

# Лаборатория методов ядерно-физических экспериментов МФТИ

## Научный отчет за 2024 г.

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

В 2024 году продолжались работы по обработке данных эксперимента GERDA по поиску безнейтринного двойного бета-распада Ge-76 в рамках международной коллаборации GERDA.

Выполнена обработка массива данных сигналов системы «аргонного вето» установки GERDA, которая регистрирует сцинтилляции в жидком аргоне. Жидкий аргон, содержащийся в 60 м<sup>3</sup> криостате, содержит 0,33% Ar-36, который является кандидатом в изотопы, претерпевающие безнейтринный двойной электронный захват. Отсутствие в данных эксперимента GERDA сигналов, соответствующих этому процессу, позволило установить верхний предел для периода полураспада Ar-36 по этому каналу, равный  $1,5 \times 10^{22}$  лет (90%) [1].

С использованием данных, собранных в ходе фазы II эксперимента GERDA выполнен поиск полных энергетических выделений от бозонных кандидатов на роль темной материи с массами от 65 до 1021 кэВ. При анализе учитывалось прямое поглощение темной материи, а также темное комптоновское рассеяние. При общей экспозиции 105.5 кг лет не было обнаружено никаких доказательств наличия сигнала выше фона. Полученные пределы, выведенные с помощью байесовской или частотной статистики, являются наиболее строгими прямыми ограничениями в большей части диапазона масс 140–1021 кэВ. Кроме того, проведен поиск пикоподобных сигналов от распадов нуклонов и электронов вследствие процессов за рамками Стандартной модели [2].

### 2. Новые технологии искусственного интеллекта для решения проблем продовольственной безопасности

Разработаны программные библиотеки для численных расчетов, позволяющие интегрировать алгоритмы машинного обучения в классические модели вычислительной физики. Результаты могут быть использованы для борьбы с вызовами, возникающими в связи с глобальными климатическими изменениями.

В опубликованной статье [3] рассмотрена глобальная проблема продовольственной безопасности в условиях влияния изменений климата на пригодность сельскохозяйственных земель. Цель исследования - прогнозирование рисков, связанных с

ухудшением пригодности земель и изменениями в схемах орошения, напрямую влияющих на продовольственную безопасность. Для анализа влияния изменения климата на пригодность сельскохозяйственных земель при различных сценариях выбросов углерода были использованы интерпретируемые методы машинного обучения. Разработанная модель продемонстрировала высокую производительность при решении задачи классификации пригодности земель по нескольким классам. Результаты исследования важны для стратегического планирования, включая распределение критически важных ресурсов, таких как вода и удобрения, что необходимо для предотвращения гуманитарных кризисов. Результаты показывают, что машинное обучение может стать мощным инструментом прогнозирования и управления воздействием изменений климата на продовольственную безопасность.

### 3. Развитие методики физического эксперимента

В 2024 году продолжено 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.

В статье [4] рассмотрены конструкция и параметры сцинтилляционных детекторов комптоновских поляриметров, используемых для изучения свойств фотонов, образующихся при аннигиляции покоящихся электрон-позитронных пар. Рассматриваемая в работе установка позволяет измерять и сравнивать поляризационные корреляции рассеянных аннигиляционных фотонов. Приведены амплитудные параметры рассеивателей и детекторов рассеянных фотонов, полученные в результате предварительных испытаний детекторов с использованием радиоактивных гамма-источников, а также в процессе набора экспериментальных данных. Показана возможность измерения и сравнения поляризационных корреляций рассеянных аннигиляционных фотонов.

Сотрудниками Лаборатории в 2024 году также были проведены работы по расчетам распространения света в сцинтилляционных детекторах. Детекторы элементарных частиц с непрерывным сцинтиллятором и матрицей фотоумножителей широко используются в современной экспериментальной физике и различных медицинских томографах. Существует два распространенных способа расчета координат сцинтилляционной вспышки через выход энергии фотоумножителей: метод Энгера и моделирование Монте-Карло. В работе [5] выведено аналитическое решение для расчета выходной энергии от нескольких фотоумножителей, встроенных в нижнюю грань сцинтилляционной камеры с непрерывным сцинтиллятором в форме прямоугольного параллелепипеда. Аналитическое решение при этом используется в качестве опорной точки для реконструкции координат

сцинтилляционной вспышки. Достигнутые результаты аналогичны тем, которые дает моделирование Монте-Карло, но требуют меньшего времени вычислений.

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

Проведено моделирование эмиссии спектаторных нейтронов и протонов в ультрацентральных столкновениях ядер Bi с теми же (Bi) или более легкими (W, Cu) ядрами-мишенями [6]. Для расчетов использовалась модель Abrasion-Ablation Monte Carlo for Colliders с MST-кластеризацией (AAMCC-MST). Было показано, что обнаружение прямых нейтронов и протонов в таких столкновениях позволяет анализировать отношение числа нейтронов и протонов на периферии ядра. Были рассчитаны сечения образования заданного числа нейтронов-спектаторов, а также среднее число спектаторных нейтронов и протонов в ультрацентральных столкновениях. Вычисления проведены как с учетом, так и без учета наличия “нейтронной кожи” ядра Bi. Было найдено, что отношение среднего числа спектаторных нейтронов к числу спектаторных протонов особенно чувствительно к наличию “нейтронной кожи” в столкновениях Bi-W, что может в будущем помочь подтвердить обогащение поверхности ядра нейтронами. Показано также, что для столкновений Bi-Cu такой чувствительности нет.

В ультрапериферических столкновениях релятивистских ядер распределения ядерной плотности не перекрываются, а взаимодействия происходят посредством сжатых по Лоренцу кулоновских полей. Это приводит к электромагнитной диссоциации ядер фотонами Вайцзеккера-Вильямса. В работе [7] модель RELDIS была использована для симуляции электромагнитной диссоциации ядер Bi-209 и Xe-124 в эксперименте MPD проекта NICA, с фокусом на испускание нейтронов и протонов в столкновениях Bi-209-Bi-209 (в коллайдерных экспериментах) и Xe-124-W-184 (в экспериментах с фиксированной мишенью). Эти результаты имеют важное значение для понимания потенциального загрязнения обнаруженных адронных событий событиями электромагнитной диссоциации. Дополнительно была смоделирована электромагнитная диссоциация Xe-124 в ультрапериферических столкновениях с мишенью CsI на эксперименте BM@N. Отмечено, что моноэнергетический нейтронный пучок, получаемый в результате электромагнитной диссоциации на установке BM@N может использоваться для калибровки детекторов и радиобиологических исследований.

#### 5. Разработка программных систем для физических экспериментов

Разработана новая система визуализации событий для эксперимента BM@N NICA, в том числе новый пользовательский веб-интерфейс с функциями отображения геометрии детекторов и зарегистрированных событий. Решение основано на VisionForge,

современной системе визуализации с открытым исходным кодом. Важной частью решения является интеграция системы с программным фреймворком эксперимента BmnRoot, который является средой, основанной на программном пакете CERN ROOT. Для корректного взаимодействия двух систем была разработана специальная промежуточная серверная компонента, транслирующая модель данных CERN ROOT в модель VisionForge. В работе [8] описывается архитектура созданной системы визуализации и приводятся примеры ее использования.

## 6. Расчеты сечений захвата солнечных нейтрино ядрами

Для интерпретации экспериментальных данных и планирования экспериментов нового поколения необходимо рассчитывать взаимодействия нейтрино с веществом детектора [9, 10]. Исследован процесс взаимодействия нейтрино с ядрами теллура с учетом влияния зарядово-обменных резонансов. Рассчитаны сечения захвата солнечных нейтрино изотопами Te-128 и Te-130. Использовались как экспериментальные данные по силовым функциям, полученные в зарядово-обменной реакции ( $He-3, t$ ), так и функции, рассчитанные в рамках микроскопической теории конечных Ферми-систем. Исследовалось влияние резонансной структуры силовой функции на рассчитываемые сечения захвата солнечных нейтрино и выделены вклады каждого из высоколежащих резонансов в сечение захвата. Рассчитаны вклады всех компонентов солнечного нейтринного спектра. Оценен вклад фоновых солнечных нейтрино в двойной бета-распад ядер Te-130.

## Публикации сотрудников ЛМЯФЭ в 2024 году

[1] M. Agostini et al. [GERDA Collaboration, incl. L.V. Inzhechik]. An improved limit on the neutrinoless double-electron capture of Ar-36 with GERDA // Eur. Phys. J. C 84, 34 (2024). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-023-12280-6> (Q1)

[2] M. Agostini et al. [GERDA Collaboration, incl. L.V. Inzhechik]. Searches for new physics below twice the electron mass with GERDA // Eur.Phys.J.C 84, 940 (2024). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-024-13020-0> (Q1)

[3] V. Shevchenko, A. Lukashovich, D. Taniushkina, 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. IEEE Access 12, pp. 15748-15763 (2024) <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3358865> (Q1)

[4] Baranov, A.G., Ivashkin, A.P., Musin, S.A., Salakhutdinov G. H., Strizhak A. O. Scintillation Detectors of Compton Polarimeters for Measuring Polarization States of Annihilation Photons // Instrum Exp Tech 67, 228 (2024). <https://doi.org/10.1134/S0020441224700362>

[5] Khamitov, T., Vovchenko, I. Analytical solutions to intensity calculation in scintillation detectors and their application to the scintillation flash coordinate reconstruction // Eur. Phys. J. Plus 139, 368 (2024). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-05133-y> (Q2)

[6] A. Svetlichnyi, S. Savenkov, R. Nepeivoda, I. Pshenichnov. Peeling away surface neutrons from Bi-209 in asymmetric collisions // Int. J. Mod. Phys. E, accepted (2024), <https://doi.org/10.1142/S0218301324410271>

[7] I. A. Pshenichnov, U. A. Dmitrieva, S. D. Savenkov, A. O. Svetlichnyi. Electromagnetic dissociation of nuclei: from LHC to NICA // Int. J. Mod. Phys. E, accepted (2024), <https://doi.org/10.1142/S0218301324410076>

[8] E. Blinova, I. Dunaev, K. Gertsenberger, P. Klimai, A. Nozik. Development of Next-Generation Event Visualization Platform for the BM@N Experiment // Phys.Part.Nucl.Lett. 21, 785 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1547477124701358>

[9] Lutostansky, Y.S., Fazliakhmetov, A.N., Lubsandorzhev, B.K., Belogortseva N. A, Koroteev G. A., Lutostansky A. Yu., Tikhonov V. N. Interaction of Solar Neutrinos with Te-128 and Te-130 // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 88, 1223 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1062873824707347>

[10] Ю.С. Лютостанский, А.Н. Фазлиахметов, Б.К. Лубсандоржиев, Г.А. Коротеев, В.Н. Тихонов. Исследование взаимодействия солнечных нейтрино с ядрами 128, 130 Те и проект большого баксанского нейтринного телескопа // Ядерная физика, принято в печать (2024).

## Защиты диссертаций сотрудниками ЛМЯФЭ в 2024 году

1. Защита диссертации на соискание ученой степени кандидата физико - математических наук. Светличный Александр Олегович, “Свойства спектаторной материи в столкновениях релятивистских ядер”, специальность 1.3.15 (физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий). Диссертационный совет 24.1.163.01 ИЯИ РАН. Защита состоялась 25.01.24 Защита утверждена Минобрнауки 30.05.24, № решения 8/1.

2. Защита диссертации на соискание ученой степени кандидата физико - математических наук. Стрижак Александр Олегович, “Измерение комптоновского рассеяния запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов”, специальность 1.3.2 (приборы и методы экспериментальной физики). Диссертационный совет 24.1.163.01 ИЯИ РАН. Защита состоялась 20.06.24. Защита утверждена Минобрнауки 28.10.24, № решения 15/8.

## Доклады сотрудников ЛМЯФЭ в 2024 году

1. A. Strizhak, A. Baranov. "Status of Forward Hadron Calorimeter at MPD/NICA". 28th International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2024), 27 октября - 1 ноября 2024 г. Дубна, Россия. <https://indico.jinr.ru/event/4343/contributions/28518/>
2. A. Svetlichnyi, S. Savenkov, R. Nepeivoda, I. Pshenichnov. "Peeling away surface neutrons from Bi in asymmetric collisions", LXXIV International conference Nucleus-2024: Fundamental problems and applications, 1–5 июл. 2024 г., Dubna, Russia. <https://indico.jinr.ru/event/4304/contributions/26844/>
3. I. Pshenichnov, U. Dmitrieva, S. Savenkov, A. Svetlichnyi. "Electromagnetic dissociation of nuclei: from LHC to NICA", LXXIV International conference Nucleus-2024: Fundamental problems and applications, 1–5 июл. 2024 г., Dubna, Russia. <https://indico.jinr.ru/event/4304/contributions/26838/>
4. A. Svetlichnyi, A. Novikov, E. Vasyagina. "A lightweight library prototype for Monte-Carlo simulation of relativistic nucleus-nucleus collisions based on pipeline architecture", 28th International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2024), 27 октября - 1 ноября 2024 г. Дубна, Россия. <https://indico.jinr.ru/event/4343/contributions/28401/>
5. E. Vasyagina, S. Savenkov, A. Svetlichnyi. "Simulation of the momentum distributions of the spectator fragments in  $^{124}\text{Xe}+\text{CsI}$  Collisions at the BM@N with accounting for pre-equilibrium clusterization". 28th International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2024), 27 октября - 1 ноября 2024 г. Дубна, Россия. <https://indico.jinr.ru/event/4343/contributions/28696/>
6. A. Svetlichnyi, S. Savenkov, I. Pshenichnov. "Calculations of the cell survival rate after irradiating with minibeam of protons and C-12". 28th International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2024), 27 октября - 1 ноября 2024 г. Дубна, Россия. <https://indico.jinr.ru/event/4343/contributions/28779/>
7. A. Zubankov, A. Svetlichnyi, A. Shabanov, F. Guber, I. Pshenichnov, M. Golubeva, N. Karpushkin, S. Savenkov, S. Morozov. "The acceptance and efficiency of the Highly Granular Neutron Detector prototype in the BM@N experiment". 28th International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2024), 27 октября - 1 ноября 2024 г. Дубна, Россия. <https://indico.jinr.ru/event/4343/contributions/28516/>
8. G. Koroteev. "Neutrino capture cross section as function of GT excitations at accelerator energies". Девятая международная конференция "Hadron Structure and Fundamental Interactions: From Low to High Energies". Гатчина, Россия, 8-12 июля 2024. <https://hepd.pnpi.spb.ru/hsfi/sciprogram.html>

9. И.А. Дунаев, К.В. Герценбергер, П.А. Климай, А.А. Нозик. “Разработка системы визуализации физических событий для эксперимента VM@N”, 66-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Долгопрудный, Россия, 1–6 апреля 2024 г.

[https://conf.mipt.ru/view/conference/view\\_division/3227562](https://conf.mipt.ru/view/conference/view_division/3227562)

10. И.А. Дунаев, К.В. Герценбергер, П.А. Климай, А.А. Нозик. “Разработка системы визуализации для эксперимента VM@N”, XIII молодёжная конференция “Физика элементарных частиц и космология”, Москва, Россия, 3–4 декабря 2024 г.

<https://belle.lebedev.ru/conference/wp-content/uploads/sites/13/participants-database/nica-1.pdf>