

I. Введение

Программно-консультативный комитет по ядерной физике выразил глубокую скорбь в связи с кончиной профессора Адама Собичевского, выдающегося польского ученого в области теоретической ядерной физики, члена ПКК по ядерной физике с 1995 года.

Председатель сессии ПКК по ядерной физике М. Левитович приветствовал независимых членов комитета, членов *ex officio*, назначенных от ОИЯИ, и дирекцию ОИЯИ.

Председатель представил краткое сообщение о выполнении рекомендаций предыдущей сессии.

Вице-директор ОИЯИ М. Г. Иткис проинформировал ПКК о резолюции 122-й сессии Ученого совета Института (сентябрь 2017 года) и решениях Комитета полномочных представителей (ноябрь 2017 года). ПКК с удовлетворением отмечает, что рекомендации предыдущей сессии ПКК, касающиеся исследований в области ядерной физики, были приняты Ученым советом и дирекцией ОИЯИ.

II. Рекомендации по теме «Неускорительная нейтринная физика и астрофизика»

ПКК заслушал отчеты по проектам, выполняемым в рамках темы «Неускорительная нейтринная физика и астрофизика» (03-2-1100-2010/2018), и предложения по их продлению.

Проект GERDA (G&M)

ПКК заслушал отчет по проекту GERDA (G&M), представленный К. Н. Гусевым, который посвящен поиску двойного безнейтринного бета-распада ^{76}Ge с открытыми Ge-детекторами в жидком аргоне. Коллаборация GERDA проводит вторую фазу эксперимента (2015–2021 годы), важной особенностью которой является то, что жидкий аргон используется еще и в качестве активного вето. Суммарная масса исследуемого изотопа ^{76}Ge составляет 38 кг. Достигнут беспрецедентный уровень радиоактивного фона в 0,001 отсчета/(кэВ·кг·год). Результаты анализа данных, накопленных в 2016–2017 годах, позволили установить предел на период полураспада двойного безнейтринного бета-распада $^{76}\text{Ge} > 8,0 \cdot 10^{25}$ лет. Ожидается, что после достижения запланированной экспозиции в 100 кг·лет, предел на период полураспада будет улучшен до значения $> 1,4 \cdot 10^{26}$ лет. Часть представленного

отчета была посвящена начавшейся подготовке нового крупномасштабного германиевого эксперимента LEGEND (до 1 тонны ^{76}Ge), расчетная чувствительность которого составит 10^{28} лет. Целью этого амбициозного проекта является выяснение иерархии нейтринных масс.

Рекомендация. ПКК рекомендует продолжить выполнение проекта GERDA и участие в проекте LEGEND в 2019–2021 годах.

Проект SuperNEMO

ПКК заслушал доклад о проекте SuperNEMO, представленный Ю. А. Шитовым. Многолетнее успешное участие ОИЯИ в эксперименте NEMO привело к получению фундаментальных результатов мирового уровня для двухнейтринного и безнейтринного двойного бета-распада обогащенных изотопов ^{48}Ca , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{130}Te и ^{150}Nd (измерения на установке NEMO-3). Детектор нового поколения SuperNEMO будет иметь модульный дизайн (20 модулей) с возможностью одновременного измерения нескольких изотопов на уровне чувствительности к периоду полураспада $T_{1/2}(2\beta 0\nu) \geq 10^{26}$ лет. В запускаемом в эксплуатацию первом демонстрационном модуле SuperNEMO (демонстратор) используется 7 кг ^{82}Se . ОИЯИ играет ключевую роль в проекте, особенно в создании калориметра, системы VETO, программ моделирования и обработки данных и в разработке методов очистки изотопов. ПКК выражает уверенность в том, что ОИЯИ продолжит вносить значительный вклад в создание детектора SuperNEMO и его демонстратора.

Рекомендация. ПКК рекомендует продолжить выполнение проекта SuperNEMO в 2019–2021 годах.

Проект БАЙКАЛ

ПКК заслушал доклад о ходе реализации проекта по созданию глубоководного нейтринного телескопа на озере Байкал (проект БАЙКАЛ), представленный И. А. Белолаптиковым.

Предложенная вторая фаза нейтринного телескопа БАЙКАЛ-ГВД станет новой исследовательской инфраструктурой, имеющей основную цель в изучении потока нейтрино от астрофизических объектов. Детектор будет использовать воду озера Байкал как рабочую среду, где оптические сенсоры будут регистрировать черенковское излучение, которое генерируют вторичные частицы, образованные во взаимодействиях нейтрино высоких энергий внутри или вблизи инструментального объема. Первый этап строительства детектора БАЙКАЛ-ГВД был завершен в 2015 году созданием первого демонстрационного кластера «Дубна». В период 2016–2017 годов коллаборацией БАЙКАЛ были развернуты два полномасштабных

кластера с 576 оптическими модулями. На данный момент темпы производства и развертывания позволяют коллаборации запускать два кластера в год. Таким образом, к концу 2021 года планируется запустить в эксплуатацию 10 полномасштабных кластеров с 2880 оптическими модулями, что позволит зарегистрировать порядка 30 астрофизических событий с энергиями выше 100 ТэВ, и, таким образом, провести детальное изучение сигнала, обнаруженного коллаборацией IceCube. ПКК отмечает важную роль проекта БАЙКАЛ (совместно с экспериментом IceCube) для изучения высокоэнергичных нейтринных потоков с полным перекрытием небесной сферы.

Рекомендация. ПКК рекомендует продолжить выполнение проекта БАЙКАЛ в 2019–2023 годах. ПКК с нетерпением ожидает публикацию первых результатов.

Проект DANSS

ПКК заслушал доклад о ходе эксперимента с реакторными нейтрино DANSS, проводимого на Калининской АЭС, и предложение по его продлению, представленные В. Г. Егоровым.

Проект DANSS нацелен на создание относительно компактного нейтринного детектора, который не содержит едких, легко воспламеняющихся или других опасных жидкостей, и поэтому не подпадает под ограничения по его размещению вблизи активной зоны промышленного реактора. В результате воздействия интенсивного нейтринного потока в чувствительной части детектора объемом 1 м³ каждые сутки происходит около 15000 обратных бета-распадов (ОБР) на протоне ($p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$). В дополнение к мониторингу ядерного реактора детектор применяется для фундаментальных исследований, а именно поиска осцилляции нейтрино в стерильное состояние на коротком расстоянии.

К настоящему времени детектор DANSS собран, запущен и отлажен. Ожидается, что в 2018 году будет получен окончательный результат по проверке существования «реакторной аномалии». В период 2019–2021 годов планируется, во-первых, существенно расширить область ограничения осцилляционных параметров нейтрино и, во-вторых, в течение двух-трех кампаний осуществить диагностику работы реактора, связав данные об энергетическом спектре нейтрино с меняющимся составом топлива и тепловой мощностью (эти данные создадут основу для нейтринного мониторинга реакторов).

Предполагается также принять посильное участие в создании дополнительного детектора возле реактора СМЗ в НИИАР (Димитровград, Россия) совместно с NEOS (CUP IBS, Тэджон, Корея) и Neutrino4 (ПИЯФ, Гатчина, Россия), что даст возможность

измерить нейтринный спектр на расстояниях 5–18 метров от реактора, и, таким образом, существенно расширить область ограничения осцилляционных параметров.

Кроме того, с учетом накопленного опыта планируется разработать и создать на основе других сцинтилляционных элементов два новых нейтринных детектора S^3 (S-cube) с улучшенными параметрами. Являясь меньше, проще и дешевле, чем детектор DANSS, они будут обладать лучшим энергетическим разрешением и детектировать около 300-400 событий ОБР в сутки. Первый детектор будет собран в IEAP CTU (Прага) и установлен на АЭС Темелин (Чехия), а второй будет работать совместно с большим детектором DANSS на Калининской АЭС, что позволит осуществлять более надежный контроль за реактором.

Рекомендация. ПКК рекомендует продолжить проект DANSS в 2019-2021 годах, предусматривающий сотрудничество с проектами NEOS и Neutrino4, а также разработку и создание двух маленьких детекторов S^3 .

Проект GEMMA-III

ПКК заслушал доклад о ходе экспериментов проекта GEMMA с реакторными нейтрино, проводимых сотрудниками ОИЯИ на Калининской АЭС, и предложения по их продлению, представленные А. В. Лубашевским.

Проект GEMMA нацелен на изучение свойств реакторных нейтрино с помощью низкопороговых сверхчистых германиевых детекторов. В частности, производится поиск магнитного момента нейтрино (ММН) и когерентного рассеяния нейтрино (КРН) на ядрах вещества. В настоящее время ведется строительство экспериментальной установки на Калининской АЭС с четырьмя низкопороговыми детекторами общей массой 1,6 кг. Порог детектирования составляет ~ 350 эВ. В рамках проекта GEMMA-III планируется использовать четыре новых низкопороговых детектора с общей массой в $\sim 5,5$ кг (порог регистрации около 200 эВ). Экспериментальная установка будет расположена под реактором № 3 КАЭС на расстоянии 10 м от центра активной зоны. За счет такого близкого расположения в эксперименте доступен огромный поток антинейтрино $> 5 \cdot 10^{13} \text{ 1/(см}^2 \cdot \text{с)}$. Спектрометр расположен на специальном подъемном механизме, что дает возможность в любой момент значительно варьировать поток антинейтрино и тем самым подавлять главные систематические ошибки, вызванные возможной долгосрочной нестабильностью или неопределенностью в оценке фона.

Планируется, что в эксперименте будет впервые зарегистрировано когерентное рассеяние от реакторных нейтрино. После всех улучшений появится возможность

регистрировать ~ 190 событий от КРН в день, что позволит использовать данный процесс для изучения свойств нейтрино и мониторинга реакторов. Оценивается, что за несколько лет измерений будет достигнута чувствительность к ММН на уровне $9 \cdot 10^{-12}$ мВ, что приближается к значению, важному для астрофизики.

Рекомендация. ПКК рекомендует продолжение проекта GEMMA-III в 2019–2021 годах. ПКК с удовлетворением отмечает лидирующую роль ОИЯИ в этих экспериментах.

Проект EDELWEISS-LT

ПКК заслушал отчет о последних результатах эксперимента EDELWEISS, представленный Е. А. Якушевым. В эксперименте инновационные криогенные HPGe-болометры в низкофоновой установке используются для прямого поиска слабовзаимодействующих массивных частиц (WIMP) из галактического гало, считающихся основными кандидатами на роль темной материи. Целью новой фазы эксперимента EDELWEISS-LT является поиск спин-независимого рассеяния на нуклонах так называемых легких WIMP, актуальность поиска которых связана как с отсутствием доказательств SUSY на LHC, так и новыми теоретическими моделями, отдающими предпочтение WIMP с массой меньше $10 \text{ ГэВ}/c^2$. ПКК с удовлетворением отмечает, что участие в этом проекте обеспечивает для ОИЯИ возможность использования всей низкофоновой инфраструктуры EDELWEISS, включая одну из самых глубоких подземных лабораторий LSM, для создания и тестирования установок, предназначенных для проведения нейтринных экспериментов на Калининской АЭС.

Рекомендация. ПКК рекомендует продолжить выполнение исследовательской программы по прямому поиску частиц темной материи в проекте EDELWEISS-LT в 2019–2021 годах.

Резюме по выполнению темы «Неускорительная нейтринная физика и астрофизика»

ПКК заслушал резюме, представленное Е. А. Якушевым, по выполнению темы «Неускорительная нейтринная физика и астрофизика», включающей шесть рассмотренных проектов. В рамках темы для изучения редких явлений, связанных со слабым взаимодействием, применяются методы современной ядерной спектроскопии. Изучаемые редкие процессы включают поиск безнейтринного двойного бета-распада — проекты GERDA (G&M) и SuperNEMO, эксперименты с реакторными антинейтрино — проекты DANSS и GEMMA-III, прямой поиск частиц темной материи — проект EDELWEISS-LT и изучение нейтрино высоких энергий из

космоса с глубоководным нейтринным телескопом на озере Байкал — проект БАЙКАЛ-ГВД. ПКК с удовлетворением отмечает, что во всех проектах получены результаты мирового уровня. ПКК поддерживает общее направление развития темы, когда участие в престижных международных проектах обеспечивает доступ к передовым разработкам для развития домашних нейтринных экспериментов на двух основных экспериментальных базах — в лабораториях, расположенных на Калининской АЭС и на озере Байкал.

Общая рекомендация. ПКК рекомендует продолжить систематическую поддержку этих экспериментов. ПКК осознает нехватку людских ресурсов ОИЯИ в эксперименте БАЙКАЛ, что может стать проблемой при полноценном анализе данных. ПКК настоятельно рекомендует расширять международные контакты с коллаборацией KM3NET, чтобы разработать общие механизмы взаимодействия и стать частью дорожных карт ESFRI и APPEC.

ПКК рекомендует поддерживать сотрудничество с глубокими подземными лабораториями с учетом необходимости найти подходящее место как для эксперимента LEGEND, так и для полномасштабного детектора SuperNEMO. ПКК подчеркивает необходимость продолжения усилий по совершенствованию экспериментальной базы в ОИЯИ и на озере Байкал.

III. Статус фабрики сверхтяжелых элементов

ПКК заслушал доклад о состоянии работ по сооружению фабрики сверхтяжелых элементов (СТЭ), представленный В. А. Семиным и А. Г. Попеко. Монтаж циклотрона ДЦ-280 проходит успешно и его завершение планируется в конце первого полугодия 2018 года. Пуско-наладочные работы будут завершены к середине 2018 года. Ввод в эксплуатацию ускорителя ДЦ-280 начнется в сентябре 2018 года. Существенный прогресс достигнут в создании экспериментальных установок, включая мишенный блок, сепараторы и детектирующие системы. В частности, изготовлен и доставлен в Дубну новый газонаполненный сепаратор, его монтаж запланирован на январь-март 2018 года. Проведение первых тестовых экспериментов намечено на октябрь-ноябрь 2018 года. Наряду с созданием экспериментальных установок, значительные усилия ЛЯР и ОИЯИ направлены на процесс лицензирования, который должен быть завершен до начала экспериментов по синтезу и исследованиям сверхтяжелых элементов.

ПКК хотел бы поздравить коллектив ЛЯР с тщательно продуманными решениями, обеспечивающими продолжение работы У-400 в течение нескольких лет

и проведение экспериментов на газонаполненном сепараторе ГНС-1. Эксперименты по спектроскопии и изучению реакций на установке SHELS и новых элементов на сепараторе ГНС-1 являются взаимодополняющими.

Рекомендация. Для обеспечения сроков пуска в эксплуатацию фабрики СТЭ и начала первых экспериментов на ней ПКК рекомендует дирекции ОИЯИ и ЛЯР сконцентрировать максимально возможные ресурсы, необходимые для завершения в 2018 году работ всех систем ускорителя, сепаратора, мишенного и детектирующего узлов. Лицензирование объекта, которое сегодня является одной из наиболее важных задач, должно тщательно отслеживаться руководством. Следуя рекомендациям предыдущей сессии, ПКК ожидает заслушать на следующей сессии сообщение о методологии контроля за качеством изготовления и ввода в эксплуатацию основных систем фабрики СТЭ.

IV. Фрагмент-сепаратор АКУЛИНА-2

Фрагмент-сепаратор АКУЛИНА-1 использовался на протяжении многих лет в Лаборатории ядерных реакций для изучения экзотических ядер, удаленных от полосы стабильности. В 2016 году на циклотроне У-400М был запущен новый фрагмент-сепаратор АКУЛИНА-2. Этот фрагмент-сепаратор был протестирован в 2016 и 2017 годах на первичном пучке ^{15}N для получения различных вторичных пучков радиоактивных изотопов. Интенсивности вторичных пучков оказались в 25 раз выше, чем на предыдущем сепараторе АКУЛИНА-1. Таким образом, АКУЛИНА-2 становится базовой установкой для изучения экзотических ядер в ЛЯР ОИЯИ. Предложены первые эксперименты на новой установке, направленные на изучение распадов ^7H , ^{13}Li , ^{17}Ne , ^{26}S с испусканием 2p, 2n и 4n.

Рекомендация. ПКК полностью поддерживает экспериментальную программу исследований на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 на 2018 год. В первых измерениях планируется использовать дейтерированную полиэтиленовую физическую мишень. ПКК также рекомендует установить газовую мишенную систему в экспериментальном зале установки АКУЛИНА-2.

V. Рекомендации по завершающейся теме «Теория структуры ядра и ядерных реакций» и открытию новой темы «Теория ядерных систем»

ПКК принял к сведению отчет по завершающейся теме «Теория ядерной структуры и ядерных реакций» (01-3-1114-2014/2018) и предложение по открытию темы «Теория ядерных систем», представленные Н. В. Антоненко. ПКК высоко

оценивает результаты, полученные по основным направлениям исследований: структура ядер, удаленных от полосы стабильности, взаимодействие ядер при низких энергиях, динамика слияния, малочастичные системы, ядерная динамика при релятивистских энергиях, свойства горячей и плотной ядерной материи. Выдающиеся результаты были достигнуты путем разработки большого числа моделей и инновационных эффективных численных методов. ПКК принимает во внимание, что эти исследования тесно связаны с основными экспериментальными программами, реализуемыми на установках в ОИЯИ и за рубежом. ПКК отмечает плавный переход на новую тему «Теория ядерных систем», которая обещает быть тесно связана с физикой, представляющей большой интерес для фабрики СТЭ и фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2 в ОИЯИ, а также для других установок, работающих или находящихся на этапе ввода в эксплуатацию, таких как FAIR, SPES, NIE-ISOLDE, SPIRAL2 и ELI-NP. ПКК также высоко оценивает образовательную деятельность ЛТФ.

ПКК поддерживает продолжение исследований по теории ядра в рамках новой темы «Теория ядерных систем», которая должна отражать комплексный широкий подход к различным аспектам ядерной структуры и ядерных реакций и соответствовать программе экспериментальных исследований в ОИЯИ.

Рекомендация. ПКК рекомендует закрыть тему «Теория ядерной структуры и ядерных реакций» после ее завершения в 2018 году и одобрить новую тему «Теория ядерных систем» на 2019–2023 годы. ПКК также рекомендует укреплять международное сотрудничество с другими теоретическими группами, в частности с центром ECT* в Тренто (Италия).

VI. Научные доклады

ПКК с интересом заслушал доклад «Изучение завихренности и поляризации гиперонов в столкновениях ядер в диапазоне энергий NICA», представленный В. Д. Тонеевым.

ПКК с интересом заслушал доклад «Использование реакций многонуклонных передач для синтеза нейтронно-избыточных ядер», представленный А. В. Карповым. В докладе была описана модель для анализа реакций многонуклонных передач, которая достаточно хорошо воспроизводит имеющиеся экспериментальные данные, в том числе полученные в ЛЯР ОИЯИ. Показано, что решение системы уравнений Ланжевена с хорошо контролируруемыми параметрами может оказаться полезным для предсказаний выходов нейтронно-обогащенных ядер, которые могут быть более

эффективно синтезированы в реакциях многонуклонных передач, чем в реакциях фрагментации. Интересно отметить, что модель Карпова, Загребаева, Грайнера и коллаборации представляется существенно более надежной, для оценки выходов ядер, удаленных от снарядоподобных и мишенеподобных продуктов реакции в выходном канале, чем разработанный группой из Турина и широко используемый код GRAZING.

ПКК с интересом заслушал доклад «Анализ содержания мышьяка и ртути нейтронно-активационным методом в человеческих останках XVI-XVII вв. из некрополей Московского Кремля», представленный А. Ю. Дмитриевым. ПКК признает, что применение ядерных технологий служит мощным инструментом для получения точных данных, которые помогут пролить свет на интерпретацию истории. ПКК призывает группу продолжить работу в этом направлении, завершив настоящий анализ и применив этот метод к другим прикладным задачам, например, в изобразительном искусстве.

VII. Постерная сессия

ПКК с удовлетворением ознакомился с представлением новых результатов и проектов молодых ученых в области ядерной физики. Были отмечены лучшие стендовые сообщения: «Чувствительный метод регистрации нейтронов посредством йодсодержащих сцинтилляторов», представленное Д. В. Пономаревым, «Использование $(p,4n)$ реакционного потенциала для производства медицинских изотопов протонами средних энергий: генератор радионуклидов $^{90}\text{Mo} \rightarrow ^{90}\text{Nb}$ », представленное А. Мариновой, и «Использование сцинтилляций в аргоне для активного подавления фона в экспериментах GERDA (фаза-II) и LEGEND», представленное Е. А. Шевчиком.

ПКК рекомендует доклад «Чувствительный метод регистрации нейтронов посредством йодсодержащих сцинтилляторов» для представления на сессии Ученого совета в феврале 2018 года.

VIII. Разное

ПКК отмечает большую работу, проделанную авторами проекта E&T по разработке методов изучения основных ядерно-физических параметров урановой сборки «Quinta» (нейтронное поле, время производства плутония, энергетический выход сборки, отношение трансмутации минорных актинидов) и подготовке новой

программы с урановой массивной мишенью BURT. Мишень была недавно установлена для облучения пучком фазотрона ЛЯП ОИЯИ.

Рекомендация. ПКК рекомендует, чтобы результаты, полученные с мишенной сборки «Quinta», и дальнейшая программа экспериментов с мишенью BURT были рассмотрены и оценены на специальном совещании экспертов, организованном дирекцией ОИЯИ.

IX. Посещение ЛЯП

Члены ПКК благодарят дирекцию Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова за организацию посещения лаборатории.

X. Следующая сессия ПКК

Следующая сессия ПКК по ядерной физике состоится 20–21 июня 2018 года.

Ее предварительная программа включает следующие вопросы:

- отчеты и рекомендации по темам и проектам, завершаемым в 2018 году;
- рассмотрение новых проектов;
- стендовые сообщения молодых ученых, посвященные новым результатам и проектам в области исследований по ядерной физике;
- научные доклады.

М. Левитович
председатель ПКК
по ядерной физике

Н. К. Скобелев
ученый секретарь ПКК
по ядерной физике