Рецензия

на научно-техническое обоснование продления
проекта “Участие ОИЯИ в проекте STAR” (02-1-1066-1-2010/2026)
в 2027–2029 гг. и отчёт по проекту за 2024–2026 гг.

Авторами проекта представлен отчет за период работы в 2024–2026 гг. и даны предложения по его продлению на 2027–2029 гг.

Основными задачами проекта являются:

1. набор экспериментальных данных по программе Hot QCD Physics по *p*-*p*, *p*-Au, и Au-Au и O-O взаимодействиям при энергии $\sqrt{s_{NN}}$ =200 ГэВ в новой, расширенной, геометрии установки STAR;
2. набор экспериментальных данных по программе Cold QCD Physics по взаимодействию поляризованных протонов $p\uparrow p\uparrow$ с энергией $\sqrt{s_{NN}}$ = 510 ГэВ в новой, расширенной, геометрии установки STAR;
3. обработка и анализ данных по программе энергетического сканирования BES-II в коллайдерных экспериментах и экспериментах с фиксированной мишенью.

Программа энергетического сканирования охватывает диапазон энергий в столкновениях ядер золота от 3 до 27 ГэВ в моде с фиксированной мишенью и в режиме коллайдера для поиска критической точки и сигнатур фазовых переходов ядерной материи. В программе Hot QCD Physics делается акцент на столкновения ядер золота с максимальной энергией 200 ГэВ с целью набора огромной статистики (18 млрд событий ядро-ядерных столкновений) для изучения микроструктуры кварк-глюонной плазмы. В программе Cold QCD Physics делается акцент на изучении столкновений поляризованных протонов с максимальной энергией 510 ГэВ для изучения природы спина и создания основы для будущих измерений на электронно-ионном коллайдере (EIC). Следует отметить, что задачи по набору статистики по программам Hot QCD Physics и Cold QCD Physics коллаборацией успешно выполнены. Группа в 2022–2026 гг. ОИЯИ принимала активное участие в сеансах по набору статистики в экспериментах на установке STAR (в дистанционном режиме).

Установка STAR была создана в Брукхейвенской национальной лаборатории при определяющем участии Объединённого института ядерных исследований для проведения экспериментов на релятивистском коллайдере тяжёлых ионов и поляризованных протонов RHIC. Установка STAR успешно проработала на пучках коллайдера в течение 25 лет. Все детекторы для Barrel и Endcup калориметров, включая высоковольтные системы питания для Endcup калориметра, созданы в ОИЯИ и успешно отработали в течение длительного периода.

Главной задачей физической программы на ускорительном комплексе RHIC являлось получение нового состояния ядерной материи, образующейся в столкновениях тяжёлых ионов (Cu, Au, $^{96}_{44}Ru$, $^{96}_{40}Zr$, U, O), изучение его свойств различными пробниками в широком диапазоне энергий (3–200 ГэВ) и центральности столкновения и определение фазовой диаграммы ядерной материи.

На основании результатов исследований, проведенных на установке STAR, сделано заключение – в столкновениях тяжелых ионов при максимальной энергии

RHIC образуется сильно взаимодействующая ядерная материи кварков и глюонов, больше напоминающей идеальную жидкость (Perfect Liquid), чем идеальный газ (Perfect Gas). Эта материя характеризуется сильным подавлением выходов частиц с большими поперечными импульсами, большим эллиптическим потоком адронов с лёгкими и тяжёлыми странными кварками, наличием сильных Δη и Δφ корреляций («ridge» effect) и «кварковым скейлингом». В экспериментах с поляризованными протонными пучками с рождением струй при энергии 510 ГэВ установлен положительный интегральный вклад глюонов в спин протона, а с рождением *W*-бозонов − обнаружено отличие спин-зависимых распределений морских *u*- и *d*-кварков в протоне.

Одной из главных задач группы ОИЯИ в 2024–2026 гг. в эксперименте STAR было участие в программе энергетического сканирования BES-II. В результате выполнения программ BES-I и BES-II просканирован интервал энергий от 3 до 200 ГэВ, соответствующий интервалам температуры 60–160 МэВ и барионного химического потенциала 720–25 МэВ.

В 2024–2026 гг. с участием группы ОИЯИ получен ряд новых результатов по программе энергетического сканирования:

- получена зависимость отношения кумулянтов $C4/C2$ для net-протонов в наиболее центральных и периферических событиях и установлено расхождение в пределах (2–5)σ в области энергии $\sqrt{s_{NN}}$ = 19 ГэВ (Phys. Rev. Lett. 135, 142301 (2025);
- установлена зависимость фактора ядерной модификации заряженных адронов от поперечного импульса для энергий столкновения 19.6 и 27 ГэВ и проведено сравнение с Монте-Карло моделями – UrQMD (каскадной) и SMASH + vHLLE (гидродинамической);
- установлена зависимость выходов образования φ-мезонов в Au-Au столкновениях при энергиях 19,6 и 27 ГэВ и 9 классах центральности от поперечного импульса в центральной области быстрот;
- проведен анализ спектров заряженных и странных частиц при энергиях 7,7, 11,5, 19,6, 27 и 39 ГэВ и определены термодинамических свойств ядерной среды (температура и барионный химический потенциал) в рамках модели ударной волны.
- проведен анализ фемтоскопических корреляций идентичных пионов, образующихся в столкновениях Au + Au при энергиях 3,0, 3,2, 3,5, 3,9, 4,5 ГэВ и установлено систематическое различие в поведении радиусов положительно и отрицательно заряженных пионов;
- проведен анализ спектров K_S^0 -мезонов в Au-Au столкновениях при энергии 19,6 ГэВ в рамках теории *z*-скейлинга и установлены закономерности скейлинговой функции в широком диапазоне переменной подобия, включая кумулятивную область;
- проведен фрактальный анализ с использованием Монте-Карло метода SePaC для событий Au-Au, полученных с помощью генератора AMPT (многофазная транспортная модель), фракталов Монте-Карло, событий со случайно распределенными частицами и сравнение с данными STAR при энергии 200 ГэВ;

- проведен анализ фемтоскопических корреляций пар K_S^0 - K_S^0 мезонов на статистике 500 миллионов событий в Au-Au столкновениях при энергии 19,6 ГэВ и семи классов центральности в диапазоне импульсов от 5 МэВ/*c* до 6 ГэВ/*c*.
- проведено сравнение эффективности различных моделей машинного обучения для идентификации частиц на основе информации от детекторов TPC и TOF на данных MC, полученных для детектора MPD.

Продолжение проекта на 2027–2029 гг. включает новые направления исследований. Одной из основных задач проекта на ближайшие несколько лет остаётся обработка данных, полученных по программе BES-II. Анализ результатов по программе энергетического сканирования важен не только для дальнейшего планирования экспериментальной программы на установке STAR, но и для определения области исследований, в которой необходимо провести измерения с высокой статистической точностью на установке MPD на коллайдере NICA. Отмечу, что анализ данных с фиксированной мишенью является важным для экспериментов на выведенных пучках Нуклотрона, например, BM@N.

В настоящее время предлагается продление проекта на 3 года (2027–2029 гг.), но надо понимать, что обработка экспериментальных данных STAR и, особенно по программам Hot QCD Physics и Cold QCD Physics, будет продолжаться не менее 10–15 лет, поскольку получен так называемый «золотой набор», который включает *p*-*p*, *p*-Au, Au-Au, измерения на лёгких ядрах, а также данные с поляризованными протонами. Все эти данные безусловно будут полезными при планировании и анализе экспериментов, как для будущих экспериментов на электронно-ионном коллайдере (EIC), так и для ускорительного комплекса NICA, в том числе и для эксперимента SPD. Отмечу, что исследования ядро-ядерных взаимодействий при максимальных энергиях RHIC, но в расширенном интервале пвсевдобыстрот, позволит получить принципиально новую информацию о динамике ядро-ядерных столкновений и проявлении спиновой структуры протонов и ядер.

Учитывая большой опыт совместной работы с Лабораторией информационных технологий и Брукхейвенкской национальной лаборатории по обработке экспериментальных данных с установки STAR с использованием GRID-технологий на Многофункциональном информационно-вычислительном комплексе ОИЯИ, организация такой работы в 2027–2029 гг. по обработке данных по программам Hot QCD Physics и Cold QCD Physics может стать существенным вкладом ОИЯИ в сотрудничестве в эксперименте STAR.

Среди задач проекта, предлагаемых группой ОИЯИ на 2027–2029 гг. отмечу следующие:

1. Использование метода корреляционной фемтоскопии для систематического изучения пространственно-временных параметров рождения частиц при энергетическом сканировании с учётом различных флуктуаций.
2. Изучение рождения странных частиц (мезонов и барионов) как чувствительных пробников состояния ядерной материи для поиска и изучения сигнатур фазовых переходов ядерной материи в зависимости от энергии и центральности соударения в широкой области значений поперечного импульса

3. Исследование структуры событий с применением метода фрактального анализа, кумулятивного рождения частиц в зависимости от энергии и множественности и изучение модификации спектров в ядерной среде.
4. Изучение энергетической и угловой зависимости глобальной поляризации, а также кирального магнитного эффекта.
5. Развитие и применение методов машинного обучения для анализа данных в экспериментах на коллайдерах.
6. Сохранение необходимых экспериментальных данных с коллайдера RHIC в ОИЯИ. Преобразование набранных данных в форматы pico- и femtoDST и их размещение на сервере ЛИТ ОИЯИ (200 Тб). Эти данные могут быть использованы для дополнительного анализа при планировании и проведении экспериментов по программе исследований на ускорительном комплексе NICA вне зависимости от внешних обстоятельств.

Физические результаты, полученные группой ОИЯИ, постоянно представляются на международных конференциях. В 2024–2026 гг. было представлено более 15 докладов. В 2024–2025 гг. с участием сотрудников группы ОИЯИ было подготовлено свыше 14 публикаций.

Отмечу, что в группе работают студенты университетов и молодые специалисты. В 2024–2025 гг. было подготовлено и защищено 5 бакалаврских и магистерских работ. Трое молодых учёных работают над подготовкой кандидатских диссертаций по тематике программы BES-II.

Молодыми учёными группы ОИЯИ в эксперименте STAR получен грант Российского научного фонда – «Измерение термодинамических характеристик плотной барионной среды, образующейся в столкновениях тяжёлых ионов при энергиях 3–27 ГэВ» (РНФ 22-72-10028, РНФ 25-72-30005).

Опыт сотрудников, вовлечённых в эксперимент STAR, чрезвычайно важен для подготовки физического проекта по программе исследований с тяжёлыми ионами на комплексе MPD/NICA в диапазоне энергий $\sqrt{s_{NN}}$ = 4–11 ГэВ и по программе поляризационных исследований на SPD/NICA в диапазоне энергий $\sqrt{s}$ =12–25 ГэВ.

Рекомендую принять отчёт по проекту «Участие ОИЯИ в эксперименте STAR» (02-0-1066-2007/2029-1) за 2024–2026 гг. и продолжить работы по проекту в 2027–2029 гг. Считаю, ресурсы, запрашиваемые авторами в научно-техническом обосновании продления проекта на 2027–2029 гг., обоснованы.

Начальник отделения ЛФВЭ
Доктор физико-математических наук В.П. Ладыгин
vladygin@jinr.ru

