

Физика элементарных частиц и тяжелых ионов высоких энергий

В соответствии с «дорожной картой» ОИЯИ исследования в области современной физики элементарных частиц и тяжелых ионов высоких энергий можно разделить на четыре взаимосвязанных направления — исследования на основе увеличения энергии ускорителей (энергетический рубеж), исследования на основе увеличения интенсивностей ускорителей (рубеж интенсивности), увеличение точности неускорительных исследований (рубеж точности) и исследования по астрофизике частиц (космический рубеж). Исходя из этих направлений современного развития физики элементарных частиц и ядерной физики ОИЯИ сосредотачивает свои усилия в рамках нового семилетнего плана в следующих основных областях:

1. Исследования по физике элементарных частиц, в том числе по физике нейтрино и редких процессов (рубежи энергетический, интенсивности, точности и космический), с целью раздвижения горизонта стандартной модели (СМ) и установления новых фундаментальных закономерностей;

2. Исследования по физике тяжелых ионов высоких энергий (рубежи энергетический и интенсивности) с целью установления уникальных свойств адронной материи в условиях фазовых переходов между кварковыми и адронными состояниями вещества;

3. Разработка детектирующих систем и ускорительных комплексов нового поколения, теоретическая поддержка ведущихся и планируемых экспериментальных исследований, развитие и поддержка высокоэффективных коммуникационно-вычислительных средств ОИЯИ с целью всестороннего обеспечения поставленных перед ОИЯИ задач семилетнего плана.

Выполнение нового семилетнего плана ОИЯИ по физике элементарных частиц и тяжелых ионов высоких энергий будет осуществляться силами четырех лабораторий ОИЯИ (ЛФВЭ, ЛЯП, ЛИТ и ЛТФ) как на собственной ускорительной базе, включающей ускоритель **Нуклотрон-М** и коллайдер **НИСА**, так и в рамках международных партнерских программ исследований на уникальных ускорительных комплексах мира, таких как Тэватрон (FNAL), RHIC (BNL), LHC и SPS (ЦЕРН), FAIR (GSI), в экспериментах, где вклад сотрудников ОИЯИ носит существенный характер.

ОИЯИ также участвует в работах по созданию ускорителя и детекторов в рамках проекта Международного линейного коллайдера (**ILC**). Район города Дубны признан одним из пяти официальных кандидатов на размещение коллайдера. Естественным продолжением этих усилий является участие в разработках детекторов и в подготовке программы физических исследований для ILC. ЛФВЭ и ЛЯП планируют продолжить разработку элементов лазера на свободных электронах, прототипа фотоинжектора ILC (в коллаборации с DESY, КЕК и ИПФ РАН), проектирование криогенных модулей четвертого поколения, радиочастотной и диагностической систем, встроенного оборудования, лазерного метрологического комплекса, технологии сварки взрывом элементов холодной структуры (совместно с ВНИИЭФ (Саров)), а также завершить создание испытательного стенда ЛИНАК-800 с электронными пучками. Группы сотрудников ОИЯИ включились в работы в рамках международных проектов **FLASH** и **XFEL**. Планируется участие в разработке диагностических систем сверхкоротких сгустков пучков в линейном ускорителе, экспериментальных исследованиях когерентного излучения, разработке блоков диагностики рентгеновского излучения, диагностике больших криогенных систем.

В **Лаборатории физики высоких энергий** в 2010–2016 гг. сохранятся основные направления исследований по физике тяжелых ионов высоких энергий и актуальным проблемам физики элементарных частиц, связанным с исследованием спиновой структуры нуклонов, проверкой стандартной модели, поиском новой физики и CP-нарушением. **Лаборатория ядерных проблем** в этот же период также продолжит свои

исследования по физике элементарных частиц, в том числе в традиционной для ОИЯИ области физики нейтрино и редких процессов, а также примет участие в создании базовых установок ОИЯИ.

Исследования по физике тяжелых ионов высоких энергий в ОИЯИ будут проводиться на ускорительном комплексе ЛФВЭ (Нуклотроне-М и NICA), создание которого является первоочередной задачей данной лаборатории. На этом комплексе в рамках проекта **MPD** будут проводиться исследование свойств горячей и плотной адронной материи, поиски так называемой «смешанной фазы», то есть смеси кварк-глюонного и адронного состояний, а также поиск возможного фазового перехода при энергии сталкивающихся частиц до $\sqrt{s_{NN}}=11$ ГэВ.

Степень участия сотрудников ОИЯИ в исследованиях **по физике тяжелых ионов высоких энергий в ускорительных центрах мира** будет определяться ходом работ по проекту NICA/MPD и появляющимися возможностями для работы на ускорительном комплексе **Нуклотрон-М/NICA**. В то же время сотрудники ЛФВЭ примут участие в изучении свойств ядерной материи в состояниях с экстремально высокой плотностью и температурой, поиске проявлений деконфайнмента кварков и возможных фазовых переходов в рамках совместных исследований по физике тяжелых ионов в экспериментах **STAR** на коллайдере RHIC (BNL), **NA61** (SPS) и **ALICE** (LHC, ЦЕРН).

В рамках проекта **ФАЗА** на **Нуклотроне-М** до 2011–2012 гг. планируется исследование процессов множественной эмиссии ядерных фрагментов промежуточной массы с помощью пучков релятивистских легких ионов. Предполагается установить механизм мультифрагментации и получить информацию о ядерных фазовых переходах типа «жидкость-туман» и «жидкость-газ».

Изучение столкновений тяжелых ядер при энергиях до 2 ГэВ на нуклон путем регистрации лептонных пар проводится сотрудниками ЛФВЭ на ускорителе **SIS-18** (GSI) с помощью широкоапертурного спектрометра **HADES**. После запуска нового ускорителя **SIS-100** планируется продолжение работы экспериментальной установки **HADES** при энергиях этого ускорителя (~10 ГэВ на нуклон).

Установка **СВМ** создается в GSI для исследования взаимодействий тяжелых ионов высоких энергий в новом международном ускорительном центре **FAIR** (Facility for Antiproton and Ion Research) в Дармштадте (Германия). Целью создаваемого экспериментального комплекса СВМ является проведение исследований по программе поиска и исследования смешанной фазы в «fixed target» постановке эксперимента. Эксперименты на СВМ являются дополнительными по отношению к исследованиям на установке **MPD** коллайдера NICA. Группа из ОИЯИ принимает участие в разработке и создании части трековых детекторов для установки СВМ, активно участвует в моделировании ее элементов и разработке физической программы.

Цель проекта **ТЕРМАЛИЗАЦИЯ**, проводимого на модернизированной установке СВД, состоит в исследовании коллективного поведения вторичных частиц, образованных в pp-взаимодействии при энергии протонов 70 ГэВ (Протвино). Программа исследований включает измерение парциальных сечений pp-взаимодействий при высоком числе вторичных заряженных частиц; исследование многочастичных корреляций, поиск сигналов турбулентности возбужденной адронной материи и т.п. Окончание проекта планируется в 2011 году.

Исследования спиновой структуры нуклонов будут проводиться сотрудниками ОИЯИ на ускорительном комплексе ЛФВЭ, а также в ЦЕРН и BNL. В ЛФВЭ планируется проведение экспериментов на выведенных поляризованных пучках Нуклотрона-М, в том числе с использованием передвижной поляризованной мишени. Эти исследования связаны с подготовкой спиновой программы проекта NICA и заключаются в создании эффективной поляриметрии, в развитии техники поляризованных мишеней и источников поляризованных частиц. В период до 2012 года в рамках этой программы

предполагается проведение исследований по измерению поляризационных наблюдаемых на установках **DSS** и **ALPOM-2**.

Задача планируемого совместно с RIKEN эксперимента **DSS** состоит в измерении спин-зависимых наблюдаемых реакции ${}^3\text{He}(d,p){}^4\text{He}$ при энергиях $T_d=1,0-1,75$ ГэВ. В эксперименте будет использоваться пучок поляризованных дейтронов Нуклотрона и поляризованная ${}^3\text{He}$ -мишень, изготовленная в CNS (Япония). Целью проекта **ALPOM-2** является измерение анализирующей способности в реакции $p+\text{CH}_2$ при импульсах поляризованного протонного пучка от 3 до 6 ГэВ. Такие данные необходимы для планируемых экспериментов по измерению поляризационным методом отношения электрического и магнитного формфакторов нуклона при больших передачах 4-импульса.

Изучение структуры адронов и адронная спектроскопия с использованием высокоинтенсивных пучков мюонов и адронов является задачей эксперимента **COMPASS** (ЦЕРН, SPS). Группа ОИЯИ примет участие в измерении обобщенных партонных распределений, в исследовании процессов Матвеева-Мурадяна-Тавхелидзе-Дрелла-Яна (ММТДЯ), а также в изучении продольной и поперечной спиновой структуры нуклона. В 2010–2016 гг. планируется участие ОИЯИ в наборе, обработке и анализе данных. Научная программа эксперимента **COMPASS** будет продолжена на ускорительном комплексе **NICA** в рамках проекта **SPD**, предполагаемый пуск которого состоится в 2016–2017 гг.

Целью спиновой программы проекта **STAR** является измерение спин-зависимых структурных функций нуклонов и ядер с использованием поляризованных пучков ускорителя **RHIC** (BNL). Группа ОИЯИ планирует продолжить участие в данной программе эксперимента **STAR** до ввода в эксплуатацию детектора **SPD** на установке **NICA**.

Сотрудники ЛЯП ОИЯИ принимают участие в экспериментах по проверке метода поляризации антипротонов, проводимых в настоящее время на установках **COSY** (Юлих) и **AD** (ЦЕРН). В случае успеха будет разрабатываться проект **PAX** по исследованиям в области спиновой физики на **FAIR**.

Важнейшими направлениями деятельности ОИЯИ на ближайшие 7 лет в области физики элементарных частиц являются **проверка стандартной модели, поиск проявлений новой физики за ее рамками и изучение нарушений фундаментальных симметрий**. Эти исследования уже проводятся и будут проводиться сотрудниками ЛЯП и ЛФВЭ в рамках международных программ исследований на крупнейших ускорительных комплексах мира в экспериментах, где вклад сотрудников ОИЯИ носит существенный или определяющий характер. Таковыми в настоящее время являются эксперименты на ускорителе со встречными протон-антипротонными пучками Тэватроне (**FNAL**), где ученые ЛЯП, участвуя в экспериментах с детекторами **CDF** и **D0**, уже получили физические результаты фундаментального значения. Анализ данных с этого коллайдера продлится до 2012 года. Опыт, приобретенный сотрудниками ОИЯИ в этих экспериментах, крайне важен для эффективного участия ОИЯИ в будущих экспериментах на **LHC**.

Безусловно, новая эра фундаментальных исследований в области физики элементарных частиц открывается с запуском коллайдера **LHC** (ЦЕРН). Сотрудники ЛЯП, ЛТФ, ЛИТ и ЛФВЭ примут участие в проведении экспериментов **ATLAS** и **CMS** на **LHC**. Оба этих эксперимента нацелены на прецизионные измерения многих возможных (известных и неизвестных) продуктов взаимодействия протонов при рекордной энергии в системе центра масс 14 ТэВ. В проекте **ATLAS** предполагается изучение протон-протонных взаимодействий с максимальным использованием уникальных возможностей **LHC** для исследования разнообразных физических процессов с целью проверки предсказаний стандартной модели и поиска явлений за ее пределами. Сотрудники ОИЯИ принимают участие в работах по ряду основных физических задач (топ-кварк, поиск бозона Хиггса, суперсимметрии и других проявлений новой физики) и отвечают за

функционирование ключевых подсистем экспериментальной установки. ОИЯИ участвует в проекте **CMS** в составе коллаборации России и стран-участниц ОИЯИ (RDMS CMS). RDMS несет полную ответственность за торцевые адронные калориметры и передние мюонные станции. В 2010–2016 гг. группа ОИЯИ примет участие в наборе данных, мониторинговании состояния детекторных систем, обеспечении их функционирования, обработке и анализе данных с целью проверки стандартной модели в процессах ММТДЯ и поиске проявлений новой физики. Будут проведены исследования по КХД, изучены струйные события, измерены их сечения и уточнены структурные функции глюонов. Планируется также участие сотрудников ОИЯИ в изучении рождения массивных состояний (калибровочные бозоны, бозон Хиггса).

На ускорителе **PS** (ЦЕРН) в рамках проекта **DIRAC** ученые ЛЯП продолжают изучение параметров КХД при низких энергиях, обусловленных нарушением киральной симметрии. Планируется рассмотреть возможность улучшения качества измерений с помощью пучка SPS и завершение этих исследований в 2014 году.

Исследования нарушения комбинированной четности (CP) в настоящее время крайне существенны для понимания характера CP-нарушения в рамках СМ. На пучке SPS (ЦЕРН) сотрудники ЛФВЭ в рамках проекта **NA62** продолжают серию прецизионных экспериментов по изучению характеристик каонных распадов, в том числе и прямого CP-нарушения в них. Установка NA62 предназначена для регистрации редкого распада заряженного каона на заряженный пион и два нейтрино, измерение вероятности которого позволит существенно уточнить параметры матрицы смешивания кварков (Кабиббо-Кобаяши-Маскава) и, возможно, обнаружить проявление новой физики. Задачи группы ОИЯИ в 2010–2016 гг. состоят в создании (совместно с ЦЕРН) трекового детектора нового типа, в развитии программного обеспечения как для реконструкции треков в детекторе, так и для всего эксперимента NA62, а также в участии в наборе, обработке и анализе экспериментальных данных.

Полученные с участием ЛЯП в эксперименте E391a (КЕК) результаты анализа распада нейтрального каона на пион и нейтрино-антинейтринную пару позволяют считать, что продолжение этих исследований на более высоком уровне точности ведет к новому пониманию эффекта CP-нарушения. Сотрудники ЛЯП продолжают эти работы в экспериментах **KLOE** в ИФВЭ (Протвино) и NA62 в ЦЕРН.

Прецизионное изучение редких распадов мюонов и пионов позволит проверить стандартную модель электрослабых взаимодействий и μ -e-универсальность. Предлагается провести поиск распада μ^+ на $e^+\gamma$, в котором нарушается закон сохранения лептонного числа (проект MEG). Современные расширения СМ допускают процессы с нарушением лептонного аромата, такие как распад μ^+ на $e^+\gamma$. Предлагаемый эксперимент с относительной точностью 10^{-14} (по отношению к основной схеме распада) на ускорителе PSI дает хорошую возможность получить первые указания на существование новой физики за пределами СМ.

Поиск проявлений поляризованной скрытой странности нуклонов в рождении ϕ - и ω -мезонов в протон-протонных и нейтрон-протонных взаимодействиях является основной целью проекта **HyperNIS** на **Нуклотроне-М**. Характеристики пучков Нуклотрона-М дают уникальные возможности для поиска гиперъядер и исследования их свойств. Основной задачей в ближайшее время является поиск нейтроноизбыточных гиперъядер ${}^6_{\Lambda} \text{H}$ на пучке ${}^7\text{Li}$. Завершение исследований планируется в 2015 году.

ОИЯИ активно участвует в работах по ускорителю и детекторам на комплексе **FAIR**. Физическая программа комплекса FAIR включает в себя широкий спектр задач, которые затрагивают ключевые аспекты сильных взаимодействий и КХД. Антипротонный пучок в области от 1 до 15 ГэВ/с позволит в эксперименте **PANDA** проводить прецизионные измерения в области спектроскопии чармония и очарованных адронов, поиск экзотических адронов и исследования влияния плотной адронной среды на характер модификации массы адронов.

В планах Института на ближайшие 7 лет участие в эксперименте PANDA: создание мюонной системы, сверхпроводящего соленоида и кварцевых радиаторов. Предполагается, что основная часть работ ОИЯИ по проекту FAIR будет финансироваться в рамках соглашения между Россией и коллаборацией FAIR.

Физика нейтрино и редких процессов открывает уникальные возможности для изучения фундаментальных, ключевых вопросов современной физики элементарных частиц. **Изучение процессов двойного бета-распада**, являясь одним из высших приоритетов ЛЯП, будет проводиться в рамках проектов NEMO, GERDA–MAJORANA и Super-NEMO. К 2016 году с использованием ^{82}Se планируется достичь ограничения на эффективную массу нейтрино $m_\nu < 0,04\text{--}0,11$ эВ. Главная задача эксперимента GERDA — поиск безнейтринного двойного бета-распада ^{76}Ge . Установка GERDA будет содержать чистые германиевые детекторы (обогащенные ^{76}Ge), погруженные в жидкий аргон. Эксперимент будет проводиться в подземной лаборатории Гран-Сассо (Италия).

Наблюдения **осцилляции нейтрино** означают наличие массы у нейтрино и несохранение лептонного аромата. ЛЯП принимает участие в лидирующих экспериментах по осцилляции нейтрино, таких как эксперимент OPERA (Гран-Сассо), задача которого — обнаружение тау-нейтрино в пучке мюонных нейтрино из ЦЕРН, и эксперимент с реакторными нейтрино Daya Bay.

С помощью спектрометра GEMMA, установленного на Калининской АЭС, проводятся прецизионные эксперименты по измерению **магнитного момента нейтрино**. Уникальные параметры этой установки позволяют уже в 2009 году получить рекордную чувствительность на уровне $3,5 \cdot 10^{-11}$ мВ. В конце 2010 года вступит в строй новый детектор GEMMA-2 для работы с более интенсивным нейтринным потоком от реактора. В течение 2010–2012 гг. на этом детекторе планируется достичь чувствительности к магнитному моменту нейтрино на уровне $(9\text{--}7) \cdot 10^{-12}$ мВ.

ЛЯП принимает участие в изучении **космических лучей ультравысоких энергий** (проекты TUS, NUCLEON и «Байкал»), экспериментах по прямому и косвенному **поиску темной материи** (проекты EDELWEISS и «Байкал»). Прямое наблюдение взаимодействия слабозаимодействующих массивных частиц (WIMP) в наземном детекторе стало бы событием огромной важности для физики частиц и космологии. Коллаборация EDELWEISS ведет поиск такой темной материи с помощью криогенных детекторов. Свое дальнейшее развитие эксперимент EDELWEISS получит в рамках проекта EURECA (European Underground Rare Event Calorimeter Array), целью которого является поиск частиц темной материи на беспрецедентном уровне точности с помощью детектора массой до 1 т. Планируется начать эксперимент EURECA в 2015 году.

Для реализации амбициозной программы ОИЯИ в области физики элементарных частиц и, в особенности, в области физики тяжелых ионов высоких энергий в ОИЯИ будет создан специализированный **Ускорительный комплекс ЛФВЭ**, оснащенный соответствующего уровня детектирующими системами. С этой целью подготовлен проект коллайдера NICA, предусматривающий создание ускорительной базы и инфраструктуры, необходимой для реализации главной физической задачи, стоящей перед ЛФВЭ, — проведения экспериментальных исследований по изучению адронной (сильнозимодействующей) материи и ее фазовых превращений.

Основной задачей проекта является создание на базе Нуклотрона-М ускорительного комплекса NICA, позволяющего проводить исследования на встречных пучках высокоинтенсивных ионов (вплоть до Au^{+79}) при средней светимости $L=10^{27}$ см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ в диапазоне энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}}=4\text{--}11$ ГэВ, а также на пучках поляризованных протонов ($\sqrt{s_{\text{NN}}}$ до 20 ГэВ) и дейтронов ($\sqrt{s_{\text{NN}}}$ до 12 ГэВ) с продольной и поперечной поляризацией и на выведенных пучках ионов, поляризованных протонов и дейтронов.

Для этого необходимо создание источника высокозарядных тяжелых ионов, сооружение линейного ускорителя-инжектора, бустерного синхротрона и двух

сверхпроводящих накопительных колец, а затем — объединение разработанных систем и существующего ускорителя Нуклотрона-М в единый комплекс с обеспечением не менее двух точек пересечения пучков. Сооружение комплекса Нуклотрон-М предполагается завершить в 2011 году. Запуск ускорительного комплекса NICA планируется произвести в 2015 году.

Для эффективного использования возможностей ускорительного комплекса NICA необходимо создание в ОИЯИ адекватных детектирующих установок. Такими экспериментальными установками будут детекторы **MPD** и **SPD** в ЛФВЭ.

Цель проекта **MPD** — эксперименты по изучению сильного взаимодействия в горячей и плотной адронной материи, поиск образования «смешанной фазы» такой материи. Концепция установки **MPD** предполагает размещение центрального комплекса регистрирующей аппаратуры в соленоидальном магнитном поле и двух форвард-детекторов за его пределами. Группа ЛЯП планирует взять ответственность за создание высокоэффективного компактного электромагнитного калориметра.

Установка **SPD** создается в ЛФВЭ для реализации второй части научной программы на коллайдере NICA по исследованию столкновений встречных пучков легких ионов и пучков поляризованных протонов и дейтронов. Это позволит на качественно новом уровне продолжить традиционные исследования спиновой структуры нуклонов в ОИЯИ.

Реализация поставленной перед ЛФВЭ задачи по созданию ускорительного комплекса NICA и установок **MPD** и **SPD** требует концентрации существенных ресурсов на эту задачу и оптимизации/минимизации финансирования по остальным проектам, ведущимся в ЛФВЭ в рамках существующих обязательств ОИЯИ.

Финансирование (тыс. долл. США)*

Работы	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Нуклотрон+NICA	10 900	25 100	26 700	26 300	6 200	6 600	8 200
Детектор MPD	2 100	4 600	8 100	7 600	5 100	650	650
Детектор SPD	130	550	750	850	1 050	1 600	2 700
Эксперименты на пучках Нуклотрона	165	175	175	175	155	125	90
Физика нейтрино и редких процессов	800	1 300	1 800	2 300	2 300	2 300	2 300
Эксперименты на внешних ускорителях	2 300	2 450	2 450	2 500	3 200	3 700	3 700
Итого	16 395	34 175	39 975	39 725	18 005	14 975	17 640

* Финансирование, представленное в таблицах Плана, не включает в себя расходы на заработную плату, электропотребление и инфраструктуру.