

## I. Введение

Председатель ПКК по ядерной физике М. Левитович представил сообщение о выполнении рекомендаций предыдущей сессии ПКК.

Вице-директор ОИЯИ С. Н. Дмитриев проинформировал ПКК о резолюции 129-й сессии Ученого совета (февраль 2021 года) и решениях Комитета полномочных представителей государств-членов ОИЯИ (март 2021 года).

ПКК с удовлетворением отметил, что рекомендации предыдущей сессии ПКК по исследованиям ОИЯИ в области ядерной физики были приняты Ученым советом и дирекцией ОИЯИ.

## II. Отчеты по завершающимся темам

### **«Синтез и свойства сверхтяжелых элементов, структура ядер на границе нуклонной стабильности»**

ПКК заслушал доклад «СТЭ в ЛЯР: исследования и развитие работ» представленный Ю. Ц. Оганесяном.

В докладе представлен обзор научно-исследовательских работ, проведенных за последние четыре года. Самым значительным событием безусловно стало начало экспериментов на новом циклотроне ДЦ-280 в 2019 году. ПКК отмечает, что ввод в эксплуатацию Фабрики СТЭ, ключевым элементом которой является циклотрон ДЦ-280, модернизация циклотрона У-400М, а также создание экспериментальных установок нового поколения значительно расширяют возможности проведения в ОИЯИ фундаментальных ядерно-физических и прикладных исследований на высочайшем уровне в широкой коллаборации с научными центрами государств-членов ОИЯИ, а также с научными центрами других стран, ориентирующимися на проведение исследований в Дубне.

ПКК особенно выделяет результаты первых экспериментов на Фабрике СТЭ по синтезу изотопов Mc (московия) и Fl (флеровия) в реакциях слияния  $^{48}\text{Ca}+^{243}\text{Am}$  и  $^{48}\text{Ca}+^{242}\text{Pu}$  соответственно. Было зарегистрировано 61 событие образования изотопов  $^{288,289}\text{Mc}$  (ранее за все годы было зарегистрировано 35 цепочек), а также более 99 цепочек распада  $^{286,287}\text{Fl}$  (ранее за все годы – 25 цепочек). Благодаря высокой эффективности проводимых экспериментов и хорошему подавлению фона, впервые был зарегистрирован альфа-распад ядра  $^{268}\text{Db}$ , что привело к открытию нового изотопа  $^{264}\text{Lr}$ .

Изучение химических свойств новых элементов и связанных с ними релятивистских эффектов – еще одна цель экспериментов, проводимых в ЛЯР.

Для этого в экспериментальном зале ДЦ-280 уже смонтирован новый газонаполненный сепаратор ГНС-3.

На период после 2023 года уже планируется дальнейшее развитие новых экспериментальных установок, которые будут идеально дополнять экспериментальную программу. Это, во-первых, криогенная газовая ловушка с многоотражательным времяпролетным масс-спектрометром (MR-TOF) и, во-вторых, сверхпроводящий газонаполненный соленоид (SC-GASSOL) для химического исследования короткоживущих изотопов. ПКК убежден, что эти экспериментальные установки послужат хорошим дополнением к существующему оборудованию. Они позволят получить новые интересные результаты и понять свойства и моды распада самых тяжелых изотопов и атомов.

Была проведена серия экспериментов, направленных на изучение массово-энергетического распределения бинарных продуктов, образованных в реакциях с пучками  $^{52,54}\text{Cr}$ ,  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{86}\text{Kr}$  и  $^{68}\text{Zn}$ , приводящих к составным системам с  $Z$  от 114 до 120. Такие эксперименты позволяют оценить вклад квазиделения в сечения захвата, что является крайне важным для планируемых экспериментов по синтезу новых сверхтяжелых элементов с  $Z = 119$  и  $Z = 120$ .

ПКК принял к сведению отчет «СТЭ в ЛЯР: исследования и развитие работ». ПКК полностью поддерживает представленную научную программу по синтезу и исследованию тяжелых и сверхтяжелых ядер и желает команде ЛЯР успехов в проводимых и запланированных многообещающих экспериментах.

### ***«Развитие ускорительного комплекса и экспериментальных установок ЛЯР (DRIBs-III)»***

ПКК заслушал отчет по выполнению темы «Развитие ускорительного комплекса и экспериментальных установок ЛЯР (DRIBs-III)» за 2017–2021 гг., представленный Г. Г. Гульбекином. ПКК отмечает, что на циклотронах ЛЯР (ДЦ-280, У-400, У-400М, ИЦ-100) за отчетный период был проведен широкий спектр научных и прикладных исследований в области физики тяжелых ионов. ПКК удовлетворен высоким уровнем полученных результатов, включающих ввод в эксплуатацию экспериментального корпуса Фабрики СТЭ и запуск ее базовой установки – циклотрона ДЦ-280 – в марте 2019 года. В настоящее время проводятся исследования возможных путей увеличения интенсивности пучков ионов, в первую очередь, титана и хрома.

ПКК отмечает, что программа экспериментальных исследований на ускорительном комплексе ЛЯР У-400 была выполнена согласно плану работ. Время работы циклотрона использовалось в основном для выполнения программы исследований на пучках  $^{48}\text{Ca}$  (установки ГНС и SHELS) и  $^{50}\text{Ti}$  (установка SHELS), а также для выполнения прикладных работ (Роскосмос).

В июле 2020 года началась модернизация циклотрона У-400М, которую планируется завершить в середине 2022 года. Модернизация У-400М, в первую очередь, направлена на повышение надежности и стабильности ускорителя, а также на увеличение интенсивности и энергии пучков тяжелых ионов. В результате модернизации будут полностью заменены катушки основного магнита, компоненты вакуумной системы ускорителя, систем управления и радиационного контроля. До этой остановки циклотрон У-400М обеспечивал выполнение программы экспериментальных исследований на пучках  $^{11}\text{B}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{32}\text{S}$  (сепараторы АКУЛИНА-1 и АКУЛИНА-2), на пучках  $^{18}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$  (установка КОМБАС) и  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  (масс-спектрометр MASHA).

ПКК отмечает важность реконструкции ускорителя У-400 в У-400R и создания нового экспериментального зала. ПКК высоко оценивает проделанную работу по подготовке проекта нового экспериментального зала ускорителя У-400R, который получил положительное заключение Главгосэкспертизы России. Планируемый срок строительства нового экспериментального зала составляет 2,5 года (2022–2024 гг.).

ПКК констатирует большое внимание к созданию и развитию новых экспериментальных установок ЛЯР. Был введен в эксплуатацию новый газонаполненный сепаратор ГНС-2. Более того, была создана и испытана новая увеличенная система детекторов, размещенная в фокальной плоскости сепаратора ГНС-2, которая позволила повысить регистрацию продуктов реакций в 1,5 раза, что крайне важно для проведения длительных экспериментов по синтезу СТЭ.

Для изучения химических свойств сверхтяжелых элементов был построен новый газонаполненный сепаратор ГНС-3, перед фокальной плоскостью которого установлен дополнительный магнит для транспортировки продуктов реакции в отдельную установку для радиохимического анализа. Запуск сепаратора запланирован на осень 2021 года. Кроме того, продолжается создание ионной газовой ловушки и начата разработка многоотражательного времяпролетного масс-спектрометра для прецизионного измерения масс СТЭ.

ПКК отмечает, что в рамках темы был разработан и введен в эксплуатацию сепаратор АКУЛИНА-2. В 2017–2021 годах был проведен ряд методических работ по

подготовке к экспериментам на пучках  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^9\text{Li}$ ,  ${}^{10}\text{Be}$ ,  ${}^{27}\text{S}$  и др. Для подготовки новых экспериментов по изучению легких нейтронно-обогащенных ядер, запланированных на конец 2023 года, реализуется технический проект тритиевого комплекса, который включает в себя создание сложной газовакуумной системы с целью обеспечения безопасности при подаче, охлаждении-нагреве трития, а также контроля радиационной безопасности и утилизации нежелательных газов. Кроме того, создан радиочастотный фильтр (ВЧ сепаратор) для дополнительной очистки пучка радиоактивных ионов.

ПКК отмечает, что в 2019 году создан и введен в эксплуатацию магнитный анализатор высокого разрешения (МАВР) на пучке циклотрона У-400 ЛЯР ОИЯИ.

ПКК поддерживает решение дирекции ОИЯИ и ЛЯР о создании новой ускорительной установки ДЦ-140 для прикладных исследований в области твердого тела, производства трековых мембран, испытания электронных компонентов на радиационную стойкость, проводимых в ЛЯР ОИЯИ. Ускорительный комплекс ДЦ-140 войдет в состав создаваемого в ОИЯИ Инновационного центра.

ПКК принял к сведению отчет по теме «Развитие ускорительного комплекса и экспериментальных установок ЛЯР (DRIBs-III)» за 2017–2021 гг.

### **III. Продление тем «Развитие ускорительного комплекса и экспериментальных установок ЛЯР (DRIBs-III)» и «Синтез и свойства сверхтяжелых элементов, структура ядер на границе нуклонной стабильности»**

ПКК заслушал предложение по продлению тем «Развитие ускорительного комплекса и экспериментальных установок ЛЯР (DRIBs-III)» и «Синтез и свойства сверхтяжелых элементов, структура ядер на границах нуклонной стабильности» на 2022–2023 гг., представленное С. И. Сидорчуком.

Дальнейшая реализация темы «Развитие ускорительного комплекса и экспериментальных установок ЛЯР (DRIBs-III)» включает модернизацию и развитие циклотронного комплекса ЛЯР, расширение экспериментальной базы лаборатории (создание новых физических установок), развитие систем ускорителей. Основные этапы темы направлены на повышение стабильности работы ускорителей, увеличение интенсивности и улучшение качества пучков ионов как стабильных, так и радиоактивных нуклидов в диапазоне энергии от 5 до 60 МэВ/нуклон при одновременном снижении энергопотребления. Основной целью работ по теме является существенное повышение эффективности проведения экспериментов по

синтезу и изучению свойств сверхтяжелых элементов, а также легких ядер на границах нуклонной стабильности. В 2022–2023 гг. планируется:

- продолжить работы по повышению интенсивностей и эффективности ускорения тяжелых ионов (в первую очередь,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{50}\text{Ti}$ ,  $^{54}\text{Cr}$ );
- завершить модернизацию и ввести в эксплуатацию ускоритель У-400М;
- отработать методику получения пучков урана на ускорителе У-400;
- начать строительство нового экспериментального корпуса ускорителя У-400R;
- создать ускорительный комплекс ДЦ-140 для исследований в области физики твердого тела, модификации поверхности материалов, производства трековых мембран и тестирования электронных компонентов на радиационную стойкость;
- продолжить создание и развитие физических установок, включая ввод в эксплуатацию сепаратора ГНС-3, завершение создания ионной газовой ловушки, проектирование и начало изготовления многоотражательного времяпролетного масс-спектрометра, комплекса криогенных газовых мишеней сепаратора АКУЛИНА-2;
- начать проектные работы по созданию радиохимической лаборатории первого класса.

В рамках темы «Синтез и свойства сверхтяжелых элементов, структура ядер на границе нуклонной стабильности» на Фабрике СТЭ в 2022–2023 гг. будут продолжены эксперименты по синтезу изотопов элементов 114 (Fl) и 115 (Mc) в реакциях  $^{48}\text{Ca}$  с  $^{242}\text{Pu}$  и  $^{243}\text{Am}$  с целью детального изучения радиоактивных свойств изотопов от Lr до Mc. Также будет проведена серия экспериментов по определению сечений образования изотопов СТЭ в реакциях актиноидов с  $^{50}\text{Ti}$  и  $^{54}\text{Cr}$ , что позволит определить перспективы синтеза новых элементов 119 и 120 и начать первые эксперименты.

Дальнейшим шагом в исследовании тяжелейших ядер станет изучение реакций глубоконеупругих передач и квазиделения как инструмента для синтеза тяжелых и сверхтяжелых ядер с большим избытком нейтронов, изучение влияния формы ядер, а также оболочечных эффектов на выходы синтезируемых нуклидов. Основное внимание будет уделено вопросу получения нейтроноизбыточных ядер вблизи замкнутой нейтронной оболочки  $N=126$ , а также новых изотопов трансурановых элементов в процессах многонуклонных передач в реакциях взаимодействия урана с актинидными мишенями.

На сепараторах SHELS и ГНС-3 с использованием детектирующих систем GABRIELA и SFiNX будут продолжены эксперименты по  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -спектроскопии изотопов трансфермиевых элементов, которые позволят получить данные о структурах ядерных уровней. Планируется выполнить первые эксперименты по спектроскопии ядер московия.

С использованием на Фабрике СТЭ новой установки ГНС-3 в качестве пресепаратора для транспортировки продуктов ядерных реакций к радиохимическим установкам будут выполняться эксперименты по изучению свойств СТЭ в основном состоянии с  $Z = 112$  и  $Z = 114$ .

Основой для проведения исследований свойств экзотических лёгких ядер, ядер средних масс с  $Z \leq 36$ , а также механизмов реакций, приводящих к их образованию, является фрагмент-сепаратор АКУЛИНА-2. В это время будет продолжен анализ экспериментальных данных, полученных на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 в 2018–2020 гг. После запуска циклотрона У-400М в 2022 году планируется продолжить изучение возможностей повышения эффективности экспериментов, нацеленных на исследование структуры ядра  ${}^7\text{H}$ . Кроме того, будет выполнена подготовка и начата реализация программы по экспериментальному изучению структуры других нейтронообогащенных ядер:  ${}^{10}\text{He}$ ,  ${}^{11,13}\text{Li}$ ,  ${}^{16}\text{Be}$ ,  ${}^{18,19}\text{C}$  и  ${}^{26}\text{O}$ . Особое внимание будет уделено моделированию будущих экспериментов с тритиевой мишенью на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2. После ввода в эксплуатацию тритиевой мишени будут изучаться  ${}^{10}\text{He}$  и  ${}^{16}\text{Be}$  в реакциях передачи двух нейтронов.

ПКК высоко оценивает работы, направленные на развитие сетевой базы знаний по ядерной физике низких энергий NRV. ПКК отмечает, что важно не только поддержание в рабочем состоянии существующей системы (<http://nrv.jinr.ru>), но и развитие модернизированной системы (<http://nrv2.jinr.ru>) с использованием современных Web-технологий.

ПКК принял к сведению предложение дирекции ЛЯР о закрытии проекта «Создание прототипа начальной секции сильноточного линейного ускорителя тяжелых ионов, нацеленного на получение интенсивных пучков для фундаментальных исследований» в рамках темы «Развитие ускорительного комплекса и экспериментальных установок ЛЯР (DRIBs-III)». ПКК понимает мотивы предложения о закрытии проекта, но предлагает в будущем представить проект на рассмотрение при условии решения проблем его финансирования.

Рекомендация. ПКК рекомендует продлить темы «Развитие ускорительного комплекса и экспериментальных установок ЛЯР (DRIBs-III)» и «Синтез и свойства сверхтяжелых элементов, структура ядер на границах нуклонной стабильности» на 2022–2023 годы с первым приоритетом.

#### **IV. Проект ЭНГРИН**

ПКК заслушал предложение по открытию нового проекта «Исследование эмиссии мгновенных нейтронов в делении ядер (проект ЭНГРИН)», представленное Ш. С. Зейналовым. Исследования спонтанного деления и деления ядер с околобарьерной энергией возбуждения привлекают большое внимание специалистов как источник новых данных о свойствах ядерной системы, образующейся непосредственно к моменту разрыва шейки. Исследования, планируемые авторами проекта ЭНГРИН, предполагают измерения связей множественности и угловых распределений мгновенных нейтронов деления с полученными данными о спектрах энергии и массы осколков деления тяжелых ядер, наблюдаемого на пучке резонансных нейтронов. Такие многообещающие эксперименты перспективны для оценки размеров и формы делящегося ядра и доли полной кинетической энергии осколков, полученных к моменту разрыва шейки.

ПКК отмечает, что реализация проекта ЭНГРИН даст новые возможности исследования динамики процесса деления. Данные, которые будут получены в ходе выполнения проекта, несомненно, явятся предметом теоретических исследований. Установка, созданная по проекту ЭНГРИН, может быть применена для обнаружения нейтронов, испущенных до момента разрыва шейки, и для оценок доли полной кинетической энергии осколков, полученных на спуске от барьера деления до точки разрыва. Авторы проекта ЭНГРИН собрали высококвалифицированную команду экспертов и специалистов в исследовании процесса деления.

Рекомендация. ПКК рекомендует открыть в 2022 году проект ЭНГРИН сроком на один год с последующим его продлением в случае успешных работ по его реализации и одобрения финансирования темы. ПКК предлагает авторам пересмотреть процесс рассеяния нейтронов деления в материалах ионизационной камеры и нейтронных детекторов, который может привести к ложной идентификации углов вылета и энергии нейтронов.

ПКК отнес рецензируемый проект к категории В.

**V. Проект MONUMENT**

ПКК заслушал доклад о статусе проекта «Измерение обычного мюонного захвата для проверки ядерных матричных элементов  $2\beta$ -распадов (MONUMENT)», представленный М. В. Ширченко. Задачей проекта является проведение экспериментальных измерений мюонного захвата на нескольких дочерних по отношению к кандидатам на  $0\nu\beta\beta$ -распад ядрах. Получаемые новые результаты важны для проверки точности теоретических расчетов ядерных матричных элементов. Группа ОИЯИ планирует проводить измерения на мезонной фабрике Института им. Пауля Шеррера (PSI) в Швейцарии. Проект был рассмотрен и одобрен программным комитетом PSI, согласно решению которого в 2020 году предоставлено время на пучке для предварительного исследования  $^{136}\text{Ba}$  и  $^{76}\text{Se}$  с программой дальнейших измерений, как минимум, на три года. Время проведения измерений было перенесено на 2021 год (октябрь-ноябрь) в связи с COVID-19. Это позволило группе осуществить более тщательную подготовку оборудования и материалов к предстоящим измерениям, а также освоить новую систему сбора данных и проанализировать данные для  $^{24}\text{Mg}$ , полученные в 2019 году. Группа ОИЯИ активно готовит материалы и оборудование для предстоящих измерений. В октябре 2021 года по расписанию времени на пучке планируется старт самих измерений.

Рекомендация. ПКК признает потенциальные возможности проекта MONUMENT и рекомендует продолжить работы до конца 2023 года.

ПКК отнес проект к категории А.

**VI. Проект Э&Т&РМ**

ПКК заслушал доклад по проекту «Исследование глубокоподкритических электроядерных систем и особенностей их применения для производства энергии и трансмутации отработанного ядерного топлива (Э&Т&РМ)», представленный А. А. Балдиным. Проект посвящен разработке новой концепции электроядерных систем (ADS) на основе сильноточного ускорителя легких ядер. Перспективность ADS обусловлена как возможностью создания замкнутого топливного цикла, так и трансмутацией радиоактивных отходов. Проект включает в себя как теоретические исследования, так и эксперименты на пучках протонов, дейтронов и легких ядер ускорительного комплекса ОИЯИ, включая Фазотрон и NICA. Специализированная станция ядерно-энергетических технологий, создаваемая на ускорительном комплексе NICA, открывает новые возможности экспериментальных исследований на

выведенных пучках протонов и легких ядер. Проект посвящен изучению реакций в различных типах мишеней, включая мишени из обедненного урана и тория. Экспериментальные измерения высокоэнергетичных спектров нейтронов необходимы для верификации теоретических моделей процессов, описывающих взаимодействие пучков ускоренных ионов с протяженными мишенями. Данные результаты могут быть использованы как для решения проблемы трансмутации отработанного ядерного топлива, так и для изучения радиационной стойкости материалов. Проект был переработан и скорректирован с учетом замечаний, сделанных членами ПКК на предыдущем заседании, о недооценке финансирования и отсутствии подробного рабочего плана. Рассматриваемый проект содержит план работы на два года и подробную смету необходимых средств и занятых трудовых ресурсов. ПКК на прошлой сессии отнес проект Э&Т&РМ к категории В.

В докладе также было кратко упомянуто о двух новых направлениях работ по проекту: о станции исследования ядерных энергетических технологий (СИЯЭТ) и о разработке и создании прототипа комплекса лучевой терапии и прикладных исследований с пучками тяжелых ионов на Нуклотроне-М.

Рекомендация. ПКК рекомендует продлить проект Э&Т&РМ до конца 2023 года. Кроме того, ПКК считает два новых направления работ чрезвычайно интересными, учитывая будущую доступность высокоэнергетических пучков на комплексе NICA. Однако в плане работ эти два направления отсутствуют, и неясно, считаются ли они частью проекта Э&Т&РМ. Учитывая большие потенциальные возможности двух новых направлений, ПКК рекомендует разделить проект на три раздела и представить доклад на одном из заседаний комитета, выделив для каждого из трех направлений статус и, если возможно, подробный план работ, включая бюджет, людские ресурсы и участие сторонних организаций.

ПКК относит проект Э&Т&РМ к категории В.

## **VII. Следующая сессия ПКК**

Следующая сессия ПКК по ядерной физике состоится 27–28 января 2022 года. Предварительная программа сессии включает следующие вопросы:

- отчеты и рекомендации по темам и проектам, завершаемым в 2022 году;
- новые данные по экспериментам на Фабрике СТЭ;
- научные доклады;

- стендовые сообщения молодых ученых, посвященные новым результатам и проектам в области исследований по ядерной физике.

М. Левитович  
председатель ПКК  
по ядерной физике

Н. К. Скобелев  
ученый секретарь ПКК  
по ядерной физике