

## Ограничение на поток космогенных нейтрино в области сверхвысоких энергий по данным нейтринного телескопа Baikal-GVD

В течение зимней экспедиции 2025 года на озере Байкал количество регистрирующих оптических модулей в составе глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD было увеличено до 4212, а его эффективный объем в задаче регистрации событий от нейтрино высоких энергий составил более 0,7 км<sup>3</sup>. В 2023 году в эксперименте KM3NeT зарегистрировано нейтрино с энергией выше 100 ПэВ (событие KM3-230213A). Данное событие может принадлежать потоку космогенных нейтрино, либо оно испущено локальным источником нейтрино сверхвысоких энергий. Ранее в эксперименте IceCube и на наземной установке по регистрации широких атмосферных ливней РАО (Auger) были получены ограничения на величину диффузного потока нейтрино в области энергий выше десятков ПэВ. Байкальский телескоп Baikal-GVD ведет набор данных начиная с 2016 года. На основании данных Baikal-GVD за шесть лет наблюдений получено дифференциальное ограничение на величину потока космогенных нейтрино представленное на рисунке 1. В результате совместного анализа данных экспериментов IceCube, РАО, Baikal-GVD и KM3NeT получена оценка величины потока нейтрино, равновесного по ароматам и со спектром  $E^{-2}$  на уровне  $F_{(1-\text{аромат})}^{(\nu+\bar{\nu})} = 7,2^{+16,5}_{-5,9} \cdot 10^{-10} \text{ГэВ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$  в интервале энергии 72 ПэВ - 2,6 ЕэВ, совпадающем с интервалом неопределенности энергии события KM3-230213A.

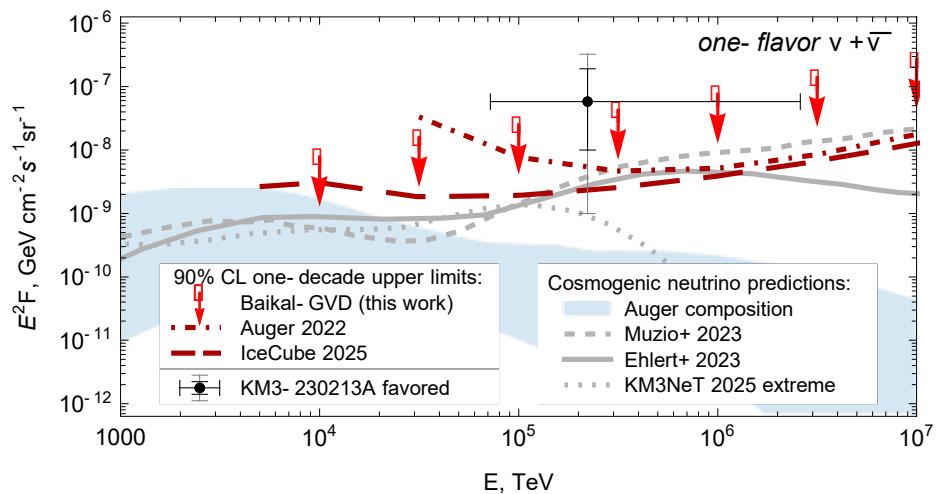


Рисунок 1. Верхние пределы на 90% д.у. на поток космогенных нейтрино по данным Baikal-GVD (красные точки) в сравнении с ограничениями IceCube, РАО, с оценкой потока KM3-230213A и с предсказаниями ряда теоретических моделей.

### Публикации:

1. Baikal-GVD Collaboration (V.A. Allakhverdyan, A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al.) and A.V. Plavin, D.V. Semikoz, S.V. Troitsky, Constraints on the diffuse flux of multi-PeV astrophysical neutrinos obtained with the Baikal Gigaton Volume Detector, Phys. Rev. D **112**, 083025 (2025), DOI: <https://doi.org/10.1103/jlz3-26lw>.

**Координатор работ:** Джилкибаев Жан-Арыс Магисович

Эл. почта: [djilkib@yandex.ru](mailto:djilkib@yandex.ru)

**ПНФИ 1.3.3.3. Нейтринная физика, астрофизические и космологические аспекты ядерной физики и физики элементарных частиц**

В рамках темы госзадания FFWS-2025-0002

## Измерения эволюции квантовой запутанности в комптоновском рассеянии аннигиляционных фотонов

Запутанность является одним из уникальных свойств квантовой теории и проявляется в сохранении суперпозиции квантовых состояний даже на макро-расстояниях. Данный эффект был впервые экспериментально исследован около 70 лет назад в системе двух фотонов, образующихся при позитрон-электронной аннигиляции в покое. Полученные поляризационные корреляции рассеянных в комптоновских поляриметрах аннигиляционных фотонов полностью соответствовали теоретическим предсказаниям и подтвердили их изначально запутанное квантовое состояние.

Вплоть до последнего времени считалось, что квантовая запутанность исчезает при взаимодействии начальных аннигиляционных фотонов с окружающей средой, в частности в их комптоновском рассеянии. Данное предположение было экспериментально исследовано в ИЯИ РАН и привело к достаточно неожиданному результату. Выяснилось, что квантовая запутанность практически полностью сохраняется при малых углах рассеяния и не исчезает полностью даже при больших углах рассеяния. Обнаруженный эффект устойчивости квантовой запутанности привел к пересмотру возможностей создания позитрон-эмиссионных томографов нового поколения, в которых предполагается использовать азимутальные корреляции для подавления фона от рассеянных событий. Недавние расчёты с помощью квантовой теории поля, а также Монте Карло моделирование классических состояний двух фотонов объяснили наблюдаемый эффект и указали на области взаимодействий фотонов, где квантовая запутанность является наиболее устойчивой (рис.1). Проведенные исследования актуальны для развития квантовых технологий, использующих передачу запутанных состояний фотонов.

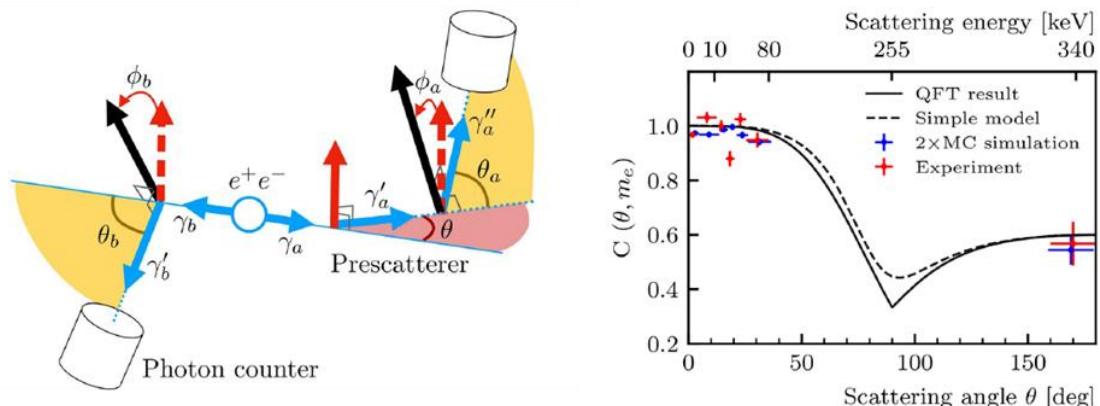


Рисунок 1. Слева – схема измерения поляризационных корреляций в комптоновском рассеянии двух аннигиляционных фотонов. Справа – зависимость степени запутанности аннигиляционных фотонов от угла (энергии отдачи электрона) комптоновского рассеяния.

### Публикации:

1. I. Tkachev, S. Musin, D. Abdurashitov, A. Baranov, F. Guber, A. Ivashkin, A. Strizhak, *Measuring the evolution of entanglement in Compton scattering*. Sci Rep **15**, 6064 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87095-4>
2. 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>

**Координатор работ: Ткачев Игорь Иванович**

эл.почта: [tkachev@inr.ru](mailto:tkachev@inr.ru)

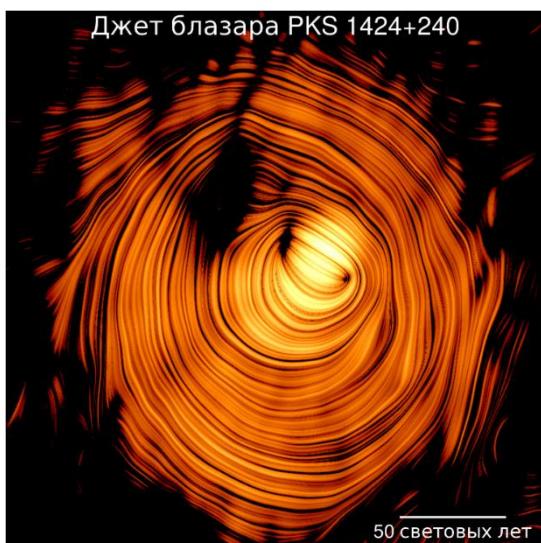
тел. +7 (909)-625-34-47

**ПНФИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий**

## **Решена проблема «доплеровского кризиса» экстремальных активных ядер галактик (совместно с АКЦ ФИАН и КРАО РАН)**

Источник PKS 1424+240 – самый яркий из известных нейтринных блазаров, идентифицированных нейтринным телескопом IceCube, а также один из самых далеких и мощных источников высокоэнергичного гамма-излучения, наблюдаемого наземными черенковскими телескопами. Вопреки ожиданиям, изображения его релятивистского выброса, полученные в радиодиапазоне, показывали медленное движение вдоль выброса, хотя только наиболее быстрые плазменные струи могут производить столь интенсивные высокоэнергетические излучения. Подобное противоречие наблюдалось и в других блазарах, зарегистрированных в фотонах диапазона энергий выше 100 ГэВ, и получило название «доплеровский кризис».

С использованием результатов радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой за 15 лет наблюдений авторами было собрано комбинированное изображение этой струи с угловым разрешением около 50 микросекунд дуги. Оно выявило почти идеальное тороидальное магнитное поле с ультрарелятивистской струей, направленной прямо на наблюдателя (см. рис.). Такая геометрия струи приводит к увеличению видимой яркости в 30 и более раз из-за эффектов специальной теории относительности, а кажущаяся медленной скорость движения – эффект проекции.



*«Око Саурана» – изображение плазменной струи в блазаре PKS 1424+240, летящей прямо на нас. Струя обтекает почти идеальное тороидальное магнитное поле (визуализировано оранжевым цветом). Высокоэнергетические гамма-лучи и нейтрино направлены в сторону Земли, а движение струи кажется медленным благодаря эффектам специальной теории относительности.*

*Изображение: © Y.Y. Kovalev et al., 2025*

### **Публикация:**

1. Y. Y. Kovalev, A. B. Pushkarev, J. L. Gomez, D. C. Homan, M. L. Lister, J. D. Livingston, I. N. Pashchenko, A. V. Plavin, T. Savolainen, S. V. Troitsky: *Looking into the Jet Cone of the Neutrino-Associated Very High Energy Blazar PKS 1424+240*, *Astronomy and Astrophysics* 700 (2025) L12, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202555400>

**Координатор работ: Троицкий Сергей Вадимович**  
эл.почта: [st@ms2.inr.ac.ru](mailto:st@ms2.inr.ac.ru)

**ПНФИ 1.3.3.3. Нейтринная физика, астрофизические и космологические аспекты ядерной физики и физики элементарных частиц**

С российской стороны исследование поддержано Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта "Наука", грант номер 075-15-2024-541.

**Поиск аксионов тёмной материи ниже квантового предела: экспериментальное предложение Космологического Аксионного Саровского Галоскопа (CASH)**

Прочно утвердившуюся в астрофизических наблюдениях темную материю пока не удается непосредственно обнаружить в экспериментах. Аксионы и аксионоподобные частицы являются одними из ведущих кандидатов на роль темной материи, и были предприняты многочисленные попытки обнаружить их в лабораторных условиях. В данной работе мы предлагаем существенно продвинуть эти усилия, повысив чувствительность к аксионам темной материи в диапазоне масс  $(38\text{--}54) \text{ нэВ}$  вплоть до значений аксионно-фотонных связей  $g_{a\gamma} \lesssim 10^{(-14)}\text{--}10^{(-15)} \text{ ГэВ}^{(-1)}$ , мотивированных общими моделями квантовой хромодинамики аксионов. Ключевыми элементами эксперимента являются однофотонные детекторы на джозефсоновских, работающие при сверхнизких температурах порядка  $20 \text{ мК}$ . Прогнозируемая чувствительность будет достигнута через год набора данных с использованием магнитного поля, что делает Космологический Аксионный Саровский Галоскоп Саров (CASH) (Cosmological Axion Sarov Haloscope) самым чувствительным галоскопом в этом диапазоне масс.

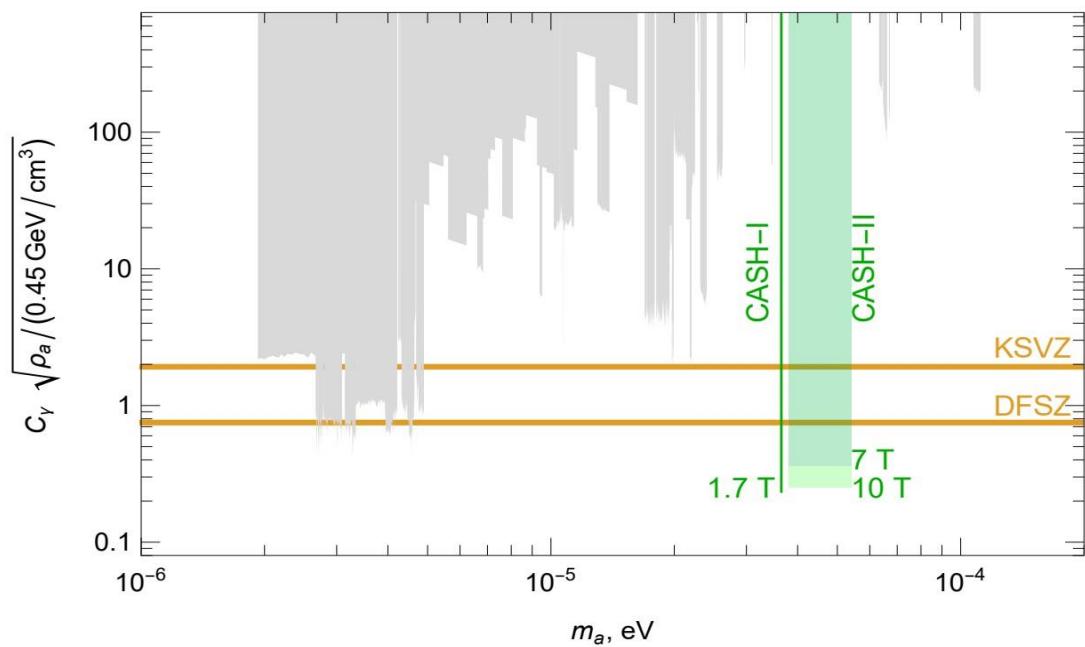


Рис 1. Прогнозируемая чувствительность эксперимента CASH на фоне мировых аналогов. Вертикальная ось показывает силу взаимодействия аксиона с фотонами, горизонтальная — массу аксиона. Серая область — уже исключенные другими экспериментами параметры. Горизонтальные линии (KSVZ, DFSZ) — теоретически предсказанные значения. Зеленые и синие вертикальные полосы — области, которые сможет исследовать CASH. Проект позволит с беспрецедентной точностью проверить существование аксионов в ранее недоступном диапазоне масс.

**Публикации:**

1. Andrey L. Pankratov, Pavel A. Belov, Eduard E. Boos, Alexander S. Chepurnov, Alexander V. Chiginev, Alexander V. Derbin, Ilia S. Drachnev, Lev V. Dudko, Dmitry S. Gorbunov, Maxim A. Gorlach, Vadim V. Ivanov, Leonid V. Kravchuk, Maxim V. Libanov, Michael M. Merkin, Valentina N. Muratova, Alexander E. Pukhov, Dmitry V. Salnikov, Petr S. Satunin, Dmitrii A. Semenov, Alexander M. Sergeev, Maksim I. Starostin, Igor I. Tkachev, Sergey V. Troitsky,

Maxim V. Trushin, Evgenii V. Unzhakov, Maxim M. Vyalkov, Arkady A. Yukhimchuk. *Search for dark-matter axions beyond the quantum limit: the Cosmological Axion Sarov Haloscope (CASH) proposal. Phys.Rev.D 112 (2025) 3, 035003 arXiv:[2506.18595](https://arxiv.org/abs/2506.18595)*

**Координаторы работ:** Сатунин Петр Сергеевич, Троицкий Сергей Вадимович, Горбунов Дмитрий Сергеевич  
эл.почта: [petr.satunin@gmail.com](mailto:petr.satunin@gmail.com)  
тел. +7 916 295 81 65

**ПНФИ 1.3.3.3.** Нейтринная физика, астрофизические и космологические аспекты ядерной физики и физики элементарных частиц

**ПФНИ.1.3.3.3.** Нейтринная физика, астрофизические и космологические аспекты ядерной физики и физики элементарных частиц.

**В рамках проекта “Наука” Министерства науки и высшего образования РФ, контракт 075-15-2024-541**

*В эксперименте ALICE на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРН впервые обнаружено превращение ядер свинца в золото в результате их электромагнитных взаимодействий*

Одной из основных задач эксперимента ALICE является исследование горячей и плотной материи, образующейся в адронных столкновениях ускоренных на БАК ультрарелятивистских ядер свинца непосредственно в области их геометрического перекрытия. Однако, примерно в 30 раз чаще в коллайдере происходят электромагнитные взаимодействия, когда ядра пролетают мимо друг друга, не соприкасаясь, но воздействуя друг на друга интенсивными электромагнитными полями. Благодаря лоренц-фактору, достигающему величины 17 миллионов, рекордно сжатые кулоновские поля встречных ядер рассматриваются в разработанной в ИЯИ РАН модели RELDIS в качестве потоков эквивалентных фотонов с широким энергетическим спектром. Следуя этой модели, фотоны, взаимодействуя со встречным ядром, могут возбуждать в нем гигантский дипольный резонанс, распадающийся с эмиссией нейтронов, а также другие фотоядерные реакции, приводящие к эмиссии протонов с образованием тяжёлого ядра остатка, в частности, Tl, Hg, Au. Сотрудники ИЯИ РАН, работающие в составе коллаборации ALICE, выполнили обработку данных передних адронных калориметров этой установки. С учётом разнообразных поправок на регистрацию многонуклонных событий ими были измерены сечения эмиссии одного, двух и трёх протонов в сопровождении нейтронов, которые соответствуют событиям образования Tl, Hg, Au в качестве вторичных ядер. Измерения полностью подтвердили предсказания модели RELDIS, разработанной в ИЯИ РАН И.А.Пшеничным, и показали состав вторичных ядер для моделирования их траекторий в коллайдере и защиты его магнитов специальными коллиматорами. Эти данные также необходимы для проектирования будущего суперколлайдера FCC-hh. Интересно отметить, что в секунду в результате электромагнитных Pb--Pb взаимодействий на установке ALICE образуется примерно 89 000 ядер золота, распадающихся за доли секунды. За время работы БАК в 2015-2018 годах образовалось примерно 29 пикограммов ( $2.9 \times 10^{-11}$  грамм) золота, что не имеет практического значения, но заслужило внимание мировых СМИ благодаря ассоциации со средневековой алхимией. Работу отметили в Nature, Scientific American, Newsweek, лондонской The Times, изданиях Коммерсантъ и Московский комсомолец, упомянули в теленовостях.

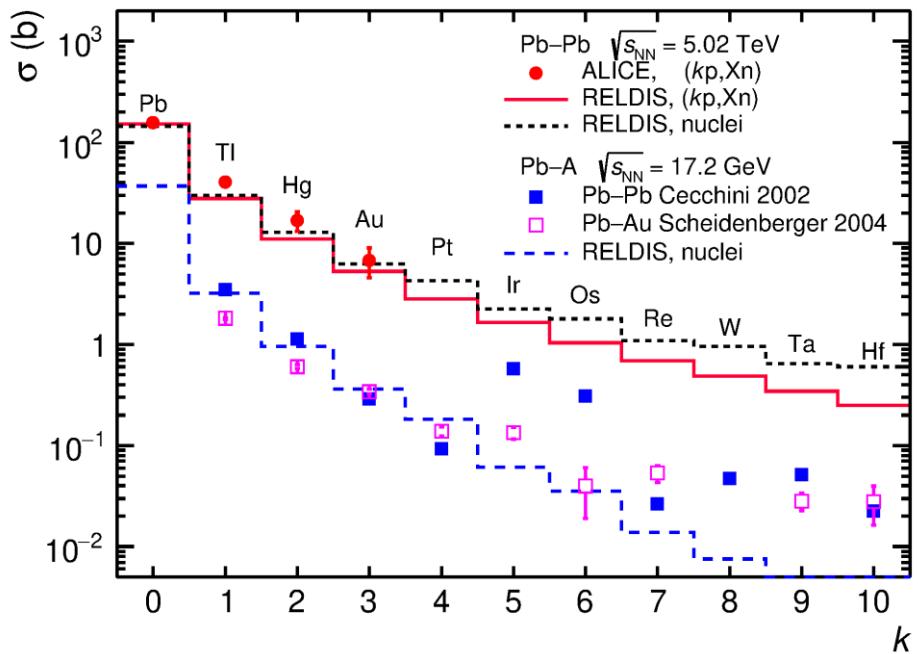


Рисунок 1. Измеренные коллаборацией ALICE (красные круглые точки) и рассчитанные с помощью модели RELDIS (красная сплошная гистограмма) сечения эмиссии определённого числа протонов  $k$  вместе с нейтронами в электромагнитных взаимодействиях ядер  $^{208}\text{Pb}$  при  $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$  ТэВ. Предсказываемые моделью сечения образования ядер Pb, Tl, Hg, Au, ... Hf, при  $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$  ТэВ и 17.21 ГэВ представлены, соответственно, чёрной и синей пунктирными гистограммами. Измеренные в двух других экспериментах при  $\sqrt{s_{\text{NN}}}=17.21$  ГэВ сечения образования определённых элементов в столкновениях  $^{208}\text{Pb}$  с мишениями Au и Pb, и представленные квадратными символами за вычетом вклада адронной фрагментации, также хорошо описываются моделью RELDIS для вторичных ядер Pb, Tl, Hg и Au.

**Координатор работ:** Пшеничнов Игорь Анатольевич

e-mail: [pshenich@inr.ru](mailto:pshenich@inr.ru)

телефон: +7(985)302-8707

**Публикация:**

1. S. Acharya et al. (ALICE Collaboration), Proton emission in ultraperipheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$  TeV, Phys. Rev. C **111** (2025) 054906, <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.111.054906>

**ПФНИ:** 1.3.3 Ядерная физика и физика элементарных частиц

### *Поиск зеркального скрытого сектора с помощью нейтральных каонов в эксперименте NA64*

Зеркальная материя из скрытого сектора с теми же взаимодействиями и аналогичными частицами, как и в Стандартной модели (модель Окуни-Померанчука и Ли) является одним из кандидатов на роль темной материи. Несколько экспериментов по поиску осцилляций нейтрона и позитрония в их зеркальные аналоги были выполнены недавно. В данном исследовании рассмотрена возможность осцилляции нейтральных каонов в их зеркальные аналоги в полной аналогии по поиску осцилляций в нейтронах и позитронии. На базе экспериментальной установки NA64 в ЦЕРНе предложен эксперимент по поиску

осцилляций нейтральных каонов в их зеркальные аналоги. Показано, что возможно открыть осцилляции с вероятностью перехода больше или равной 10-7 при количестве примерно 1011 падающих  $K^+$ -мезонов на мишень. Предсказываемый будущий результат существенно лучше существующих экспериментальных ограничений и ограничений из астрофизики и космологии.

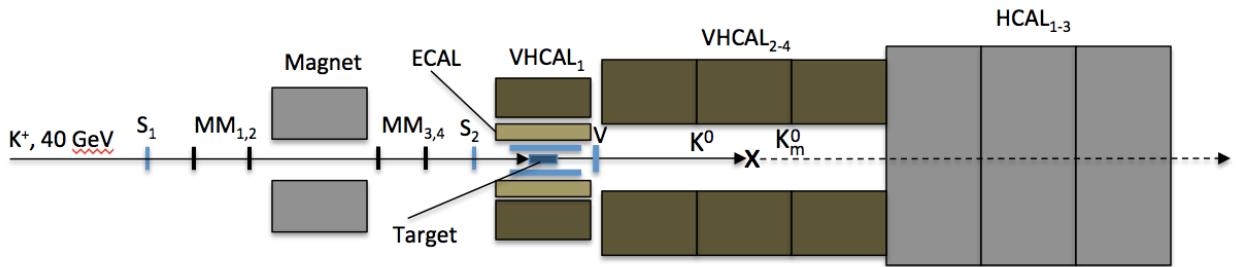


Рисунок 1 – Схема установки NA64 для поиска переходов  $K^0 \rightarrow K^0 m$ .

### Публикации:

1. Gninenco S.N. and Krasnikov N.V. Search for mirror hidden sector with neutral kaons at NA64 // Phys. Rev. D. – 2025. – Vol. 111. – N11. – P. 115519. – <https://doi.org/10.1103/btqb-16lt>.

**Координатор работ: Красников Николай Валерьевич**

Эл.почта: [krasniko@inr.ac.ru](mailto:krasniko@inr.ac.ru)

**ПФНИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий**

### *Интерпретация горячего пятна вблизи радиогалактики Центавр A с учетом межгалактического магнитного поля*

Показано, что для распространения космических лучей в турбулентных межгалактических магнитных полях неприменимо стандартное приближение диффузационной теории, состоящее в том, что распространение каждой частицы считается независимо случайным. Существенно то, что, хотя мы имеем дело со стохастическим магнитным полем, речь идет об одной его конкретной случайной реализации. Как следствие, размер изображения источника получается меньше, чем размер, предсказанный в модели стандартной диффузии, а его положение смещено. Показано, что несмотря на отклонение в галактических магнитных полях космических лучей, испущенных активной галактикой Центавр A, эта галактика может быть источником наблюдаемого избытка, если, в результате случайности, отклонения в межгалактических магнитных полях компенсируют отклонения в галактических полях. Показано, что такие конфигурации внегалактических полей существуют, но, учитывая случайность поля, вероятность этого составляет около 0.5%. В то же время, показано, что избыток в окрестности Центавра A может быть следствием отклонения частиц, испущенных галактикой со вспышкой звездообразования M83.

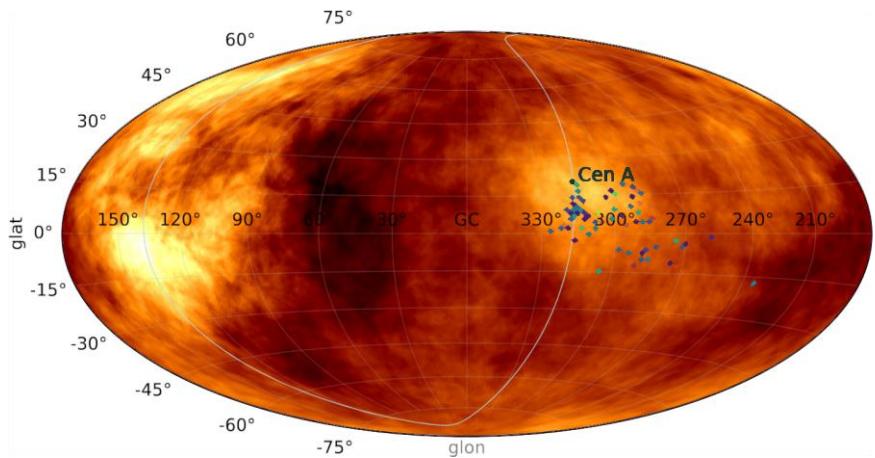


Рисунок 1. Пример наблюдаемых направлений прихода космических лучей, испущенных галактикой Центавр А, в котором отклонение во внегалактических магнитных полях компенсирует отклонение в магнитном поле Галактике (величина внегалактического магнитного поля 1.5 нГс, длина корреляции 3.35 Мпк).

### Публикация:

K. Dolgikh, A. Korochkin, G. Rubtsov, D. Semikoz, I. Tkachev. Displacement of ultra-high-energy cosmic ray source images by the intergalactic magnetic field: the cases of Cen A and M83 // International Journal of Modern Physics A. — 2025. — P. 2540012. DOI: 10.1142/S0217751X25400123

**Координатор работ:** Рубцов Григорий Игоревич

e-mail: grisha@ms2.inr.ac.ru

телефон: +7(903)755-1732

**ПНФИ 1.3.3.3. Нейтринная физика, астрофизические и космологические аспекты ядерной физики и физики элементарных частиц**

### *Определение спектра энергии возбуждения ядра ${}^6\text{Li}$ в реакции $n+{}^6\text{Li}$*

Для поиска экзотических тринуклонных квазимолекулярных состояний в легких ядрах с  $A = 6$  на нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН был проведен эксперимент по исследованию кластерной структуры ядра  ${}^6\text{Li}$  в реакции неупругого рассеяния нейтронов на ядрах  ${}^6\text{Li}$  с регистрацией в совпадении рассеянных нейтронов и продуктов распада высоко возбужденных состояний  ${}^6\text{Li}$ .

В результате исследования реакции  ${}^6\text{Li}(n, {}^3\text{He } n)t$  при энергии первичных нейтронов 40–60 МэВ получен спектр энергии возбуждения  ${}^6\text{Li}$  в диапазоне  $E_x = 16$ –50 МэВ. Впервые в интервале энергии возбуждения  $E_x = 30$ –50 МэВ обнаружены два широких резонанса со структурой  ${}^3\text{He} + t$  при  $E_x = 35.9$  МэВ с  $\Gamma = 8.4$  МэВ и  $E_x = 43.1$  МэВ с  $\Gamma = 5.4$  МэВ.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 «Ядерная и радиационная физика». реакции

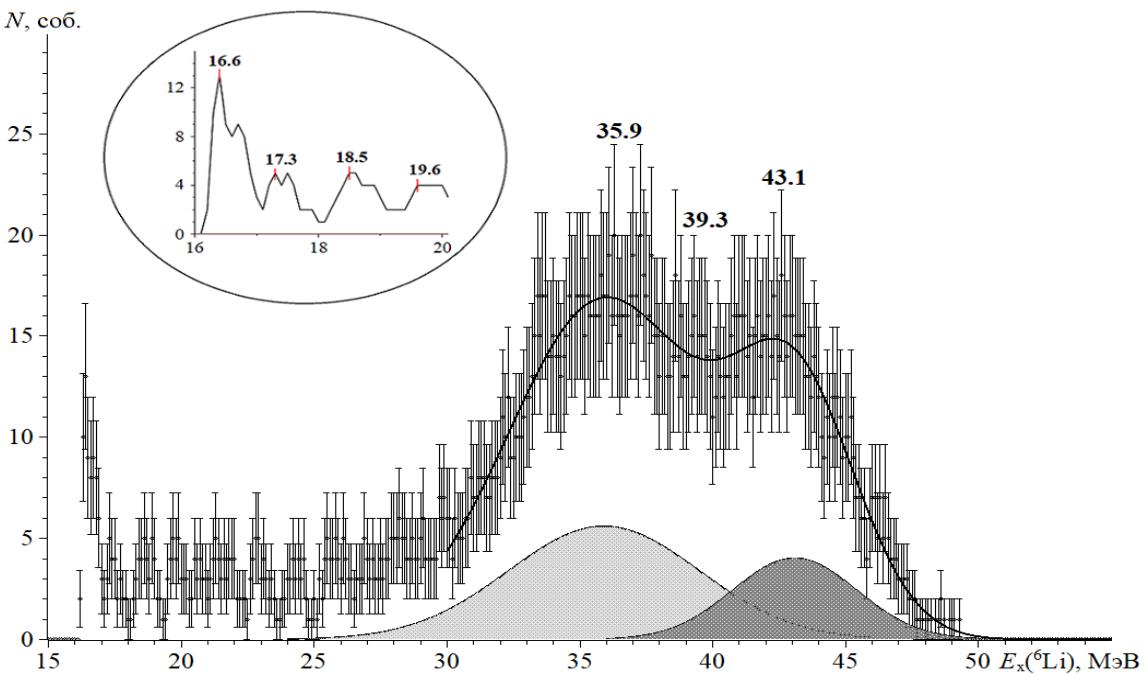


Рисунок 1. Спектр энергии возбуждения  $E_x$  ядра  ${}^6\text{Li}$ , полученного в реакции  ${}^6\text{Li}(n, {}^3\text{He} n)t$  при энергии первичных нейтронов 40–60 МэВ канала РАДЭКС ИЯИ РАН. На вкладке – структура при энергиях немного выше порога ( ${}^3\text{He} + t$ ).

**Координатор работ:** Каспаров Александр Александрович

Телефон: +7(916)979-07-05

e-mail: kasparov200191@gmail.com

**Публикация:**

1. М.В. Мордовской, А.А. Каспаров, А.А. Афонин, А.И. Драчев, Ю.М. Бурмистров, В.В. Мицук, В.Н. Пономарев, С.И. Поташев. Определение спектра энергии возбуждения ядра  ${}^6\text{Li}$  в реакции  $n + {}^6\text{Li}$  // Ядерная физика. 2025. Т. 88. № 1. С. 107-113. DOI: 10.31857/S0044002725010143

**ПФНИ:** 1.3.3 Ядерная физика и физика элементарных частиц

**Исследование влияния 3N-сил на величины низкоэнергетических характеристик пр-взаимодействия, извлекаемых из малонуклонных реакций**

Для исследования проявления 3N-взаимодействия в малонуклонных реакциях и определения степени этого взаимодействия от энергии участвующих частиц на нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН в рамках цикла исследований по изучению межнуклонных взаимодействий при малых энергиях проведен кинематически полный эксперимент по исследованию реакции  $nd \rightarrow npr$  при энергии нейтронов 5 МэВ.

Впервые при столь низкой энергии первичных нейтронов в реакции  $nd$ -развала в результате сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования извлечена величина энергии виртуального  ${}^1S_0$   $np$ -состояния  $E_{np} = 40 \pm 2$  кэВ и соответствующее ей значение длины  $np$ -рассеяния  $a_{np} = -30.9 \pm 0.8$  Фм (см. рис. 1).

При сравнении с данными других экспериментов по исследованию реакций  $nd$ - и  $dd$ -развалов при различных энергиях (см. рис. 2) делается предположение, что довольно большой разброс между значениями  $a_{np}$  может быть обусловлен разным вкладом 3N-сил.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 «Ядерная и радиационная физика».

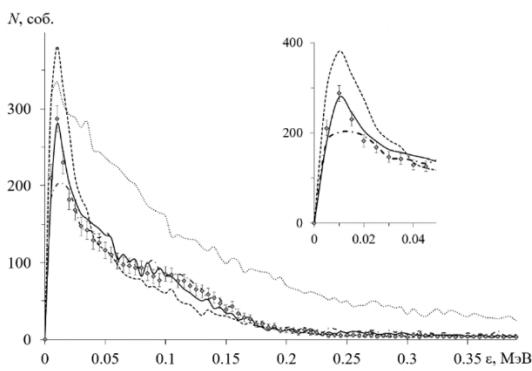


Рис. 1. Сравнение экспериментальной зависимости выхода  $nd$ -развала от относительной энергии  $pr$ -пары при энергии первичных нейтронов  $E = 5 \pm 1$  МэВ (точки) и результатов моделирования для различных значений энергии виртуального  $^1S_0$  уровня  $E_{np}$ : штриховая кривая – 0.015 МэВ; сплошная кривая – 0.04 МэВ; штрихпунктирная кривая – 0.07 МэВ. Точечная кривая – “демократический” развал.

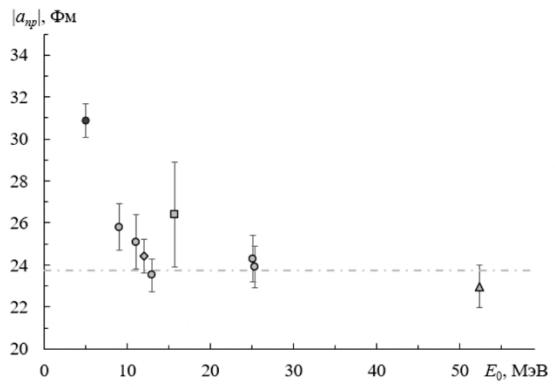


Рис. 2. Значения  $|a_{np}|$ , извлеченные из малонуклонных реакций, в зависимости от энергии налетающих частиц, используемых в этих экспериментах. Точки: данные, полученные в  $\diamond$  –  $pd$ -реакции;  $\Delta$  –  $dp$ -реакции;  $\square$  –  $dd$ -реакции;  $\circ$  –  $nd$ -реакции,  $\bullet$  – результат настоящей работы. Горизонтальная линия соответствует значению  $a_{np}$ , извлеченному из экспериментов по свободному  $pr$ -рассеянию.

**Координатор:** Каспаров Александр Александрович  
**Телефон:** +7(916)979-07-05  
**e-mail:** kasparov200191@gmail.com

**Публикация:** A.A. Kasparov, M.V. Mordovskoy, A.A. Afonin, V.V. Mitcuk // Phys. Atom. Nucl. 2025. V. 88. No. 2. P. 374-382. DOI: 10.1134/S106377882570022X

**ПФНИ:** 1.3.3 Ядерная физика и физика элементарных частиц

### Измерение EMC-эффекта в ядрах трития и гелия-3 в эксперименте MARATHON и теоретическая интерпретация данных

“EMC-эффект” известен как обозначение ядерных эффектов в глубоконеупругом рассеянии лептонов на ядрах. Впервые значительный ядерный эффект был обнаружен Европейской мюонной коллегией (EMC) в ЦЕРНе в отношении глубоконеупругих сечений рассеяния на ядрахдейтерия и железа. В данной работе сообщаются результаты нового измерения EMC-эффекта в трех-частичных ядрах трития и гелия-3 в сравнении с теоретическими предсказаниями. Данные получены экспериментом MARATHON по глубоконеупругому рассеянию электронов с энергией 10.59 ГэВ на ускорителе JLab надейтериевой (d), тритиевой (t) и гелий-3 (h) газовых мишениях при температуре 40К в кинематической области бъергеновской переменной  $0.2 < x < 0.83$  и инвариантного квадрата переданного импульса от 2.7 до 12 ГэВ2. EMC-эффект в тритии был измерен впервые, а новые данные для гелия-3 существенно дополняют и уточняют предыдущие измерения. Результаты измерений отлично согласуются с теоретическими предсказаниями на основе подхода, разрабатываемого С.А.Кулагиным (ИЯИ РАН) в рамках госзадания.

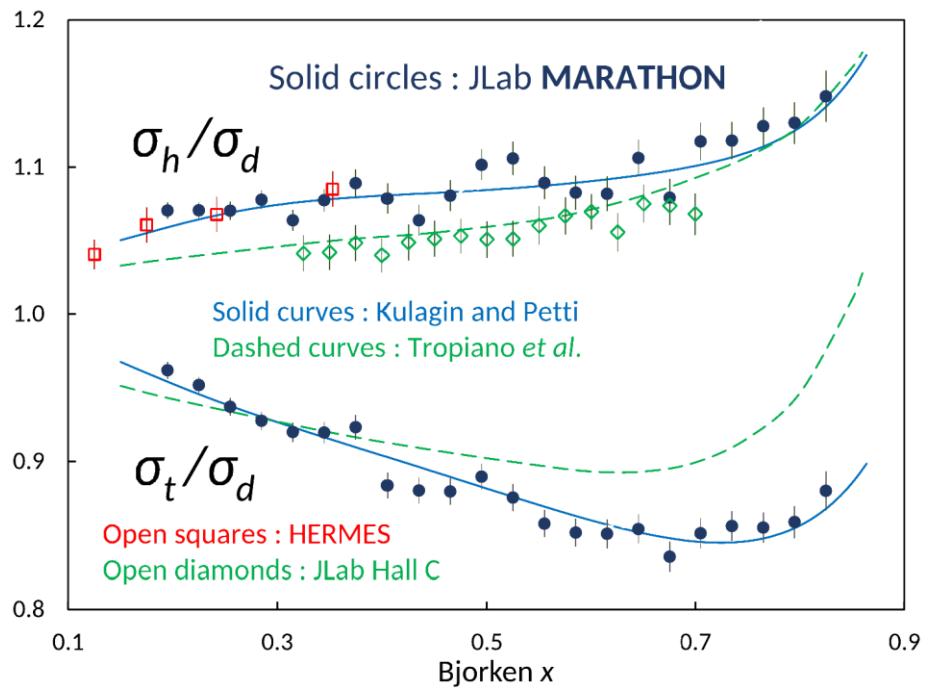


Рис. 1. Данные эксперимента MARATHON по  $h/d$  и  $t/d$  отношениям глубоконеупругих сечений в зависимости от бъеркеновской переменной  $x$ . Сплошные кривые - предсказания модели Кулагина-Петти, пунктир - вычисления Tropiano et al. Показаны также данные экспериментов HERMES (DESY) и Jlab E03-103 по глубоконеупрочному рассеянию на гелии-3.

#### Публикации:

1.D. Abrams et.al. EMC Effect of Tritium and Helium-3 from the Jlab MARATHON Experiment. Phys. Rev. Lett. **135**, 062502 (2025).

Координатор работ: Кулагин Сергей Анатольевич

связь: [kulagin.physics@gmail.com](mailto:kulagin.physics@gmail.com) тел.: +7-905-724-8856

ПФНИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

#### *Использование столкновений релятивистских ядер в качестве источника моноэнергетических нейтронов*

Для расширения исследовательской программы эксперимента BM@N в ИЯИ РАН разрабатывается и создаётся высокогранулярный нейтронный детектор (HGND) для измерения выходов и анизотропных потоков нейтронов с энергиями 0.3 – 4 ГэВ, образующихся в ядро-ядерных столкновениях при энергиях до 4А ГэВ [1]. Прототип этого детектора был также создан в ИЯИ РАН и использован в первом физическом сеансе эксперимента BM@N в конце 2022 – начале 2023 гг. для измерения выходов нейтронов вперёд от электромагнитной диссоциации (ЭМД) и ядро-ядерных взаимодействий в реакции Xe+CsI при кинетической энергии ионов ксенона 3,8А ГэВ. Проведенный анализ экспериментальных данных позволил оценить выходы нейтронов-спектаторов в ядро-ядерных столкновениях и нейтронов от ЭМД и показал состоятельность новой концепции высокогранулярного нейтронного детектора для измерения выходов и анизотропных потоков нейтронов в эксперименте BM@N [2].

Реконструированные экспериментальные спектры кинетической энергии нейтронов от электромагнитной диссоциации и от ядро-ядерных столкновений представлены на рис.1

в сравнении с реконструированными спектрами, полученными в ходе моделирования в полной геометрии установки BM@N с использованием моделей RELDIS для ЭМД и DCM-QGSM-SMM и UrQMD-AMC для адронных взаимодействий ядер.

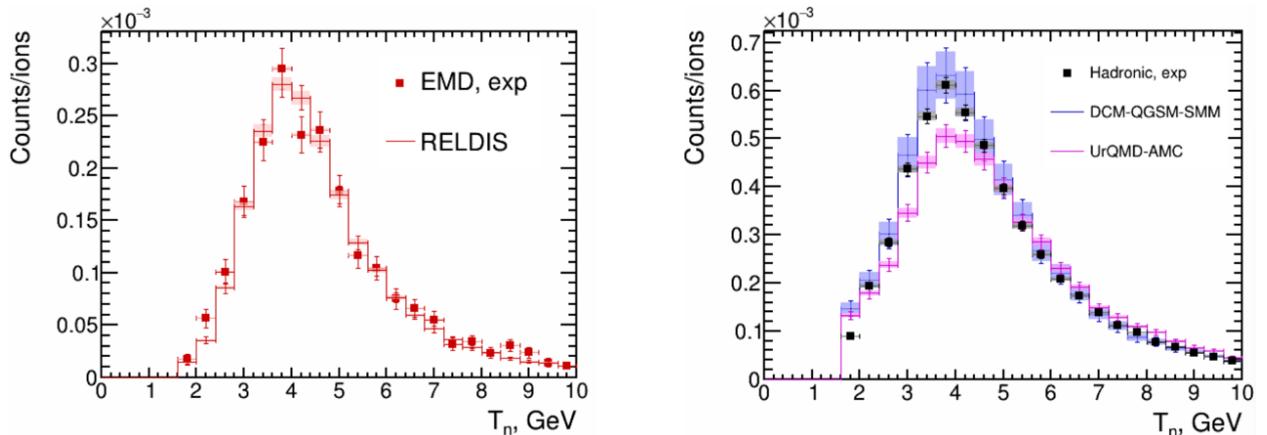


Рисунок 1. Реконструированные экспериментальные спектры кинетической энергии нейтронов от электромагнитной диссоциации (слева) и от центральных и полуцентральных столкновений (справа) ядер ксенона с кинетической энергией 3,8А ГэВ с мишенью CsI. Экспериментальные данные (точки) показаны с учётом статистических и систематических неопределённостей и сравниваются с результатами моделирования (гистограммы).

Электромагнитная диссоциация релятивистских ядер впервые в мире использована в качестве источника коллимированных моноэнергетических нейтронов для калибровки прототипа нейтронного детектора HGND.

**Координатор работ:** Губер Федор Фридрихович  
 e-mail: [guber@inr.ru](mailto:guber@inr.ru)  
 телефон: +7(903)629-3268

#### Публикации:

1. The Highly-Granular time-of-flight Neutron Detector for the BM@N experiment / S. Morozov, V. Bocharnikov, D. Finogeev [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2025. – Vol. 1072. – P. 170152. – <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.170152>.
2. Performance study of the Highly Granular Neutron Detector prototype in the BM@N experiment / A. Zubankov, S. Afanasiev, M. Golubeva [et al.] // Nuclear Science and Techniques 2025 36:11. – 2025. – Vol. 36. – № 226. – P. 1-12. – <https://doi.org/10.1007/s41365-025-01817-x>.

**ПФНИ:** 1.3.3 Ядерная физика и физика элементарных частиц

#### *Антиферромагнитное упорядочение спиновой плотности на диамагнитных атомах Sn, перенесенных из Gd в сплаве GdCuSn<sub>0.85</sub>Ge<sub>0.15</sub>*

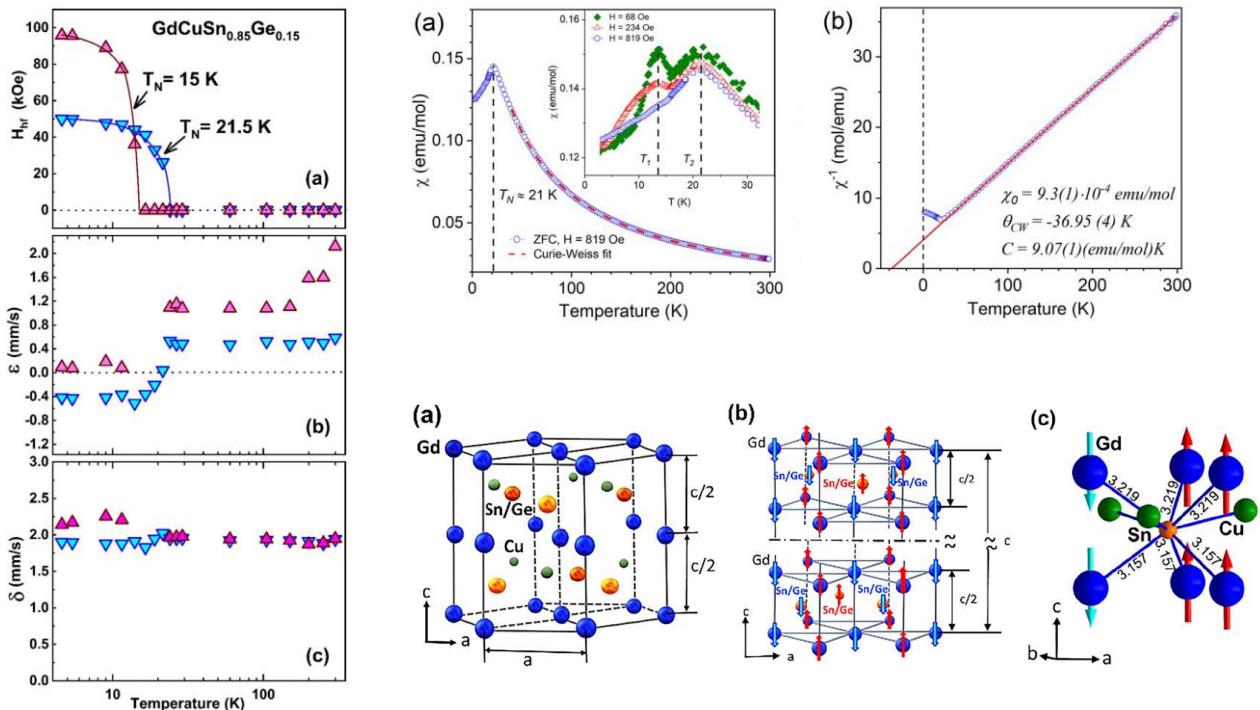
Тройные интерметаллические соединения на основе редкоземельных металлов привлекают большое внимание в связи с открытием в них гигантского магнитокалорического эффекта (МКЭ), что открывает перспективу для использования таких материалов в устройствах магнитного охлаждения. Особый интерес представляют соединения GdCuGe и GdCuSn, поскольку металлический гадолиний имеет одно из самых

высоких значений МКЭ при комнатной температуре. В данной работе исследованы магнитные свойства сплава  $\text{GdCuSn}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$  методами  $^{119}\text{Sn}$ -мессбауэровской спектроскопии в сочетании с измерениями магнитной восприимчивости и рентгеновской дифракции.

В результате анализа кристаллической и магнитной структуры сплава, а также механизма формирования магнитного поля  $^{119}\text{Sn}H_{hf}$  на олове установлено, что спиновая плотность на атомах Sn упорядочена по типу антиферромагнитной структуры (Рис. 1). Показано, что  $^{119}\text{Sn}$ -мессбауэровская спектроскопия является эффективным методом изучения особенностей магнитной структуры различных соединений.

В данной работе установлены необычные особенности магнитной структуры и магнитных фазовых переходов как в основном соединении  $\text{GdCu}(\text{Sn}/\text{Ge})$ , так и в примесной фазе  $\text{Gd}_3\text{Cu}_4\text{Sn}_4$  этого сплава.

В основном состоянии атомы олова Sn немагнитны (диамагнетик), и магнитные поля на ядрах Sn отсутствуют. Нами показано, что в магнитных кристаллах, содержащих диамагнитное олово, магнитное поле на ядрах  $^{119}\text{Sn}$  возникает вследствие переноса спиновой плотности от магнитного атома Gd к атомам Sn. Величина спиновой плотности и направления спинов установлены с помощью  $^{119}\text{Sn}$ -мессбауэровской спектроскопии.



**Рисунок 1.** Сверхтонкие взаимодействия (эффект Мёссбауэра,  $^{119}\text{Sn}$ ), магнитная восприимчивость  $\chi(T)$  для двух позиций олова Site-1 (синий) и Site-2 (розовый). Кристаллическая и магнитная структуры в основной фазе сплава  $\text{GdCu}(\text{Sn},\text{Ge})$ .

### Публикация:

1. S.N. Aksenov, M. V. Lyubutina, A. A. Mironovich, Yu. N. Lebed', N. I. Snegirev, S. S. Starchikov, V. A. Zayakhanov, R. A. Sadykov, A. G. Gavriluk and I. S. Lyubutin, "Antiferromagnetic ordering of the spin density at diamagnetic Sn atoms transferred from Gd in the alloy  $\text{GdCuSn}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$ ", Phys. Scr. 100, 0759a1 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1088/1402-4896/adec20> (IF: 2.6 (Q2))

### Кооперация с другими организациями:

- 1) Институт ядерных исследований РАН, 108840, Троицк, Москва, Россия
- 2) Center for High Pressure Science and Technology Advanced Research (HPSTAR), Shanghai, China

3) Курчатовский комплекс кристаллографии и фотоники (КККиФ) НИЦ «Курчатовский институт», 119333 Москва, Россия  
4) Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 236041, Калининград, Россия

**Координатор работ: Гаврилюк Александр Григорьевич**  
эл.почта: [gavriliuk@mail.ru](mailto:gavriliuk@mail.ru)

**ПФНИ 2021-2030:** 1.3.2.12., 1.3.3.5., 1.3.3.7.

*Точная связь между бегом константы сильных взаимодействий и предсказаниями теории возмущений для характеристики электрон-позитронной аннигиляции в адроны в суперсимметричной КХД*

В суперсимметричной КХД обнаружена явная точная формульная связь между логарифмическим убыванием при росте энергии константы сильных взаимодействий и предсказаниями теории возмущений для аналога полного сечения процесса электрон-позитронной аннигиляции в адроны в Евклидовой области. Данное соотношение выполняется в введенных ранее авторами настоящей работы в 2013 г. классе фиксированных перенормировочных процедур минимальных вычитаний логарифмов который в случае суперсимметричной КЭД входит процедура вычитаний на массовой поверхности. Отмечено, что аналогичные точные формульные особенности выражения для полного сечения электрон-позитронной аннигиляции в адроны могут быть справедливы и в несуперсимметричной КХД.

**Публикации:**

1. A.L.Kataev and K.V. Stepanyantz; Exact relations between running of  $\alpha_s$  and  $\alpha$  in  $N=1$  SQCD+SQED. Письма в ЖЭТФ, 121 (2025) стр. 337-339; arXiv:2410.12070v2 [hep-th]

**Координатор работ: Катаев Андрей Львович**

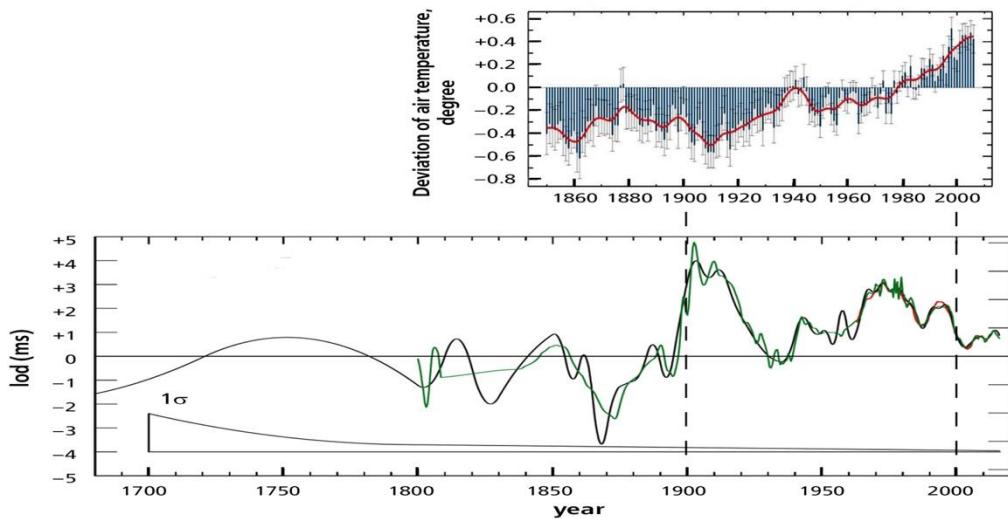
эл.почта: [kataev@ms2.inr.ac.ru](mailto:kataev@ms2.inr.ac.ru)

тел. +7 (915) 033-01-67

**ПФНИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий**

*Объяснение потепления климата с одновременным уменьшением длительности суток на Земле*

В рамках развития новой модели Земли – Богатая водородом Земля дано объяснение наблюдаемого потепления климата и одновременного уменьшения длительности суток как ускорение распада гидридов металлов под мантией Земли. Указаны источники и даны численное оценки энергии, выделяющейся внутри Земли и обеспечивающей наблюдаемый нагрев океанов и атмосферы. Полученные результаты показывают несостоятельность идеи влияния деятельности человека на климат и могут быть использованы для долговременного прогнозирования климатических изменений планеты Земля.



Верхний график - изменение температуры воздуха на Земле.

Нижний график – изменение длительности суток (lod) на Земле, ноль соответствует 86 400 секундам.

### Публикации:

1. Л. Б. Безруков, И. С. Карпиков, А. К. Межох, С. В. Силаева, В. В. Синёв. Какую долю калия в Земле допускает эксперимент Борексино. Известия РАН. Серия Физическая. 2023, том 87, №7, с.1042-1044.
2. L. B. Bezrukov and V. V. Sinev, General reason for warming of the ocean and decrease of length of day (lod) of the Earth. Moscow University Physics Bulletin 80(7), (2025).

**Координатор:** г.н.с. Безруков Леонид Борисович, в.н.с. Синёв Валерий Витальевич, ОЭФ ИЯИ РАН. **эл.почта:** [bezrukov1945@mail.ru](mailto:bezrukov1945@mail.ru), [vsinev@inr.ru](mailto:vsinev@inr.ru)  
**ПНФИ** 1.3.7.5. Планеты и планетные системы.

### *Адронный калориметр на коллайдере NICA*

Рассмотрена возможность размещения адронного калориметра спектаторов, предназначенного для определения центральности столкновений, на коллайдере NICA с использованием магнитных элементов коллайдера. Показано, что в результате отклонения спектаторов-протонов от основного пучка практически устраняется неоднозначность данных калориметра для центральных и периферических событий. Измерение полной выделенной энергии нуклонов и фрагментов при прохождении активных и пассивных слоев калориметра позволяет определить число спектаторов, которое зависит от параметра столкновения. Размещение адронного калориметра на установке MPD на прямом пучке с отверстием для прохождения пучка приводит к неоднозначности в определении центральности. Часть спектаторов, заключенных во фрагментах, попадает в это отверстие вследствие меньшего поперечного импульса фрагментов. Эффективным решением проблемы является использование магнитного поля, которое отклоняет основной пучок, протоны- спектаторы и фрагменты на различные углы.

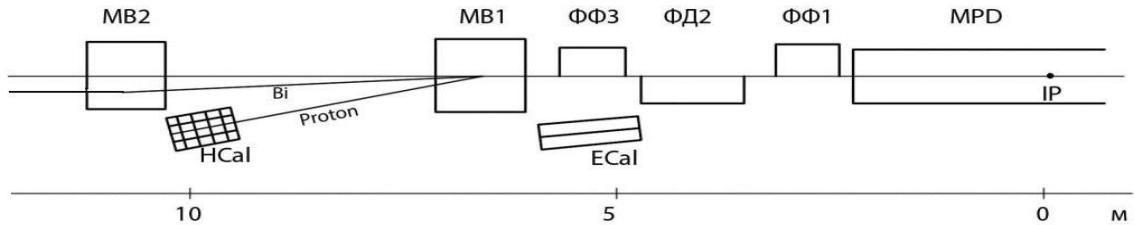


Рис.1. Схема размещения адронного калориметра на коллайдере NICA

На Рис.1 показано предлагаемое размещение модулей адронного и электромагнитного калориметров и расчетные отклонения основного пучка ядер висмута и протонов - спектаторов. Блоки адронного калориметра HCal с входным квадратным сечением 15 x 15 кв.см и длиной 106 см в количестве до 16 шт. устанавливаются навстречу пучку ниже вакуумной трубы. Модули электромагнитного калориметра, от 2 до 4 шт., размещаются области квадруполей FF3. Каждый модуль состоит из 16 ячеек-башен с входным сечением 4 x 4 кв.см и длиной около 60 см. При таком расположении модулей адронного калориметра обеспечивается плавное увеличение выделенной в калориметре энергии соответственно увеличению числа спектаторов - протонов и легких фрагментов вплоть до центральностей, эквивалентных параметру столкновения 12 Фм.

#### Публикация:

1.А.Б.Курепин, В.С.Попов, Н.А.Курепин,“Адронный калориметр на коллайдере NICA”, в печати Письма в ЭЧАЯ (2025)

**Координатор работ: Курепин Алексей Борисович**

эл.почта: [kurepin@inr.ru](mailto:kurepin@inr.ru) тел+7(903)6293267

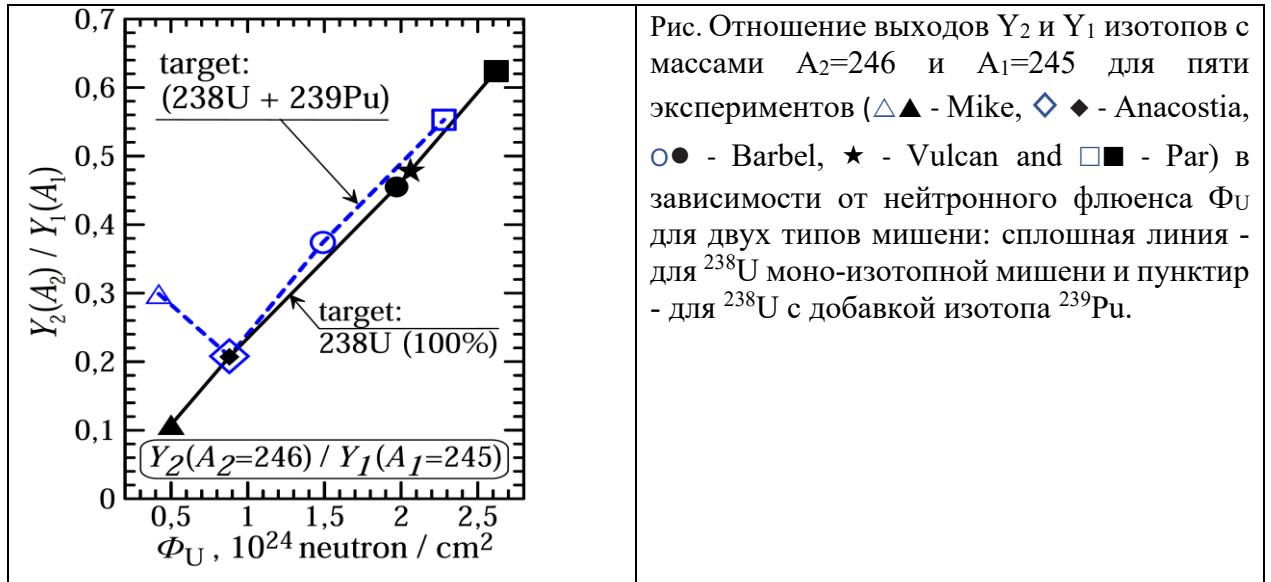
**ПФНИ 1.3.3.1 Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий**

**ПФНИ 1.3.3.3. Нейтринная физика, астрофизические и космологические аспекты ядерной физики и физики элементарных частиц**

#### *Отношение выходов трансурановых изотопов как индикатор достигнутых нейтронных флюенсов в импульсном нуклеосинтезе*

Образование трансурановых нуклидов в экстремальных импульсных нейтронных флюенсах исследуется в динамической модели с учетом падения температуры при разлете вещества во взрывном термоядерном процессе. Интенсивная ( $n,\gamma$ )-активация мишени, изготовленной из изотопа  $^{238}\text{U}$  обеспечивает образование нейтронно-избыточных трансурановых нуклидов вплоть до  $^{257}\text{Fm}$ . Результаты образования изотопов получены для пяти крупномасштабных экспериментов по синтезу трансуранов. Расчетные выходы хорошо соответствуют экспериментальным данным. Аналитически показано, что зависимость выходов изотопов от нейтронных флюенсов может быть линейной в интервале реализованных нейтронных потоков  $\sim 10^{24}$  нейтрон/см $^2$ . Отношения выходов изотопов в зависимости от нейтронного флюенса обсуждаются для соседних пар с массовыми числами ( $A=245$  и  $244$ ), ( $A=246$  и  $245$ ), ( $A=247$  и  $246$ ). Результаты получены в вариантах с мишенью из моно-изотопа  $^{238}\text{U}$  и в предложенном сценарии с вбросом изотопа  $^{239}\text{Pu}$  (присутствующего в экспериментальном устройстве). Полученные данные по отношениям выходов указывают на зависимость, близкую к линейной в интервале флюенсов, достигнутых в проведенных экспериментах. Наиболее явное подтверждение зависимости, близкой к линейной получено для мишени из  $^{238}\text{U}$ . Максимальное изменение отношений

(что важно для надежной регистрации в эксперименте) достигается для выходов изотопов с массами  $A=246$  и  $A=245$ . Полученные результаты могут быть использованы в анализе данных по нуклеосинтезу трансурановых изотопов при слиянии двойных звездных систем и для моделей с обдиранием звездной оболочки. Результаты анализа изотопных отношений могут быть применены для прикладных целей контроля взрывных тестов.



#### Публикации:

1. V. I. Lyashuk, *Relation of Transuranium Isotope Yields as Indicator of the Achieved Neutron Fluxes at the Pulse Nucleosynthesis Region*. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2025, Vol. 22, No. 2, p. 324.

Координатор работ: **Ляшук Владимир Иванович**

эл.почта: [lyashuk@itep.ru](mailto:lyashuk@itep.ru)

тел. +7 (977)8529227

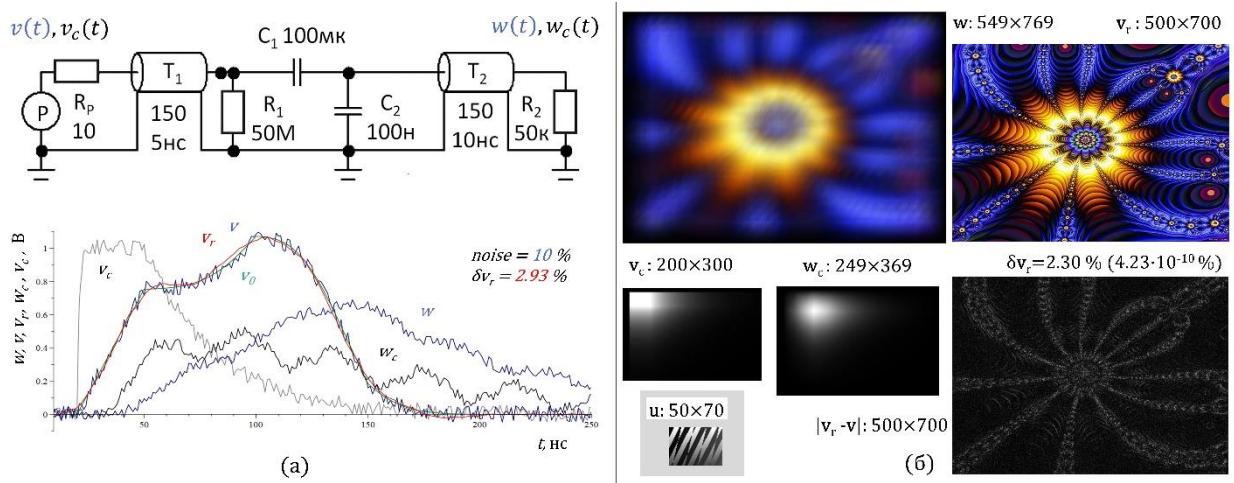
**ПНФИ 1.3.3.5.** Физика ускорителей заряженных частиц, включая синхротроны, лазеры на свободных электронах, источники нейтронов, а также другие источники элементарных частиц; **1.3.3.7.** Ядерно-физические методы в медицине, энергетике, материаловедении, биологии, экологии, системах безопасности и других областях.

#### **Реконструкция и моделирование сигналов с помощью метода тестовых испытаний систем обработки**

Разработанные в ИЯИ РАН математические методы тестовых испытаний (ТИ) предназначены для восстановления одномерных и многомерных сигналов, включая изображения, искаженных в процессе измерений, приема, передачи и другой обработки сигналов линейными стационарными (ЛС) системами. Использование тестовых сигналов вместо аппаратных или передаточных функций ЛС систем позволяет эффективно решать некорректно поставленные и плохо обусловленные задачи реконструкции и избежать сложного процесса моделирования работы систем.

Уравнение тестовых испытаний, лежащее в основе ТИ методов, имеет низкий уровень неопределенности и не содержит функций из класса обобщенных, что определяет устойчивость алгоритма численных расчетов и его эффективность при обработке сильно зашумленных сигналов. Специально разработанный операторный подход, основанный на многомерном уравнении свертки, сокращает количество операций, необходимых для обработки сигналов, и значительно ускоряет численные вычисления. На Рисунке 1а представлен пример реконструкции сигналов с частотным диапазоном более 200 МГц,

искаженные делителем напряжения с частотой среза  $\sim 1$  МГц, что соответствует расширению эффективного частотного диапазона устройства более, чем в 200 раз. При этом погрешность реконструкции составила 2.93 %, что в три раза меньше уровня шумов в исходных данных (10 %). На Рисунке 1б представлен результат обработки многомерных сигналов на примере восстановления двумерного фрактального изображения, размытого со случайным двумерным ядром с разрывами первого рода.



**Рисунок 1.** Реконструкция  $v_r$  входного сигнала  $v$  с использованием тестовых сигналов  $v_c$  и  $w_c$  из выходного сигнала  $w$ , искаженного емкостным делителем напряжения (а); и из двумерного изображения  $w$ , размытого с ядром  $u$  (б). Здесь  $\delta v_r = \|v_r - v\|/\|v\| \%$  - погрешность реконструкции,  $\delta f = \|Af\|/\|f\| \%$  - уровень шумов в данных.

Методы тестовых испытаний имеют большой инновационный потенциал и широкие возможности практического применения во многих областях науки и техники, связанных с измерениями, приемом, передачей и другой обработкой сигналов и изображений ЛС системами. Технический и экономический эффект от их внедрения состоит в повышении качества обработки информации математическими методами вместо создания дорогостоящей аппаратуры, связанной с решением сложных физических и научно-технических задач.

Методы апробированы в докладах на международных конференциях, научно-технических советах и семинарах, защищены публикациями в рецензируемых журналах в России и за рубежом. Алгоритмы реконструкции описаны в статьях и препринтах и готовы к практическому применению. Программные коды размещены в открытом доступе в библиотеке GitHub по адресу: <https://github.com/novikov-borodin/data-rec>.

### Публикации:

1. Новиков-Бородин А.В. Математическая реконструкция сигналов и изображений с помощью тестовых испытаний: неслепой подход. – Журнал вычислительной математики и математической физики, т.65, № 3, 2025, с.401-414. doi: <https://doi.org/10.31857/S0044466925030135> //
2. Novikov-Borodin A.V. Mathematical Restoration of Signals and Images Using Test Trials: A Non-Blind Approach. - Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2025, Vol. 65, No. 3, pp. 649–661. doi: <https://doi.org/10.1134/S0965542524702105>.
3. Novikov-Borodin A.V. Using Test Trials of Processing Systems for Non-Blind Recovery of Signals and Images. - Journal of Data Science and Intelligent Systems, Sept. 2025, <https://doi.org/10.47852/bonviewJDSIS52024990>.

**Координатор работ: Новиков-Бородин Андрей Валерьевич**

эл. почта: [novikov.borodin@gmail.com](mailto:novikov.borodin@gmail.com)

## ПНФИ:

1.1.2.2. Обратные и некорректно поставленные задачи, методы усвоения данных

1.1.3.1. Методология математического моделирования

1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

1.3.3.5. Физика ускорителей заряженных частиц, включая синхротроны, лазеры на свободных электронах, источники нейтронов, а также другие источники элементарных частиц, атомных ядер, синхротронного и рентгеновского излучения

1.3.3.6. Развитие методов детектирования элементарных частиц, атомных ядер и ионизирующего излучения, методов рентгеновской и нейтронной оптики

### *Фоторождение экзотического заряженного чармониум-подобного состояния Zc(3900) на ядерных мишенях и его внутренняя структура*

В последние годы в ряде высокозенергетических экспериментов (коллаборации Belle, BESIII, LHCb, CMS, ATLAS, CLEO, D0) было обнаружено существование в природе экзотических адронных состояний (XYZ состояний), проявляющих свойства, выходящие за рамки традиционной кварковой модели (двуихкварковые мезоны и трехкварковые барионы). Открытые состояния имеют в своей структуре 4 и 5 валентных кварков и поэтому получили название тетракварки и пентакварки. Так в 2013 году коллаборации BESIII, Belle, CLEO обнаружили новый чармониум-подобный тетракварк  $Z_c(3900)^{+,-}$  в электрон-позитронной аннигиляции, содержащий чармированные кварк и антискварк и два легких кварка ( $u, d$ ). Этот тетракварк привлекал в последнее десятилетие особое внимание из-за своей крайне необычной и не совсем понятной даже в настоящее время (несмотря на многочисленные экспериментальные и теоретические исследования) внутренней структуры, предсказываемой в ряде теоретических подходов в виде чисто компактного плотно связанного четырехкваркового состояния, молекулярного состояния, состоящего из двух слабосвязанных  $D, D^*$  мезонов, или их смеси с предполагаемыми вероятностями. В данной работе мы рассмотрели (впервые) возможность изучения внутренней структуры  $Z_c(3900)$  мезонов в реакциях их фоторождения на ядерных мишенях. В рамках разработанной нами новой модели было впервые показано (см. рисунок 1 выше), что рассмотренные нами наблюдаемые (полные и дифференциальные сечения, прозрачности) обладают определенной чувствительностью к предполагаемой структуре  $Z_c(3900)$  мезона – важный для его будущих экспериментальных исследований, в частности, на фотонном пучке обновленного до энергии 22 ГэВ ускорительного комплекса CEBAF (США) вывод данной работы.

E. Y. Paryev

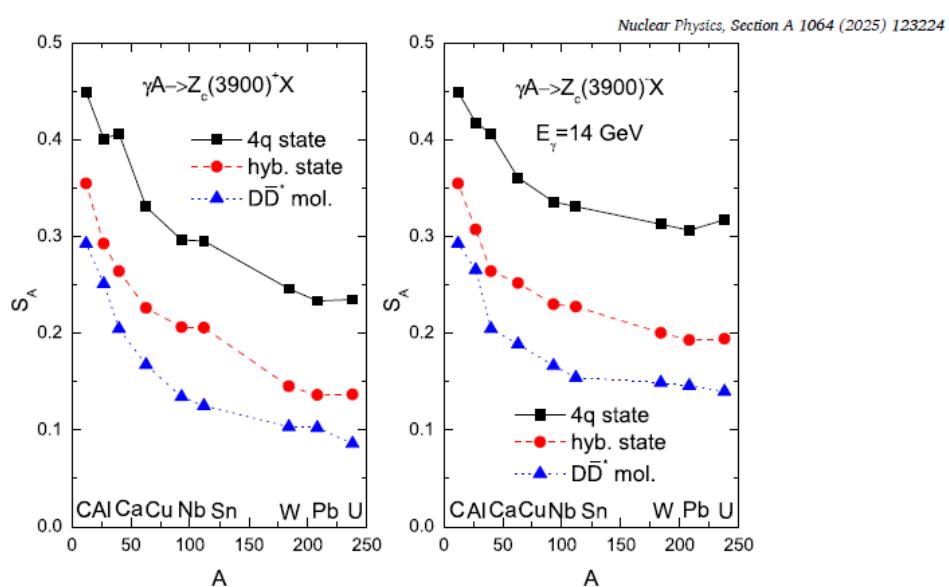


Рисунок 1. Прозрачность ядер  $S_A$  для  $Zc(3900)$  мезонов, рожденных в прямых взаимодействиях первичных фотонов с внутриддерными нуклонами при энергии первичных фотонов 14 ГэВ, в зависимости от массового числа ядра-мишени в различных предположениях о внутренней структуре этих мезонов (указано на рисунке).

**Публикации:**

1. E. Ya. Paryev. Photon-induced production of the exotic charged charmonium-like state  $Zc(3900)$  off nuclear targets and its internal structure. Nucl. Phys. A 1064 (2025) 123224, arXiv: 2506.00944 [hep-ph].

**Научный руководитель работы: Парьев Эдуард Яковлевич**

эл. почта: [paryev@inr.ru](mailto:paryev@inr.ru)

**ПНФИ 1.3.3.1. Физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий.**

**Определение компонент спектра антинейтрино ядерного реактора для мониторинга активной зоны ядерного реактора**

Энергетический спектр антинейтрино ядерного реактора состоит из трех основных частей:

$$\rho(E) = {}^{fiss}\rho(E) + {}^{Pu}\rho(E) + {}^{SF}\rho(E), \quad (1)$$

где  ${}^{fiss}\rho(E)$  – спектр, образованный осколками деления;  ${}^{Pu}\rho(E)$  – спектр от бета-распадов  $^{239}\text{U}$  и  $^{239}\text{Np}$  при образовании  $^{239}\text{Pu}$ ;  ${}^{SF}\rho(E)$  – спектр антинейтрино от долгоживущих изотопов, содержащихся в отработанном топливе, хранящемся в бассейне рядом корпусом реактора.

Проведено описание экспериментально полученных спектров антинейтрино в ряде экспериментов с высокой статистикой. Описание проводилось с использованием расчетной методики, разработанной в ИЯИ РАН. Получены четыре компоненты спектра антинейтрино ядерного реактора от делящихся изотопов урана и плутония, которые входят в состав спектра любого реактора. Полученные спектры антинейтрино позволяют предсказывать поток антинейтрино от любого реактора в любой момент его работы.

Возможно применение при анализе состава активной зоны ядерного реактора.

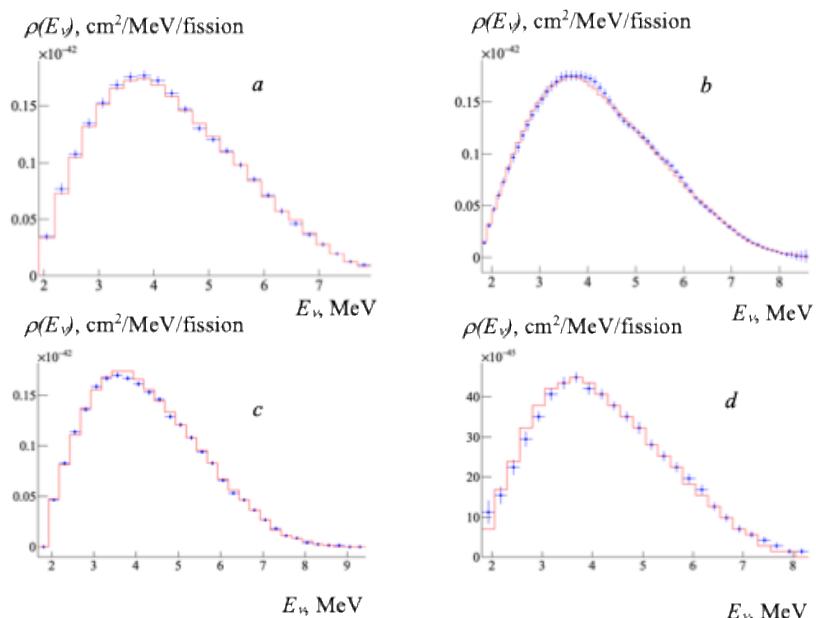


Рисунок 1. Экспериментальные спектры антинейтрино, взвешенные с сечением: (a) Daya Bay, (b) RENO, (c) Double Chooz, (d) PROSPECT. Красная линия – спектр ИЯИ РАН.

**Публикации:**

1. А.П. Власенко, П.Ю. Наумов, С.В. Ингерман, В.В. Синев, *Спектры антинейтрино  $^{235,238}\text{U}$  и  $^{239,241}\text{Pu}$  из измерения эксперимента Double Chooz*. Ядерная физика, т. 87, № 1, с. 79-89, 2024.

**Координатор работ: Синев Валерий Витальевич**

эл. почта: [vsinev@inr.ru](mailto:vsinev@inr.ru)

тел. +7 903 783 9034

**ПНФИ 1.3.3.1.** Нейтринная физика, астрофизические и космологические аспекты ядерной физики и физики элементарных частиц; **1.3.3.2.** Фундаментальная физика атомного ядра; **1.3.3.7.** Ядерно-физические методы в медицине, энергетике, материаловедении, биологии, экологии, системах безопасности и других областях.

**Первый совместный осцилляционный анализ атмосферных и ускорительных нейтринных данных, полученных в экспериментах Супер-Камиоканде и T2K**

В 2025 году был получен первый результат совместного осцилляционного анализа данных, накопленных в эксперименте Супер-Камиоканде с атмосферными нейтрино и в эксперименте T2K с ускорительными нейтрино. В анализе использовались данные Супер-Камиоканде, набранные с атмосферными нейтрино в течение 3244.4 суток и данные T2K с пучками мюонных нейтрино и антинейтрино, сформированными на ускорителе J-PARC (Япония), для интегрального потока 30-Гэвных протонов на мишени  $36.0 \times 10^{20}$ . Полученные ограничения на СР нечетную фазу  $\delta_{CP}$  показаны на рис.1.

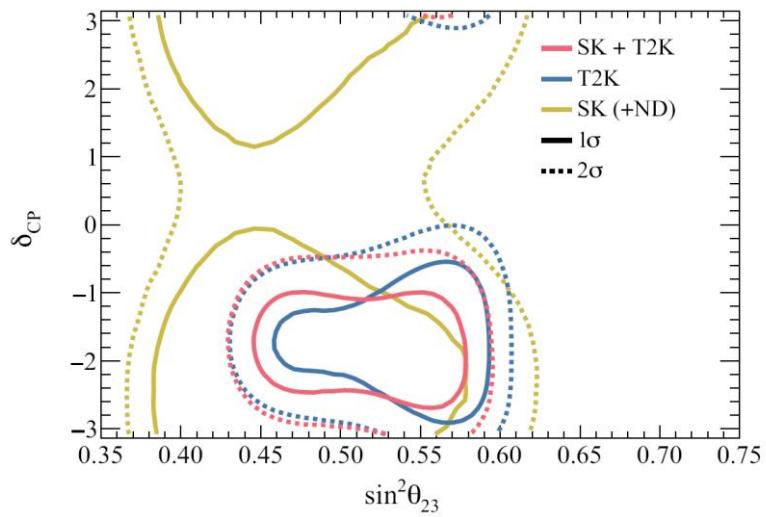


Рис.1. Доверительные интервалы ( $\sin^2\theta_{23}$ ,  $\delta_{CP}$ ), полученные в экспериментах Супер-Камиоканде (SK), T2K и в комбинированном анализе SK+T2K.

В результате совместного анализа сохранение комбинированной СР четности в лептонном секторе Стандартной Модели (нейтринных осцилляциях) было исключено со статистической значимостью  $2\sigma$ . Полученный результат указывает на максимальное СР нарушение и определяет наиболее вероятное значение СР нечетной фазы  $\delta_{CP} \simeq -\pi/2$ . Также было получено, что предпочтительной (значимость  $1.2\sigma$ ) является нормальная

иерархия масс нейтрино. Полученные результаты имеют фундаментальное значение: указывают на существование нового источника СР нарушения и открывают новые возможности для объяснения одной из загадок природы - барионной асимметрии Вселенной.

**Публикации:**

Phys.Rev.Lett. 134 (2025) 1, 011801

(Коллaborации Супер-Камиоканда и T2K. Российские участники- сотрудники ИЯИ РАН и ОИЯИ)

**Координатор работ: Куденко Юрий Григорьевич**

эл.почта: [kudenko@inr.ru](mailto:kudenko@inr.ru)

**Грант РНФ № 24-12-00271 "Поиск нарушения СР симметрии и изучение свойств нейтрино с использованием 3D сегментированного детектора СуперFGD в эксперименте T2K"**

**ПНФИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий**

**Наиболее значимые результаты, имеющие инновационный потенциал**

***1.Разработка методов повышения эффективности регистрации сцинтилляционных детекторов***

Сцинтилляционные детекторы представляют собой один из наиболее распространённых и универсальных типов радиационных детекторов, применяемых для регистрации заряженных частиц, фотонов и нейтронов. В данной работе разработана конструкция многослойного сцинтилляционного детектора, основанного на пластиковом световоде, в объёме которого размещаются пластины сцинтиллятора. Такой подход позволяет существенно повысить эффективность регистрации за счёт увеличения активного объёма сцинтилляционного материала. Предложенная конструкция адаптирована для изготовления с использованием аддитивных технологий, таких как стереолитография (SLA) и цифровая световая проекция (DLP). Применение этих методов снижает стоимость производства, повышает воспроизводимость и открывает возможность создания как компактных детекторов для персональной дозиметрии, так и устройств сложной геометрии для задач физики высоких энергий и физики конденсированного состояния. Также разработан метод повышения эффективности регистрации, основанный на использовании нейтронного отражателя. Размещение пластиковой пластины за детектором приводит к рассеянию части прошедших нейтронов и их возврату в активный объём, что увеличивает вероятность последующего взаимодействия нейтронов со сцинтиллятором. Применение данного подхода позволяет повысить эффективность регистрации тепловых нейтронов примерно на 12%, оставаясь при этом технологически простым и экономически доступным решением. Разработанные технологии соответствуют уровню УГТ4.

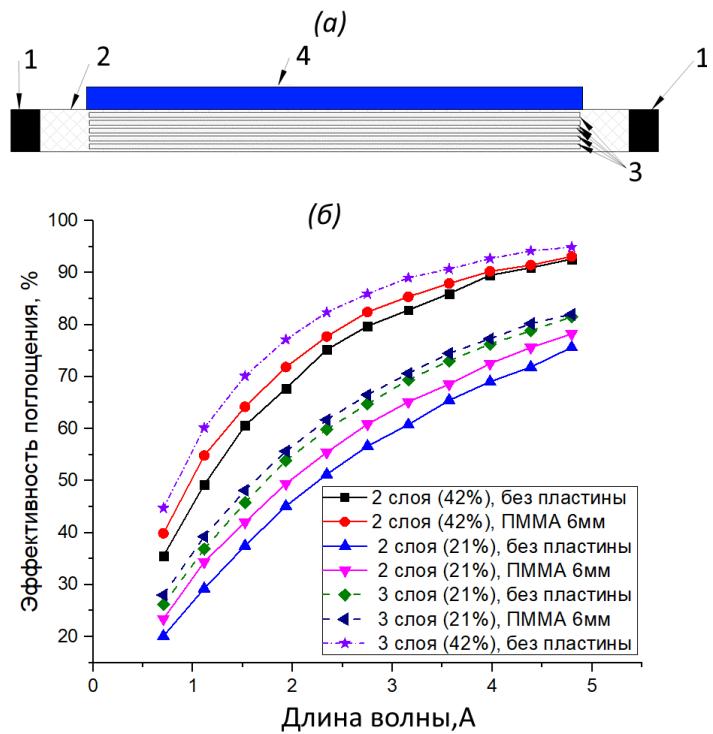


Рис. 1 – (а) -конструкция детектора, где 1 – фотодетектор, 2 световод, 3- слои сцинтиллятора, 4 отражатель;(б)- Зависимость спектральной эффективности поглощения нейтронов в слоях сцинтиллятора от толщины тыловой ПММА-пластины

**Координаторы работ:** Садыков Равиль Асхатович, Трунов Дмитрий Николаевич  
эл.посы: rsadykov@inr.ru  
тел. +7-926-883-91-34

1. Патент № 2834905 С1 Российская Федерация, МПК G01T 3/06. Сцинтилляционный детектор тепловых нейтронов с отражателем нейтронов: заявл. 20.08.2024 : опубл. 17.02.2025 / Д. А. Бучный, В. С. Литвин, Д. Н. Трунов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

2. Патент № 2842597 С2 Российская Федерация, МПК G01T 3/06. микрощелевой гомогенный световод для сбора фотонов со сцинтиллятора: заявл. 16.06.2022 : опубл. 30.06.2025 / Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, Р. А. Садыков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

**ПНФИ 1.3.3.6.** Развитие методов детектирования элементарных частиц, атомных ядер и ионизирующего излучения, методов рентгеновской и нейтронной оптики

**В рамках проекта «Разработка и создание современных экспериментальных станций источников импульсного или постоянного типа» Министерства науки и высшего образования РФ, контракт 075-10-2021-115**

## ***Способ безопасной оценки дезактивируемости материалов для средств индивидуальной защиты (СИЗ)***

Материал верхней оболочки СИЗ должны проверяться на дезактивируемость в соответствии с требованием ГОСТ Р 53264-2019. Метод определения дезактивируемости, установленный ГОСТ 27708-88, основан на измерении уровней радиоактивного загрязнения образцов до и после дезактивации с использованием радиоактивных веществ открытого типа, для чего необходимо обеспечить соответствующую радиационную безопасность и проводить утилизацию радиоактивных отходов. Такой метод отрицательно сказываются на экологии, экономических показателях, что служит серьёзным препятствием для применения в легкой промышленности.

Разработанный в ИЯИ РАН способ, **не имеющий аналогов**, показал, что коэффициент дезактивации, как один из показателей адгезии, можно оценивать новым безопасным способом с использованием имитации – замены опасного компонента измерения на безопасный. При новом способе имитируется радиоактивное загрязнение путём нанесения на испытуемую поверхность безвредного пылевидного вещества, а адгезия определяется методом липкой ленты. Испытание основано на снятии с поверхности образца трёх слепков: перед нанесением загрязнителя, после загрязнения поверхности перед промывкой и с загрязнённой поверхности после промывки (см. рис.). Изображения слепков преобразуются в цифровую форму и анализируются с помощью элементов искусственного интеллекта для вычисления показателя адгезии, как оценки дезактивируемости материала СИЗ.

Таким образом открывается возможность создать в ИЯИ РАН лабораторию по экологически безопасной аттестации на дезактивируемость материалов, предназначенных для изготовления спецодежды.

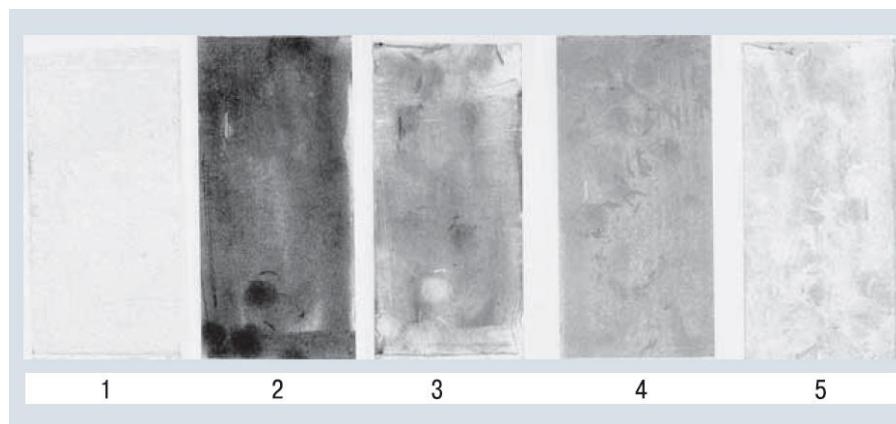


Рисунок. Изображения слепков материала «Т9» внешней оболочки РЗК, выпускаемого АО «ПТС», при помощи липкой ленты. Обозначения: 1 – слепок с чистой поверхности до нанесения загрязнителя; 2 – слепок с поверхности после нанесения загрязнителя; 3 – повторный слепок с того же места после снятия слепка № 2; 4 – слепок с остатками загрязнителя после обработки поверхности моющим средством; 5 – повторный слепок с того же места после снятия слепка № 4.

**Координатор работ:** Лифанов Михаил Николаевич  
**Телефон:** +7(926)204-24-94  
**e-mail:** mikelifanov@bk.ru

**Публикация:**

Лифанов М.Н., Белянский К.Л. Способ безопасной оценки дезактивируемости материалов для средств индивидуальной защиты (СИЗ) // Патент №2852345 от 8.12.2025 г.

**ПФНИ:** 1.3.3.7 Ядерно-физические методы в медицине, энергетике, материаловедении, биологии, экологии, системах безопасности и других областях

И.о. директора ИЯИ РАН,  
член-корреспондент РАН

Либанов М.В.



Протокол заседания Ученого совета ИЯИ РАН от «10» декабря 2025 г. №7