Форма № 24

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ДИНАМИКА И НЕЛИНЕЙНЫЕ КВАНТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

ТЕМА: «ТЕОРИЯ ЯДЕРНЫХ СИСТЕМ»

ЛТФ ОИЯИ

ФАМИЛИИ РУКОВОДИТЕЛЕЙ ПРОЕКТА: Бондаренко С.Г., Ларионов А.Б.

ДАТА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЕКТА В ДНОД \_\_\_06.04.2023\_\_

ДАТА НТС ЛАБОРАТОРИИ \_22.12.2022\_\_\_\_\_ НОМЕР ДОКУМЕНТА \_\_\_9\_\_\_\_\_\_

ДАТА НАЧАЛА ПРОЕКТА \_\_\_2024\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(ДЛЯ ПРОДЛЕНИЙ –– ДАТА ПЕРВОГО УТВЕРЖДЕНИЯ ПРОЕКТА)\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ   
Директор Института**

**\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ /  
“\_\_\_ “\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 202\_ г.**

**Блок Теоретическая физика  
Наименование проекта по теме «Теория ядерных систем»**

Релятивистская ядерная динамика и нелинейные квантовые процессы

**Сроки выполнения проекта: 2024-2028**

**1. Общие сведения о проекте**

**1.1. Шифр темы** **01-3-1136-2019**

**1.2. Лаборатория ЛТФ**

**1.3. Научное направление Теоретическая физика**

**1.4. Наименование проекта**

Релятивистская ядерная динамика и нелинейные квантовые процессы

**1.5. Руководители проекта:** Бондаренко С.Г., Ларионов А.Б.

**2. Научное обоснование и организационная структура**

**2.1. Аннотация**

Цель проекта - изучение универсальных закономерностей в релятивистских столкновениях тяжелых ионов, сопровождающихся рождением различных частиц; определения наиболее важных наблюдаемых для проверки уравнения состояния ядра; теоретическая поддержка экспериментов на комплексе NICA. Большая ядерная прозрачность по сравнению с предсказаниями глаубероподобных моделей может указывать на наличие цветовой прозрачности и требует внимательного рассмотрения. На основе обобщенного эйконального приближения с будут рассчитаны ядерные прозрачности в *dd*-столкновениях, которые доступны на NICA SPD. Планируется исследовать трех/четырехнуклонные связанные (3He,T,4He) состояния и системы рассеяния (упругое протон-дейтронное рассеяние) в релятивистском формализме Бете-Солпитера-Фаддеева. Изучение свойств нагретой и сжатой ядерной материи при столкновении тяжелых ионов основано на Намбу-Иона-Лазинио модели c петлей Полякова.

**2.2. Научное обоснование**

Задача теории ядра состоит в том, чтобы разгадать механизм образования ядер из их строительных блоков, сильно взаимодействующих протонов и нейтронов, изучить динамику ядро-ядерных столкновений, приводящих к рождению различных частиц и фазовым переходам. Мега проект NICA требует теоретической поддержки планируемых экспериментов. Крупномасштабные установки в мире поддерживают программу теоретических исследований в области релятивисткой ядерной динамики и нелинейных квантовых процессов. Наши теоретические усилия направлены на ответы на следующие вопросы:

- Как можно улучшить транспортные подходы для описания динамики релятивистских столкновений тяжелых ионов?

- Каковы наиболее важные наблюдаемые в релятивистских столкновениях тяжелых ионов для проверки уравнения состояния ядра?

- Как быстро сталкивающаяся система эволюционирует к локальному изотропному состоянию в импульсном пространстве?

- Каковы особенности взаимодействия высокоэнергетических гамма-квантов с сильным лазерным полем?

- Какие релятивистские эффекты проявляются в малонуклонных системах?

(а) В связи с развитием Европейского исследовательского центра ELI представляют интерес исследования нелинейных квантовых процессов в очень сильных поляризованных электромагнитных полях, которые достигаются в коротких высокочастотных лазерных импульсах. В частности, будет изучаться рождение частиц в результате взаимодействия фотонов с такими лазерными импульсами.

Лазерный импульс является когерентным состоянием, в котором взаимодействие лазерных фотонов с заряженной материей является когерентным. В лазерных импульсах высокой интенсивности связь между зарядом и полем становится достаточно большой, что нарушает пертурбативные представления и необходимо учитывать взаимодействие между зарядом и лазером во всех порядках теории возмущений одновременно или непертурбативно. Непертурбативность проявляется в том, что несмотря на малую величину постоянной тонкой структуры α, плотность фотонов ρ в лазере масштабируется как ρ ∼ ξ2/α, в котором безразмерный параметр интенсивности ξ2 пропорционален мощности лазера и в настоящее время легко может намного превышать единицу. Так что эффективная константа взаимодействия заряд-поле (αρ)1/2 ∼ ξ>> 1.

Кроме известного Швингеровского механизма спонтанного рождения *e+e-* пар в постоянных сильных электромагнитных полях, который представляет скорее чисто академический интерес, в последнее время интенсивно исследуются нелинейные, непертурбативные 1→2 процессы, кинематически запрещенные в вакууме но разрешённые в присутствии фонового (лазерного) поля. Это, например, нелинейное образование фотонов (нелинейный Комптон эффект) и нелинейное рождение *e+e-* пар (нелинейный эффект Брейта -Уиллера). Эти процессы можно изучать экспериментально, поэтому в настоящее время исследование этих эффектов проводится во многих теоретических центрах и им посвящены создаваемые крупные экспериментальные установки. Соответствующие ссылки можно найти в недавнем обзоре [1].

Планируется дальнейшее развитие теоретических моделей и методов в теории нелинейных квантовых процессов взаимодействия заряженных частиц с интенсивными электромагнитными полями. При этом кроме зависимости наблюдаемых от интенсивности поля планируется исследование поляризационных эффектов, планируется исследование роли формы и несущей (carrier phase) фазы импульса.

(б) Планируется расширить релятивистское рассмотрение трехнуклонных (3He,T) систем в формализме уравнения Бете-Солпитера-Фаддеева с сепарабельных ядром взаимодействия [2] на четырехнуклонные системы в формализме Якубовского. Полученное уравнение будет решено для расчета энергии связи 4He в различных приближениях для их исследования. Также планируется вычисление электромагнитного формфактора этой системы.

Одним из наиболее распространенных подходов к изучению *pD*-рассеяния в релятивистском случае является анализ фейнмановской диаграммы взаимодействия на основе однонуклонного обмена, а также корректировки диаграмм высших порядков с учетом π-мезонного обмена [3], Δ изобары [4] и т.д. В амплитуду рассеяния входит волновая функция дейтрона, которую можно найти, например, путем решения уравнения Бете-Солпитера (БС). Сечение упругого рассеяния пропорционально четвертой степени волновой функцией дейтрона, поэтому результат очень чувствителен к выбору этой функции. Можно ограничиться парциальными состояниями дейтрона S и D и принять во внимание P-состояния [3], а также учесть обменные мезонами и Δ изобары.

В ходе исследования упругого протон-дейтронного рассеяния назад, предполагается использование релятивистского трехнуклоного уравнения Бете-Солпитера-Фаддеева с сепарабельных ядром взаимодействия. Такая тактика позволит учесть диаграммы перерассеяния нуклонов и заложить базис для учета других механизмов реакции. На первом этапе будет рассмотрено решение уравнения для низкоэнергетических параметров (длина рассеяния), а затем и полной амплитуды рассеяния. Будут проведены сравнения с расчетами, использующими фейнмановские диаграммы подпроцессов рассеяния.

Также нами будет рассмотрено упругие электромагнитные форм факторы пиона с учетом аномального магнитного момента кварка в рамках ковариантого сепарабельного кварк-кваркого взаимодействия.

(в) Модель Намбу-Иона-Лазинио (НИЛ) с петлей Полякова является одной из наиболее развитых моделей, позволяющих описать состояние материи при конечных температуре и плотности, в отличие от расчетов на решетке или прочих функциональных методов, в которых не удалось продвинуться к высоким значениям химического потенциала. Тем не менее, модель НИЛ с петлей Полякова [4,5] фазовая диаграмма характеризуется завышенным, по сравнению с полученным в КХД на решетке, значением температуры фазового перехода при нулевом химическом потенциале. Это объясняется, например, тем, что связь между глюонами и кварками, описываемая в такой модели через ковариантную производную и эффективный потенциал недостаточно сильна. В работах [6,7], предложено ввести феноменологическую зависимость констант четырехкваркового взаимодействия (скалярного и векторного) от поля петли Полякова. Включение в модель НИЛ с петлей Полякова дополнительного векторного взаимодействия и его влияние на структуру фазовой диаграммы рассматривалась в работах [8-10], где было показано, что учет векторного взаимодействия приводит к значительному изменению структуры фазовой диаграммы: с увеличением отношения Gv/Gs уменьшается область фазового перехода первого рода, а при определенных значениях, он и вовсе исчезает. Однако, нелокальная версия модели НИЛ [11] не демонстрирует исчезновение фазового перехода первого рода и критической точки. Таким образом, модель НИЛ является гибким инструментов, позволяющим качественно описывать свойства материи, находящейся в критических условиях высоких температур и плотностей. Уравнения состояния, полученные в рамках модели НИЛ часто используются как начальные условия для расчетов в гидродинамических моделях, а также при изучении характеристик нейтронных звезд.

Одной из целей нашего проекта является изучение свойств нагретой и сжатой ядерной материи при столкновении тяжелых ионов. Особый интерес представляет изучение возможных фазовых переходов, возникающих в процессе охлаждения системы, а также проблемы нарушения СР-инвариантности в сильных взаимодействиях, что может быть следствием влияния киральной аномалии на топологическую структуру КХД вакуума при сильных магнитных полях, возникающих в процессе столкновения тяжелых ионов. Источником информации о состоянии среды в критических условиях столкновения тяжелых ионов могут стать различные процессы рассеяния кварков и адронов на различных стадиях охлаждения ядерной материи. Одной из задач нашего исследования является изучение рождения дилептонных пар. Спектр рождения дилептонных пар напрямую связан с различными промежуточными состояниями кварк-адронной материи. И его исследование может дать информацию о фазовых переходах.

Для изучения сечений поглощения и рождения Y-мезонов в BB-столкновениях планируется использование ковариантной кварковой модели с SU(5) Лагранжианом с учетом аномальных взаимодействий. Ковариантная модель кварков представляет собой квантовополевой подход к описанию адронов, рассматриваемых как связанные состояния кварков. Подход основан на феноменологическом, релятивистском лагранжиане, описывающем связь адронного поля с составляющими его кварками. Для простоты вычислений в модели в качестве вершинной функции выбирается форм фактор, моделирование которого позволяет менять их взаимодействие. Цель исследования – рассмотреть как сечение рассеяния меняется в зависимости от свойств среды.

Изучение двухфотонных и Далиц-распадов легких мезонов в рамках модели НИЛ при конечных температуре и плотности. Спектр рождения дилептонных пар напрямую связан с различными промежуточными состояниями кварк-адронной материи, а его исследование может дать информацию о фазовых переходах. В данной задаче основной сложностью является выбор подхода, позволяющего записать интегралы Фейнмана с использованием техники Матсубары для явного включения температуры в случае, когда один или два результирующих фотона являются оффшельными.

(г) Проект предполагает исследования явления цветовой прозрачности (ЦП), короткодействующих нуклон-нуклонных корреляций (КДК) и кумулятивного эффекта. Явление (ЦП) представляет собой уменьшенное взаимодействие нейтральных по цвету кварковых конфигураций, входящих или выходящих из точки жесткого взаимодействия, с окружающей ядерной средой. Обзоры по ЦП даны в работах [1,2,3]. Интерес к ЦП связан с тем, что это явление является прямым следствием кварковой структуры адронов. Кроме того, присутствие ЦП является необходимым условием применимости факторизации (т. е. Разделения амплитуды процесса на жесткую часть, рассчитываемую методами пертурбативной КХД, и мягкую непертурбативную часть, описываемую обобщенными партонными распределениями) в расчете данного жесткого процесса. При высоких энергиях ЦП наблюдалась в FERMILAB в когерентной диссоциации пучка пионов с импульсом 500 ГэВ/c в две струи на ядрах [4]. В области промежуточных энергий (Elab ~ 10-100 ГэВ) ЦП «размывается» за счет расширения сжатых в точке жесткого взаимодействия кварковых конфигураций по мере удаления от нее. Однако именно в этой области энергий уже выполнены [5,6,7] и планируются [8] в JLab, а также планируются на FAIR PANDA [9,10] и NICA SPD [11,12] эксперименты по поиску ЦП.

Чувствительной к ЦП наблюдаемой является ядерная прозрачность, т.е. отношение измеренного сечения рождения на ядре к тому же сечению, но рассчитанному в импульсном приближении. Таким образом, большая ядерная прозрачность по сравнению с предсказаниями глаубероподобных моделей может свидетельствовать о наличии ЦП. Взаимодействие механизмов кваркового счета и Ландшоффа в амплитуде упругого рассеяния *pp* → *pp* на большие углы в с.ц.м. влияет на сигнал ЦП, приводя к характерным осцилляциям ядерной прозрачности как функции энергии пучка в процессе *d(p,2p)n* [12]. Особенности детектора NICA SPD предполагают, однако, что симметричные dd-столкновения будут более доступны на начальном этапе, чем *pd*-столкновения. Поэтому на основе обобщенного эйконального приближения (ОЭП) с учетом эффектов ЦП [12] будут рассчитаны ядерные прозрачности в жестких процессах *d(d,2p)nn* и *A(p,2p)* с более тяжелыми ядерными мишенями (*A*>2) , для которых эффекты ЦП должны быть более сильными.

(д) Нуклон-нуклонные КДК проявляются во взаимодействиях высокоэнергетических частиц с ядрами с достаточно большими передачами импульса (Q>1 ГэВ). В КДК доминируют тензорные ядерные силы, которые выделяют канал S=1, T=0, что соответствует квазидейтронныму pn состоянию (см., например, обзор по КДК в работе [13]). В эксперименте это подтверждается тем, что при выбивании из ядра протона с начальным импульсом выше импульса Ферми с большой вероятностью (>70%) вылетает также и нейтрон с импульсом, равным по величине и противоположным по направлению начальному импульсу протона [14]. В последние годы интенсивные исследования КДК проводились в JLab и позволили получить информацию о доле нуклонов, связанных в КДК и их изоспиновом составе в тяжелых ядрах [15,16]. Кроме того, выяснилось [17], что с ростом импульса протона в ядре до 0.4 ГэВ/c до 1 ГэВ/c возрастает вероятность того, что этот протон принадлежит pp КДК, т. е. возрастает роль центральных ядерных сил. КДК могут дать информацию о ненуклонных степенях свободы в ядрах [18].

Поскольку плотность ядерной материи в КДК сопоставима с плотностью в центральной области нейтронных звезд, то включение КДК в уравнение состояния холодной ядерной материи может помочь объяснить существование недавно открытых нейтронных звёзд с массой больше двух солнечных масс.

Эксклюзивные реакции 12C+p→10B+pp+n и 12C+p→10Be+pp+p были измерены коллаборацией BM@N в ОИЯИ в обратной кинематике с пучком 12C при 48 ГэВ/с, взаимодействующим с водородной мишенью, производящей два протона под большими углами [19]. В этих двух реакциях протон взаимодействует с pn и pp КДК соответственно, тогда как выделение ядра 10A в основном состоянии направлено на уменьшение взаимодействий в начальном (ВНС) и конечном (ВКС) состояниях. Действительно, расчеты [20] указывают на то, что ВНС/ВКС снижает полное сечение реакции без значительного изменения кинематических зависимостей дифференциального сечения, за исключением зависимости от полного импульса остаточного ядра. Расчеты [20] основаны на глауберовской теории многократного рассеяния в предположении, что все частицы движутся быстро вперед в системе покоя ядра, что является не вполне оправданным предположением, в особенности для медленного нуклона-спектатора из КДК-пары.

Целью нашей предстоящей работы является разработка прочной теоретической базы для описания взаимодействия протона с КДК-парой в ядре с учетом ВНС/ВКС. В расчетах будет применена феноменологическая относительная волновая функция ядро-КДК, и спектроскопические факторы для *pn*- и *pp*-пар из трансляционно-инвариантной оболочечной модели [21]. Акцент будет сделан на совершенствовании формализма модели Глаубера и ОЭП для применения к частицам, распространяющимся под большими углами в лабораторной системе отсчета, например нуклону-спектатору из КДК-пары.

Интерес к кумулятивному эффекту, то есть рождению частиц в кинематически запрещенной области фазового пространства, возник в 70-х годах, когда проводились первые эксперименты с пучками легких ядер на синхрофазотроне ОИЯИ [22,23,24]. Для образования нуклонов кумулятивная область включает в себя полярные углы *Θ*≈180o в лабораторной системе отсчета. Механизм кумулятивного эффекта до сих пор не установлен. Было предложено несколько возможных механизмов. Одна из возможностей состоит в том, что налетающий протон сталкивается в ядре с массивным компактным объектом, называемым «флуктуоном» [25]. Другое предложение заключалось в том, что точный учет КДК вместе с эффектами глауберовского (анти)экранирования объясняет кумулятивный выход протонов [26]. Наконец, возможно также, что ключевую роль играет цепочка многократных перерассеяний в ядре с возбуждением и распадом барионных резонансов [27, 28].

Мы планируем провести сравнительные расчеты *pA*-реакций на основе модели КДК (которая будет разработана на более ранней стадии проекта) и на основе транспортной модели ГиБУУ [29] для изучения кумулятивного образования протонов и пионов. Будет проведено сопоставление результатов расчетов с имеющимися экспериментальными данными для дейтронной и более тяжелых (*A*>2) ядерных мишеней, предоставлены прогнозы для энергий NICA и установлена роль теплового равновесия на кумулятивные выходы.

(е) Используя полученное выражение для оптического потенциала нуклон-ядерного рассеяния, где он выражается через параметры элементарной амплитуды рассеяния нуклон на нуклонах, связанных в ядерной среде, будет проведён анализ соответствующих экспериментальных данных рассеяния протонов на ядрах при энергиях от 100 Мэв до 1 Гэв. Таким образом появляется возможность выявить влияние ядерной среды на такие фундаментальные характеристики элементарной NN-амплитуды, как полное сечение рассеяния нуклона на связанном нуклоне ядерной среды, и ещё двух характеристиках этой амплитуды, а именно с зависимостью от энергии отношения её реальной части к мнимой, а также параметра её наклона в зависимости от переданного импульса связанному в ядре нуклону.

(ж) Вычисление точных адронных распределений по поперечному импульсу и быстроте новыми методами в рамках статистики Цаллиса-1, Цаллиса-3 и *q*-дуальной статистики и их применение для описания экспериментальных данных для адронов, образованных в столкновениях тяжелых ионов и протонов с протонами при энергиях LHC, RHIC, NICA и FAIR. Введение локально равновесной релятивистской статистической модели адронов с модельной геометрией расширяющегося файербола для описания распределений по поперечному импульсу и быстроте для адронов, образующихся в столкновениях тяжелых ионов и протонов с протонами при высоких энергиях. Обобщение квантово-статистической адроной модели с точно сохраняющейся странностью системы на случай точного сохранения барионного и электрического зарядов системы и нахождение рекуррентных уравнений для точного решения статистической суммы и средних по ансамблю. Использование этой модели для вычисления множественности идентифицированных адронов, образованных в столкновениях тяжелых ионов при энергиях LHC, RHIC, NICA и FAIR. Введение статистической кварк-партонной модели для описания партонных функций распределения в высокоэнергетических глубоко неупругих лептон-адронных и протон-протонных столкновениях.

(з) Продолжение исследования поведения духовых и глюонных пропагаторов при конечной температуре в подходе, основанном на уравнения Дайсона-Швингера в калибровке Ландау в приближении усеченной радуги. Решения системы связанных уравнений для духовых и глюонных пропагаторов, как функция температуры *T*, частоты Мацубары *Ωn* и квадрата трех-импульсов **k**2, планируется решать численно в большом диапазоне *T*. Полученные решения будут служить ингредиентами для ввода в расчеты температурно-зависимого уравнения Бете-Солпитера для глюболов. Планируется исследовать возможные фазовые переходы из связанного состояния глюбола в свободную глюонную плазму. Это исследование имеет непосредственное отношение к проблемам фазовых переходов в кварк-глюонную плазму в горячей ядерной среде (например, в процессах, запланированных для исследований в экспериментах на установке NICA).

Будут выполнены аналитические расчеты лептонной аномалии g-2, обусловленной пузырьковыми диаграммами Фейнмана до восьмого порядка в КЭД в рамках комбинированных соотношений Меллина-Барнса и дисперсионных соотношений к *x*-параметризации соответствующих диаграмм. Мы планируем найти универсальное выражение для аномалии, справедливое для любого вида лептонов.

Литература

[1] A. Fedotov et al. Advances in QED with intense background fields, 2 2022, e-rint:[2203.00019](https://arxiv.org/abs/2203.00019) [hep-ph]

[2] S. Bondarenko, V. Burov, S. Yurev, “Relativistic rank-one separable kernel for helium-3 charge form factor”, Nucl.Phys.A 1004 (2020) 122065; “Trinucleon form factors with relativistic multirank separable kernels|”, Nucl.Phys.A 1014 (2021) 122251

[3] L. P. Kaptari, B. Kämpfer, S. M. Dorkin, and S. S. Semikh, Elastic proton-deuteron backward scattering: Relativistic effects and polarization observables, Phys. Rev. C 57, 1097; L. P. Kaptari, B. Kämpfer, S. M. Dorkin and S. S. Semikh, Pion-Exchange Effects in Elastic Backward Proton-Deuteron Scattering, Few-Body Systems 27, 189–206 (1999).

[4] N. Ladygina, Study of deuteron-proton backward elastic scattering at intermediate energies, SciPost Phys. Proc. 3, 053 (2020).

[5] S. Klevansky Rev. Mod. Phys. 64, 649 (1992)

[6] K. Fukushima Phys. Lett. B 591, 227 (2004)

[7] Y. Sakai, et al. Phys. Rev. D 82, 076003 (2010); Phys. Rev. D 84, 091911 (2011)

[8] U. Wogl, W. Weise, Prog. Part. Nucl. Phys. 27, 195 (1994)

[9] K. Kashiva et al., Phys. Lett. B 662, 26 (2008)

[10] Y. Sakai et al. Phys. Rev. D 78, 076007 (2008)

[11] D. Blaschke et al. Phys. Part. Nucl. Lett., 4, 342 (2014)

[12] L.L. Frankfurt, G.A. Miller, M. Strikman, Geometrical Color Optics of Coherent High-Energy Processes, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 44, 501 (1994)

[13] P. Jain, B. Pire, J.P. Ralston, Quantum color transparency and nuclear filtering, Phys. Rept. 271, 67 (1996)

[14] D. Dutta, K. Hafidi, M. Strikman, Color Transparency: past, present and future, Prog. Part. Nucl. Phys. 69, 1 (2013).

[15] E.M. Aitala, Observation of color transparency in diffractive dissociation of pions, Phys. Rev. Lett. 86, 4773 (2001).

[16] B. Clasie et al., Measurement of nuclear transparency for the A(e, e' π+) reaction, Phys. Rev. Lett. 99, 242502 (2007).

[17] L. El Fassi et al., Evidence for the onset of color transparency in ρ0 electroproduction off nuclei, Phys. Lett. B 712, 326 (2012).

[18] D. Bhetuwal et al., Ruling out Color Transparency in Quasielastic 12C(e,e'p) up to Q2 of 14.2 (GeV/c)2, Phys. Rev. Lett. 126, 082301 (2021).

[19] S. Li et al., Searching for an Enhanced Signal of the onset of Color Transparency in Baryons with D(e,e'p)n scattering, MDPI Physics 4, 1426 (2022).

[20] A.B. Larionov, M. Strikman, Color transparency in p d → π- π0p reaction, Eur. Phys. J. A 56, 21 (2020).

[21] G. Barucca et al., PANDA Phase One, Eur. Phys. J. A 57, 184 (2021).

[22] V.V. Abramov et al., Possible Studies at the First Stage of the NICA Collider Operation with Polarized and Unpolarized Proton and Deuteron Beams, Phys. Part. Nucl. 52, 1044 (2021).

[23] A.B. Larionov, Color coherence effects in the reaction d(p,2p)n, arXiv:2208.08832 [nucl-th], accepted in Phys. Rev. C.

[24] C. Ciofi degli Atti, In-medium short-range dynamics of nucleons: Recent theoretical and experimental advances, Phys. Rept. 590, 1 (2015).

[25] E. Piasetzky, M. Sargsian, L. Frankfurt, M. Strikman, and J. W. Watson, Evidence for Strong Dominance of Proton-Neutron Correlations in Nuclei, Phys. Rev. Lett. 97, 162504 (2006).

[26] O. Hen et al., Momentum sharing in imbalanced Fermi systems, Science 346, 614 (2014).

[27] M. Duer et al., Direct Observation of Proton-Neutron Short-Range Correlation Dominance in Heavy Nuclei, Phys. Rev. Lett. 122, 172502 (2019).

[28] A. Schmidt et al. (M. Strikman, A. Larionov), Probing the core of the strong nuclear

interaction, Nature 578, 540 (2020).

[29] A.B. Larionov, A. Gillitzer, J. Haidenbauer, and M. Strikman, Theoretical study of the Δ++ -- Δ−configuration in the deuteron using an antiproton beam, Phys. Rev. C 98, 054611 (2018).

[30] M. Patsyuk et al., Unperturbed inverse kinematics nucleon knockout measurements with a 48 GeV/c carbon beam, Nature Phys. 17, 693 (2021).

[31] Yu. Uzikov, Short-range NN Correlations and Rescatterings in the 12C + p → 10A + pp + N Reaction, Acta Phys. Polon. Supp. 14, 793 (2021).

[32] Yu. Uzikov and A. Uvarov, The pp/pn Ratio in the Reaction 12C(p,ppN)10A of Quasi-Elastic Knock-Out of a Nucleon from a Short-Range Correlated NN Pair, Phys. Part. Nucl. 53, 426 (2022).

[33] A.M. Baldin et al., Cumulative meson production,Yad. Fiz. 18, 79 (1973).

[34] A.M. Baldin et al., An Experimental Investigation of Cumulative Meson Production,

Yad. Fiz. 20, 1201 (1974).

[35] B. S. Aladashvili et al., One Particle Distributions with Large Momentum Transfers in d p Collisions at 3.3-GeV/c Incident Deuteron Momentum, Yad. Fiz. 27, 704 (1978).

[36] V.V. Burov, V.K. Lukyanov, A.I. Titov, Large momentum pion production in proton

nucleus collisions and the idea of “fluctuons” in nuclei, Phys. Lett. B 67, 46 (1977).

[37] L.L. Frankfurt and M.I. Strikman, On the role of short-range nucleus structure in fast backward particle production in high-energy processes, Phys. Lett. B 83, 407 (1979).

[38] L.G. Dakhno and V.A. Nikonov, Application of the Multiple Scattering Theory to Calculation of the Cumulative Proton Production in the Reaction pd→ppn, Nucl. Phys. A 491, 652 (1989).

[39] O. Panova, A. Motornenko, M. I. Gorenstein, J. Steinheimer, and H. Stoecker,

Backward nucleon production by heavy baryonic resonances in proton-nucleus collisions, Phys. Rev. C 100, 054617 (2019).

[40] O. Buss, T. Gaitanos, K. Gallmeister, H. van Hees, M. Kaskulov, O. Lalakulich,

A. B. Larionov, T. Leitner, J. Weil, and U. Mosel, Transport-theoretical Description of Nuclear Reactions, Phys. Rept. 512, 1 (2012).

Сотрудники сектора № 4 НОТАЯ ЛТФ имеют многолетний опыт успешной работы по изучению ядерной динамики, ежегодно публикуют около 15 статей в высокорейтинговых международных журналах.

Как следует из приведенного списка публикаций за последние 4 года, участники проекта успешно решают проблемы описания квантовых малонуклонных систем.

Избранные публикации сотрудников сектора № 4 НОТАЯ ЛТФ (2019-2022)

1. L.P. Kaptari, A.V. Kotikov, N.Yu. Chernikova, P. Zhang, “Longitudinal Structure Function FL at Small x Extracted from the Berger–Block–Tan Parametrization of F2”, *JETP Letters* **109**, 281-286 (2019)
2. Yu. B. Ivanov, V. D. Toneev, A. A. Soldatov, “Estimates of hyperon polarization in heavy-ion collisions at collision energies √ sNN = 4 – 40 GeV”, *Phys. Rev. C* **100**, 014908 [7 pages] (2019)
3. L.P. Kaptari, A.V. Kotikov, N.Yu. Chernikova, P. Zhang, “Extracting the longitudinal structure function FL(x,Q2) at small x from a Froissart-bounded parametrization of F2(x,Q2)”, *Phys. Rev. D* **99**, 096019 [16 pages] (2019)
4. A.S. Parvan, “Lorentz transformations of the thermodynamic quantities”, *Annals of Physics* **401**, 130-138 (2019)
5. V.K.Lukyanov, D.N.Kadrev, E.V.Zemlyanaya, K.V.Lukyanov, A.N.Antonov, M.K.Gaidarov, “Microscopic analysis of quasielastic scattering and breakup reactions of the neutron-rich nuclei 12,14Be”, *Phys. Rev. C* **100**, 034602 [12 pages] (2019)
6. L.P. Kaptari, B. Kaempfer, P. Zhang, “Modeling the gluon and ghost propagators in Landau gauge by truncated Dyson-Schwinger equations”, *Eur. Phys. J. Plus* **8**, 383-397 (2019)
7. S. Bondarenko, Ya. Dydyshka, L. Kalinovskaya, L. Rumyantsev, R. Sadykov, and V. Yermolchyk, “One-loop electroweak radiative corrections to polarized *e+ e →Z H”, Phys. Rev. D* **100**, 073002 [6 pages] (2019)
8. S.M. Dorkin, L.P. Kaptari, B. Kaempfer, “Pseudo-Scalar *qq-* Bound States at Finite Temperatures Within a Dyson-Schwinger–Bethe-Salpeter Approach”, *Few Body Systems* **60**, 20-39 (2019)
9. A. V. Friesen, Yu. L. Kalinovsky, V. D. Toneev, “Strange matter and kaon to pion ratio in the SU(3) Polyakov–Nambu–Jona-Lasinio model”, *Phys. Rev. C* **99**, 045201 [7 pages] (2019)
10. A. Friesen, Yu. L. Kalinovsky & V. D. Toneev, “Kaon to pion ratio in SU(3) PNJL model”, *Physics of Particles and Nuclei Letters* **16**, 681-689 (2019)
11. B. M. Abramov, M.Baznat, Yu.A.Borodin, S. A. Bulychjov, I. A. Dukhovskoy, A.P.Krutenkova, V. V. Kulikov, M. A. Martemianov1, M. A. Matsyuk, E.N. Turdakina, and A. I. Khanov, “Nuclear Fragments in 12C + 9Be Interactions at an Energy of 2 GeV per Nucleon”, *Physics of Particles and Nuclei* **82**, 623-629 (2019)
12. С. Г. Бондаренко, В.В. Буров, С.А. Юрьев, “О вкладе парциальных P- и D- состояний в энернгию связи тритона в формализме Бете-Солпитера-Фадеева”, *Ядерная Физика* **82**, 1-7 (2019)
13. Д.Ю. Бардин, П.Х. Христова, Л.В. Калиновская, В.A. Колесников, Л.А. Румянцев, Р.Р. Садыков, А.А. Сапронов, Е.Д. Углов, В.Б. фон Шлиппе, А.Б. Арбузов, С.Г. Бондаренко, Г. Нанава, А. и др., “Прецизионное описание процессов на коллайдерах в системе SANC”, *ЭЧАЯ* **50**, 395–432 (2019)
14. A. Arbuzov, S. Bondarenko, L. Kalinovskaya, “Asymmetries in Processes of Electron-Positron Annihilation”, *Symmetry* **12**, 1132 [14 pages] (2020)
15. D. Blaschke, A. V. Friesen, Yu. L. Kalinovsky, A. Radzhabov, “Chiral phase transition and kaon-to-pion ratios in the entanglement SU(3) PNJL model”, *Eur. Phys. J. Special Topics* **229**, 3517 – 3536 (2020)
16. I. Strakovsky, L. Pentchev, A.I. Titov, “Comparative analysis of ω-p, φ-p, and J/ψ-p scattering lengths from A2, CLAS, and GlueX threshold measurements”, *Phys. Rev. C* **101**, 045201 [4 pages] (2020)
17. A.S. Parvan, “Equivalence of the phenomenological Tsallis distribution to the transverse momentum distribution of q-dual statistics”, *Eur. Phys. J. A* **56**, 106 [5 pages] (2020)
18. A.S. Parvan, T. Bhattacharyya, “Hadron transverse momentum distributions of the Tsallis normalized and unnormalized statistics”, *Eur. Phys. J. A* **56**, 72 [20 pages] (2020)
19. L.P. Kaptari, B. Kaempfer, “Mass Spectrum of Pseudo-Scalar Glueballs from a Bethe–Salpeter Approach with the Rainbow–Ladder Truncation”, *Few Body Systems* **61**, 28 [10 pages] (2020)
20. A.I. Titov, A. Otto, B. Kaempfer, “Multi-photon regime of non-linear Breit-Wheeler and Compton processes in short linearly and circularly polarized laser pulses”, *Eur. Phys. J. D* **74**, 39 [13 pages] (2020)
21. A.I. Titov and B. Kaempfer, “Non-linear Breit–Wheeler process with linearly polarized beams”, *Eur. Phys. J. D* **74**, 218 [9 pages] (2020)
22. U. Hernandez Acosta, A. Otto, B. Kaempfer, and A.I. Titov, “Nonperturbative signatures of nonlinear Compton scattering”, *Phys. Rev. D* **102**, 116016 [11 pages] (2020)
23. Yu. D. Chernichenko, O. P. Solovtsova, L. P. Kaptari, “On resummation S-factor for a system of two relativistic spinor particles of arbitrary masses”, *Nonlinear phenomena in complex systems* **23**, 449-457 (2020)
24. S. Bondarenko, Ya. Dydyshka, L. Kalinovskaya, R. Sadykov, V. Yermolchyk, “One-loop electroweak radiative corrections to lepton pair production in polarized electron-positron collisions”, *Phys. Rev. D* **102**, 033004 [11 pages] (2020)
25. S.G. Bondarenko, V.V. Burov, S. Yurev, “Relativistic rank-one separable kernel for helium-3 charge form factor”, *Nuclear Physics A* **1004**, 122065 [13 pages] (2020)
26. A.S. Parvan, “Scaled variables and the quark-hadron duality”, *Eur. Phys. J. A* **56**, 192 [7 pages] (2020)
27. J.H.Khushvaktov, P.Tich, J.Adam, A.A.Baldin, M.Baznat, M.Bruniakov, W.I.Furman, S.A.Gustov, D.Krol, A.A.Solnyshkin, V.I.Stegailov, J.Svoboda, V.M.Tsoupko-Sitnikov, S.I.Tyutyunni et al. “Study of the residual nuclei generation in a massive lead target irradiated with 660 MeV protons”, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A* **959,** 163542 [8 pages] (2020)
28. D. Blaschke, A. Friesen, Y. Kalinovsky, A. Radzhabov, “Using the Beth–Uhlenbeck Approach to Describe the Kaon to Pion Ratio in a 2 + 1 Flavor PNJL Model”, *Particles* **3**, 169-177 (2020)
29. Л.И.Голяткина, Ю.Л.Калиновский, Е.Д.Рогожина, А.В.Фризен, “Application of a computer algebra systems to the calculation of the pion-pion -scattering amplitude”, *Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science* **28**, 216-229 (2020)
30. M. Baznat, A. Botvina, G. Musulmanbeko, V. Toneev, V. Zhezher, “Monte-Carlo Generator of Heavy Ion Collisions DCM-SMM”, *Physics of Particles and Nuclei Letters* **17**, 303–324 (2020)
31. Ю.Л.Калиновский, В.Д.Тонеев, А.В.Фризен, “The role of the chiral phase transition in modelling the kaon to pion ratio”, *JETP Letters* **111**, 147-148 (2020)
32. Yu. B. Ivanov, V. D. Toneev, A. A. Soldatov, “Vorticity and Particle Polarization in Relativistic Heavy-Ion Collisions”, *Physics of atomic nuclei* **83**, 179–187 (2020)
33. V.K. Lukyanov, E.V. Zemlyanaya, K.V. Lukyanov, I. Abdul-Magead, “Analysis of the Pion-Nucleus Scattering within the Folding and the Kisslinger Type Potentials”, *Nucl. Phys. A* **1010**, 122190 [13 pages] (2021)
34. T. Bhattacharyya, A.S. Parvan, “Analytical Results for the Classical and Quantum Tsallis Hadron Transverse Momentum Spectra: the Zeroth Order Approximation and beyond”, *Eur. Phys. J. A* **57**, 206 [11 pages] (2021)
35. H. Abramowicz, A.I. Titov, A. Zhemchukov, “Conceptual design report for the LUXE experiment”, *Eur. Phys. J. Special Topic* **230**, 2445-2560 (2021)
36. A. Arbuzov, S. Bondarenko, L. Kalinovskaya, R. Sadykov, V. Yermolchyk, “Electroweak effects in *e+e- -- > Z H* process”, *Symmetry* **13**, 1256 [14 pages] (2021)
37. L.P. Kaptari, B. Kaempfer, “Ghost and Gluon Propagators at Finite Temperatures within a Rainbow Truncation of Dyson–Schwinger Equations”, *JETP Letters* **114**, 501-506 (2021)
38. A. S. Khvorostukhin, E. E. Kolomeitsev, and V. D. Toneev, “Hybrid model with viscous relativistic hydrodynamics: a role of constraints on the shear-stress tensor”, *Eur. Phys. J. A* **57**, 294 [25 pages] (2021)
39. B. Kampfer, A.I. Titov, “Impact of laser polarization on q-exponential photon tails in nonlinear Compton scattering”, *Phys. Rev. A* **103**, 033101 [11 pages] (2021)
40. E. Nazarova, R. Akhat, M. Baznat, O. Teryaev, A. Zinchenko, “Monte Carlo Study of Lambda Polarization at MPD*”, Phys.Part. Nucl. Lett.,* **18**, 429-438 (2021)
41. A. I. Titov, U. Hernandez Acosta, and B. Kaempfer, “Positron energy distribution in a factorized trident process”, *Phys. Rev. A* **104** 062811 [9 pages] (2021)
42. Chernichenko Yu.D., Kaptari L.P. Solovtsova O.P., “Relativistic Coulomb S-factor of two spinor particles with arbitrary masses”, *Eur. Phys. J. Plus* **136**, 302 [17 pages] (2021)
43. A.S. Parvan, T. Bhattacharyya, “Remarks on the phenomenological Tsallis distributions and their link with the Tsallis statistics”, *J. Phys. A* **54**, 325004 [16 pages] (2021)
44. U. Hernandez-Acosta, A.I. Titov, B.Kampfer, “Rise and fall of laser-intensity effects in spectrally resolved Compton process”, *New Journal of Physics* **23**, 095008 [32 pages] (2021)
45. L.P. Kaptari, O.P. Solovtsova, Yu. Chernichenko, “Spin Effects in the Sommerfeld-Gamow-Sakharov Factor”, *Nonlinear Dynamics and Applications* 27, 101-113 (2021)
46. S.G. Bondarenko, V.V. Burov, S. Yurev, “Trinucleon form factors with relativistic multirank separable kernels”, *Nuclear Physics A* **1014**, 122251 [13 pages] (2021)
47. Abramov, B.M., Baznat, M., Borodin, Y.A., Bulychjov, S.A., Dukhovskoy, I.A., Krutenkova, A.P., Kulikov, V.V., Martemianov, M.A., Matsyuk, M.A., Turdakina, E.N., “Cumulative pi-Mesons in 12C + 9Be-Interactions at 3.2 GeV/Nucleon”, *Physics of Atomic Nuclei* **84**, 467-474 (2021)
48. L. V. Bravina, M. I. Baznat, Yu. B. Ivanov, E. E. Zabrodin, “Investigation of Vorticity, Directed Flow and Freeze-Out in A + A Collisions at Energies of the NICA Collider”, *Physics of Particles and Nuclei* **52**, 544-548 (2021)
49. В.В. Абрамов, А. Алешко, В.А. Басков, Э. Боос, В. Буничев, О.Д. Далькаров, Р. Эль-Холи, А. Галоян, А.В. Гуськов, В.Т. Ким, Е.С. Кокоулина, И.А. Кооп, Б.Ф. Костенко, А.Д. Коваленко, и др., “Возможные исследования на начальной стадии работы коллайдера NICA с поляризованными и неполяризованными пучками протонов и дейтронов”, ЭЧАЯ **52**, 1392-1529 (2021)
50. Л.П. Каптарь, Б. Кэмпфер, “Температурная зависимость пропагаторов глюонов и духов в подходе Дайсона-Швингенра в приближении радуги”, *Письма в ЖЭТФ* **114**, 579-585 (2021)
51. Titarenko Yu.E., Batyaev V.F., Pavlov K.V., Titarenko A.Yu. et al, 206,207,208,natPb(*p,x*)194Hg and 209Bi(p,x)194Hg excitation functions in the energy range 0.04–2.6 GeV”, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A* **1026**, 166151 [9 pages] (2022)
52. A.B. Larionov, “Color Transparency in pbar A Reactions”, *Physics* **4**, 294—300 (2022)
53. A.B. Arbuzov, S.G. Bondarenko, L.V. Kalinovskaya, L.A. Rumyantsev, V.L. Yermolchyk, “Electroweak effects in polarized muon-electron scattering”, *Phys. Rev. D* **105**, 033009 [14 pages] (2022)
54. D. Goderidze, A. Friesen, Yu. Kalinovsky, “Pion damping width and pion spectral function in hot pion gas”, *International Journal of Modern Physics A* **37**, 2250135 [11 pages] (2022)
55. A.S. Parvan, “Study of invariance of nonextensive statistics under the uniform energy spectrum translation”, *Physica A* **588**, 126556 [12 pages] (2022)
56. A. B. Larionov and L. von Smekal, “Effects of chiral symmetry restoration on meson and dilepton production in relativistic heavy-ion collisions”, *Phys. Rev. C*, **105**, 034914 [16 pages] (2022)

**2.3. Предполагаемый срок выполнения 2024-2028**

**2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ**

**ЛТФ в сотрудничестве с ЛЯР, ЛИТ, ЛФВЭ, ЛЯП**

**2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации**

**Приведено в предложении по продлению темы**

**3. Кадровое обеспечение**

**3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№№**  **п/п** | **Категория**  **работника** | **Основной персонал, сумма FTE** | **Ассоциированный персонал, сумма FTE** |
| 1. | научные работники | 11 | 0 |
| 2. | инженеры | 0 | 0 |
| 3. | специалисты | 0 | 0 |
| 4. | служащие | 0 | 0 |
| 5. | рабочие | 0 | 0 |
|  |  | **Итого: 11** | **0** |

**3.2. Доступные кадровые ресурсы**

**3.2.1. Основной персонал ОИЯИ, ЛТФ**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **№№**  **п/п** | **Категория работников** | **ФИО** | **Должность** | **FTE** |
| 1. | научные работники | Юрьев Сергей Александрович | н.с. | 100% |
| 2. |  | Доркин Сергей Михайлович | с.н.с. | 25% |
| 3. |  | Парван Александру | с.н.с. | 100% |
| 4. |  | Фризен Александра Вадимовна | с.н.с. | 100% |
| 5. |  | Базнат Мирча | в.н.с. | 100% |
| 6. |  | Каптарь Леонид Петрович | в.н.с. | 100% |
| 7. |  | Ларионов Алексей Борисович | в.н.с. | 100% |
| 8. |  | Лукьянов Валерий Константинович | г.н.с | 100% |
| 9. |  | Титов Александр Иванович | г.н.с | 100% |
| 10. |  | Тонеев Вячеслав Дмитриевич | г.н.с | 100% |
| 11. |  | Бондаренко Сергей Григорьевич | нач.сектора | 100% |
|  | **Итого:** | **10 чел. – основное место работы**  **1 чел. - совместители** |  |  |

**4. Финансовое обеспечение**

Проект будет финансироваться в рамках темы «Теория ядерных систем».



**Руководитель проекта \_\_\_\_\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_/**

Форма № 25

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ДИНАМИКА И НЕЛИНЕЙНЫЕ КВАНТОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

ТЕМА: «ТЕОРИЯ ЯДЕРНЫХ СИСТЕМ»

ФАМИЛИИ РУКОВОДИТЕЛЕЙ ПРОЕКТА: Бондаренко С.Г., Ларионов А.Б.



|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| УТВЕРЖДЕН ДИРЕКТОРОМ ОИЯИ | ПОДПИСЬ | ДАТА |
|  |  |  |
|  |  |  |
| СОГЛАСОВАНО |  |  |
|  |  |  |
| ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ОИЯИ | ПОДПИСЬ | ДАТА |
|  |  |  |
| ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ | ПОДПИСЬ | ДАТА |
|  |  |  |
| ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР | ПОДПИСЬ | ДАТА |
|  |  |  |
| ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ | ПОДПИСЬ | ДАТА |
|  |  |  |
| ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ | ПОДПИСЬ | ДАТА |
|  |  |  |
| РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА | ПОДПИСЬ | ДАТА |
|  |  |  |
| ЗАМ. РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА | ПОДПИСЬ | ДАТА |
|  |  |  |
| ОДОБРЕН |  |  |
|  |  |  |
| ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ | ПОДПИСЬ | ДАТА |