I. Введение

ПКК благодарит организаторов за отличную работу по подготовке документации и презентаций к заседанию.

Дирекцией ОИЯИ было предложено назначить председателем 56-й сессии ПКК по ядерной физике В. В. Несвижевского.

Директор ОИЯИ Г. В. Трубников представил доклад «Структура и основные направления исследований ОИЯИ. Научные результаты за последние годы и развитие ОИЯИ на 2024–2030 годы».

Вице-директор ОИЯИ С. Н. Дмитриев проинформировал ПКК о резолюции 132-й сессии Ученого совета (сентябрь 2022 года) и решениях Комитета полномочных представителей государств-членов ОИЯИ (ноябрь 2022 года).

II. Проект Семилетнего плана развития ОИЯИ по ядерной физике на 2024–2030 годы

На сессии ПКК были представлены подробные доклады о состоянии дел и предложения в Семилетний план развития ОИЯИ в области ядерной физики на 2024–2030 годы, представленные директорами лабораторий: С. И. Сидорчуком (ЛЯР), В. Н. Швецовым (ЛНФ), В. В. Кореньковым (ЛИТ), заместителем директора ЛТФ Н. В. Антоненко и начальником отдела ЛЯП Е. А. Якушевым.

Лаборатория ядерных реакций им. Г. Н. Флерова

Исследования Лаборатории ядерных реакций в области физики тяжелых ионов направлены на решение научных задач, сформулированных в двух темах: «Синтез и свойства сверхтяжелых элементов, структура ядер на границе нуклонной стабильности» и «Развитие ускорительного комплекса и экспериментальных установок ЛЯР (DRIBs-III)». К началу предстоящего 7-летнего периода (2024–2030 годы) Лаборатории удалось существенным образом продвинуться по основным направлениям исследований. IUPAP/IUPAC официально признали за ЛЯР синтез новых элементов Периодической таблицы Менделеева, а именно Fl, Mc, Lv, Ts, Og. Дальнейшие исследования потребовали радикального увеличения эффективности экспериментов. С этой целью в 2020 году в ОИЯИ была запущена Фабрика СТЭ на базе ускорителя ДЦ-280 и сепараторов нового поколения ГНС-2 и GRAND (ГНС-3). Увеличение интенсивности пучка, эффективности ускорения и транспортировки продуктов реакций позволили провести эксперименты по синтезу СТЭ на уровне

чувствительности, соответствующем сечениям менее 100 фбарн. Впервые были обнаружены новые изотопы и моды распадов известных элементов в реакциях с пучком ^{48}Ca и мишенями Th, U, Pu, Am. За период с 2020 по 2022 годы на Фабрике СТЭ было зарегистрировано 238 новых событий синтеза сверхтяжелых ядер (в 3 раза больше, чем за всю историю исследований). Особое значение имеет то, что впервые была измерена ветвь альфа-распада ^{268}Db и обнаружен новый изотоп ^{264}Lr .

В настоящее время проходят первые эксперименты по изучению химических свойств сверхтяжелых элементов Cn и Fl с использованием сепаратора GRAND. На модернизированной установке SHELS-GABRIELA был проведен цикл экспериментов по гамма- и нейтронной спектроскопии ряда изотопов Rf и Fm. Для сильно нейтронодефицитного изотопа ^{249}No , впервые синтезированного в эксперименте на сепараторе SHELS в 2020 году, были измерены период полураспада ($T_{1/2} = 38,1 \pm 2,5$ мс) и энергия α -частиц ($E_\alpha = 9129$ кэВ), оценена вероятность спонтанного деления ($\leq 0,23\%$).

В 2017 году был запущен новый фрагмент-сепаратор АКУЛИНА-2, оснащенный RF-кикером и спектрометром нулевого градуса, что позволило на порядок поднять интенсивность вторичных пучков для исследования легких ядер, удаленных от линии бета-стабильности. Были проведены эксперименты по изучению структуры ядерных систем за границей нуклонной стабильности, таких как $^{6,7}\text{H}$, $^{7,9}\text{He}$, ^{10}Li . Ускоритель У-400М находится на модернизации и будет введен в эксплуатацию в 2023 году. После модернизации ожидается повышение надежности и стабильности работы ускорителя, а также увеличение интенсивностей пучков тяжелых ионов. Ожидаемые параметры пучков: ^7Li (39 МэВ/А) 10 pA; ^{11}B (33 МэВ/А) 6 pA; ^{15}N (51 МэВ/А) 2 pA. В качестве первого эксперимента на циклотроне У-400М запланировано продолжение исследований структуры ^7He в реакции $^6\text{He}(d, p)^7\text{He}$.

В настоящее время происходит подготовка к созданию циклотрона ДЦ-140, предназначенного для прикладных исследований, включая радиационное материаловедение, производство трековых мембран и их применение.

Подготовлен проект реконструкции ускорителя У-400→У-400Р и нового экспериментального зала площадью 1500 м². Циклотрон У-400Р станет базовой установкой нового ускорительного комплекса и позволит плавно варьировать энергию ускоренных пучков в диапазоне от 1 до 28 МэВ/А, а также повысить интенсивности пучков вплоть до урана. Основными задачами на ускорителе У-400Р будут получение новых тяжелых изотопов, исследование механизмов их образования в реакциях многонуклонных передач и изучение свойств этих изотопов. Реконструкция ускорителя

запланирована на начало предстоящей семилетки, а сдача в эксплуатацию экспериментального здания — на 2025 год.

Одной из основных целей ЛЯР является синтез новых элементов с атомными номерами 119 и 120 в таких реакциях, как $^{54}\text{Cr}+^{248}\text{Cm}$ и $^{50}\text{Ti}+^{249}\text{Bk}$. Ожидаемые сечения образования новых изотопов составляют порядка 20 фбарн. В настоящее время ведется работа по получению высокоинтенсивных пучков ^{50}Ti и ^{54}Cr . Для этих целей создается сверхпроводящий ЭЦР-источник ионов с рабочей частотой 28 ГГц.

Для исследования химических свойств наиболее тяжелых известных элементов 113–115 на Фабрике СТЭ планируется создать сепаратор на основе сверхпроводящего соленоида, который позволит фокусировать продукты реакций в пятно диаметром не более 1 см с высоким уровнем очистки от пучка. Это позволит впервые проводить эксперименты с временами жизни изотопов менее 0,5 с.

Точное измерение масс изотопов СТЭ является одной из наиболее приоритетных задач в предстоящий семилетний период. С этой целью в ЛЯР планируется создать времяпролетный многоотражательный спектрометр с разрешением порядка 10^{-7} , который позволит измерять массы новых изотопов с точностью около 30 кэВ, что сопоставимо с точностью измерения энергии альфа-распада. В результате измерение массы одного ядра из цепочки распадов синтезированного изотопа позволит получить точную информацию о массах всех изотопов цепочки. Эксперименты по альфа-, бета-, гамма- и нейтронной спектроскопии изотопов СТЭ также являются важной частью программы предстоящих исследований на Фабрике СТЭ.

Также планируется продолжение экспериментов по изучению структуры и механизмов образования ядер вблизи и за границей нуклонной стабильности на установках АКУЛИНА-1, АКУЛИНА-2 и МАВР. В начале нового семилетнего периода (2024–2030 годы) в фокальной плоскости фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2 будет установлен комплекс криогенной газовой системы, который позволит использовать в качестве мишеней для вторичных пучков водород, дейтерий и тритий в газообразном и жидком состояниях.

Рекомендация. ПКК с интересом заслушал сообщение об основных достижениях ЛЯР за семилетний период 2017–2023 гг. ПКК выражает поддержку предлагаемой стратегии развития научных исследований ЛЯР в области физики тяжелых ионов на период 2024–2030 гг. ПКК ожидает, что данные научные направления получат выражение в форме тем и проектов, которые будут представлены на следующей сессии ПКК по ядерной физике в июне 2023 года.

Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка

Ядерно-физические исследования с нейтронами в Лаборатории проводятся в рамках научной темы «Исследования взаимодействия нейтронов с ядрами и свойств нейтрона». В теме реализуется три проекта: ТАНГРА (изучение реакций с нейтронами от D-T генератора с использованием метода меченых нейтронов), ЭНГРИН (изучение мгновенных нейтронов деления) и модернизация ЭГ-5. Физические исследования в рамках темы условно можно разделить на три направления:

- исследование нарушений фундаментальных симметрий во взаимодействиях нейтронов с ядрами, получение ядерных данных;
- исследование фундаментальных свойств нейтрона, физика ультрахолодных и очень холодных нейтронов;
- прикладные и методические исследования.

В силу имеющихся ограничений работы на внешних нейтронных источниках регулярная работа ИРЕН на физический эксперимент становится чрезвычайно актуальной. Это поможет возобновить традиционные для ЛНФ исследования свойств возбужденных ядер, реакций с вылетом заряженных частиц, физики деления на резонансных нейтронах, вести методические разработки, нацеленные на обнаружение Т-неинвариантных эффектов.

На новый семилетний период 2024–2030 гг. предлагается сосредоточиться на решении следующих физических задач в области нейтронной ядерной физики:

- всестороннее изучение процесса ядерного деления: измерение массово-энергетических и угловых распределений осколков деления, быстрых нейтронов и гамма-квантов; измерение запаздывающих нейтронов и гамма-квантов; поиск редких и экзотических мод деления (тройное, четверное и пятерное деление; деление на три фрагмента сопоставимой массы; образование пионов при делении, холодная фрагментация и др.); изучение и поиск Р-нечетных и Т-нечетных эффектов в делении;
- изучение свойств нейтронных резонансов. Измерение спектров гамма-квантов для резонансов с разными спинами, четностями и угловыми моментами. Изучение и поиск Р-четных и Р-нечетных эффектов в нейтронных резонансах. Поиск р-волновых резонансов, в которых может ожидать нарушение временной инвариантности;
- получение данных для ядерной инженерии и астрофизики: измерение интегральных и дифференциальных сечений нейтронов, угловых корреляций в диапазоне энергий от холодных нейтронов до ~ 1 ГэВ;
- разработка и применение метода меченых нейтронов для изучения реакций взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами;

– разработка и применение нейтронных и ядерных методов для элементного анализа и прикладных исследований: инструментальный активационный анализ; анализ по мгновенным гамма-квантам; элементный анализ быстрыми и мечеными нейтронами; элементный анализ поверхностных слоев твердых тел;

– разработка нового источника УХН на реакторе ИБР-2 будет являться основной задачей в области исследований с УХН на 2024–2030 годы. Его создание позволит повысить точность измерения времени жизни нейтрона, проводить исследования на основе прецизионной спектроскопии гравитационных уровней нейтронов, улучшить ограничение на электрический дипольный момент нейтрона.

За семилетний период 2024–2030 гг. планируется увеличить интенсивность потока нейтронов установки ИРЕН до $3 \cdot 10^{12}$ н/с, а также увеличить ток пучка ускорителя ЭГ-5 до 50 мкА, а его энергию — до 4,1 МэВ.

Рекомендация. ПКК с интересом заслушал сообщение об основных достижениях ЛНФ за семилетний период 2017–2023 гг. ПКК рекомендует продолжить научные исследования по ядерной физике с использованием нейтронных установок ЛНФ, таких как импульсный источник резонансных нейтронов ИРЕН, импульсный реактор ИБР-2 и электростатический генератор ЭГ-5, открыв несколько новых проектов.

ПКК рекомендует рассмотреть возможность выделения работ по развитию ИРЕН в качестве инфраструктурного проекта, учитывая, что данная установка должна стать базовой для исследований по ядерной физике в ЛНФ.

ПКК предлагает заслушать на следующем заседании в июне 2023 года предложение по продлению данной темы научных исследований и сообщения с предложениями об открытии новых проектов в ее рамках.

Лаборатория информационных технологий им. М. Г. Мещерякова

Развитие надежной сетевой и информационно-вычислительной инфраструктуры, а также математического и программного обеспечения научно-производственной деятельности Института и стран-участниц ОИЯИ на базе Многофункционального информационно-вычислительного комплекса (МИВК) ОИЯИ, включая суперкомпьютер «Говорун», осуществляется в рамках темы «Информационно-вычислительная инфраструктура ОИЯИ» и включенного в нее проекта «Многофункциональный информационно-вычислительный комплекс (МИВК)». МИВК ОИЯИ является ключевым элементом вычислительной инфраструктуры ОИЯИ и играет определяющую роль в научных исследованиях, требующих современных вычислительных мощностей и систем хранения данных.

Уникальность МИВК обеспечивается сочетанием всех современных информационных технологий: от сетевой инфраструктуры с пропускной способностью до 4x100 Гбит/с и распределенной системы обработки и хранения данных, основанной на грид-технологиях и облачных вычислениях, до гиперконвергентной вычислительной инфраструктуры на жидкостном охлаждении для суперкомпьютерных приложений.

Другое направление исследований ЛИТ связано с разработкой и внедрением эффективных методов, алгоритмов и программного обеспечения для моделирования физических систем, математической обработки и анализа экспериментальных данных с целью успешной реализации учеными ОИЯИ и его государств-членов научной программы (в рамках темы «Методы, алгоритмы и программное обеспечение для моделирования физических систем, математической обработки и анализа экспериментальных данных»). Современные исследования в области фундаментальной науки на основе новых математических и численных методов для моделирования сложных систем и процессов, новых программных комплексов и систем анализа экспериментальных данных развиваются с использованием многоядерных и гибридных гиперконвергентных архитектур на базе МИВК ОИЯИ. Важнейшими задачами являются разработка новых алгоритмов обработки и анализа данных на основе глубокого и машинного обучения, включая искусственный интеллект, и развитие современных методов и алгоритмов больших данных для решения прикладных задач. Исследования в области квантовых вычислений будут направлены на развитие алгоритмов интеллектуального управления физическими экспериментальными установками ОИЯИ и на оптимизацию решения ресурсоемких задач. Развитие цифровой платформы «Цифровая экосистема ОИЯИ», интегрирующей существующие и перспективные сервисы поддержки научной, административной и социальной деятельности, а также сопровождения инженерной и IT-инфраструктур Института обеспечит надежный и безопасный доступ к данным различного типа и даст возможность всестороннего анализа. Отличительной особенностью деятельности ЛИТ является тесное сотрудничество со всеми лабораториями Института, институтами государств-членов ОИЯИ и других стран.

Рекомендация. ПКК с интересом заслушал сообщение об основных работах и достижениях ЛИТ за семилетний период 2017–2023 гг. ПКК полностью поддерживает научную программу ЛИТ, связанную с развитием тем «Информационно-вычислительная инфраструктура ОИЯИ» и «Методы, алгоритмы и программное обеспечение для моделирования физических систем, математической обработки и

анализа экспериментальных данных». ПКК предлагает заслушать предложения по продлению тем и сообщения с предложениями об открытии новых проектов в рамках тем на следующем заседании в июне 2023 года.

Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джелеева

Научные исследования в рамках темы «Неускорительная нейтринная физика и астрофизика» посвящены изучению редких явлений, связанных со слабым взаимодействием, методами современной ядерной спектроскопии. Выделяются следующие направления в рамках темы:

– исследования двойного бета-распада различными калориметрическими и трекокалориметрическими методами;

– поиск магнитного момента нейтрино, когерентного рассеяния нейтрино на ядрах (CE ν NS);

– исследование галактических и внегалактических источников нейтрино, диффузионного нейтринного космического фона, поиск экзотических частиц, поиск стерильных нейтрино;

– дистанционное исследование процессов горения в ядерном реакторе с помощью нейтрино;

– разработка новых методов обнаружения заряженных и нейтральных частиц;

– развитие современной радиохимии для астрофизики и ядерной медицины.

В настоящее время вышеуказанные проблемы исследуются в семи основных научных проектах темы. Двойной безнейтринный бета-распад изучается в проектах SuperNEMO, GERDA (LEGEND) и MONUMENT. Эксперименты с реакторным антинейтрино: ν GeN — поиск магнитного момента и когерентного рассеяния нейтрино; DANSS — диагностика реактора и исследование свойств нейтрино. Прямой поиск темной материи (проект EDELWEISS) расширен для поиска новой физики с CE ν NS (совместный проект EDELWEISS/RICOCHET). Один из основных проектов ОИЯИ — проект Байкал-ГВД — посвящен исследованиям с глубоководным нейтринным телескопом на озере Байкал.

Реализация темы осуществляется с использованием общих подходов и имеющихся ресурсов. В дополнение к научному персоналу имеются следующие ресурсы, позволяющие осуществлять научную программу: лаборатория по производству и ремонту полупроводниковых детекторов, лаборатория по созданию и производству сцинтилляционных материалов, сектор радиохимии, мастерские, группа компьютерной поддержки, группа масс-сепараторов и другие.

ПКК с удовлетворением отмечает, что в рамках темы имеются знания, персонал и возможности для создания установок мирового класса, проведения измерений на них и получения результатов на мировом уровне. ПКК поддерживает общее направление реализации темы, когда участие в престижных международных проектах обеспечивает доступ к передовым разработкам для развития домашних нейтринных экспериментов.

ПКК поддерживает предложение дирекции ЛЯП о реорганизации структуры темы с подготовкой новых объединенных более масштабных проектов, отражающих реальное вовлечение персонала и ресурсов. В дополнение к проекту Байкал-ГВД новыми предлагаемыми проектами в рамках темы будут:

– исследования реакторных нейтрино на короткой базе (эксперименты Ricochet, DANSS-2, ν GeN);

– ядерная спектрометрия для поиска и исследования редких явлений (все эксперименты и активности, связанные с двойным бета-распадом, поиск темной материи спектрометрическими методами и др.);

– радиохимия и спектроскопия для астрофизики и ядерной медицины.

Рекомендации. ПКК с интересом заслушал сообщение об основных выполненных работах и достижениях за семилетний период 2017–2023 гг. ПКК рекомендует реорганизовать структуру темы и представить более масштабные проекты по нейтринной физике и астрофизике на следующем заседании ПКК. ПКК подчеркивает важность усилий ЛЯП по дальнейшему совершенствованию экспериментальной базы в ОИЯИ и на озере Байкал.

Лаборатория теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова

Исследования в области ядерной физики низких энергий ведутся в рамках темы «Теория ядерных систем». В работах представлены основные направления исследований: структурные особенности ядер, удаленных от линии стабильности, структура сверхтяжелых ядер, взаимодействие ядер при низких энергиях, динамика слияния и деления ядер, ядерные реакции в астрофизических условиях, малочастичные системы, ядерная динамика при релятивистских энергиях, свойства горячей и плотной ядерной материи, нелинейные квантовые процессы в сильных поляризованных магнитных полях. Исследования в области ядерной физики низких энергий будут сосредоточены на изучении экзотических ядер сверхтяжелых элементов и легких ядерных систем на границах стабильности и за их пределами, что актуально для экспериментальных исследований на Фабрике СТЭ в ЛЯР ОИЯИ и в других мировых исследовательских центрах. Ядерная динамика слияния и деления

будет рассмотрена с учетом кластерных степеней свободы. На предстоящий семилетний период 2024–2030 гг. планируется продолжить исследования в области теории ядра, в частности установить связь между микроскопическими самосогласованными и феноменологическими моделями ядра. Для описания ядро-ядерных взаимодействий, двойных γ -, β - и EC-распадов тяжелых ядер планируется использовать функционалы плотности энергии. Для задач астрофизики будут разрабатываться модели для предсказания скоростей различных ядерных реакций. Ядерные реакции в звездной среде будут изучаться в том числе методами теории нескольких тел и теории открытых квантовых систем. Будут проанализированы механизмы передачи нуклонов и/или кластеров между ядрами, а также распада одного ядра в поле другого.

ПКК поддерживает продолжение исследований по теории ядра в рамках текущей темы, которая должна отражать комплексный и широкий подход к различным аспектам ядерной структуры и ядерных реакций и соответствовать программе экспериментальных исследований в ОИЯИ. Для лучшей организации работ тема должна состоять из четырех проектов: «Микроскопические модели для экзотических ядер и ядерной астрофизики», «Низкоэнергетическая ядерная динамика и свойства ядерных систем», «Квантовые системы нескольких частиц» и «Релятивистская ядерная динамика и нелинейные квантовые процессы». ПКК также высоко оценивает образовательную программу ЛТФ и связь теоретических исследований с экспериментальной программой ОИЯИ.

Рекомендация. ПКК высоко оценивает результаты, полученные по основным направлениям исследований, и рекомендует продлить тему «Теория ядерных систем» до конца 2030 года.

III. Следующая сессия ПКК

Следующая сессия ПКК по ядерной физике состоится 29–30 июня 2023 года. Предварительная программа сессии включает следующие вопросы:

- отчеты и рекомендации по темам и по проектам, завершаемым в 2023 году;
- научные доклады;
- стендовые доклады молодых ученых, посвященные новым результатам и проектам в области исследований по ядерной физике.

В. В. Несвижевский
председатель ПКК
по ядерной физике

Н. К. Скобелев
ученый секретарь ПКК
по ядерной физике