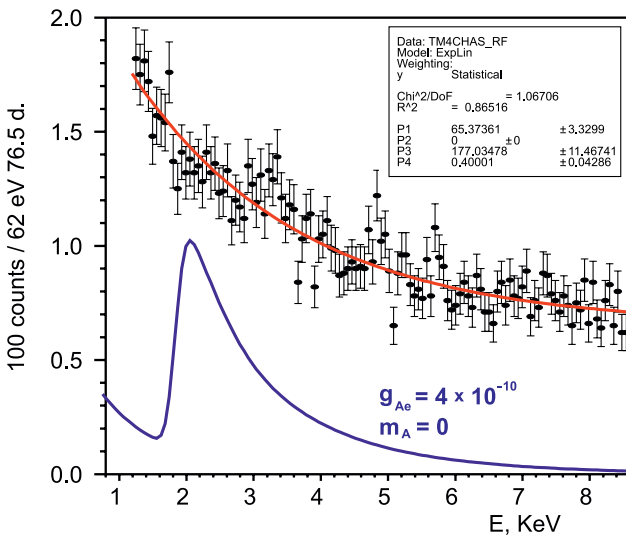
Bellini G. ..., Derbin A., Muratova V. et al. (Borexino Collaboration) // Phys. Rev. D. 2013. V. 88. P. 072010.

Поиск солнечных аксионов по их взаимодействию с электронами

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

В ПИЯФ, в лаборатории низкофоновых измерений Отделения нейтронных исследований (зав. лаб. А. В. Дербин), проведен поиск аксиоэлектрического эффекта (аналога фотоэффекта) на атомах Si для солнечных аксионов с энергией 1–10 кэВ,

поток которых зависит от константы связи аксиона с электроном g_{Ae} . Форма спектра аксионов совместно с сечением аксиоэлектрического эффекта приводит к характерным ожидаемым особенностям в измеряемом спектре. Для поиска использовался Si(Li)-детектор, размещенный в низкофоновой установке (см. рис. слева). В результате в прямом лабораторном эксперименте исключена новая область возможных значений масс m_A и констант связи аксиона с электроном g_{Ae} (см. рис. справа).



Слева: спектр Si(Li)-детектора, измеренный за 76,5 суток. Ожидаемый сигнал для аксионов с массой $m_A \sim 0$ и константой связи $g_{Ae} = 4 \cdot 10^{-10}$. Справа: исключенные области масс и констант связи аксиона, полученные в различных работах (внутри и выше приведенных кривых): 1 – настоящая работа; 2 – эксперименты на реакторах; 3 – ускорительные эксперименты beam-dump; 4 – распад ортопозитрония; 5, 6 – эксперименты по поиску темной материи CoGeNT и CDMS; 7, 8 – астрофизические ограничения; 9 – эксперимент по резонансному поглощению аксионов ядром ^{169}Tm

1. Derbin A. V., Kayunov A. S., Muratova V. N., Semenov D. A., Unzhakov E. V. // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. P. 023505.
2. Дербин А. В., Драчнев И. С., Каюнов А. С., Муратова В. Н. // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95. Вып. 7. С. 379.

Эксперимент «Нейтрино-4» по поиску переходов реакторных антинейтрино в стерильное состояние

Эксперимент «Нейтрино-4» разрабатывается коллаборацией Научно-исследовательского центра «Курчатовский институт» в составе ПИЯФ, КИ, ИФВЭ и ОАО «ГНЦ НИИАР». В настоящее время проведен модельный эксперимент на 16-мегаваттном реакторе ВВР-М ПИЯФ с целью реализации полномасштабного эксперимента на 100-мегаваттном реакторе СМ-3 НИИАР. Исследованы фоновые условия для проведения такого эксперимента на обоих реакторах. Сделан вывод о возможности реализации полномасштабного эксперимента «Нейтрино-4» на реакторе СМ-3 НИИАР. На реакторе

СМ-3 совместными усилиями ПИЯФ – НИИАР создана нейтринная лаборатория: подготовлено помещение с чистыми низкофоновыми условиями, установлена 60-тонная пассивная защита из свинца и борированного полиэтилена. Таким образом, подготовлено место для установки полномасштабного детектора для измерения нейтринных осцилляций на расстояниях 6–13 м. Рис. 1 иллюстрирует работы, ведущиеся на реакторе ВВР-М. На рис. 2 показано помещение нейтринной лаборатории на реакторе СМ-3 с установленной пассивной защитой.

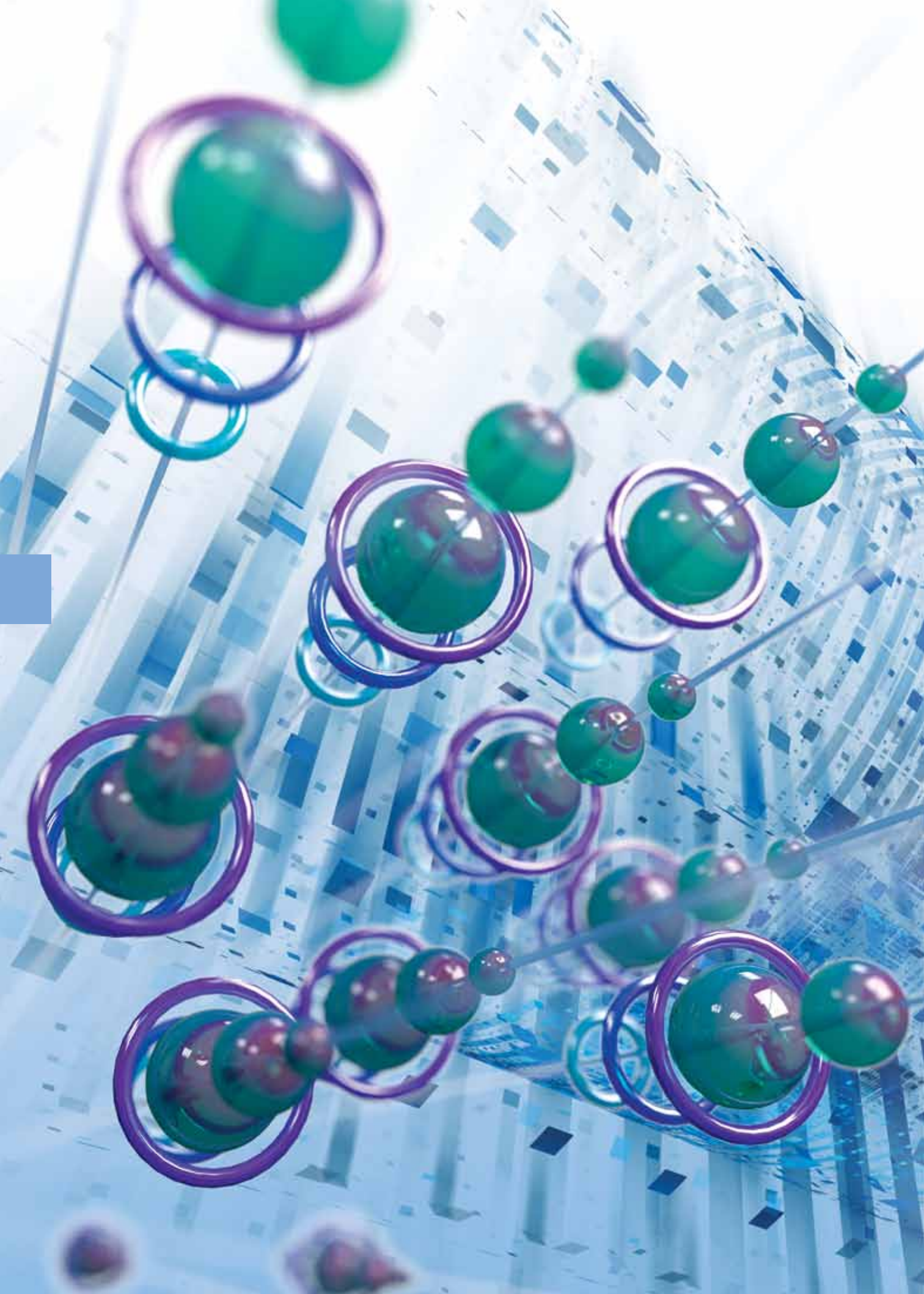


Рис. 1. Модельный эксперимент на реакторе ВВР-М ПИЯФ



Рис. 2. Смонтированная пассивная защита на реакторе СМ-3 для эксперимента «Нейтрино-4»

1. Серебров А. П., Фомин А. К., Зиновьев В. Г., Логинов Ю. Е., Онегин М. С., Гагарский А. М., Петров Г. А., Соловей В. А., Черный А. В., Жеребцов О. М., Мартемьянов В. П., Циноев В. Г., Тарасенков В. Г., Алешин В. И., Петелин А. Л., Павлов С. В., Святкин М. Н., Изхутов А. Л., Сазонтов С. А., Рязанов Д. К., Громов М. О., Храмов Н. С., Рыкалин В. И. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39(14). С. 25–33.
2. Serebrov A. P., Fomin A. K., Zinoviev V. G., Ivochkin V. G., Loginov Yu. E., Petrov G. A., Solovey V. A., Chernyi A. V., Zherebtsov O. M., Samoylov R. M., Martemyanov V. P., Tsinoev V. G., Tarasenkov V. G., Aleshin V. I., Petelin A. L., Pavlov S. V., Svyatkin M. N., Izhutov A. L., Sazontov S. A., Ryazanov D. K., Gromov M. O., Khramkov N. S., Rykalin V. I. On Possibility of Realization Neutrino-4 Experiment on Search for Oscillations of the Reactor Antineutrino into a Sterile State. Submitted to NIMA, 2013.



Фундаментальные и прикладные исследования с использованием тяжелых ионов

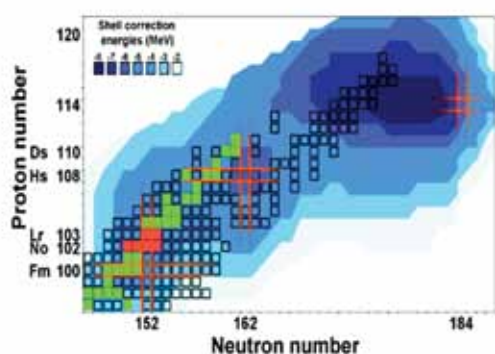
Прямые прецизионные измерения масс нуклидов на установке SHIPTRAP	90
Распределения ядерной материи в экзотических ядрах	91
Поиск критической точки КХД в эксперименте PHENIX	92
Участие в создании детектора эксперимента CBM	93

Прямые прецизионные измерения масс нуклидов на установке SHIPTRAP

Работы в режиме «в линию» с пучком тяжелых и сверхтяжелых ядер проводились впервые на ионной ловушке. Были измерены прямым методом массы нуклидов элементов nobелия и лоуренсия (красный цвет на схематичной карте нуклидов тяжелых элементов), позволившие определить массы других сверхтяжелых (зеленый цвет), что положило начало определению ландшафта масс сверхтяжелых элементов по направлению к гипотетическому острову сверхтяжелых (синий цвет) в Периодической системе Д. И. Менделеева. Впервые экспериментально обнаружено новое «магическое» число нейтронов – $N = 152$. Выполненные работы не имеют аналогов в мировой практике.

Работы в режиме «вне линии» на установке SHIPTRAP (GSI, Дармштадт) были посвящены поиску кандидатов на резонансный безнейтринный двойной захват электронов ядрами. Эти альтернативные двойному бета-распаду источники нейтрино могут пролить свет на существование майорановского нейтрино, закон несохранения лептонного числа и величину эффективной массы нейтрино. Привлекательность канала двойного захвата вызвана возможностью его резонансного

характера, которая может быть проверена весьма точными измерениями разности масс атомов, участвующих в процессе двойного захвата. Такие измерения были проведены на ионной ловушке SHIPTRAP с разработанной методикой «взаимной калибровки» пары измеряемых нуклидов. Полученные значения разностей масс с рекордной точностью в 100 эВ позволили определить резонансное усиление, которое, например, достигает фактора 10^6 в нуклиде ^{152}Gd , ставя вероятность процесса в один ряд с источниками двойного β -распада. Впервые определено редкое явление множественного резонансного двойного захвата (в нуклиде ^{156}Dy). В экспериментальную кампанию 2011–2013 гг. были измерены разности масс 15 пар нуклидов и определены резонансные факторы для них. Были предложены и впервые в мировой практике использованы метод октупольного резонансного возбуждения ионов в ловушке и принципиально новый метод регистрации ионов с определением фазы их резонансной частоты, улучшившие точность измерений на порядок величины. Эксперименты продолжаются.



Схематичная карта нуклидов тяжелых элементов

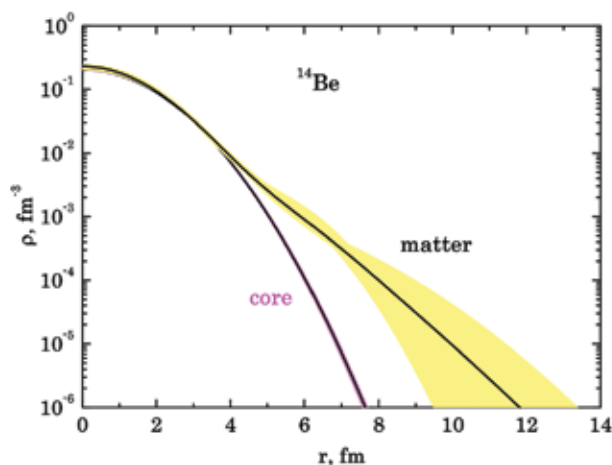
1. Block M. ..., Novikov Yu. N. et al. // Nature. 2010. V. 463. P. 785.
2. Minaya Ramirez E. ..., Nesterenko D., Novikov Yu. N. et al. // Science. 2012. V. 337. P. 1207.
3. Eliseev S., Novikov Yu., Blaum K. // J. Phys. G. 2012. V. 39. P. 124003.
4. Eliseev S., Nesterenko D., Novikov Yu. N. et al. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 082501.

Распределения ядерной материи в экзотических ядрах

Для изучения распределений ядерной материи в экзотических ядрах сотрудниками ПИЯФ было предложено проводить эксперименты в «инверсной» кинематике, т. е. исследуемые ядра с энергией ~ 1 ГэВ/нуклон рассеивать на ядрах водорода, причем величину передаваемого импульса определять с помощью ионизационной камеры, наполненной водородом, которая служила бы одновременно мишенью и спектрометром. В обсуждаемых экспериментах использовался уникальный спектрометр ИКАР, разработанный и созданный в ПИЯФ. Эксперименты проводились на пучках экзотических ядер в Центре по изучению тяжелых ионов (GSI, Дармштадт). Пучки исследуемых экзотических ядер проходили через ионизационный спектрометр ИКАР, рассеянные протоны регистрировались в спектрометре, причем их энергия, а значит, и передаваемый импульс определялись по величине заряда, собираемого на электродах спектрометра. Подробно принцип работы экспериментальной установки описан в публикации.

Сечения рассеяния измерялись при относительно малых углах рассеяния. Но в случае ядер с гало именно область малых углов рассеяния особенно важна, т. к. вклад в сечение рассеяния при рассеянии протонов на нуклонах гало сосредоточен как раз при малых переданных импульсах, т. е. при малых углах рассеяния. В результате проведенных экспериментов были исследованы нейтроноизбыточные изотопы ядер He, Li, Be, C, а также протоноизбыточное ядро ${}^8\text{B}$. Анализ сечений рассеяния позволил определить как среднеквадратичные радиусы всей ядерной материи исследованных ядер, так и размеры ядерных коров и нуклонных гало. В 2010–2013 гг. был завершен анализ данных для ядер ${}^{12,14}\text{Be}$, проведены эксперименты по измерению сечений рассеяния протонов на ядрах изотопов углерода и в основном завершен анализ измеренных сечений для ядер ${}^{14-17}\text{C}$.

В качестве примера на рисунке приводится полученное в результате анализа данных распределение материи в ядре ${}^{14}\text{Be}$.



Распределение материи в коре и распределение всей материи (кор и гало) в ядре ${}^{14}\text{Be}$. Среднеквадратичный радиус материи $R_m = 3,25(11)$ фм, кора $R_c = 2,77(6)$ фм и гало $R_h = 5,28(43)$ фм

Ilieva S., Alkhozov G. D., Dobrovolsky A. V., Inglessi A. G., Khanzadeev A. V., Kiselev O. A., Korolev G. A., Seliverstov D. M., Sergeev L. O., Vorobyov A. A., Yatsoura V. I., Zhdanov A. A. // Nucl. Phys. A. 2012. V. 875. P. 8–28.

Поиск критической точки КХД в эксперименте PHENIX

После открытия нового экстремального состояния ядерного вещества – плотной, высокотемпературной, сильновзаимодействующей, почти идеальной кварк-глюонной жидкости, формируемой в центральных столкновениях ультрарелятивистских ионов на RHIC и Большом адронном коллайдере, исключительно важен вопрос: как меняются свойства этого состояния с понижением энергии столкновения? С этой целью на RHIC была инициирована обширная программа RHIC Beam Energy Scan (BES). Траектория такого сканирования по энергии, показанная схематически на рис. 1, в плоскости «температура – барионная плотность», фактически означает поиск критической точки КХД, в которой происходит переход из одного фазового состояния среды в другое. В рамках этой программы коллаборацией PHENIX был получен ряд важных результатов. В частности, во взаимодействиях ядер

золота при более низких энергиях взаимодействия: $\sqrt{s_{NN}} = 22, 39$ и 62 ГэВ – были измерены два основных признака, указывающих на формирование плотной, сильносвязанной, почти идеальной кварк-глюонной жидкости: факторы ядерной модификации и эллиптические потоки легких адронов.

Сравнение (рис. 2) полученных результатов с аналогичными измерениями при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ показало, что при уменьшении энергии взаимодействия вплоть до $\sqrt{s_{NN}} = 39$ ГэВ по-прежнему наблюдаются признаки образования кварк-глюонной плазмы со свойствами идеальной жидкости – параметр, характеризующий эллиптические потоки постоянен, а подавление выхода легких адронов слабо зависит от энергии. Из поведения эллиптических потоков видно, что критическую точку следует искать в интервале энергий столкновения $\sqrt{s_{NN}} = 20\text{--}40$ ГэВ.

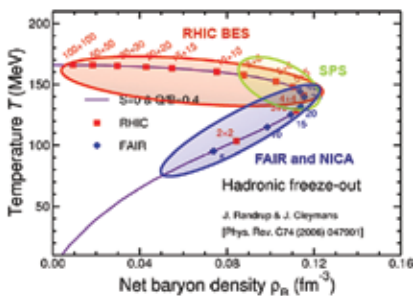


Рис. 1. Диаграмма программы RHIC BES

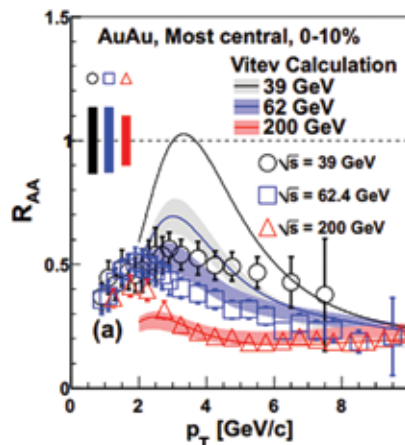
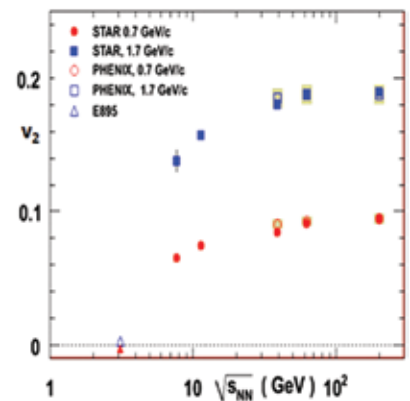


Рис. 2. Факторы ядерной модификации для легких адронов в центральных столкновениях (слева). Эллиптические потоки легких адронов (справа)



1. Vznuzdaev E., Ivanishev D., Komkov B., Kotov D., Riabov V., Riabov Y., Samsonov V., Khanzadeev A. (PHENIX Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. P. 152301.

2. Vznuzdaev E., Ivanishev D., Komkov B., Kotov D., Riabov V., Riabov Y., Samsonov V., Khanzadeev A. (PHENIX Collaboration) // Nucl. Phys. A. 2013. V. 904–905. P. 264c–269c.

Участие в создании детектора эксперимента CBM

Важнейший результат с точки зрения участия ПИЯФ в будущих исследованиях в области ядерной физики высоких энергий достигнут в рамках международного эксперимента CBM, принятого к постановке на строящемся в Германии ускорительном комплексе FAIR. Эксперимент CBM предназначен для исследования сверхплотной ядерной материи, создаваемой в центральных столкновениях тяжелых ядер (вплоть до урана) выведенного пучка с энергией 4–35 АГэВ (А – массовое число налетающего ядра) с ядрами мишени. Программа исследований включает изучение уравнения состояния ядерной материи при высоких барионных плотностях, поиск деконфаймента и киральных фазовых переходов. Конструкция спектрометра CBM должна обеспечить систематическое измерение почти всех частиц, рождающихся при столкновении ядер, с беспрецедентной точностью, включая изучение очарованных частиц и векторных мезонов, распадающихся на лептонные пары.

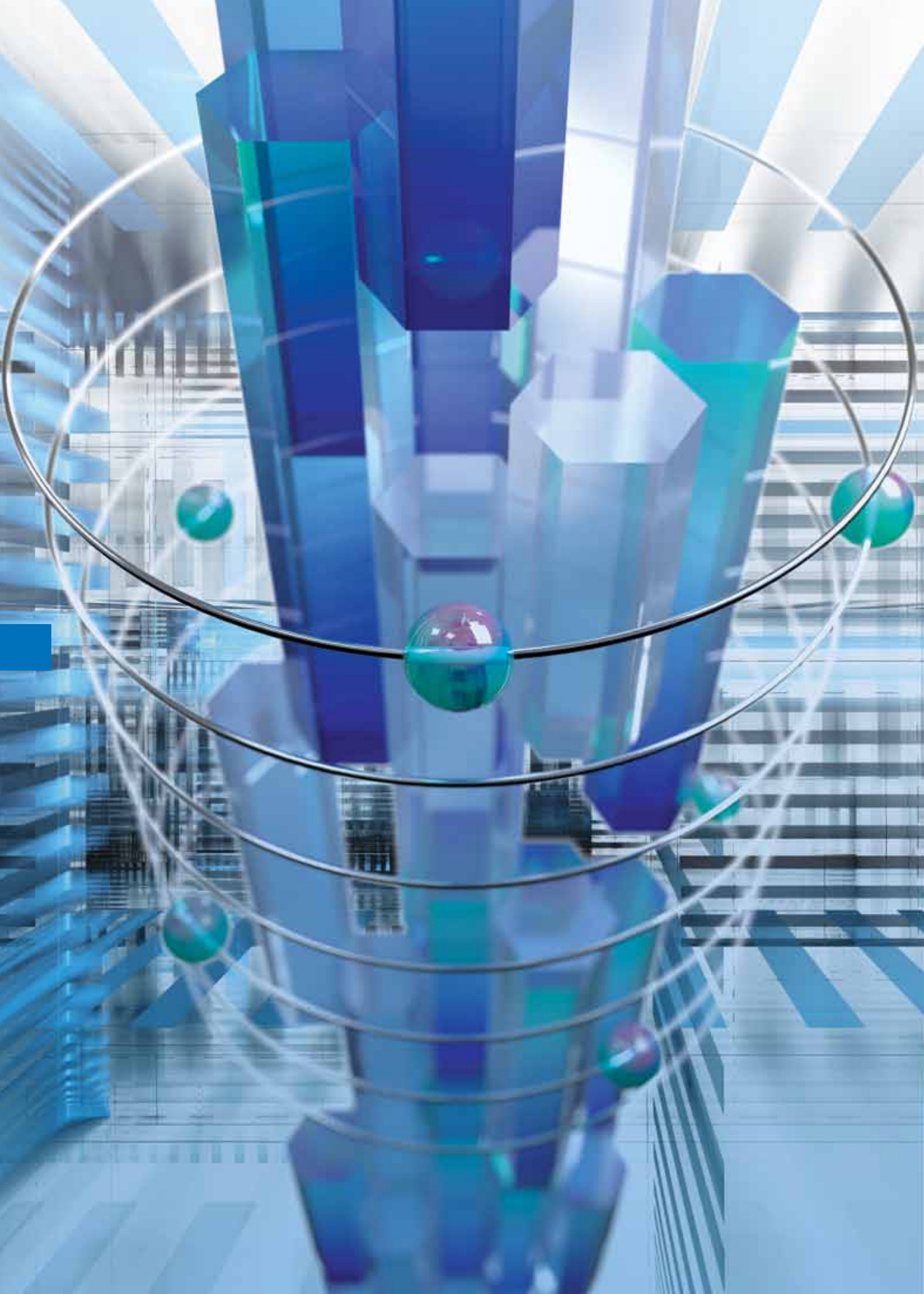
Лаборатория релятивистской ядерной физики принимает участие в создании двух подсистем детектора CBM: черенковского детектора кольцевого действия (RICH) и мюонной подсистемы (MUCH).

RICH, в котором будет использована классическая газовая конструкция с фокусирующим зеркалом и детектором фотонов, предназначен для идентификации электронов и разделения пионов в импульсном диапазоне до 10 ГэВ/с. Прототип детектора успешно прошел испытания на тестовом пучке Т9 ускорителя PS (ЦЕРН, Швейцария). Использовался вторичный пучок электронов, мюонов и пионов с импульсом от 1 до 10 ГэВ/с и шагом 1 ГэВ/с. Механическое производство детектора предполагается в Российской Федерации. Мюонный детектор MUCH будет иметь структуру, состоящую из распределенного адронного поглотителя, между слоями которого расположены трековые станции. В зоне ответственности ПИЯФ – проектирование и создание трековых станций 3 и 4, адронного поглотителя, поддерживающей трековые станции механической структуры, газовой системы.

Во второй половине 2013 г. была завершена работа над техническими проектами (TDR) мюонной системы и черенковского детектора CBM-эксперимента, куда вошли итоги работы, проводимой в ПИЯФ. Оба проекта успешно прошли международную экспертизу и представлены на утверждение.



1. Vznuzdaev E., Riabov Y., Samsonov V., Tarasenkova O. et al. // Technical Design Report for the CBM. FAIR, Germany. November 2013.
2. Evseev V., Ivanov V., Komkov B., Nikulin V., Samsonov V., Khanzadeev A. et al. // Technical Design Report for the CBM. FAIR, Germany. December 2013.



Физика ядерных реакторов и ускорителей

Физический пуск реактора ПИК.	96
Расчеты реактора ПИК	97
Обоснование продления ресурса реактора ВВР-М на основании изучения радиационной стойкости сплава САВ-1.	98
Разработка концепции установки извлечения трития из тяжелой воды реактора ПИК.	99
Отработка технологии разделения изотопов водорода методом химического изотопного обмена «вода – водород» на установке ЭВИО с получением тяжелой воды и дейтерия.	100
Ультразвуковой контроль корпуса реактора ПИК.01.000	101
Аттестация программного средства «Блок теплофизического расчета реактора ВВР-М» программного комплекса НЕХА-БАНК.	102
Разработка метода автоматизированного контроля целостности корпуса реактора ПИК.01.000 на основе дистанционного прецизионного мониторинга содержания протия в тяжелой воде	103
Проблема компенсации нестационарного фона при измерениях в радиометрии	104
Повышение радиационной стойкости полупроводниковых холловских сенсоров для термоядерных реакторов	105
Синхроциклотрон ПИЯФ на энергию протонов 1 000 МэВ.	106
Фокусирующее устройство синхроциклотрона ПИЯФ	107
Циклотронный комплекс Ц-80	108
Формирование магнитного поля циклотрона Ц-80	109

Физический пуск реактора ПИК

Среди важнейших событий в жизни нашего института следует отметить физический пуск высокопоточного исследовательского реактора ПИК, который был осуществлен 28 февраля 2011 г. Реактор выведен в критическое состояние в 16:23.

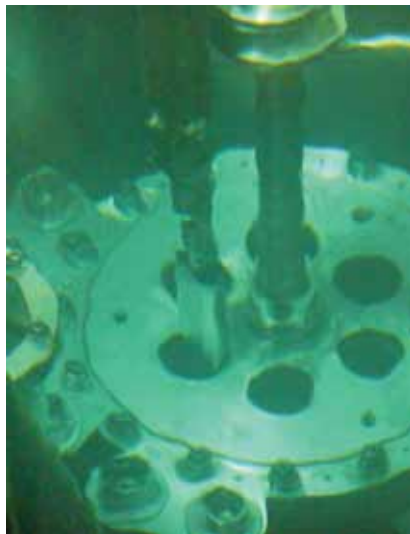
Программа физического пуска основана на опыте эксплуатации полномасштабного критического стенда «Физическая модель реактора ПИК», являющегося копией сооружаемого реактора. Первая критическая загрузка состояла из 12 тепловыделяющих сборок (ТВС). По условиям действия лицензии Ростехнадзора на эксплуатацию реактора, в составе первого пускового комплекса мощность реактора первоначально ограничена величиной 100 Вт.

Для расчетного сопровождения физического пуска реактора использовано аттестованное программное средство MCNP. Независимые расчеты выполнены главным конструктором реактора – ОАО «НИКИЭТ».

Программа физического пуска реактора ПИК выполнена в полном объеме. Подтверждены проектные нейтронно-физические характеристики реактора, измерены запас реактивности и эффективность рабочих органов системы управления и защиты (РО СУЗ), распределение скорости реакции деления в активной зоне и нормированные на мощность нейтронные потоки, подтверждена работоспособность СУЗ реактора ПИК.

Результаты впервые сообщены в докладе на XIII Российском совещании «Безопасность исследовательских ядерных установок».

Физический пуск является одним из необходимых этапов при вводе реактора в эксплуатацию. Одной из целей физического пуска являлась проверка работы служб, обеспечивающих эксплуатацию объекта.



Загрузка первой ТВС в активную зону

1. Коноплев К. А., Смольский С. Л., Мащетов В. П. и др. // Тез. докл. XIII Рос. совещ. «Безопасность исследовательских ядерных установок». Дмитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2011. С. 43–45.
2. Konoplev K. A. // Eur. Research Reactor Conf. IGORR – RRFM. Czech Republic: Prague, March 2012.
3. Ковальчук М. В., Аксенов В. Л., Самсонов В. М., Коноплев К. А. и др. // Тез. докл. Междунар. научн.-техн. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». М.: ОАО «НИКИЭТ», 2012. С. 42–54.
4. Ковальчук М. В., Аксенов В. Л., Коноплев К. А., Ерыкалов А. Н., Захаров А. С., Самсонов В. М., Смольский С. Л., Драгунов Ю. Г., Лопаткин А. В., Третьяков И. Т., Куатбеков Р. П. // Вопросы атомной науки и техники: Обеспечение безопасности АЭС. 2013. Вып. 33. С. 25–36.

Расчеты реактора ПИК

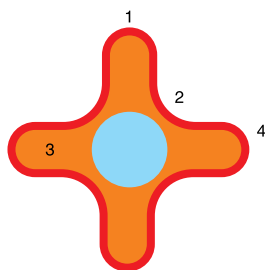
Были выполнены расчеты для подготовки и осуществления физического пуска реактора ПИК, в частности, рассчитаны коэффициенты размножения двух пусковых активных зон (для выхода на критичность и измерения нейтронных потоков). По реактивности расхождение между расчетом и измерением составило всего лишь 0,4 %. Вычислены также веса регуляторов ПИКа, согласие с экспериментом составило 5 %. Было рассчитано распределение потоков нейтронов по длине экспериментальных каналов реактора ПИК, таких как ЦЭК, ГЭК 4-4', ВЭК-1 и ВЭК-3. Получено хорошее согласие с измеренными потоками, подтверждающее надежность математической модели реактора.

Изучалось снижение потока нейтронов и мощности в реакторе ПИК при введении отрицательной реактивности. Задача была сведена к системе 16 дифференциальных уравнений точечной кинетики реактора; решается система 16 дифференциальных уравнений точечной кинетики реактора (1 уравнение для потока нейтронов, 6 уравнений для источников запаздывающих нейтронов и 9 уравнений для источников фотонейтронов отражателя). Было учтено как увеличение ценности запаздывающих нейтронов в активной зоне, так и уменьшение ценности фотонейтронов в отражателе. Можно учесть временное введение

отрицательной реактивности и одновременно изменение времени жизни нейтронов за счет введения стержней регулирования в отражатель.

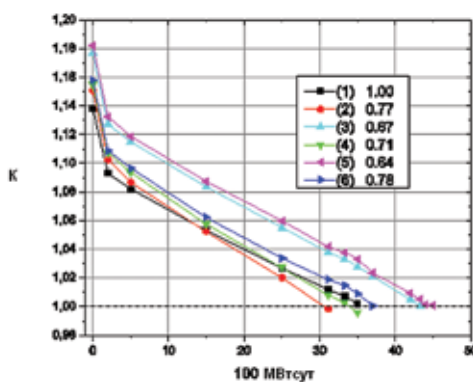
Продолжены работы по совершенствованию ТВЭЛов реактора ПИК. Известно, что с целью выравнивания температуры по периметру ТВЭЛа в ТВЭЛах используют центральный вытеснитель из алюминия. Использование такого вытеснителя уменьшает продолжительность кампании реактора и тем самым увеличивает расход урана в 1,26 раза. Было предложено выполнить вытеснитель из водородосодержащего материала, например воды. При этом за счет уменьшения утечки нейтронов из активной зоны возвращаются не только потери в продолжительности кампании, но и расход урана уменьшается до 0,77 от штатного. Это предложение предполагается оформить в виде патента, заявка на который подана.

Продолжаются также работы по проектированию источников холодных и ультрахолодных нейтронов на реакторе ПИК. Для источника холодных нейтронов (ИХН) проведены нейтронно-физические расчеты, получены значения плотностей потоков нейтронов в центре камеры ИХН, на доньшке канала и в коллиматоре. Исследовано влияние источника на работу реактора, а также определена скорость наработки трития в нем.



Экономичный ТВЭЛ реактора ПИК.

Слева: сечение ТВЭЛа; справа: зависимость коэффициента размножения от энерговыработки и доля расходуемого урана



1. Ковальчук М. В. и др. Препринт ПИЯФ 2924. Гатчина, 2013. 29 с.

2. Ковальчук М. В., Ансенов В. Л., Коноплев К. А., Ерыкалов А. Н., Захаров А. С., Самсонов В. М., Смольский С. Л., Драгунов Ю. Г., Лопаткин А. В., Третьяков И. Т., Куатбеков Р. П. // Вопросы атомной науки и техники: Обеспечение безопасности АЭС. 2013. Вып. 33. С. 25–36.

Обоснование продления ресурса реактора ВВР-М на основании изучения радиационной стойкости сплава САВ-1

В 2012 г. завершен комплекс совместных с ОАО «ГНЦ НИИАР» и ФГУП «ЦНИИ КМ „Прометей“» работ, связанных с проведением реакторных испытаний, послереакторных материаловедческих исследований сплава САВ-1 и прочностных обоснований основных элементов бака реактора ВВР-М.

Лицензия на эксплуатацию одной из главных установок нашего института – реактора ВВР-М истекла в июне 2012 г., поэтому еще в 2008 г. были предусмотрены работы по определению радиационной стойкости основного материала реактора – сплава САВ-1, из которого изготовлены бак реактора, опорная решетка, горизонтальные каналы. Цель работы состояла в обосновании работоспособности элементов реактора ВВР-М на основании исследований радиационной стойкости сплава САВ-1 с оценкой времени их дальнейшей эксплуатации.

Проведенный комплекс исследований (реакторные испытания в СМ, послереакторные исследования ФГУП «ЦНИИ КМ „Прометей“»: профилометрия,

вырезка и изготовление образцов для механических испытаний, проведение исследований кратковременных механических свойств, трещиностойкости, ударной вязкости и др.) позволил получить необходимые экспериментальные данные, на основании которых проведены прочностные обоснования опорной решетки и горизонтального канала ГЭК-4, показывающие возможность дальнейшего использования данных элементов реактора до флюенса $3,48 \cdot 10^{22}$ н/см² ($E > 0,8$ МэВ).

Данная работа является этапной в области исследовательских атомных реакторов типа ВВР-М и имеет огромное значение для дальнейшего совершенствования их конструкции и повышения надежности. Результаты работы легли в основу документов, на основании которых получена лицензия на право эксплуатации реактора ВВР-М до 2015 г., и докладывались на X Российской конференции по реакторному материаловедению 27–31 мая 2013 г. в ОАО «ГНЦ НИИАР» (Димитровград). Работа заняла 2-е место на конкурсе лучших работ ПИЯФ за 2012 г.

Смольский С. Л., Коноплев К. А., Илатовский В. А., Орлов С. П., Фридман С. Р. (ФГБУ «ПИЯФ», Гатчина); Морозов А. М., Петров В. А. (ФГУП «ЦНИИ КМ „Прометей“», Санкт-Петербург); Ижуртов А. Л., Петелин А. Л. (ОАО «ГНЦ НИИАР», Димитровград) // Тез. докл. X Рос. конф. по реакторному материаловедению. Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2013. 214 с.

Разработка концепции установки извлечения трития из тяжелой воды реактора ПИК

При эксплуатации реактора ПИК в тяжеловодном отражателе образуется радиоактивный изотоп водорода – тритий. Тритий является не только потенциальным источником загрязнения окружающей среды, но и приводит к дополнительным дозовым нагрузкам на персонал. При проведении технологических и ремонтных операций в тяжеловодном контуре реактора, связанных с его разгерметизацией, происходит разбавление тяжелой воды влагой атмосферного воздуха, что приводит к ухудшению параметров и производительности реактора. Поэтому необходима установка для извлечения трития и поддержания параметров тяжелой воды реактора ПИК на заданном уровне. Концепция такой установки разработана в ПИЯФ.

В установке для извлечения трития и трития из тяжелой воды и предварительного концентрирования трития используется процесс каталитического изотопного обмена в системе «жидкая вода – водород» и электролиза воды, что является главной особенностью установки. Конечное концентрирование трития осуществляется криогенной

дистилляцией водорода. Концентрат трития будет безопасно храниться в форме гидрида титана.

Для обеспечения проектных работ по созданию установки, в лаборатории разделения изотопов водорода Отдела физики и техники реакторов выполнен комплекс научно-исследовательских работ. Технология очистки тяжелой воды от трития и трития на основе комбинации методов электролиза и каталитического изотопного обмена на гидрофобном катализаторе реализована и отработана на опытно-промышленной установке.

На основе выполненных исследований в ПИЯФ разработано детальное техническое задание на создание первой в России установки извлечения трития, и в 2013 г. начато ее проектирование.

Алексеев И. А., Архипов Е. А., Бондаренко С. Д., Васянина Т. В., Федорченко О. А. Техническое задание на проектирование установки извлечения трития из тяжелой воды реактора ПИК. Инв. № 12 РКТС-087.00 ТЗ.

Отработка технологии разделения изотопов водорода методом химического изотопного обмена «вода – водород» на установке ЭВИО с получением тяжелой воды и дейтерия

Технология разделения изотопов водорода методом изотопного обмена в системе «жидкая вода – водород» с использованием гидрофобного катализатора позволяет проводить процессы очистки воды от трития и получения тяжелой воды при умеренных значениях температуры и давления. Этот метод завоевывает все большее признание в мире и разрабатывается в исследовательских центрах ряда стран, в том числе и в России.

На созданной в ПИЯФ опытной установке ЭВИО, работающей на основе метода химического изотопного обмена между водой и водородом и электролиза воды (СЕСЕ-процесса), обрабатывается технология СЕСЕ-процесса, а также перерабатываются тяжеловодные отходы и производятся тяжелая вода и газообразный дейтерий в количествах, обеспечивающих текущие потребности России в этих продуктах.

Проведены теоретическое и экспериментальное исследования зависимости характеристик процесса от температуры, давления и удельной нагрузки водорода, продемонстрирована высокая эффективность работы колонны изотопного обмена, показана возможность достижения

высоких степеней очистки тяжелой воды от трития (на три порядка и более) в сравнительно невысоких колоннах (высотой ~ 7 м), работающих при умеренных значениях температуры (65–75 °С) и давления (150–180 кПа). Сравнение с зарубежными результатами по детритизации тяжелой воды в установках на основе обмена «вода – водород» показывает, что полученные в нашей работе результаты, по крайней мере, не уступают лучшим мировым.

Выполненные на установке исследования позволили отработать технологию разделения и выбрать оптимальные условия и режимы переработки отходов. Характеристики получаемой продукции находятся на уровне мировых стандартов и отвечают потребностям отечественных и зарубежных потребителей.

Полученные результаты используются при проектировании установки извлечения трития из тяжелой воды реактора ПИК. Использование в этой установке процесса изотопного обмена в системе «жидкая вода – водород» на гидрофобных катализаторах позволило упростить технологическую схему установки, сократить стоимость и энергетические затраты.

1. Алексеев И. А., Архипов Е. А., Бондаренко С. Д., Васянина Т. В., Коноплев К. А., Федорченко О. А., Уборский В. В. // Перспективные материалы. Специальный выпуск (8). Февраль 2010. С. 203–210.
2. Alekseev I. A., Bondarenko S. D., Fedorchenko O. A., Vasyanina T. V., Konoplev K. A., Arkhipov E. A., Uborsky V. V. // Fusion Science and Technology. 2011. V. 60. No. 3. P. 1117–1120.
3. Fedorchenko O. A., Alekseev I. A., Arkhipov E. A., Bondarenko S. D., Vasyanina T. V. // Fusion Science and Technology. 2011. V. 60. No. 4. P. 1375–1378.

Ультразвуковой контроль корпуса реактора ПИК.01.000

Необходимым условием безопасной эксплуатации реактора ПИК является безотказная, надежная работа и ресурс его основного элемента – корпуса ПИК.01.000. Существенное значение при этом имеет контроль металла корпуса неразрушающими методами. Наиболее важно знать состояние и иметь возможность проконтролировать часть корпуса, в которой располагается активная зона и которая наиболее подвержена радиационному повреждению в процессе эксплуатации.

В 2010 г. завершено создание штатной системы ультразвукового контроля и проведен предэксплуатационный контроль металла и сварного соединения корпуса ПИК.01.000 с внутренней стороны, в районе активной зоны (см. рис.). Цель – выявление и фиксация возможных дефектов для последующего их наблюдения на стадии эксплуатационного контроля. Кроме того, проведен расчет

максимально допускаемых размеров несплошностей в процессе эксплуатации. В соответствии с расчетами, при минимальном значении вязкости разрушения основного металла $K_{cr} = 50 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ они составляют: $5 \times 1,3 \text{ мм}$, или $6,5 \text{ мм}^2$, для основного металла и $6,4 \times 150 \text{ мм}$, или более 900 мм^2 , для сварного соединения.

Результаты проведенного контроля, показавшие, что на уровне фиксации дефектов не обнаружено ни одного отражателя, гарантированно подтвердили соответствие качества основного металла и сварных соединений корпуса ПИК.01.000 требованиям конструкторской и нормативной документации. Результаты контроля корпуса ПИК.01.000 позволили приступить в 2011 г. к программе физического пуска реактора ПИК. Результаты работ опубликованы в совместных отчетах ПИЯФ – НИКИЭТ.



Проведение ультразвукового контроля корпуса ПИК.01.000. Слева: ввод штанги УЗ-системы в крышку корпуса; справа: касание датчиков внутренней поверхности корпуса

Аттестация программного средства «Блок теплофизического расчета реактора ВВР-М» программного комплекса НЕХА-БАНК

Программное средство «Блок теплофизического расчета реактора ВВР-М» (ПС ТФР ВВР-М) используется в составе программного комплекса НЕХА-БАНК для стационарных эксплуатационных расчетов максимально допустимой мощности реактора ВВР-М при ограничении ее температурой оболочки самого горячего ТВЭЛа, а также для расчета температуры оболочек ТВЭЛов. Расчетные данные используются для обоснования безопасности работы реактора в документах, представляемых в Ростехнадзор. Программное средство может применяться также для расчетов стрелы термического прогиба наружных ТВЭЛов ТВС и коэффициента запаса реактора по мощности до кризиса теплоотдачи из условия аperiодической неустойчивости течения в параллельных каналах.

В 2012–2013 гг. группой реакторной теплофизики Отдела физики и техники реакторов проведен комплекс работ, включающий:

- выпуск верификационного отчета ПС ТФР ВВР-М программного комплекса НЕХА-БАНК, № ЭР-267;

- прохождение экспертизы и редактирования отчета в соответствии с замечаниями экспертов;

- представление программного средства и верификационного отчета на заседании секции № 2 «Расчеты теплопередачи и гидродинамики, связанные нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты, моделирование нестационарных и аварийных процессов» Совета по аттестации программных средств при Ростехнадзоре и на заседании Экспертного совета по аттестации программных средств при Ростехнадзоре.

После завершения всех процедур в 2013 г. получен аттестационный паспорт на ПС ТФР ВВР-М программного комплекса НЕХА-БАНК, регистрационный номер 334 от 12.09.2013 г., со сроком действия до 2023 г.

Получение аттестационного паспорта на заявленное программное средство дает возможность на законных основаниях использовать проверенную многолетним опытом экспериментально расчетную методику определения предельных безопасных рабочих параметров реактора, определяющих экономичность его работы.



Разработка метода автоматизированного контроля целостности корпуса реактора ПИК.01.000 на основе дистанционного прецизионного мониторинга содержания протия в тяжелой воде

Сотрудниками Отдела физики и техники реакторов проведено совершенствование методик анализа изотопного состава тяжелой воды и предложен уникальный метод дистанционного автоматизированного контроля целостности корпуса активной зоны реактора ПИК на основе прецизионного мониторинга изотопного состава воды контура жидкостного регулирования. Конструктивные особенности реактора ПИК позволяют организовать дополнительный контроль герметичности его корпуса по снижению концентрации тяжелой воды контура жидкостного регулирования в случае образования протечки легкой воды первого контура. Создание автоматизированной

системы дистанционного прецизионного мониторинга целостности корпуса реактора ПИК.01.000 на основе изотопного анализа воды позволит:

1) в несколько раз снизить время обнаружения нарушения герметичности корпуса активной зоны реактора по сравнению со штатными датчиками технологического контроля по уровню и давлению;

2) повысить эффективность системы безопасности за счет ввода дополнительной системы контроля целостности корпуса реактора и реакторного оборудования.

1. Воронина Т. В., Слободов А. А. // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 3. С. 3–9.
2. Воронина Т. В., Семенов В. Г. // Научное приборостроение. 2012. № 1. С. 120–126.
3. Воронина Т. В., Семенов В. Г. // Заводская лаборатория. 2012. Т. 78. № 12. С. 10–14.
4. Воронина Т. В. Разработка методического обеспечения химико-технологического контроля изотопного состава тяжелой воды методом ИК-спектроскопии: Дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГУ, 2012. 171 с.

Проблема компенсации нестационарного фона при измерениях в радиометрии

В 2011 г. завершен крупный этап цикла работ, посвященных проблеме компенсации переменного фона при измерениях в радиометрии.

Проведена классификация известных методов компенсации фона, основанных на представлениях теории вероятности и математической статистики. Показана граница применимости подобных методов. Для решения задачи компенсации переменного фона, являющегося неэргодическим случайным процессом, разработана оригинальная математическая модель, позволившая соединить представление об истинном значении измеряемой физической величины с зафиксированным прибором результатом измерения. Разработанная авторами вероятностно-функциональная модель (ВФМ) переменного фона представляет интерес для теоретической метрологии, поскольку в ней используются неклассические теоретические представления. С практической точки зрения ВФМ может быть использована как в качестве методической основы для организации измерительного процесса с компенсацией переменного фона, так и для создания нового типа радиометрических приборов, компенсирующих переменный фон на базе алгоритма ВФМ.

На основе ВФМ разработана, аттестована и успешно используется на практике методика выполнения измерений суммарной объемной активности бета-излучающих техногенных радио-

нуклидов в аэрозолях воздуха, содержащего продукты распада радона-222, с применением альфа-, бета-радиометров. Данная методика очень актуальна, т. к. позволяет проводить экспресс-оценку, не дожидаясь распада естественных радионуклидов, как предлагают методики, используемые в настоящее время.

Исследованы основные свойства ВФМ, в частности, показано, что в предельном случае удается проверить гипотезу о распределении истинных (действительных) значений физической величины вокруг однократного измерения этой величины. Получена формула для расчета чувствительности методики, основанной на ВФМ, к эффекту. Проведена тщательная экспериментальная проверка полученных теоретических результатов, с заданной надежностью подтвердившая положенные в основу ВФМ гипотезы.

Представляемая работа выходит далеко за рамки обычных методических разработок, поскольку в ней использованы нетрадиционные метрологические представления. Она является результатом многолетнего кропотливого труда, который позволил, возможно впервые, решить задачу компенсации переменного неэргодического фона на строгой метрологической основе. В 2011 г. работа заняла 3-е место на конкурсе лучших работ ПИЯФ в разделе «Методика эксперимента».

Соловьев Н. И., Сафончик А. Е., Мащетов В. П. Препринт ПИЯФ 2881. Гатчина, 2011. 44 с.

Повышение радиационной стойкости полупроводниковых холловских сенсоров для термоядерных реакторов

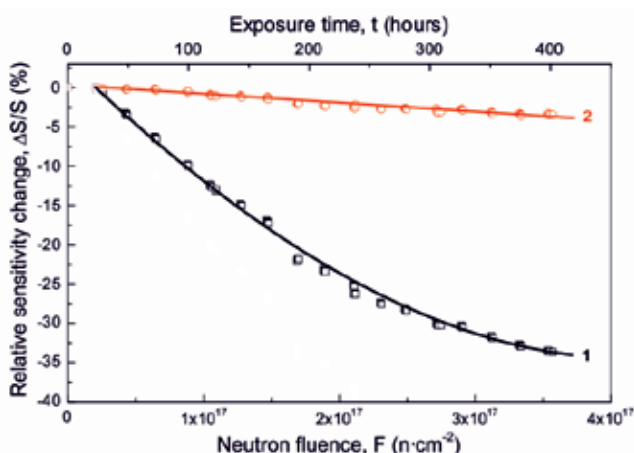
Выполнено исследование радиационной стойкости полупроводниковых холловских сенсоров для контроля магнитного поля в термоядерных реакторах. Предлагаемые полупроводниковые структуры обладают на порядок большей радиационной стойкостью при облучении быстрыми нейтронами, чем существующие аналоги.

Облучение полупроводниковых сенсоров магнитного поля производили в низкотемпературной гелиевой петле реактора ВВР-М. Изменение чувствительности и концентрации носителей тока выполняли непосредственно в процессе облучения нейтронами реактора. При облучении в полупроводниковом материале InSb происходят одновременно два взаимно компенсирующих процесса:

1) генерация радиационных дефектов акцепторного типа быстрыми нейтронами в кристаллической решетке материала сенсора (первичные радиационные дефекты – пары Френкеля, а также кластеры радиационных дефектов);

2) генерация доноров за счет реакций трансмутационного легирования при взаимодействии нейтронов с атомами индия основного вещества с образованием олова, которое для InSb является донорной примесью.

При оптимальном составе полупроводникового материала, за счет баланса этих двух механизмов, можно минимизировать дрейф параметров сенсоров при облучении до такого уровня, который затем поддается коррекции электроникой и программным обеспечением магнитоизмерительной аппаратуры (см. рис.).



Изменение чувствительности тонкопленочных сенсоров на основе InSb под действием нейтронного облучения.

1 – стандартный сенсор;

2 – радиационно стойкий сенсор

1. Bolshakova I., Chekanov V., Duran I., Holyaka R., Konopleva R., Kulikov S., Leroy C., Makido E., Marusenkov A., Moreau P. J., Nazarkin I., Shurygin F., Stockel J., Vayakis G., Yerashok V. // IEEE Xplore: Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and Their Application. 2010. P. 1–6.

2. Большакова И. А., Куликов С. А., Коноплева Р. Ф., Чеканов В. А., Васильевский И. С., Шурыгин Ф. М., Макидо Е. Ю., Duran I., Мороз А. П., Штабалик А. П. // ФТТ. 2014. Т. 56. Вып. 1. С. 156–159.

Синхроциклотрон ПИЯФ на энергию протонов 1 000 МэВ

Синхроциклотрон (СЦ) ПИЯФ на энергию протонов 1 000 МэВ является базовой экспериментальной установкой института. Распоряжением Правительства РФ № 2125-р от 30 декабря 2009 г. СЦ включен в перечень уникальных ядерно-физических установок РФ.

В процессе запуска ускорителя была создана уникальная система вывода с эффективностью ~ 30 %, что в пять раз больше для стандартной регенеративной системы. Разработана система временной растяжки пучка, которая позволила увеличить коэффициент временного заполнения пучка с 2 до 80 %. Успешно осуществленный однооборотный сброс пучка на внутреннюю нейтронообразующую мишень позволил создать времяпролетный нейтронный спектрометр ГНЕЙС (Гатчинский НЕЙтронный Спектрометр), который является конкурентоспособной установкой этого типа в мире. Создан единственный в Европе нейтронный пучок с атмосфероподобным спектром. Эта разработка отмечена премией им. И. В. Курчатова в 2012 г. На нейтронном и протонном пучках СЦ создан новый универсальный комплекс для радиационных испытаний электронной компонентной базы в интересах Роскосмоса и Министерства обороны РФ.

Интенсивность внутреннего протонного пучка СЦ была значительно увеличена и доведена до 3,5 мкА за счет введения в центральную область ускорителя системы электростатической фокусировки пучка по вертикали. При этом интенсивность выведенного из ускорительной камеры пучка составила 1 мкА. Это позволило создать мезонные каналы на внешней мезонообразующей мишени и обеспечило возможность получения интенсивных пучков как отрицательных, так и положительных π - и μ -мезонов.

На основе численных расчетов траекторий частиц, процесса вывода и экспериментов на действующем ускорителе оказалось возможным сформировать и вывести из камеры пучок из частиц, теряемых в процессе вывода основного пучка. Получен пучок с интенсивностью 10^{10} с^{-1} . Этот пучок может быть использован параллельно основному пучку как для физических, так и для прикладных целей, в частности для проведения протонной лучевой терапии.

На СЦ ПИЯФ, совместно с РНЦРХТ, создан комплекс протонной лучевой терапии, предназначенный для лечения различных заболеваний головного мозга, в частности аденом гипофиза и артериовенозных мальформаций. В отличие от других отечественных и зарубежных центров, где для целей протонной лучевой терапии применяются протоны с энергией 70–200 МэВ, на СЦ ПИЯФ используется уникальная методика облучения внутричерепных мишеней протонами с энергией 1 000 МэВ напролет – «гатчинский метод» – в сочетании с ротационной техникой облучения. К настоящему времени курс протонной терапии прошли около 1 500 пациентов.



Ivanov E. M., Mikheev G. F., Riabov G. A. and the Accelerator Staff // PNPI, High Energy Physics Division. Main Scientific Activities 2007–2012. Gatchina, 2013. P. 6–13.

Фокусирующее устройство синхроциклотрона ПИЯФ

На всех синхроциклотронах, работающих с открытым ионным источником типа Пеннинга, коэффициент вывода протонов при помощи регенеративной магнитной системы составляет $< 30\%$. Остальные 70% протонов гибнут на элементах выводного канала, производя его радиоактивацию. Показано, что основная доля потерь происходит из-за несоответствия радиального аксептansa выводного канала слишком большому радиальному эмиттансу ускоряемого пучка, при этом гибнут в основном протоны с большими амплитудами радиальных колебаний.

Для устранения этого эффекта предложена модификация фокусирующей системы (см. схему). В конструкцию системы на радиусах ~ 30 см помещается дефлектор 5, на который подается напряжение в виде радиоимпульса с частотой заполнения, равной частоте вертикальных бетатронных колебаний протонов в ускоряемом сгустке. Включение радиоимпульса синхронизовано с дуантом и происходит в момент нахождения между пластинами дефлектора только части сгустка протонов, имеющих большие амплитуды радиальных колебаний.

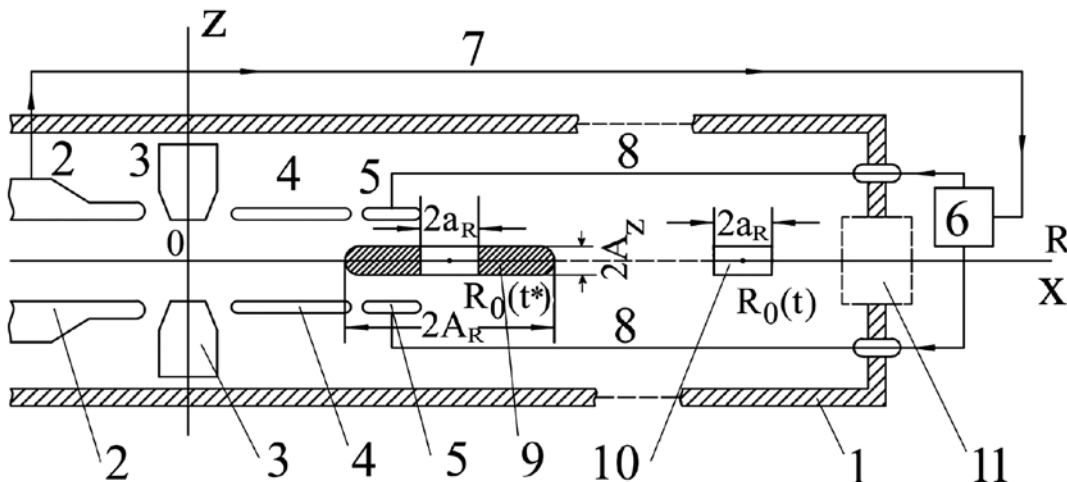


Схема модифицированной фокусирующей системы синхроциклотрона. 1 – вакуумная камера синхроциклотрона; 2 – дуант; 3 – ионный источник с центральными фокусирующими электродами; 4 – боковой фокусирующий электрод; 5 – пластины дефлектора; 6 – генератор радиоимпульсов; 7 – цепь синхронизации генератора радиоимпульсов; 8 – разнополярные выходы генератора, подключенные к пластинам дефлектора; 9 – положение и размер ускоряемого сгустка протонов в момент подачи радиоимпульса t^* (заштрихованная часть сгустка – протоны, подвергающиеся воздействию дефлектора и выбывающие из ускоряемого сгустка); 10 – положение и размер сгустка протонов, продолжающих дальнейшее ускорение; 11 – схематическое изображение выводного канала

1. Абросимов Н. К., Михеев Г. Ф. Радиотехнические системы синхроциклотрона Петербургского института ядерной физики: Монография. Гатчина, 2012. 340 с.
2. Фокусирующее устройство синхроциклотрона: пат. решение № 2013129668/07 (044143) / Е. М. Иванов, Г. Ф. Михеев, Г. А. Рябов, А. С. Покровский; от 27.06.2013 г.

Циклотронный комплекс Ц-80

Изохронный циклотрон Ц-80 по ускорению H⁻-ионов предназначен для получения протонных пучков с переменной энергией 40–80 МэВ и током выведенных пучков до 200 мкА. Вывод ускоренных H⁻-ионов из циклотрона Ц-80 осуществляется методом перезарядки на обдирочной фольге. Высокая энергия выведенных протонов открывает возможность получать ряд изотопов для позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), недоступных для коммерчески производимых циклотронов РФ. Данные изотопы используются в качестве генераторов, например ⁸²Sr/⁸²Rb. Такой подход позволяет избежать необходимости строительства циклотронов в каждом медицинском учреждении, где используется ПЭТ. Следует подчеркнуть, что в настоящее время ПЭТ является интенсивно развивающимся направлением ядерно-медицинской диагностики.

Циклотрон Ц-80 позволит производить практически все радионуклиды, необходимые для ядерной медицины. В подвальном помещении зала Ц-80 будут смонтированы три мишенные станции для наработки таких изотопов. На первом этапе планируется установка двух горячих камер, одна из которых предназначена для выделения и последующего использования генератора ⁸²Sr/⁸²Rb.

В будущем планируется строительство специального здания, где будет производиться весь спектр необходимых радиофармпрепаратов и их расфасовка. В зале циклотрона будет построено помещение для лучевой терапии злокачественных опухолей органов зрения и поверхностных форм рака. На очереди создание специального протонного пучка для радиационных испытаний электронной компонентной базы в интересах Роскосмоса и Министерства обороны РФ.



Изохронный H⁻-циклотрон ПИЯФ

1. Abrosimov N. K., Artamonov S. A. ..., Miceev G. F. ..., Ivanov E. M. ..., Riabov G. A. et al. // Proc. of the XIII Intern. Conf. on Cycl. and Their Appl. Canada, Vancouver, 1992. P. 58–61.
2. Артамонов С. А., Иванов Е. М., Михеев Г. Ф., Рябов Г. А., Самсонов В. М. // ВАНТ. 2012. № 3(79). С. 10–14.

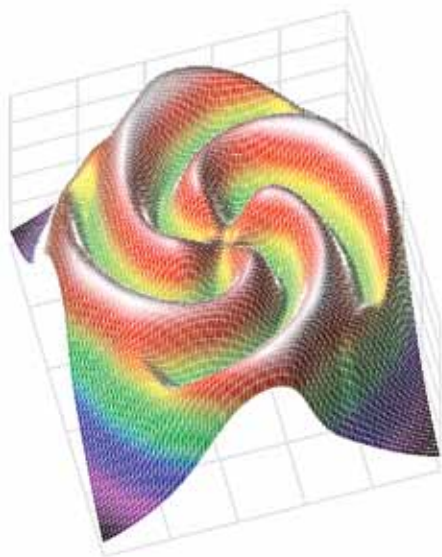
Формирование магнитного поля циклотрона Ц-80

Одной из центральных проблем при создании изохронного циклотрона является формирование радиального и азимутального распределений магнитного поля с требуемыми свойствами. Сформированное поле циклотрона должно обеспечивать изохронность движения для ускоряемых частиц, а также вертикальную и горизонтальную устойчивость пучка во время ускорения. Это поле также должно гарантировать прохождение так называемой рабочей точки циклотрона вдали от опасных резонансов и (или) обеспечивать быстрое и правильное ее прохождение через резонансные зоны. При этом магнитная система должна иметь такие параметры, которые дают возможность установки других систем циклотрона в зазор магнита: ВЧ-системы и вакуумной камеры, долинных шиммов, корректирующих гармонических катушек.

В результате опережающего всестороннего 3D-моделирования параметров системы была

получена оптимальная магнитная структура циклотрона Ц-80, которая удовлетворяет всем указанным требованиям. Она имеет 4 пары секторов, на каждом из которых расположены по 17 кольцевых секторных накладок. Вблизи выводного радиуса циклотрона, в каждой долине, размещены шиммы, которые позволяют уменьшить потери Н⁺-ионов в результате электромагнитной диссоциации в сильном магнитном поле. Помимо этого в каждой долине Ц-80 расположены по 4 корректирующие гармонические катушки для ликвидации паразитных гармоник поля.

После изготовления в железе секторов, кольцевых секторных накладок, катушек, долинных шиммов была успешно выполнена процедура экспериментальной доводки отдельных параметров структуры. Такой двухступенчатый подход соответствует современному мировому уровню по изготовлению изохронных циклотронов.



Оптимальное трехмерное магнитное поле изохронного циклотрона Ц-80

1. Артамонов С. А., Андрианов С. Н. // Вестник СПбГУ. 2008. Сер. 10. Вып. 3. С. 12–23.
2. Артамонов С. А., Андрианов С. Н. // Вестник СПбГУ. 2009. Сер. 10. Вып. 2. С. 3–14.
3. Artamonov S. A., Ivanov E. M., Riabov G. A., Chernov N. A. // Proc. of RUPAC 2012. Saint Petersburg, 2012. WEPPC015. P. 475–477.



Ядерная медицина (производство изотопов, лучевая терапия, нанобиотехнологии для медицины)

Производство медицинских радиоизотопов	112
Формирование офтальмологического пучка протонов.	113
Стереотаксическая протонная радиохирurgia на синхроциклотроне ПИЯФ. Результаты протонной радиохирургии эндоселлярных аденом гипофиза	114
Поглощение йодфолиевых кислот раковыми клетками	115
Роль гена <i>APP</i> человека в развитии патогенеза болезни Альцгеймера	116
Пагубная страсть, гены и дофамин	117
Молекулярная диагностика болезни Паркинсона	118
Новый метод оценки функциональной активности тромбоцитов	119
Жидкие дисперсии магнитных наночастиц для медицинских приложений	120
Водные растворы фуллеренов для медицинских приложений.	121
Синтез и радиационная стойкость эндометаллофуллеренов	122
Научно-практическая разработка «Система сохранения и укрепления здоровья и оптимизации учебной нагрузки учащихся общеобразовательного учреждения на основе комплексной объективной оценки физиологического баланса организма»	123

Производство медицинских радиоизотопов

Активное развитие позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ) требует соответствующего развития производства радиоизотопов – позитронных эмиттеров. Такие изотопы получают на высокоинтенсивных ускорителях протонов с энергией 20–150 МэВ. Основной задачей сооружаемого в ПИЯФ циклотрона Ц-80 является производство медицинских радиоизотопов. Некоторые из них приведены в таблице.

В качестве первоочередной ставится задача производства ^{82}Sr и ^{68}Ge , являющихся материнскими радионуклидами для генераторов позитронных эмиттеров ^{82}Rb и ^{68}Ga соответственно. Планируется также освоить получение альфа-излучателя ^{223}Ra , считающегося одним из самых перспективных радионуклидов для альфа-радиоиммунотерапии.

Важным требованием к получаемым радиоизотопам является отсутствие посторонних радиоактивных примесей. Часто такими примесями являются другие изотопы того же химического элемента. В этих случаях наиболее перспективно использование масс-сепараторного метода выделения нужного изотопа. В ПИЯФ уже в течение многих лет успешно работает масс-спектрометрический комплекс по выделению и исследованию короткоживущих ядер на синхроциклотроне СЦ-1000. Теперь этот опыт будет использован на циклотроне Ц-80 для получения сверхчистых медицинских изотопов (см. схему).

Создаваемый в ПИЯФ центр по производству радиоизотопов сможет обеспечить Северо-Западный регион РФ широким спектром медицинских радиоизотопов. Кроме того, будут проводиться работы по изготовлению радиофармпрепаратов, а также по использованию методов микробиологии в ядерной медицине.

Таблица. Радиоизотопы циклотрона Ц-80

Радиоизотопы	Назначение
^{82}Sr , ^{68}Ge	радионуклиды для генераторов позитронных эмиттеров
^{82}Rb , ^{68}Ga , ^{18}F	радионуклиды для ПЭТ
^{111}In , ^{123}I , ^{99m}Tc	гамма-излучающие радионуклиды для томографии
^{223}Ra , ^{149}Tb , ^{188}Re , ^{99m}Tc , ^{111}In , ^{124}I	радионуклиды для альфа-, бета- и гамма-терапии

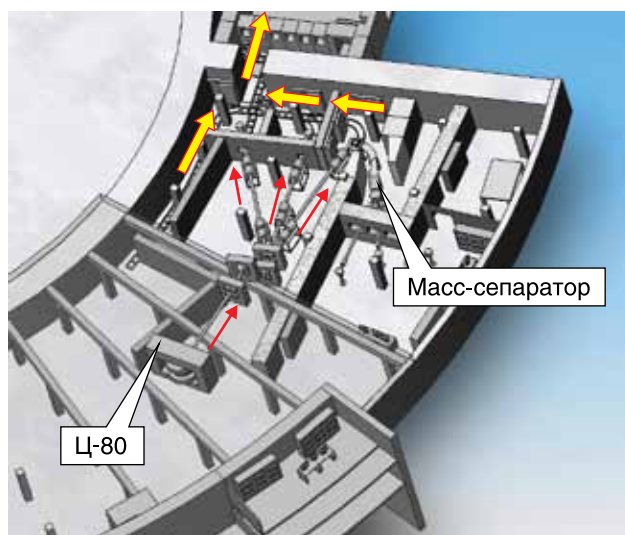


Схема получения радиоактивных изотопов на циклотроне Ц-80

Формирование офтальмологического пучка протонов

Настоящая работа проводится в рамках исследований по созданию центра протонной офтальмологии в ПИЯФ на базе циклотрона Ц-80. Основная задача данного этапа – разработка методики формирования пучка протонов с энергией ~ 60 МэВ для лечения заболеваний глаза. Формирование такого пучка требует создания однородного поля заданного поперечного сечения и плато модифицированной кривой Брэгга вдоль оси пучка.

Анализ системы доставки и качества пучка проведен на основе моделирования методом Монте-Карло в программном комплексе Geant4. Оценено влияние химического состава материалов, близких по составу к структурам глаза человека, и процессов ядерных взаимодействий на пространственное

распределение и величину поглощенной дозы. Показана необходимость учета ядерных взаимодействий при расчете биологической поглощенной дозы. Проведено моделирование различных вариантов формирования пучка на основе метода пассивного рассеяния (см. схему). Рассчитано несколько вариантов системы формирования, и оценены оптимальные характеристики пучка на входе в зал облучения. Показано, что наиболее перспективен широкий пучок с малым угловым расхождением, который позволяет получить требуемую однородность поглощенной дозы в фантоме и обеспечить минимальный радиационный фон в зале облучения.

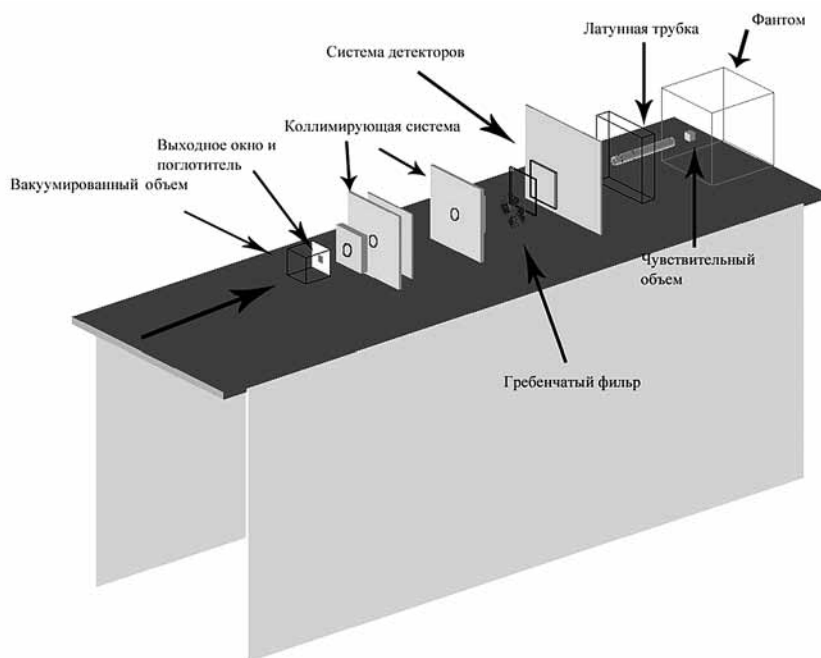


Схема формирования пучка методом пассивного рассеяния

1. Иванов Н. А., Лебедева Ж. С., Тверской М. Г., Шуракова Ю. Б. Сообщение ПИЯФ 2891. Гатчина, 2012. 35 с.
2. Иванов Н. А., Лебедева Ж. С. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2013. № 1(165). С. 128–135.
3. Иванов Н. А., Лебедева Ж. С., Шуракова Ю. Б. // Медицинская физика. 2013. № 3(59). С. 42–47.

Стереотаксическая протонная радиохirurgия на синхроциклотроне ПИЯФ. Результаты протонной радиохirurgии эндоселлярных аденом гипофиза

С 1975 г. протонная стереотаксическая радиохirurgия (ПСРХ) проведена 465 пациентам с эндоселлярными аденомами гипофиза. Лечение проводилось на синхроциклотроне ПИЯФ (1 000 МэВ, Гатчина) однократно методом «напролет». Для формирования адекватного дозного поля и ввиду высокой энергии генерируемого пучка использовался ротационно-конвергентный метод облучения. Поглощенные дозы варьировали от 80 до 120 Гр в изоцентре с резким градиентом дозы до 20 % на миллиметр в пределах 50–40 % изодозных кривых. Второй патологией, при которой успешно применялась ПСРХ по аналогичной методике с подведением в изоцентр 40–60 Гр, были артериовенозные мальформации (АВМ) головного мозга. Проведено 499 (37 %) сеансов ПСРХ для лечения АВМ головного мозга.

При пролактинсекретирующих аденомах клиническая ремиссия отмечена у 80 % пациентов, стабилизация – в 15 % случаев. У 21-й пациентки беременности закончились рождением здоровых детей, причем 4 из них родили дважды. Полная клиническая ремиссия наблюдалась у 92 % пациентов

с болезнью Иценко – Кушинга, в отдаленные сроки эти показатели равнялись 96 %. Она проявлялась исчезновением сахарного диабета, нормализацией показателей артериального давления и регрессом патологического ожирения. Стойкое излечение и полная нормализация показателей соматропного гормона отмечались в отдаленные сроки наблюдения у 86 % больных акромегалией. Клиническое излечение при гормонально-неактивных аденомах составило 95 %.

Во всех случаях для больных АВМ, прошедших курс лечения на синхроциклотроне ПИЯФ, применение хирургических методов лечения было сопряжено с высоким риском осложнений, а порой и вовсе невозможно. В течение 6 и более лет наблюдений излечение отмечено у 90 (49 %) больных, у 41-го (22,3 %) эффект отсутствовал, частичный отмечен у 37 (20,1 %) пациентов. Следует отметить, что полное излечение в 68 % наблюдений отмечено у больных с размерами АВМ 2 см³ и менее.

Проведение протонного облучения не сопровождалось серьезными, угрожающими жизни осложнениями.



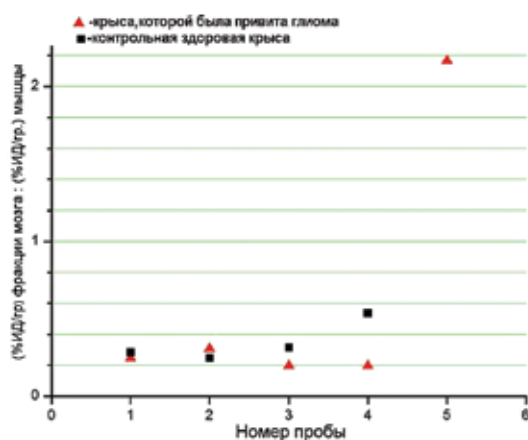
Пациент до протонной терапии и после

1. Granov A. et al. // HCPBM 10th Workshop on Heavy Charged Particles in Biology and Medicine and ENLIGHT 4th Meeting of the European Network for Light Ion Hadron Therapy. Italy: Oropa (Biella), 2005. P. 67–69.
2. Гранов А. М. и др. // Вопросы онкологии. 2013. Т. 59. С. 465–469.

Поглощение йодфолиевых кислот раковыми клетками

Разработаны новые методы синтеза производных фолиевой кислоты, меченных изотопом 125 I. Совместно с лабораторией клеточной биологии Отделения молекулярной и радиационной биофизики исследовано взаимодействие их с клетками HeLa, ECV, L-41, глиомы человека, глиомы крыс и взятыми для сравнения в качестве здоровых клеток фибробластами легких эмбриона человека (ФЛЭЧ). Показано, что поглощение $3'$ -йодфолиевой кислоты клетками L-41 и ECV в сотни раз превосходит количество препарата, поглощенного клетками ФЛЭЧ. Для клеток HeLa определена константа диссоциации комплекса $3'$ -йод-5-формилтетрагидрофолиевой кислоты с акцептором, предположительно вызывающим ее накопление в клетках. Определены константы диссоциации комплексов фолиевой, йодфолиевой и дийодфолиевой кислот с этим же акцептором. Исследовано распределение $3'$ -йодфолиевой и $3'$ -йод-5-формилтетрагидрофолиевой кислот в тканях разных органов здоровых мышей и крыс, а также у крыс с саркомой, привитой на бедро, и с глиомой, привитой в головной мозг. Показано, что имеется значительная разница в концентрациях $3'$ -йодфолиевой и $3'$ -йод-5-формилтетрагидрофолиевой кислот в опухоли

и в здоровом органе: $3'$ -йодфолиевой кислоты в здоровой мышце бедра в 5 раз меньше, чем в опухоли, привитой на бедро, а содержание $3'$ -йод-5-формилтетрагидрофолиевой кислоты в здоровом мозге в 10 раз меньше, чем в опухоли мозга (см. рис.). Таким образом, радиоактивно меченные производные фолиевой кислоты могут быть использованы для локализации злокачественных новообразований, при этом они в несколько раз селективнее, чем традиционно используемая для этих целей 2-дезоксифторглюкоза. Синтезированные нами радиоактивно меченные производные фолиевой кислоты проникают внутрь клетки. Этим они выгодно отличаются от многочисленных препаратов, описанных в литературе, в которых радиоактивная метка введена в объемистый заместитель, ковалентно связанный с фолиевой кислотой. Поскольку такие препараты не способны проникать внутрь клетки, они пригодны только для обнаружения опухолей, клетки которых содержат на поверхности фолатные рецепторы. Однако клетки далеко не всех типов раковых опухолей имеют на поверхности фолатные рецепторы, поэтому разработка наиболее селективных препаратов является на сегодняшний день актуальной задачей.



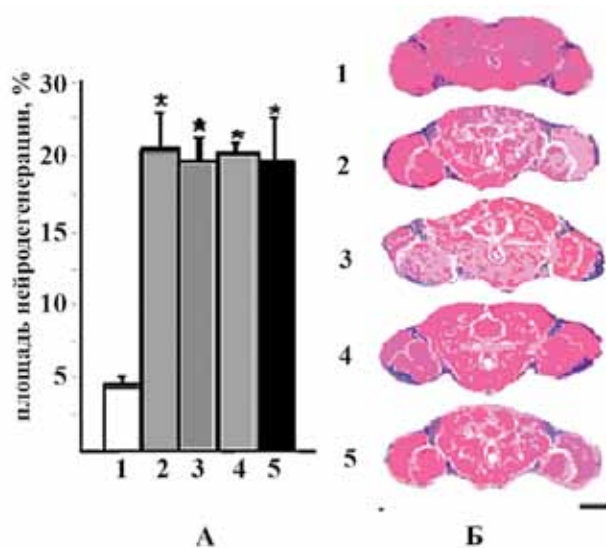
Распределение йодформилтетрагидрофолиевой кислоты в мозге крысы по отношению к ее содержанию в мышце. Верхняя точка – отдельно взятая опухоль; остальные точки – произвольно выбранные фракции мозга; по оси ординат – процент от инъецированной дозы на грамм веса (доля удельной активности в процентах в образце ткани по отношению к инъецированной дозе на грамм веса животного); по оси абсцисс – номера проб произвольно выбранных образцов ткани

Сорока Н. В., Филатов М. В., Королев В. Г., Багиян Г. А., Аплин К. Д., Гридасов Г. Г. // Биоорганическая химия. 2012. Т. 38(6). С. 734–744.

Роль гена *APP* человека в развитии патогенеза болезни Альцгеймера

Болезнь Альцгеймера (БА) – наиболее распространенная форма первичных нейродегенеративных заболеваний, характеризующаяся прогрессирующей потерей памяти, расстройством речи, распадом интеллекта и психической деятельности. Одним из основных нейropатологических маркеров заболевания является образование в мозге больных БА экстраклеточных амилоидных отложений. Однако в ранней клинической фазе заболевания нарушения в работе нервных клеток и нарушение памяти наблюдаются значительно ранее образования амилоидных отложений. Мутации в гене предшественника амилоида (*APP*) вызывают семейную форму БА и приводят к повышенному образованию амилоидного пептида β ($A\beta$), который является основным компонентом амилоидных бляшек, и, как предполагают, именно этот процесс является пусковым механизмом для развития БА. Доказательства, полученные в экспериментах *in vivo*, указывают, что мутации в *APP* могут приводить к изменению его клеточных функций

и эти изменения обуславливают нарушение в работе синапсов, независимо от генерации $A\beta$. В лаборатории экспериментальной и прикладной генетики Отделения молекулярной и радиационной биофизики на *Drosophila melanogaster* была создана модель БА, которая воспроизводит основные нейropатоморфологические черты БА, наблюдаемые у людей: изменение синаптической плотности, нейродегенерацию в мозге, образование и отложение $A\beta$, а также такие клинические показатели, как нарушение памяти и способности к обучению. В рамках этой модели удалось разделить эффекты *APP* и $A\beta$. Исследования показали, что нарушения клеточных функций *APP* приводят к развитию синаптической и нейродегенеративной патологий в мозге животных, а также негативно сказываются на их поведении и способности к запоминанию, независимо от образования $A\beta$. Образование $A\beta$ приводит к усилению нейropатологических процессов (см. рис.).



Нейродегенерация в мозге 30-дневных мух: А – площадь нейродегенерации; Б – парафиновые срезы мозга (окраска эозином и гематоксилином). Цифрами указаны линии: 1 – контроль; 2 – экспрессия *APP*; 3 – экспрессия *APP* с мутацией; 4 – образование $A\beta$; 5 – образование $A\beta$ с мутацией. Световая микроскопия, масштаб – 50 мкм

1. Саранцева С. В., Шварцман А. Л. // Нейродегенеративные заболевания: фундаментальные и прикладные аспекты / Под ред. акад. М. В. Угрюмова. М.: Наука, 2010. С. 286–298.
2. Sarantseva S., Schwarzman A. // Amyloidosis – Mechanisms and Prospects for Therapy / Ed. by S. Sarantseva. Rijeka: Intech, 2011. P. 199–216.
3. Саранцева С. В., Родин Д. И., Шварцман А. Л. // ДАН. 2012. Т. 442. № 2. С. 279–281.
4. Саранцева С. В., Кислик Г. А., Ткаченко Н. А., Васильев А. Н., Шварцман А. Л. // Цитология. 2012. Т. 54. № 5. С. 55–63.

Пагубная страсть, гены и дофамин

В лаборатории молекулярной генетики человека Отделения молекулярной и радиационной биофизики проведено исследование по оценке влияния алкоголя на работу генов, кодирующих ключевые белки, участвующие в синтезе и передаче дофамина – вещества, которое в настоящее время рассматривают как основной коррелят удовольствия при приеме алкоголя. Объектом исследования были выбраны лимфоциты периферической крови человека – удобный объект, т. к. они не только синтезируют дофамин, но и содержат на своей мембране основные классы дофаминовых рецепторов.

В ходе работы было показано, что любое употребление спиртосодержащих напитков приводит к адаптивным изменениям в работе генов, нарушается нормальный клеточный метаболизм и в итоге происходят эпигенетические модификации струк-

туры самих генов (см. схему). При формировании синдрома алкогольной зависимости формируется определенный фенотип дофаминергической нейротрансмиссии (охарактеризованный нами): активность генов α -синуклеина и некоторых рецепторов дофамина повышена, но перераспределения в количестве лимфоидных клеток, несущих те или иные рецепторы дофамина, не происходит.

В настоящее время лечение алкогольной зависимости остается одним из актуальных вопросов современной медицины. По мнению авторов работы, основная проблема антиалкогольной терапии связана с отсутствием индивидуального подхода. Предполагается, что разработка новых нейрорептиков с учетом индивидуальной оценки рецепторов дофамина приведет к прорыву в лечении алкоголизма.



Схема механизма формирования алкогольной зависимости, сопровождающейся изменениями экспрессии генов вследствие эпигенетических процессов

1. Тараскина А. Е. // Природа. 2011. № 6. С. 18–23.
2. Тараскина А. Е., Морозова М. Н., Бычкова Н. В., Давыдова Н. И., Шварцман А. Л. // Российский иммунологический журнал. 2012. Т. 6(15). № 3. С. 273–280.



В лаборатории молекулярной генетики человека Отделения молекулярной и радиационной биофизики проведено масштабное исследование (наиболее крупное в России) по выявлению генетических маркеров, позволяющих формировать группы высокого риска развития распространенного нейродегенеративного заболевания человека – болезни Паркинсона (БП) и прогнозировать его течение и ответ на медикаментозную терапию. При поиске мутаций ряда генов среди пациентов с БП были выбраны генетические детерминанты (мутации в генах *LRRK2* и *GBA*), позволяющие прогнозировать с высокой вероятностью развитие дан-

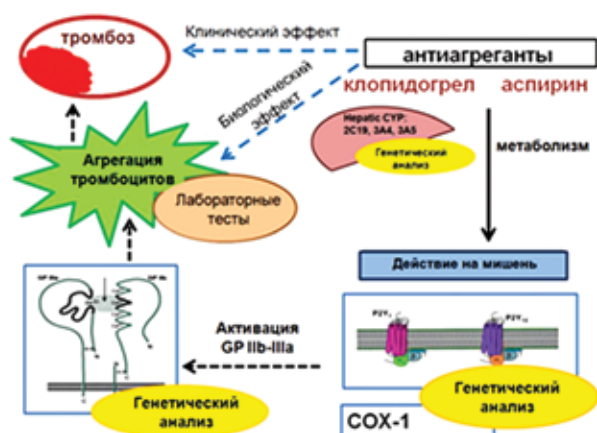
ного заболевания, и оценена их частота в популяции и среди больных. Мутации в первом гене редки, однако их наличие приводит к развитию заболевания в возрасте 60–80 лет с вероятностью 80 %. Носителями мутаций во втором гене является каждый 200-й житель России, и их наличие повышает риск развития ранних форм заболевания в 15 раз. Впервые предложен алгоритм выявления групп высокого риска БП на основании проведения молекулярно-генетического анализа. Полученные данные позволяют прогнозировать развитие БП и создавать новые подходы к нейропротекторной терапии этого распространенного заболевания.

1. Пчелина С. Н., Иванова О. Н., Емельянов А. К., Якимовский А. Ф. // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2011. Т. 111. № 12. С. 56–62.
2. Emelyanov A., Bukina T., Usenko T., Drosdova A., Zakharchuk A., Andoskin P., Dubina M., Schwarzman A., Pchelina S. // *Mov. Disord.* 2012. V. 1. P. 158–159.
3. Emelyanov A., Andoskin P., Yakimovskii A., Usenko T., Nuzhnyi E., Nikolaev M., Pchelina S. // *Parkinsonism Relat. Disord.* 2013. V. 19(11). P. 1064–1065.

Новый метод оценки функциональной активности тромбоцитов

Ингибирование тромбоцитарной агрегации является в настоящее время ключевым терапевтическим подходом в лечении и профилактике сердечно-сосудистой патологии. Количество тромбоцитарных рецепторов на поверхности клетки изменяется при активации тромбоцита. С одной стороны, степень данных изменений может служить адекватным маркером гиперагрегации тромбоцитов, а с другой – позволяет оценить эффективность антиагрегантной терапии. В лаборатории молекулярной генетики человека Отделения молекулярной и радиационной биофизики разработан новый метод анализа изменения количества

тромбоцитарных рецепторов на поверхности нативных клеток при активации 10 мкМ АДФ с использованием специфичных антител к Р-селектину и рецептору для фибриногена GP IIb-IIIa – индуцированная проточная тромбоцитометрия. На основе данного метода впервые сформулирован алгоритм лабораторного молекулярно-генетического исследования для оценки функционального состояния тромбоцитов у людей с сердечно-сосудистыми заболеваниями и определения индивидуальной чувствительности к антиагрегантным препаратам, включающий функциональные тесты и генетический анализ (см. рис.).



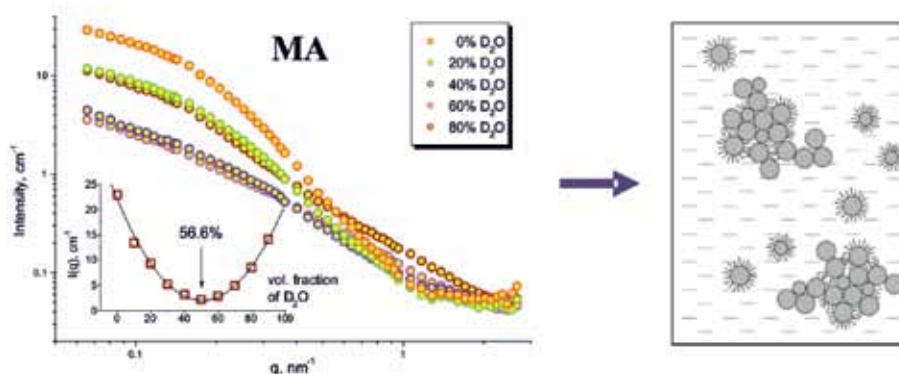
Комплексный алгоритм анализа функциональной активности тромбоцитов и чувствительности к антиагрегантным препаратам с учетом молекулярно-генетических механизмов активации тромбоцитарного гемостаза

1. Сироткина О. В., Боганьнова Н. А., Ласковец А. Б., Кухарчик Г. А., Гайковая Л. Б., Вавилова Т. В. // Медицинская иммунология. 2010. Т. 12. № 3. С. 213–218.
2. Сироткина О. В., Вавилова Т. В. // Атеротромбоз. 2012. № 1. С. 49–55.
3. Сироткина О. В., Ласковец А. Б., Липунова А. С., Гайковая Л. Б., Болдуева С. А., Вавилова Т. В. // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. 2013. Т. 9. № 1. С. 27–30.

Жидкие дисперсии магнитных наночастиц для медицинских приложений

В рамках комплексного подхода исследована структура биосовместимых феррожидкостей, синтезируемых для терапии раковых опухолей мозга человека. Для стабилизации наночастиц магнетита (размер ~ 10 нм, полидисперсность $> 50\%$) в жидкой среде использован двойной слой поверхностно-активных веществ (ПАВ) – насыщенных монокарбоновых миристиновой (МА + МА) и лауриновой (LA + LA) кислот. Несмотря на сравнительно высокую временную стабильность, в образцах присутствуют устойчивые кластеры наночастиц с характерным размером в диапазоне 30–40 нм. В частности, для уточнения состава кластеров использовалось малоугловое рассеяние тепловых нейтронов с применением вариации контраста на основе замещения «водород – дейтерий» в водной основе. Обнаружено существенное различие в доле кислот в кластерах для образцов двух типов: если для образцов типа LA + LA кластеры состоят из частиц магнетита, полностью покрытых

оболочкой ПАВ толщиной около 3,5 нм, то в случае образцов типа МА + МА кластеры состоят из частиц магнетита с неполным покрытием кислотами (см. рис.). Это указывает на более значительную агрегацию ПАВ с большей длиной в процессе приготовления, что снижает адсорбцию МА на поверхность магнетита. Данный вывод согласуется с тем фактом, что получение стабильных водных феррожидкостей посредством более длинных ПАВ из ряда монокарбоновых кислот (пальмитиновая, стеариновая кислоты) не представляется возможным. Из важных полученных характеристик следует также отметить температурную стабильность кластеров и отсутствие мицелл свободного (неадсорбированного) ПАВ. Наночастицы из данных систем показали хорошую проникающую способность в отношении раковых клеток (глиобластомы) наряду с малой цитотоксичностью в отношении здоровых клеток мозга (астроцитов) и использовались в пробных *in-vitro*-экспериментах по терапии рака.



Вариация контраста в экспериментах по малоугловому рассеянию нейтронов на биосовместимых феррожидкостях на основе наномангнетита, покрытого двойным слоем LA- и МА-кислот. Анализируются изменения в кривых рассеяния при варьировании объемной доли тяжелой воды (D_2O) в растворителе. На вкладках показаны эффективные точки компенсации, найденные по рассеянию в нулевой угол. Справа схематично представлена найденная структура кластеров в изучаемых системах

1. Авдеев М. В., Аксенов В. Л. // УФН. 2012. Т. 180. № 10. С. 1009–1034.
2. Petrenko V. I., Avdeev M. V., Bulavin L. A., Vekas L., Rosta L., Garamus V. M., Willumeit R., Aksenov V. L. // J. Phys.: Conf. Ser. 2012. V. 345. P. 012028.
3. Нагорный А. В., Петренко В. И., Авдеев М. В., Булавин Л. А., Аксенов В. Л. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 2. С. 3–8.

Исследованы структура и токсичность водных кластерных растворов фуллерена C_{60} с перспективой их использования в биомедицинских целях. Рассмотрено два вида систем, полученных путем замены растворителя и из смешанных растворов C_{60} /N-метилпирролидон. С помощью структурных методов наблюдалось существенное (в 2 раза) различие в размерах кластеров. Определены пороги токсичности в отношении присутствия в растворе третьей компоненты, ниже которых оба типа исследованных систем показывают отсутствие токсичности в экспериментах *in vitro* на клетках китайского хомяка (линия V-79) для достаточно широкого диапазона концентраций C_{60} , от 0,05 до 5 мкг/мл (рис. 1). Тот факт, что N-метилпирролидон не проявляет высокую токсичность при указанных концентрациях фуллерена в растворе, позволяет рассматривать его в качестве базового растворителя в дальнейших попытках получения биосовместимых водных *мономерных* растворов C_{60} при условии дополнительной очистки систем.

Методом малоуглового рассеяния нейтронов проведена сравнительная структурная характеристика кластеров фуллеренов C_{60} (рис. 2) и C_{70} в воде и в смешанном растворителе NMP/ H_2O . Водные растворы получали методом замены растворителя. Для получения водно-органической системы C_{60} /NMP/ H_2O фуллерен изначально растворялся в органическом растворителе с последующим добавлением воды, так что доля NMP в конечном растворе составляла не более 0,005 % по объему. Получено распределение по размерам кластеров для каждого из образцов. Исследована возможность использования растворов фуллеренов на основе NMP/ H_2O в биомедицинских целях с точки зрения токсичности. В частности, наблюдается корреляция между размерами кластеров фуллерена в растворах и их цитотоксичностью.

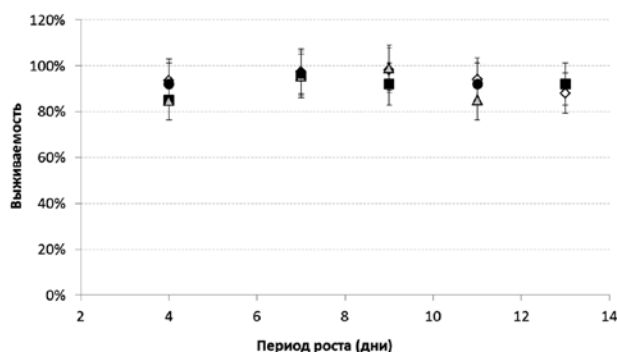


Рис. 1. Выживаемость клеток линии V-79 китайского хомяка в течение 13 дней при добавлении водного раствора фуллерена для концентраций: Δ – 0,5, \blacksquare – 0,05, \diamond – 0,005 мкг/мл раствора C_{60} соответственно; \bullet – контроль

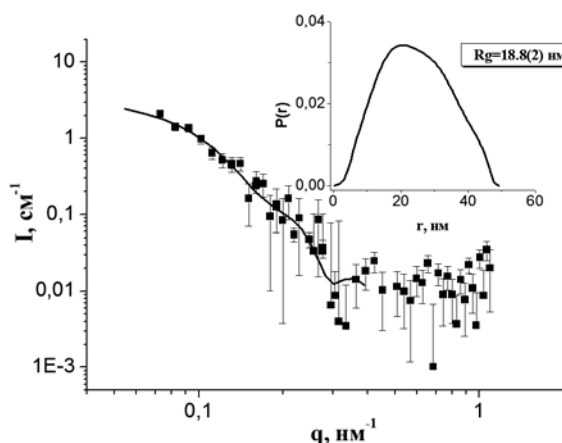
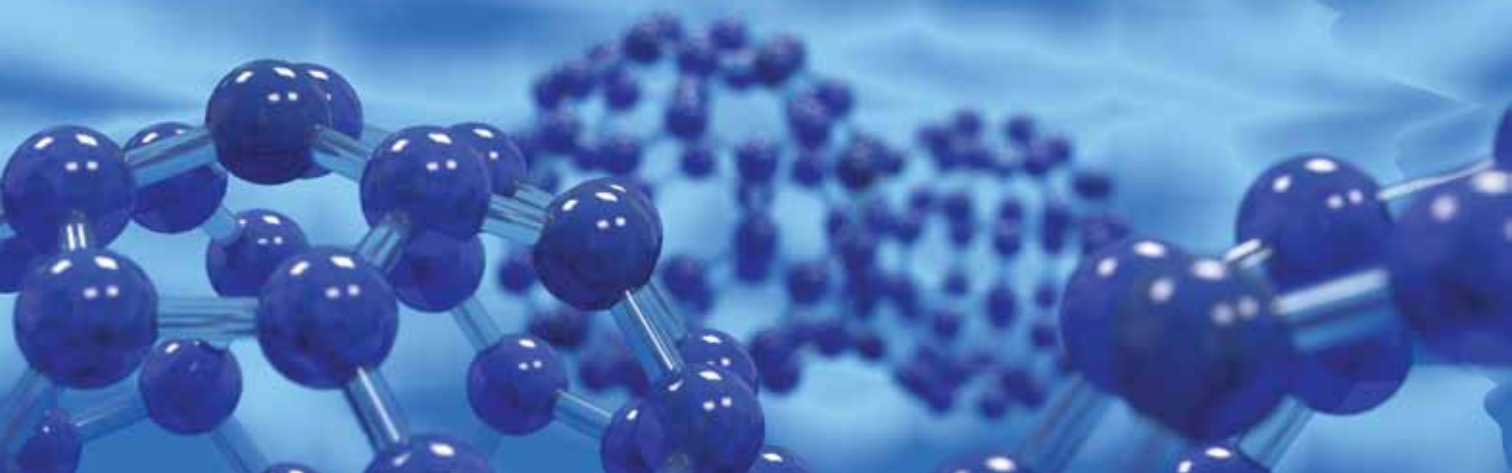


Рис. 2. Определение корреляционной функции парных расстояний в кластерах C_{60} для водных коллоидных растворов фуллерена с помощью малоуглового рассеяния нейтронов

1. Авдеев М. В., Аксенов В. Л., Тропин Т. В. // Журнал физической химии. 2010. Т. 84. № 8. С. 1405–1416 (обзор).
2. Кузыма О. А., Коробов М. В., Авдеев М. В., Гарамус В. М., Снегирь С. В., Петренко В. И., Аксенов В. Л., Булавин Л. А. // Chem. Phys. Lett. 2010. V. 493. P. 103–106.
3. Кырей Т. О., Кузыма О. А., Авдеев М. В., Тропин Т. В., Коробов М. В., Аксенов В. Л. // Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures. 2012. V. 20. P. 341–344.
4. Кузыма О. А., Кырей Т. О., Авдеев М. В., Коробов М. В., Булавин Л. А., Аксенов В. Л. // Chem. Phys. Lett. 2013. V. 556. P. 178–181.

Синтез и радиационная стойкость эндометаллофуллеренов



В лаборатории нейтронных физико-химических исследований Отделения нейтронных исследований ПИЯФ созданы уникальные эндоэдральные комплексы фуллеренов с металлами редкоземельного ряда и другими металлами, атомы которых обладают магнитным моментом.

Разработаны методы превращения эндометаллофуллеренов в водорастворимые формы – фуллеренолы типа $Gd@C_{82}(OH)_x$ ($X = 30-40$) для целей внедрения в медицину в качестве эффективных и нетоксичных контрастирующих агентов, способных, как показали опыты на животных, давать также и терапевтический эффект, подавляя развитие опухоли – глиомы С6 в мозге мыши. Возможности

реакторного комплекса ПИЯФ были использованы для определения радиационной стойкости эндофуллеренов и фуллеренолов, перспективных для получения радиоизотопов путем активации ядер редкоземельных элементов, заключенных внутри углеродных оболочек. Полученные в ПИЯФ эндофуллерены и фуллеренолы изучены в условиях растворов, моделирующих биологические среды, методами рассеяния нейтронов на реакторе ВВР-М ПИЯФ; найдены закономерности и условия молекулярной организации этих объектов в сверхструктуры, характер которых необходимо контролировать в целях биомедицинских применений этих веществ.



1. Nikolaev I. V., Lebedev V. T., Grushko Yu. S., Sedov V. P., Shilin V. A., Török Gy., Melenevskaya E. Yu. // Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures. 2012. V. 20. Iss. 4–7. P. 345–350.
2. Лебедев В. Т., Грушко Ю. С., Седов В. П., Шилин В. А., Козлов В. С., Орлов С. П., Сушков П. А., Колесник С. Г., Сажокина А. А., Шабалин В. В. // ФТТ. 2014. Т. 56. Вып. 1. С. 176–179.

Научно-практическая разработка «Система сохранения и укрепления здоровья и оптимизации учебной нагрузки учащихся общеобразовательного учреждения на основе комплексной объективной оценки физиологического баланса организма»

Наиболее значимым достижением лаборатории медицинской биофизики Отделения молекулярной и радиационной биофизики являются разработка под руководством профессора Л. А. Носкина концепции предиктивной диагностики и создание технических средств и методик для реализации данного подхода. Накопленный в лаборатории многолетний опыт позволил создать систему экспрессного саногенетического мониторинга, адаптированного как к условиям лечебных учреждений, так и к другим условиям. Данная система была реализована в виде ряда приборов, объединенных в единый комплекс с помощью уникального программного обеспечения. В работе предложены принципиально новые методы решения проблемы сохранения и укрепления здоровья учащихся:

- индивидуальная оценка состояния здоровья каждого учащегося и его здоровьесберегающего ресурса, объективность и многокритериальность оценки;

- оценка краткосрочной, среднесрочной и долгосрочной динамики (мониторинг);

- минимальная квалификация, необходимая для измерений;

- выработка рекомендаций для педагогов, всего коллектива общеобразовательного учреждения, учащегося и его родителей по оптимизации во всех сферах: интеллектуальные и физические нагрузки (прежде всего – учебные), режим дня, недели, года; виды и объемы внешкольной деятельности, режим питания;

- встроенность действенных механизмов рекомендаций в уклад образовательного учреждения (философия «Школы здоровья»).

Указанные программно-аппаратные комплексы реализованы как в стационарном варианте, устанавливаемом в образовательном учреждении, так и в мобильном, что особенно важно для сельской малокомплектной школы. Интерфейсом системы с учащимся и его родителями является «Паспорт здоровья школьника», реализованный как в электронном, так и в бумажном формате.

В настоящее время приборно-аппаратными комплексами саногенетического мониторинга оснащены 35 образовательных учреждений, выездные обследования проводятся в 27 образовательных учреждениях. Объем исследований составил 60 классов – 1 354 человека. Результаты и рекомендации переданы в школы, что позволяет системе образования включиться в процесс информатизации общества, в систему построения здоровьесберегающей информационно-образовательной среды.

Разработка защищена патентом РФ № 121138 от 2 мая 2012 г. Программное обеспечение защищено свидетельствами о регистрации программ № 2008615058 и 2011613432. За выполнение данной работы авторскому коллективу во главе с Л. А. Носкиным в 2012 г. присуждена премия Правительства Российской Федерации в области образования.



Количественные показатели

Результаты научных исследований.	126
Кадровый состав института	128

Результаты научных исследований

Число публикаций сотрудников ПИЯФ

Публикации	2010	2011	2012	2013	Итого
отечественные	115	119	126	95	455
зарубежные	365	408	419	503	1 695
монографии	1	5	4	5	15

Участие сотрудников ПИЯФ в конференциях

Конференции	2010	2011	2012	2013	Итого
российские	30	30	32	150	242
международные	67	70	80	92	309

Число диссертаций, защищенных в диссертационном совете ПИЯФ

Диссертации*	2010	2011	2012**	2013
докторские	1	4	–	–
кандидатские	4	3	6	–

* Включены диссертации только по физико-математическим наукам.

** С 1 июля 2012 г. диссертационный совет ПИЯФ не работал.

Количество грантов

Гранты	2010	2011	2012	2013
РФФИ	65	77	85	77
Президента РФ	3	3	3	3
Правительства РФ	–	–	–	7

Государственная поддержка

Государственную поддержку в 2010–2013 гг. имели две научные школы:

- Школа теоретической физики высоких энергий и элементарных частиц (руководитель член-корреспондент РАН Л. Н. Липатов);
- Петербургская школа экспериментальной физики высоких энергий (руководитель член-корреспондент РАН А. А. Воробьев).

Награды и премии

- 2009–2010 15 сотрудников ПИЯФ удостоены стипендии губернатора Ленинградской области. Из них 12 – в категории «Ведущие ученые» и 3 – в категории «Молодые ученые».
- 2011 Сотрудник Отделения теоретической физики ПИЯФ профессор Д. И. Дьяконов стал лауреатом премии правительства Ленинградской области и президиума СПбНЦ РАН в области фундаментальных исследований.
- 2011–2012 14 сотрудников ПИЯФ удостоены стипендии губернатора Ленинградской области. Из них 9 – в категории «Ведущие ученые» и 5 – в категории «Молодые ученые».
- 2012 Заместитель директора по науке ПИЯФ В. Ф. Ежов удостоен ордена Почета за исследования подледникового озера Восток.
Авторский коллектив ПИЯФ в составе В. Г. Королева, А. Ю. Конева, Ю. А. Ильина, Д. В. Федорова, А. Ю. Черненко и авторский коллектив ПИЯФ в составе А. С. Воробьева, Е. М. Иванова, Г. Ф. Михеева, Г. А. Рябова, О. А. Щербакова стали лауреатами конкурса на соискание премии им. И. В. Курчатова за 2012 г.
- 2013 Сотрудник Отделения теоретической физики ПИЯФ доктор физико-математических наук С. В. Малеев стал лауреатом премии им. В. А. Фока.
Сотрудники Отделения молекулярной и радиационной биофизики ПИЯФ А. Л. Конева, С. В. Кириллов, Ю. П. Семенов и сотрудник Отделения нейтронных исследований ПИЯФ аспирант Ю. А. Демидов стали лауреатами конкурса на соискание премии им. И. В. Курчатова за 2013 г.
- 2013–2014 22 сотрудника ПИЯФ удостоены стипендии губернатора Ленинградской области. Из них 16 – в категории «Ведущие ученые» и 6 – в категории «Молодые ученые».

Кадровый состав института

Численность сотрудников ПИЯФ

Сотрудники	Годы			
	2010	2011	2012	2013
Всего без учета совместителей	1 782	1 785	1 794	1 878
Всего научных сотрудников	538	529	530	529
<i>Из них с должностью</i>				
главного научного сотрудника	15	14	12	12
ведущего научного сотрудника	61	62	65	64
старшего научного сотрудника	209	200	200	200
научного сотрудника	148	147	147	147
младшего научного сотрудника	34	37	47	54
прочие научные сотрудники	21	19	12	34
<i>С ученой степенью</i>				
доктора наук	78	76	79	79
кандидата наук	280	263	258	266
<i>С ученым званием</i>				
академика	–	–	1	1
члена-корреспондента	2	2	2	2
профессора	–	–	–	17
доцента (с. н. с.)	–	–	–	133

Возраст научных сотрудников ПИЯФ


Сотрудники	Возраст, лет					
	20–29	30–39	40–49	50–59	60 и старше	Средний возраст
<i>С ученой степенью</i>						
доктора наук	–	2	8	12	60	67,6
кандидата наук	8	28	40	50	140	59,4
<i>Не имеют ученой степени</i>	35	39	21	26	63	48,6
Всего	43	69	69	88	263	
<i>С ученым званием</i>						
академика	–	–	–	–	1	73,6
члена-корреспондента	–	–	–	–	2	74,3
профессора	–	–	–	–	17	76,5
доцента (с. н. с.)	–	–	3	19	111	69,8

Средний возраст научных сотрудников ПИЯФ по должностям

Должность	Средний возраст
главный научный сотрудник	74,4
ведущий научный сотрудник	61,7
старший научный сотрудник	58,6
научный сотрудник	49,6
младший научный сотрудник	30,5
прочие научные сотрудники	26,2

Научный стаж сотрудников ПИЯФ

Должность	Со стажем			Всего
	до 5 лет	от 5 до 10 лет	более 10 лет	
зав. лабораторией и отделом	3	2	47	52
главный научный сотрудник	–	–	12	12
ведущий научный сотрудник	1	2	61	64
старший научный сотрудник	9	11	180	200
научный сотрудник	21	19	107	147
младший научный сотрудник	40	14	–	54



188300, Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща,
ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Тел.: +7 (81371) 4 60 25, +7 (81371) 4 60 47

Факс: +7 (81371) 3 60 25, +7 (81371) 3 13 47

Web: www.pnpi.spb.ru

E-mail: dir@pnpi.spb.ru



Основные результаты научной деятельности 2010–2013

Дизайн, компьютерная верстка: *М. Ю. Попов*
Технический редактор *Т. А. Парфеева*
Редакторы: *Е. Ю. Орбеев, Е. С. Степовая*
Компьютерная обработка: *Е. В. Веселовская*

Отпечатано в издательско-полиграфическом отделе
ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»
на Konica Minolta bizhub C552

188300, Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща
Зак. 91, тир. 250, уч.-изд. л. 12; 02.04.2014 г.