



Российская Академия Наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

**«ДОРОЖНАЯ КАРТА»
В ОБЛАСТИ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

Редактор Л.В. Григоренко

Москва
2021

УДК 539.1
ББК 22.383
Д69

Авторский коллектив:

Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флёрова, Объединенный институт ядерных исследований: Л.В. Григоренко, А.С. Деникин, С.Н. Дмитриев, А.В. Карпов, С.А. Крупко, Ю.Ц. Оганесян, С.И. Сидорчук, А.С. Фомичев; **Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ:** Л.В. Григоренко, С.М. Полозов, С.В. Попруженко; **Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»:** Л.В. Григоренко, А.Л. Барабанов; **Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова, Объединенный институт ядерных исследований:** Н.В. Антоненко, Р.В. Джолос; **Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» — Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова:** А.С. Воробьев, В.Н. Пантелеев, А.П. Серебров; **Санкт-Петербургский государственный университет:** С.В. Григорьев, С.Ю. Ториллов; **Государственный университет «Дубна»:** А.С. Деникин; **Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета:** Д.О. Ерёмenco, Б.С. Ишханов, А.А. Кузнецов; **Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики:** Н.В. Завьялов, Р.И. Ильяев; **Институт ядерных исследований Российской академии наук:** Л.В. Кравчук; **Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» — Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова:** Т.В. Кулевой; **GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research, Дармштадт, Германия:** И.Г. Муха; **Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики Российской академии наук»:** В.А. Скалыга; **Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук:** С.Ю. Таскаев; **Объединенный институт ядерных исследований:** Б.Ю. Шарков; **Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований:** В.Н. Швецов.

Д69 «Дорожная карта» в области ядерной физики / Ред. Л. В. Григоренко. — М.: РАН, 2021. — 78 с.

ISBN 978-5-907366-33-6

Содержание

Часть I. Фундаментальная ядерная физика низких энергий.....	4
I.1. Программы исследований в ЛЯР ОИЯИ	5
I.1.а. Тяжелые и сверхтяжелые ядра. Синтез и свойства СТЭ.....	5
I.1.б. Экзотические ядра вблизи границ стабильности	7
I.1.в. Ядерные реакции на пучках стабильных и радиоактивных ионов	10
I.1.г. Прикладные задачи на пучках тяжелых ионов.....	11
I.2. ISOL-установка ИРИНА в НИЦ «КИ» — ПИЯФ.....	12
I.3. Сотрудничество в рамках коллаборации NUSTAR проекта FAIR (GSI, Германия).....	17
I.4. Фундаментальные исследования в РФЯЦ-ВНИИЭФ.....	20
I.4.а. Создание систематики глобальных оптических потенциалов	20
I.4.б. Экспериментальное и теоретическое исследования гамов-теллеровского резонанса	21
I.4.в. Исследование статистических флуктуаций плотности нейтронов.....	22
I.5. Экспериментальная ядерная физика в МГУ	24
I.5.а. Исследования в области физики фотоядерных реакций в НИИЯФ МГУ	24
I.5.б. Исследования на базе комплекса ускорителей ионов в НИИЯФ МГУ	26
I.6. Проект DERICA и стратегия развития ядерной физики низких энергий в Российской Федерации.....	27
Часть II. Нейтронные исследования	33
II.1. Реактор ИБР-2 и комплекс DNS-IV на реакторе ИБР-3 в ЛНФ ОИЯИ	34
II.2. Фундаментальные исследования с нейтронами в НИЦ «КИ» — ПИЯФ.....	39
II.2.а. Высокоинтенсивный источник УХН на основе сверхтекучего гелия на базе реактора ПИК	40
II.2.б. Перспективные эксперименты на реакторе ПИК	40
II.2.в. Импульсный нейтронный источник и спектрометр ГНЕЙС в НИЦ «КИ» — ПИЯФ	48
II.3. Развитие центра нейтронных исследований в ИЯИ РАН	49
II.4. Программы развития компактных нейтронных источников	56
II.4.а. Компактный источник нейтронов ИЯФ СО РАН.....	57
II.4.б. Проект DARIA (СПбГУ, ИПФ РАН, ИТЭФ, ОИЯИ)	59
Часть III. «Интеллектуальная инфраструктура».....	63
III.1. Образование и подготовка кадров	63
III.2. Развитие теоретических исследований	67
III.2.а. Теоретические школы в ОИЯИ.....	69
III.2.б. Теоретические школы в МГУ	72
III.2.в. Теоретические школы в СПбГУ	73
III.2.г. Теоретические школы в КИ.....	74
III.2.д. Теоретические школы в МИФИ	74
III.2.е. Теоретическая школа в Воронежском университете	74
III.3. Исследовательский центр ФАИР-Россия	74
Часть IV. Выводы и рекомендации.....	76

Часть I. Фундаментальная ядерная физика низких энергий

Ядерная физика низких энергий исторически имела огромное значение для развития ряда высокотехнологичных отраслей науки и техники в нашей стране. Атомная энергетика, реакторная физика, ядерная часть оборонного комплекса, нейтронная физика, ядерная астрофизика в различных аспектах опираются на данные и на экспертизу из фундаментальной ядерной физики низких энергий. Особенно это касается не «рутинных», хорошо отработанных приложений ядерной физики, а возможности проведения пионерских и междисциплинарных исследований в этих областях. Однако на настоящий момент системная фундаментальная ядерная физика низких энергий в РФ практически прекратила существование: экспериментальные исследования мирового класса в этой области ведутся в нашей стране фрагментарно и относительно успешно лишь по отдельным узким направлениям.

Данное печальное положение имеет принципиальные причины. В конце 1980-х и начале 1990-х годов в мире происходила смена парадигмы ядерной физики низких энергий и был существенно расширен фронт исследований структуры и свойств ядерной материи. От исследований стабильных ядер произошел стремительный переход к исследованиям преимущественно на пучках радиоактивных изотопов (РИ): с одной стороны, была в значительной степени исчерпана повестка исследований со стабильными ядрами, а с другой — были доведены до рабочего состояния технологии работ с пучками РИ. Эффективная генерация пучков РИ в технологии *in-flight* (фрагментация быстрого пучка стабильных ядер) требует тяжелоионных ускорителей относительно высоких энергий (50–1500 МэВ/нуклон, чаще всего чем выше, тем лучше, но есть оптимум под каждую задачу). Также эффективная генерация пучков РИ в технологии *ISOL* (сбор осколков индуцированного деления урана) требует как высокоинтенсивного драйвера (в основном электроны, нейтроны, протоны и дейтроны), так и постускорения полученных редких изотопов для проведения исследований более широкого класса задач. Таким образом, от одиночных ускорителей «зари ядерной эры» произошел переход к каскадам ускорителей, характерным скорее для комплексов физики высоких энергий. В этот период развитие научных проектов у нас в стране было заморожено в принципе, и этот переход в РФ не состоялся.

Ситуация в мире сегодня характеризуется активным строительством фабрик радиоактивных изотопов нового поколения. К амбициозным программам апгрейда давно существующих лидеров в этой области — RIKEN → RIBF (Япония, работает с 2007 г.), GANIL → SPIRAL2 (Франция, работает с 2020 г.), GSI → FAIR (Германия, идет капитальное строительство, первые пучки ожидаются в 2026 г.), NSCL → FRIB (США, в 2021 г. был получен первый пучок, завершается монтаж оборудования) — добавились новые «игроки». Это исключительно масштабные, создаваемые «на ровном месте» центры исследования радиоактивных изотопов — HIAF (Китай) и RAON (Республика Корея). HIAF и RAON приближаются к стадии

монтажа оборудования. Базовые бюджеты всех перечисленных проектов найдутся в диапазоне от ~ 1 до ~ 3 млрд долл. США.

Приборная база ядерной физики низких энергий в РФ катастрофически устарела. Ее обновление ведется силами отдельных институтов и на отдельных направлениях (разделы I.1.a, I.1.в, I.2). При этом, с одной стороны, создаются установки достаточно высокого класса, а с другой стороны — какой-либо единой стратегии развития ядерной физики низких энергий не существует. Чтобы кардинально переломить ситуацию после трех десятилетий «голодного пайка», требуются перспективное видение, консолидация усилий и инвестиции гораздо большего уровня с целью создания ядерно-физического центра (центров) по-настоящему мирового класса (раздел I.6).

I.1. Программы исследований в ЛЯР ОИЯИ

Ядерно-физические исследования в ОИЯИ выполняются в основном на пучках тяжелых ионов Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флёрва (ЛЯР) по следующим направлениям:

- синтез и свойства тяжелых и сверхтяжелых элементов (СТЭ);
- структура ядер вблизи границ нуклонной стабильности;
- взаимодействия сложных ядер, ядра в экстремальных состояниях.

План развития экспериментальной базы ЛЯР в краткосрочной перспективе имеет целью создание специализированных ускорительных комплексов, оборудованных современными экспериментальными установками, на базе которых будет реализовываться программа исследований ЛЯР. Работы в названных трех областях ядерной физики и смежных науках (атомной физике, химии, астрофизике), а также в прикладных задачах получают развитие на трех ускорительных комплексах, оснащенных современным оборудованием. Базовое оборудование (ускорительные установки, сепарирующие каналы и детекторные системы) каждого из направлений представлено ниже.

I.1.a. Тяжелые и сверхтяжелые ядра. Синтез и свойства СТЭ

Инфраструктура

В состав научно-экспериментального комплекса «Фабрика сверхтяжелых элементов» входят: циклотрон DC-280 (введен в строй в 2019 г.), 3 экспериментальных зала, 2 газонаполненных сепаратора сверхтяжелых ядер (один введен в строй, второй вводится). Идет разработка новых экспериментальных установок.

Научная программа

Развитие исследований в области синтеза и изучения свойств СТЭ в ОИЯИ связано с реализацией проекта специализированного ускорительного комплекса «Фабрика СТЭ» [1]. Комплекс «Фабрика СТЭ» не имеет мировых аналогов. Его создание открывает широкие возможности для будущих исследований на новом уровне и будет укреплять лидерство России и стран-участниц ОИЯИ в науке о СТЭ [2]. «Фабрика СТЭ» создана на базе ускорителя тяжелых ионов нового поколения — циклотрона DC-280 (рис. I.1.1) — с рекордными интенсивностями пучков редких

изотопов серы-36, кальция-48, титана-50 и более тяжелых ионов, необходимых для синтеза новых элементов. Новый газонаполненный сепаратор (ГНС-2 или DGFRS-2, рис. I.1.2) после успешно проведенных тестовых испытаний будет использоваться в экспериментах по синтезу 119-го и 120-го элементов, открывающих 8-й ряд таблицы Д. И. Менделеева. Его отличительными особенностями являются высокая трансмиссия ядер отдачи в фокальную плоскость детектора (порядка 60 %), а также чрезвычайно эффективное подавление фона, что, в частности, имеет ключевое значение для наблюдения редких событий распада изотопов сверхтяжелых элементов.



Рис. I.1.1. Комплекс «Фабрика СТЭ»: циклотрон DC-280

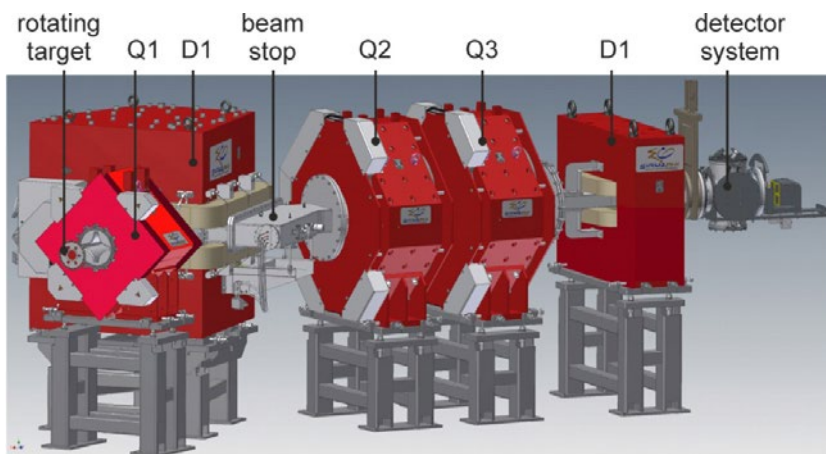


Рис. I.1.2. Основные узлы сепаратора ГНС-2 (DGFRS-2). Показаны вращающаяся мишень, квадрупольные и дипольные магниты (Q1, D1, Q2, Q3, D2), камера остановки пучка и камера детекторов

Программа экспериментов включает также изучение новых свойств изотопов уже синтезированных тяжелейших элементов с целью определения границ «острова стабильности» СТЭ и продвижения в область более нейтронно-избыточных нуклидов, где ожидается существенный рост их стабильности. Изучение характеристик продуктов деления СТЭ в перспективе позволит ответить на ряд ключевых вопросов синтеза элементов во Вселенной.

Прецизионные измерения масс сверхтяжелых нуклидов и продуктов их альфа-распада (всего более 50 ядер) с точностью около 0.05–0.1 МэВ (в 20 раз точнее теоретических предсказаний) послужат основой для получения реалистичных прогнозов границ существования ядерной материи и свойств еще более тяжелых ядер. Для проведения этих исследований создаются криогенная газовая ловушка и многоотражательный времяпролетный (MR-ToF) масс-спектрометр рекордного разрешения (разрабатывается совместно с ИАП РАН).

Будет продолжено развитие ядерной спектроскопии элементов с $Z > 100$, начатое в лаборатории в последние годы. Повышение интенсивности пучков ионов, создание новых экспериментальных установок и модернизация действующего оборудования нацелены прежде всего на повышение производства ядер СТЭ в 50–100 раз по сравнению с современным уровнем подобных исследований в других лабораториях мира.

Перспективные проекты

Изучение химических свойств СТЭ требует, в дополнение к быстродействующим сепараторам сверхтяжелых атомов, создания экспериментальной базы для исследований их электронной структуры, а также специального оборудования для постановки радиохимических экспресс-экспериментов. В течение ближайших 2–3 лет программа работ будет в основном нацелена на исследование влияния т. н. «релятивистского эффекта» на химическое поведение уже синтезированных элементов с $Z = 112–118$ в сравнении с их легкими гомологами.

Использование реакций многонуклонных передач в низкоэнергетических столкновениях актинидов дает перспективу синтеза нейтроноизбыточных изотопов тяжелых актинидов, а также трансактинидов, недоступных другими методами. Реализация этой программы потребует прежде всего получения высокоинтенсивных пучков урана. Для этого идет разработка источника на основе электрон-циклотронного резонанса (ЭЦР), работающего на частоте 28 ГГц. Кроме этого, стоит задача развития методики сепарации и идентификации ядер, образующихся в реакциях многонуклонного обмена.

1.1.б. Экзотические ядра вблизи границ стабильности

Предмет исследований и ситуация в мире

Получение пучков РИ в технологии *in-flight* состоит в фрагментации быстрого пучка первичных ионов на легкой мишени и отборе продуктов фрагментации специфическим спектрометром — фрагмент-сепаратором (ФС). На сегодня этот метод является наиболее *универсальным* подходом

к производству РИ. В этой парадигме работают крупнейшие «фабрики РИ» в мире: GSI (Дармштадт, Германия), GANIL (Кан, Франция), MSU (Ист-Лэнсинг, США) и ряд менее масштабных центров в Китае, Италии, Бразилии и т. д.

Инфраструктура

Ускоритель U-400M (идет модернизация в 2020–2022 гг.), фрагмент-сепараторы ACCULINNA и ACCULINNA-2 (введен в строй в 2018 г.).

Научная программа

Программа исследования легких экзотических ядер, получаемых методом фрагментации, началась в 1996 г. на фрагмент-сепараторе ACCULINNA при ускорителе тяжелых ионов U-400M (см. рис. I.1.3). Эта программа была ограничена узким диапазоном доступных первичных пучков (ионы легче, чем сера, аргон) и слабостью фрагмент-сепаратора (аксептанс, степень очистки и т. д.). Однако ACCULINNA стабильно выдавала результаты мирового класса в 1996–2016 гг. [3] за счет следующих ключевых факторов: а) наличия высокоинтенсивных (до 4 рнА) первичных пучков ионов на циклотроне U-400M; б) использования новых методов анализа корреляционных данных; в) создания комплекса криогенной тритиевой мишени (совместная разработка с РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров; в мире эта технология недоступна для «гражданских» лабораторий).

В 2018 г. вступил в строй новый фрагмент-сепаратор ACCULINNA-2 [4], а в 2019–2021 гг. на нем были получены первые результаты мирового класса [5, 6]. По «производительности» ACCULINNA-2 превосходит ACCULINNA примерно в 15–30 раз, а улучшение степени очистки от примесей может достигать фактора 100. Характеристики ACCULINNA-2 сопоставимы или превосходят установки того же класса RIPS (RIKEN, Япония) и LISE (GANIL, Франция). Однако надо понимать, что последние функционируют уже более 25 лет. Подробная информация о комплексе ACCULINNA-2@U-400M и программа первых экспериментов с пучками РИ приведены в обзоре [4]. К преимуществам ACCULINNA-2 относительно мировых аналогов следует отнести: а) относительно низкий диапазон энергий РИ (от 5–7 МэВ/нуклон до 50 МэВ/нуклон); б) возможность работы в качестве физической мишени со всеми изотопами водорода (включая тритий) и гелия в широком диапазоне толщин (от 10^{19} до 10^{21} атом/см²), достигаемом за счет выбора фазового состояния вещества — газ или жидкость; в) возможность длительных экспозиций на комплексе ACCULINNA-2@U-400M (месяц и более).

Перспективные проекты

Синтез и исследование структуры ядер с большим избытком протонов или нейтронов в ЛЯР ОИЯИ до 2030 г. будут проводиться на вторичных пучках радиоактивных ионов, полученных в реакциях фрагментации ядер — стабильных изотопов с $Z < 36$, ускоренных на циклотроне U-400M до энергий 30–60 МэВ/нуклон. Производящая бериллиевая мишень способна принять мощность пучка до 4 кВт. В 2020–2022 гг. проводится модернизация ускорителя U-400M, нацеленная на увеличение стабильности работы, повышение энергий, интенсивностей и качества первичных пучков ионов.

Будет активно развиваться ряд «тяжелых» научных инструментов для использования на комплексе ACCULINNA-2@U-400M (см. рис. I.1.3).

Эта деятельность нацелена в том числе на развитие установки в парадигме «пользовательского центра» («user facility»): «гостевые» эксперименты используют привозное уникальное оборудование, но пучок радиоактивных ионов и услуги необходимых в данной работе «тяжелых» инструментов предоставляются гостям «под ключ». К этим проектам относятся такие работы:

а) Вводится в строй радиочастотный фильтр скоростей (так называемый «RF-kicker»), который радикально улучшит возможности работы с протонно-избыточными пучками за счет качества очистки от примесей.

б) Расширяется и совершенствуется массив нейтронных детекторов на основе кристаллов стибьена (в наличии 48 модулей, планируется 64).

в) Разрабатывается модульный массив позиционно-чувствительных ΔE - ΔE - E -телескопов заряженных частиц (в перспективе 10–16 модулей).

г) Разрабатывается годоскоп (регистрации заряженных частиц) для спектрометра нулевого угла.

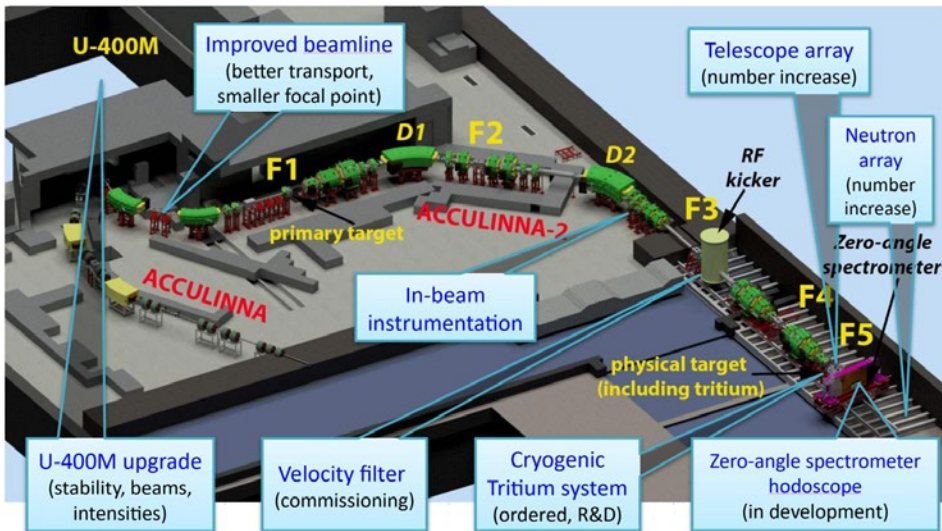


Рис. I.1.3. Фрагмент-сепараторы ACCULINNA и ACCULINNA-2 в зале ускорителя U-400M. Системы и установки, для которых запланировано изготовление/развитие/модернизация в 2020–2023 гг., см. текст

д) Ведутся разработки новых детектирующих систем для работы под высокой нагрузкой в пучковых линиях и внутри фрагмент-сепаратора (in-beam instrumentation). Сюда относятся сцинтилляционныеToF-детекторы, координатные газовые детекторы низкого давления — лавинные счетчики РРАС (в коллаборации с Университетом Тэджона, Республика Корея), радиационно-стойкие кремниевые детекторы (в коллаборации с ФТИ, Санкт-Петербург).

е) Наиболее сложной и дорогостоящей разработкой является создание нового комплекса тритиевой мишени, удовлетворяющего современным требованиям безопасности. Комплекс газовакуумного оборудования с системой тритиевого наполнения в помещениях 2-го радиационного класса

планируется запустить в период 2020–2022 гг. Эта уникальная возможность (сегодня единственная в мире) откроет широкий класс исследований экзотических ядер, таких как ${}^5\text{-}7\text{H}$, ${}^8\text{-}10\text{He}$, ${}^{11\text{-}13}\text{Li}$, ${}^{14\text{-}16}\text{Be}$, ${}^{19\text{-}21}\text{C}$, ${}^{24\text{-}26}\text{O}$ и др., образующихся в прямых ядерных реакциях (t, α), (t, p) и (t, d).

1.1.в. Ядерные реакции на пучках стабильных и радиоактивных ионов

Инфраструктура

Реакции на пучках стабильных ионов: ускоритель U-400 реконструируется в U-400R (реконструкция подготовлена), новый экспериментальный зал + новый экспериментальный корпус (ведутся проектные работы) + 2 кинематических сепаратора продуктов реакций (ведется НИР).

Реакции на постускоренных пучках радиоактивных ионов: проект DRIBs-3 (Dubna Radioactive Ion Beams). Для исследований на пучках радиоактивных ядер с высоким разрешением используется связь двух циклотронов в тандеме: U-400M (производитель) + U-400R (постускоритель).

Научная программа

Исследования взаимодействий сложных ядер являются традиционной и актуальной частью научной программы Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Исследования в этой области привели в свое время к открытию реакций многонуклонных передач, холодного слияния массивных ядер, процесса квазиделения тяжелых ядер и его роли в слиянии сложных ядер. Коллективные процессы, протекающие вблизи кулоновского барьера с участием нескольких сотен нуклонов, исследовались одновременно с реакциями квазиупругих и глубоко неупругих передач, включая последнюю стадию — деления тяжелых и сверхтяжелых ядер. Этот подход дал представление о сложной картине коллективного движения в зависимости от структуры сталкивающихся ядер, которая в дальнейшем получила описание в динамических расчетах теории Хартри — Фока — Боголюбова. Теперь, после синтеза сверхтяжелых элементов в реакциях слияния с ${}^{48}\text{Ca}$, эксперименты будут продолжены для предельно тяжелых систем, типа ${}^{238}\text{U} + {}^{238}\text{U}$ или ${}^{248}\text{Cm} + {}^{238}\text{U}$, перспективных для синтеза нейтронно-избыточных изотопов с $Z \leq 108$.

Перспективные проекты

Развитие этого направления до 2030 г. будет связано с созданием нового сверхпроводящего ЭЦР-28 ГГц источника ионов и модернизацией U-400 → U-400R. По плану на циклотроне U-400R могут быть получены интенсивные пучки всех ионов от ${}^4\text{He}$ до ${}^{238}\text{U}$ с плавно варьлируемой энергией от 0.6 до 25 МэВ/нуклон с достаточно высоким энергетическим разрешением (~ 0.3 %). В реакциях слияния с ядрами высокой энергии (например, ${}^{48}\text{Ca}$ с энергией 1.2 ГэВ) открывается возможность исследования образования и распада сильно нагретых ядер, температура которых сравнима и даже выше энергии связи нуклонов. Этот же пучок низкой энергии вблизи кулоновского барьера реакции будет использован для спектроскопии ядер флоревия ($Z = 114$) и московия ($Z = 115$) на проектируемом кинематическом сепараторе SHELS.

Также планируется завершение проекта DRIBs-3 с вводом в действие тандема циклотронов U-400M + U-400R с целью получения радиоактивных

пучков с высоким разрешением и плавной вариацией энергии. Дальнейшее развитие комплекса DRIBs-3 путем модернизации обоих ускорителей и создание нового экспериментального корпуса значительно расширят возможности исследований экзотических ядер и реакций с ними. Проект DRIBs-3 позволит на установках, расположенных в новом экспериментальном корпусе, проводить измерения на монохроматических пучках радиоактивных ядер для всестороннего исследования структуры изотопов вблизи и за границами существования ядер. В этом направлении также могут работать существующие и перспективные спектрометры MABP, CORSET, GALS, STAR.

1.1.2. Прикладные задачи на пучках тяжелых ионов

Наряду с фундаментальными исследованиями в ЛЯР ОИЯИ на протяжении долгого времени существует и имеет план перспективного развития до 2030 г. программа прикладных работ для внедрения результатов в физике тяжелых ионов в смежные области науки и техники.

Новые материалы (трековые мембраны)

Создание прецизионных мембранных структур (методом облучения полимеров тяжелыми ионами и последующим травлением) и изготовление опытных партий до 50000 м²/год. Их использование особенно важно в бактериологии, вирусологии и медицине, а также в инновационных технологиях и в создании композиционных материалов.

Ускорительные технологии

Создание специализированных ускорителей и плазменных источников ионов для исследований в области физики твердого тела и радиационного материаловедения, включая создание наноразмерных структур, и ряда практических задач, связанных с моделированием нейтронного облучения и облучения осколками деления. К настоящему времени созданы 4 ускорительные установки циклотронного типа для целевого использования и 3 плазменных ЭЦР-источника многозарядных ионов.

Испытания электронных модулей на радиационную стойкость

Производятся для обеспечения длительной работоспособности космической техники в условиях воздействия ионизирующих излучений космического пространства при создании космических систем и комплексов с длительными сроками их активного орбитального существования. В связи с ростом потребностей в использовании пучков тяжелых ионов в ближайшие годы планируется ввести в эксплуатацию новый циклотрон ДЦ-140, разрабатываемый в ЛЯР ОИЯИ, включающий в свой состав также необходимый набор для проведения физических экспериментов по каждому из направлений.

Ссылки

[1] Г.Г. Гульбекян и др. *Запуск циклотрона ДЦ-280 — базовой установки фабрики сверхтяжелых элементов ЛЯР ОИЯИ*. Письма в ЭЧАЯ. **16**, 653–665 (2019).

[2] Yu. Ts. Oganessian, S.N. Dmitriev, V.K. Utyonkov. *Project of Priority Experiments at SHE Factory*. Proceedings of the International Symposium on Exotic Nuclei “EXON-2018”, Petrozavodsk, Russia, 10–15 September 2018. P. 431–436. Editors Yu. E. Penionzhkevich and Yu. G. Sobolev. World Scientific, Singapore, 2020.

[3] Л. В. Григоренко и др. *Исследования легких экзотических ядер вблизи границы стабильности в ЛЯР ОИЯИ*. УФН. **186**, 337–386 (2016) [L. V. Grigorenko et al., *Phys. Usp.* **59** 321–366 (2016)].

[4] A. S. Fomichev et al. *The ACCULINNA-2 project: The physics case and technical challenges*. *Eur. Phys. J. A* **54**, 97 (2018).

[5] A. A. Bezbakh et al. *Evidence for the first excited state of ${}^7\text{H}$* . *Phys. Rev. Lett.* **124**, 022502 (2020).

[6] I. A. Muzalevskii et al. *Resonant states in ${}^7\text{H}$. Experimental studies of the ${}^3\text{H}$ (${}^8\text{He}$, ${}^3\text{He}$) reaction*. *Phys. Rev. C* **103**, 044313 (2021).

1.2. ISOL-установка ИРИНА в НИЦ «КИ» — ПИЯФ

Предмет исследований и ситуация в мире

Исследование протонно-избыточных и нейтронно-избыточных ядер вблизи границы протонной и нейтронной стабильности с использованием метода ISOL (Isotope Separator On-Line) является одним из важнейших направлений развития физики радиоактивных изотопов. Этот метод особенно эффективен для относительно долгоживущих изотопов ($T_{1/2} > 30$ мс). Кроме того, радиоактивные изотопы, получаемые данным методом, широко используются в исследованиях по физике твердого тела, в ядерной медицине для диагностики и лечения различных заболеваний и в молекулярно-биологических приложениях.

В настоящее время лидирующие ISOL-комплексы ISOLDE (CERN), TRIUMF (Ванкувер, Канада), IGISOL-комплекс в университете Юваскюлы (Финляндия) интенсивно совершенствуют свой научный инструментарий. В ряде научных центров ведется интенсивная работа по проектированию и строительству относительно скромных ISOL-установок для локального развития программ физики радиоактивных изотопов: INFN (Леньяро, Италия), ITEMBA Labs (Стелленбош, ЮАР), RAON (Тэджон, Республика Корея) и т. д. Нужно отметить, что лучшие функционирующие ISOL-системы уже практически исчерпали свои возможности по продвижению в сторону изучения ядер, более удаленных от «долины стабильности». Развитие «рекордного» ISOL-комплекса SPIRAL2 (GANIL, Франция) было прекращено, комплекс перепрофилирован («постфукусимский синдром», ужесточение законодательства по радиационной безопасности). В этой ситуации ISOL-комплекс ИРИНА, планируемый к созданию на пучке реактора ПИК в НИЦ «КИ» — ПИЯФ, имеет перспективу занять уникальное положение в мире.

Действующие программы

В настоящее время на базе синхроциклотрона СЦ-1000 в НИЦ «КИ» — ПИЯФ действует ISOL-установка ИРИС (Исследование Радиоактивных Изотопов на Синхроциклотроне), использующая протонный пучок синхроциклотрона. На установке ИРИС в течение 45 лет ее непрерывной работы проводятся исследования протонно- и нейтронно-избыточных ядер, удаленных от полосы β -стабильности. За это время исследовано более 300 ядер, причем 17 из них были получены и исследованы впервые.

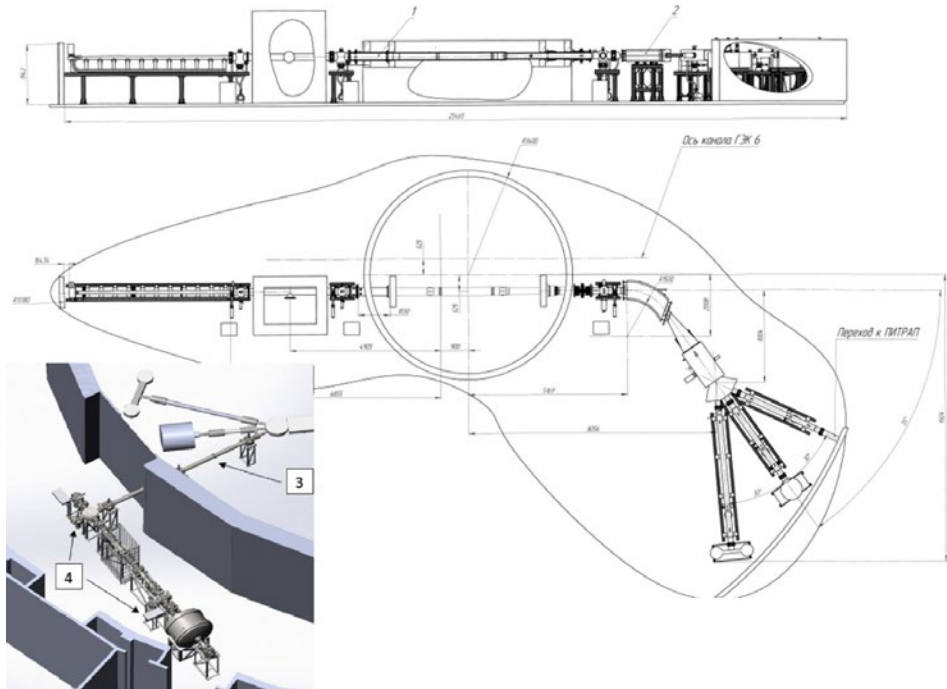


Рис. I.2.1. Общий вид комплекса ИРИНА в экспериментальном зале реактора ПИК. В центральной части рисунка условно показан реактор. В левой части показаны горячая камера и система автоматического передвижения мишенного устройства. В правой части изображен масс-сепаратор с тремя ионными трактами и приемными станциями. Левый по ходу ионных пучков ионный тракт (3) соединяется с установкой ПИТРАП (4), располагающейся в круговой галерее. Установка для резонансной лазерной ионизации получаемых радионуклидов и проведения их лазерно-спектроскопических исследований располагается в специальном помещении за круговой галереей. Лазерные лучи вводятся в мишенно-ионное устройство через кварцевое окно в дисперсионной камере магнита масс-сепаратора

Особенности перспективной установки

Для получения интенсивных потоков экзотических нейтронно-избыточных ядер в НИЦ «КИ» — ПИЯФ реализуется проект ИРИНА (Исследование Радиоактивных Изотопов на НейтронАх) на пучке тепловых нейтронов реактора ПИК. Схема расположения установки ИРИНА в экспериментальном зале реактора представлена на рис. I.2.1. Мишенно-ионное устройство размещается в одном из каналов реактора ПИК с интенсивностью 3×10^{13} н/см²сек на мишени. Термостойкая мишень из карбида урана содержит 4 г ²³⁵U (на начальном этапе эксплуатации масса уменьшена до 2 г). В мишени происходит до 10^{14} делений в секунду, индуцированных нейтронами, в результате чего она разогревается до температуры более 2000 °С. Высокая температура обеспечивает эффективную диффузию осколков деления в вакуумный объем мишенно-ионного устройства, где происходит высокоселективная лазерная ионизация атомов искомого элемента. Вытягивающая-фокусирующая электростатическая система направляет сформированный ионный пучок в анализирующий магнит масс-сепаратора,

где происходит разделение по массам, а затем выделение и вывод выбранного для исследования изотопа.

Для эффективного исследования ядер, лежащих близко к границе нейтронной стабильности, также решающим является обеспечение изобарной чистоты пучков, т. е. селективной ионизации изотопов одного выделенного элемента. Обеспечить селективную ионизацию изотопов большого числа элементов может только метод лазерной резонансной ионизации, разработанный и с успехом применяющийся на установке ИРИС, а теперь и в других ISOL-лабораториях. Данный метод позволяет селективно ионизовать атомы получаемых на ISOL-установках радиоактивных изотопов в очень широкой области элементов, а также с достаточно высокой точностью измерять изотопические сдвиги и сверхтонкое расщепление атомных уровней получаемых РИ. Эффективность лазерной резонансной ионизации для многих элементов составляет величину 10–15 %. Имеется возможность получать изобарически чистые изотопные пучки Cu, Ni, Ag, Sn, Mg, Ga, Mn, Fr, Tl и многих других элементов и одновременно измерять их изотопические сдвиги и сверхтонкое расщепление.

Плановая интенсивность 10^{14} делений в секунду на установке ИРИНА позволяет получать выходы нейтронно-избыточных ядер, многократно превышающие выходы этих же ядер на других установках. Например, выход «маркерного» изотопа ^{132}Sn (дважды магическое ядро, значительно удаленное от долины β -стабильности) на пучке нейтронов реактора ПИК с интенсивностью 3×10^{13} н/см²сек из мишени ^{235}U массой 4 г составит около 10^{11} ядер в секунду. На действующих установках ИРИС и ISOLDE данный выход равен соответственно 10^7 и 10^8 частиц в секунду. Максимальный расчетный выход этого изотопа на ISOL-установке следующего поколения SPIRAL-2 (GANIL, Франция) не превысил бы 10^9 изотопов в секунду. При этом следует иметь в виду, что при использовании массивной мишени (до 2 килограммов ^{238}U на SPIRAL-2) возникали бы большие трудности при выводе из нее короткоживущих изотопов, связанные со значительным ухудшением диффузионно-эффузионных свойств мишени большой массы и объема.

Научная программа

По полученным оценкам (см. примеры на рис. 1.2.2), выходы других нейтронно-избыточных изотопов на реакторе ПИК будут значительно выше, чем, например, на установке ISOLDE (ЦЕРН) — наиболее успешной функционирующей в настоящее время ISOL-установке.

На ISOLDE исследования зарядовых радиусов цепочки изотопов меди доведены до $A = 78$ ($N = 49$). Показано, что четно-нечетный эффект в радиусах исчезает при $N > 45$, и описание этого эффекта является критическим тестом для ядерных теорий. Как видно из оценок выходов для комплекса ИРИНА, можно продвинуться дальше (по крайней мере, до $^{80,81}\text{Cu}$), что имеет принципиальное значение, так как, помимо четно-нечетного эффекта, мы сможем изучить и оболочечный эффект (при $N = 50$, $A = 79$).

Дважды магическое ядро ^{78}Ni — один из наиболее востребованных объектов исследования в ядерной физике последнего десятилетия. Особая ценность данных для этого экзотического ядра определяется его дважды магичностью и чрезвычайно большим нейтронным избытком. Рекордные выходы

^{78}Ni , ожидаемые на реакторе ПИК, позволят детально изучить свойства этого ядра и соседних с ним ядер.

Большое значение для теории имеет продолжение исследований нейтронно-избыточных ядер олова, в частности — проверки предсказаний, касающихся четно-нечетного и оболочечного эффектов, где исследования заканчиваются на $A = 134$; на установке ИРИНА предполагается продвинуться до $A = 138$ – 139 . Значительный интерес представляют также исследования изотопических цепочек Cd, In, Ga и др. Недавние эксперименты, выполненные на ISOLDE, вызвали большой интерес. На комплексе ИРИНА@ПИК планируется продвинуться дальше в нейтронно-избыточную область.

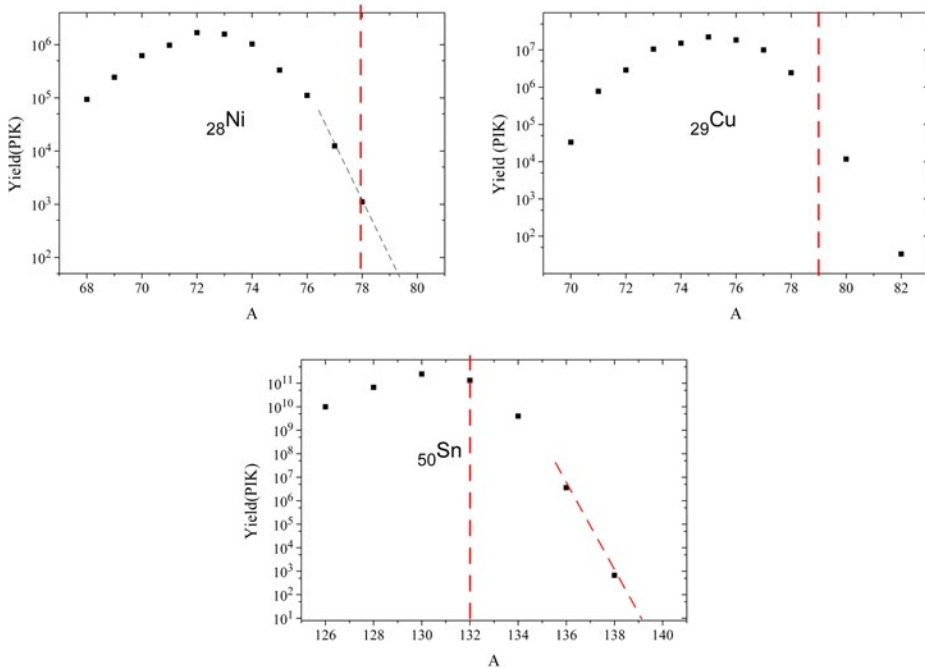


Рис. 1.2.2. Оценки выходов некоторых особенно интересных для исследования изобар на установке ИРИНА

Перспективные научные инструменты: спектрометр-ловушка Пеннинга

Масс-спектрометрический комплекс ПИТРАП предназначен для прецизионного (несколько кэВ) измерения масс большого массива ядер, удаленных от долины β -стабильности в нейтронно-избыточную область. Ожидается, что высокие выходы нейтронно-избыточных ядер обеспечат возможность измерений масс в крайне удаленной от стабильности области карты нуклидов, что позволит получать уникальную информацию по физике ядра и ядерной астрофизике (так, массы соответствующих нейтронно-избыточных нуклидов являются ключевой характеристикой, определяющей ход астрофизического r -процесса). На ПИТРАП могут быть измерены, например, массы нуклидов в начальной и серединной областях r -процесса

при $N = 50, 82$. Ловушку ПИТРАП также можно использовать в автономном режиме («offline») для прецизионных измерений масс долгоживущих нуклидов, наработанных на базовых установках, в целях нейтринной физики.

Перспективные научные инструменты: лазерные методы

Лазерные методы, помимо использования их для получения изобарно чистых ионных пучков, используемых далее для ядерной спектроскопии, применяются также для измерения изотопических сдвигов и сверхтонкого расщепления атомных уровней. Эти измерения позволяют получить такие характеристики ядер, как величины среднеквадратичных радиусов, спины и электромагнитные моменты. Одним из наиболее интересных объектов для лазерно-ядерных исследований является так называемый «оболочечный эффект» в среднеквадратичных зарядовых радиусах — скачки в скорости изотопического изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов при пересечении оболочки (магического числа нейтронов). Систематические исследования изотопических изменений зарядовых радиусов могут быть использованы для определения общих тенденций изменения основных свойств ядерной материи и сравнения их с предсказаниями современных ядерных моделей. Характерные объекты исследования на установке ИРИНА — это Sb, Sn, In, Cd, Ag с числом нейтронов, близким к магическому числу $N = 82$, и Ge, Ga, Zn, Cu и Ni в окрестности оболочки с магическим числом нейтронов $N = 50$.

Производство сверхчистых изотопов для ядерной медицины

На установке ИРИНА также предполагается создание ионного тракта для получения интенсивных изотопных источников высокой чистоты для целей ядерной медицины и, кроме того, использование пучков радиоактивных ионов в экспериментах по физике твердого тела. Подобные эксперименты, в том числе по получению радиоизотопов высокой чистоты для использования в ядерной медицине, уже в течение довольно долгого времени проводятся на установке ISOLDE (ЦЕРН, программа MEDICIS — Medical Isotopes Collected from ISOLDE). Однако, по причине невысокой активности получаемых образцов, они могут использоваться только для проведения предварительных исследований на мелких животных. Для того чтобы обеспечить возможность клинических испытаний, а затем и терапевтическое использование в соответствующих клиниках, необходимо получение целевых радионуклидов на уровне нескольких кюри. На комплексе ИРИНА радиоизотопные источники высокой чистоты и «терапевтической» активности (для изотопов ^{89}Sr , ^{90}Y , ^{131}I и др.) могут производиться и накапливаться либо на приемнике-коллекторе в коллекторной камере масс-сепаратора, либо радиоизотопный ионный пучок может выводиться по соответствующему ионному тракту в специальное приемное устройство. Получение радионуклидов является пилотным проектом, при успешном осуществлении которого может быть выдвинуто предложение по созданию специальной установки с использованием масс-сепаратора на пучке сильнопоточного реактора исключительно для производства радионуклидов высокой изотопной чистоты для нужд ядерной медицины. Это может открыть для медицинского использования очень широкие области новых радионуклидов, которые не могли быть использованы ранее из-за большого изотопического загрязнения.

1.3. Сотрудничество в рамках коллаборации NUSTAR проекта FAIR (GSI, Германия)

В настоящее время в Германии сооружается уникальный ускорительный комплекс Европейского исследовательского центра ионов и антипротонов FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, https://www.gsi.de/en/about_us). Создание его ведется на базе центра тяжелоионных исследований GSI под г. Дармштадтом. Начальная стоимость «стартовой версии» этого международного мегапроекта составляет 1023 млн евро в ценах 2005 г. Обсуждается вопрос увеличения стоимости за счет стран-участниц. Экспериментальные исследования на новых ускорителях ионов и антипротонов планируется начать с 2026 г.

Россия совместно с рядом других стран подписала Конвенцию FAIR, в соответствии с которой она является стратегическим партнером Германии в создании FAIR. Вклад России в начальную стоимость FAIR составляет 178.05 млн евро в ценах 2005 г., что составляет 17.4 % от полного бюджета начальной стоимости стартовой версии FAIR. Эти средства поступают на счет управляющей компании FAIR из бюджета РФ через Государственную корпорацию «Росатом».

Научная программа FAIR весьма обширна и представлена четырьмя крупнейшими коллаборациями, или, как их еще называют, «столпами» («pillars»):

- Структура ядра и ядерная астрофизика — **NUSTAR** (NUclear STructure, Astrophysics, and Reactions) — участвуют ~ 800 исследователей, из них 43 (5 %) из России, в основном из ОИЯИ, НИЦ «КИ» и НИЦ «КИ» — ПИЯФ.
- Плотная барионная материя — **CBM** (Compressed Baryonic Matter) — участвуют ~ 500 исследователей, 76 (27 %) из Российской Федерации.
- Антипротонная программа — **PANDA** (antiProton ANnihilation at DArmstadt) — участвуют ~ 550 исследователей, из них 84 (27 %) из Российской Федерации.
- Физика сверхплотной плазмы, атомная физика, а также прикладные исследования по материаловедению и биологии — **APPA** (Atomic, Plasma Physics and Applications) — участвуют ~ 600 исследователей, из них 85 (25 %) из России.

Коллаборация NUSTAR в структуре FAIR занимается фундаментальной ядерной физикой (преимущественно низких энергий) и является крупнейшей из научных коллабораций. Российская сторона представлена очень слабо, во многих случаях условно. Финансирование именно научных работ по тематике NUSTAR в структуре расходов российской стороны имеет «следовой характер» (на настоящий момент выделено ~ 1.5 млн евро, см. ниже). Если ситуация не изменится, то, при огромных вложениях в проект FAIR в целом со стороны российского государства, российская ядерно-физическая наука будет не способна извлекать пользу из участия в этом проекте. Ситуация эта тем более парадоксальна, что именно установки NUSTAR будут первыми вводиться в строй. В то же время амбициозный проект CBM@FAIR практически провален (поскольку строительство его базовой установки — ускорителя SIS-300 — в принципе не рассматривается и все детектирующие системы адаптируются под энергии SIS-100). Между тем в РФ успешно

строится научный аналог СВМ — коллайдер NICA. Проект PANDA имеет ряд компонент, которые будут введены в строй очень не скоро; кроме того, часть научной программы PANDA может быть реализована в CERN, J-PARC, BNL и HIAF. Таким образом, очень значительные инвестиции РФ в проекты СВМ и PANDA в действительности омертвляются, а существенно меньшие финансы по проектам NuSTAR, составляющие ~ 10% от общих вложений, выделяются по остаточному принципу, хотя они могут начать приносить «научные дивиденды» уже в ближайшее время. Ниже рассматривается статус работ, выполняемых российскими организациями по программам NUSTAR.

Статус работ по системе питания для нейтронного детектора NeuLAND@R3B

Руководитель: В. Л. Головцов, НИЦ «КИ» — ПИЯФ.

NeuLAND (New Large Area Neutron Detector) будет нейтронным детектором следующего поколения с высокой эффективностью регистрации нейтронов, высоким разрешением, в том числе для множественных срабатываний (регистрация до 4 нейтронов из одного события). Это будет достигнуто за счет применения высокосегментированных пластиковых сцинтилляторов и отсутствия нечувствительного материала нейтронного конвертера. Детектор состоит из 3000 отдельных модулей размером $5 \times 5 \times 250$ см³, объединенных в 30 двоянных плоскостей по 100 модулей каждая, и имеет полную глубину 3 м. В 2014 г. между НИЦ «КИ» — ПИЯФ и FAIR был заключен контракт на сумму 415 тыс. евро (в ценах 2005 г., 570 тыс. евро на настоящий момент) на изготовление в НИЦ «КИ» — ПИЯФ высоковольтной системы питания ФЭУ детектора NeuLAND (6000 каналов). В 2017 г. была создана и сдана в эксплуатацию высоковольтная система на 3000 каналов. Все работы по контракту выполнены в 2021 г.

Статус работ по спектрометру PAS@R3B

Руководитель: А. Г. Крившич, НИЦ «КИ» — ПИЯФ.

Протонный спектрометр PAS (Proton Arm Spectrometer) на базе дрейфовых трубок (straw tubes) размещается позади магнита GLAD внутри вакуумной камеры и предназначен для определения импульсов протонов с энергией в диапазоне $E_p = 500\text{--}700$ МэВ. Протонный спектрометр будет состоять из четырех слоев дрейфовых трубок, каждый из которых предназначен для определения координат X1, Y1, X2, Y2, соответственно. Каждая координата измеряется с помощью трех рядов дрейфовых трубок, сдвинутых друг относительно друга на половину диаметра. Трубки имеют диаметр 1 см. Всего — 2000 каналов. TDR протонного спектрометра PAS был одобрен в июле 2015 г. Подготовлен контракт между НИЦ «КИ» — ПИЯФ и FAIR на сумму в 476 тыс. евро (в ценах 2005 г.) на изготовление PAS в НИЦ «КИ» — ПИЯФ.

Статус работ по АСТАФ1@R3B и АСТАФ2@R3B

Руководитель: Е. М. Маев, НИЦ «КИ» — ПИЯФ.

НИЦ «КИ» — ПИЯФ предлагает изготовить две активные мишени: АСТАФ1 (Active Target for FAIR) — наполненную водородом ионизационную камеру высокого давления для исследования в инверсной кинематике упругого рассеяния протонов на экзотических ядрах; и АСТАФ2 — ионизационную камеру, наполненную гелием (с добавкой водорода) для изучения в инверсной кинематике неупругого рассеяния альфа-частиц на изучаемых

ядрах. АСТАФ2 может помещаться в гамма-спектрометре CALIFA, и рассеянные альфа частицы могут регистрироваться на совпадение с испускаемыми продуктами реакций гамма-лучами, которые детектируются спектрометром CALIFA. TDR по активным мишеням АСТАФ1 и АСТАФ2 был утвержден советом FAIR в декабре 2017 г. Изготовлен и успешно испытан прототип мишени АСТАФ2. Готовится контракт между НИЦ «КИ» — ПИЯФ и FAIR на 174.7 тыс. евро (в ценах 2005 г.) для создания активной мишени АСТАФ2.

Статус работ по CALIFA@R3B

Руководитель: А. С. Фомичев, ОИЯИ.

В проекте CALIFA (CALorimeter for In Flight detection of γ -rays and light charged pArticles) российская сторона (ОИЯИ) ответственна за создание части сцинтилляционного спектрометра iPhos. Стоимость in-kind вклада РФ — 300 тыс. евро в ценах 2005 г., в 2018 г. был подписан соответствующий контракт. На декабрь 2021 г. контракт выполнен на 90 %, работы ведутся согласно план-графика и завершатся в 2022 г.

Статус работ по EXPERT@SuperFRS

Руководитель: А. С. Фомичев, ОИЯИ.

Уникальность проекта EXPERT (EXotic Particle Emission and Radioactivity by Tracking) состоит в том, что его идея, научная программа и повестка исследований были полностью сформулированы российскими учеными. Научной задачей установки является открытие новых изотопов и измерение их масс, изучение свойств экзотических ядер вблизи границ стабильности и за их пределами, исследование структуры экзотических ядер, изучение экзотических распадов с испусканием частиц (например, $2p$ -радиоактивности) и поиск неизвестных видов распадов (например, $2n$, $4n$, $4p$ и др.), см. рис. I.3.1.

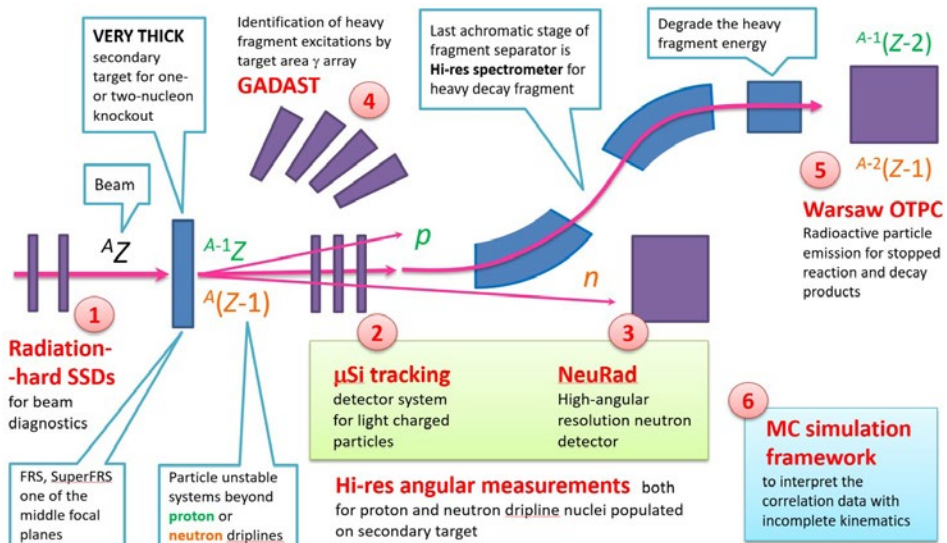


Рис. I.3.1. Логическая схема расположения приборов комплекса EXPERT на пучковой линии внутри фрагмент-сепаратора SuperFRS (FRS до ввода в строй SuperFRS). До ввода в строй SuperFRS оборудование EXPERT размещается в промежуточной фокальной плоскости FRS

В проекте EXPERT участие российских институтов является доминирующим и составляет более 60 % (более 20 российских участников из 8 институтов). Стоимость натурального вклада ~ 2 млн евро в ценах 2005 г. Подписание контракта зависит от решения о перераспределении взноса РФ в пользу экспериментов (53.5 млн евро вместо 24.3 млн евро). Проект частично (~ 40 %) реализован за счет финансирования из грантов BMBF (Германия), Республики Чехия, бюджета ОИЯИ. Именно на этот подпроект коллаборации NUSTAR@FAIR возлагаются надежды на получение новых научных открытий в экспериментах первого дня на фрагмент-сепараторе SuperFRS.

Проблемы

По коллаборации NUSTAR (ядерная физика низких энергий) финансирование перспективной *экспериментальной* программы носит «следовой характер» (финансируются вложения в *инфраструктуру*). Такая ситуация делает участие в проекте FAIR малоэффективным с точки зрения ядерно-физического научного сообщества.

Другая важная проблема, которая требует политического урегулирования, — это дефицит пучкового времени в GSI в период до 2026 года, которое требуется для проверки работоспособности подсистем и проведения тестовых измерений (включая научные исследования в рамках программы «day one experiments», хотя это относится ко всем подпроектам FAIR). Такая ситуация является совершенно неудовлетворительной, учитывая доминирующий вклад РФ среди зарубежных стран — участниц проекта FAIR.

1.4. Фундаментальные исследования в РФЯЦ-ВНИИЭФ

Отличительная особенность ядерно-физических исследований во ВНИИЭФ состоит в том, что любые исследования уже по их назначению можно отнести к классу фундаментальных, так как их результаты прямо или опосредствованно используются в решении мегазадачи по изучению как ядерного взрыва в целом, так и протекания отдельных процессов в нем. При решении этой мегазадачи формируются новые потребности в ядерных данных. Следует отметить, что повестка исследований реакций при столкновении стабильных ядер, оказывается, далеко не исчерпана, когда речь идет о высокоточных и высокодетализованных данных. За последние годы во ВНИИЭФ были выполнены масштабные измерения сечений каналов реакций при взаимодействии протонов, дейтронов, тритонов с ядрами ${}^6\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{11}\text{B}$, и при этом многие важные данные были получены впервые [1].

1.4.а. Создание систематики глобальных оптических потенциалов при взаимодействии нейтронов, протонов, дейтронов, гелия-3 и гелия-4 с легчайшими ядрами (от лития до кислорода) в диапазоне энергий от астрофизических до 200 МэВ

Отправной точкой всех современных вычислений ядерно-физических констант и теоретических исследований ядерных реакций является

оптическая модель упругого рассеяния. Однако до сих пор отсутствуют надежные феноменологические оптические потенциалы взаимодействия перечисленных частиц с легчайшими ядрами, что связано с проблемой правильного учета в экспериментальных данных упругого рассеяния различных процессов, не отличимых от чисто упругого рассеяния.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ на основе высокоточных методов решения уравнения Шредингера создан оптико-модельный программный код OptModel (номер гос. регистрации 2014619860) с феноменологическим потенциалом Вудса — Саксона [2]. При дальнейшем развитии в формуле потенциала было учтено резонансное рассеяние для мишеней с любым спином: в оптикомодельную амплитуду рассеяния были добавлены полюсные резонансные члены. Одновременно описываются все существующие экспериментальные данные в энергетическом диапазоне от астрофизических энергий до 200 МэВ: дифференциальные сечения, векторная поляризация, полные сечения, и в результате их описания формируются энергетические зависимости параметров оптического потенциала, находятся параметры предполагаемых резонансов. На сегодня нам неизвестно существование подобного кода в мире.

Перспективы развития

Для анализа по этой модели проводится поиск, анализ и отбор экспериментальных данных, а при необходимости выполняются экспериментальные исследования на тандемном ускорителе протонов, дейтронов и тритонов ЭПП-10, действующем в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Результатом работ по этой теме будет:

а) получение энергетической зависимости оптических потенциалов, изучение их закономерностей в поведении;

б) получение энергетической зависимости средних (оптических) полных сечений реакций и полных сечений с учетом резонансов.

Выполнение программы исследований займет несколько лет.

1.4.б. Экспериментальное и теоретическое исследования гамов-теллеровского резонанса в составном ядре, возбуждаемом в реакции $^{117}\text{Sn}(p, nx)$; поиск подобных механизмов возбуждения гамов-теллеровского резонанса в других ядрах

Гамов-теллеровский резонанс (ГТР) 1^+ впервые обнаружен в 70-е годы прошлого века в прямой реакции перезарядки на среднетяжелых сферических ядрах в спектре нейтронов под малыми углами вылета, то есть он наблюдался как возбуждение в остаточном ядре. И далее во всех экспериментах использовался и используется этот механизм возбуждения ГТР, кроме одного [3], выполненного в 1984 г. в Сарове группой Б. Я. Гужовского, где ГТР наблюдался в составном ядре в реакции $^{117}\text{Sn}(p, xn)$ в расщепленном виде на два компонента. С тех пор теоретически объяснить этот феномен не удается. В 2016 г. в Сарове был поставлен новый эксперимент, в другой постановке, в отличие от первого. Его результаты в целом подтверждают данные Гужовского, однако тема требует дальнейшей проработки. В перспективе видятся дальнейшие эксперименты по этой теме.

1.4.в. Исследование статистических флуктуаций плотности нейтронов в надкритическом реакторе в отсутствие стороннего источника нейтронов

Предмет исследований и ситуация в мире

Процесс развития устойчивых цепочек деления в размножающих системах (РС) со слабым источником нейтронов (ИН) обусловлен статистическими флуктуациями плотности нейтронов, возникающими в ядерных реакциях внутри активной зоны (АЗ). С особой четкостью влияние флуктуаций плотности нейтронов проявляется в ядерных устройствах (ЯУ) с АЗ из обогащенного урана при отсутствии стороннего источника нейтронов. Импульс нейтронов в таких ЯУ при переводе их в надкритическое состояние развивается в среднем через секунды, а не через миллисекунды, как это следует из уравнений обычной кинетики. Время задержки генерации импульса от момента перевода ЯУ в надкритическое состояние зависит от количества фоновых нейтронов, а также от степени перехода через критическое состояние ЯУ.

Эксперименты по изучению развития устойчивых цепочек деления проводились на быстрых аperiodических импульсных реакторах (АИР) с АЗ из высокообогащенного изотопом ^{235}U металлического урана (БОУ): GODIVA-II (США), APRFR (США), CALIBAN (Франция), БИР-2М (Россия). Однако опубликованные экспериментальные данные обладают следующими недостатками:

- большая погрешность в экспериментальной плотности вероятности вследствие малой статистики импульсов;
- неполное описание характеристик исследуемых устройств;
- противоречие в экспериментальных данных среднего времени ожидания возникновения импульса.

Основная причина рассогласования экспериментальных данных представляется в отсутствии данных об изменении плотности потока нейтронов в АЗ при выводе реактора в стартовое положение, а также о влиянии нейтронов от стороннего ИН, убранного за биологическую защиту.

Инфраструктура

Новые экспериментальные данные планируется получать на имеющейся во ВНИИЭФ установке БР-1М. Все топливные элементы АЗ БР-1М изготовлены из сплава высокообогащенного урана (массовая доля изотопа ^{235}U в уране — 90 %) с молибденом (массовая доля в сплаве — 10 %). Реактор БР-1М может работать в статическом режиме, а также в режимах генерирования импульсов на запаздывающих и мгновенных нейтронах.

Инициирование импульса на мгновенных нейтронах осуществляется с помощью внешнего импульсного нейтронного генератора (ИНГ), пуск которого производится после ввода необходимой избыточной реактивности (выше состояния мгновенной критичности) с помощью импульсного блока активной зоны реактора. При отключении питания нейтронного генератора можно осуществить режим работы реактора, при котором исследуется развитие импульса при статистических флуктуациях плотности нейтронов, обусловленных процессами спонтанного деления и распадом ядер предшественников запаздывающих нейтронов.

Научная программа

В рамках работы будет исследоваться временная зависимость числа делений в АЗ БР-1М от реактивности АЗ. Для этого необходимо зарегистрировать изменение потока нейтронов утечки при различных положениях стороннего ИН и органов регулирования реактора. Поэтому работу предполагается выполнить в несколько этапов:

а) На первом этапе определяется число делений в АЗ БР-1М, находящейся в заглушенном состоянии, при различном положении стороннего ИН (ИН вблизи АЗ и за биологической защитой при удалении от АЗ). Эти экспериментальные данные позволят оценить долю делений в АЗ, вызванных нейтронами от стороннего источника.

б) На втором этапе производится регистрация изменения потока нейтронов утечки из подкритической АЗ БР-1М при различных положениях органов регулирования. Полученная экспериментальная информация позволит оценить величину плотности потока нейтронов в АЗ перед встраиванием импульсного блока, а также проверить расчет изменения количества ядер предшественников запаздывающих нейтронов в ЯУ с урановой АЗ при варьировании ее реактивности.

в) На третьем этапе проводится регистрация потока нейтронов утечки после встраивания импульсного блока в АЗ при отсутствии вблизи стороннего ИН и без включения импульсного нейтронного генератора. Исследования проводятся для трех состояний мгновенной надкритичности АЗ БР-1М.

Важным отличием данной работы от предыдущих является детальное прописывание флуктуации числа делений при изменении состояния критичности АЗ. Изменение числа делений в АЗ определяется посредством регистрации потока нейтронов утечки из реактора. Для этого будет разработан канал измерений нейтронов, позволяющий зарегистрировать изменение потока нейтронов утечки в широком диапазоне (от $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$, что соответствует интенсивности образования нейтронов за счет протекания различных ядерных реакций в заглушенном состоянии АЗ в отсутствие стороннего ИН, до $\sim 10^8 \text{ с}^{-1}$ — минимальный уровень интенсивности ИН, при котором справедливы детерминистические законы развития устойчивой цепочки деления). Канал измерений нейтронов должен включать в себя высокоэффективную систему детекторов и модуль регистрации нейтронного счета с частотой дискретизации, достаточной для детального описания развития устойчивой цепочки деления.

Перспективы проекта

Результаты исследований позволят проверить расчетное моделирование флуктуационных процессов при развитии устойчивой цепочки деления в ЯУ. В итоге появится возможность верифицировать методы расчета стохастической кинетики, используемые при моделировании работы ЯУ, в том числе для определения оценок аварийного энерговыделения.

Ссылки

[1] Выездное заседание секции ядерной физики ОФН РАН 26–27 июня 2018 года, РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров).

[2] Л.Н. Генералов, В.А. Жеребцов, С.М. Таова. *Высокоточный оптико-модельный программный код OptModel*. Изв. РАН. Сер. Физ. **80**, 328–335 (2016).

[3] Б.Я. Гужовский, Б.М. Дзюба, В.Н. Протопопов. *Наблюдение гигантского гамма-теллеровского резонанса в составном ядре ^{118}Sb* . Письма в ЖЭТФ. **40**, 487–493 (1984).

1.5. Экспериментальная ядерная физика в МГУ

1.5.а. Исследования в области физики фотоядерных реакций в НИИЯФ МГУ

В НИИЯФ МГУ активно проводятся исследования фотоядерных реакций. Необходимость таких исследований обусловлена, в первую очередь, такими фундаментальными задачами современной ядерной физики, как изучение структуры и свойств нейтронно-избыточных и протонно-избыточных ядер, исследование различных процессов звездного нуклеосинтеза, в том числе — механизмов образования «обойденных» ядер. На бетатроне НИИЯФ МГУ было открыто и исследовано новое явление — конфигурационное расщепление ГДР легких ядер. Для фундаментальных задач и прикладных целей в НИИЯФ МГУ создана научная школа по исследованиям и разработке в области ускорителей электронов на энергию ускоренного пучка до 100 МэВ. В частности, НИИЯФ МГУ обладает компетенцией в области разработки разрезных микротронов — компактных и экономичных ускорителей на энергию до 100 МэВ, компетенцией в области генерации ярких электронных пучков.

Научная программа

В современных исследованиях фотоядерных реакций используется существующая инфраструктура НИИЯФ МГУ: разрезные микротроны РТМ55 с энергией электронов 55 МэВ и РТМ70, созданные с использованием постоянных магнитов на основе редкоземельного магнитного материала, с энергией электронов до 70 МэВ; линейный ускоритель электронов с энергией 10 МэВ. Измеряются выходы и сечения многонуклонных реакций с вылетом до 7 нуклонов и реакции фотоделения. В центре данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ (участнике сети центров данных по ядерным реакциям МАГАТЭ) развиваются методы оценки результатов разных фотоядерных экспериментов, основанные на использовании объективных физических критериев достоверности данных.

Ведутся исследования фотовозбуждения ядер в области порога ($\gamma, 1n$) реакции. Данные о сечениях в области порога необходимы для изучения пикми-резонанса и g -процесса образования обойденных ядер в процессе звездного нуклеосинтеза. Эти исследования ведутся как на тормозных пучках электронных ускорителей в НИИЯФ МГУ, так и (в составе коллаборации) на пучках квазимоноэнергетических фотонов от обратного комптоновского рассеяния на установке NewSubaru (Япония).

На базе НИИЯФ МГУ, совместно с другими организациями России, разработан проект лазерно-электронного генератора интенсивного монохроматического рентгеновского излучения с перестраиваемой энергией,

сочетающий наиболее передовые технологии в области ускорителей заряженных частиц, лазеров и рентгеновской оптики. Совместно с кафедрой радиохимии химического факультета МГУ исследуются способы наработки медицинских радионуклидов в результате фотоядерных реакций, в том числе и реакции фотоделения. Достоинствами фотоядерных методов являются возможность использования компактных ускорителей электронов в непосредственной близости от медицинского центра и, в ряде случаев, простая химия разделения макроколичеств мишени и микроколичеств целевого нуклида. К настоящему времени выполнены исследования наработки на электронных ускорителях изотопов ^{47}Sc , ^{67}Cu , ^{166}Ho , ^{177}Lu , $^{198,199}\text{Au}$, разработана химия их выделения. Широкому внедрению этого метода получения медицинских изотопов может способствовать разработка новых ускорителей электронов с энергией около 30 МэВ и средним током пучка в единицы мА.

Перспективы

1. Создание компактного лазерно-электронного генератора интенсивного монохроматического рентгеновского излучения с энергией, перестраиваемой в диапазоне 15–50 кэВ, с яркостью, сопоставимой с показателями источников СИ 2–3-го поколений. Проработано несколько вариантов реализации лазерно-электронного генератора по техническим заданиям различных потенциальных потребителей. Наиболее универсальный, основанный на сочетании линейного ускорителя электронов на энергию 50 МэВ и накопительного кольца, обеспечивает следующие параметры рентгеновского излучения: энергия, регулируемая в диапазоне 20–40 кэВ, средняя интенсивность 10^{10} ф/с в энергетический интервал 0.1 %, яркость 10^{11} – 10^{12} ф/(с \times мм² \times мрад² \times 0.1 %), частота следования импульсов излучения 79 МГц при длительности импульса 30–40 пс. Площадь, занимаемая установкой, — примерно 6 \times 6 м². На данный проект имеется комплект конструкторской документации.

2. Создание ускорителя электронов на энергию 30–40 МэВ, с высокой средней мощностью пучка для реализации методик наработки медицинских изотопов с использованием фотоядерных реакций. На основе экспериментов на ускорителе РТМ55 по наработке медицинских изотопов выработаны требования к ускорителю. Проект находится в стадии разработки.

3. Модернизация существующего ускорителя РТМ55, которая даст возможность проводить облучения с плавающей энергией электронов от 10 до 55 МэВ с шагом 5 МэВ, что позволит получить более детальную информацию о механизмах возбуждения ядер. Проект модернизации ускорителя разработан. Для модернизации ускорителя требуется изготовить новую вакуумную камеру и ряд других узлов, что планируется выполнить в течение 2–3 лет.

4. Запланированы исследования фотоядерных реакций в области порога и продолжение изучения конфигурационного расщепления ГДР на ядрах с $A > 50$ на пучке квазимоноэнергетических фотонов на установке ELI-NP (в составе коллаборации). Из-за особенностей прямого метода регистрации нейтронов при измерении сечений фотонейтронных реакций эти работы необходимо сопровождать измерениями выходов соответствующих реакций, проводимыми активационным методом на ускорителях НИИЯФ МГУ.

*1.5.6. Исследования на базе комплекса ускорителей ионов
НИИЯФ МГУ*

Ускорительный комплекс заряженных частиц НИИЯФ МГУ перекрывает диапазон энергий от сотни эВ до 30 МэВ. Он востребован для решения задач ядерной физики низких энергий, современного материаловедения, в том числе наноэлектроники и спинтроники, задач биологического и фармакологического направлений. Комплекс включает 120-сантиметровый циклотрон, электростатические генераторы ЭГ-8 и AN2500, каскадный генератор КГ-500, ионный имплантатор HV500 (500 кэВ) и ускоритель газовых кластеров.

На базе ускорительного комплекса НИИЯФ МГУ проводятся следующие ядерно-физические исследования: а) ориентационные эффекты при прохождении заряженных частиц через кристаллы; б) вынужденного деления тяжелых ядер; в) ядерная спектроскопия и изучение закономерностей рассеяния протонов и альфа-частиц атомными ядрами; г) изучаются изомерные отношения в ядерных реакциях; д) развиваются корреляционные методы для продуктов ядерных реакций — измерения функции угловой корреляции вылетающих частиц и γ -излучения.

Ионный ускорительный комплекс НИИЯФ МГУ является базой не только исследований по ядерной физике, но и активно используется для решения проблем физики твердого тела, физики поверхности, материаловедения: а) использование методов ядерного и резерфордского обратного рассеяния заряженных частиц для решения научных и прикладных задач современного материаловедения; б) исследования радиационной стойкости космических материалов и микросхем, а также тестирование детекторов, устанавливаемых на спутники; в) исследуется воздействие космических лучей на биологические объекты и модельные физико-химические самоорганизующиеся системы, что важно при планировании полетов в дальнем космосе и длительных работах на Луне; г) проводится наработка радионуклидов для медицины, промышленности и научных исследований, в частности, были разработаны новые радиофармацевтические препараты « ^{199}Tl -хлорид» и «Астат-211» для диагностических и терапевтических целей в кардиологии и онкологии; д) на базе КГ-500 и установки TUBA создан комплекс КГ-MEIS для исследования поверхности материалов, приповерхностных слоев и ультратонких многослойных структур.

Ускорительный комплекс НИИЯФ МГУ также активно используется в образовательных целях.

Очевидно, что ускорительный комплекс будет необходим и дальше, а его возможности и сферы применения должны расширяться. Необходимо признать, что в настоящее время циклотрон У-120, который был запущен в 1959 г. на энергию около 6.3 МэВ/нуклон и модернизирован в 1977 г. до энергии 7.5 МэВ/нуклон, находится в плохом состоянии из-за его изношенности. Необходима его замена на современный ускоритель. Прорабатывается замена У-120 на универсальный тяжелоионный ускоритель серии DC (ЛЯР ОИЯИ). Предварительные оценки стоимости нового ускорителя в НИИЯФ МГУ составляют до 30 млн долл. США.

1.6. Проект DERICA и стратегия развития ядерной физики низких энергий в Российской Федерации

К концу 90-х гг. в мире «выкристаллизовалось» понимание того, как должна выглядеть фабрика РИ нового поколения. Первыми программу такого перехода к новому поколению выполнили японцы в проекте RIBF (RIKEN). На сегодняшний день амбициозные программы апгрейда реализуют все мировые лидеры в области исследования РИ — GANIL (Франция) → SPIRAL2 (в 2021 г. базовый ускоритель проекта вышел на полный ток), GSI (Германия) → FAIR (после многочисленных задержек осуществляется реалистичный план запуска научной программы в 2026 г.), NSCL (США) → FRIB (в 2021 г. базовый ускоритель проекта ускорил первые пучки до проектной энергии). Более того, появились новые «игроки», в перспективе претендующие на мировое лидерство. Центры исследования радиоактивных изотопов HIAF (Китай) и RAON (Республика Корея) создаются с нуля на новом месте, не несут тягот старой инфраструктуры и в их проектные решения закладывается запас на дальнюю перспективу. Базовые бюджеты всех упомянутых проектов находятся в диапазоне от ~ 1 до ~ 3 млрд долл. США, что является хорошей демонстрацией того, сколько стоит передовая наука в данной области.

В последнее десятилетие в ряде отечественных лабораторий предпринимались значительные усилия для обновления исследовательской инфраструктуры. В ЛЯР ОИЯИ в 2018 г. был запущен новый фрагмент-сепаратор ACCULINNA-2 (см. раздел I.1.6). В ЛЯР ОИЯИ в 2019 г. заработала «фабрика сверхтяжелых элементов», базирующаяся на новом ускорителе DC-280 (см. раздел I.1.a). В НИЦ «КИ» — ПИЯФ получил «зеленый свет» проект ИРИНА (см. раздел I.2). Однако суммарный бюджет этих проектов (несколько менее 100 млн долл. США) весьма значителен по отечественным масштабам, но незначителен по мировым. Проекты эти «нишевые», то есть способны выдавать результаты мирового класса в узких специфических областях современной ядерной физики низких энергий. С массовым вступлением в строй фабрик радиоактивных изотопов нового поколения в период с 2023 по 2028 г. научные возможности этих установок станут малоконкурентными на мировом уровне.

В рамках стратегического плана развития ОИЯИ на период с 2022 по 2030 г. и далее был предложен проект DERICA (**D**ubna **E**lectron — **R**are **I**sotope **C**ollider **f**Acility), способный вдохнуть новую жизнь и вывести на мировой уровень исследования в области ядерной физики низких энергий у нас в стране [1, 2]. Проект базируется на линейном сверхпроводящем ускорителе тяжелых ионов квазинепрерывного действия с пучками рекордных характеристик. В проекте делается акцент на исследованиях короткоживущих РИ в накопительных кольцах. Уникальной особенностью проекта является возможность изучения взаимодействий электронов с РИ в коллайдерном эксперименте с целью определения фундаментальных свойств ядерной материи — электромагнитных форм-факторов экзотических ядер. Отметим ключевые моменты проекта.

Амбициозная задача-максимум и широта охвата

Проект DERICA имеет принципиальную и амбициозную задачу-максимум — создание коллайдера электронов и радиоактивных изотопов. Ее реализация относится к последней стадии проекта. Однако ряд уникальных научных задач мирового класса предлагается выполнить по ходу проекта на его ранних стадиях. Так, например, вторичные радиоактивные пучки в диапазоне энергий 20–70 МэВ/нуклон будут иметь рекордные интенсивности в широком номинале доступных масс A и зарядов Z . Постускоренные пучки РИ исключительного качества (чистота, моноэнергетичность, эмитанс) будут доступны с энергиями до ~ 500 МэВ/нуклон. Другой, очень интересной возможностью является использование мишени в виде потока свободных нейтронов (или холодных нейтронов в ловушке) для исследования реакций с ними в накопительных кольцах. Эти и другие уникальные технические возможности предлагаемого проекта позволят эффективно исследовать самые сложные фундаментальные вопросы современной ядерной физики низких энергий: границы ядерной стабильности и границы существования ядерной структуры на карте нуклидов, истоки и механизмы сильного взаимодействия, в том числе и в «сильно несимметричной» ядерной материи, существование и свойства экзотических видов радиоактивности ($2p$, $2n$, $4n$ и т. д.), модификация оболочечной структуры ядер вдали от ядерной «долины стабильности», поведение высокозаряженных ионов в условиях, близких к астрофизическим, и т. д.

Общий замысел

Базовой установкой для проекта DERICA является линейный сверхпроводящий ускоритель-драйвер пучка стабильных ионов LINAC-100, рассчитанный на экстремальные интенсивности. Он должен работать в квазинепрерывном режиме и обеспечивать на выходе для тяжелых ионов (Xe, Bi, U) энергию до 100 МэВ/нуклон (отсюда и название ускорителя) с интенсивностями ~ 20 ркА и для легких ионов (B, Ne, Ca) до 160 МэВ/нуклон при ~ 300 ркА. При этом предполагается поэтапное строительство LINAC-100 с возможностью использования пучка для экспериментов при более низких энергиях по мере готовности ускорителя. РИ, отобранные фрагмент-сепаратором DFS (DERICA Fragment Separator, см. рис. I.6.1, I.6.2), останавливаются в газовой ячейке, аккумулируются в ионной ловушке и передаются ионному источнику, который формирует максимально высокое зарядовое состояние для дальнейшего эффективного ускорения. Постускорение пучка РИ в проекте DERICA осуществляется линейным импульсным нормально-проводящим ускорителем LINAC-30 до энергии ~ 30 МэВ/нуклон. Для ряда задач требуются более высокие энергии. Так, эффективное функционирование электрон-РИ-коллайдера требует энергий ионов 300–500 МэВ/нуклон. Дальнейшее повышение энергии ускорения ионов от ~ 30 до ~ 500 МэВ/нуклон проходит в бустере — синхротроне с максимальным темпом изменения магнитного поля FRR (Fast Ramping Ring, рабочий цикл менее 0.1 с). В зависимости от схемы постускорения время до инъекции в экспериментальное кольцо CR будет составлять 0.1–0.5 с, что предоставляет неплохие условия для исследования даже весьма короткоживущих РИ, достаточно удаленных от долины ядерной стабильности.

Таким образом, проект DERICA объединяет конструктивные особенности и возможности как комплексов РИ, основанных и на технологии *in-flight*, и на технологии *ISOL*, и по сравнению с ранее предложенными подходами концепция DERICA дает существенный выигрыш по времени, протекающему до начала измерений, что может быть критично для исследования короткоживущих РИ.

Стадийность проекта

Проект разбит на относительно короткие научно мотивированные стадии (см. рис. I.6.1). Первые очереди проекта дадут научные результаты уже через $\sim 3\text{--}5$ лет после начала строительства. Каждые $3\text{--}5$ лет будет вводиться очередная установка, открывающая новые научные возможности. Стадийность в разворачивании проекта позволяет уменьшить многие технологические риски, связанные с проектом. В частности, это снимет остроту (но, конечно, не устранит полностью) проблемы обеспечения высококвалифицированными кадрами.

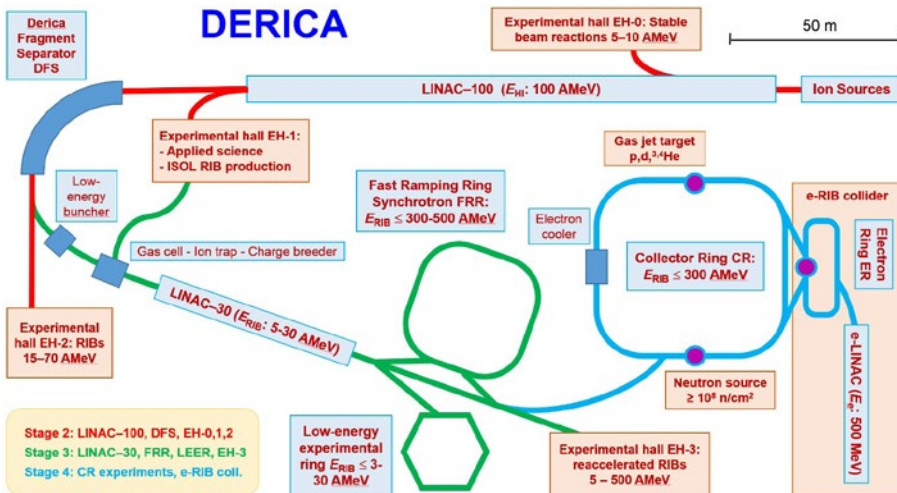


Рис. I.6.1. Стадийность проекта DERICA (цвета пучковых линий соответствуют стадиям проекта) в соответствии с [1]. **Стадия 1:** формирование научной повестки, создание технико-экономического обоснования, прототипирование критических подсистем. **Стадия 2:** (а) — строительство LINAC-100 в «стартовой конфигурации» (6 МэВ/нуклон , только нормальнопроводящие резонаторы), экспериментальный зал EH-1; (б) — LINAC-100(50) работает на промежуточных энергиях и DFS работает на низкой интенсивности (50 МэВ/нуклон , экспериментальный зал EH-2); (в) — LINAC-100 работает в полной конфигурации (100 МэВ/нуклон) и DFS работает на полной интенсивности. **Стадия 3:** создание системы постускорения РИ в составе линейного ускорителя LINAC-30 и синхротрона FRR — доступны высококачественные постускоренные пучки РИ $\sim 5\text{--}300 \text{ МэВ/нуклон}$ в экспериментальном зале EH-3. **Стадия 4:** создание комплекса накопительных колец; эксперименты на накопительных кольцах и электрон-РИ-коллайдере

Возможности прикладных и междисциплинарных исследований

Ускорительный комплекс DERICA является источником пучков любых стабильных ионов с $Z = 5\text{--}92$ исключительно высокой интенсивности ($1\text{--}5 \text{ emA}$) вплоть до энергий $\sim 160 \text{ МэВ/нуклон}$. Стабильные и радио-

активные пучки меньших интенсивностей будут доступны до энергий ~ 500 МэВ/нуклон. Это делает ускорительный комплекс DERICA пригодным для большого числа прикладных задач из различных областей: физика плазмы и физика высоких плотностей энергии, спектроскопия изомерных ядер, нейтронная физика, материаловедение и радиационная стойкость материалов, радиационное тестирование компонентов микроэлектроники, радиационная биология, ядерная и радиационная медицина. При этом, вследствие весьма высокой интенсивности первичных ионных пучков, многие из этих задач могут решаться в «фоновом режиме» (используя незначительную часть полного тока), не пересекаясь с решением основных научных задач.

Парадигма пользовательского центра

DERICA планируется в современной парадигме пользовательского центра (так называемого «user facility»), когда пучковое время на любой установке предоставляется внешним пользователям в соответствии со стандартизированной процедурой. Комплекс, таким образом, должен стать базовым центром по фундаментальной и прикладной ядерной физике низких энергий у нас в стране и в странах — участницах ОИЯИ. При этом группы из различных исследовательских организаций получают: а) доступ к сложным и дорогим инструментам общего пользования; б) возможность развивать и эксплуатировать свое оборудование без необходимости поддерживать всю инфраструктуру получения пучков редких изотопов высокой интенсивности.

«Окно возможностей»

DERICA — проект умеренной стоимости (оценка ~ 400 млн долл. США). В современной физике ядра и элементарных частиц типичная стоимость проектов мирового класса сегодня начинается от величин в 5–10 раз выше. Возможность создания ядерно-физического комплекса с актуальной и перспективной на мировом уровне программой и с относительно скромным бюджетом определяется особенностью момента. Например, из-за сложностей в реализации проекта FAIR часть научной программы может быть реализована в рамках DERICA. Физика радиоактивных изотопов активно развивается во многих странах, и это «окно возможностей» не будет длительным.

Статус проекта DERICA

Научная программа проекта опубликована в работе [1]. Со статусом программы DERICA можно ознакомиться также на сайте [2]. Место проекта DERICA в стратегии развития ОИЯИ представлено в [3]. Результаты работ по «критическим» подсистемам DERICA на начало 2021 г. опубликованы в работе [4].

Логическая схема проекта DERICA представлена на рис. I.6.1 с разбивкой на стадии. В настоящий момент в ОИЯИ развернута программа по проведению НИОКР, созданию прототипов «критических» компонентов проекта и технико-экономическому обоснованию всего проекта DERICA. Эта программа выполняется в сотрудничестве с ведущими отечественными центрами, прежде всего НИЦ КИ-ИТЭФ, МИФИ, ИЯФ СО РАН, РФЯЦ-ВНИИТФ. К критическим компонентам проекта относятся узлы и установки, от которых зависит выполнимость научной программы DERICA в целом и/или для развития которых требуется длительное время.

Рис. 1.6.2 иллюстрирует результаты НИОКР 2019–2020 гг. [4] по направлениям: ускоритель-драйвер LINAC-100, фрагмент-сепаратор DFS (Dubna Fragment Separator), комплекс накопительных колец.

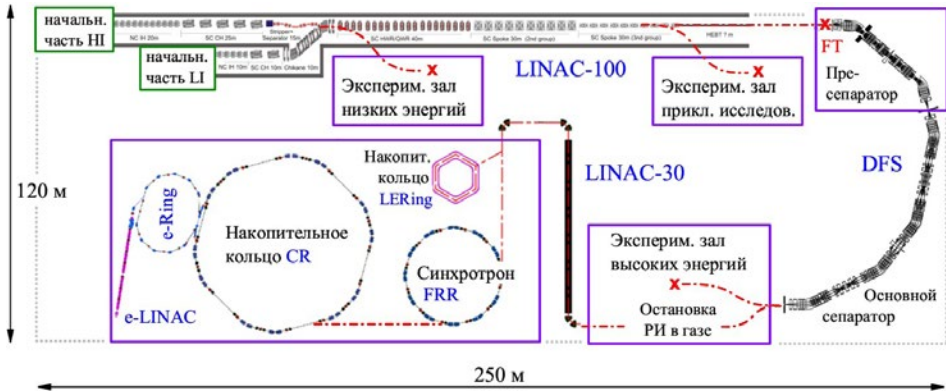


Рис. 1.6.2. Общий вид площадки DERICA по результатам эскизного проектирования [4]. Сверхпроводящий сильноточный ускоритель-драйвер непрерывного действия LINAC-100 доводит энергию пучка стабильных ионов до 100–160 МэВ/нуклон. Радиоактивные изотопы рождаются на производящей мишени FT; первичный пучок и ненужные фрагменты поглощаются в радиационно-нагруженной зоне пресепаратора DFS. Искомые РИ отбираются основным сепаратором DFS и используются в экспериментальной зоне высоких энергий: либо для реакций при промежуточных энергиях (50–100 МэВ/нуклон), либо останавливаются в газе. Остановленные в газе РИ ионизируются, ускоряются импульсным нормальнопроводящим ускорителем LINAC-30 до ~ 30 МэВ/нуклон и передаются комплексу накопительных колец. Здесь пучок используется в низкоэнергетическом исследовательском накопительном кольце LERing или для дальнейшего ускорения (синхротрон FRR ~ 500 МэВ/нуклон) и исследований в коллайдере CR/e-Ring

Долговременные перспективы

Значимость проекта DERICA велика не только для решения фундаментальных задач ядерной физики, но и для развития технологической базы физических исследований. Высокочастотная сверхпроводимость, высокочастотная электроника и силовая электроника, технологии линейных нормальнопроводящих и сверхпроводящих ускорителей, работающих в квазинепрерывном режиме, технологии высокого вакуума, мишенный комплекс на мощность пучка порядка 1 МВт и другие «экстремальные» технические аспекты проекта DERICA потребуют привлечения возможностей значительного числа отечественных научных и инженерных организаций. В частности, экспертиза организаций Государственной корпорации «Росатом» будет необходима при создании роботизированного мишенного комплекса, работающего в условиях экстремальных радиационных нагрузок.

Выполнение проекта DERICA можно начинать в рамках бюджета ОИЯИ в ограниченном виде (ускоритель на половинную энергию плюс фрагмент-сепаратор). Даже в таком виде предлагаемый комплекс станет основой перспективной научной программы ОИЯИ мирового класса в области физики радиоактивных изотопов [5]. В полном виде проект DERICA относится к классу «мегасайенс» и в действительности представляет собой не рядовой

проект создания изолированной установки, а стратегию развития фундаментальной физики низких энергий в РФ на десятилетия вперед.

Ссылки

[1] Л. В. Григоренко и др. *Научные задачи перспективного ускорительно-накопительного комплекса для исследования радиоактивных изотопов DERICA*. УФН. **189**, 721–738 (2019); перевод: [L. V. Grigorenko et al., *Phys.-Usp.* **62**, 675–690 (2019)].

[2] Сайт проекта DERICA: <http://derica.jinr.ru>.

[3] Стратегия ОИЯИ: https://indico.jinr.ru/event/1121/attachments/6760/9449/03._DERICA.Fin.pdf.

[4] Л. В. Григоренко, Г. Н. Кропачев, Т. В. Кулевой, И. Н. Мешков, С. М. Полозов, А. С. Фомичев, Б. Ю. Шарков, П. Ю. Шатунов, М. И. Явор. *Проект DERICA и стратегия развития ядерной физики низких энергий*. Ядерная физика. **84** (2021) 53–66; перевод: [L. V. Grigorenko et al., *Physics of Atomic Nuclei* **84** (2021) 68–81].

[5] Стратегический план развития ОИЯИ на период до 2030 г. и далее: http://www.jinr.ru/wp-content/uploads/JINR_Docs/JINR_Strategy_2030.pdf (на русском языке http://www.jinr.ru/wp-content/uploads/JINR_Docs/JINR_Strategy_2030_rus.pdf).

Часть II. Нейтронные исследования

В России источниками нейтронов мирового уровня являются импульсный реактор ИБР-2 Объединенного института ядерных исследований (Дубна), вводимый в эксплуатацию высокопоточный реактор непрерывного действия ПИК в НИЦ «КИ» — ПИЯФ (Гатчина), нейтронный комплекс ИЯИ РАН (Троицк) на основе сильноточного ускорителя протонов и импульсный источник нейтронов типа «spallation» на базе протонного ускорителя с нейтронным спектрометром по времени пролета ГНЕЙС в НИЦ «КИ» — ПИЯФ (Гатчина). Реактор ИБР-2 ОИЯИ обладает наибольшим в мире импульсным потоком нейтронов, достижимым на исследовательских источниках нейтронов (10^{16} н/см²/с при средней по времени величине 10^{13} н/см²/с). Реактор ПИК спроектирован на мощность 100 МВт и поток нейтронов 4.5×10^{15} н/см²/с в центральной зоне, что в перспективе позволит ему стать одним из наиболее мощных непрерывных исследовательских источников нейтронов. Нейтронный комплекс ИЯИ РАН имеет возможность проведения широкого спектра нейтронных исследований и значительные возможности повышения интенсивности при апгрейде ускорителя-драйвера. Спектрометр ГНЕЙС на источнике нейтронов с энергиями от тепловых до 1000 МэВ с длительностью импульса 10 нс и средней интенсивностью 3×10^{14} н/с входит в число лучших мировых установок этого класса и является единственным действующим инструментом этого типа в России. Если нейтронный импульс длительностью 200–300 мкс удовлетворяет главным образом запросам физиков, работающих в области исследования конденсированного состояния вещества, то более короткий (20–30 мкс и менее) может быть эффективно использован в ряде экспериментов по фундаментальной и прикладной ядерной физике.

Для исследований в области энергий нейтронов от сотен кэВ до 20 МэВ эффективно используются низкоэнергетические ускорители протонов, дейтронов и альфа-частиц, на которых в реакциях на легких ядрах получают пучки моноэнергетических нейтронов, позволяющие измерять сечения взаимодействия нейтронов с ядрами в этой области энергий, реализуя программу ядерных данных для астрофизики и ядерной энергетики. В мире успешно работают порядка 400 таких ускорителей, в нашей стране в конце 80-х годов прошлого века их было более 30. В настоящее время остались 3 центра: Дубна, Обнинск, Новосибирск.

Заслуживает внимания также тот факт, что высокопоточные источники нейтронов с импульсом в 200–300 мкс, используемые в основном для исследований в области физики твердого тела, в настоящее время предоставляют возможности проверки теоретических моделей, выводящих нас за рамки стандартной модели. Поэтому указанные источники нейтронов становятся привлекательными для физики элементарных частиц.

II.1. Реактор ИБР-2 и перспективный комплекс DNS-IV на реакторе ИБР-3 в ЛНФ ОИЯИ

Лаборатория нейтронной физики ОИЯИ

Научная программа по ядерной физике в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ всегда имела широкий спектр задач, это было обусловлено тем, что в ЛНФ имеются источники нейтронов различных энергий: быстрых (получаемых на пучках электростатического генератора ЭГ-5), резонансных (реактор ИБР-30, затем установка ИРЕН), тепловых (реактор ИБР-2). В настоящее время в лаборатории существуют активные группы, ведущие исследования с ультрахолодными и очень холодными нейтронами (эксперименты на выезде), изучающие физические процессы в реакциях нейтронно-индуцированного деления и в реакциях на быстрых нейтронах, а также с применением нейтронно-активационного анализа.

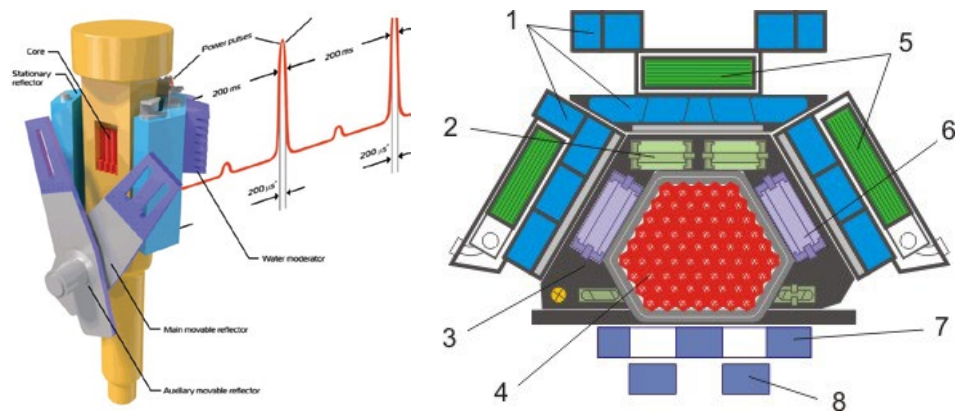


Рис. II.1.1. Слева: схема работы ИБР-2. Справа: устройство активной зоны ИБР-2. 1 — водяные замедлители, 2 — система аварийной защиты, 3 — стационарный отражатель, 4 — тепловыделяющие сборки, 5 — холодные замедлители, 6 — регулирующие стержни, 7 — основной подвижный отражатель, 8 — дополнительный подвижный отражатель

Реактор ИБР-2

При проектировании импульсного реактора следующего поколения ИБР-2 со средней мощностью 4 МВт было предложено осуществлять механическую модуляцию реактивности реактора при помощи специальных подвижных отражателей — двух вращающихся вблизи активной зоны реактора роторов (см. рис. II.1.1). Физический пуск реактора состоялся в начале 1978 г., а энергетический пуск и начало исследований — еще на четыре года позже. К началу 80-х годов экспериментальный зал реактора уже был оснащен рядом нейтронных спектрометров. С 1984 г. до настоящего времени реактор ИБР-2 работает в течение 2500 часов в год, предоставляя пучковое время для проведения исследований более 100 ученым из стран — участниц ОИЯИ и других стран мира, которые ежегодно выполняют более 200 экспериментов в рамках пользовательской программы. Сравнимое количество экспериментов выполняется сотрудниками Отделения нейтронных исследований и разработок в области конденсированных сред ЛНФ. В период с конца 90-х годов до 2011 г. была осуществлена модернизация реактора

ИБР-2 с временной остановкой реактора в 2007–2010 гг. За это время были заменены основной и вспомогательный модуляторы реактивности, корпус реактора, система контроля и управления, часть системы охлаждения реактора. В 2010–2011 гг. были выполнены физический (декабрь 2010 г.) и энергетический (июль-октябрь 2011 г.) пуски обновленного реактора, а с 2012 г. возобновилась пользовательская программа и были продолжены исследования на 15 нейтронных спектрометрах.

Научная программа: фундаментальные свойства нейтрона

К основным мотивациям изучать фундаментальные свойства нейтрона относятся поиск нарушения симметрий в фундаментальных взаимодействиях и поиск новых типов взаимодействий за пределами Стандартной модели. Выделим несколько основных тем исследований.

а) Исследования нарушения пространственной четности в реакциях низкоэнергетических поляризованных нейтронов с малонуклонными системами

Предлагаемые эксперименты направлены на исследование слабых нуклон-нуклонных (NN) взаимодействий при низких энергиях. В этой области существует ряд фундаментальных проблем, связанных как с изучением слабого взаимодействия, так и сильного взаимодействия в низкоэнергетическом, непertурбативном пределе квантовой хромодинамики. «Традиционные», сильные NN-взаимодействия модифицируются слабым взаимодействием, из-за чего в ядерных реакциях появляются эффекты нарушения пространственной четности. Одним из проявлений таких эффектов является асимметрия эмиссии продуктов реакции относительно спина поляризованного нейтрона. Эффекты взаимодействия медленных поляризованных нейтронов с малонуклонными системами в ряде случаев могут быть рассчитаны количественно из «первых принципов». Существует несколько теоретических подходов к описанию слабых NN-взаимодействий, но только экспериментальное измерение этих эффектов позволит подтвердить или опровергнуть ту или иную модель.

В краткосрочной перспективе (5–7 лет) предлагается провести измерения P-нечетных асимметрий в реакциях ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ и ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ с медленными поляризованными нейтронами. Величины ожидаемых эффектов малы ($\sim 10^{-8}$ – 10^{-7}), поэтому для проведения экспериментов за разумное время требуются высокие потоки медленных поляризованных нейтронов и специальная техника регистрации. В мире такого рода исследования проводятся широкими коллаборациями, в основном в США, на источниках холодных нейтронов (Нейтронный научный центр в Лос-Аламосе, Центр нейтронных исследований NIST, SNS в Ок-Ридже). В России исследования P-нечетных эффектов на легких ядрах были начаты в середине 80-х годов прошлого века в сотрудничестве ЛНФ ОИЯИ — ЛИЯФ (Гатчина) на реакторе ВВР, а затем продолжены в более широкой коллаборации ЛНФ — ПИЯФ — ILL на высокопоточном реакторе в Гренобле (Франция). К настоящему времени получение ограничения на значение π -мезонной константы слабого нуклонного взаимодействия, которое оказалось ниже величины, предсказываемой в рамках подхода потенциала одномезонного обмена (один из наиболее признанных в данной области).

Научные группы ЛНФ ОИЯИ и ПИЯФ входят в коллаборацию по уточнению π -мезонной константы слабого нуклонного взаимодействия. В ПИЯФ была разработана методика измерений и система регистрации малых эффектов, в ЛНФ имеется большой опыт разработки и создания оригинальных детекторов. Проведение экспериментов в настоящее время, пока не будет введен в эксплуатацию реактор ПИК, возможно только на инструменте PF1В высокопоточного реактора ILL.

б) Эксперименты по измерению времени жизни нейтрона

Задача по прецизионному измерению времени жизни нейтрона связана с проверкой справедливости Стандартной модели элементарных частиц и проверкой справедливости теоретических моделей нуклеосинтеза в ранней Вселенной. Широко использовались два метода измерений: путем регистрации продуктов распада в выделенной области пространства, через которую проходит нейтронный пучок с измеренной интенсивностью, и методом определения характерного времени падения плотности ультрахолодных нейтронов (УХН) в ловушке. На сегодняшний день результаты, полученные различными методами, статистически расходятся.

Недавно в ОИЯИ был предложен новый метод измерения времени жизни нейтрона по изменению формы времяпролетного спектра нейтронов на импульсном источнике. Сложность реализации эксперимента с тепловыми нейтронами связана с малой величиной измеряемого эффекта. Поэтому представляет интерес реализация такого эксперимента на интенсивном импульсном пучке холодных или очень холодных нейтронов. В ЛНФ начаты методические работы с целью определения достижимой точности на ИБР-2 и перспектив повышения этой точности на ИБР-3.

в) Разработка интенсивного источника очень холодных нейтронов для фундаментальных исследований (поиска нейтрон-антинейтронных осцилляций)

Возможность существования нейтрон-антинейтронных осцилляций представляет фундаментальный интерес для физики элементарных частиц и космологии. Такие осцилляции нарушают барионное число ($\Delta B = 2$) и имеют много других последствий для возможной «новой физики».

Самое точное ограничение на возможные осцилляции свободного нейтрона в вакууме было поставлено в 1994 г. на интенсивном источнике холодных нейтронов в ILL. В 90%-ном доверительном интервале ограничение на время осцилляции τ было установлено на уровне $\tau \geq 0.86 \times 10^8$ с. При использовании медленных нейтронов может быть достигнута чувствительность ко времени осцилляций на уровне $\tau \sim 10^{10}$ с. При этом использование интенсивного источника очень холодных нейтронов с плотностью потока 10^7 – 10^8 см⁻² с⁻¹ будет более выгодно с точки зрения надежности сделанных теоретических оценок. Таким образом, разработку технологии создания интенсивного источника очень холодных нейтронов можно рассматривать как ближайший этап в подготовке такого эксперимента.

В ЛНФ в сотрудничестве с широкой коллаборацией из РФ и Европы ведется разработка эффективных отражателей ОХН на основе нанодисперсных алмазов. Создание таких отражателей должно позволить разработать

интенсивные источники ОХН для наиболее «ярких» российских исследовательских нейтронных источников (ПИК, ИБР-2, ИБР-3).

г) Эксперименты по поиску новых и измерению известных Т-нечетных эффектов в нейтронно-ядерных взаимодействиях

С увеличением интенсивности потока импульсного источника нейтронов становятся реальными эксперименты по поиску истинного нарушения Т-инвариантности с использованием поляризованных нейтронов и ядер. Эффекты с нарушением пространственной четности в нейтронных резонансах были открыты в ЛНФ в конце 70-х годов прошлого века группой Л. Б. Пикельнера, к концу XX века в рамках коллаборации TRIPLE с участием физиков ОИЯИ эти эффекты были экспериментально измерены в резонансах более чем двадцати ядер. В это же время были осуществлены попытки измерить эффекты с нарушением временной симметрии, которые не увенчались успехом в силу недостаточной интенсивности нейтронных пучков. На рубеже 2000-х гг. были наблюдаемы аналогичные эффекты (TRI- и ROT-эффекты) в тройном и бинарном делении, вызванном тепловыми поляризованными нейтронами, которые оказались неожиданно большими. В настоящее время значительная часть этих эффектов получила объяснение на основе квантово-механических представлений о процессе деления без привлечения гипотезы о нарушении Т-инвариантности, но дальнейшие измерения указанных эффектов для делительных гамма-квантов привели к противоречию. Поэтому возникла необходимость исследования этих явлений в резонансах, являющихся «чистыми» квантово-механическими состояниями ядра. Это должно привести к более полному пониманию механизмов деления и усовершенствованию теории деления. Для количественного анализа TRI- и ROT-эффектов в ядерном делении необходимо знание спин-разделенных сечений деления, которые на данный момент отсутствуют для большинства исследуемых ядер. Такие измерения требуют не только интенсивных пучков поляризованных нейтронов, но и создания поляризованных ядерных мишеней.

Кроме того, прецизионные измерения нейтронных сечений в тепловой области и в низколежащих резонансах являются самым распространенным и наиболее точным источником нормировочных констант (сечений и параметров низколежащих резонансов), необходимых для абсолютной нормировки сечений, измеряемых в других энергетических диапазонах. Потребность в таких нормировочных константах существовала и будет существовать всегда, так как требования к точности необходимых ядерных констант (сечений) непрерывно обновляются и растут ввиду необходимости все более точных расчетов энергетических ядерных установок.

Для осуществления этой программы исследований необходимо использовать высокоэффективные всеволновые поляризаторы нейтронов на выведенных нейтронных пучках. Такие устройства были созданы и успешно использовались на выведенных пучках реактора ИБР-30 ЛНФ ОИЯИ. Сейчас ведутся работы по созданию таких поляризаторов нового поколения для ИРЕН и ИБР-2.

д) Исследования с ультрахолодными нейтронами (УХН)

С момента открытия в 1968 г. в ЛНФ ОИЯИ ультрахолодных нейтронов они превратились в инструмент высокоточных измерений. К области

применения УХН относятся как фундаментальная физика и физика частиц, так и квантовая оптика и физика поверхности. С использованием УХН на сегодняшний день получены наиболее точные результаты для времени жизни нейтрона, установлено ограничение на электрический дипольный момент нейтрона, обнаружен «малый нагрев» УХН как на поверхности твердых тел, так и жидкостей, ведутся эксперименты по проверке закона дисперсии нейтронов в среде и поиску новых типов взаимодействий при помощи прецизионного измерения параметров энергетических уровней в гравитационном поле Земли и переходов между ними.

Перспективы повышения точности экспериментов с УХН и расширения области их применения связаны с интенсивностью доступных источников. Создание источника УХН, позволяющего получить плотность УХН в ловушке свыше 10^4 см^{-3} и имеющего производительность более 10^7 с^{-1} , ведется на реакторе ПИК (см. раздел II.2.а). В ЛНФ, на импульсном реакторе ИБР-2, перспективным подходом к созданию интенсивного источника УХН является накопление импульсной плотности УХН с использованием временной фокусировки. Работы в этом направлении начаты. Разработка технологий для реализации такого источника на ИБР-2 (или ИБР-3 в дальнейшей перспективе) позволит расширить число исследований с УХН, повысить точность экспериментов и расширить область применения УХН.

Научная программа: прочее

Сюда относятся: механизмы ядерных реакций, ядерные данные для технологий и астрофизики, нейтрон-активационный анализ. Немаловажной частью экспериментальной программы исследований в области нейтронной ядерной физики в ОИЯИ являются (и будут развиваться в будущем) эксперименты по измерениям сечений нейтрон-индуцированных сечений в диапазоне энергий от тепловых до десятков МэВ, в том числе с поляризованными нейтронами, исследование механизмов ядерных реакций и их описание в рамках различных моделей ядра, прикладные исследования — аналитические методы элементарного и изотопного анализа, их применение для изучения объектов природного и культурного наследия.

Ближние перспективы

Мировой опыт показывает, что для эффективной реализации экспериментальной программы во всех направлениях нейтронной ядерной физики нужны специализированные источники нейтронов с определенными спектральными и временными характеристиками выведенных нейтронных пучков. Парк нейтронных источников, работающих в России, в дальнейшем будет эффективно дополнен источником резонансных нейтронов ИРЕН (ЛНФ ОИЯИ) на базе электронного линейного ускорителя. ИРЕН в ближайшем будущем должен выйти на уровень интегрального выхода нейтронов 10^{13} н/с при длительности нейтронного импульса 20–100 нс, что выведет его на мировой уровень.

Долгосрочные перспективы

Необходимость создания нового источника нейтронов ОИЯИ, призванного заменить ИБР-2, была осознана практически сразу же после завершения финального этапа его модернизации. При подготовке 7-летнего плана развития ОИЯИ на 2017–2023 гг. эта задача была включена в окончательную версию документа как одна из приоритетных. В рамках разработки

Стратегии развития ОИЯИ до 2030 г. была создана международная Рабочая группа Комиссии по стратегическому планированию ОИЯИ, задачей которой является координация научно-технического обоснования проекта создания «Дубненского источника нейтронов четвертого поколения». Место перспективного комплекса DNS-IV на реакторе ИБР-3 в ЛНФ в стратегии развития ОИЯИ представлено в [1].

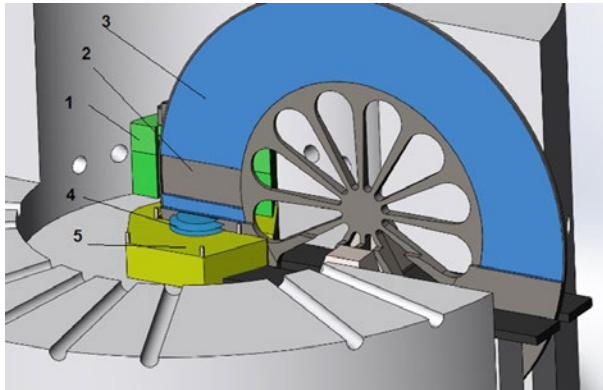


Рис. II.1.2. Схематический вид ИБР-3: 1 — активная зона, 2 — пустотный сектор модулятора реактивности, 3 — модулятор реактивности, 4 — замедлитель, 5 — бериллиевый отражатель

В 2017 г. между ОИЯИ и Научно-исследовательским и конструкторским институтом энерготехники имени Н. А. Доллежала (НИКИЭТ) заключен контракт «Разработка концептуального предложения высокопоточного импульсного источника нейтронов периодического действия на основе протонного ускорителя и размножающей зоны», в рамках которого была осуществлена конструкторская проработка двух вариантов нейтронного источника, предложенных Лабораторией. Окончательный отчет по договору был получен в конце 2019 г. На основе этого был сделан выбор в пользу импульсного исследовательского реактора на основе нептуниевого топлива ИБР-3 (см. рис. II.1.2). Время ввода в эксплуатацию этого источника нейтронов определено дорожной картой проекта и зафиксировано как 2037 год. Планируется достичь рекордной в мире импульсной плотности потока 10^{17} н/см²/с при средней 10^{14} н/см²/с.

Ссылки

[1] Стратегический план развития ОИЯИ на период до 2030 г. и далее: http://www.jinr.ru/wp-content/uploads/JINR_Docs/JINR_Strategy_2030.pdf (на русском языке http://www.jinr.ru/wp-content/uploads/JINR_Docs/JINR_Strategy_2030_rus.pdf).

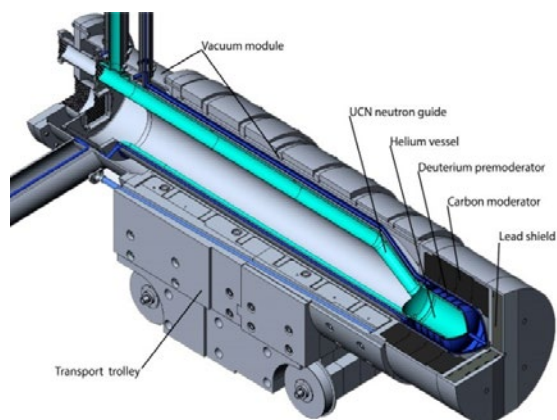
II.2. Фундаментальные исследования с нейтронами в НИЦ «КИ» — ПИЯФ

В современной физике элементарных частиц тесно переплелись и космология, и свойства Вселенной на ранней стадии образования, и собственно

структура элементарных частиц и их взаимодействий, ядерная физика и физика фазовых превращений. Один из путей получения новых данных в этой области — это увеличение точности измерений в физике низких энергий, в частности в нейтронной физике. Для этой цели необходимы высокоинтенсивные источники нейтронов, поскольку для увеличения точности необходимо увеличение статистики, кроме того, необходимы также новые идеи, методики и нестандартное оборудование.

II.2.a. Высокоинтенсивный источник УХН на основе сверхтекучего гелия на базе реактора ПИК

Создается источник для производства УХН с плотностью, в 10–100 раз превышающей плотность УХН на существующих в мире источниках (см. рис. II.2.1 и II.2.2). Такой результат в увеличении интенсивности УХН будет достигнут за счет применения новой технологии со сверхтекучим гелием. На источнике УХН запланирована программа исследований фундаментальных взаимодействий, включающая в себя поиск ЭДМ нейтрона и прецизионное измерение времени жизни нейтрона. Обе задачи имеют принципиальное значение для физики элементарных частиц и космологии. На пучках УХН будут проводиться работы ученых из НИЦ «КИ», ОИЯИ и зарубежных коллег. В настоящее время эти работы проводятся на реакторе ILL (Гренобль, Франция). Однако физика УХН начиналась в России, и было бы важно восстановить российские приоритеты в этой области.



Параметр	Значение
Полная производительность, с ⁻¹	7.8×10^6
Энерговыведение в гелиевой камере, Вт	2
Плотность потока УХН, нейтрон/см ⁻³	1.3×10^3
Объем камеры источника УХН, л	40
Рабочая температура конвертора УХН, К	1.2

Рис. II.2.1. Конструкция источника УХН на РК ПИК

II.2.б. Перспективные эксперименты на реакторе ПИК

Магниторезонансный спектрометр на УХН для измерения ЭДМ нейтрона (ЭДМ)

Эксперимент по поиску ЭДМ нейтрона связан с общей проблемой теории элементарных частиц: адекватным описанием процессов, идущих с нарушением CP- и T-симметрии. Величина ЭДМ нейтрона в современных

теоретических моделях возникает в первом порядке по слабому взаимодействию и оказывается на уровне $d_n \sim 10^{-26} - 10^{-28} e \text{ см}$.

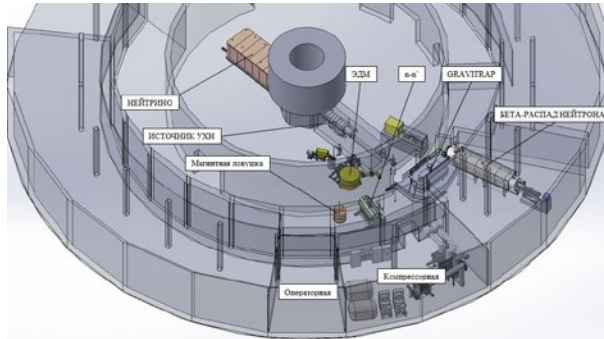


Рис. II.2.2. План размещения источника УХН со сверхтекучим гелием и экспериментальных установок на канале ГЭК-4 РК ПИК: UCN — источник УХН на канале ГЭК-4; EDM — установка для измерения ЭДМ нейтрона; GT — установка для измерения времени жизни нейтрона с гравитационной ловушкой УХН; MT — установка для измерения времени жизни нейтрона с магнитной ловушкой УХН

Наиболее точное на сегодняшний день ограничение на величину электрического дипольного момента нейтрона $d_n < 2 \times 10^{-26} e \text{ см}$ было получено в ILL. В их установке использовалась одна камера для хранения УХН и ртутный комагнетометр для мониторинга магнитных условий. В такой схеме возможны систематические ошибки при наличии градиента магнитного поля. Дифференциальный магниторезонансный спектрометр с двумя камерами хранения УХН, с системой двойного анализа поляризации и четырьмя детекторами, с общим постоянным магнитным полем (рис. II.2.3) обеспечивает принципиально иную возможность контроля систематических эффектов. Тестовый эксперимент был проведен на реакторе ILL, где был получен предел $d_n < 5 \times 10^{-26} e \text{ см}$. Создание нового источника УХН на реакторе ПИК с плотностью на 2 порядка выше, чем в ILL, позволит получить точность измерений ЭДМ нейтрона на уровне лучше чем $10^{-27} e \text{ см}$. Обнаружение ЭДМ нейтрона либо новое ограничение на его величину на таком уровне может стать решающим фактором при выборе теории, адекватно описывающей явления CP-нарушения.

Установка «ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом» (DEDM)

При создании экспериментальной позиции на пучке холодных нейтронов с большой апертурой и интенсивностью в нейтроноводном зале первоочередной задачей является кристалл-дифракционный эксперимент по поиску ЭДМ нейтрона на установке DEDM. Данный инструмент будет представлять собой универсальную позицию для исследования свойств нейтрона и фундаментальных взаимодействий (рис. II.2.4). Основная идея заключается в использовании гигантских электрических полей нецентросимметричного кристалла. Величина полей на всем пути нейтрона через кристалл составляет $10^8 - 10^9 \text{ В/см}$, что более чем в 10^4 раз превышает поля,

достижимые в лаборатории обычными методами. При поиске ЭДМ нейтрона возможно достижение точности $d_n \sim (2-3) \times 10^{-27} e \text{ см}$ с использованием нового класса кристаллов (BSO, BGO).

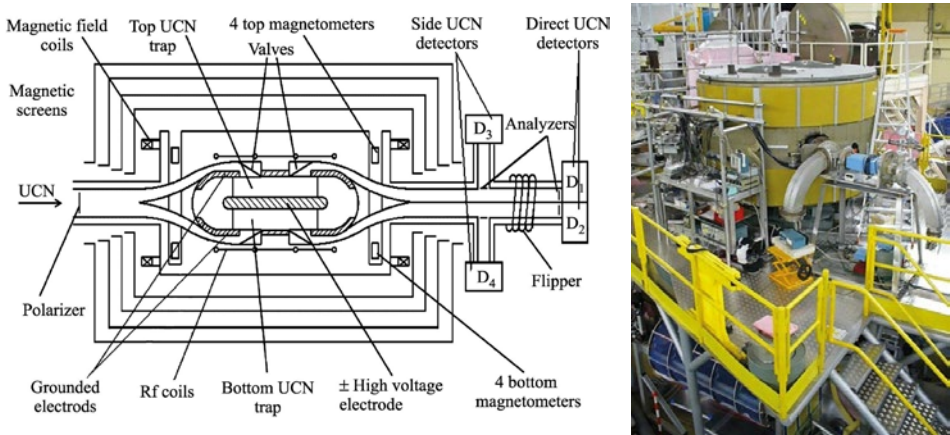


Рис. П.2.3. Слева — схема ЭДМ установки. Справа — ЭДМ-спектрометр ПИЯФ на реакторе ILL (тестовый эксперимент)

Установка для измерения времени жизни нейтрона с использованием магнитного хранения УХН (МТ)

Проведение эксперимента заключается в измерении времени жизни нейтрона методом хранения УХН в магнитной ловушке, изготовленной с использованием постоянных магнитов (рис. П.2.5). Магнитное удержание нейтронов позволяет исключить соударение нейтронов со стенками. В магнитной ловушке УХН определенной поляризации отражаются магнитным барьером и не испытывают соударений со стенками. Задача данного эксперимента — достичь статистической чувствительности в измерении времени жизни нейтрона на уровне 0.3 с.

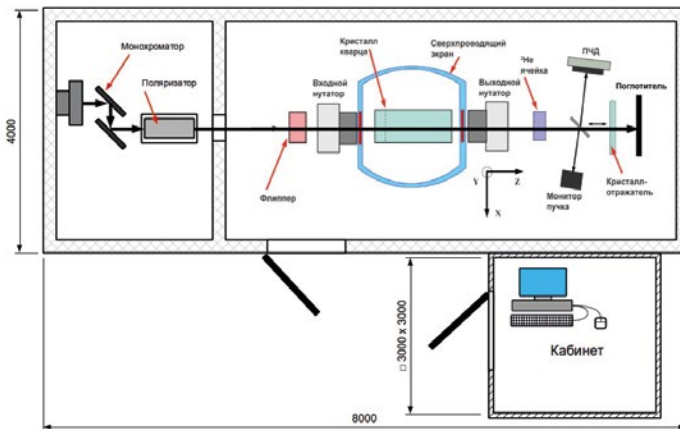


Рис. П.2.4. Схема установки DEDM по поиску ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом

Большая гравитационная ловушка для измерения времени жизни нейтрона (GT)

Увеличение точности в измерении времени жизни нейтрона позволит проверить справедливость теоретических моделей нуклеосинтеза в ранней Вселенной и справедливость Стандартной модели элементарных частиц. В установке (рис. П.2.5) используется принцип гравитационного затвора для удержания УХН в материальной ловушке. Объем хранения УХН в новой ловушке примерно в 4 раза больше, чем в предыдущей. Ожидается, что точность измерения времени жизни нейтрона в данной установке составит 0.2 с.

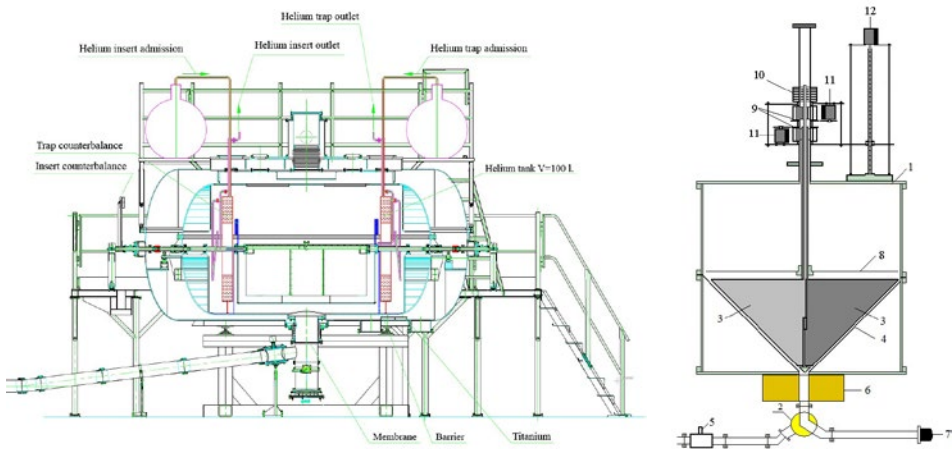


Рис. П.2.5. Слева — общий вид гравитационной ловушки для измерения времени жизни нейтрона. Справа — схема экспериментальной установки времени жизни нейтрона с использованием магнитного хранения. 1 — вакуумная камера, 2 — переключатель направления движения УХН, 3 — вращающиеся шторки, 4 — магнитная ловушка, 5 — шибер нейтронов, 6 — электромагнитный затвор УХН, 7 — детектор УХН, 8 — крышка-отражатель нейтронов

Установка «Бета-распад нейтрона»

Основная цель эксперимента — измерение электронной асимметрии β -распада нейтрона с относительной точностью $(1-2 \times 10^{-3})$. Основу экспериментальной установки (рис. П.2.6) составляет сверхпроводящий соленоид с напряженностью магнитного поля 0.35 Тл в области однородного поля и 0.80 Тл в области магнитной пробки при токе 1000 А. Корреляционный коэффициент в β -распаде нейтрона измеряется за счет магнитной коллимации угла вылета электрона и усреднения по углам вылета нейтрино. Магнитная коллимация осуществляется магнитной пробкой, а усреднение по углам вылета нейтрино выполняется благодаря сбору всех протонов от β -распада нейтрона с помощью распределенного электрического потенциала. Создание поляризации нейтронного пучка и ее анализ предлагается осуществлять с помощью суперзеркального многощелевого поляризатора. Используется времяпролетная методика с прерывателем пучка и селектором скоростей. Это позволит фиксировать место распада нейтрона. Применение скрещенных электрических и магнитных полей позволяет развести протоны и электроны.

Зная точку распада нейтрона и используя времяпролетную методику для протонов, можно измерить продольный импульс протона. Это позволяет перейти к измерению нейтринной асимметрии. Пучок нейтронов попадает в область распада, ограниченную цилиндрическим электродом. Все протоны вытягиваются из области распада нейтронов электрическим полем и попадают на протонный детектор. Электроны движутся на электронный детектор.

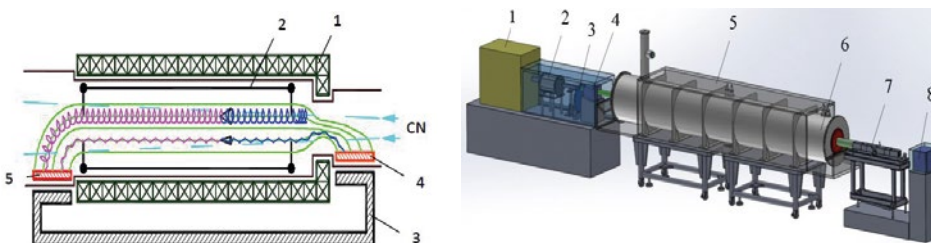


Рис. П.2.6. Слева — схема эксперимента «Бета-распад нейтрона». 1 — сверхпроводящий соленоид, 2 — цилиндрический электрод, 3 — железное ядро, 4 — детектор электронов, 5 — детектор протонов. Справа — нейтронный приборный комплекс. 1 — суперзеркальный поляризатор, 2 — монохроматор, 3 — прерыватель, 4 — спин-флиппер, 5 — магнитный экран, 6 — сверхпроводящий соленоид, 7 — устройство для измерения поляризации пучка, 8 — ловушка пучка

Установка «Нейтрино»

Экспериментальный поиск возможных осцилляций нейтрино в стерильное состояние проводится уже на протяжении многих лет. Этому посвящены многочисленные эксперименты на ускорителях, реакторах, на искусственных нейтринных источниках. Стерильное нейтрино является кандидатом в частицы темной материи. Гипотеза осцилляций в стерильное состояние может быть проверена прямым измерением зависимости нейтринного потока и нейтринного энергетического спектра на различных расстояниях в диапазоне 6–12 м.

Реактор ПИК открывает замечательные возможности для таких исследований благодаря компактной зоне и большой мощности реактора. Детектирование реакторных антинейтрино основано на реакции обратного β -распада и использовании жидкого сцинтиллятора с гадолинием. Фотоумножителями регистрируются два последовательных события: мгновенная вспышка от позитрона и аннигиляционных γ -квантов, каждый с энергией 511 кэВ, а после — задержанный сигнал от γ -квантов реакции ($n\text{Gd}, \gamma$) с рожденным нейтроном. Энергетический спектр антинейтрино восстанавливается из энергетического спектра позитронов. Детектор будет расположен в главном зале под транспортным коридором, где имеется наилучшая защита от космического излучения (рис. П.2.7). Минимальное расстояние по прямой до активной зоны составит порядка 6 м, максимальное — 15 м.

Подготовка эксперимента была начата на реакторе ВВР-М и продолжена на реакторе СМ-3. После пуска реактора ПИК планируется проводить основные измерения на нем. Ожидаемая скорость счета антинейтринных событий для детектора объемом 2 м^3 на расстоянии 8 м от активной зоны реактора ПИК может составлять ~ 800 в сутки.

Поиск зеркальной темной материи в лабораторном эксперименте с ультрахолодными нейтронами

Из-за нарушения пространственной инвариантности в слабом взаимодействии наш мир оказался левым. Причина такого неравноправия левого и правого неизвестна. Стандартная модель успешно объясняет, как устроено слабое взаимодействие, но не объясняет, почему выбор пал на левый (V-A) вариант теории. В принципе, если существует левая асимметрия, то почему не может существовать правая, т. е. ее зеркальное отображение?

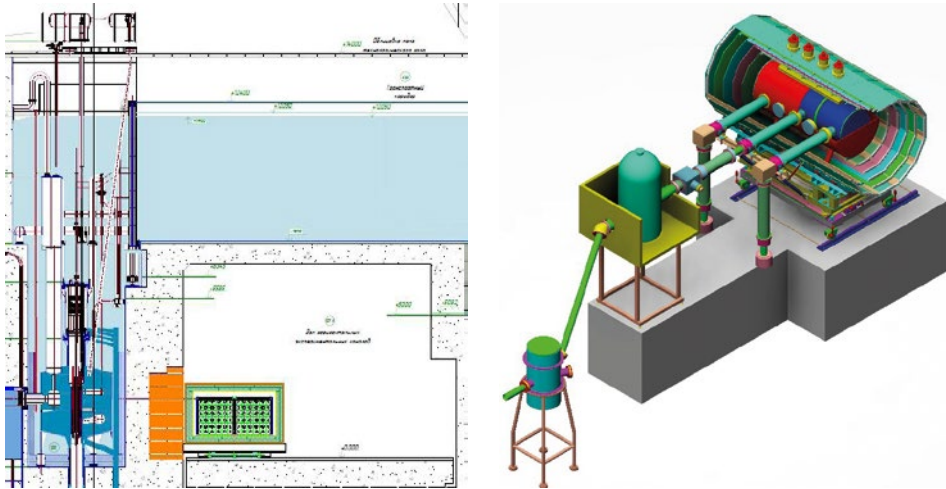


Рис. П.2.7. Слева — схема размещения детектора антинейтрино на реакторе ПИК. 1 — активная зона реактора ПИК (высота 50 см, диаметр 40 см), 2 — область перемещения детектора антинейтрино 6–15 метров от активной зоны реактора ПИК. Справа — установка для поиска переходов нейтрона в зеркальное (стерильное) состояние

Идея эксперимента состоит в следующем. Если нейтрон и его зеркальный партнер строго вырождены по массе и нет внешних полей, с которыми они взаимодействуют по-разному, то их энергетические состояния одинаковы и тогда возможны переходы или осцилляции нейтрон — зеркальный нейтрон. Ультрахолодный нейтрон хранится в ловушке за счет отражения от ее стенок, но если за время пролета от одной стенки к другой произойдет переход в зеркальное состояние, то зеркальный нейтрон пройдет через стенку ловушки без взаимодействия и покинет ловушку. Был проведен целый ряд экспериментов для проверки этой гипотезы. В эксперименте ПИЯФ был использован магнитный экран и основные элементы нового спектрометра для поиска ЭДМ нейтрона. Измерения проводились в ИЛЛ на пучке УХН, подготовленном ПИЯФ для ЭДМ-эксперимента. Эффект осцилляций не был обнаружен, предел на время осцилляций составил 448 с, а соответствующий предел на энергию смешивания составляет 1.4×10^{-18} эВ. На реакторе ПИК этот предел может быть значительно улучшен благодаря высокоинтенсивному источнику УХН (см. рис. П.2.7).

Установка исследования множественности осколков деления (FISCO)

Создаваемая установка располагается в зале наклонных каналов на нейтронном пучке НЭК-2 реактора ПИК (рис. П.2.8) и предназначена для корреляционных исследований в делении ядер при помощи разных методов: а) исследование распределений множественности нейтронов деления в зависимости от характеристик осколков деления и делящихся систем; б) изучение угловых и энергетических корреляций нейтронов, γ -квантов и третьих частиц в делении.

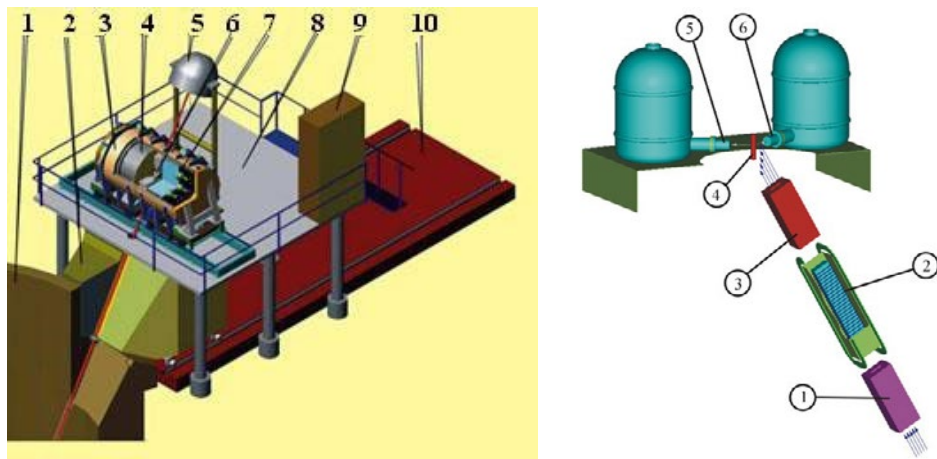


Рис. П.2.8. Слева — общий вид установки FISCO на пучке НЭК-2. 1 — корпус реактора ПИК, 2 — стандартный шиббер (возможно дополнительное размещение поляризатора), 3 — защита детектора множественности, 4 — сборка сцинтилляционных детекторов, 5 — ловушка пучка, 6 — детектор заряженных продуктов деления, 7 — фотоумножители, 8 — эстакада, 9 — приборная стойка, 10 — платформа. Справа — общая схема расположения полупроводниковых γ -спектрометров на наклонном канале реактора ПИК. Экспериментальное оборудование: 1 — поляризатор нейтронов, 2 — флиппер, 3 — коллиматор, 4 — ловушка, 5 и 6 — детекторы излучений

Несмотря на значительные успехи теории деления, предсказать наблюдаемые на практике величины с необходимой для практических приложений точностью не удастся. Так, например, при расчете реакторов и других критических систем точность определения выхода нейтронов должна быть не хуже 0.1 %. Делаются попытки создания систем обнаружения замаскированных ядерных материалов, которые строятся по принципу наблюдения различных корреляций между продуктами деления. Получение таких корреляций возможно при помощи метода Монте-Карло в рамках статистической теории. При этом экспериментальные данные об угловых и энергетических распределениях «мгновенных» нейтронов и γ -квантов деления являются средством для отладки и проверки выполняемых расчетов. Такая информация весьма важна для дальнейшего изучения механизма деления ядер, поскольку позволяет определять основные характеристики делящейся системы, такие как параметры плотности уровней для нейтрон-избыточных ядер; деформации обоих осколков вблизи «точки разрыва» и свойства «разрывных» нейтронов.

Спектрометр ядерных излучений (PROGRAS)

Установка состоит из логарифмического нейтроновода и установленных на его выходе (в зале наклонных каналов) двух высокочистых германиевых HPGe-детекторов (рис. II.2.8). Внутриканальный нейтроновод служит для вывода пучка тепловых нейтронов, обеспечивая при этом низкий уровень фона от быстрых нейтронов и γ -квантов благодаря эффективному использованию биологической защиты реактора.

Спектрометр ядерных излучений PROGRAS будет использоваться для проведения исследований структуры атомного ядра в (n,γ) -реакциях на тепловых нейтронах по спектрам $(\gamma-\gamma)$ -совпадений, нейтронно-радиационного анализа элементного и изотопного состава образцов, а также измерения сечения взаимодействия нейтронов с веществом.

Установка нейтронно-активационного анализа (ИНАА)

Предназначена с целью создания измерительного комплекса для проведения инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА, рис. II.2.9) на основе спектрометра γ -излучения и пневматической транспортной установки. Автоматизация процесса проведения ИНАА предполагается за счет транспортировки образцов из лаборатории в канал реактора ПИК для облучения и обратно в лабораторию с помощью пневмотранспортного устройства для дальнейших спектрометрических исследований. Также планируется сокращение времени доставки образца к месту облучения и обратно и исключение контакта персонала с радиоактивными исследуемыми образцами.

Установка позволит определять содержание Li, B, N, O, F, Ne, Al, V, Pb в образцах по их короткоживущим изотопам, что невозможно сделать методами обычного нейтронно-активационного анализа. Это открывает уникальную возможность определять эти элементы в сверхтвёрдых и жаростойких сплавах, от состава которых очень сильно зависят их свойства, а также исследовать геологические образцы и биологические объекты.



Рис. II.2.9. Общий вид пневматической транспортной установки и стойки управления (прототип)

*И.2.в. Импульсный нейтронный источник и спектрометр
ГНЕЙС в НИЦ «КИ» — ПИЯФ*

Основные особенности нейтронного комплекса

Импульсный нейтронный источник действует с 1975 г. на базе протонного синхроциклотрона СЦ-1000 [1]. Сброс протонов с энергией 1 ГэВ на свинцовую мишень с расположенным рядом полиэтиленовым замедлителем дает импульс нейтронов с малой длительностью ~10 нс и средней интенсивностью 3×10^{14} н/с. При этом формируются как пучки № 1–4 с преобладанием медленных и резонансных нейтронов с энергиями ниже 100 кэВ, так и пучок № 5, состоящий из нейтронов со спектром типа «spallation» («скалывание») с энергиями от 100 кэВ до 1000 МэВ. При этом спектрометр ГНЕЙС обладает примерно теми же характеристиками, что аналогичные зарубежные установки LANSCE (США) и n_TOF (ЦЕРН), в которых используются такие же источники нейтронов. Только на этих трех установках проводятся значимые спектроскопические нейтронные исследования, охватывающие максимально широкий диапазон энергий нейтронов — от тепловых до 1000 МэВ. В России в настоящее время для ядерно-физических исследований с использованием нейтронной времяпролетной спектроскопии в области энергий выше нескольких эВ доступны только 3 импульсных нейтронных источника (и спектрометры на их базе): ГНЕЙС (ПИЯФ, Гатчина), ИРЕН (ОИЯИ, Дубна) и ММФ (ИЯИ, Троицк).

Программа фундаментальных и прикладных исследований

На спектрометре ГНЕЙС выполнялись и выполняются многочисленные фундаментальные и прикладные исследования. Так, медленные нейтроны использовались для изучения особенностей процесса ядерного деления в измерениях асимметрии выхода легких осколков относительно импульса падающего нейтрона в реакции (n, f) на ядре ^{235}U . Продолжающиеся исследования реакции $(n, \gamma f)$ на ядрах ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu на резонансных нейтронах дают ценную информацию о структуре двугорбого барьера деления. Прецизионные измерения полных сечений взаимодействия нейтронов с энергиями 1 эВ — 10 кэВ с изотопами свинца позволили уточнить электрическую поляризуемость нейтрона. Многие из измеренных сечений деления ядер ^{208}Pb , ^{209}Bi , ^{232}Th , ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{243}Am нейтронами промежуточных энергий 1–200 МэВ были получены впервые. Примером использования спектрометра ГНЕЙС в прикладных работах служит создание испытательного стенда для изучения радиационной стойкости электронной компонентной базы к естественным нейтронным потокам. Из действующих в настоящее время в России нейтронных источников только нейтроны в пучке № 5 спектрометра ГНЕЙС обладают спектром, максимально близким к спектру атмосферных нейтронов космического происхождения в интервале энергий нейтронов 1–1000 МэВ.

Исследования, выполняемые на спектрометре ГНЕЙС в настоящее время, в значительной степени инициированы интересом, который во многих развитых странах проявляется к разработкам ядерных энергетических установок следующего поколения, в том числе — гибридных, с приводом от ускорителей (ADS — Accelerator Driven System), проектам по трансмутации

ядерных отходов и т. д. Эти разработки привели к повышению требований к точности ядерно-физических констант (нейтронных сечений, а также дифференциальных характеристик продуктов ядерных реакций, индуцированных нейтронами). За рубежом соответствующие измерения проводятся или планируются не только на существующих установках LANSCE и n_TOF, но и на создаваемых в последние годы высокоинтенсивных нейтронных источниках в США (SNS), в Европе (ESS), в Японии (JPARC).

С 2014 года выполняются измерения угловых распределений осколков деления ядер нейтронами с энергиями 1–200 МэВ, которые до некоторой степени являются продолжением ранее выполнявшейся и ныне возобновленной программы по измерению сечений деления ядер в этом же энергетическом диапазоне. К настоящему времени данные по угловым распределениям опубликованы для ядер ^{209}Bi , $^{\text{nat}}\text{Pb}$, ^{232}Th , ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np , ^{239}Pu , при этом большая часть из них получена впервые. Эти результаты имеют также большое научное значение, так как открывают новые возможности для получения информации о динамике деления и особенностях протекания ядерных реакций при высоких энергиях [2]. Следующим этапом исследований могут быть измерения массовых и энергетических распределений осколков деления ядер актинидов в том же диапазоне энергий падающих нейтронов.

Перспективы развития

Спектрометр по времени пролета ГНЕЙС в настоящее время продолжает активно использоваться в нейтронных ядерно-физических исследованиях, находясь в группе мировых лидеров в соответствующей области нейтронной физики и оставаясь единственной в России действующей установкой на источнике нейтронов типа «spallation». Подготовлены предложения по модернизации поддерживающего характера протонного ускорителя СЦ-1000, нейтронного источника на его базе и лабораторного комплекса нейтронного спектрометра ГНЕЙС. Модернизация нацелена на расширение круга решаемых задач, повышение точности получаемых данных и расширение доступности для исследователей.

Ссылки

- [1] О. А. Щербаков и др. *Испарительный источник нейтронов ГНЕЙС*. ЭЧАЯ. **47**, 137–141 (2018).
- [2] A. S. Vorobyev et al. *Angular distributions and anisotropy of fragments from the neutron-induced fission of ^{237}Np in the energy range of 1–200 MeV: Measurement data and model calculations*. JETP Letters. **110**, 242–249 (2019).

II.3. Развитие центра нейтронных исследований в ИЯИ РАН

Предмет исследований и ситуация в мире

В мире существует несколько импульсных источников нейтронов на основе протонных ускорителей. В качестве примера действующих источников можно привести LANSCE (США), SNS (США), ISIS (Великобритания), JPARC (Япония). Недавно запущен новый импульсный источник CSNS в Китае, сооружается Европейский нейтронный источник ESS в Швеции.

Ведется проектирование источников в Индии и Южной Корее. В таких источниках нейтроны образуются при взаимодействии ускоренного пучка протонов с мишенями из тяжелых элементов за счет эффекта испарения (скалывания, spallation). Источники нейтронов на базе ускорителей протонов в настоящее время получили приоритетное развитие, поскольку: 1) не содержат делящегося вещества, и, следовательно, не попадают под ограничения, с этим связанные; 2) импульсный режим работы ускорителей позволяет формировать требуемую временную структуру нейтронных потоков, что расширяет возможности исследований.

Действующие программы

Институт ядерных исследований РАН располагает экспериментальной базой исследований на основе крупнейшего в России сильноточного ускорителя протонов с проектной энергией 600 МэВ и током до 0.5 мА [1]. Ускоритель обеспечивает работу нейтронного комплекса, в том числе исследования конденсированных сред, по ядерной физике, включая нейтрон-ядерные взаимодействия, комплекса по наработке радиоизотопов, исследовательского комплекса протонной терапии, а также экспериментального стенда для изучения воздействия ускоренных протонов на узлы радиоэлектронной аппаратуры. Ведется работа по развитию комплементарных неускорительных методов исследований современной физики. За 10 лет, с 2005 по 2014 г., коллективом, работающим на ускорителе, опубликовано более 300 работ [2].

В мире ускорители данного класса применяются главным образом в качестве основы источников нейтронов, которые, в свою очередь, используются как для фундаментальных, так и прикладных исследований. Нейтронный комплекс ИЯИ РАН включает в себя импульсный источник тепловых нейтронов ИН-06, импульсный источник быстрых, эпитепловых и тепловых нейтронов РАДЭКС и спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100. Имеется парк из трех современных рентгеновских дифрактометров (фирм STADI, HUBER, Germany) и мессбауэровский спектрометр (Россия). Следует отметить уникальность Центра коллективного пользования ИЯИ РАН, где возможна реализация всего спектра нейтронных исследований, изучения структуры и динамики конденсированных сред, в том числе и при экстремальных условиях, проведения исследований нейтрон-ядерных взаимодействий в интересах развития ядерной энергетики. Источники тепловых нейтронов ИН-06 и эпитепловых и тепловых нейтронов РАДЭКС взаимодополняют друг друга, используя более широкий спектр нейтронов, что не реализовано в других нейтронных центрах.

В настоящее время в ИЯИ РАН сформирован центр нейтронных и рентгенографических исследований для физики конденсированных сред, нанодиагностики, перспективных функциональных материалов и материалов нанотехнологий, материаловедения, геофизики при разных физических условиях (температурах, давлениях).

Импульсный источник нейтронов ИН-06

ИН-06 предназначен главным образом для исследований в области конденсированных сред. Он состоит из двух независимых источников нейтронов, расположенных каждый в своем боксе в общей биологической защите (см. рис. П.3.1). Физический пуск ИН-06 осуществлен в конце 1998 г.

Первый бокс ИН-06. В нем находится вольфрамовая мишень с водяным замедлителем, на которую в настоящее время подается пучок протонов от ускорителя. Для выведения пучков нейтронов из замедлителя к экспериментальным устройствам источник имеет семь каналов. При этом четыре канала направлены в экспериментальный зал, а три за пределы экспериментального корпуса. Малое количество каналов накладывает специфические требования к установкам и условиям выведения нейтронов: многофункциональность установок и, по возможности, раздвоение пучков нейтронов для увеличения количества используемых установок. Для повышения нейтронного потока в расчете на один протон первичного пучка завершается работа по созданию мишени с бериллиевым отражателем.

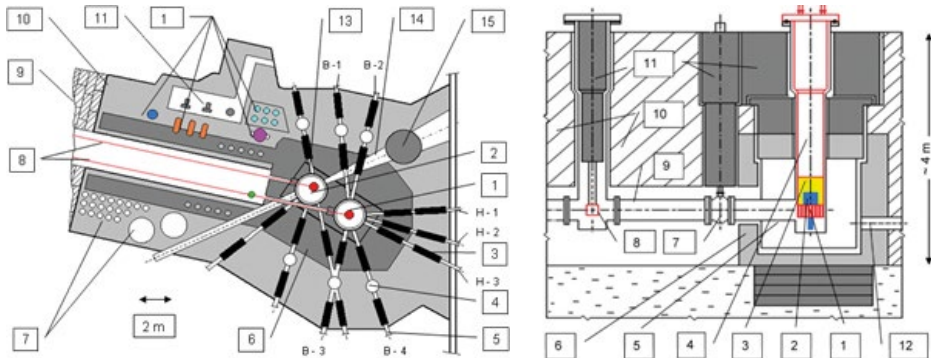


Рис. П.3.1. Слева — комплекс источников нейтронов ИН-06. 1 — бокс импульсного источника нейтронов, 2 — второй бокс, 3 — шиберы, 4 — вертикальные проходки на нейтронноводах диаметром 0.9 м для установки дополнительного экспериментального оборудования, 5 — нейтронноводы диаметром 0.2 м, 6 — железная защита, 7 — промежуточные хранилища газовых баков и ампул (модулей) нейтронного источника и ловушки пучка, 8 — протонные пучки, 9 — разборная защита, 10 — бетонная защита, 11 — помещение и оборудование специальной вентиляции, 12 — оборудование первого контура охлаждения (насосы, фильтры, теплообменник), 13 — тепловая защита, 14 — широкоапертурный канал, 15 — шибер широкоапертурного канала. Справа — принципиальная схема импульсного источника нейтронов в защитном боксе. 1 — мишень, 2 — замедлители, 3 — бериллиевый отражатель, 4 — мишенный модуль, в состав которого входят вольфрамовая мишень, замедлители и защитные стальные пробки, 5 — газовый бак (диаметр ~ 1500 мм), 6 — тепловая защита, 7 — дистанционно-разъемное уплотнение, 8 — датчик положения пучка, 9 — ионопровод, 10 — железная защита, 11 — съемные стальные защитные пробки, 12 — нейтронновод

Второй бокс ИН-06. В настоящее время свободен. Разработка мишенного устройства для второго бокса ИН-06 позволила бы в перспективе задействовать дополнительно предусмотренные проектом и существующие в пределах здания экспериментального комплекса восемь каналов. Рассматривается возможность создания на базе второго бокса источника холодных и ультрахолодных нейтронов с суперзеркальными нейтронноводами. В качестве альтернативы прорабатываются вопросы создания демонстрационного стенда — прототипа электроядерной установки для решения проблем замыкания ядерного энергетического цикла. Наличие нейтронноводов в массиве радиационной защиты позволило бы одновременно использовать стенд в качестве источника нейтронов.

Создание второго источника позволит увеличить число действующих нейтронных каналов и, соответственно, спектрометров более чем в два раза, что позволило бы создать полновесный центр коллективного пользования для научных организаций Москвы и Московского региона.

Импульсный источник нейтронов РАДЭКС

Вольфрамовая мишень источника РАДЭКС (РАДиационный ЭКСперимент) оптимизирована для поглощения протонного пучка с энергией ~ 250 МэВ и средним током до 150 мкА. Горизонтальный и вертикальный вакуумные нейтроноводы позволяют проводить исследования по времени пролета на пролетных расстояниях до 50 м. При регулировании длительности импульса тока пучка ускорителя в диапазоне от 0.25 мкс до нескольких десятков микросекунд потоки нейтронов составляют 4×10^{12} – 9×10^{14} н/с, а энергетическое разрешение 0.15–2 %. Физический пуск РАДЭКС осуществлен в конце 1998 г.

С учетом сложившихся к настоящему времени возможностей ускорения протонов эта установка была оптимизирована на пропускание протонов с энергиями до 350 МэВ (так называемая «сквозная ловушка») с выносом устройств гашения вторичных частиц на расстояния до 50 метров. Таким образом, был создан дополнительный импульсный источник нейтронов с нейтроноводами и пролетными базами до 50 метров, что позволило использовать эту систему как спектрометр нейтронов по времени пролета (ВПНС-РАДЭКС, рис. П.3.2).

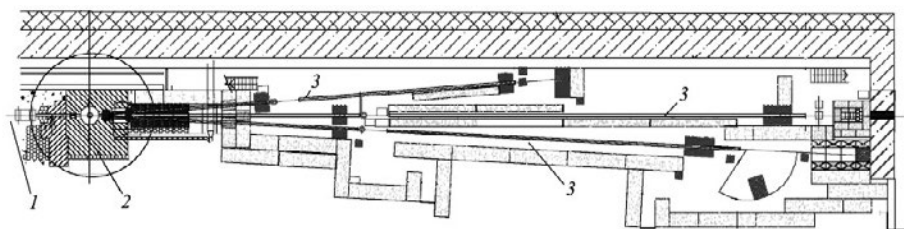


Рис. П.3.2. Схема ВПНС-РАДЭКС: 1 — протонный пучок, 2 — импульсный нейтронный источник в защите, 3 — горизонтальные времяпролетные каналы с экспериментальными зонами и ловушками пучка

Пучок быстрых нейтронов канала РАДЭКС

Установка РАДЭКС представляет собой также уникальный источник быстрых нейтронов. При энергии протонов до 350 МэВ наличие «толстой» вольфрамовой мишени позволяет получать пучок нейтронов с энергиями вплоть до предельной, равной энергии протонного пучка. Хотя энергетический спектр нейтронов канала РАДЭКС широк (он включает все энергии вплоть до предельной, равной энергии первичного пучка протонов), одновременная регистрация всех вторичных частиц в реакциях взаимодействия нейтронов с малонуклонными системами позволяет восстановить энергию первичного нейтрона для каждого зарегистрированного события. На рис. П.3.3 показан реконструированный спектр нейтронов, падающий на дейтериевую мишень и вызывающий коррелированные события в реакции $n + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p$.

Таким образом, данные об исследуемой реакции, вызванной быстрыми нейтронами, могут быть получены в широком диапазоне энергий нейтронов (10–350 МэВ), а разброс энергий будет определяться только шириной энергетического интервала суммирования событий, т. е. статистикой эксперимента.

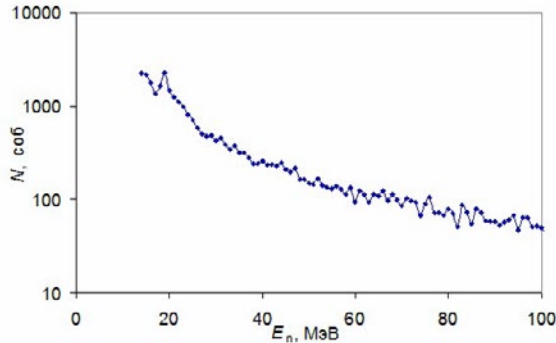


Рис. П.3.3. Энергетический спектр первичных нейтронов, вызвавших реакцию $n + d \rightarrow p + n + n$ в дейтериевой мишени

Спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100

В 2000 г. запущен 100-тонный спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100 (см. рис. П.3.4). При длительности импульса протонного пучка 1.5–2 мкс и частоте следования 50 Гц получены рекордные для данного класса установок параметры: разрешение около 27 %, что близко к теоретическому значению (26 %), и интенсивность $\sim 10^{14}$ н/с. Достоверный энергетический диапазон соответствует 1 эВ — 2 кэВ. Уменьшение длительности импульса до 0.25–0.5 мкс позволяет расширить диапазон измерений до 30–50 кэВ. При относительно невысоком разрешении СВЗ-100 обладает уникальной чувствительностью, что позволяет получать нейтронные данные на микрообразцах разного изотопного состава и дает возможность исследования элементного состава нано- и биоматериалов, извлекать данные нейтрон-ядерных взаимодействий на ультрамалых образцах радиоактивных ядер — продуктов цепочки превращений делящихся материалов ядерной энергетики.

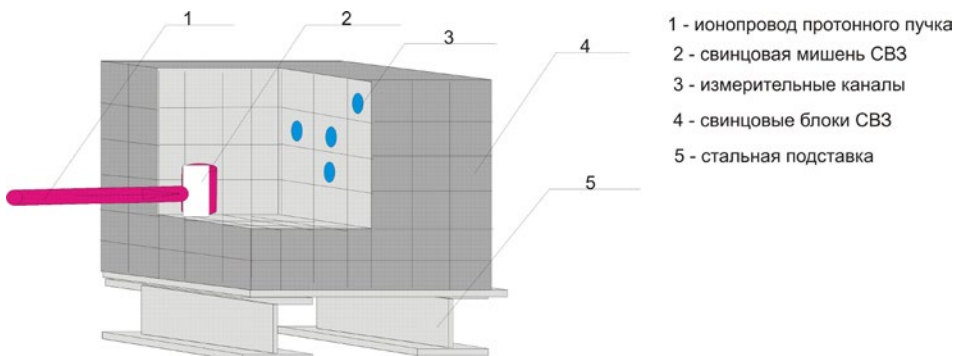


Рис. П.3.4. Спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100

Принцип действия СВЗ основан на специфических свойствах свинца как рассеивателя нейтронов: ниже порога неупругого рассеяния $E_{th} = 0.57$ МэВ нейтроны испытывают только упругое рассеяние с сечением около 10 барн. Вклад других процессов пренебрежимо мал. Поэтому нейтрон, при блуждании в большом массиве свинца, теряет энергию малыми порциями в многочисленных актах упругого рассеяния. В результате средняя энергия нейтрона однозначно связана со временем замедления, измеряя которое мы фактически измеряем энергию. Благодаря очень высокой светосиле (высокие потоки нейтронов) СВЗ позволяет измерять нейтронные сечения для образцов массой порядка микрограмм, что практически невозможно в технике времени пролета, где потоки нейтронов в 10^3 – 10^4 раз ниже. Эти особенности спектрометров по времени замедления в свинце определяют естественную нишу для их эффективного применения: измерение нейтронных сечений элементов, доступность которых в макроколичествах затруднительна, в частности — актинидов.

Научная программа

На импульсном источнике тепловых нейтронов ИН-06 ИЯИ РАН действуют и изготавливаются нейтронографические установки первой очереди:

«Горизонт» — рефлектометр с горизонтальной плоскостью рассеяния нейтронов для исследования поверхностей и наноструктур (материалов нанотехнологий). Установка изготавливается совместно с НИЦ «КИ» — ПИЯФ и в настоящий момент имеется еще только одна подобная на импульсном реакторе ИБР-2 в России. Аналог имеется за рубежом в Англии на импульсном источнике ISIS.

«Геркулес» — дифрактометр-спектрометр для исследования структуры и фазовых переходов веществ при экстремальных условиях — высоком давлении до 100 кбар и низких температурах до 12 К, включая исследования наводораживания образцов (материалов водородной энергетики) в ходе эксперимента (in situ). Установка изготавливается совместно с НИЦ «КИ» — ПИЯФ и ИФВД РАН.

«МНС» — многоцелевая установка для определения структуры, включающая в себя блоки детектирования методом фокусировки по времени пролета, высокоинтенсивный блок дифракции и блок малоуглового рассеяния. Установка изготавливается совместно с ФИАН.

«Кристалл» — дифрактометр для исследования структуры монокристаллов при различных температурах и давлении.

На импульсном источнике нейтронов РАДЭКС начата отработка методики измерений по физике конденсированных сред на макетах нейтронографических установок ИН-06 и разработка новых установок, использующих эпитепловой («жесткий») спектр нейтронов и не имеющих аналогов в России в силу возможности их реализации только на импульсных источниках нейтронов с «жестким» спектром.

На импульсном источнике нейтронов РАДЭКС можно успешно проводить ряд исследований в области ядерной физики по методу времени пролета. Параметры времяпролетного спектрометра (ВПНС) на источнике РАДЭКС, достигнутые в настоящее время, позволяют проводить исследования по программе изучения характеристик нейтронных резонансов

деформированных ядер (лантанидов и трансуронов) и средних нейтронных сечений для нужд астрофизики и трансмутации. Кроме того, можно планировать проведение экспериментальных исследований по более широким программам, принятым в других исследовательских центрах, в том числе: а) нейтронная спектроскопия; б) деление ядер; в) рассеяние нейтронов ядрами и поляризуемость нейтрона; г) определение длины рассеяния нейтрон-электрон и нейтрон-нейтрон; д) гамма-спектроскопия; е) реакции (n, α) и (n, p) ; ж) исследование сверхтонких эффектов в нейтронных резонансах и эффектов нарушения четности в нейтронных резонансах.

На пучке быстрых нейтронов канала РАДЭКС ведутся исследования реакций взаимодействия нейтронов с малонуклонными системами. В частности, было проведено исследование реакции $nd \rightarrow ppn$ в широкой области энергии нейтронов (10–60 МэВ), получены новые данные о параметрах нуклон-нуклонного взаимодействия и роли $3N$ -взаимодействий в реакциях с тремя нуклонами в конечном состоянии.

Ближайшие планы

В настоящее время ускоритель протонов обеспечивает следующие параметры пучка: энергия — до 350 МэВ, импульсный ток — до 16 мА, частота повторения импульсов — до 50 Гц, длительность импульса — до 200 мкс, средняя интенсивность ускоренного пучка — до 150 мкА при энергии 160 МэВ и до 50 мкА при энергии 209 МэВ. Относительно средней интенсивности следует отметить, что все импульсные системы ускорителя, включая инжектор и систему ВЧ-питания, работают с частотой повторения 50 Гц. Величина среднего тока, которая реально получается при максимально возможных импульсном токе, частоте повторения и длительности импульса, составляет 150 мкА. Увеличение частоты повторения импульсов тока пучка до проектной величины 100 Гц позволит удвоить интенсивность ускоряемого пучка. Увеличение энергии пучка определяется возможностями поступления клистронов.

Будет продолжено развитие экспериментальной базы и проведены исследования структур перспективных функциональных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях).

Также будут продолжены работы по нейтрон-ядерным взаимодействиям, в том числе определены энергии и кластерные структуры высоковозбужденных состояний легких ядер, что важно для понимания и адекватного описания механизмов ядерных реакций и структуры ядер, будут получены новые данные о параметрах нуклон-нуклонного взаимодействия в различных реакциях и в широкой области энергии ядер-снарядов.

Необходимо обновление и развитие средств детектирования частиц, электронного оборудования для сбора экспериментальных данных и компьютерного оборудования для накопления и обработки массивов данных.

Перспективное развитие нейтронного комплекса ИЯИ РАН

Ускоритель ИЯИ РАН является единственным сильноточным ускорителем протонов в России. Параметры ускорителя (энергия и интенсивность), в силу исторических причин, ниже, чем в современных зарубежных многоцелевых нейтронных центрах, и ниже проектных значений,

однако и имеющиеся пучки протонов и вторичных нейтронов предоставляют возможности проведения широкого круга как фундаментальных, так и прикладных исследований. Более того, модернизации систем ускорителя обеспечила бы повышение как энергии, так и интенсивности пучков протонов и нейтронов. Представляются важными реализация возможностей повышения энергии ускоренного пучка до 350 МэВ, а интенсивности — до 150 мкА, и обеспечение устойчивой работы комплекса импульсных нейтронных источников с указанными параметрами при проведении исследований. Сформировавшиеся и развиваемые многоцелевые направления исследований на базе сильноточного ускорителя протонов ИЯИ РАН отвечают передовым мировым тенденциям получения новых данных, способствующих поступательному технологическому развитию.

Модернизация ускорителя должна вестись с использованием современных технологий. В частности, новые резонаторы должны быть сверхпроводящими, современного дизайна; возможна замена части уже установленных нормальнопроводящих резонаторов на экономичные и эффективные сверхпроводящие структуры. Такое развитие линейного ускорителя ИЯИ находится в синергии с развиваемым в ОИЯИ (в сотрудничестве с ИТЭФ и МИФИ) проектом восстановления и развития технологий высокочастотной сверхпроводимости в РФ. Эти разработки производятся с перспективой использования в проектах модернизации инжекторов комплекса NICA и создания тяжелоионного ускорителя-драйвера для проекта DERICA, и ускоритель ИЯИ является другим возможным «получателем» этих технологий.

Ссылки

[1] Сильноточный линейный ускоритель ИЯИ РАН. <http://www.inr.ru/rus/dokument/buk-slu.pdf>.

[2] Список публикаций ИЯИ РАН. <http://www.inr.ru/~ouk/Biblio.htm>.

II.4. Программы развития компактных нейтронных источников

Компактные источники нейтронов (КИН) — это активно развивающаяся тенденция в мировой практике. В настоящее время в мире уже действует ряд компактных источников нейтронов на основе либо протонных, либо электронных ускорителей: LENS в Университете Индианы (США), CPNS в Университете Циньхуа (Китай), RANS в институте RIKEN (Япония), FRANZ (Германия), SARAF (Израиль), MUNES (Италия) и другие.

Разработка отечественной программы компактных источников нейтронов имеет целью создание сети таких источников в российских университетах и клиниках. Созданные на базе компактного источника нейтронов теплового и холодного спектров центры коллективного пользования могут стать крупными региональными междисциплинарными исследовательскими центрами, объединяющими группы из разнопрофильных исследовательских институтов и университетов, и обеспечат площадку для подготовки высококвалифицированных научных кадров.

С помощью КИН можно получать значимые результаты в области материаловедения с использованием таких методов, как дифракция,

малоугловое рассеяние нейтронов и нейтронная радиография. КИН могут быть использованы в медицине для бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ), где требуемые интенсивности нейтронного потока можно достичь при токе пучка ~ 10 мА. Для нейтронно-активационного анализа (определение количества элемента в образце) можно обеспечить чувствительность вплоть до 10^{-10} г. Базовые ускорители КИН могут быть использованы в составе компактных установок для легирования полупроводниковых приборов с целью прецизионного управления характеристиками переключения. Для данных работ необходимы пучки протонов с энергией 0.5–3.5 МэВ и током пучка менее 1 мА.

На компактных источниках нейтронов возможно размещение инструментов для физики ядра и ядерной спектроскопии и проведение соответствующих экспериментов (см. пример в разделе П.4.а). Импульсный характер источника и возможность получения нейтронов различного энергетического спектра позволяет использовать данный источник для работ, аналогичных проводимым в настоящее время на источниках типа ГНЕЙС (НИЦ «КИ» — ПИЯФ, Гатчина, см. раздел П.2.в), т. е. с использованием множества отработанных методик по исследованию процессов деления ядра, угловых корреляций в реакции деления тяжелых ядер и ядерной спектроскопии, как основного источника информации о свойствах ядер и ядерных взаимодействиях.

П.4.а. Компактный источник нейтронов ИЯФ СО РАН

Компактный источник нейтронов ИЯФ СО РАН предназначен для получения стационарных пучков тепловых, эпитепловых, быстрых или моноэнергетических нейтронов высокой интенсивности [1]. Основная цель этой разработки связана с получением пучка эпитепловых нейтронов с плотностью потока 10^9 см⁻² с⁻¹ для бор-нейтронозахватной терапии — перспективной методики лечения злокачественных опухолей. При этом компактность источника и инфраструктуры должна стать фактором, упрощающим продвижение технологии в клинических условиях. Физический проект компактного источника нейтронов был предложен в 1998 г. [2]. Через 10 лет установка была введена в эксплуатацию, на ней был получен протонный пучок с током 0.1 мА и осуществлена генерация нейтронов. За последующие 10 лет после проведения научных исследований осуществлена модернизация ускорителя и ток протонного пучка увеличен в 100 раз — до 10 мА.

Конструктивные особенности

Источник нейтронов размещен в радиационно-защищенном зале площадью всего 65 м² со стенами из тяжелого бетона толщиной 1.2 м. Для получения стационарного пучка протонов или дейтронов используется оригинальный электростатический ускоритель тандемного типа, к которому со временем прижилось название «ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией» (см. рис. П.4.1). Ускоритель отличается высоким темпом ускорения — 25 кВ/см, широкий диапазон энергий пучков — от 0.6 до 2.3 МэВ, широкий диапазон тока — от 0.5 до 10 мА, высокая стабильность и монохроматичность энергии — 0.1 %, высокая стабильность тока — 0.5 %.

Нейтроногенерирующая мишень трехслойная: тонкий слой чистого лития кристаллической плотности для генерации нейтронов; тонкий слой материала, стойкого к радиационному блистерингу, для поглощения протонов; тонкая медная подложка с каналами охлаждения турбулентным потоком воды для теплоотвода. Мишень отличается простотой, длительным сроком эксплуатации и высокой плотностью мощности принимаемого пучка ионов — до 5 кВт/см^2 . Литий контролируемой толщины от 1 до 300 мкм напыляют на подложку мишени термическим способом в вакууме на отдельном автоматизированном стенде. После напыления мишенный узел закрывают шиббером для сохранения вакуума, отсоединяют от стенда, переносят на установку и подсоединяют к ней.

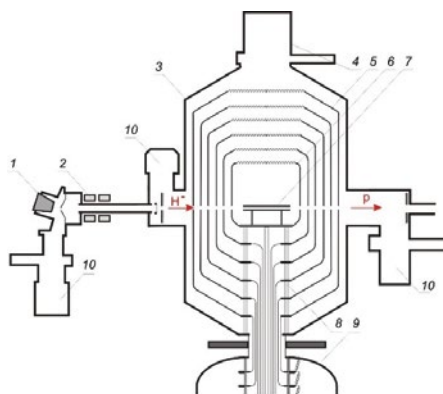


Рис. П.4.1. Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией: схема (слева), фотография (справа): 1 — источник H^+ , 2 — магнитные линзы, 3 — ускоритель, 4 — криогенный насос, 5 — промежуточные электроды, 6 — высоковольтный электрод, 7 — газовая обдирочная мишень, 8 — проходной изолятор, 9 — высоковольтный источник питания, 10 — турбомолекулярные насосы

Статус проекта

Проведенные исследования показали высокую эффективность КИН для подавления роста клеток определенных новообразований в культурах клеток человека и для излечения лабораторных животных и домашних животных со спонтанными опухолями. В настоящее время, помимо установки в ИЯФ СО РАН, изготовлен и поставлен КИН для клиники в г. Сямьнь (Китай) — одной из первых шести клиник БНЗТ в мире.

На КИН в ИЯФ СО РАН был проведен и проводится ряд прикладных исследований в интересах ИТЭР и ЦЕРН. Конкретно, по ядерно-физической тематике было с высокой точностью измерено сечение реакции ${}^7\text{Li}(p,p'\gamma){}^7\text{Li}$ и выход гамма-квантов из толстой литиевой мишени при энергии протонов от 0.65 до 2.225 МэВ [3], что отлично иллюстрирует актуальность КИН для задач фундаментальной ядерной физики.

Перспективные проекты

В марте 2021 г. принято решение об использовании КИН для оснащения клиник БНЗТ в Российской Федерации [4]. КИН в ИЯФ СО РАН будет использован для сертификации и проведения клинических испытаний БНЗТ.

Замена водорода на дейтерий позволила получить пучок дейтронов (2.1 МэВ, 1.4 мА) и осуществить генерацию быстрых нейтронов на литиевой мишени. Выход нейтронов составил $2 \times 10^{12} \text{ с}^{-1}$; в ближайшее время планируется увеличить ток дейтронов до 5 мА.

Ссылки

[1] С. Ю. Таскаев. *Разработка ускорительного источника эпитепловых нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии*. Физика элементарных частиц и атомного ядра. **50**, 657–669 (2019).

[2] B. Bayanov et al. *Accelerator based neutron source for the neutron-capture and fast neutron therapy at hospital*. Nuclear Instr. and Methods in Physics Research. A **413**, 397–426 (1998).

[3] S. Taskaev et al. *Measurement of the ${}^7\text{Li}(p,p'\gamma){}^7\text{Li}$ reaction cross-section and 478 photon yield from a thick lithium target at proton energies from 0.65 to 2.225 MeV*. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. B **502** (2021) 85–94.

[4] Сайт Правительства РФ. URL: <http://government.ru/orders/selection/401/41771/>.

II.4.6. Проект DARIA (СПбГУ, ИПФ РАН, ИТЭФ, ОИЯИ)

В проекте DARIA (neutron source Dedicated to Academic Research and Industrial Application), разрабатываемом совместно СПбГУ, ИПФ РАН, ИТЭФ и ОИЯИ, предлагается строительство пилотного образца компактного источника нейтронов на базе линейного резонансного ускорителя [1, 2]. В течение 6 лет это позволит создать на его основе серийную установку для образовательных, медицинских учреждений и промышленности. Более того, разработка такого источника закладывает технологические основы сверхмощного нейтронного источника будущего поколения, который следует планировать к разработке к середине XXI века (см. также раздел II.3).

На основе предварительного анализа пользовательской востребованности различных методик предлагается следующий выбор. Протонный ускоритель, состоящий из ECR-источника и ускоряющих структур до 13 МэВ на средний ток более 5 мА, обеспечивающий формирование импульсной структуры пучка на мишени с высоким пиковым током более 50 мА (см. рис. II.4.2). В качестве инжектора протонного пучка будет использован уникальный электронно-циклотронный резонансный ионный источник, разработанный в ИПФ РАН (см. рис. II.4.3) [3–5]. Нагрев плазмы в нем осуществляется мощным излучением гиротрона на частоте 28 ГГц, обеспечивая рекордный для таких систем уровень удельного энергоклада свыше 100 Вт/см^3 . Высокая плотность плазмы (10^{13} см^{-3}) и температура электронной компоненты (50–100 эВ) обеспечивают возможность формирования чистых протонных пучков (без молекулярных ионов) с током до нескольких сотен миллиампер и эмиттансом, удовлетворяющим требованиям современных ускорителей. По характеристикам пучка на сегодняшний день такой источник не имеет аналогов в мире.

Для ускорения протонного пучка используется секция с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) на 1.5–2 МэВ и набор секций с трубками дрейфа. Разработка ускоряющих секций и каналов

транспортировки пучка ведется ИТЭФ — НИЦ «Курчатовский институт» (см. рис. П.4.2).

Для генерации нейтронов будет использоваться реакция столкновения протонов с ядрами бериллия, обеспечивающая выход нейтронов, достаточный для исследований в физике конденсированного состояния, при умеренном выделении тепла. Плотность потока нейтронов в импульсе может достигать 10^{15} н/с/см², что приравнивает компактный источник нейтронов по своим научным возможностям к исследовательским реакторам средней мощности типа ВВР. Энергия протонов будет ограничена сверху 13 МэВ, так как ее дальнейшее увеличение приведет к производству трития в мишенях, что нежелательно для источника, размещаемого, например, в образовательных учреждениях.

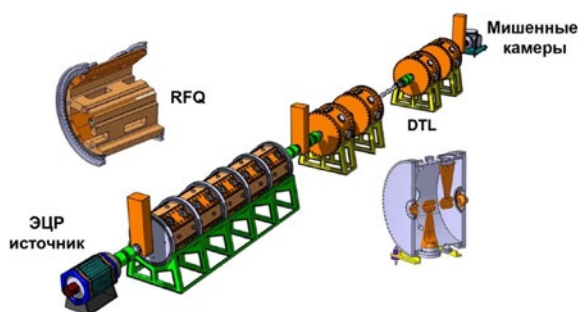


Рис. П.4.2. Схема компактного источника нейтронов на базе линейного ускорителя DARIA

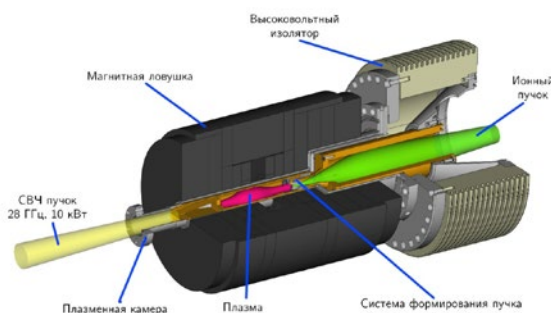


Рис. П.4.3. Электронно-циклотронный резонансный ионный источник, разработанный в ИПФ РАН

Научная программа

В базовом проекте DARIA предусмотрено 5 станций нейтронного рассеяния для физики конденсированного состояния и 3 станции для физики ядра и прикладных исследований.

Инструменты нейтронного рассеяния: а) дифрактометр нейтронов для исследования кристаллической и магнитной структуры вещества; б, в) установки малоуглового и ультрамалоуглового рассеяния для изучения наноструктур и нанообъектов; г) рефлектометр для изучения слоистых

структур и поверхности материалов; д) спектрометр для исследования фонных и магнанных спектров.

Инструменты для физики ядра, ядерной спектроскопии и приложений: а) установки исследования угловых корреляций в делении ядра поляризованными нейтронами, б) спектрометр ядерных излучений для исследования (n, γ)- и (n, γ)-реакций; в) установки нейтронной радиографии для исследования радиационной стойкости электронных компонентов и готовых изделий. Это позволит проводить следующие эксперименты:

1) Исследования радиационного захвата и реакции с вылетом заряженных частиц в (n, γ)- и (n, γ)-процессах. Для среднетяжелых ядер ($40 < A < 150$) в последние годы наметился прогресс в изучении индуцированных нейтронами реакций с вылетом заряженных частиц: протонов, альфа-частиц и т. д. Продиктовано это интересом как к фундаментальным астрофизическим задачам (происхождение элементов во Вселенной), так и к «практическим нуждам» реакторного материаловедения (механизмы радиационного повреждения материалов).

2) Исследования угловых корреляций при делении ядер поляризованными нейтронами, а именно: вылета легких заряженных частиц тройного деления, нейтронов и гамма-квантов деления. При делении ядер поляризованными нейтронами возникают TRI- и ROT-эффекты, изучение которых является новым направлением в физике деления и представляется очень перспективным для получения информации о наименее изученной стадии процесса — моменте разрыва ядерной материи.

Прикладная программа

Стоит отметить прикладную возможность использования источника для исследования радиационной стойкости материалов и изделий. Возможность генерации нейтронов широкого энергетического спектра (до 10 МэВ) позволяет исследовать радиационную стойкость, например компонентов элементной базы радиоэлектроники или готовых изделий, что имеет большое практическое значение.

Использование пучков протонов с энергиями от 1.5 до 10 МэВ позволит решать подавляющее большинство задач современной микро- и силовой электроники, связанных с регулированием времени жизни носителей заряда и обеспечением требуемых характеристик быстродействия и сочетания комплекса статических и динамических параметров. Важно отметить, что сегодня биполярные и биполярно-полевые кремниевые приборы, в технологии которых не используются меры по регулированию характеристик быстродействия, практически не имеют шансов как на внутреннем, так и на внешнем рынках. При этом наилучшие результаты могут быть получены с применением протонной обработки (в сравнении с электронным облучением и легированием золотом и платиной). Возможность применения протонной обработки в массовом производстве позволит отечественным предприятиям не только улучшить качество, но и существенно нарастить объем целого сегмента микроэлектронной продукции, осуществить реальное импортозамещение и выйти на международный рынок.

Установка на базе линейного ускорителя обеспечит эффективное производство изотопов ^{18}F и ^{15}O для использования в медицинских целях. Также

необходимо отметить, что ускорители на основе RFQ позволяют обеспечить потоки нейтронов, необходимые для БНЗТ.

Статус проекта

Разработка установки DARIA поддержана грантом РФФИ № 19-12-00363. ЭЦР-источник работает на стенде ИПФ РАН. В 2020 г. проведено измерение эмиттанса пучка при ускоряющем напряжении вплоть до 51 кВ и токе пучка от 50 до 100 мА [6]. Используя измеренные значения эмиттанса, на основе численного моделирования разработан канал ускорителя, обеспечивающий захват в режим ускорения 95 % тока пучка. Потери пучка происходят на низких значениях энергии, что обеспечивает отсутствие активации элементов ускорителя. Разработана конструкция резонаторов канала.

Ссылки

[1] S. Grigoriev, E. Iashina, K. Pavlov. *Spin-echo Small Angle Neutron Scattering for a Compact Neutron Source Daria*. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. **13** (2019) 1132–1134 [<http://dx.doi.org/10.1134/S1027451019060314>].

[2] G. Kropachev, T. Kulevoy, and A. Sitnikov. *The Proton Linac for Compact Neutron Source Daria*. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. **13** (2019) 1126–1131 [<http://dx.doi.org/10.1134/S1027451019060399>].

[3] V.A. Skalyga, A.F. Bokhanov, S.V. Golubev, I.V. Izotov, M.Yu. Kazakov, E.M. Kiseleva, R.L. Lapin, S.V. Razin, R.A. Shaposhnikov, S.S. Vybin. *Status of the gasdynamic ion source for multipurpose operation (GISMO) development at IAP RAS*. Review of Scientific Instruments. **90** (2019) 123308 [<http://dx.doi.org/10.1063/1.5128489>].

[4] V. Skalyga, I. Izotov, S. Golubev, A. Sidorov, S. Razin, A. Vodopyanov, O. Tarvainen, H. Koivisto, T. Kalvas. *New progress of high current gasdynamic ion source*. Review of Scientific Instruments. **87** (2016) 02A716 [<http://dx.doi.org/10.1063/1.4934213>].

[5] S.S. Vybin, I.V. Izotov, V.A. Skalyga. *High current ion beam formation with strongly inhomogeneous electrostatic field*. Plasma Sources Science and Technology. **29** (2020) 11LT02 [<https://doi.org/10.1088/1361-6595/abbf9c>].

[6] С.В. Барабин, Г.Н. Кропачев, А.Ю. Лукашин, Т.В. Кулевой, С.С. Выбин, С.В. Голубев, И.В. Изотов, Е.М. Киселева, В.А. Скалыга, Н.А. Коваленко, С.В. Григорьев. *Измерения эмиттанса газодинамического электронно-циклотронного резонансного источника ионов*. Письма в ЖТФ. **47** (2021) 7–10 [<https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.10.50964.18628>].

Часть III. «Интеллектуальная инфраструктура»

III.1. Образование и подготовка кадров

Подготовка кадров для ядерного эксперимента имеет не много специфики по сравнению с подготовкой кадров для физического эксперимента в целом. Естественной спецификой являются вопросы радиационной безопасности и расширенное изучение вопросов взаимодействия излучения с веществом. Подготовка кадров в интересах Росатома и оборонного комплекса ведется в значительной степени в «локальных» отделениях МИФИ и вузах за Уралом. Подготовка экспериментальных кадров для фундаментального ядерно-физического эксперимента находится в упадке.

Многие отечественные группы не имеют или не видят перспектив развития локальной исследовательской инфраструктуры. Их актуальная научная деятельность перенесена в иностранные центры. Подготовка кадров в этих условиях ведется «на экспорт»: перспективная молодежь с самого начала ориентируется и мотивируется на трудоустройство за рубежом. «Классические» ядерно-физические «школы» в европейской части страны (МИФИ, МГУ, СПбГУ) в значительной степени утратили связь с перспективными работодателями в области фундаментальной науки или утратили мотивацию для поддержания такой эффективной связи. В качестве компенсации началось ускоренное развитие «локальных» образовательных возможностей «для себя». Как пример можно привести учебные центры при ОИЯИ и филиалы МИФИ в закрытых наукоградах.

Подготовка научных кадров на базе НИИЯФ МГУ и отделения ядерной физики физического факультета МГУ

На отделении ядерной физики физического факультета МГУ действуют 5 кафедр, которые готовят специалистов-ядерщиков (выпуск около 40 человек в год). На отделении ядерной физики физического факультета МГУ имеется аспирантура, обеспечивающая подготовку (около 10 человек в год) специалистов по соответствующим специальностям (физика атомного ядра и элементарных частиц, физика высоких энергий, физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, приборы и методы экспериментальной физики, теоретическая физика, радиобиология, физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика и т. д.). Студенты и аспиранты проходят обучение и проводят научные исследования на базе отделов и лабораторий НИИЯФ МГУ, а также ОИЯИ, ИЯИ РАН, Курчатовского института. По результатам мониторинга примерно две трети выпускников пошли в аспирантуру или распределились в научные организации. Однако значительная часть идет в зарубежные (CERN и др.) научные организации.

Подготовка научных кадров на базе СПбГУ

С 2014 г. в Санкт-Петербургском государственном университете подготовка специалистов в области физики атомного ядра и элементарных частиц осуществляется на кафедре ядерно-физических методов исследования, включающей направления «Ядерная физика», «Нейтронная и синхротронная физика» и «Ядерно-магнитный резонанс». С 2018 г. по инициативе Росатома в СПбГУ открыта новая магистерская программа «Физика

конденсированного состояния на установках МЕГА-класса» на английском языке. Программа направлена на подготовку специалистов и научных сотрудников, способных моделировать, проектировать, создавать и эксплуатировать нейтронные установки для реактора ПИК Петербургского института ядерной физики (ПИЯФ) НИЦ «Курчатовский институт». Эти навыки также являются несомненным конкурентным преимуществом для специалистов, осуществляющих проект компактного источника нейтронов на протонном ускорителе DARIA, инициатором которого является СПбГУ и который был широко поддержан российскими научными организациями и независимыми экспертами.

Обучающиеся на направлении «Ядерная физика» получают фундаментальную подготовку в области экспериментальной и теоретической ядерной физики. В числе прочих студентам читаются лекции «Теория ядерных реакций», «Прямые реакции», «Экзотические ядра», «Современные методы в ядерной физике». Раз в пять лет в Санкт-Петербургском государственном университете проводится одна из крупнейших международных конференций, посвященных вопросам теоретического и экспериментального исследования атомного ядра, — «Ядро».

По результатам мониторинга вероятность закрепления специалистов, выпускаемых по направлению физики атомного ядра, в отечественных исследовательских организациях низкая.

Подготовка научных кадров в ОИЯИ и университете «Дубна»

Подготовка специалистов для поддержки действующих и перспективных научно-исследовательских проектов, входящих в проблемно-тематический план ОИЯИ, еще с советских времен осуществлялась совместно с ведущими вузами страны. Наиболее плодотворная форма такого взаимодействия реализовывалась на базовых кафедрах вузов, создаваемых непосредственно в лабораториях ОИЯИ. В ОИЯИ также проходили практику, а впоследствии и трудоустроивались студенты-выпускники ядерно-физических специальностей из вузов Воронежа, Ленинграда, Твери, Томска и других городов. Для организации эффективного взаимодействия с молодыми специалистами из вузов стран — участниц ОИЯИ в структуре института было создано специальное подразделение Учебно-научный центр ОИЯИ (УНЦ ОИЯИ), в задачи которого входит решение всех организационных вопросов «прикрепления» молодых специалистов к секторам, научным и инженерным группам ОИЯИ. Благодаря грамотно выстроенной системе и неформальному отношению к молодым специалистам ОИЯИ привлечет талантливую молодежь, позволяя построить карьеру в широком спектре научных специальностей и направлений, обеспечивая доступ к накопленному опыту в фундаментальных и прикладных исследованиях в области физики атомного ядра и элементарных частиц, теоретической физики, вычислительной физики и математики, а также доступ к уникальной экспериментальной базе.

Кризис конца 90-х годов XX в. серьезно повлиял на приток молодых кадров в лаборатории института. Это привело к тому, что руководство ОИЯИ начало реализовывать новую образовательную политику. Если ранее усилия предпринимались в основном для привлечения студентов старших курсов

и выпускников, то начиная с 1999 г. ОИЯИ совместно с созданным в г. Дубна университетом «Дубна» проводит набор на 1-й курс и осуществляет полный цикл подготовки специалистов по ядерно-физическим специальностям. Первой кафедрой, созданной в университете «Дубна» на базе ОИЯИ, стала кафедра биофизики, выпускающая ежегодно 10–15 специалистов по специальности «Радиационная безопасность человека и окружающей среды». Основным «потребителем» этих выпускников стала Лаборатория радиационной биологии ОИЯИ. С 2003 года в университете начинают работу кафедра теоретической физики (в настоящее время кафедра фундаментальных проблем физики микромира) и кафедра ядерной физики, являющиеся базовыми для Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова и Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флёрова ОИЯИ, соответственно. Ежегодно данные кафедры выпускают более 25 бакалавров и магистров по профилям «Теоретическая и математическая физика», «Физика атомного ядра и частиц», «Физика ядерных реакций низких энергий», а также реализуют программы обучения в аспирантуре. На кафедре ядерной физики реализована программа двойного диплома по профилю «Физика атомного ядра и частиц» для студентов из стран — участниц ОИЯИ, в рамках которой, в частности, более 200 студентов из ведущих вузов Республики Казахстан прошли обучение в Дубне. Особенность образовательных программ университета «Дубна», реализуемых совместно с ОИЯИ, состоит в первую очередь в возможности привлечения к преподаванию ведущих ученых и инженеров из числа сотрудников института, ранней (с 1-го курса) профориентации студентов на базе научных и инженерно-технических подразделений ОИЯИ, а также в наличии уникальной, высокотехнологичной материально-технической базы мирового уровня.

В целом в университете «Дубна» действуют семь базовых кафедр ОИЯИ, кроме упомянутых выше к ним относятся:

Кафедра проектирования электроники для установок «мегасайнс» (базовая лаборатория — ЛФВЭ), ориентированная на подготовку инженеров-электронщиков для сопровождения работ на сверхпроводящем коллайдере тяжелых ионов NICA.

Кафедра нанотехнологий и новых материалов (базовые лаборатории — ЛНФ и ЛЯР), готовящая специалистов в области радиационного материаловедения, создания новых детектирующих материалов, методов исследования функциональных материалов и наноматериалов.

Кафедра физико-технических систем (базовая лаборатория — ЛФВЭ) готовит специалистов в области разработки и эксплуатации электроники физических установок.

Кафедра распределенных информационно-вычислительных систем (базовая лаборатория — ЛИТ) готовит IT-специалистов для работ по сбору, обработке и хранению больших объемов данных экспериментов по физике частиц, в частности для проекта коллайдера NICA.

Общий ежегодный набор бакалавров, магистров и аспирантов на направления обучения базовых кафедр составляет более 220 человек. Около 60 % выпускников трудоустраиваются в лаборатории и подразделения ОИЯИ после окончания обучения на инженерно-физические и научные должности.

Часть студентов продолжает свою карьеру в других международных научных центрах по всему миру (CERN, GSI, GANIL и др.).

Проблемы

а) Преимущественная опора на кадры, выращенные в университете «Дубна» (доминирование местных учащихся), в перспективе ведет к обеднению кадрового потенциала ОИЯИ.

б) В силу тесной связи между базовыми кафедрами университета «Дубна» и лабораториями ОИЯИ (сотрудники института являются сотрудниками университета) научные исследования проводятся студентами и преподавателями кафедр в основном в рамках научных программ лабораторий ОИЯИ. Это является слабой стороной созданной структуры подготовки кадров — университет фактически не имеет своей материально-технической базы и опирается только на возможности, предоставляемые ОИЯИ. Использование сложной, дорогостоящей научно-исследовательской инфраструктуры института для учебных целей возможно лишь в ограниченном формате, а создание или закупка учебно-лабораторных установок хоть и осуществляются, но в недостаточных объемах и не по всем востребованным дисциплинам.

в) В ряде случаев имеет место существенный «кадровый голод» при поиске специалистов, готовых и, главное, способных преподавать специальные дисциплины, непрофильные для ОИЯИ.

Одно из перспективных видений развития университета «Дубна» — его реформатирование в технический университет федерального класса с взятием на себя тех функций подготовки специалистов для физических научных центров, которые в советское время выполнял в основном МИФИ.

Подготовка научных кадров в МИФИ

Исторически важнейшим центром подготовки научных кадров отечественной фундаментальной ядерной физики являлся МИФИ. В МИФИ специалистов в области теоретической ядерной физики готовила кафедра 32 (теоретическая ядерная физика), в области экспериментальной ядерной физики — кафедры 11 (экспериментальные методы ядерной физики) и 7 (экспериментальная ядерная физика). Около 20 лет назад из кафедры 11 выделилась кафедра 40 (физики элементарных частиц), около 15 лет назад образована кафедра 60 (физики экстремальных состояний вещества), 7 лет назад кафедра 11 официально стала базовой кафедрой ОИЯИ. Кроме того, на кафедре 3 (кафедра электроники) работает группа, занимающаяся электроникой для детекторов, используемых в экспериментах по физике высоких энергий. В МИФИ также работает кафедра 14 (кафедра электрофизических установок), на которой ведется подготовка специалистов в области разработки и создания ускорителей заряженных частиц.

К настоящему времени перечисленные пять кафедр в своей научной и учебной работе заняты совершенно разными направлениями, ситуация с подготовкой кадров для фундаментальной ядерной физики печальная:

Кафедра 32 практически утратила «ядерные» направления; основными исследовательскими направлениями в настоящее время являются физика взаимодействия лазерного излучения с веществом, физика плазмы и квантовая оптика; ежегодно кафедра выпускает 10–15 бакалавров и около 10 магистров; более половины студентов выполняют научно-исследовательскую

работу и дипломные проекты за пределами МИФИ, в основном в институтах РАН и НИЦ «КИ». В настоящее время основным функционалом кафедры является учебная работа, основную часть которой составляет чтение базовых курсов по теоретической физике для всех студентов МИФИ, у которых такие курсы включены в учебный план.

Кафедра 7 в настоящее время — это самая большая по количеству сотрудников из перечисленных пяти, однако научная работа в большей степени сосредоточена на космофизике (в составе кафедры — институт космофизики), космических лучах и соответствующих детекторах; также развивается направление исследований взаимодействия излучения с веществом и радиационной безопасности; кафедра ведет большую учебную работу, читая половине МИФИ курсы по экспериментальной ядерной физике (в том числе — группам иностранных студентов), собственные группы небольшие — 10–12 бакалавров, 8–10 магистров.

Кафедра 11 к настоящему времени так и «зависла», по-настоящему не став базовой для ОИЯИ; научная работа на кафедре связана с экспериментами по физике высоких энергий (проводится в основном совместителями из ОИЯИ) в CERN, КЕК и только последние годы — для ОИЯИ и GSI; работает группа по разработке детекторов нейтрино; группы студентов — по 5–8 человек.

Кафедра 40 изначально была создана под эксперименты в CERN, это направление и продолжает быть основным, специализация кафедры — детекторы, электроника, GRID, обслуживание эксперимента (в том числе — в ОИЯИ); также на кафедре работает маленькая группа по космическим лучам; группы студентов — по 5–8 человек.

Кафедра 60 изначально создавалась как базовая для ИТЭФ и должна была готовить кадры для экспериментов по экстремальным взаимодействиям и взаимодействию тяжелых ионов с конденсированными средами. Основной преподавательский состав кафедры — совместители из ИТЭФ; кафедра осуществила уже более 10 выпусков, ежегодно набирая в специалитет около 10 человек, но в последние годы, в связи с переходом на двухуровневую систему и сокращением набора в бакалавриат МИФИ, набор студентов на кафедру снизился до 5 и менее, что явно недостаточно даже для удовлетворения потребностей базовой организации кафедры.

Кафедра 14 продолжает готовить специалистов по проектированию ускорителей, программы подготовки в целом соответствуют современным потребностям. Кафедра участвует в основных российских и некоторых крупных международных проектах, проводятся разработки линейных ускорителей и СВЧ-систем. Однако выпуск не превышает 10–12 студентов в год, что не позволяет покрыть даже текущую кадровую потребность ускорительных центров. При этом до половины выпускников уходит работать на предприятия ОПК, «Росатома» и «Ростеха».

III.2. Развитие теоретических исследований

Исследования в области теоретической ядерной физики имеют важную специфику, которую необходимо отметить. Эта область крайне фрагменти-

рована. Теория ядерной структуры и теория ядерных реакций представляют собой в методологическом смысле очень разные области. Теория ядерной структуры, в свою очередь, имеет обширные подразделы: методы задачи нескольких тел, методы модели оболочек, прямые вариационные подходы и подходы типа метода резонирующих групп, вычислительно интенсивные «ab initio» подходы, подходы, использующие концепцию среднего поля ядра, и подходы, опирающиеся на функционал плотности энергии, которые при учете деформации естественно смыкаются с задачей деления ядер. Теория ядерных реакций включает «точные» методы задачи нескольких тел, DWBA-подобные методы, эйкональные подходы при низких, средних и высоких энергиях. Особняком стоят методы ядерной астрофизики, статистические методы для областей с высокой плотностью состояний, гидродинамические подходы для задач мультифрагментации и релятивистских столкновений ионов. «Зоопарк» техник, подходов и методов в теоретической ядерной физике имеет объективный источник — это фундаментальное отсутствие последовательной теории сильных взаимодействий, проявляющееся практически в необходимости разработки теоретических приближений, функциональных в узких областях.

Теоретические исследования по структуре ядра в ядерной физике низких энергий практически с самого начала их становления велись с использованием разных подходов при изучении свойств легких и тяжелых ядер. В случае легких ядер исследования опирались на оболочечную модель ядра, а в случае тяжелых ядер — на коллективную модель, с последующей формулировкой концепции среднего потенциала деформированного ядра. Сближение обоих подходов произошло в конце 50-х годов, когда была сформулирована, при определяющем вкладе российских ученых (Н. Н. Боголюбов, С. Т. Беляев, В. Г. Соловьёв), модель сверхтекучего ядра. Базовой концепцией, на которую опирались и продолжают опираться, в особенности в случае тяжелых ядер, является концепция среднего поля ядра. Она дополнилась введением остаточных нуклон-нуклонных взаимодействий. В случае легких ядер они определялись при сравнении с экспериментальными данными результатов оболочечных расчетов, выполненных в весьма ограниченном конфигурационном пространстве состояний ядра, определяемом имевшимися возможностями вычислительной техники. В случае тяжелых ядер существовало два подхода: парные корреляции плюс мультиполь-мультипольные силы (Копенгаген, Дубна) и теория конечных ферми-систем (группа А. Б. Мигдала в Курчатовском институте). В те времена среднее поле ядра и остаточное взаимодействие определялись независимо, хотя, конечно, теоретики всегда понимали, что общим источником для них является нуклон-нуклонное взаимодействие.

Ситуация стала меняться в начале 90-х, когда в применении к тяжелым ядрам начал разрабатываться подход, основанный на функционале плотности энергии, а в случае легких ядер стало возможным проводить оболочечные расчеты в огромном конфигурационном пространстве, не выделяя инертный остов (кор) ядра. В случае тяжелых ядер и среднее поле ядра, и остаточное взаимодействие нуклонов в ядре определялись основываясь на функционале плотности энергии. Здесь использовались разные

функционалы, но можно выделить релятивистский подход, опирающийся на нуклон-мезонный лагранжиан взаимодействия.

Другую группу исследований структуры образовывали так называемые *ab-initio*-исследования свойств легчайших ядер: ядерная структура должна возникать из потенциала нуклон-нуклонного взаимодействия, определяемого при описании фаз рассеяния и свойств дейтрона. Эти методы изначально опирались на решения точных уравнений Фаддеева и Фаддеева — Якубовского или использовался гиперсферический базис для диагонализации гамильтониана (3–5 частиц). С ростом доступности вычислительных мощностей *ab-initio*-методы сначала продвинулись в область 8–10 частиц (включив многочисленный арсенал методов «грубой силы» — таких как прямые вариационные подходы, квантовое Монте-Карло, «no-core»-модель оболочек), а затем начало происходить эффективное размытие границы с многочастичными среднеполевыми методами. В последние годы для определения нуклон-нуклонного потенциала для методов *ab-initio* используется киральная эффективная теория поля. Однако полученный в последнее время в рамках этого подхода потенциал, позволяющий вполне удовлетворительно описывать свойства легких ядер, содержит десятки (например, 26) параметров. Таким образом, проблема последовательной формулировки теории нуклон-нуклонного взаимодействия на основе низкоэнергетической QCD остается не решенной.

Теория ядерных реакций в низкоэнергетической ядерной физике в последнее время пребывает в глубоком упадке во всем мире. В основном она существует в виде феноменологии для эксперимента с радиоактивными ядрами и задач ядерной астрофизики.

В настоящий момент исследования по теоретической ядерной физике низких энергий сосредоточены в РФ в ОИЯИ и НИИЯФ МГУ. Остальное сообщество фрагментировано (отдельные исследователи или группы 2–3 человека) и разбросано по различным исследовательским институтам и университетам. Значительное число научных школ в теоретической ядерной физике прекратили свое существование или находятся на грани исчезновения.

III.2.a. Теоретические школы в ОИЯИ

Динамика задачи нескольких тел в экзотических кластеризованных ядрах

Вблизи границ ядерной стабильности, а также вблизи порогов дезинтеграции на несколько тел динамика задачи нескольких тел начинает играть важную роль. Релевантные вопросы: структура трехкластерных систем; трехчастичные распады; двухпротонная радиоактивность; кулоновская задача трех тел в непрерывном спектре; электромагнитные и слабые переходы; экзотические виды радиоактивности ($2n$, $4n$, $4p$); «мягкие» моды возбуждения; астрофизические процессы с участием нескольких тел; анализ корреляционных данных. [Л. В. Григоренко, Ю. Л. Парфёнова, П. Г. Шаров, С. Н. Ершов].

Динамика ядерных реакций с тяжелыми ионами. Образование и распад тяжелых и сверхтяжелых ядер

Ядерные реакции с тяжелыми ионами характеризуются сильной конкуренцией и взаимопересечением каналов глубоко неупругого рассеяния, квазиделения, слияния-деления и др. Актуальные вопросы: динамика различных каналов ядерных реакций с тяжелыми ионами; механизм слияния атомных ядер; новые методы синтеза неизвестных тяжелых и сверхтяжелых ядер; роль оболочечных эффектов в образовании и распаде тяжелейших ядер; времена жизни и конкуренция различных видов радиоактивного распада сверхтяжелых ядер. [А. В. Карпов, В. А. Рачков, В. В. Сайко, Н. Ю. Куркова].

Проявления кластерных мод, модель двойной ядерной системы в реакциях слияния, деления, глубоко неупругих столкновениях тяжелых ионов, в кластерном распаде и структуре низколежащих коллективных состояний

Для описания реакций полного слияния, квазиделения и многонуклонных передач перспективным является рассмотрение эволюции двойной ядерной системы, образующейся во входном канале реакции, через различные кластерные состояния (движение по массовой асимметрии). Необходимо: развить методы теории открытых квантовых систем для описания движения по коллективной координате, связанной с внутренними степенями свободы, в сложном потенциале; предложить эксперименты для оценки роли движений по массовой асимметрии и кластерных мод; выявить зависимости выходов продуктов реакций от энергии, углового момента и изоспиновой асимметрии во входном канале; связать низколежащие коллективные состояния ядра с кластеризацией; оценить выходы новых изотопов ядер с $104 \leq Z \leq 108$ для заполнения существующего пробела между продуктами холодного и горячего слияния; предложить единый подход для описания кластерного распада и спонтанного деления. [Н. В. Антоненко, Г. Г. Адамян, А. К. Насиров, А. В. Андреев, Т. М. Шнейдман, В. В. Саргсян, Ш. А. Каландаров, И. С. Рогов].

Структура сверхтяжелых ядер и их альфа-распад

Спектроскопические исследования низколежащих одноквазичастичных состояний в трансактинидах актуальны из-за проблемы однозначной идентификации новых сверхтяжелых ядер и неизвестных изотопов тяжелых ядер. Необходимо установить положение следующей после свинца замкнутой протонной оболочки на основе микроскопических методов и предложить эксперимент по проверке теоретического результата; предсказать положение изомерных состояний; рассчитать спектр энергий альфа-распадов сверхтяжелых ядер; определить плотности ядерных уровней в основном состоянии и на барьере деления для расчета выживаемости возбужденных сверхтяжелых ядер; проверить возможность сосуществования форм в сверхтяжелых ядрах. [Н. В. Антоненко, Г. Г. Адамян, А. Н. Безбах, Р. В. Джолос, А. В. Сушков, Н. Ю. Ширикова, Л. А. Малов, Т. М. Шнейдман].

Резонансные возбужденные состояния атомных ядер, структура низколежащих возбужденных состояний

Развитие квазичастично-фононной модели, построенной на базе функционала плотности энергии, для изучения многообразия свойств возбужденных состояний средних и тяжелых ядер с большим нейтронным

избытком в широком интервале энергий возбуждений. Актуальные вопросы: исследование низкоэнергетических гамма-переходов; конкуренция гамма-распада и двойного гамма-распада; вероятность каскада гамма-переходов; фрагментация гигантских резонансов нейтронно-избыточных ядер; тороидальные дипольные резонансы в ядрах и возможности их обнаружения; изотопическая зависимость изоскалярных дипольных и квадрупольных мод. [В. В. Воронов, А. И. Вдовин, А. П. Северюхин, А. А. Джиоев, В. О. Нестеренко, Н. Н. Арсеньев].

Низколежащие коллективные возбуждения, фазовые переходы в ядрах

Структура атомных ядер содержит много примеров, демонстрирующих фазовые переходы при увеличении энергии возбуждения, момента вращения и при изменении чисел нуклонов. Это фазовые переходы равновесной формы и структуры основного и низколежащих возбужденных состояний ядер, связанные с изменением их симметрии. Проблематика фазовых переходов вызвала новую волну исследований: описание этих переходов в рамках коллективной модели ядра с гамильтонианом, зависящим от небольшого числа динамических переменных; микроскопические аспекты фазовых переходов; изотопическая зависимость сосуществования форм. [Р. В. Джолос, Е. А. Колганова, Т. М. Шнейдман, Е. Мардыбан].

Бета-распад, двойной бета-распад, взаимодействие нейтрино с атомными ядрами, астрофизические приложения

Исследование влияния взаимодействия простых и сложных конфигураций как на свойства зарядово-обменных возбуждений с учетом резонансной структуры, так и на характеристики бета-распада ядер у границы нейтронной стабильности с помощью одного набора параметров функционала плотности энергии. Взаимодействие нейтрино с веществом представляет собой важную проблему в различных астрофизических явлениях, например сверхновые, слияние нейтронных звезд, образование коры нейтронных звезд. Актуальные вопросы: роль тензорного нуклон-нуклонного взаимодействия при описании фрагментации гамов-теллеровского резонанса; бета-распад нейтронно-избыточных ядер; сопутствующая мультинейтронная эмиссия; бета-задержанная гамма-спектроскопия; роль неупругого рассеяния нейтрино на ядрах и магнитного поля в процессе термализации нейтрино; влияние температуры на скорость протекания астрофизических реакций; сечения слияния в астрофизике. [И. Н. Борзов, А. И. Вдовин, А. А. Джиоев, А. П. Северюхин, Н. Н. Арсеньев, В. В. Саргсян].

Исследование свойств малонуклонных ядер на основе уравнения Фаддеева

Слабосвязанные трехатомные кластеры являются системами, в которых наиболее вероятно проявление эффекта Ефимова. Взаимодействие между межатомными парами может быть резонансным, так как длины парного рассеяния в десятки (а иногда и сотни) раз превышают эффективный диапазон взаимодействия. Актуальные вопросы: определение условий, по крайней мере, для двух парных подсистем тримера, чтобы вызвать эффективное дальнедействующее притяжение в трехчастичной системе, способной поддерживать большое (вплоть до бесконечного) число связанных состояний;

поиск ефимовских состояний в трехатомных системах. [Е. А. Колганова, А. К. Мотовилов].

Реакции упругого рассеяния с экзотическими ядрами

Исследования распределений плотности вещества в ядрах, далеких от стабильности, показывают вытянутый хвост низкой плотности на больших радиальных расстояниях. Необходимо: провести полностью микроскопический анализ реакций квазиупругого рассеяния и распада нейтронно-избыточных ядер; определить влияние структуры гало на взаимодействие ядер. [В. К. Лукьянов, Е. В. Земляная].

III.2.б. Теоретические школы в МГУ

Физика малочастичных квантовых систем и аналитические методы описания ядерных процессов

Описание ядерных и атомных систем нескольких тел в рамках строгих квантово-механических уравнений. Исследование характеристик экзотических мюонных и антипротонных атомов. Развитие и применение методов асимптотических нормировочных коэффициентов для ядерной астрофизики. [Л. Д. Блохинцев, Г. Я. Коренман, Ю. В. Орлов, В. П. Попов, Ю. В. Попов, Д. А. Савин, С. Н. Юдин].

Исследования кластерных явлений в физике ядра и ядерных процессов с составными частицами

Проблема кластеризации и проблема описания реакций, вызванных столкновениями составных частиц. Разработка высокоточных микроскопических подходов на суперкомпьютерах. Исследования взаимовлияния ядерных и атомных степеней свободы. [Ю. М. Чувильский (НИИЯФ МГУ), С. Д. Кургалин (ВГУ), С. Ю. Игашов, А. С. Соловьёв, Д. М. Родкин (ВНИИА)].

Исследование экзотических ядер различных типов и свойства барионных взаимодействий

Объектами исследований являются: а) ядра вблизи границ нуклонной стабильности, в частности нейтроноизбыточные, одночастичные спектры, новые магические числа, парные корреляции нуклонов; б) сверхтяжелые ядра, предсказание их свойств на основе макроскопических и микроскопических подходов; в) гиперядра, обобщение представлений о ядерных взаимодействиях на барионы октета; г) нейтронные звезды как гигантские сверхтяжелые нейтроноизбыточные ядра, в состав которых, кроме нуклонов, входят также гипероны. [Б. С. Ишханов, Д. Е. Ланской, Т. Ю. Третьякова].

Природа сильных взаимодействий нуклонов при промежуточных энергиях и квантовая хромодинамика

Сотрудники школы изучают вопросы рождения мезонов, а также барионных и дибарионных резонансов в процессах $N + N$, $N + d$, $d + d$ и т. д. соударений в области гигаэлектронвольтных энергий и выше, в тесной связи с природой ядерных сил на средних и коротких расстояниях. [В. И. Кукулин, И. Т. Обуховский, В. Н. Померанцев, О. А. Рубцова, М. Н. Платонова].

Исследования в области физики ядерных реакций

Исследование механизма реакций с легкими частицами и тяжелыми ионами; в частности, особое внимание уделяется динамическим аспектам

ядерного деления. Исследования механизма ядерных реакций, приводящих к образованию сверхтяжелых ядерных систем, а также механизма их распада. [Д. О. Ерёмченко, О. А. Юминов, В. А. Дроздов, С. Ю. Платонов, О. В. Фотина].

Ядерная спектроскопия, дисперсионный оптический потенциал

К настоящему времени в НИИЯФ МГУ разработан метод конструирования дисперсионного оптического потенциала, который позволяет выполнять предсказательные расчеты эволюции одночастичных характеристик, близких к сферическим ядер среднего и тяжелого атомного веса вплоть до границ нуклонной стабильности. [О. В. Беспалова, А. А. Климочкина].

Исследования в области физики прямых ядерных реакций

Исследование механизма прямых ядерных реакций на легких ядрах. Развитие теоретического аппарата расчета сечений реакции, учитывающего виртуальную кластеризацию легких ядер в рамках задачи нескольких тел. [Н. С. Зеленская, Л. И. Галанина, В. М. Лебедев, А. В. Спасский].

Методы «ab initio» в модели оболочек

Описание ab initio ядерной структуры и ядерных реакций; модели нуклон-нуклонного взаимодействия; переход к эффективным взаимодействиям в области средних масс для модели оболочек. [В. А. Куликов, А. М. Широков].

Исследования в области физики фотоядерных реакций

Комбинированная модель фотоядерных реакций (средние и тяжелые ядра ниже порога образования мезонов). Описание фотоядерных реакций основывается на комбинации полумикроскопической, экситонной и испарительной моделей, при учете влияния изоспиновых эффектов. [В. Н. Орлин, Б. С. Ишханов].

III.2.в. Теоретические школы в СПбГУ

Развитие среднеполевых подходов

Исследование гигантских резонансов и низкоэнергетических возбуждений в ядрах в рамках самосогласованного приближения случайных фаз (и его расширенной модификации, включающей эффекты квазичастично-фононного взаимодействия), самосогласованных подходов в приближении временной блокировки, подходов, основанных на методе энергетического функционала плотности. [В. И. Целяев, Н. А. Люторович].

Изучение парных энергий деформированных ядер

Исследование парного взаимодействия и модификация выражений для оценки парных энергий на основе микроскопического подхода. Расчет масс атомных ядер в широком диапазоне массовых чисел. [А. К. Власников].

Изучение систематики ядерных свойств

Развиваются методы применения гидродинамических методов при описании столкновения тяжелых ионов при промежуточных энергиях, ведутся работы в области оценки данных по структуре и распадам ядер, систематика ядерных свойств и поиск новых закономерностей в больших массивах ядерных данных. [И. А. Митропольский].

III.2.г. Теоретические школы в КИ

Изучение свойств плотной ядерной материи

Исследование свойств сильно взаимодействующей материи в ядерных столкновениях, в недрах звезд и в катастрофических астрофизических процессах, построение реалистических уравнений состояния и изучение фазовых переходов в адронной и кварк-глюонной материи, изучение вихрей в адронном веществе. [Ю. Б. Иванов, И. Н. Мишустин].

Развитие методов теории конечных ферми-систем

Описание основных характеристик, изобар-аналоговых и других резонансных состояний тяжелых ядер в рамках самосогласованной теории конечных ферми-систем, расчеты слабых и электромагнитных переходов между возбужденными и основными состояниями ядер, барьеров деления сверхтяжелых ядер. [И. Н. Борзов, С. П. Камерджиев, Ю. С. Лютостанский, С. В. Толоконников].

Исследования реакций и распадов в мезоатомных и ядерных системах

Использование методов квантовой теории нескольких тел для изучения перезарядки в столкновениях атомов и мезоатомов, релятивистских эффектов в электрорасщеплении легчайших ядер, радиоактивности ядер, находящихся на границах нуклонной стабильности, угловых корреляций в бета-процессах и в делении ядер нейтронами при промежуточных энергиях. [А. Л. Барабанов, С. В. Романов, В. Д. Эфрос].

Задача нескольких тел в приложении к кластеризованным ядрам

Методы теории нескольких тел; электромагнитные и слабые переходы; «мягкие» моды возбуждения; астрофизические процессы с участием нескольких тел; анализ корреляционных данных. [Н. Б. Шульгина].

III.2.д. Теоретические школы в МИФИ

Развитие среднеполевых подходов

Резонансные возбужденные состояния ядер, зарядово-обменные возбуждения и реакции, астрофизические приложения. [М. Г. Урин].

Развитие методов теории конечных ферми-систем

Теория конечных ферми-систем, сильное взаимодействие в барионной материи, ядерная астрофизика. [Д. Н. Воскресенский].

III.2.е. Теоретическая школа в Воронежском университете

Протонная, альфа-частичная и кластерная радиоактивность атомных ядер, силовые функции нейтронных резонансов, несохранение четности в нейтронных резонансах. [С. Г. Кадменский].

III.3. Исследовательский центр ФАИР-Россия

В 2008 г. в ИТЭФ состоялось официальное открытие российско-немецкого «Исследовательского центра ФАИР-Россия» (ИЦФР, FAIR-Russia Research Center, FRRC). Соучредителями данного центра выступили: с российской стороны ИТЭФ, а с немецкой — Общество по исследованию

тяжелых ионов (GSI, Дармштадт). Финансирование велось на паритетных началах Институтом Гельмгольца и Госкорпорацией «Росатом».

Основная идея центра заключалась в поддержке российских ученых, принимающих активное участие в работах российских институтов и университетов по тематике проектов FAIR (см. также раздел I.3). Важнейшим условием получения стипендии ИЦФР была непосредственная работа молодого специалиста в лабораториях России по созданию детекторов, экспериментальных установок, систем ускорителя по программам FAIR и по запросу специалистов FAIR. Путем жесткого конкурсного отбора создавался контингент специалистов, готовых начать работы на вновь создаваемом ускорительном комплексе FAIR. Кроме индивидуальных грантов, финансовую поддержку получали также группы молодых исследователей, финансировалось участие в международных конференциях. Отметим следующие существенные моменты в организации работ ИЦФР:

- Очень широкий (существенно шире, чем обычно в молодежных программах) возрастной диапазон поддержки — начиная от студентов-дипломников и кончая молодыми докторами наук. В результате — высокая преемственность и эффективность в исполнении долговременных научных программ.
- ИЦФР выполнял важную функцию связности молодого ученого сообщества, работающего по очень «удаленным» друг от друга программам FAIR в разных организациях и городах России (общие отчетные мероприятия, учебные программы и школы, конференции на базе ИЦФР при ИТЭФ).
- Часто поддержка центра являлась решающей для выполнения научных и инженерных задач, так как носила исключительную направленность на исполнителя.
- Существенным оказался аспект обратной передачи технологий и опыта, т. е. компетенция, возникшая в работе по проекту FAIR, оказывалась в итоге «укорененной» и востребованной в российской организации.

За восемь лет активной работы центра стипендиатами стали около 200 перспективных молодых ученых. ИЦФР стал как эффективным инструментом борьбы с «утечкой мозгов» из России, так и инструментом для «закрепления» молодежи в науке (благодаря долгосрочности программ и широкому возрастному диапазону поддерживаемых ученых). Воспитанники центра защитили около 50 кандидатских, 8 докторских диссертаций, несколько человек были выбраны в члены РАН. Ряд стипендиатов заняли крупные руководящие позиции в науке.

После передачи под управление НИЦ «КИ» в 2016 г. деятельность центра быстро деградировала. Формально он существует, но фактически прекратил серьезные программы поддержки молодых ученых.

Как минимум, следует восстановить реальное функционирование ИЦФР по программам FAIR. В качестве задачи-максимум следовало бы найти возможность распространить успешный опыт ИЦФР на внутрисоссийские научные проекты. Привлечение к проектам молодежи из удаленных институтов и университетов при помощи прозрачного, простого в обслуживании и достаточно долговременного проектного финансирования могло бы колоссально увеличить «связность» и ресурсную базу отечественной науки.

Часть IV. Выводы и рекомендации

Приборная база ядерной физики низких энергий в РФ катастрофически устарела. На поддержание устаревших установок тратятся непропорционально большие ресурсы. Во многих случаях кумулятивная «цена владения» за постсоветское время многократно превысила возможную цену перехода на современную исследовательскую инфраструктуру. С одной стороны такое положение позволяет успешно отчитываться за якобы существующие научные направления. Однако в перспективе этот путь ведет к окончательному развалу по причине национального самообмана. С другой стороны такое положение позволяет выживать остаткам кадров в недофинансируемых научных направлениях. В первые полтора-два постсоветских десятилетия это могло рассматриваться как необходимость; сегодня и в перспективе это путь к окончательному развалу по причине вымирания кадров и научных школ.

Рекомендация: провести национальную инвентаризацию исследовательской инфраструктуры ядерной физики низких энергий и определить степень отставания от мировых центров.

Обновление приборной базы ведется силами отдельных институтов и на отдельных направлениях. Проекты, демонстрирующие конкурентность или потенциально конкурентные на мировом уровне, необходимо приоритетно поддерживать. Однако это не решит проблемы глобально. Не существует какой-либо единой стратегии развития ядерной физики низких энергий. Чтобы кардинально переломить ситуацию после трех десятилетий «голодного пайка», требуется перспективное видение, консолидация усилий и инвестиции гораздо большего уровня с целью создания ядерно-физического центра (центров) по-настоящему мирового класса. Во всем мире для ядерной физики низких энергий стандартом стало создание крупных национальных лидеров — «фабрик радиоактивных изотопов» — которые обладают самой современной дорогостоящей инфраструктурой и консолидируют вокруг себя научную жизнь. При этом наличие локальных установок разной направленности позволяет поддержать «видовое разнообразие» в научной экосистеме. Но мировое лидерство сегодня возможно только на базе крупнейших общенациональных центров, где созданы лучшие условия для реализации научного потенциала.

Рекомендация: приступить к реализации общенационального проекта по ядерной физике низких энергий. Таким проектом может стать проект DERICA.

В области нейтронной физики, где всегда относительно высок был запрос на прикладные исследования, ситуация развивается относительно системно: реактор ПИК по возможностям будет среди мировых лидеров, импульсный источник следующего поколения ИБР-3 может стать лидером в своем классе. Определенный провал имеется с импульсными источниками, основанными на ускорителях протонов. Потенциально лидирующим

игроком здесь может стать нейтронный комплекс ИЯИ РАН, но для этого требуется принятие стратегического решения. Развитие программ компактных нейтронных источников в РФ способно не только способствовать широкому внедрению ряда передовых (даже жизненно важных) технологий, но и послужить распространению ядерно-физических компетенций в целом. Также нужно отметить относительную «бедность» проектов, нацеленных именно на фундаментальные исследования в нейтронной физике.

Рекомендация: определиться с национальной стратегией, приступить к реализации проектов ИБР-3 в ОИЯИ, нейтронного комплекса в ИЯИ РАН и программ развития компактных нейтронных источников.

Подготовка кадров в области фундаментальной ядерной физики носит провальный характер. Стратегически необходимо принять решение — или усилить систему локальной подготовки кадров (современная тенденция), или стремиться к восстановлению лидирующего статуса крупных национальных вузов (советская модель). Особенно возмутительно выглядит развал проекта ИЦФР, предложившего совершенно новую, перспективную **неэкспортную** модель подготовки и постобразовательной поддержки молодых кадров.

Рекомендация: необходимо выстроить систему подготовки кадров в соответствии с приоритетами фундаментальной ядерной физики и физики частиц; по возможности вернуть эффективные в прошлом модели взаимодействия ведущих вузов с ведущими отечественными потребителями кадров.

Инфраструктура проекта FAIR (т. е. научная инфраструктура Германии) финансируется, а должной подготовки экспериментов ядерно-физической тематики в рамках FAIR российскими научными организациями — практически нет. Зачем РФ оплачивать создание дорогостоящей научной инфраструктуры в Германии, если отечественные ученые не могут на достойном уровне участвовать именно в научной работе этого центра? «На достойном уровне» означает — на уровне создания приборов и методик (для проведения исследований в FAIR) в домашних организациях, а не методом поездок в гости «с пустыми карманами» и не методом «экспорта» научной молодежи.

Рекомендация: необходимо привести в сбалансированное состояние финансирование создания инфраструктуры FAIR в Германии и финансирование научных экспериментов российских ученых в рамках научной программы FAIR.

«ДОРОЖНАЯ КАРТА» В ОБЛАСТИ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Подписано в печать 10.12.2021. Формат 70x100 1/16.
Гарнитура Times. Печ. л. 5.
Тираж 300 экз. Заказ № 6235.

Издатель – Российская академия наук

Оригинал-макет подготовлен
ООО «Красногорский полиграфический комбинат»

Публикуется в авторской редакции

Отпечатано в ООО «Красногорский полиграфический комбинат»
115093 г. Москва, Партийный переулок, д. 1, корп. 58, стр. 1, эт. 1, пом. 1

Издается в соответствии с постановлением Научно-издательского совета
Российской академии наук (НИСО РАН) от 12 февраля 2021 г. № 01
и распространяется бесплатно