

## Проекты:

Наименование проекта	Руководители проекта	Статус
Лаборатория Ответственные от лаборатории		
1. Математические методы, алгоритмы и программное обеспечение для моделирования физических процессов и экспериментальных установок, обработки и анализа экспериментальных данных	Шматов С.В. Заместители: Айриян А.С. Войтишин Н.Н.	Реализация

### Краткая аннотация и научное обоснование:

Проект направлен на организацию и обеспечение вычислительной поддержки подготовки и реализации физической программы исследований, проводимых с участием ОИЯИ, разработку и развитие математических методов и программного обеспечения для моделирования физических процессов и экспериментальных установок, обработки и анализа данных экспериментов в области физики элементарных частиц, ядерной физики, физики нейтрино, радиобиологии и др.

Особое внимание будет уделено созданию систем распределенной обработки и анализа данных экспериментов и информационно-вычислительных платформ поддержки исследований, проводимых в ОИЯИ и других исследовательских центрах.

Основные направления работы – математическая и вычислительная физика для поддержки крупных инфраструктурных проектов ОИЯИ, среди которых, в первую очередь, флагманский проект ОИЯИ NICA в режиме работы на фиксированной мишени (BM@N) и в режиме коллайдера для столкновений релятивистских тяжелых ионов (MPD) и на поляризованных пучках (SPD), нейтринный телескоп Baikal-GVD. Также будет продолжено сотрудничество с экспериментами в мировых ускорительных центрах (ЦЕРН, BNL и пр.), экспериментами в области физики нейтрино и астрофизических экспериментах, программами радиобиологических исследований. Рассматривается возможность применения разрабатываемых методик и алгоритмов в рамках других перспективных проектов мегасайенс (CEPC, JUNO, Супер чарм-тау фабрика, СКИФ и др.).

### Ожидаемые результаты по завершении проекта:

Ревизия генераторов взаимодействий и их развитие для моделирования процессов взаимодействий легких и тяжелых ядер, в том числе при энергиях NICA (FTF, QGSM, DCM-QGSM-SMM и др.), и процессов за рамками Стандартной модели, таких как рождения частиц-кандидатов на роль темной материи, дополнительных хиггсовских бозонов и процессов, идущих с нарушением лептонного числа и пр. (QBH, Pythia, MadGraph и др.) для условий LHC при номинальной энергии и полной интегральной светимости до  $450 \text{ фбн}^{-1}$ .

Разработка алгоритмов реконструкции треков заряженных частиц для экспериментальных комплексов, в том числе на NICA и LHC, создание соответствующего программного обеспечения и его применение для обработки и анализа данных, изучения физико-технических характеристик детекторных систем.

Разработка масштабируемых алгоритмов и программного обеспечения для обработки многопараметрических, многомерных, иерархических наборов данных эксабайтного объема, в том числе на основе рекуррентных и сверточных нейронных сетей, для задач машинного и глубокого обучения, предназначенных в первую очередь для решения различных задач в экспериментах по физике частиц, в том числе для мегапроекта NICA и нейтринных экспериментов.

Создание и развитие систем обработки и анализа данных и современных инструментов исследований для международных коллабораций (NICA, нейтринная программа ОИЯИ, эксперименты на LHC).

Разработка алгоритмов и программного обеспечения для исследовательских проектов ОИЯИ в области нейтронной физики.

Разработка алгоритмов, программного обеспечения и информационно-вычислительных платформ для радиобиологических исследований, прикладных исследований в области протонной терапии и экологии.

### Ожидаемые результаты по проекту в текущем году:

Завершение ревизии модели Geant4 FTF, более точное задание функций фрагментации кварков и дикварков в странные частицы в модели Geant4 QGS. Оптимизация работы моделей DCM и UrQMD 3.4 Попытка разработать модель кварк-глюонных струн для ядро-ядерных взаимодействий.

Физический анализ данных, полученных в экспериментах NICA MPD, NICA BM@N и NA61/SHINE, в рамках моделей Geant4 FTF и UrQMD 3.4. Массовые расчеты для указанных моделей по заявкам экспериментаторов.

Учет различных эффектов в генераторе DCM-QGSM-SMM: зависимости времени жизни резонансов от плотности ядерной среды, подавление сечения рождения псевдоскалярных мезонов и усиление рождения гиперонов в плотной ядерной среде, деформации ядер. Разработка решеточной модели ядра и перколяционной модели мультифрагментации.

Алгоритмы, программное обеспечение, Монте-Карло моделирование и анализ данных эксперимента CMS для исследования резонанса с массой 28 ГэВ в спектре пар мюонов на статистике Run 3 LHC. Поиск резонанса при 28 ГэВ в канале распада на пары  $e^+e^-$  и  $\tau^+\tau^-$  с использованием данных Run 2 и Run 3 LHC.

Алгоритмы, программное обеспечение, Монте-Карло моделирование и анализ данных эксперимента CMS для поиска частиц темной материи в данных Run 3 в конечном состоянии с двумя мюонами разного знака и недостающим импульсом. Интерпретация результатов в рамках Inert Doublet Model и в 2HDM+a моделей.

Отладка процедуры тестирования чувствительных элементов калориметра высокой гранулярности эксперимента CMS, включая реконструкцию треков и оценку эффективности каждой ячейки детектора. Проработка возможности мониторингирования ячеек калориметра с помощью физических процессов.

Разработка и отладка алгоритмов и методов реконструкции траекторий мюонов в катодно-стриповых камерах (КСК) мюонной системы эксперимента CMS для сравнения непрерывного подхода вейвлет-анализа для разделения перекрывающихся сигналов с нейросетевым подходом на базе KAN сети, оценки пространственного разрешения камер КСК и эффекта их старения на данных, полученных в 2025 г. на установке GIF++ в ЦЕРН и в протон-протонных соударениях пучков LHC.

Участие в работах по модернизации пакета ATLAS Athena IOVDbSvc под CREST, адаптация сервиса EventIndexPicking под требования Production System Group, модификация TDAQ Resource manager в соответствии с заданиями системы ATLAS JIRA.

Исследование эффективности и скорости различных методов машинного обучения идентификации частиц в BM@N (mailto:BM@N).

Нахождения полного набора поправочных параметров для детекторов STS и GEM эксперимента BM@N (с учетом и без учета магнитных полей) и их программная реализация для актуальных конфигураций детекторов в 2025-2026 годах.

Подготовка детальной геометрии трековых детекторов для актуальной конфигурации установки девятого сеанса эксперимента BM@N. Подготовка алгоритмов моделирования реалистичных откликов для газовых и полупроводниковых детекторов гибридной трековой системы, а также алгоритмов реконструкции координат с микростриповых плоскостей данных детекторов для обработки экспериментальных данных, собранных в 2025 году в рамках девятого сеанса эксперимента.

Алгоритмы моделирования откликов трековых детекторов эксперимента BM@N на основе генеративно-состязательных сетей (GAN). Алгоритмы восстановления пространственных координат в трековых детекторах с применением гибридного подхода на базе классических и квантовых нейронных сетей.

Исследование с помощью Монте-Карло моделирования многочастичных корреляций в pp-взаимодействиях при энергии пучков комплекса NICA 13 ГэВ, сравнение с теоретическими моделями.

Внедрение программы идентификации заряженных частиц в MPD на основе градиентного бустинга в MPDroot.

Проведение модернизации алгоритмов кластеризации и завершение интеграции трекера ACTS в глобальную реконструкцию треков в рамках программной оболочки MPDroot. Тестировка ACTS пользователями в условиях mass production.

Обновление внешних зависимостей MPDRoot и его адаптация к изменениям в используемых пакетах (GCC 15.x, GEANT4 11.4+, ROOT 6.38+, C++23). Завершение поддержки CentOS 7 и начало поддержки Alma Linux 10.x. Оценка возможности распространения пакета MPDRoot с использованием CVMFS на платформе macOS.

Разработка и внедрение нейросетевых алгоритмов для задач реконструкции событий в эксперименте SPD на ускорительном комплексе NICA.

Разработка и внедрение нейросетевых методов на базе сетей Колмогорова-Арнольда (KAN) для деконволюции многокомпонентных сигналов получаемых в физическом эксперименте.

Разработка алгоритмов на базе тензорных сетей для задачи реконструкции треков заряженных частиц в TPC MPD на ускорительном комплексе NICA.

Применение классических методов трекинга для построения и экстраполяции треков из TPC к системе ToF эксперимента MPD.

Развитие и поддержка эксплуатации информационных систем экспериментов BM@N и MPD для описания геометрии установок, конфигурации детекторов, процесса менеджмента. Создание прототипа системы BM@N Data Quality Assurance. Создание и внедрение системы MPD e-log. Участие в разработке онлайн системы DAQ MPD.

Исследование свойств алгоритмов реконструкции струй/кластеров адронов в условиях SPD. Изучение возможности наблюдения кластеров частиц в инклюзивном случае. Определение кинематики партонов жесткого процесса с применением алгоритмов машинного обучения.

Реализация модели обработки и хранения смоделированных данных эксперимента SPD, актуальной на 2025-2026 год. Интеграция промежуточного программного обеспечения и создаваемого на программной платформе Sampo прикладного ПО эксперимента SPD.

Функциональное тестирование и отладка компонентов и интерфейсов комплекса промежуточного программного обеспечения для системы предварительной обработки данных эксперимента SPD на программно-аппаратном прототипе кластера первичной обработки данных - SPD Online Filter.

Обеспечение необходимого уровня функционирования, отвечающего потребностям в массовом моделировании физических процессов эксперимента SPD в распределенной вычислительной среде на основе системы управления нагрузкой PanDA и системы управления данными на основе пакета RUCIO DDM. Развитие систем управления процессами обработки, добавление новых процессов, системы учета запросов на обработку данных. Проработка вопросов безопасности, в частности, аутентификации и авторизации пользователей, политик доступа к данным эксперимента. Развитие средств мониторинга инфраструктуры, сервисов и процессов обработки данных. Разработка систем полу- и автоматического тестирования сервисов созданной распределенной вычислительной среды.

Оптимизация графов автоматизированной обработки данных Baikal-GVD для эффективного использования многопоточности в программах обработки.

Развитие программного обеспечения для обработки данных на спектрометре малоуглового рассеяния нейтронов ЮМО.

Построение модели машинного обучения для задачи классификации адронов и гамма-квантов в эксперименте TAIGA.

Моделирование апгрэйд версии прототипа ОЛВЭ-HERO для тестов на пучках ускорителей.

Разработка математических методов и алгоритмов для реконструкции траекторий в задаче моделирования протонного цифрового томографа.

Дальнейшая оптимизация веб-приложения для фитирования экспериментальных данных: выбор наилучшей LLM-модели, разработка дополнительного интерфейса для пользователя, увеличение числа принимаемых форматов данных.

Использование МБЭ-многочленов высоких порядков для совершенствования методики обработки реакторных данных и нейтронных шумов реактора ИБР-2М.

Развитие алгоритмического модуля на основе моделей глубокого обучения и объяснимых моделей искусственного интеллекта для задач анализа данных, получаемых с использованием тест-системы «Водный лабиринт Морриса» в экспериментах, направленных на изучение поведенческих реакций лабораторных животных, подверженных воздействию различных факторов.

Разработка алгоритмов на базе методов глубокого обучения и компьютерного зрения и создание веб-приложения для анализа данных, получаемых с использованием тест-системы «Открытое поле» в экспериментах по изучению влияния ионизирующего излучения и других факторов на биологические объекты.

Исследования в области повышения точности моделей классификации и детекции болезней растений. Оценка эффективности и применимости различных методов генерации синтетических изображений болезней растений.

Исследования в области прогнозирования загрязнения окружающей среды с использованием данных дистанционного зондирования земли и различных методов машинного обучения. Разработка нейросетевых методов калибровки мобильных платформ для оценки состояния чистоты воздуха.

Разработка новых вычислительных методов на основе универсального обратного преобразования Радона и создание программного обеспечения для улучшенного анализа данных компьютерной томографии.

Разработка алгоритмов восстановления спектра нейтронов по показаниям спектрометра Боннера на основе глубоких нейронных сетей с преобразованием входящих признаков. Создание прототипа веб-приложения.

Тестирование и доработка прототипа квантового нечеткого ПИД – регулятора и демонстрационного образца робота со встроенным прототипом самоорганизующегося регулятора. Тестирование в эксплуатационном режиме прототипа интеллектуальной системы управления криогенными системами для сверхпроводящих магнитов ускорительного

комплекса НИКА в штатных и нештатных ситуациях на основе квантового координационного самоорганизующегося ПИД – регулятора. Доработка методологии разработанной структуры интеллектуальной системы управления ВЧ-станцией.