

Лаборатория методов ядерно-физических экспериментов МФТИ

Научный отчет за 2022 год

1. Исследования спектаторной материи, возникающей при столкновениях ядер в коллайдере NICA

Смоделировано образование спектаторной материи в ультрацентральных столкновениях релятивистских ядер с учётом особенностей их структуры. Исследовано влияние присутствия “нейтронной кожи” в ядре Pb-208 на сечения выхода спектаторных нейтронов. Кроме того, предсказан эффект обеднения спектаторной материи в ультрацентральных столкновениях при увеличении кинетической энергии сталкивающихся ядер [1].

Исследованы различные характеристики фрагментации ядер Pb-208 при столкновениях на высоких энергиях, такие как зависимость максимального заряда ядра-спектатора в событии и средней множественности спектаторов от суммарного заряда спектаторов, который коррелирует с центральностью события. Путем сравнения результатов моделирования столкновений ядер в экспериментах на LHC и SPS изучена эволюция этих зависимостей при увеличении начальной энергии столкновения. Также вычислены характеристики спектаторной материи, доступные для изучения в коллайдерных экспериментах по ядерно-ядерным столкновениям — число нейтронов и отношение числа нейтронов к числу протонов, вместе с их корреляциями с количеством нуклон-нуклонных столкновений [2].

С помощью ранее созданной модели Abrasion-Ablation Monte Carlo for Collider (AAMCC), которая описывает процесс образования спектаторных нуклонов и ядерных фрагментов-спектаторов, был промоделирован процесс столкновения тяжелых ядер с поверхностным нейтронным слоем. Показано, что в процессе столкновения с большим перекрытием ядер обогащенный нейтронами слой отделяется от горячей зоны. Протоны и нейтроны из этой “кожуры” могут быть отдельно зарегистрированы и подсчитаны в специальных передних детекторах, уже много лет используемых в эксперименте ALICE на Большом Адронном Коллайдере в ЦЕРН. Как следует из результатов моделирования, сечения образования определенного количества нейтронов одновременно с небольшим количеством протонов оказываются чувствительными к параметрам нейтронного слоя [3].

Состав спектаторной материи в столкновениях релятивистских ядер O-16 исследован с помощью модели AAMCC с учётом внутренней кластеризации в ядре кислорода. Показано, что распределение альфа-частиц по множественности чувствительно к наличию и вкладу кластеризованных состояний в ядре кислорода. На основе экспериментальных данных оценен вклад кластерных состояний в ядре кислорода. Результаты изложены в статье [4], принятой к публикации.

2. Сечения взаимодействия нейтрино с ядрами. Поиск безнейтринного двойного бета-распада Ge-76. Эксперимент GERDA.

В теории конечных ферми-систем рассчитана зарядово-обменная силовая функция для изотопов Mo-98,100. Также проанализированы экспериментальные силовые функции, полученные при анализе реакций (p, n) и (^3He , t). Показано, что резонансная структура силовой функции имеет решающее значение для расчета сечения и скорости захвата нейтрино ядрами [5].

Рассчитано сечение и скорость захвата солнечных нейтрино на ядре I-127 с учетом высоколежащих резонансных состояний (Гигантского Гамов-Теллеровского и пигми резонансов) в теории конечных ферми-систем. Учтено не только рождение Xe-127, но и стабильного Xe-126, при энергиях возбуждения выше энергии отрыва нейтрона. Показано, что сравнение экспериментальных значений для изотопов Xe-127 и Xe-126 может служить индикатором металличности для различных моделей потока солнечных нейтрино [6].

Выполнен апгрейд системы селекции выходных импульсов детекторов установки GERDA с использованием технологии “pulse shape analysis”. В результате в фазе II эксперимента GERDA при экспозиции 103,7 кг(Ge-76)×год подавление фоновых сигналов увеличилось в 5 раз по сравнению с фазой I. При этом система сохраняет $81 \pm 3\%$ полезных сигналов. В статье [7] описана модернизированная система селекции сигналов детектора установки GERDA и приведен исчерпывающий перечень параметров, которые были использованы при окончательном анализе данных эксперимента.

Исследовано влияние GT-резонансной структуры функции силы обмена зарядами в реакции $76\text{ Ge}(^3\text{He}, t)^{76}\text{As}$ на поперечное сечение захвата солнечных нейтрино. Показано, что учет GT-резонансов увеличивает скорость захвата солнечных нейтрино более чем на 20%. Теоретические функции прочности для ^{76}Ge и ^{74}Ge были рассчитаны в соответствии с рамками самосогласованной теории конечных систем Ферми. Эти результаты могли бы помочь разложить экспериментальную функцию силы и перечислить некоторые низколежащие состояния возбуждения и карликовые резонансы. Также в работе [8] продемонстрирована значительная роль эффекта закалки для расчетов поперечного сечения. Точный подсчет скорости захвата нейтрино может изменить оценки индекса фоновых событий в экспериментах по поиску двойного бета-распада типа GERDA и LEGEND.

3. Физика атмосферных разрядов

Впервые получено аналитическое описание физики лавин релятивистских убегающих электронов с учётом релятивистской позитронной обратной связи. Установлены условия, необходимые для формирования гамма-вспышек земного происхождения и молнии за счёт релятивистской позитронной обратной связи. Показано противоречие модели Relativistic Feedback Discharge Model (ранее предложенной американскими учеными) с данными наблюдений грозových облаков [9].

Для модели Дваера, описывающей динамику лавин убегающих электронов в атмосфере, получен критерий образования бесконечной обратной связи за счёт разворота тормозных гамма-квантов. В работе [10] показано, что для низких полей, которые преобладают в грозových облаках, вклад позитронной обратной связи выше вклада гамма-обратной связи.

4. Развитие информационной системы коллайдера NICA

Для решения задачи хранения необходимых параметров и информации об экспериментах NICA, необходимой для дальнейшей обработки полученных экспериментальных данных (а также смоделированных событий), была разработана информационная система на основе базы данных состояний [11]. Для удобного управления параметрами, хранящимися в унифицированной базе данных, реализовано веб-приложение для просмотра, поиска, управления и визуализации информации об экспериментах проекта NICA, такой как информация о сессиях и запусках, детекторах, параметрах и их значениях, а также информация о файлах с данными моделирования. Кроме того, разработанная информационная система предоставляет участникам совместной работы набор вспомогательных сервисов, включая сервисы проверки данных и мониторинга состояния, которые улучшают функциональность системы и делают ее более удобной.

В работе [12] показано, что система управления базами данных Apache Cassandra может быть использована в разрабатываемой системе метаданных физических событий в качестве каталога событий. Каталог событий служит для хранения и индексирования информации о событиях, полученных на установках NICA, что позволяет осуществлять быстрый поиск и использовать только необходимые записи по различным критериям для дальнейшей обработки и анализа. Установлено, что Cassandra обеспечивает приемлемую производительность и является возможным кандидатом для создания каталога событий в

NICA и подобных экспериментах. Сформулированы принципы создания объектов базы данных, в частности, выбора первичных ключей таблиц.

В работе [13] представлен обзор ландшафта исследования фазовой диаграммы КХД в области максимальной барионной плотности, где коллайдер NICA и установка MPD смогут внести значительный и уникальный вклад. В нем также содержится подробное описание настройки MPD, включая его различные подсистемы, а также его поддержку и вычислительные инфраструктуры. Отдельные исследования производительности для конкретных физических измерений в MPD представлены и обсуждаются в контексте существующих данных и теоретических ожиданий.

5. Развитие методики физического эксперимента

Разработан новый подход к системе дистанционного управления компактным многокристалльным энергодисперсионным спектрометром для приложений рентгеновской эмиссионной спектроскопии. Этот новый подход основан на асинхронной связи между программными компонентами и принципах реактивного проектирования. Разработан новый целостный коммуникационный протокол, который может быть применен для управления различными аппаратными компонентами, обеспечивая как независимую работу, так и простую интеграцию в различные системы SCADA [14].

Для крупномасштабных экспериментов следующего поколения в области астрофизики физики элементарных частиц был разработан новый жидкий сцинтиллятор с высокой светоотдачей на основе линейного алкилбензола (LAB) в качестве органического растворителя и нового наноструктурированного кремнийорганического люминофора в качестве сцинтилляционного фтора. Показано, что разработанный жидкостный сцинтиллятор имеет световой выход почти в два раза выше, чем традиционный лабораторный жидкостный сцинтиллятор с PPO fluor, при сравнении пиковых значений светового выхода, поскольку первый достигает максимума при 490 нм, а второй - при 360 нм. В то же время, кинетика излучения света характеризуется постоянной времени затухания около 10 нс для его самого быстрого компонента, который вносит более 80% в общий световой выход сцинтиллятора [15].

Построена вычислительная платформа для решения задач в сфере мюонной томографии (мюонографии), для чего были использованы технологии машинного обучения. Развита принципиально новый подход к симуляциям прохождения частиц через материю, основанный на принципах дифференцированного программирования и алгоритмах, ускоряющихся на GPU архитектурах. Платформа может быть применена в сфере экологии и охраны окружающей среды, для таких приложений, как мониторинг подземных хранилищ углекислого газа, шахт, последствий гидроразрыва и многих других. Результаты частично опубликованы в [16], к печати готовится новая статья.

Создана экспериментальная установка для изучения комптоновского рассеяния запутанных и декогерентных аннигиляционных гамма-квантов [17]. Это гамма-излучение рождается в результате двухфотонной позитронно-электронной аннигиляции. Поляризации аннигиляционных гамма-квантов взаимно ортогональны, а поляризация каждого фотона неопределенна. Если один из фотонов пары взаимодействует с веществом, пара становится декогерентной и фотоны приобретают определенные состояния поляризации. Кинематика комптоновского рассеяния зависит от состояний поляризации и может быть различной для запутанных и декогерентных пар аннигиляционных фотонов. Были измерены и сравнены угловые корреляции рассеянного гамма-излучения как для запутанного, так и для декогерентного состояний. Показано, что кинематика комптоновского рассеяния одинакова для обоих случаев [18].

Публикации ЛМЯФЭ в 2022 году

1. Pshenichnov, I.A., Kozyrev, N.A., Svetlichnyi, A.O., Dmitrieva, U.A. - "What One Can Learn by Studying Spectator Remnants in Central Nucleus–Nucleus Collisions?", *Physics of Particles and Nuclei* 53(2), pp. 335–341 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1063779622020691>
2. Svetlichnyi, A., Nepeivoda, R., Pshenichnov, I. - Study of Nuclear Fragmentation at Heavy Ion Colliders, *Physics of Particles and Nuclei* 53(2), pp. 612–620 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1063779622020800>
3. Kozyrev, N., Svetlichnyi, A., Nepeivoda, R. et al. - Peeling away neutron skin in ultracentral collisions of relativistic nuclei, *Eur. Phys. J. A* 58, 184 (2022). <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00832-5>
4. Svetlichnyi, A., Savenkov, S., Nepeivoda, R., Kozyrev, N., Pshenichnov, I. - Smoking gun of nuclear clusterization in collisions of light relativistic nuclei, *Phys. of Atomic Nucl.* 86 (2022), принято к публикации.
5. Lutostansky, Y.S., Koroteev, G.A., Lutostansky, A.Y., ... Tikhonov, V.N., Fazliakhmetov, A.N. - Resonance Structure of the Charge-Exchange Strength Function for the Molybdenum Isotopes 98,100 Mo, *Physics of Atomic Nuclei*, 85(3), pp. 231–240 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1063778822030127>
6. Lutostansky, Y.S., Fazliakhmetov, A.N., Koroteev, G.A., ... Osipenko, A.P., Tikhonov, V.N. - New prospects for iodine detector and Solar neutrinos registration, *Physics Letters*, B 826, 136905 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2022.136905>
7. GERDA Collaboration: M. Agostini et al (incl. L.V. Inzhechik) - Pulse shape analysis in Gerda Phase II, *Eur.Phys.J.C* 82, 284 (2022). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10163-w>
8. L.V. Inzhechik, G.A. Koroteev, Yu.S. Lutostansky, and A.N. Fazliakhmetov. Unremovable neutrino induced background index for GERDA-like experiments. Статья принята к публикации в журнал *Ядерная физика*, ориентировочно выйдет из печати в декабре 2022 года.
9. Stadnichuk, E., Svechnikova, E. - The criterion for self-sustaining production of relativistic runaway electron avalanches by the positron feedback in thunderstorms, *Atmospheric Research* 277, 106329 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106329>
10. Седельников, А.С., Землянская, Д.И., Стадничук, Е.М. - “Критерий бесконечной гамма обратной связи в модели Дваера”, *Ученые записки физического факультета МГУ*, Выпуск 4, 2240502 (2022). <http://uzmu.phys.msu.ru/abstract/2022/4/2240502>
11. Chebotov, A., Gertsenberger, K., Klimai, P., Moshkin, A. - Information System Based on the Condition Database for the NICA Experiments, User WEB Application, and Related Services, *Phys.Part.Nucl.Lett.* 19, 558-561 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1547477122050132>
12. Degtyarev, A., Gertsenberger, K., Klimai, P. - Usage of Apache Cassandra for Prototyping the Event Metadata System of the NICA Experiments, *Phys.Part.Nucl.Lett.* 19, 562-565 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1547477122050144>
13. Abgaryan, V. et al (incl. Strizhak, A.) - Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA, *European Physical Journal A* 58(7), 140 (2022). <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00750-6>
14. Khokhriakov, I., Merkulova, O., Nozik, A., Fromme, P., Mazalova, V. - A novel solution for controlling hardware components of accelerators and beamlines, *Journal of Synchrotron Radiation* 29, pp. 644–653 (2022). <https://doi.org/10.1107/S1600577522002685>
15. Sidorenkov, A., Borshchev, O., Fazliakhmetov, A., et al - Characterization of a high light yield liquid scintillator with a novel organosilicon fluor developed for astroparticle physics experiments, *European Physical Journal C* 82(11), 1038 (2022). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-11017-1>

16. Grinis, R. Differentiable Programming for Particle Physics Simulations, Journal of Experimental and Theoretical Physics 134(2), pp. 150–156 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1063776122020042>
17. Abdurashitov, D. et al (incl. Strizhak, A.) - Setup of Compton polarimeters for measuring entangled annihilation photons, Journal of Instrumentation 17(3), P03010 (2022).
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/03/P03010>
18. Strizhak, A., Abdurashitov, D., Baranov, A., Ivashkin, A., Musin, S. - Study of the Compton Scattering of Entangled Annihilation Photons, Physics of Particles and Nuclei Letters 19(5), pp. 509–512 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1547477122050405>