

УДК 538.9+539.123+539.17

ФИЗИКА ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА

© 2023 г. А. А. Юхимчук^{1,*}, А. Н. Голубков¹, И. П. Максимкин¹, И. Л. Малков¹,
О. А. Москалев¹, Р. К. Мусяев¹, А. А. Селезнев¹, Л. В. Григоренко^{2,3,4}, В. Н. Трофимов²,
А. С. Фомичев², А. В. Голубева⁴, В. Н. Вербецкий⁵, К. А. Кузаков⁵, С. В. Митрохин⁵,
А. И. Студеникин⁵, А. П. Ивашкин⁶, И. И. Ткачев⁶

¹Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, Саров, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

⁵Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁶Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: arkad@triton.vniief.ru

Поступила в редакцию 12.10.2023 г.

После доработки 23.10.2023 г.

Принята к публикации 23.10.2023 г.

В статье представлена информация о научном направлении № 8 “Физика изотопов водорода” научной программы Национального центра физики и математики. Приводится описание целей и задач научного направления, их место в мировой науке и научно-техническом развитии Российской Федерации.

DOI: 10.56304/S2949609823010057, EDN: WVIPPV

ВВЕДЕНИЕ

В рамках направления № 8 “Физика изотопов водорода” Национального центра физики и математики (НЦФМ) предполагается проведение исследований по двум проектам:

1. исследования в области взаимодействия изотопов водорода с твердым телом;
2. фундаментальные исследования в области нейтринной физики и нейтроноизбыточных ядер с использованием изотопов водорода и гелия.

Основными целями проведения работ являются:

по первому проекту — исследования влияния водорода и его изотопов на физико-механические свойства материалов, развитие существующих и создание новых водородных технологий и технологий топливного цикла термоядерных устройств (хранения, разделения, очистки, транспортирования изотопов водорода). В рамках этого проекта реализуются следующие подпроекты: а) исследование взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами (КМ), водородной и гелиевой прочности материалов; б) получение термодинамических и кинетических параметров взаимодействия изотопов водорода (ИВ) с гидридообразующими металлами и интерметаллидными соединениями (ИМС), а также фазовых диаграмм состояния систем “металл—ИВ” при давлениях до 500 МПа; в) квантово-химическое и молекулярно-динамическое моделирование процессов взаимодействия ИВ и их смесей с твердым телом, коэффициентов переноса и параметров уравнения состояния плотных смесей ИВ и гелия;

по второму проекту — развитие методов исследований в области нейтринной физики и нейтроно-избыточных ядер с использованием изотопов водорода и гелия для фундаментальной ядерной физики. Получение рекордных данных по электромагнитным свойствам нейтрино дает возможность проверки Стандартной модели и поиска новой физики за ее пределами, а изучение свойств легких нейтроноизбыточных ядер, находящихся вблизи и за границей нейтронной стабильности, позволяет приоткрыть тайну нейтронной материи. В рамках этого проекта реализуются два подпроекта: а) измерение электромагнитных характеристик нейтрино с использовани-

ем интенсивного тритиевого источника (анти)нейтрино; б) изучение свойств нейтронно-избыточных ядер, лежащих на границе нейтронной стабильности и за ее пределами.

В статье приводится описание каждого подпроекта и их место в мировой науке и научно-технологическом развитии Российской Федерации.

1. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

1.1. Исследование взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами, водородной и гелиевой прочности материалов

Основная концепция развития ядерной энергетики в настоящее время подразумевает создание энергетических установок, обеспечивающих:

- расширенное воспроизводство вторичного ядерного горючего и использование в ядерном топливном цикле природного урана, а впоследствии — тория;

- дожигание долгоживущих радиоактивных отходов и нераспространение ядерных материалов.

Основными задачами “водородной” тематики по направлению ядерной энергетики являются [1]:

- в области фундаментальных исследований — изучение механизма взаимодействия изотопов водорода (ИВ) и радиогенного гелия с материалами и, на основании этих знаний, создание конструкционных материалов (КМ), малочувствительных к накоплению ИВ и гелия в объеме материала, или (на первом этапе) выработка конструктивных решений, позволяющих свести к минимуму деградацию свойств материалов при длительном взаимодействии с ИВ и радиогенным гелием;

- в области прикладных исследований — создание средств защиты КМ от воздействия ИВ, проникающих в материал из теплоносителя, а также через материалы теплообменника первого и второго контуров теплоносителя. В качестве таких средств могут выступать защитные покрытия, могут быть разработаны конструктивные и технологические решения и т. п.

В области термоядерной энергетики по “водородной” тематике основными задачами следует считать:

- создание обращенных к плазме материалов (ОПМ) и конструкционных материалов, способных длительно выдерживать экстремальные условия высоких температур и нейтронного повреждения, при этом захватывая минимальное количество трития и обеспечивая минимизацию утечек трития за пределы камеры реактора;

- создание экспериментальной базы для отработки технологий топливного цикла термоядерных реакторов (ТЯР).

Из текущих ОПМ наиболее перспективными являются вольфрам и жидкий литий. Однако их использование сопряжено с рядом проблем. Вольфрам хрупок при комнатной температуре, а в результате нейтронного облучения его температура хладноломкости сдвигается до 700°C [2], то есть он окажется хрупок в диапазоне рабочих температур. Необходимо разрабатывать сплавы вольфрама или технологии его обработки, которые позволят материалу оставаться пластичным в диапазоне рабочих температур ТЯР при значительном уровне нейтронного повреждения (десятки смещений на атом (с.н.а.)). Поскольку литий является геттером ИВ [3], его использование в ТЯР требует разработки технологий чрезвычайно быстрой очистки кубометров лития от трития. Кроме того, все материалы внутри камеры реактора должны быть совместимы с жидким литием.

Из конструкционных материалов ТЯР наиболее перспективными на данный момент считают ферритно-мартенситные стали с быстрым спадом наведенной активности. Отечественной сталью этого класса является ЭК-181 [4]. Недостаток этих материалов заключается в том, что они магнитные, а ТЯР — установка со значительными магнитными полями, что может создавать проблемы при переходных процессах. Альтернативой могут служить малоактивируемые аустенитные стали, разработка которых на сегодняшний день чрезвычайно перспективна.

Выбор теплоотводящих материалов ТЯР представляет собой проблему. Теплоотводящим материалом реактора ИТЭР является CuCrZr бронза. Но поскольку это высокоактивируемый материал, он не может быть применен в промышленных реакторах, если придерживаться концепции применения материалов с быстрым (в течение до 100 лет) спадом наведенной активности. Альтернативой могут служить SiC_f/SiC-композиты [5] — низкоактивируемые материалы с потенциально очень высокой теплопроводностью. При существующих технологиях производства

таких композитов их теплопроводность в разы меньше, чем у карбида кремния. Разработка SiC_f/SiC с высокой теплопроводностью весьма актуальна.

Необходимо исследовать параметры взаимодействия ИВ с материалами ТЯР в условиях, ожидаемых в ТЯР: при облучении нейтронами с энергией термоядерного спектра (≤ 14 МэВ) в диапазоне доз повреждения 1–100 с.н.а. и, желательно, при одновременном воздействии тепловых потоков в диапазоне 1–20 МВт/м². К сожалению, получить сочетание всех этих факторов возможно лишь, собственно, в ТЯР, создать который необходимо из материалов, уже имеющих необходимые характеристики и обеспечивающих необходимый ресурс работы в ТЯР. Отсюда, для тестирования потенциальных материалов ТЯР возникает необходимость в создании установок и методик, позволяющих моделировать свойства и состояние КМ после их длительной эксплуатации в реакторе. В качестве таких методик могут выступать:

- 1) облучение высокоэнергетичными тяжелыми ионами (в том числе Fe, W) для моделирования нейтронного повреждения;
- 2) “третиевый трюк” для генерации радиогенного гелия в объеме материалов, насыщенных тритием.

Исследования взаимодействия ИВ после указанных воздействий будут весьма востребованы до тех пор, пока в России не будет создан собственный действующий термоядерный реактор.

В термоядерном реакторе реакция будет протекать в смеси дейтерия и трития, продукты реакции — гелий и нейтроны. В ходе работы установки тритий будет накапливаться в материалах стенки, а рабочий газ — загрязняться атомами гелия и различных примесей, распыленных со стенки. Будет необходимо быстро разделять выхлоп откачной системы установки, выделяя тритий и удаляя ненужные примеси. Необходимы также технологии извлечения трития из конструкционных элементов реактора. Для отработки соответствующих технологий необходимо развитие стандовой базы топливного цикла, причем масштаб времен и объемов переработки должен быть сравним с требуемым для ТЯР.

Ключевыми проблемами направления в области *водородной энергетики* являются: массовое производство водорода и его безопасное хранение и транспортировка, особенно в случае использования на транспортных средствах.

В настоящее время существует множество способов получения водорода, себестоимость по большинству из них достаточно высока. Самым эффективным и дешевым способом в настоящее время считается метод паровой конверсии метана. Однако этот способ малопригоден для массового использования водорода на транспорте. Нарботка водорода путем электролиза воды в настоящее время, с учетом цен на энергоносители, экономически невыгодна, однако в случае постоянной потребности в водороде она будет применена. Такой способ получения водорода целесообразен либо при использовании провальных режимов в работе электростанций, особенно атомных, либо в случае избытка установленной мощности станции. Поэтому разработка дешевой технологии получения водорода теплохимическими, каталитическими или другими методами является приоритетной в данном направлении. Для всех перечисленных способов получения водорода важным аспектом является обеспечение его чистоты, в том числе и с использованием мембранных методов.

Для транспортировки водорода понадобится разработка транспортных систем. Наиболее целесообразно использовать для этих целей имеющиеся газовые магистральные трубопроводы, однако материал этих трубопроводов не аттестован для работы с водородом и, скорее всего, водородное охрупчивание материала не позволит его использовать напрямую. Одним из путей решения данного вопроса является создание ингибирующих добавок в водород, подавляющих водородное охрупчивание конструкционных материалов (например, добавка в водород природного газа).

Чрезвычайно важно создать устройства безопасного хранения водорода на борту транспортных средств. В настоящее время основными подходами в этом направлении являются: криогенное хранение, хранение водорода в сжатом виде, хранение водорода в химически или физически связанном состоянии (химическая абсорбция или физическая адсорбция, гидриды). Хранение водорода в сжиженном состоянии или в баллонах высокого давления уже применяется, но имеет недостатки: необходимость затрат энергии на поддержание низкой температуры, взрывоопасность в случае аварий. Наиболее перспективным на сегодня считается хранение водорода в металлгидридных системах. Работы в этом направлении в ближайшее время будут интенсивно развиваться.

При переходе к массовому использованию водорода в качестве энергоносителя или топлива для автомобиля потребуются дешевые конструкционные материалы, способные длительное время работать в среде водорода без изменения своих механических свойств.

В настоящее время металлические материалы, получаемые с использованием аддитивных технологий (АТ), рассматриваются как новый класс конструкционных материалов, а сами АТ — как новый перспективный способ конструирования металлических изделий сложной формы для перспективных приложений в машиностроении, биомедицине и энергетике.

Вместе с тем, в научно-технической литературе практически отсутствует информация об исследованиях процессов взаимодействия таких КМ с водородом, а также о влиянии водорода на их механические свойства. Результаты исследования взаимодействия водорода с КМ, полученными с помощью АТ, представляют научный и практический интерес в связи с интенсивным развитием водородной энергетики.

Таким образом, тематика взаимодействия ИВ с твердым телом и, в частности, с КМ является крайне актуальной как с теоретической (создание теорий, моделей поведения водорода в твердом теле), так и с сугубо практической (выбор КМ для конкретных условий применения) точек зрения.

1.2. Исследования термодинамических и кинетических параметров взаимодействия ИВ с гидридообразующими металлами и ИМС

О перспективах использования металлгидридных систем в водородном транспорте уже говорилось выше, однако металлгидридные системы обладают рядом уникальных свойств. Так водород, попадая в кристаллическую решетку металла, может кардинально изменить его свойства, например, при давлении порядка нескольких миллионов атмосфер были синтезированы гидриды металлов, обладающие сверхпроводимостью при температурах выше температуры кипения жидкого азота [6]. К сожалению, они не стабильны при снижении давления. Поэтому производство в промышленных масштабах и эксплуатация таких сверхпроводников пока нереальны. Но работы в направлении синтеза новых гидридов с содержанием водорода выше обычного, так называемых “сверхстехиометрических” гидридов, непрерывно ведутся. Главная задача здесь — снижение давления, необходимого для синтеза и использования гидридов, а цель — получение металлгидридных систем с уникальными свойствами и повышенным объемным содержанием водорода для практического применения, например, в водородном транспорте [7].

Увеличение содержания водорода в гидридах для увеличения пробега транспортных средств на водородном топливе является одной из главных задач в этой области. Большое значение здесь приобретают работы с высокими давлениями изотопов водорода. При обычно используемых давлениях водорода 0.1–15 МПа далеко не все металлы, сплавы или интерметаллиды способны реагировать с водородом или достичь своей максимальной водородной емкости. В то же время повышение давления до нескольких сотен МПа необходимо для создания новых материалов с заданными свойствами.

Целью проведения работ в рамках научной программы НЦФМ по синтезу гидридов металлов и ИМС с применением высоких давлений является попытка синтеза “сверхстехиометрических” гидридов при давлениях до 500 МПа и исследование их свойств. Для этого создаются установки, позволяющие при этих давлениях проводить синтез гидридов и исследования их свойств различными методами термического анализа и путем измерения соотношения Р-Т-С (давление—температура—концентрация водорода) для получения фазовой диаграммы состояния гидридов.

Важным объектом исследования материалов для хранения изотопов водорода являются сплавы 3d-металлов со структурой фаз Лавеса и так называемые высокоэнтропийные сплавы [8, 9] (многокомпонентные сплавы, состоящие из пяти и более компонентов с примерно равными атомными долями и с высокими значениями энтропии смешения).

В настоящее время реакция взаимодействия водорода с высокоэнтропийными сплавами различных структурных типов (в том числе фаз Лавеса) недостаточно изучена. Установление корреляций между характеристиками абсорбции/десорбции водорода и составом сплавов и интерметаллических соединений 3d- и 4f-металлов несомненно представляют как научный, так и практический интерес.

1.3. Квантово-химическое и молекулярно-динамическое моделирование процессов взаимодействия ИВ и их смесей с твердым телом, коэффициентов переноса и параметров уравнения состояния плотных смесей ИВ и гелия

В настоящее время методы молекулярной динамики (МД) широко используются для расчета свойств различных материалов. Методы МД-моделирования позволяют получать информацию о физико-химических характеристиках веществ в области параметров (температура, давление), где проведение реального физического эксперимента затруднительно или практически невозможно. В данном проекте предполагается провести адаптацию на высокопроизводительных компьютерах методов МД-моделирования для определения свойств плотных газовых смесей изотопов водорода и гелия, а также для расчета кинетических констант, характеризующих скорость взаимодействия изотопов водорода с металлами, образующими гидридные фазы. Предполагается адаптировать как методы классической молекулярной динамики, так и методы МД-моделирования, где межатомные взаимодействия рассчитываются из первых принципов на основе метода функционала плотности (DFT).

Метод функционала плотности начал разрабатываться с начала 60-х годов прошлого века. В работах Кона с Хоэнбергом и Шэмом [10, 11] было впервые показано, что вместо волновой функции для расчета основных характеристик многоэлектронной системы можно использовать электронную плотность. Именно это наблюдение позволяет снять трудности расчета характеристик многоэлектронных ансамблей методом решения уравнения Шредингера, поскольку электронная плотность для любой системы зависит только от трех пространственных переменных. Теория Кона–Шэма (метод DFT) лежит в основе современных расчетов электронных свойств конденсированных систем. Достигнутые в этом направлении успехи систематизированы во многих статьях и монографиях. Сейчас эта теория принята широким кругом специалистов, число публикаций и научных конференций по указанной тематике неуклонно увеличивается. В квантовой химии метод DFT дополняет результаты теории Хартри–Фока, полученные для небольшого числа электронов $N \leq 10$. Для периодических систем метод DFT рассматривается как стандартная модель. Метод позволяет рассчитывать многие интересные эффекты, которые не удается рассчитать другими способами. Метод квантовой МД, базирующийся на DFT, позволяет моделировать свойства плотных газовых смесей, а также сложных, многокомпонентных кристаллических структур. Многообещающие результаты получены для жидкостей.

В работе Кар и Паринелло [12] также был разработан мощный метод, позволяющий создавать МД-модели, в которых ионы перемещаются классически, но под действием сил, полученных путем решения задачи распределения электронной структуры, исключая таким образом потребность в эмпирических потенциалах. Эта важная разработка является продолжением одного из самых важных направлений исследования в физике твердого тела, известное как МД из первых принципов (ab initio, FPMD).

В существующей классической МД задачи решаются с использованием самых мощных компьютеров на ансамблях, содержащих миллион частиц, или в течение времени моделирования порядка наносекунд. Предел для FPMD имеет порядок тысячи атомов, и его типичные времена моделирования измеряются в пикосекундах. Это означает, что ряд задач, требующих больших размеров и/или больших времен могут быть решены только с помощью классических МД-методов. Хотя быстродействие компьютеров продолжает увеличиваться, это же происходит и с размером интересующих нас задач, и, вероятно, все МД-методы, которые сегодня известны, еще будут использоваться в течение достаточно длительного времени.

Фактически, классическая МД и МД из первых принципов представляют противоположные концы всего спектра МД-методов, отличающихся по степени приближения. Ознакомиться с быстро развивающейся областью моделирования из первых принципов, можно, например, по обзорным статьям [13, 14].

Компьютерный код, реализующий FPMD, может легко вычислить огромное количество полезных и надежных данных, например, сил, действующих на атомы, для различных геометрий и координат. Эти данные могут дополнить экспериментальные величины, обычно используемые для подгонки параметров потенциалов, помогая строить более реалистические потенциалы. Можно сказать, что в этом случае межатомный потенциал построен на знаниях энергии межатомного взаимодействия, полученных из первых принципов.

Использование метода DFT для расчета межатомного взаимодействия при МД-моделировании на высокопроизводительных компьютерах позволит получить новые данные о свойствах плотных газовых смесей изотопов водорода и гелия. Адаптация данного метода моделирования свойств материалов на высокопроизводительных компьютерах позволит также рассчитывать

свойства водородсодержащих металлов и кинетические константы, характеризующие скорость поглощения изотопов водорода металлами. Информация по данным параметрам необходима для прогнозирования поведения материалов в среде водорода и определения стойкости (срока службы) конструкционных материалов, контактирующих с газообразными ИВ.

2. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ НЕЙТРИННОЙ ФИЗИКИ И НЕЙТРОНОИЗБЫТОЧНЫХ ЯДЕР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ

2.1. Фундаментальные исследования в области нейтринной физики

Исследования электромагнитных свойств, в особенности магнитного момента, нейтрино, призваны открыть окно в новую физику [15]. Это связано с тем, что магнитный момент нейтрино наиболее хорошо изучен среди возможных электромагнитных характеристик нейтрино, которые равны нулю в Стандартной модели с безмассовыми нейтрино и могут возникнуть только за ее пределами. В минимальном расширении Стандартной модели диагональный магнитный момент массивного дираковского нейтрино ν_i дается выражением [15]:

$$\mu_{ii}^D = \frac{3eG_F m_i}{8\sqrt{2}\pi^2} \approx 3.2 \times 10^{-19} \left(\frac{m_i}{1 \text{ eV}} \right) \mu_B, \quad (1)$$

где e — элементарный заряд; G_F — константа Ферми; μ_B — магнетон Бора, m_i — масса нейтрино в электронвольтах. Существуют различные теоретические сценарии за пределами минимально расширенной Стандартной модели, которые предсказывают на порядки большие значения магнитного момента нейтрино по сравнению с (1) (см. [15] и цитируемую там литературу). Самые строгие верхние границы для магнитного момента нейтрино в лабораторных экспериментах получены в экспериментах с реакторными нейтрино: $\mu_\nu \leq 2.9 \times 10^{-11} \mu_B$ (GEMMA Collaboration [16, 17]), и солнечными нейтрино: $\mu_\nu \leq 6.3 \times 10^{-12} \mu_B$ (на основе данных эксперимента LUX-ZEPLIN [18]). На порядок более строгие ограничения накладываются исследованиями астрофизических нейтрино (см., например [15]). Таким образом, важной целью этого фундаментального физического исследования является сокращение разрыва между существующими верхними пределами на магнитные моменты нейтрино, полученными экспериментальными методами, и теоретически предсказанными значениями.

В работе [19] авторами предложена схема эксперимента для наблюдения когерентного упругого рассеяния нейтрино на атоме (CEvAS), используя электронные антинейтрино от бета-распада трития и детектор на основе сверхтекучего ^4He . В этом процессе рассеяния на атоме в целом электроны стремятся экранировать слабый заряд ядра, воспринимаемый электронным антинейтрино. Впервые CEvAS было теоретически предсказано в работе Гапонова и Тихонова [20], но до сих пор этот процесс экспериментально не наблюдался. Заметим, что экспериментальное изучение CEvAS предоставило бы уникальную возможность проверки Стандартной модели при беспрецедентно низких нейтринных энергиях и поиска новых, нестандартных взаимодействий нейтрино.

Дифференциальное число событий, вызванных нейтрино, в зависимости от энергии атомной отдачи T_R в логарифмическом масштабе показано на рис. 1. Дифференциальное число событий, связанное с когерентным упругим рассеянием нейтрино на ядре (CEvNS), показано черной сплошной линией, случай CEvAS показан пунктирной красной линией. Пунктирная синяя линия представляет дополнительное слагаемое, появляющееся в результате CEvAS при значении магнитного момента $\mu_\nu = 10^{-12} \mu_B$, в то время как пунктирная зеленая линия представляет собой суммарное дифференциальное число событий CEvAS при том же значении μ_ν . В работах [19, 21] показано, что, измеряя ранее экспериментально не изучавшийся процесс CEvAS, можно установить верхний предел, который более чем на два порядка лучше текущего рекордного экспериментального предела на базе упомянутого выше эксперимента по рассеянию реакторных нейтрино на электронах (GEMMA [16, 17]) и на порядок лучше рекордного ограничения из данных по рассеянию солнечных нейтрино на электронах (LUX-ZEPLIN [18]). Соответствующий эксперимент с использованием мощного источника тритиевых нейтрино в настоящее время готовится в рамках исследовательской программы НЦФМ в г. Саров. На рис. 2 приведен исторический ход экспериментальных результатов для верхнего ограничения на магнитный момент нейтрино, а также результаты, которые планируется получить в рамках НЦФМ (точки 13, 14 и 15).

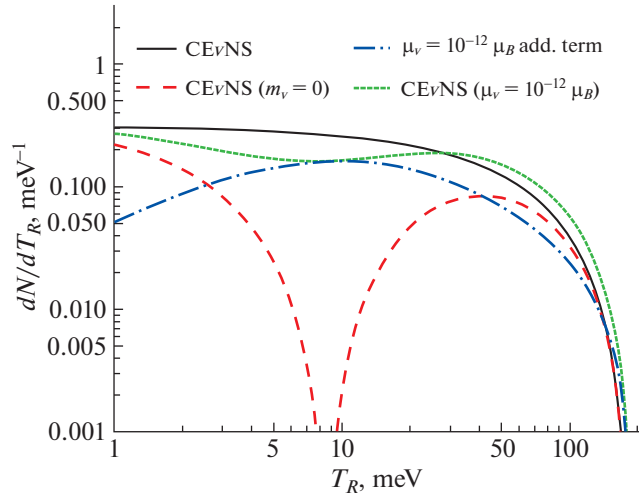


Рис. 1. Спектр энергии атома отдачи [19].

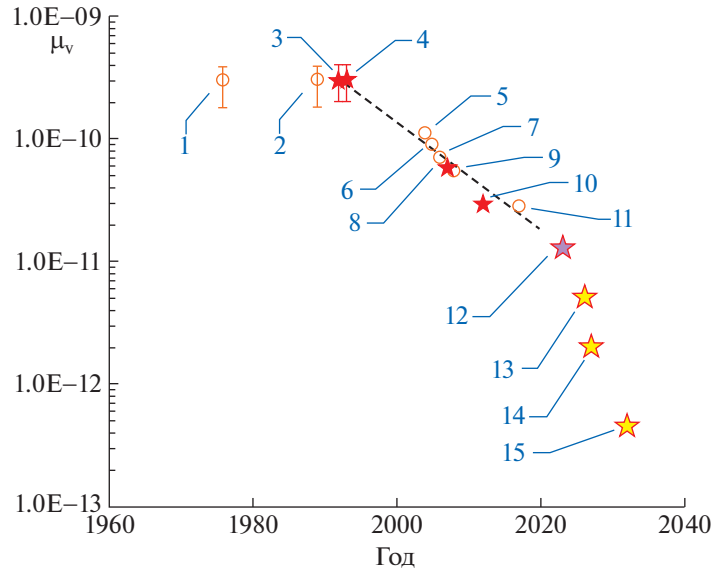


Рис. 2. Прогресс в измерении лабораторного ограничения на магнитный момент электронного нейтрино. 1 – Savannah River, first observation (1976) – $(2-4) \times 10^{-10}$ μ_B [22]; 2 – Vogel, Engel (1989) – $(2-4) \times 10^{-10}$ μ_B [23]; 3 – Kurchatov Institute, Krasnoyarsk (1992) – $(2-4) \times 10^{-10}$ μ_B [24]; 4 – Rovno, reactors (1993) – $(2-4) \times 10^{-10}$ μ_B [25]; 5 – Super-Kamiokande (2004) – 1.1×10^{-10} μ_B [26]; 6 – MUNU experiment at Bugey reactor (2005) – 9.0×10^{-11} μ_B [27]; 7 – Texono collaboration (Kuo-Sheng power plant) (2006) – 7.0×10^{-11} μ_B [28]; 8 – GEMMA I reactor (2007) – 5.8×10^{-11} μ_B [29]; 9 – BOREXINO (2008) – 5.4×10^{-11} μ_B [30]; 10 – GEMMA I reactor (2012) – 2.9×10^{-11} μ_B [16, 17]; 11 – BOREXINO (2017) – 2.8×10^{-11} μ_B [31]; New experiments: 12 – GEMMA-2 (vGEN) reactor (2023...2024) – $(1-1.6) \times 10^{-11}$ μ_B [32]; New Projects: 13 – Sarov, SrI₂(Eu)-detector (2026) – $(3-8) \times 10^{-12}$ μ_B [33]; 14 – Sarov, Si-detector (2027) – $(1.5-2.5) \times 10^{-12}$ μ_B [34]; 15 – Sarov, He-detector (2030–2032) – $(4-6) \times 10^{-13}$ μ_B [21]

В рамках данного проекта предлагается подготовить и реализовать серию экспериментов по детектированию эффектов магнитного момента нейтрино с использованием трех типов детекторов:

а) низкотемпературного (от 80 до 100 К) сцинтилляционного (CsI или SrI₂(Eu)) с порогом регистрации 100 эВ [33], см. рис. 3;

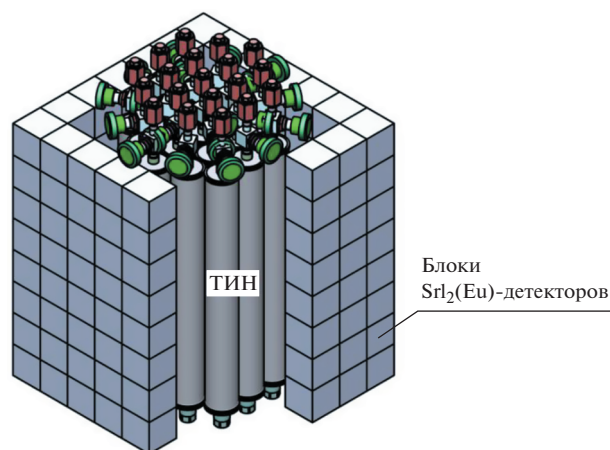


Рис. 3. Схема эксперимента с криогенным сцинтилляционным детектором.

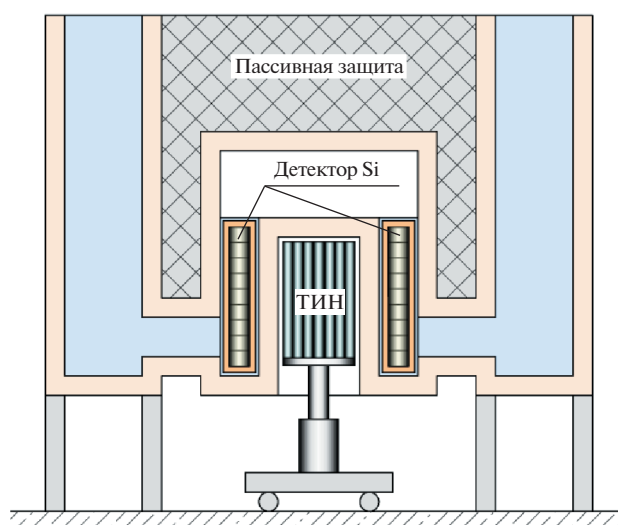


Рис. 4. Схема эксперимента с низкотемпературным кремниевым детектором.

б) криогенного (от 10 мК до 50 мК) кремниевого с порогом регистрации от 1 до 3 эВ [34], см. рис. 4;

в) жидкогогелиевого (от 40 мК до 60 мК) с порогом регистрации менее 0.1 эВ [21], см. рис. 5.

Предел по ограничению на магнитный момент нейтрино для каждого из детекторов приведен на рис. 2.

Следует отметить, что каждый из детекторов имеет рекордный для своего типа порог регистрации энергии и может использоваться для большого количества приложений (не только в нейтринной физике, но и при поиске новых частиц и темной материи). В частности, благодаря рекордно низким порогам регистрации энергии электронов отдачи при рассеянии тритиевых нейтрино в кремниевом и сцинтилляционном детекторах ожидается достижение на порядок лучшей чувствительности к величине магнитного момента электронного антинейтрино по сравнению с достигнутой в эксперименте GEMMA.

Наиболее амбициозным из планируемых экспериментов является эксперимент, предложенный в работе [19]. В этой работе впервые предложена принципиально новая экспериментальная схема для наблюдения когерентного упругого рассеяния нейтрино на атомах (CEvAS) жидкой гелиевой мишени (гелий находится в сверхтекучем состоянии) с использованием электронных

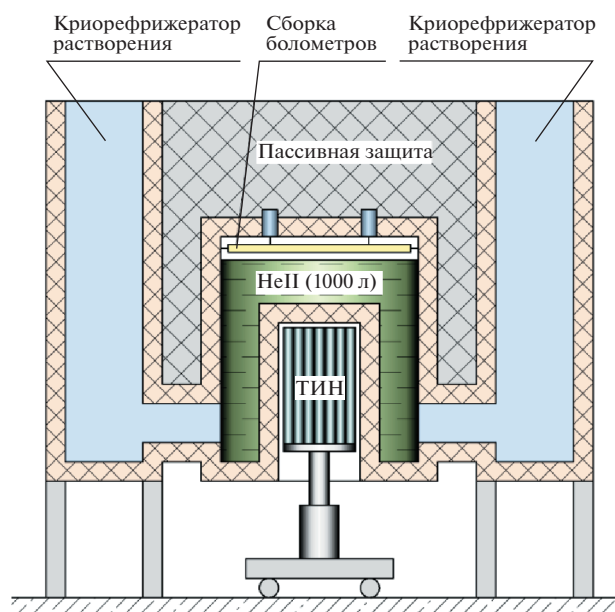


Рис. 5. Схема эксперимента с жидкогелиевым детектором.

антинейтрино от распада трития. В результате проведенного анализа чувствительности предложенного эксперимента к возможному магнитному моменту электронного нейтрино показано, что можно установить верхний предел для магнитного момента на уровне $(2-4) \times 10^{-13} \mu_B$ [21], что, как было сказано ранее, почти на два порядка лучше ограничения для электронных антинейтрино, полученного в эксперименте GEMMA [16, 17], и на порядок лучше существующего в настоящее время рекордного предела, полученного на основе данных астрофизических наблюдений [18].

2.1.1. Тритиевый источник нейтрино

Принципиальная конструктивная схема тритиевого источника нейтрино (ТИН) проработана в работе [35]. ТИН представляет собой набор трубчатых элементов (ТЭ), в которых тритий находится в химически связанном состоянии на титане (рис. 6).

В ТЭ помещается порошок титана в насыпном виде. Затем производится температурная активация порошка титана и его насыщение тритием, после чего ТЭ герметизируется. Такая конструкция ТЭ будет классифицироваться как “Источник радионуклидный закрытый”. Согласно

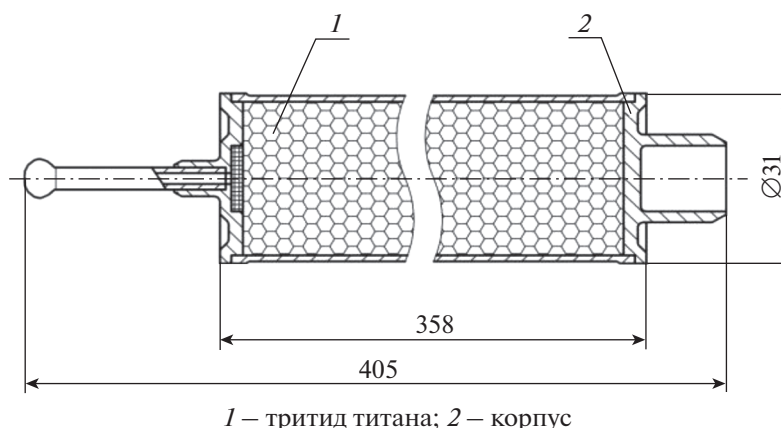


Рис. 6. Конструкция трубчатого тритиевого элемента.

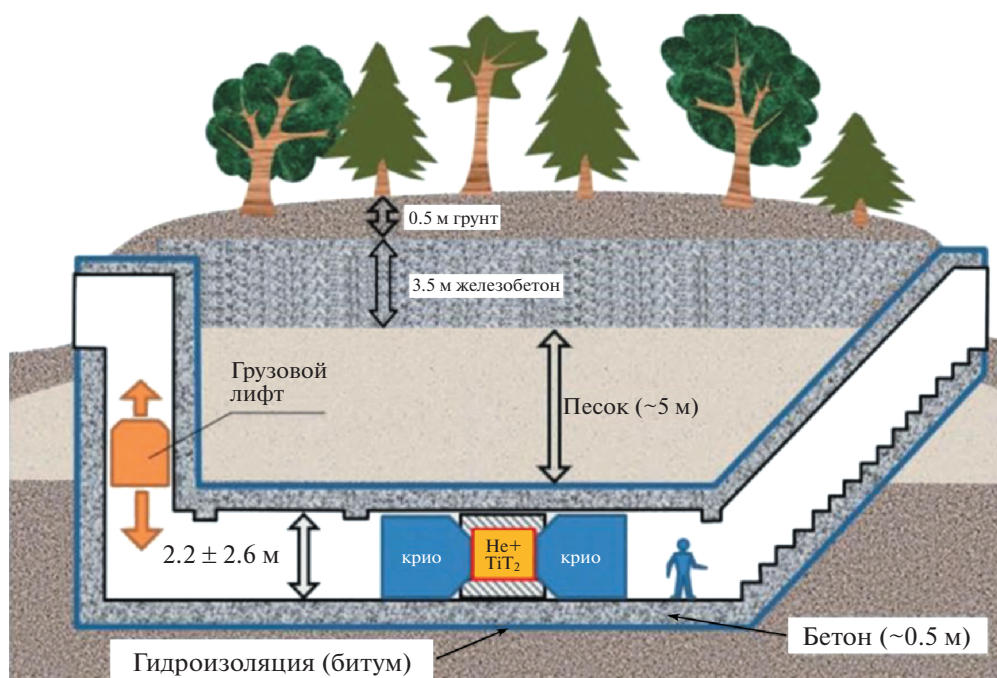


Рис. 7. Схема здания в разрезе.

НРБ-99/2009 “Источник радионуклидный закрытый — источник излучения, устройство которого исключает поступление содержащихся в нем радионуклидов в окружающую среду в условиях применения и износа, на которые он рассчитан”. То есть конструкция ТЭ выполнена таким образом, чтобы извлечь из нее тритий было возможно только в специальных заводских условиях.

Количество трития в ТЭ не больше допустимого для его безопасного обращения при транспортировке, согласно действующим национальным и международным нормам. На данном этапе принято, что масса трития в ТЭ будет составлять не более 50 г (0.5 МКи). Для конкретной детектирующей системы геометрия ТЭ должна выбираться из условий: эффективности использования нейтрино, обеспечения удобства производства и эксплуатации ТЭ, обеспечения безопасности проведения работ с ТЭ и экспериментальной установкой в целом.

2.1.2. Низкофоновая нейтринная лаборатория

Для проведения эксперимента понадобится создание низкофоновой нейтринной лаборатории (НФНЛ), обеспечивающей условия минимизации вклада компоненты жесткого космического излучения, которое будет влиять на фоновые характеристики детектирующей системы. По оценкам экспертов достаточным является заглубление под землю на 10 м или наличие мощного бетонного перекрытия толщиной примерно 4 м. На рис. 7 приведена схема имеющегося во ВНИИЭФ здания в разрезе.

Как видно из представленной схемы над рабочими помещениями НФНЛ имеется 3.5 м железобетона, изготовленного еще до “ядерной” эры и в этом плане чистого по элементам уранового ряда, 5 м песка и более 0.5 м грунта. Поэтому ожидается, что фоновые условия будут приемлемыми для проведения работ.

2.2. Фундаментальные исследования в области нейтроноизбыточных ядер

Продвижение к границам ядерной стабильности в направлении изучения нейтронно-избыточных и нейтронно-дефицитных ядер было и остается основным приоритетом ядерной физики на протяжении последнего полувека. Исследование свойств этих ядер имеет важное значение для понимания ядерных сил, астрофизических процессов и формирования ядер химических элементов. Представление о современном состоянии исследований легких экзотических ядер в области $Z \leq 20$ дает рис. 8. На сегодняшний день лишь для самых легких ядер достигнуты границы

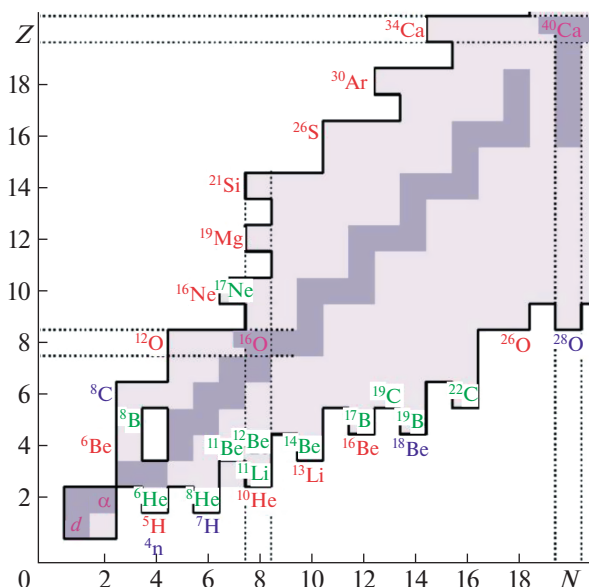


Рис. 8. Границы ядерной стабильности для изотопов с $Z \leq 20$ (из работы [36]). Зеленым цветом выделены ядра с гало-структурой, красным — излучатели двух протонов или нейтронов, синим — $4p/4n$ излучатели, серым и светло-серым фоном — долина стабильности и области ядерной стабильности, пунктиром обозначены замкнутые оболочки по нейтронам/протонам.

стабильности, а свойства легких ядер вблизи этих границ ($^5,6,7\text{H}$, $^9,10\text{He}$, $^{11,13}\text{Li}$, $^{16,18}\text{Be}$, $^{17,19}\text{B}$ и др.) продолжают интенсивно изучаться в ведущих мировых центрах [36]. Для более тяжелых изотопов с $Z \geq 4$ информация о ядерной структуре и каналах распада этих ядер оказывается весьма скудной и противоречивой, особенно с экспериментальной точки зрения. Вопрос о нахождении границы стабильности тесно связан с вопросом о пределах существования ядерной материи. Считается, что граница ядерной стабильности определяется теми нуклидами, для которых энергия отделения ядерных фрагментов (одного нуклона, нескольких нуклонов, альфа-частицы, более тяжелого кластера) становится положительной.

Важно отметить, что явление спаривания нуклонов проявляется как на протонной, так и на нейтронной границах стабильности, о чем свидетельствуют характерные выступы на рис. 8. Качественно это означает, что два нейтрона или два протона находятся в коррелированном состоянии с суммарным спином равным нулю, образуя бозонную квазичастицу [37]. Для таких ядер характерны особые формы ядерной динамики, которая получила свое название как динамика нескольких тел и имеет достаточно развитое теоретическое описание [38]. Здесь устоявшимися понятиями являются так называемые боромиевские ядра с двухнуклонным гало, *двухпротонная* радиоактивность и демократические распады (истинно трехчастичные распады) [39]. Теорией предсказаны также такие явления как радиоактивные распады с испусканием $2n$, $4n$, $4p$, требующие экспериментальной проверки [36, 40]. Как известно, модели ядерной структуры были сформулированы на основе данных, полученных для ядер в окрестности долины стабильности. Приемлемость моделей к ядрам, находящимся далеко от долины стабильности с низкой энергией связи валентных нуклонов и аномальной зарядовой асимметрией, представляет особый интерес. Криогенные мишени изотопов водорода и гелия дают возможность изучать такие экзотические системы в реакциях передачи нуклонов (d, p), (d, n), ($d, ^3\text{He}$), ($d, ^3\text{H}$), (p, d), (p, t), ($^3\text{He}, n$), (t, p) и реакциях квазисвободного рассеяния ($\alpha, 2\alpha$), ($\alpha, t\alpha$), имеющих достаточно высокое сечение при энергиях 10–50 МэВ/нуклон [36].

Экспериментальные исследования в рамках предлагаемого проекта будут проводиться с использованием комплекса криогенных мишеней и интенсивных радиоактивных пучков в ЛЯР ОИЯИ (г. Дубна) на новом фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 при ускорителе тяжелых ионов У-400М, см. рис. 9 [41]. К преимуществам установки АКУЛИНА-2@У-400М в сравнении с мировыми аналогами следует отнести: (а) относительно низкий диапазон энергий радиоактивных пучков (от 5–7 МэВ/нуклон до 50 МэВ/нуклон), удобный для изучения прямых ядерных реакций; (б) уникальная возможность работы с криогенными мишенями изотопов гелия и водорода

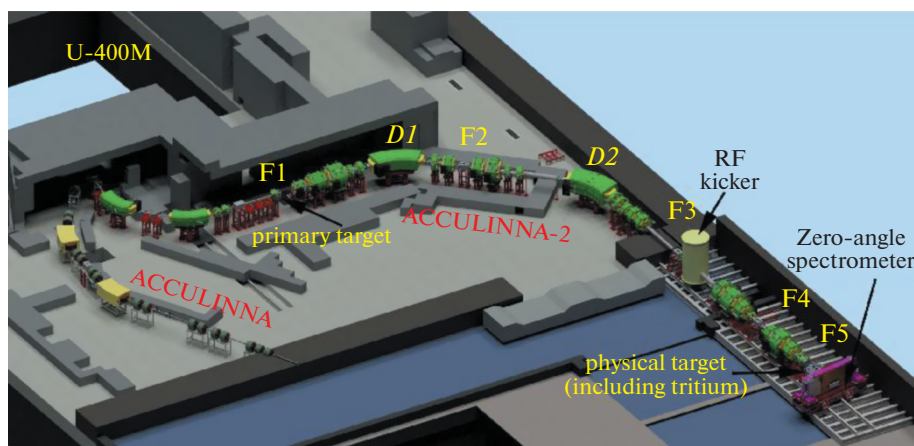
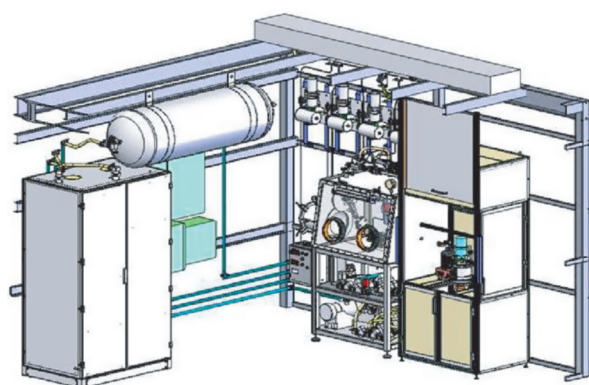


Рис. 9. Схема фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2 в зале ускорителя тяжелых ионов У-400М (из работы [41]). В фокальных плоскостях установки указаны следующие ключевые элементы: F1 — производящая мишень, F3 — высокочастотный фильтр, F5 — физическая мишень (включая тритий) и спектрометр для фрагментов, вылетающих вперед под малыми углами.



(а) 3D-модель



(б) после монтажа

Рис. 10. Тритиевый комплекс.

(включая тритий) 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 (месяц и более).

Исследования структуры ядер с большим избытком протонов или нейтронов и редких каналов их распада будут проводиться на вторичных пучках радиоактивных ионов, полученных в реакциях фрагментации ядер стабильных изотопов с $Z \leq 36$, ускоренных на циклотроне У-400М до энергий 30–60 МэВ/нуклон. Производящая бериллиевая мишень и имеющаяся радиационная защита позволяют работать с мощностью пучка тяжелых ионов до 4 кВт. С середины 2020 года ведется модернизация ускорителя У-400М, нацеленная на увеличение стабильности работы, повышение энергии, интенсивности и качества пучков тяжелых ионов.

Наиболее сложной и дорогостоящей разработкой для реализации программы исследований нейтронно-избыточных ядер является создание тритиевой инфраструктуры, удовлетворяющей современным требованиям безопасности. На первом этапе (2022/24 гг.) планируется ввести в эксплуатацию новый тритиевый комплекс (рис. 10) с набором тритиевых мишеней (рис. 11) и получить лицензию на проведение экспериментов с количествами трития 2.7 кКи. Возможность использовать тритиевые мишени является уникальной (сегодня единственной в мире), она открывает широкий класс исследований экзотических ядер.

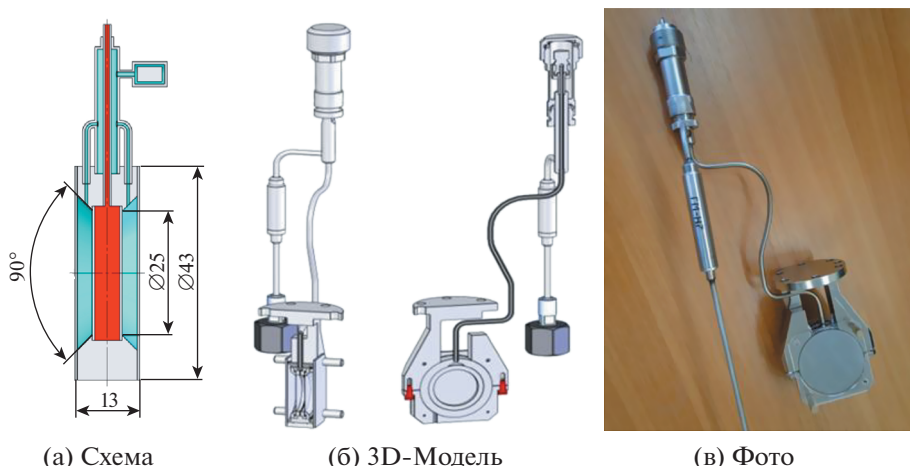


Рис. 11. Тритиевая мишень.

Ожидается, что с 2024 года возобновится программа исследований с пучками радиоактивных ядер на качественно новом уровне и будут исследованы свойства нейтронно-избыточных ядер ${}^6\text{H}$, ${}^7\text{He}$, ${}^{10}\text{He}$, ${}^{13}\text{Li}$, ${}^{16}\text{Be}$, ${}^{19-21}\text{C}$, ${}^{24,26}\text{O}$ и др. в реакциях (t, p) , (t, d) , (t, α) , $(t, {}^3\text{He})$.

В числе первых экспериментов на новом комплексе планируются следующие:

1) Прецизионное исследование уровней ${}^{10}\text{He}$ и схем распада в реакции с тритиевой мишенью ${}^8\text{He}(t, p){}^{10}\text{He}$ при энергии пучка, ~ 25 МэВ/нуклон. Ожидается, что будет достигнута высокая светимость эксперимента и достаточно хорошее инструментальное разрешение ~ 250 кэВ полуширина на полувысоте (ПШПВ) для основного состояния ${}^{10}\text{He}$ при регистрации тройных совпадений p - n - n (метод комбинированной массы).

2) Изучение спектра уровней ${}^7\text{H}$ в реакциях ${}^8\text{He}(t, {}^4\text{He}){}^7\text{H}$ и ${}^8\text{He}(d, {}^3\text{He}){}^7\text{H}$, канала распада ${}^7\text{H}$ на 5 тел — тритон и 4 нейтрона (${}^3\text{H} + 4n$), и исследование его характеристик:

а) измерение ширины основного состояния ${}^7\text{H}$ с инструментальным разрешением 300 кэВ;

б) измерение спектра и идентификация резонансных уровней ${}^7\text{H}$ в диапазоне, простирающемся до энергии 12 МэВ выше порога распада ${}^7\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + 4n$;

в) прецизионные измерения угловых и энергетических корреляций продуктов 5-тельного распада ${}^7\text{H}$.

3) Изучение спектра уровней ${}^7\text{He}$, изобар-аналога ${}^7\text{H}$, в реакции ${}^6\text{He}(d, p){}^7\text{He}$ при энергии пучка ${}^6\text{He} \sim 30$ МэВ/нуклон. Кинематика данной реакции и имеющаяся детектирующая аппаратура позволяют эффективно регистрировать тройные совпадения p - ${}^6\text{He}$ - n и тем самым детально исследовать спектр возбуждений ${}^7\text{He}$ с рекордным экспериментальным разрешением на уровне 150 кэВ (ПШПВ) в широком диапазоне энергий (до 10 МэВ).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена информация о научном направлении 8 НЦФМ “Физика изотопов водорода”. В рамках направления исследования проводятся по двум Проектам:

1. Исследования в области взаимодействия изотопов водорода с твердым телом;

2. Фундаментальные исследования в области нейтринной физики и нейтроноизбыточных ядер с использованием изотопов водорода и гелия.

Приведена мотивация и ожидаемые результаты выполнения работ по каждому из этих Проектов.

В рамках первого Проекта ожидается развитие как фундаментальных знаний о механизмах взаимодействия ИВ с различными материалами, так и прикладных технологий с конструктивными и техническими решениями, которые позволяют:

— минимизировать деградацию свойств материалов при взаимодействии с водородом и радиоактивным гелием;

- повысить ресурс конструкций и оборудования, применяемых в существующих ядерных и перспективных термоядерных и гибридных реакторах;
- обеспечить эффективное производство, безопасное хранение и транспортировку ИВ в сфере технических мероприятий по водородной энергетике;
- получить ряд новых материалов, обладающих определенными преимуществами в контакте с ИВ, и изучить их свойства;
- проводить верифицированное моделирование физико-химических процессов взаимодействия ИВ с материальной средой в области параметров, недостижимых в реальных условиях.

В рамках второго Проекта на текущем этапе предполагается разработка специализированного оборудования и инфраструктуры для тритиевого обеспечения экспериментальных комплексов, а также дальнейшее развитие детекторных систем и экспериментальных методик с целью углубленного изучения нейтринной физики и структуры легких нейтронно-избыточных ядер.

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 8 “Физика изотопов водорода”. Этап 2023–2025 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юхимчук А.А. // ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез. 2009. № 3. С. 49.
2. Gaganidze E., Chauhan A., Schneider H.-C. et al. // J. Nucl. Mater. 2021. V. 556. Art. № 153200.
3. Литий в термоядерной и космической энергетике XXI века /под ред. В.Н. Михайлова, В.А. Евтюхина, И. Е. Люблинского и др. М.: Энергоатомиздат, 1999. 526 с.
4. Леонтьева М.В., Смирнова, Агафонов А.Н. и др. // Перспективные материалы. 2006. № 6. С. 40–52
5. Aljaz Ivekovic, Sasa Novak, Goran Drazic et al. // J. European Ceramic Society. 2013. V. 33. № 10. P. 1577–1589.
6. Troyan I.A. et al. // Advanced Materials. 2021. № 33. Art. № 2006832.
7. Коромеев А.С., Миронов В.В., Смоляков В.А. // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 2004. ISJAE № 1 (9). С. 5–13.
8. Yeh J.W., Chen S.K., Lin S.J. et al. // Adv. Eng. Mater. 2004. V. 6. № 274. P. 299–303.
<https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
9. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. // Mater. Sci. Eng. A. 2004. V. 375–377. P. 213–218,
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
10. Hohnberg P., Kohn W. // Phys. Rev. 1964. A. 136. P. 864.
11. Kohn W., Sham L.J. // Phys. Rev. 1965. A. V. 140. P. 1133.
12. Car R., Parrinello M. // Phys. Rev. Lett. 1985. V. 55. P. 2471.
13. Метод классической молекулярной динамики в моделировании физико-химических процессов: учеб. пособие / А.Н. Агафонов, А.В. Еремин. — Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. — 68 с.
14. Жилиев П.А., Стегайлов В.В. // Вычислительные методы и программирование. 2012. Т. 13, с 37–45.
15. Giunti C., Studenikin A. // Rev. Mod. Phys. 2015. V. 87. P. 531.
<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.87.531>
16. Beda A. et al. // Adv. High Energy Phys. 2012. Art. № 350150.
17. Beda A. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10. P. 139.
18. Khan A. // Phys. Lett. B. 2023. V. 837. Art. № 137650.
<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2022.137650>
19. Cadeddu M. et al. // Phys. Rev. D. 2019. V. 100. Art. № 073014.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.073014>
20. Гапонов Ю.В., Тихонов В.Н. // Ядерная физика. 1977. Т. 26. С. 594.
21. Cadeddu M. et al. // arXiv:2302.05307 [hep-ph].
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.05307>
22. Reines F., Gurr H., Sobel H. // Phys. Rev. Lett. 1976. V. 37. P. 315.
23. Vogel P., Engel J. // Phys. Rev. D. 1989. V. 39. P. 3378.
24. Vidyakin G.S. et al. // JETP Lett. 1992. V. 55. P. 206.
25. Derbin I. et al. // JETP Lett. 1993. V. 57. P. 768.
26. Liu D.W. et al. (Super-Kamiokande Collab.). // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93. Art. № 021802.
27. MUNU Collaboration // Physics Letters B. 2005. V. 615. № 3–4. P. 153–159.
28. Wong H.T. et al. (TEXONO Collab.) // Phys. Rev. D. 2007. V. 75. Art. № 012001.
29. Beda A.G. et al. // Phys. At. Nucl. 2007. V. 70. P. 1873.
30. Arpesella C. et al. (Borexino Collab.) // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 101. Art. № 091302.

31. Wong H.T., Li H.-B. and Lin S.-T. // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 105. Art. № 061801; hep-ph/1001.2074.
32. Beda A.G. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10. № 2. P. 139–143.
33. Abdurashitov D.N. et al. // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85. № 6. P. 1–707.
34. Neganov B.S. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2001. V. 64. № 11. P. 2033–2039.
35. Yukhimchuk A.A. et al. // Fusion Sci. and Techn. 2005. V. 48. № 1. P. 731–736.
36. Григоренко Л.В. и др. // Успехи физ. наук. 2016. Т. 186. С. 337–386.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0186.201604a.0337>
37. Базь А.И., Гольданский В.И., Зельдович Я.Б. // Успехи физ. наук. 1965. Т. 85. № 3. С. 445–483.
38. Ershov S.N., Grigorenko L.V., Vaagen J.S., Zhukov M.V. // J. Phys. G. 2010. V. 37. P. 1–15. Art. № 064026.
39. Pfützner M., Karny M., Grigorenko L.V., Riisager K. // Rev. Mod. Phys. 2012. V. 84. P. 567–619.
40. Grigorenko L.V., Mukha I.G., Scheidenberger C., Zhukov M.V. // Phys. Rev. C. 2011. V. 84. Art. № 021303.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.84.021303>
41. Fomichev A.S. et al. // Eur. Phys. J. A. 2018. V. 54. P. 97.
<https://doi.org/10.1140/epja/i2018-12528-0>

PHYSICS OF HYDROGEN ISOTOPES

**A. A. Yukhimchuk^{1,†}, A. N. Golubkov¹, I. P. Maximkin¹, I. L. Malkov¹, O. A. Moskaev¹,
R. K. Musyaev¹, A. A. Selezenev¹, L. V. Grigorenko^{2,3,4}, V. N. Trofimov², A. S. Fomichev²,
A. V. Golubeva⁴, V. N. Verbetsky⁵, K. A. Kouzakov⁵, S. V. Mitrokhin⁵, A. I. Studenikin⁵,
A. P. Ivashkin⁶, and I. I. Tkachev⁶**

¹*Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Russia*

²*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

³*National Research Nuclear University “MEPhI,” Moscow, Russia*

⁴*National Research Center Kurchatov Institute,
Moscow, Russia*

⁵*Moscow State University, Moscow, Russia*

⁶*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[†]*e-mail: arkad@triton.vniief.ru*

Information regarding the scientific theme No 8 “Physics of hydrogen isotopes” of NCPHM has being reported in the article. Goals and tasks of the scientific theme together with its place in the world and in the Russian Federation development of science and technique were described.