

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夸克ов в процессах с рождением W-бозонов, исследованию ядерной материи в процессах с рождением тяжелых夸克ов 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 разрабатывается оригинальный метод анализа данных (z -scaling) на основе фундаментальных физических принципов — самоподобия, локальности и фрактальности взаимодействия адронов на уровне конституентов. Наличие z -скейлинга находит свое обоснование и в области, которая лежит далеко от границы фазового перехода, или вне области, где может находиться критическая точка. Тем не менее подход, основанный на теории z -скейлинга, может оказаться адекватным инструментом для поиска фазовых переходов и критических точек в адронной и ядерной материи.

За период 2015–2018 годов группой ОИЯИ в эксперименте STAR был сделан существенный вклад в получение новых физических результатов мирового уровня:

1. Получены первые статистически обеспеченные результаты по измерению А-А корреляций в $Au+Au$ столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ при активном участии физиков ОИЯИ из Чешской Республики, Словакии и России. Эти результаты послужили основой для использования RHIC в качестве фабрики гиперонов для исследования гиперон-гиперонных взаимодействий методом корреляционной фемтоскопии.
2. Впервые корреляционной методикой измерено взаимодействие между антипротонами (Nature 527 (2015) 345). Установлено, что между антипротонами действуют силы притяжения и определены два ключевых параметра, характеризующих сильное взаимодействие — длина рассеяния и эффективный радиус. Этот эксперимент еще раз продемонстрировал уникальные возможности корреляционной методики для измерения параметров сильного взаимодействия, получение которых практически невозможно другими методами.
3. Выполнен анализ спектров заряженных адронов и изучена зависимость от центральности в широком интервале поперечных импульсов в $Au+Au$ столкновениях в интервале энергий от 7,7 до 200 ГэВ. В рамках развитого в группе ОИЯИ оригинального метода анализа экспериментальных данных (z -скейлинг) проверены скейлинговые закономерности в рождении частиц, 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.

4. Общепринятой является гипотеза о том, что странные частицы являются хорошими пробниками для изучения свойств ядерной материи и построения фазовой диаграммы. Поэтому представляется достаточно интересным выполненный авторами проекта анализ экспериментальных данных для изучения скейлинговых свойств в рождении странных частиц в $p+p$ взаимодействиях на RHIC, как основа для сравнения с аналогичными данными, полученными для ядерных столкновений.

5. Предложенный авторами проекта метод z -скейлинга был развит и применен для описания двойных продольных асимметрий при рождении пионов и струй, а также передачи поляризации (D_{π}) при рождении Λ (анти- Λ) гиперона. Проведена проверка скейлингового поведения спин-зависимых функций, получены оценки для спин-зависимых фрактальных размерностей протона и Λ (анти- Λ) гиперона, изучена зависимость партонных потерь и параметра подобия от поперечного импульса частицы.

Результаты опубликованы в реферируемых журналах и докладывались на различных международных конференциях.

В новом проекте предложены эксперименты на установке STAR на 2019–2021 годы. В этих экспериментах будут проведены измерения с высокой статистической точностью различных характеристик процессов столкновений релятивистских ядер, в которых получены указания на возможность открытия новых физических явлений.

Среди задач проекта отметим следующее:

1. В эксперименте STAR были обнаружены флуктуации в разделении заряда в сильном магнитном поле ($\sim 10^{17}$ Гаусс), возникающем в ядро-ядерных столкновениях, которые получили название «киральный магнитный эффект» (SME). Для дополнительной проверки и выяснения роли магнитного поля в разделении заряда будут проведены измерения с ядрами — изобарами рутений-96 и цирконий-96. Ожидается, что эти измерения с точностью $\sim 6\%$ позволят получить ответ на вопрос: какая доля разделяемого заряда связана с SME и восстановлением киральной симметрии.

2. В 2018 году в журнале Nature (Nature 548 (2017) 62) опубликован новый и необычный результат эксперимента STAR — обнаружение глобальной поляризации ядерной материи в столкновениях ядер золота в процессах с рождением лямбда и анти-лямбда гиперонов. В работе сделан вывод об образовании вихревой структуры в идеальной жидкости при столкновениях тяжелых ионов. В проекте предполагается провести дополнительные измерения и набрать большую статистику рождения лямбда и антилямбда гиперонов в столкновениях ядер золота при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 27$ ГэВ, необходимой для измерения глобальной поляризации.

3. Основной задачей проекта является выполнение новой фазы программы энергетического сканирования BES-II. Ранее была проведена первая фаза программы энергетического сканирования BES-I в интервале энергий от 7,7 до 200 ГэВ с целью исследования фазовой диаграммы и поиска критической точки ядерной материи. Были измерены различные характеристики ядро-ядерных взаимодействий, в том числе прямой и эллиптический потоки, быстротные корреляции, флуктуации и величина $k\sigma^2$ для «net-protons», выход дилептонных пар при малых поперечных импульсах. Эти результаты опубликованы более чем в 30 реферируемых журналах и многократно докладывались на международных конференциях. Однако, полученные статистические точности еще не позволяют сделать окончательных выводов, как о положении критической точки, так и о характере фазового перехода. Поэтому на 2019–2020 гг. запланированы новые программы энергетического сканирования BES-II.

4. Целью экспериментальной программы BES-II является получение данных с высокой статистической точностью в интервале энергий от 7,7 до 19,6 ГэВ. Для проведения измерений с высокой точностью в состав установки будут включены новые детекторы (EPD, iTPC, eTOF). На коллайдере RHIC для повышения светимости в 2–4 раза будет создана система электронного охлаждения пучков при низких энергиях. Ключевыми моментами для физических выводов являются: измерение величины $k\sigma^2$ для «net-protons»,

получение спектров дилептонов в области малых инвариантных масс, измерение эллиптических потоков для ф-мезонов и проверка Number Constituent Quark (NCQ) скейлинга.

5. В Программе энергетического сканирования BES-II будут проведены измерения на фиксированной мишени в интервале энергий, соответствующих интервалу энергий в коллайдерной моде от 3,5 до 7,7 ГэВ (6 точек по энергии). Это позволит провести изучение фазовой диаграммы в области значений барионного химического потенциала (μ_B) от 420 до 721 МэВ. 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.

Группа ОИЯИ планирует принять участие в следующих пунктах научной программы:

1. Участие в обработке данных по глобальной поляризации на ядрах рутения и циркония. Сравнение поляризации лямбда гиперонов в столкновениях ядер рутения и циркония может позволить различить «вихревую» модель от модели, связанной с эффектами магнитного поля.
2. Участие в экспериментах по набору статистически обеспеченных экспериментальных данных по энергетическому сканированию BES-II и обработка этих данных для изучения глобальной поляризации гиперонов и проверки предсказаний теоретических моделей.
3. Использование экспериментальных данных по энергетическому сканированию для изучения скейлинговых свойств и фрактальной структуры ядро-ядерных столкновений с целью поиска фазовых переходов и критической точки КХД.

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 в обработку 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.

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. В случае 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 2018–2025 гг.

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

Предлагаю одобрить проект по участию ОИЯИ в эксперименте STAR в 2019–2021 годах с первым приоритетом и обеспечить запрашиваемые авторами ресурсы в полном объеме.

Доктор физико-математических наук,
профессор

hnatic@saske.sk

Михал Гнатич

