

Лаборатория методов ядерно-физических экспериментов МФТИ

Научный отчет за 2023 год

1. Поиск безнейтринного двойного бета-распада Ge-76. Эксперимент GERDA.

В 2023 году продолжались работы по обработке данных эксперимента GERDA по поиску безнейтринного двойного бета-распада Ge-76 в рамках международной коллаборации GERDA.

Симулировалась аппаратная функция системы активной защиты сборки германиевых детекторов высокой чистоты от фонов путем регистрации сцинтилляций в жидком аргоне, в который погружены детекторы — «жидкоаргоновое veto». Определена эффективность светосбора и уточнена интегральная эффективность этой компоненты комплекса защиты детекторов от фона [1].

Проведен поиск сигналов детекторов установки GERDA, которые можно интерпретировать как свидетельство трехнуклонных распадов ядра Ge-76 — ppp -, ppn -, и pnp -распады, которые приводят к образованию ядер Cu-73, Zn-73 и Ga-73. Отсутствие сигналов трехнуклонных распадов позволило установить верхний предел на период полураспада этих процессов, равный 1.2×10^{26} лет (90%) [2].

Выполнен итоговый анализ собранной статистики эксперимента GERDA по двухнейтринным двойным бета-распадам Ge-76. Получено самое точное в мире значение периода полураспада ядра Ge-76 по этому каналу, равное $[2,022 \pm 0,018 \text{ (стат. ошибка)} \pm 0,038 \text{ (сист. ошибка)}] \times 10^{21}$ лет. Из этой величины получено эффективное значение ядерного матричного элемента ядра Ge-76, соответствующего его двухнейтринному распаду, оно получилось равным 0.101 ± 0.001 . Полученный результат позволяет считать эксперимент GERDA одним из самых точных экспериментов по исследованию двойных бета-распадов ядер [3].

2. Исследования спектаторной материи, возникающей при столкновениях ядер в коллайдерах NICA и БАК

Новая версия модели Abrasion-Ablation Monte Carlo for Colliders (AAMCC), учитывающая наличие альфа-кластерных состояний, использована для моделирования столкновений ядер O-16–O-16 на Большой Адронном Коллайдере. Выходы ядер-спектаторов He, Li, Be, B, C и N рассчитаны с учетом предравновесной кластеризации спектаторной материи, внутриядерной альфа-кластеризации и короткодействующих нуклон-нуклонных корреляций в O-16. Исследовано влияние альфа-кластеризации и короткодействующих нуклон-нуклонных корреляций на образование спектаторных нейтронов и дейтронов. Полученные результаты могут помочь в оценке эффективности калориметров нулевого угла в будущих исследованиях столкновений ядер O-16 на БАКе [4].

В той же модели, на основе трех различных параметризаций плотности кластеров, были вычислены распределения зарядов ядерных фрагментов-спектаторов и распределения множественности ядер-спектаторов и спектаторных альфа-частиц. Из сравнения расчетов с экспериментальными данными показано, что вклад кластерных состояний находится на уровне 30% [5].

Модель AAMCC использована для изучения характеристик спектаторной материи в центральных столкновениях релятивистских ядер ^{238}U , чувствительных к взаимной ориентации и степени деформации сталкивающихся ядер. Показано, что детектирование нейтронов-спектаторов при столкновениях релятивистских деформированных ядер в эксперименте может быть использовано для изучения степени их деформации и выбора столкновений определенной ориентации [6].

Были промоделированы столкновения релятивистских ядер Pb-208–Pb-208 при энергиях коллайдера NICA с помощью модели AAMCC и гибридной модели UrQMD-AMC, использующей UrQMD как генератор столкновений ядер и модели вторичных распадов, используемых в модели AAMCC [7, A]. Исследовано влияние параметров модели столкновений на формирование спектаторной материи [B].

3. Расчеты сечений захвата солнечных нейтрино ядрами

Проведены расчеты сечений захвата солнечных нейтрино ядрами молибдена-100. В расчетах использованы как экспериментальные данные по силовой функции $S(E)$, полученные в реакциях перезарядки (He-3, t), так и функции $S(E)$, рассчитанные в рамках самосогласованной теории конечных ферми-систем. Изучено влияние резонансной структуры $S(E)$ на расчетное сечение захвата солнечных нейтрино и определен вклад каждого резонанса в сечение захвата ядром Mo-100. Рассчитан вклад всех компонент спектра солнечных нейтрино. Оценен вклад фоновых солнечных нейтрино в двойной бета-распад ядер Mo-100 [8].

На примере ядра I-127 проведены сравнения различных вариантов расчета функции Ферми и ее влияние на сечение захвата нейтрино. В частности, изучены эффекты размера ядра и распределения заряда в нем. Рассчитаны сечения захвата солнечных нейтрино, при этом вклады всех компонент спектра солнечных нейтрино в скорость нейтринного захвата анализируются для пяти различных вариантов функции Ферми. Показано, что в зависимости от подхода, использованного при расчете функции Ферми, разница в скорости захвата нейтрино достигает 15% [9].

Изучены силовые функции перезарядки $S(E)$ для изотопов Te-128 и Te-130. Проанализированы экспериментальные данные по $S(E)$, полученные из (He-3, t) реакций, а также рассчитанные в рамках микроскопической теории конечных ферми-систем. Исследована резонансная структура силовой функции, что имеет важное значение для расчета и анализа процесса захвата нейтрино атомными ядрами [10].

4. Развитие методики физического эксперимента

Проведено новое экспериментальное исследование квантовой запутанности пар фотонов, образующихся при позитрон-электронной аннигиляции в состоянии покоя. В таком эксперименте каждый аннигиляционный фотон имеет энергию, на пять порядков превышающую энергию фотонов в подобных оптических экспериментах. Это дает уникальную возможность контролируемого комптоновского предварительного рассеяния исходных фотонов перед поляризационными измерениями. Используемая экспериментальная установка включает систему комптоновских поляриметров для измерения угловых корреляций аннигиляционных фотонов в исходных и таким образом подготовленных предварительно рассеянных состояниях. Впервые проведено прямое сравнение поляризационных корреляций начальных и предварительно рассеянных аннигиляционных фотонов. Угловые распределения рассеянных в поляриметрах фотонов оказались одинаковыми для обоих типов событий. Более того, было показано, что корреляционная функция в неравенстве Белла также одинакова для обоих состояний. Полученные результаты имеют значение для квантовой теории измерений и квантово-запутанной позитронно-эмиссионной томографии [11].

Диффузионно-упорядоченная спектроскопия (DOSY) — основанный на ЯМР метод для анализа жидких смесей. Его ключевое преимущество заключается в способности предоставлять информацию о составе смеси и коэффициентах диффузии компонентов. В работе [12] предложен метод выбора модели, основанный на байесовских информационных критериях для оценки количества компонентов в смеси во время анализа DOSY-данных. Поскольку точность этого метода зависит от эффективности оценщиков параметров, были исследованы производительность

оценщиков взвешенных наименьших квадратов (WLS) и апостериорного максимума (MAP). Метод WLS, дополненный тщательно настроенной L2-регуляризацией, позволяет эффективно определять компоненты смеси, когда разница в коэффициентах самодиффузии превышает фактор 2, особенно когда компонент с меньшим коэффициентом имеет большее весовое отношение. Метод MAP, подкрепленный обширной базой априорной информации, показывает лучшую точность, снижая этот порог до 1.5 раз. Оба оценщика дают оценки весового соотношения со стандартными отклонениями около 1%, хотя метод MAP имеет тенденцию переоценивать компонент с большим коэффициентом самодиффузии. Отклонения от ожидаемых значений могут превышать 10%, часто из-за неточностей в определении компонентов. Оценки ошибок определяются с использованием методов повторной выборки данных, полученных на основе крупномасштабного эксперимента с 1000 точками и дополнительных пяти измерений однокомпонентной смеси. Подход, использованный в этой работе, позволил детально изучить характеристики распределения данных, что может быть использовано для дальнейшего совершенствования метода.

Создание энергоэффективных и высокопроизводительных биореакторов требует развития методов оценки ключевых параметров процесса биосинтеза. При большом разнообразии подходов и методов определения площади контакта фаз в газожидкостных потоках вопрос о получении ее точной количественной оценки остается открытым. Особенно актуальными являются вопросы мгновенного получения информации о коэффициентах массоотдачи, а также развития прогностических возможностей для реализации эффективного управления потоками при непрерывной ферментации как в лабораторных, так и в промышленных масштабах. В работе [13] классические и неклассические методы компьютерного зрения были применены к результатам высокоточной видеозаписи пузырьковых потоков, полученных в ходе экспериментов в сосуде биореактора. Характеристики пузырькового потока биореактора сначала оценивались с помощью классических методов компьютерного зрения, включая подход эллиптической регрессии для выбора и кластеризации границ одиночных пузырьков, трансформацию изображения с помощью набора фильтров и разработку алгоритма разделения перекрывающихся пузырьков. Применение разработанного метода для всей видеосъемки позволяет получить распределения параметров и установить пороги отсева для получения лучших оценок за счет усреднения. Разработанная методология дополнительно была протестирована и проверена на собранном и размеченном вручную наборе данных. Также был применен подход с использованием глубоких нейронных сетей, который продемонстрировал определенные преимущества с точки зрения высокого разрешения сегментации. При этом классический подход имеет тенденцию быть более быстрым. На основе полученных результатов разработан подход к методике оценки коэффициента массоотдачи.

5. Эксперимент BM@N и развитие информационных систем мегапроекта NICA

BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) – эксперимент с фиксированной мишенью, проводимый в рамках мегапроекта NICA. В работе [14] представлены первые физические результаты BM@N по образованию π^+ - и K^+ -мезонов при взаимодействии пучка аргона с неподвижными мишенями из углерода, алюминия, меди, олова и свинца при энергии 3,2 ГэВ на нуклон. Измерены распределения по поперечному импульсу, спектры быстрот и множественности π^+ - и K^+ -мезонов.

Система метаданных событий (EMS), разработанная для BM@N [15], используется для хранения и индексирования записей событий столкновений частиц, полученных на установке BM@N. Система позволяет быстро осуществлять поиск необходимого набора физических событий по различным заданным критериям для дальнейшего физического анализа. В работе [16] описываются разработанные для EMS пользовательский веб-интерфейс и интерфейс прикладного программирования REST API. Интерфейсы были разработаны с использованием

мультиплатформенной технологии Kotlin, благодаря чему как все компоненты веб-сервиса (frontend и backend) являются частями одного проекта, использующего один и тот же язык программирования и общую кодовую базу.

Единая база данных условий эксперимента BM@N (называемая UniConDa) используется в качестве центрального хранилища метаданных эксперимента и различных параметров, включая информацию о сеансах и пусках, параметры детекторов и подсистем и описания сгенерированных файлов со смоделированными событиями столкновений частиц. Для эффективной работы с базой данных в существующей программной среде эксперимента необходим набор различных инструментов и сервисов. Разработан программный инструмент под названием Smart Data Parser, осуществляющий перенос информации о состоянии из существующих файлов текстовых форматов ASCII, CSV и XML в Единую базу данных условий [17].

Кроме того, для эксперимента BM@N ведется разработка системы визуализации следующего поколения [E].

6. Искусственный интеллект для борьбы с климатическими изменениями

Проведена разработка новых технологий искусственного интеллекта и машинного обучения (МО) для борьбы с вызовами, которые возникают в связи с глобальными климатическими изменениями. С этой целью, внедряя дифференцируемое программирование (ДП) в классические вычисления квантовой химии, были созданы новые эффективные алгоритмы для поиска материалов, которые можно использовать для захвата парниковых газов [18].

С помощью МО и метода выборки по важности, базируясь на тестовых данных, разработан эффективный алгоритм поиска оптимальной стратегии использования источников возобновляемой энергии [19]. На основе применения комбинации МО и классических моделей климата разработан подход, позволяющий получить более точные предсказания возникновения экстремальных природных явлений [20 – 22].

7. Физика лавин в атмосфере

Релятивистские лавины убегающих электронов, развивающиеся в наэлектризованных облаках, производят гамма-излучение, которое можно наблюдать как на поверхности Земли, так и на околоземной орбите. Радиоизлучение таких лавин является гораздо менее изученным проявлением лавинного процесса. Между тем, излучение сверхвысокой частоты может быть использовано как дополнительный источник информации об условиях развития лавины. В работе [23, F] представлен метод расчета радиосигнала, создаваемого релятивистскими лавинами убегающих электронов, с использованием Монте-Карло моделирования и программного пакета GEANT4. Показано, что излучение убегающих электронов имеет максимум в диапазоне частот 0,1-1 МГц, при этом амплитуда сигнала ниже уровня фонового шума.

Публикации ЛМЯФЭ в 2023 году

1. M. Agostini et al. [incl. L.V. Inzhechik]. Liquid argon light collection and veto modeling in GERDA Phase II // Eur.Phys.J.C 83 (2023) 4, 319. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-11354-9>
2. M. Agostini et al. [incl. L.V. Inzhechik]. Search for tri-nucleon decays of ^{76}Ge in GERDA // Eur.Phys.J. C 83 (2023) 9, 778. <http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-11862-8>
3. M. Agostini et al. [incl. L.V. Inzhechik]. Final Results of GERDA on the Two-Neutrino Double- β Decay Half-Life of ^{76}Ge // Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 14, 142501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.142501>

4. A. Svetlichnyi, S. Savenkov, R. Nepeivoda, I. Pshenichnov. Clustering in Oxygen Nuclei and Spectator Fragments in ^{16}O – ^{16}O Collisions at the LHC // *Physics* 2023, 5(2), 381–390.
<https://doi.org/10.3390/physics5020027>
5. A. Svetlichnyi, S. Savenkov, R. Nepeivoda, N. Kozyrev, I. Pshenichnov. Smoking Gun of Nuclear Clusterization in Collisions of Light Relativistic Nuclei // *Phys. Atom. Nuclei* 85, 958–964 (2022). (Published 14 March 2023) <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063778823010556>
6. N. Kozyrev, A. Svetlichnyi, R. Nepeivoda, I. Pshenichnov. Spectator Matter in Collisions of Relativistic Deformed Nuclei // *Phys. Part. Nuclei* 54, 605–612 (2023).
<https://link.springer.com/article/10.1134/S1063779623040214>
7. С.Д.Савенков, Р.С.Непейвода, А.О.Светличный, И.А.Пшеничнов. Моделирование образования спектаторных фрагментов в ^{208}Pb – ^{208}Pb -столкновениях в эксперименте MPD на коллайдере NICA // *Труды 65-й Всероссийской научной конференции МФТИ в честь 115-летия Л. Д. Ландау, Фундаментальная и прикладная физика*, М.: Физматкнига, 2023. С. 415–416.
8. Yu. S. Lutostansky, G. A. Koroteev, A. Yu. Lutostansky, A. P. Osipenko, V. N. Tikhonov, A. N. Fazliakhmetov. Resonance Structure of the Neutrino-Capture Cross Section and Double Beta Decay of Mo-100 Nuclei // *Phys. Part. Nuclei* 54, 436–440 (2023).
<https://doi.org/10.1134/S1063779623030206>
9. A. N. Fazliakhmetov, Yu. S. Lutostansky, G. A. Koroteev, A. P. Osipenko, V. N. Tikhonov. Influence of the Fermi Function on the Neutrino Capture Cross Section // *Phys. Part. Nuclei* 54, 547–551 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1063779623030139>
10. A. N. Fazliakhmetov, Yu. S. Lutostansky, B. K. Lubsandorzhiev, G. A. Koroteev, A. Yu. Lutostansky, V. N. Tikhonov. Structure of the Charge-Exchange Strength Function of Tellurium Isotopes 128 and 130 // *Phys. Atom. Nuclei* 86, 736–741 (2023).
<https://doi.org/10.1134/S1063778823050162>
11. A. Ivashkin, D. Abdurashitov, A. Baranov, F. Guber, S. Morozov, S. Musin, A. Strizhak, I. Tkachev. Testing entanglement of annihilation photons // *Sci Rep* 13, 7559 (2023).
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-34767-8>
12. V. Palmin, A. Mukhin, V. Ivanova, A. Perepukhov, A. Nozik. Automated component analysis in DOSY NMR using information criteria // *Journal of Magnetic Resonance*, 355, 107541 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.jmr.2023.107541>
13. I. Nizovtseva, V. Palmin, I. Simkin, I. Starodumov, P. Mikushin, A. Nozik, T. Hamitov, S. Ivanov, S. Vikharev, A. Zinovev, V. Svitich, M. Mogilev, M. Nikishina, S. Kraev, S. Yurchenko, T. Mityashin, D. Chernushkin, A. Kalyuzhnaya, F. Blyakhman. Assessing the Mass Transfer Coefficient in Jet Bioreactors with Classical Computer Vision Methods and Neural Networks Algorithms // *Algorithms* 16(3), 125 (2023). <https://doi.org/10.3390/a16030125>
14. The BM@N collaboration [incl. P. Klimai]. Production of π^+ and K^+ mesons in argon-nucleus interactions at 3.2 A GeV // *J. High Energ. Phys.* 2023, 174 (2023).
[https://doi.org/10.1007/JHEP07\(2023\)174](https://doi.org/10.1007/JHEP07(2023)174)
15. E. Alexandrov, I. Alexandrov, A. Chebotov, A. Degtyarev, I. Filozova, K. Gertsenberger, P. Klimai, A. Yakovlev. Implementation of the Event Metadata System for physics analysis in the NICA experiments // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2438 012046 (2023). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2438/1/012046>
16. A. Chebotov, A. Degtyarev, K. Gertsenberger, P. Klimai. REST API and Web Interface for the Event Metadata System of the BM@N Experiment // *Phys. Part. Nuclei Lett.* 20, 1527–1530 (2023).
<https://doi.org/10.1134/S1547477123060092>
17. K. Gertsenberger, P. Klimai, M. Zelenyi. Auxiliary Services for the Condition Database of the BM@N Experiment at NICA // *Phys. Part. Nuclei Lett.* 20, 1217–1219 (2023).
<https://doi.org/10.1134/S1547477123050291>

18. E. Kadilenko, R. Grinis. Adjoint Sensitivity Method for Kohn-Sham Equations // препринт <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2023-jp112-v2>
19. A. Lukashevich, A. Bulkin, R. Grinis, I. Makarov, Y. Maximov. Importance Sampling Approach for Dynamic Stochastic Optimal Power Flow Control // препринт <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.02509>
20. M. Mozikov, I. Makarov, A. Bulkin, D. Taniushkina, R. Grinis, Y. Maximov. Accessing Convective Hazards Frequency Shift with Climate Change using Physics-Informed Machine Learning // препринт <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.03180>
21. V. Shevchenko, D. Taniushkina, A. Lukashevich, A. Bulkin, R. Grinis, K. Kovalev, V. Narozhnaia, N. Sotiriadi, A. Krenke, Y. Maximov. Climate Change Impact on Agricultural Land Suitability: An Interpretable Machine Learning-Based Eurasia Case Study // препринт <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.15912>
22. V. Shevchenko, A. Lukashevich, A. Bulkin, R. Grinis, K. Kovalev, V. Narozhnaia, N. Sotiriadi, A. Krenke, Y. Maximov. Climate Change and Future Food Security: Predicting the Extent of Cropland Gain or Degradation // препринт <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.03261>
23. T. Khamitov, E. Svechnikova, M. Zelenyi, A. Nozik. Simulation of VHF signal generated by avalanche of relativistic runaway electrons // Proceedings Volume 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics; 127807H (2023). <https://doi.org/10.1117/12.2690870>

Доклады ЛМЯФЭ в 2023 году

- A. С.Д. Савенков, Р.С. Непейвода, А.О. Светличный, И.А. Пшеничнов. "Моделирование образования спектаторных фрагментов в 208Pb–208Pb столкновениях в эксперименте MPD на коллайдере NICA". 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 3-8 апреля 2023. https://old.mipt.ru/upload/medialibrary/97c/Ifi-978_5_89155_387_3.pdf
- B. A. Svetlichnyi, R. Nepeivoda, S. Savenkov, I. Pshenichnov. "Participant and spectator nucleons: GlauberMC vs UrQMD" MPD Cross-PWG Meeting, 14 ноября 2023. <https://indico.jinr.ru/event/4125>
- C. A. Strizhak, A. Ivashkin. "Energy calibration of Forward Hadron Calorimeter at MPD with cosmic muons". XXV International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems 18-13 September 2023, Dubna, Russia. <https://indico.jinr.ru/event/3694/contributions/22487/>
- D. Стрижак А.О. Баранов А. Г. "Криогенный сцинтилляционный детектор нейтрино со сверхнизким энергетическим порогом." Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023». 10-21 апреля 2023. <https://lomonosov-msu.ru/rus/event/8000/>
- E. E. Blinova, K. Gertsenberger, P. Klimai, A. Nozik. "Development of Next-Generation Event Visualization Platform for the BM@N Experiment". The XXVII International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2023), 29 Oct – 3 Nov 2023, Dubna, Russia. <https://indico.jinr.ru/event/3792/contributions/23168/>
- F. T. Khamitov, E. Svechnikova, M. Zelenyi, A. Nozik. "Simulation of VHF signal generated by avalanche of relativistic runaway electrons". 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 17 October 2023.