

Физика частиц и физика тяжелых ионов высоких энергий

Научные исследования в области физики элементарных частиц и физики тяжелых ионов высоких энергий можно разделить на четыре взаимосвязанных направления: ускорительное направление повышения энергии (граница энергии), ускорительное направление повышения интенсивности (граница интенсивности), неускорительное направление повышения точности (граница точности) и направление астрофизики частиц (космическая граница). С учетом этих общих направлений в рамках нового семилетнего плана ОИЯИ сосредоточит усилия на следующих главных темах.

1. Исследования в области физики частиц, включая спектроскопию частиц, спиновую физику, физику нейтрино и изучение редких явлений (затрагивающих направления границ энергии, интенсивности, точности и космическую границу), направленные на расширение Стандартной модели и открытие новых фундаментальных законов природы.

2. Исследования в области физики высоких энергий тяжелых ионов (границы энергии и интенсивности), направленные на установление уникальных свойств адронной материи в условиях фазовых переходов между кварковым и адронным состояниями материи.

3. Разработка систем детекторов и ускорительных комплексов нового поколения, теоретическая поддержка текущих и планирующихся экспериментальных исследований, разработка и поддержание высокопроизводительных телекоммуникационных связей и вычислительных средств в ОИЯИ, направленные на обеспечение комплексной поддержки реализации научных задач, предусмотренных семилетним планом.

В области физики частиц и тяжелых ионов высоких энергий новый семилетний план будет реализовываться силами четырех лабораторий ОИЯИ (ЛФВЭ им. В. И. Векслера и А. М. Балдина, ЛЯП им. В. П. Дзелепова, ЛИТ и ЛТФ им. Н. Н. Боголюбова) как на базе собственных установок ОИЯИ — ускорительного комплекса NICA, так и в рамках международных партнерских программ на крупнейших ускорительных установках мира в экспериментах со значительным вкладом, внесенным сотрудниками ОИЯИ.

ОИЯИ продолжит участие в развитии подсистем ускорителя и детекторов в рамках проекта ILC.

В рамках международных проектов FLASH и XFEL физики ОИЯИ участвуют в разработке систем диагностики ультракоротких пучков в линейном ускорителе, рентгеновского излучения и больших криогенных систем.

Исследование горячей и плотной барионной материи и ее фазовых переходов будет вестись на базе комплекса NICA, пуск базовой конфигурации которого планируется провести во второй половине семилетнего периода. Будут проводиться эксперименты с выведенными пучками нуклотрона на установке BM@N и в режиме коллайдера на детекторе MPD в тяжелоионных столкновениях в диапазоне энергий $\sqrt{s_{NN}} = 4-11$ ГэВ. Запуск комплекса NICA и упомянутых детекторов, их окончательное доведение до проектных параметров и получение новых экспериментальных результатов будут главными задачами для ЛФВЭ на ближайшие семь лет.

Группы ученых ЛФВЭ продолжают участие в исследовании свойств ядерной материи в экстремальных условиях, в поиске кваркового деконфайнмента и возможных фазовых переходов в рамках общих исследовательских программ в эксперименте STAR на RHIC, BNL, в эксперименте NA61 на ускорителе SPS (ЦЕРН), в эксперименте ALICE на LHC (ЦЕРН), и в эксперименте CBM на установке FAIR (GSI). Объем участия ОИЯИ будет зависеть от прогресса в реализации проекта NICA, а также от необходимости консолидировать работу на ускорительном комплексе ОИЯИ.

Ожидаемые результаты

1. Запуск стартовой конфигурации установки $BM@N$ для работы на пучках легких ионов высокой интенсивности, выведенных из нуклотрона. Получение первых результатов по исследовательской программе эксперимента $BM@N$: изучение выхода адронов, гиперонов и легких ядер — 2020–2021 гг.

2. Получение результатов на установке $BM@N$ с использованием пучков тяжелых ионов высокой интенсивности, включая ионы золота. Изучение эллиптических и прямых потоков, процессов с рождением гиперонов с $S = 2$ и гиперядер — 2023–2024 гг.

3. Пуск первой очереди детектора MPD, получение первых результатов в программе исследований по изучению свойств горячей и плотной барионной материи в центральном диапазоне быстрот, поиску фазовых переходов (наблюдаемые – выходы частиц и их спектры), включая частичное восстановление киральной симметрии (наблюдаемые – выходы дилептонов), и поиску критической точки (наблюдаемые – пособытийные флуктуации, корреляции частиц) — 2022–2023 гг.

4. Сдача в эксплуатацию второй очереди детектора MPD. Начало исследовательской программы с детектором MPD во всем доступном диапазоне фазового пространства — 2025 г.

5. Получение новых результатов по программе сканирования энергии в экспериментах NA61 (SPS) и STAR (RHIC) — 2017–2023 гг.

6. Получение новых результатов по программе фемтоскопии в эксперименте ALICE (LHC), участие в модернизации установки ALICE — 2017–2023 гг.

7. Выполнение обязательств по разработке и сдаче в эксплуатацию установки CBM в объеме обязательств ОИЯИ согласно совместной исследовательской программе NICA–FAIR — 2017–2023 гг.

Изучение спиновой структуры нуклона и других поляризационных явлений в нуклон-нуклонных и нуклон-ядерных взаимодействиях, а также в малонуклонных системах будет проводиться на ускорительном комплексе ЛФВЭ, в ЦЕРН и BNL. В ЛФВЭ будут проводиться эксперименты как с фиксированной мишенью и поляризованными пучками нуклотрона, так и на коллайдере NICA, на детекторе SPD. Строительство детектора SPD запланировано в рамках выполнения следующего семилетнего плана в соответствии с техническим проектом, который должен быть разработан. Программа исследований на SPD расширит действующие программы исследований эксперимента COMPASS (на SPS, ЦЕРН) по структуре и спектроскопии адронов на высокоинтенсивных пучках мюонов и адронов, а также на пучках поляризованных протонов на установке STAR (BNL), в которых ОИЯИ продолжит принимать участие в течение 2017–2023 гг.

Ожидаемые результаты

1. Поэтапная сдача в эксплуатацию каналов поляризованных пучков на нуклотроне и инфраструктуры, необходимой для обеспечения экспериментальных исследований поляризационных явлений в рамках международной коллаборации, — 2017–2023 гг.

2. Проведение программы исследований экспериментов DSS и ALPOM-2 с поляризованными пучками нуклотрона. Одобрение и выполнение новых экспериментов, создаваемых для изучения спиновой структуры нуклона и других поляризационных явлений (как в нуклон-нуклонных и нуклон-ядерных взаимодействиях, так и в малонуклонных системах) с пучками нуклотрона, — 2017–2023 гг.

3. Введение в эксплуатацию начальной конфигурации детектора SPD на коллайдере NICA — 2026 г.

4. Получение новых результатов по спиновой структуре нуклона в экспериментах COMPASS (SPS) и STAR (RHIC) в процессах ММТДЯ, DVCS и полуинклюзивном ГНР — 2017–2023 гг.

Поиск физических явлений за пределами Стандартной модели будет продолжен в экспериментах CMS и ATLAS на LHC в ЦЕРН.

ОИЯИ будет принимать участие в модернизации детекторов во время остановок LHC в 2018–2019 гг. и 2022–2024 гг. и продолжит анализ данных, полученных на LHC.

Группа ОИЯИ примет участие в эксперименте по поиску слабо взаимодействующих частиц темной материи, предложенном в ЦЕРН на ускорителе SPS. ОИЯИ также примет участие в экспериментах по поиску процессов с нарушением закона сохранения флейвора заряженных лептонов – конверсии мюонов в электроны на ядрах μe (FNAL) и COMET (J-PARC).

Ожидаемые результаты

1. Получение новых экспериментальных результатов в рамках программы, направленной на проверку предсказаний Стандартной модели (СМ) и поиск физики за пределами СМ на установках CMS и ATLAS. Выполнение обязательств по модернизации детекторов — 2017–2023 гг.

2. Подготовка и запуск эксперимента, направленного на поиск слабо взаимодействующих частиц темной материи с использованием пучков SPS, — 2017–2023 гг.

3. Достижение верхнего предела для мюон-электронного превращения на уровне $6 \cdot 10^{-17}$ в экспериментах μe и COMET — 2020–2023 гг.

Группа ОИЯИ продолжит участие в **серии прецизионных экспериментов по изучению редких распадов K -мезонов**, в том числе с прямым CP-нарушением, в эксперименте NA62 на SPS в ЦЕРН.

Ожидаемые результаты

1. Получение новых данных по распадам заряженных K -мезонов в эксперименте NA62 — 2017–2023 гг.

2. Точное определение параметров СМ, получение новых знаний о природе CP-нарушений и поиск «новой» физики за пределами СМ.

ОИЯИ продолжит участие в подготовке физической программы для комплекса FAIR, которая охватывает широкий диапазон задач, касающихся ключевых аспектов КХД. Пучок антипротонов с диапазоном энергии от 1 до 15 ГэВ/с на установке PANDA позволит провести точные измерения по спектроскопии чармония и очарованных адронов, по поиску экзотических состояний адронов и исследованию природы модификации массы адронов из-за плотности адронной среды. В эксперименте PANDA ОИЯИ планирует принять участие в строительстве мюонной системы, сверхпроводящего соленоида и кварцевых радиаторов электромагнитного калориметра. Основная часть работ будет финансироваться в рамках российского вклада в FAIR.

В области физики и технологии ускорителей в дополнение к работе над строительством элементов ускорительной установки NICA и участием в подготовке систем ИС планируется совместная работа по созданию комплекса FAIR в рамках программ Россия–FAIR и ОИЯИ–FAIR.

Нейтринная физика и астрофизика — одни из наиболее перспективных путей исследования фундаментальных, ключевых вопросов современной физики элементарных частиц. Наблюдение осцилляций нейтрино, отмеченное в 2015 г. Нобелевской премией, говорит о наличии у нейтрино ненулевых значений масс и нарушении закона сохранения лептонного числа.

Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джелепова (ЛЯП) принимает участие в наиболее перспективных экспериментах по исследованию нейтринных осцилляций, например, реакторном эксперименте Daya Bay, в котором было зарегистрировано ненулевое

значение угла смешивания θ_{13} . За этот результат в 2016 г. присуждена престижная награда Breakthrough Prize in Fundamental Physics.

В настоящее время физика нейтрино вошла в новую эру прецизионных измерений, и главными задачами сегодня являются определение иерархии нейтринных масс и исследование величины CP-нарушения в нейтринном секторе. Проблему иерархии масс нейтрино сотрудники ОИЯИ будут решать с помощью двух взаимодополняющих методик с использованием реакторных и ускорительных нейтрино в экспериментах JUNO и NOvA соответственно. Исследование CP-нарушения в лептонном секторе будет проводиться с помощью другого ускорительного эксперимента — DUNE, в котором ОИЯИ намеревается усилить свое участие в ближайшем будущем.

Другим важнейшим приоритетом в нейтринной физике является исследование процессов двойного бета-распада ядер, которое будет проводиться в рамках проектов GERDA-MAJORANA (G&M) и SuperNEMO. ЛЯП продолжит исследование солнечных нейтрино путем участия в эксперименте BOREXINO.

ЛЯП планирует расширить международное участие в эксперименте Baikal-GVD, который сфокусирован на детектировании космических нейтрино экстремально высоких энергий. Последовательное увеличение рабочего объема этого телескопа до величины порядка 0,4 км³ одновременно с набором и обработкой данных будет осуществлено в 2017–2023 гг.

Во время следующих семи лет в рамках нейтринной программы ОИЯИ будут реализованы важные этапы каждого из ее экспериментов. Помимо приоритетного развития установки Baikal-GVD, которая детально описана в предыдущем разделе, в экспериментах JUNO, NOvA и DUNE запланировано следующее.

В 2017–2020 гг. ОИЯИ должен полностью выполнить свои важные обязательства по созданию детектора JUNO. В частности, специалисты ОИЯИ

- подготовят 20 тысяч источников питания для ФЭУ установки JUNO;
- построят несколько сканирующих станций, разработанных в ОИЯИ для детального исследования и паспортизации ФЭУ, прежде чем их устанавливать в детектор JUNO;
- выполнят часть своих финансовых обязательств в виде использования сцинтилляционных детекторов эксперимента OPERA в качестве вето-системы для детектора JUNO; разработают методы контроля этих сенсоров и поставят необходимое оборудование в место расположения эксперимента;
- разработают методы и предложат варианты оборудования для защиты ФЭУ от влияния магнитного поля Земли;
- организуют компьютерную ферму для моделирования и анализа данных с учетом развития собственной базы данных эксперимента для полноценной обработки данных в ОИЯИ.

ОИЯИ планирует и в дальнейшем использовать комнату удаленного доступа эксперимента NOvA не только для сотрудников ОИЯИ, но и для других российских участников коллаборации (ИЯИ, ФИАН и др.).

В течение 2019–2023 гг. специалисты ОИЯИ планируют продолжить исследования и разработки по калориметрии ближнего детектора DUNE и по вопросу создания электромагнитного калориметра на базе уникального опыта, накопленного в этой области в ОИЯИ.

График финансирования (тыс. долл. США)

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Всего
Проекты JUNO, NOvA/DUNE	1 220,0	1 290,0	3 440,0	930,0	582,7	1 000,0	1 000,0	9 462,7

ОИЯИ играет лидирующую роль в передовых экспериментах с реакторными нейтрино, выполняемых в непосредственной близости от ядерных реакторов (DANSS, GEMMA/ ν GeN). Развитие техники экспериментов, синергия с другими низкофоновыми проектами ОИЯИ позволяют и будут позволять в дальнейшем проводить новые исследования на переднем крае науки. Результатами исследований станут:

- поиск осцилляций нейтрино в стерильные состояния на короткой базе с лучшей в мире чувствительностью;
- поиск магнитного момента нейтрино на уровне лучше $9 \cdot 10^{-12} \mu_B$;
- детектирование когерентного рассеяния нейтрино на ядрах (CEvNS) в зоне полной когерентности;
- использование CEvNS для прецизионного изучения электрослабого сектора и поиска Новой физики за пределами Стандартной модели;
- мониторинг внутриреакторных процессов.

График финансирования (тыс. долл. США)

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Всего
Эксперименты на нуклотроне: DSS, ALPOM-2, HyperNIS, FAZA-3, новые проекты	150,0	150,0	205,0	205,0	1 005,0	3 005,0	2 905,0	7 625,0
ЛФВЭ: эксперименты в ЦЕРН, BNL, GSI/FAIR	1 566,0	1 736,0	1 879,0	1 709,0	1 629,0	1 649,0	1 649,0	11 817,0
Нейтринная программа	1 880,0	1 934,0	1 993,0	1 533,0	1 574,0	1 617,0	1 662,0	12 193,0
ЛЯП: ATLAS	1 020,0	1 200,0	1 460,0	2 550,0	1 540,0	930,0	960,0	9 660,0
ЛЯП: другие проекты	820,0	830,0	840,0	850,0	860,0	870,0	880,0	5 950,0
Всего	5 436,0	5 850,0	6 377,0	6 847,0	6 608,0	8 071,0	8 056,0	47 245,0