

## Рецензия

на научно-техническое обоснование продления  
проекта “Участие ОИЯИ в проекте STAR” (02-0-1066-2007/2029-1) в 2025–2029 гг.  
и отчёт по проекту за 2022–2024 гг.

Настоящая рецензия рассматривает отчёт авторов проекта “Участие ОИЯИ в проекте STAR” за период работы в 2022–2024 гг. и предложения по продлению проекта на 2025–2029 гг. За прошедший и предстоящий период в проекте решались и будут решаться 2 большие задачи. Это обработка и анализ данных по программе энергетического сканирования BES-II и реализация новой экспериментальной программы по модернизации установки STAR и проведении измерений ядерных и поляризационных эффектов в новой кинематической области (Hot QCD Physics, Cold QCD Physics).

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. Одной из задач физической программы на ускорительном комплексе RHIC является получение нового состояния ядерной материи, образующейся в столкновениях тяжёлых ионов (Cu, Au,  $^{96}_{44}\text{Ru}$ ,  $^{96}_{40}\text{Zr}$ , U), с целью изучения его свойств различными пробниками в широком диапазоне энергий столкновения, от 3 до 200 ГэВ, и определение свойств фазовой диаграммы ядерной материи. В результате проведённых исследований на установке STAR было сделано заключение об образовании сильно взаимодействующей ядерной материи, больше напоминающей идеальную жидкость (Perfect Liquid), при максимальных энергиях RHIC. Установлено, что новое состояние ядерной материи при максимальных энергиях RHIC характеризуется сильным подавлением выходов частиц в Au+Au при больших поперечных импульсах рождённых адронов, большим эллиптическим потоком рождения адронов с лёгкими и тяжёлыми странными кварками, отличием его для барионов и мезонов при средних импульсах  $p_T$ , наличием сильных  $\Delta\eta$  и  $\Delta\phi$  корреляций (ridge effect) и «кварковый скейлинг» для легких и тяжелых кварков. Эти свойства больше всего напоминают свойства идеальной жидкости, чем долгое время предполагавшиеся, свойства идеального газа. В экспериментах с поляризованными протонными пучками при энергии 510 ГэВ и с рождением  $W$ -бозонов было обнаружено отличие спин-зависимых распределений морских  $u$ - и  $d$ -кварков в протоне. Установлен положительный интегральный вклад глюонов в спин протона при измерении двухспиновой продольной асимметрии рождения струй в столкновениях протонов при энергии 510 ГэВ.

Одной из главных задач группы ОИЯИ в 2022–2024 гг. в эксперименте STAR было участие в программе энергетического сканирования BES-II. В 2021 г. был проведён заключительный сеанс по набору данных по программе BES-II. В результате выполнения программ BES-I и BES-II была изучена область энергий  $\sqrt{s_{NN}} = 7,7–200$  ГэВ в коллайдерной моде и был изучен энергетический интервал  $\sqrt{s_{NN}} = 3,0–7,7$  ГэВ в экспериментах с фиксированной мишенью. Впервые в мировой практике в рамках одного и того же эксперимента был перекрыт энергетический интервал от 3,0 до 200 ГэВ. Это позволило изучить фазовую

диаграмму ядерной материи в широком интервале температуры ( $T_{ch} = 60\text{--}160$  МэВ) и барионного химического потенциала ( $\mu_B = 25\text{--}720$  МэВ).

В 2022–2024 гг. с участием группы ОИЯИ получен ряд новых результатов по программе энергетического сканирования. Это исследования фемтоскопических характеристик заряженных пионов при минимально достигнутой энергии на RHIC 3,0 ГэВ и в интервале энергий от 3,0 до 3,9 ГэВ, полученных в экспериментах с фиксированной мишенью; изучение фактора ядерной модификации при энергиях 14,5, 19,6 и 27,0 ГэВ; измерение спектра нейтральных  $K_S^0$ -мезонов при энергии 19,6 ГэВ для семи центральностей. Отмечу, что впервые после включения в состав установки STAR нового детектора – внутренней время-проекционной камеры (iTPC) – удалось реконструировать спектры в области сверхмалых поперечных импульсов  $K_S^0$ -мезонов. Авторами также предложена большая программа исследований по реконструкции гиперонов.

Важно отметить результаты, относящиеся к измерениям при минимальной энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 3,0$  ГэВ (*Phys. Rev. Lett.* 128 (2022) 202303). Установлено, что соотношение корреляторов  $C_2/C_4$  воспроизводится адронно-транспортной моделью (UrQMD). Это указывает на доминирование в этой области энергий адронных взаимодействий. Найдено, что при энергии 3,0 ГэВ отсутствует NCQ (number consistuent quark) скейлинг, который наблюдается при высоких энергиях. Представляет интерес сравнение результатов STAR, полученных при близкой энергии, с аналогичными результатами эксперимента HADES, включающих и фемтоскопические характеристики (*Phys. Lett. B* 827 (2022) 137003). Установка STAR предоставляет уникальную возможность провести сравнение при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 7,7$  ГэВ как в коллайдерной моде, так и в эксперименте с фиксированной мишенью. Такие исследования планируется выполнить в рамках рассматриваемого проекта. Измерения при энергиях меньше 11,5 ГэВ чрезвычайно важны для сравнения с будущими измерениями на коллайдере NICA.

Продолжение проекта на 2025–2029 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.

Планируемая дата окончания работ по проекту в 2029 г. связана с тем, что на 2022–2026 гг. коллаборация STAR представила программу исследований ядро-ядерных взаимодействий при максимальных энергиях RHIC, но в расширенном интервале псевдобыстрот, что позволяет получить принципиально новую информацию о динамике ядро-ядерных столкновений и проявлении спиновой структуры протонов и ядер. Эти программы называют «Cold QCD Physics» для экспериментов с поляризованными протонами и «Hot QCD» для экспериментов с тяжёлыми ядрами. Для выполнения этих исследований созданы новые детекторы,

которые позволили расширить аксептанс установки в область передних углов (Mid-rapidity  $-1,5 < \eta < 1,5$  и Forward Rapidity  $2,8 < \eta < 4,2$ ).

В 2022 г. с активным участием группы ОИЯИ (26 человеко-недель) был проведён первый сеанс по программе «Cold QCD Physics» с поперечно поляризованными протонами при энергии 510 ГэВ. Набрана статистика, которая вдвое превышает статистику, набранную за все предыдущие годы. Второй сеанс по столкновению поляризованных протонов с ядрами при энергии 200 ГэВ запланирован на 2024 г.

В 2023 г. также с участием группы ОИЯИ успешно проведён первый сеанс по программе «Hot QCD Physics» с пучками ядер золота на максимальной энергии коллайдера RHIC. Новые возможности установки STAR после её модернизации позволили в этом сеансе провести измерения в диапазоне псевдобыстрот  $-1,5 < \eta < 1,5$  (mid-rapidity) и  $2,8 < \eta < 4,2$  (forward rapidity), соответствующих диапазону переменной Бьоркена  $0,005 < x < 0,5$ . Это позволит изучить распределение Сиверса, функцию transversity, фрагментационную функцию Коллинза в ранее недоступных областях и расширить возможности анализа асимметрий в рождении  $W^\pm$ - и  $Z^0$ -бозонов. Следующий сеанс по изучению столкновений ядер золота при максимальной энергии и максимальной светимости коллайдера запланирован на 2025 г.

На 2024 г. запланирован сеанс по изучению поляризационных эффектов при энергии 200 ГэВ в  $p+p$  и  $p+Au$  взаимодействиях. Вполне возможно, что часть измерений, связанных с  $p+p$  взаимодействиями, будет выполнена в 2024 г. А измерения, связанные с  $p+Au$  взаимодействиями, будут перенесены на более поздний срок (вероятно на 2026 г.). Поэтому в 2024–2026 гг. авторы проекта будут продолжать набор статистики. И кажется разумным поддержать просьбу авторов проекта продлить проект до 2029 г. включительно, чтобы они имели не менее трёх лет на обработку новых экспериментальных данных.

Среди задач проекта, предлагаемых группой ОИЯИ, 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 2022–2024 гг. было представлено более 15 докладов. В 2022–2024 гг. с участием сотрудников группы ОИЯИ было подготовлено свыше 10 публикаций.

Важно отметить, что в группе работают студенты университетов и молодые специалисты. В 2022–2024 гг. было подготовлено и защищено 15 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).

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 2022–2024 гг. Также рекомендую продолжить работы по проекту в 2025–2029 гг. Ресурсы, запрашиваемые авторами в научно-техническом обосновании продления проекта на 2025–2029 гг., обоснованы.

Доктор физико-математических наук

vladygin@jinr.ru

В.П. Ладыгин