

# Отзыв на предложение о продлении участия ОИЯИ в проекте STAR

Экспериментальные результаты коллаборации STAR по изучению ядерной материи в экстремальных условиях, исследованию спин-зависимых кварковых и глюонных структурных функций, измерению поляризации морских кварков в процессах с рождением W-бозонов, исследованию ядерной материи в процессах с рождением тяжелых кварков хорошо известны научной общественности и внесли определяющий вклад в формирование современных знаний в этой области физики. Большой вклад в создание установки STAR и реализацию экспериментальной программы внесла и группа ОИЯИ, в которой активно работают физики стран-участниц ОИЯИ в том числе и Словакии.

Возможность проводить исследования на коллайдере RHIC с продольно и поперечно поляризованными протонами, различными сталкивающимися ядрами ( $d$ ,  $He$ ,  $Cu$ ,  $Au$ ,  $U$ ) в широком диапазоне энергий (от 7 до 200 ГэВ/нуклон), одновременно с постоянным развитием детектирующих систем установки STAR, позволяет в течение многих лет успешно решать широкий круг задач по изучению кварк-глюонной структуры материи.

Основным и существенным вкладом ОИЯИ в эксперимент STAR было создание торцевого электромагнитного калориметра (ЕЕМС). Создание этого детектора и его стабильная работа в сеансах по набору статистики позволили успешно выполнять физическую программу с поляризованными протонами (измерение асимметрий рождения пионов, струй, W-бозонов с продольно и поперечно поляризованными протонами) и получить новые ограничения на спин-зависимые глюонные и кварковые (валентные и морские) распределения различных флейворов.

На протяжении всего периода своего участия в эксперименте STAR группа ОИЯИ занималась развитием новых алгоритмов обработки данных для изучения ядро-ядерных столкновений и процессов с рождением струй в экспериментах с поляризованными протонами. Предложен и дальше разрабатывается оригинальный метод анализа данных ( $z$ -scaling) на основе общих фундаментальных физических принципов — универсальности, самоподобия, локальности и фрактальности взаимодействия адронов на уровне конституентов. Подход, основанный на теории  $z$ -скейлинга, может оказаться адекватным инструментом для поиска фазовых переходов и критических точек в адронной и ядерной материи.

За период 2019–2021 годов группой ОИЯИ в эксперименте STAR был сделан существенный вклад в получение новых физических результатов мирового уровня:

1. В эксперименте STAR в ядро-ядерных взаимодействиях проведена первая проверка СРТ – инвариантности в секторе гиперядерного вещества, где (анти-) странные кварки играют существенную роль в формировании этих ядер. Относительная разница в массе между гипертритоном и антигипертритоном составляет  $[1,1 \pm 1,0 \text{ (стат.)} \pm 0,5 \text{ (сист.)}] \cdot 10^{-4}$ . Это свидетельствует об отсутствии нарушений СРТ симметрии («Precise Measurement of the Mass Difference and the Binding Energy of Hypertriton and Antihypertriton at STAR», Nature Physics 16, 409-412(2020)).
2. В рамках программы энергетического сканирования BES-I измерены флуктуации числа «нет-протонов». Эти данные обеспечат более детальную информацию об области, в которой энергетическая зависимость «net-baryon» флуктуаций, возможно, претерпевает значительные изменения (non-monotonic variations in kurtosius  $\times$  variance of the net-proton number distribution as a function of  $\sqrt{s_{NN}}$  with 3.0 $\sigma$  significance for central gold-on-gold collisions) («Net-Proton number fluctuations and the Quantum Chromodynamic critical point», e-Print arXiv(2001.02852)).

3. В столкновениях поляризованных протонов при энергии 510 ГэВ измерена односпиновая продольная асимметрия рождения W бозонов и установлена асимметрия спин-зависимых морских и d кварковых распределений в протоне (Phys. Rev. D99(2019)051102).
4. В экспериментах с продольно поляризованными протонами при энергии 510 ГэВ впервые измерена двухспиновая асимметрия рождения струй и установлен положительный интегральный вклад глюонов в спин протона (Phys. Rev. D 100(2019)052005).
5. В столкновениях ядер золота при энергии 200 ГэВ измерен коэффициент ядерной модификации для мезонов и барионов, содержащих тяжелые кварки, и установлено значительное (больше 50%) подавление выходов адронов при поперечных импульсах больше 4 ГэВ/с (Phys. Rev. C99(2019)034908).

Основная экспериментальная программа на установке STAR в 2019 - 2021 годах - это программа энергетического сканирования. В продолжающемся эксперименте 2021 года уже выполнены запланированные измерения при пяти энергиях коллайдера (7,7; 9,1; 11,5; 14,6 и 19,6 ГэВ). Также выполнены измерения в экспериментах с фиксированной мишенью, которые расширяют диапазон энергетического сканирования до более низких энергий (7,7; 6,2; 5,2; 4,5; 3,94; 3,5 ГэВ).

В группе STAR в ОИЯИ ведется обработка экспериментальных данных и развиваются новые оригинальные методы и алгоритмы анализа ядро-ядерных и протон-протонных столкновений.

1. Выполнен предварительный анализ данных BES-II и получены спектры заряженных адронов и изучена зависимость от центральности в широком интервале поперечных импульсов в Au+Au столкновениях в интервале энергий от 7,7 до 54 ГэВ. В рамках развитого в группе ОИЯИ оригинального метода анализа экспериментальных данных (z-скейлинг) проверены скейлинговые закономерности в рождении частиц при энергии 7,7 и 9,2 ГэВ, сделаны оценки партонных потерь энергии и фрактальных размерностей сталкивающихся ядер и процесса фрагментации в зависимости от энергии и центральности столкновения и поперечного импульса рожденной частицы.
2. В группе ОИЯИ разработан метод фрактального анализа событий. В основу метода положено свойство самоподобия на различных уровнях разрешения в исследуемом пространстве (например, поперечных импульсов). Для каждого уровня определяется покрытие и составляется уравнение для нахождения фрактальной размерности. Равенство размерностей для всех уравнений системы определяет объект, называемый фракталом. Разработан алгоритм реконструкции фракталов, проведено тестирование программного комплекса на широком классе фракталов, оценена эффективность метода. В группе ОИЯИ получены предварительные результаты обработки около 1 миллиона событий различной центральности: определены оптимальные параметры метода, получены распределения событий по фрактальной размерности, проведено сравнение с различными  $p_T$  - распределениями частиц (степенным, экспоненциальным, случайным), выделены классы событий,  $p_T$  - распределения которых существенно отличаются между собой, разрабатываются дополнительные критерии отбора событий с целью существенного подавления фона и получения более чистого набора фрактальных событий.
3. Группа ОИЯИ, при анализе данных STAR BES-I, впервые получила спектры по кумулятивному рождению частиц в столкновениях ядер золота в коллайдерной моде при энергиях  $\sqrt{s_{NN}} = 7,7$  и 9,2 ГэВ.

В этой области установлено гладкое поведение скейлинговой функции и других величин (momentum fractions, recoil mass), характеризующих микроскопический механизм образования адронов.

Результаты исследований группы ОИЯИ опубликованы в реферируемых журналах и докладывались на различных международных конференциях, в частности на Рочестерской конференции 2020 года в Праге, Чехия.

В новом проекте предложены эксперименты на установке STAR на 2022–2025 годы. Экспериментальная программа на этот период времени включает следующие задачи:

1. Завершение исследований по программе энергетического сканирования BES-II в коллайдерной моде и в экспериментах с фиксированной мишенью. Очень важны измерения 2021го года с высокой статистикой при минимальной энергии коллайдера 7.7 ГэВ и минимальной энергии пучка в экспериментах с фиксированной мишенью 3 ГэВ для калибровок и сравнения с планируемыми измерениями на установке NICA/MPD и BM@N. Измерения на RHIC имеют важное значение для ОИЯИ, поскольку они позволяют получить предварительные сведения о физических процессах в интервале энергий коллайдера NICA, который будет иметь более высокую светимость при проведении измерений.
2. Для решения важной научной задачи по изучению фазовой диаграммы ядерной материи и определению уравнения состояния наряду с тяжелыми ионами необходимо осуществить запланированные в проекте эксперименты по столкновению легких ядер кислорода.
3. Важную научную значимость представляют планируемые измерения в 2022 и 2024 годах по программе Cold QCD Physics с поперечно поляризованными протонами при энергиях 510 и 200 ГэВ в протон-протонных и протон-ядерных взаимодействиях. Подчеркнем, что в программу этих измерений включено исследование Sivers (transfers momentum distribution -TMD) и Efremov-Teryaev-Qui-Sterman (twist-3 collinear distribution) Functions.
4. Значительный научный интерес представляет программа Hot QCD Physics на 2023 и 2025 годы по изучению микроструктуры QGP в золото-золото соударениях при энергии 200 ГэВ, которая направлена на решение двух важнейших задач – детализацию фазовой диаграммы QCD и определение свойств QGP на малых масштабах.
5. В проекте сформулирован ряд задач по использованию метода корреляционной фемтоскопии для систематического изучения пространственно-временных параметров рождения частиц при энергетическом сканировании с учетом различных флуктуаций.

В новом проекте, как это было и на предыдущих этапах исследований, предполагается участие членов группы ОИЯИ в подготовке и проведении сеансов по набору статистики, участие в рабочих группах по обработке и анализу данных, анализ экспериментальных данных с MuDST и PicoDST в ОИЯИ, подготовка докладов на конференциях и публикаций в реферируемых журналах, в том числе и как принципиальные авторы.

Как рецензент рекомендую активно привлекать к обработке экспериментальных данных молодых ученых из ОИЯИ, поскольку приобретенный ими опыт может быть непосредственно использован при предстоящей обработке экспериментальных данных, которые будут получены в ближайшем будущем на ускорительном комплексе NICA. Отмечу, что за последние два года в группу STAR в ОИЯИ уже привлечено 8 студентов старших курсов университетов из стран-участниц для подготовки квалификационных работ. Каждому из них предложена тема исследований на материалах эксперимента STAR.

В целом, предложенная в проекте физическая программа хорошо обоснована и её реализация не вызывает сомнений.

Одним из важных достижений авторов проекта является реализованная ими совместно с сотрудниками ЛИТ возможность использования ГРИД технологии для обработки событий с установки STAR на компьютерном кластере ОИЯИ. При необходимости это позволит формировать MuDST и PicoDST файлы, необходимые для приоритетных для ОИЯИ исследований и выполнения задач проекта.

Следует отметить, что участие ОИЯИ в эксперименте STAR на RHIC входит в Семилетнюю программу ОИЯИ на 2018–2023 гг.

Запрошенное авторами проекта финансирование соответствует решаемым задачам. Отмечаю, что этот запрос соответствует тому уровню финансирования, который выделялся авторам проекта на предыдущих этапах.

Предлагаю одобрить проект по участию ОИЯИ в эксперименте STAR в 2022–2025 годах с первым приоритетом и обеспечить запрашиваемые авторами ресурсы в полном объеме.

Доктор физико-математических наук,  
профессор

[hnatic@theor.jinr.ru](mailto:hnatic@theor.jinr.ru)

Михал Гнатич

