

## 1. В Обсерватории Telescope Array зарегистрирована космическая частица экстремально высокой энергии

В Обсерватории Telescope Array зарегистрирована частица космического происхождения с чрезвычайно высокой энергией 244 ЭэВ. С высокой степенью достоверности установлено, что частица не может быть гамма-квантом. Направление прихода частицы соотнесено с картой внегалактических объектов и установлено, что частица пришла из пустой области в локальной Вселенной, что указывает на ее сильное отклонение от источника и, следовательно, на то, что частица с высокой вероятностью является тяжелым атомным ядром. Это в свою очередь указывает на то, что ее источник, хотя и не идентифицирован явно, находится относительно близко к Галактике Млечного Пути.

Ученые из группы ИЯИ РАН внесли решающий вклад в физическую интерпретацию наблюдаемого события: установив отсутствие корреляции частицы с внегалактическими объектами и вычислив расстояние до ее предполагаемого источника, а также исключив возможность того, что частица является гамма-квантом.

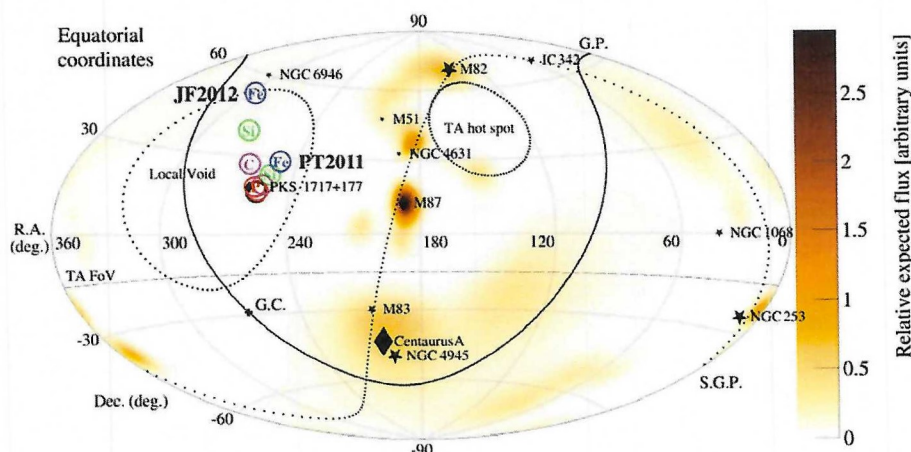


Рис.1. Направление прихода события (черный кружок) на карте локальных источников в экваториальных координатах. Цветными кружками отмечены направления на источник в предположении различных типов первичных частиц (p, C, Si, Fe) и моделей галактического магнитного поля.

### Публикации:

1. R.U.Abbasi et al. (Telescope Array collaboration), An extremely energetic cosmic ray observed by a surface detector array, Science, будет опубликована 24 ноября 2023 года, doi:10.1126/science. abo5095

**Координатор работ:** Кузнецов Михаил Юрьевич

тел.: +7(906)7604741

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

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

**Тема госзадания FFWS-2022-0006, рег. номер 122041100011-7: "Нейтринная астрофизика, нейтринная, гамма и гравитационно-волновая астрономия, физика космических лучей, физика и техника нейтринных телескопов в низкофонных подземных и подводных лабораториях "**

## 2. Идентичность поляризационных корреляций аннигиляционных фотонов в запутанном и декогерентном квантовых состояниях

Квантовая запутанность была впервые экспериментально исследована около 70 лет назад в системе двух фотонов, образующихся при позитрон-электронной аннигиляции в покое. Наблюдаемые азимутальные корреляции рассеянных в комптоновских поляриметрах фотонов полностью соответствовали теоретическим предсказаниям, опирающимся на запутанное квантовое состояние двух аннигиляционных фотонов. При этом предполагалось полное отсутствие корреляций для декогерентных фотонов, образующихся при взаимодействии начальных аннигиляционных фотонов с окружающей средой. Однако недавние теоретические расчеты парадоксальным образом указали на возможное равенство сечений комптоновского рассеяния пар как запутанных, так и находящихся в смешанном сепарабельном состоянии фотонов. В ИЯИ РАН была создана экспериментальная установка, позволяющая параллельно исследовать поляризационные корреляции при комптоновском рассеянии фотонов в двух, запутанном и декогерентном квантовых состояниях. Декогерентные квантовые состояния обеспечивались предварительным комптоновским рассеянием начального аннигиляционного фотона в сцинтилляционном детекторе. Были измерены как азимутальные корреляции, так и S-функция в неравенстве Белла в зависимости от относительного азимутального угла между двумя комптоновскими поляриметрами. Данные зависимости (см. рис.1) оказались идентичными для обоих квантовых состояний. Обнаруженный эффект привел к пересмотру возможностей реализации квантовой запутанности в позитрон-эмиссионных томографах нового поколения, в которых предполагается использовать азимутальные корреляции для подавления случайных и рассеянных фоновых событий.

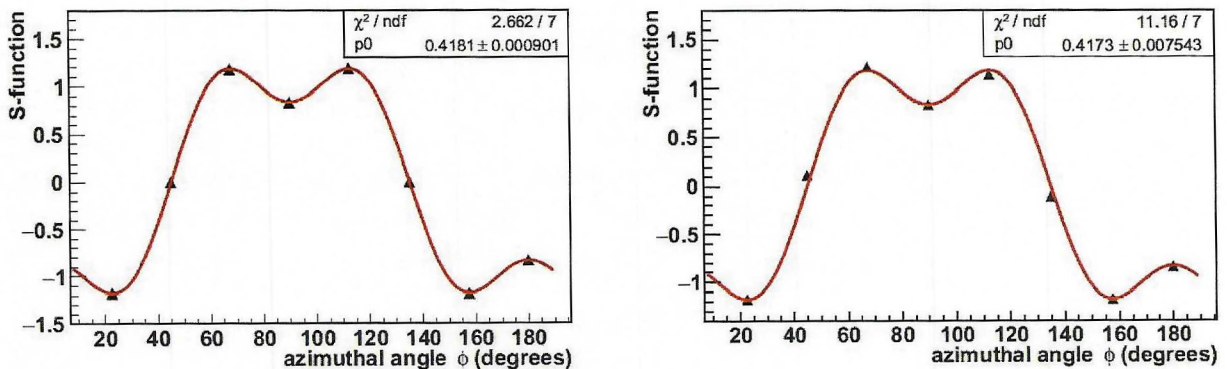


Рисунок 1. Зависимость S-функции в неравенстве Белла от относительного азимутального угла между комптоновскими поляриметрами для запутанных (слева) и декогерентных (справа) аннигиляционных фотонов. Экспериментальные точки аппроксимированы теоретически ожидаемой для запутанного состояния функцией. Нормировочный параметр  $p_0$  аппроксимирующей функции совпадает для обоих типов квантовых состояний.

### Публикации:

1. 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:** **Ивашкин Александр Павлович**

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

тел.: +7 (909)-625-34-47

ПНФИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

### 3. Поиск легкой темной материи в эксперименте NA64 в ЦЕРНе

Согласно одной из популярных сегодня гипотез, темная материя во Вселенной могла бы состоять из легких частиц  $\chi$  с массами ниже электрослабой шкалы, обладающих новым слабым взаимодействием с частицами обычной материи, переносимым векторным бозоном, т. н. темным фотоном  $A'$ . Поиск рождения таких частиц  $\chi$  в столкновениях электронов с энергией 100 ГэВ с тяжелыми ядрами активной мишени был предпринят в эксперименте NA64 на ускорителе SPS в ЦЕРНе. На основе накопленных в течение сеансов 2016 - 2022 гг. данных, соответствующих примерно  $10^{12}$  электронам, упавшим на мишень, впервые была исследована область пространства параметров легкой темной материи скалярного и фермионного типа. Событий, свидетельствующих о рождении частиц темной материи, пока не было найдено, что позволило установить лучшие в мире ограничения на константу связи темного фотона  $A'$  с обычными фотонами для масс  $m_{A'} \lesssim 0,35$  ГэВ и исключить скалярную и майорановскую темную материю с константой связи  $\chi - A'$  ниже 0,1 для области масс  $0,001 \lesssim m_\chi \lesssim 0,1$  ГэВ.

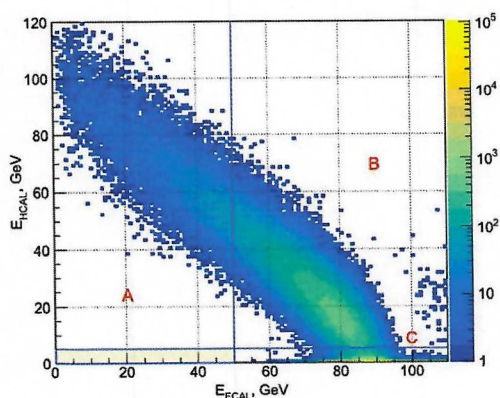


Рисунок 1 – Распределение событий в плоскости энергий  $E_{ECAL}$ - $E_{NCAL}$ , оставшихся после применения всех критериев отбора. Событий в сигнальной области (выделена серым) не было обнаружено.

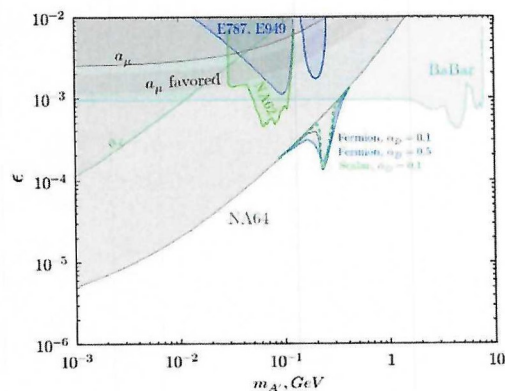


Рисунок 2 – Полученная в эксперименте NA64 область исключения параметров в плоскости  $(m_{A'}, \epsilon)$ . Также показаны ограничения, полученные в экспериментах E787, E949, BABAR и NA62, а также из измерений аномального магнитного момента электрона  $a_e$  и мюона  $a_\mu$ .

#### Публикации:

Yu.M. Andreev et al. (NA64 Collaboration). Search for Light Dark Matter with NA64 at CERN // Phys. Rev. Lett. 131, 161801 (2023). DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.161801

**ИЯИ РАН:** Ю.М. Андреев, С.Н. Гниненко, А.В. Дерменев, Д.В. Кирпичников, М.М. Кирсанов, А.Е. Корнеев, Л.В. Кравчук, Н.В. Красников, И.В. Глисова, А.Н. Торопин

Эксперимент NA64: ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, НИЦ КИ ИФВЭ, ОИЯИ, ТПУ, ФИАН (Россия), Университет Лондонского колледжа (Великобритания), Университет Бонна (Германия), Университет Патраса (Греция), Институт физики частиц (Испания), Национальный институт ядерной физики, Университет Генуи (Италия), Университет Йорка (Канада), Технический университет Федерико (Чили), Университет Андреса Белло (Чили),

Университет Ла Серена (Чили), Институт САФИР Миллениум (Чили), Институт физики частиц и астрофизики (Швейцария), ЦЕРН

**Руководитель работ: Гниненко Сергей Николаевич**

эл.почта: [Gninenko@inr.ru](mailto:Gninenko@inr.ru); [Sergei.Gninenko@cern.ch](mailto:Sergei.Gninenko@cern.ch)

тел.: 8(495)850-42-50

ПНФИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

Тема госзадания FFWS-2022-0001, рег. номер 122041100249-4 "Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология"

#### 4. *Выполнена перенормировка одноточечной функции распределения вероятности усредненной плотности материи в сферических ячейках*

Построена модель для одноточечной функции распределения вероятности усредненной плотности материи в сферических ячейках. Настоящее вычисление включает в себя экспоненциальную часть, которая определяется сферическим коллапсом, и префактор, возникающий в результате интегрирования возмущений вокруг решения в седловой точке. Разработана новая схема перенормировки коротковолновых возмущений над нелинейным решением с помощью моделирования эффективного тензора энергии-импульса коротковолновых возмущений. Найдено отличное согласие данной модели с результатами численных симуляций для радиусов ячеек  $\geq 10$  Мпк/h; где  $h=H_0/100$  км/с/Мпк,  $H_0$  - постоянная Хаббла. Для меньших радиусов были обнаружены расхождения на уровне нескольких процентов, которые связаны с двухпетлевыми поправками к модели. Разработанная модель может быть использована при анализе данных крупномасштабной структуры Вселенной (KiDS, DES, "Евклид", Обсерватория имени Веры Рубин). Использование нового метода способно улучшить ограничения на космологические параметры по сравнению с вычислениями на базе стандартной теории возмущений.

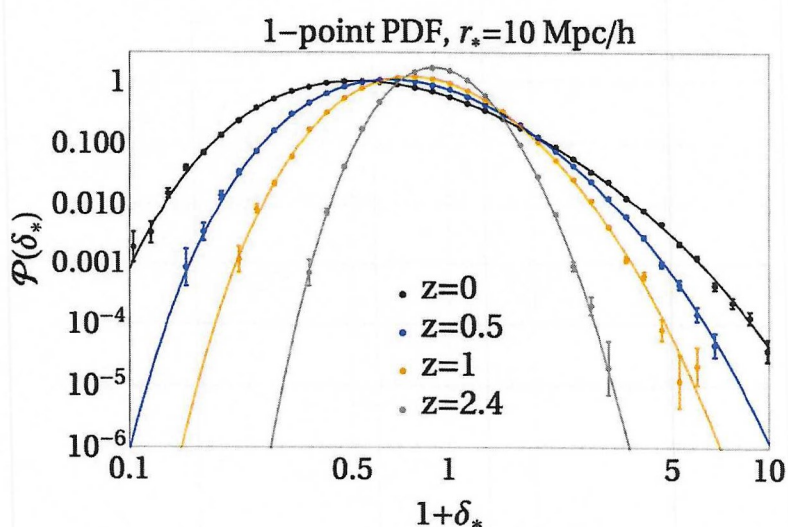


Рис. 1. Сравнение одноточечной функции плотности вероятности, рассчитанной с помощью теоретической модели (линии) и Монте-Карло моделирования (точки).

#### **Публикации:**

Anton Chudaykin, Mikhail M. Ivanov and Sergey Sibiryakov Renormalizing one-point probability distribution function for cosmological counts in cells, JCAP 08 (2023) 079.

**Координатор: Чудайкин Антон Сергеевич**

эл.почта: anchudaykin@gmail.com

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

### ***5. Разработаны алгоритмы машинного обучения для анализа данных эксперимента Байкал-GVD***

Восстановление характеристик нейтрино, регистрируемых в нейтринном телескопе Байкал-GVD, является сложной алгоритмической задачей. В рамках работ, были разработаны нейронные сети для улучшения качества реконструкции регистрируемых событий по следующим характеристикам:

Разработана нейронная сеть для подавления шумовых срабатываний оптических модулей эксперимента Байкал-GVD. На данных, симулирующих работу детектора, целевые метрики оказались на несколько процентов лучше, чем для стандартных алгоритмов. Также фильтрация шумов с помощью нейронной сети позволила улучшить угловое разрешение событий, в среднем, на 0.2 градуса.

Разработана нейронная сеть для разделения ливней, индуцированных широкими атмосферными ливнями (ШАЛ), и нейтрино. На одно нейтрино-индуцированное событие приходится примерно один миллион ШАЛ-индуцированных событий. Внедрение нейронных сетей позволило улучшить качество разделения данных событий, сохраняя большую часть экспозиции нейтринных событий. Также на основе данной нейронной сети был разработан метод для определения потока нейтрино.

Разработана графовая нейронная сеть для восстановления направления прихода нейтрино. На данных, симулирующих работу детектора, это позволило улучшить угловое разрешение событий примерно на 0.5 градуса.

**Координатор:** Харук Иван Вячеславович

**Телефон:** +7 (919) 766-94-68

**e-mail:** ivan.kharuk@phystech.edu

#### **Публикации:**

1. I. Kharuk, G. Rubtsov, G. Safronov, "Rejecting noise in Baikal-GVD data with neural networks" // JINST 18 (2023) 09, P09026 (DOI: 10.1088/1748-0221/18/09/P09026)

2. I. Kharuk, G. Safronov, A. Matseiko, A. Leonov, "Machine learning in Baikal-GVD experiment" // PoS ICRC2023 (2023), 1077 (DOI: 10.22323/1.444.1077)

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

## 6. Получено указание на существование большого количества калия в теле Земли.

Предложена новая интерпретация данных международного (с участием России) эксперимента Борексино, расположенного в подземной лаборатории Гран-Сассо в Италии. В анализ включён новый источник событий – рассеяние на электронах антинейтрино от распада радиоактивного изотопа калий-40, находящегося в теле Земли. Включение этого источника позволило получить наилучшее согласие с экспериментальными данными и определить величину потока калийных гео-антинейтрино. При этом определилась мощность потока радиогенного тепла из недр Земли от распадов калия-40, которая оказалась равной 600 ТВт (Тераватт). Существование такого большого потока тепла предсказано российской моделью «Богатая водородом Земля». Половина величины этого потока достаточна для объяснения наблюдаемого нагрева океанов, другая часть может быть поглощена увеличением размеров Земли.

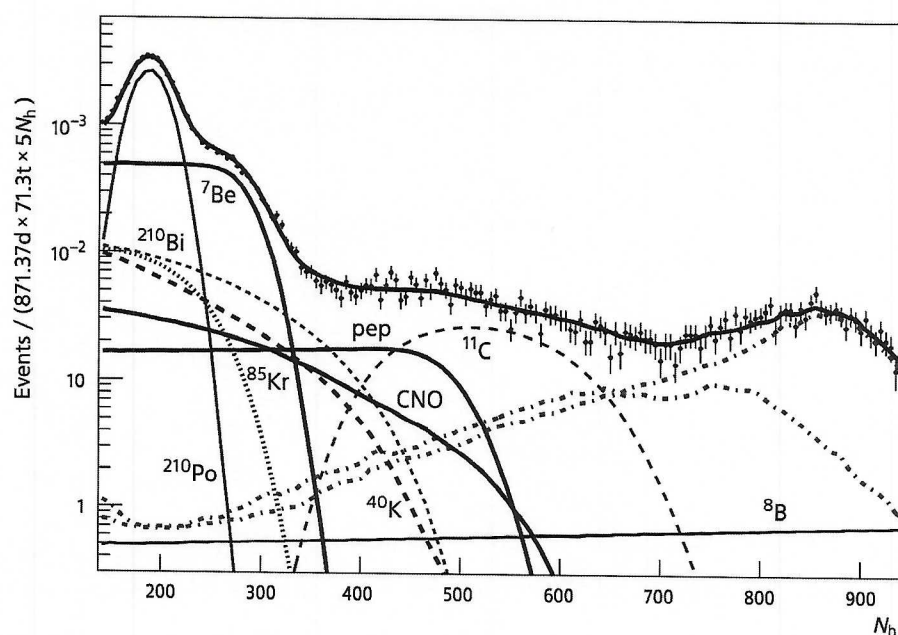


Рисунок. Зависимость числа событий от энергывыделения в детекторе Борексино.

### Публикации:

1. L. B. Bezrukov, I. S. Karpikov, A. K. Mezkhokh, S. V. Silaeva, and V. V. Sinev, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 87(7), 972 (2023).  
What Fraction of Potassium in the Earth Does the Borexino Experiment Allow.

**Координатор:** Безруков Леонид Борисович, Синёв Валерий Витальевич, ОЭФ ИЯИ РАН.  
эл.почта: [bezrukov1945@mail.ru](mailto:bezrukov1945@mail.ru), [vsinev@inr.ru](mailto:vsinev@inr.ru)

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

Работа выполнена в рамках Госзадания ИЯИ РАН. Шифр темы FFWS-2022-0006, рук. Рубцов Г.И.

## 7. Обнаружение лунно-месячных вариаций скорости счета гамма-квантов в эксперименте LVD, обусловленных распадами радона в атмосфере подземного зала

Российско-итальянский Детектор Большого Объема (LVD), расположенный в подземной лаборатории Гран Сассо, Италия, ведет поиск нейтрино от коллапсов звездных ядер в нашей галактике. Фоном эксперимента в области энергий до 3 МэВ являются нейтроны и гамма-кванты от распада дочерних ядер урана и тория. По данным детектора обнаружена модуляция скорости счета гамма-квантов, и следовательно, концентрации радиоактивного газа радона от естественной радиоактивности грунта, связанная с лунно-месячными циклами. Эта модуляция обусловлена приливной деформацией земной коры. Локально различные поля напряжений могут быть следствием изменения порового давления, связанным с подъемом глубинных потоков в земной коре. Обнаруженная гармоника, соответствует главному синодическому лунно-месячному периоду 29.53 сут. На Рисунке 1 представлены данные с 2004 по 2022 г. Фаза (максимум амплитуды) приходится на день полнолуния в пределах ошибок. Амплитуда вариаций в разные годы варьируется от 0.5 до 0.8 %.

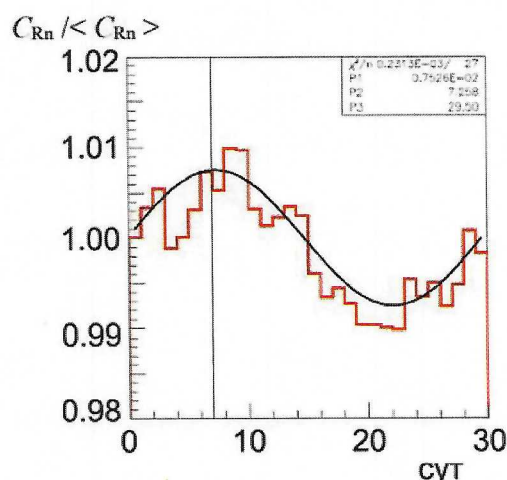


Рисунок 1. Лунно-месячные вариации скорости счета гамма-квантов  $C_{Rn}$  за период 01.01.2004–31.12.2021; деленные на среднее в год  $\langle C_{Rn} \rangle$ , Кривая – аппроксимация гармонической функцией  $f(t) = 1 + P1 \times \cos(2\pi (t - P2)/P3)$ , где  $P1$  – амплитуда,  $P2$  – фаза,  $P3$  – период модуляции.

### Публикации:

1. Н. Ю. Агафонова, Е. А. Добрынина, И. Р. Шакирьянова, Н. А. Филимонова "Периодические вариации концентрации радона в подземной Лаборатории Гран Сассо, измеренные с помощью LVD", ЖЭТФ, 2023, том 164, вып. 3 (9), стр. 386–395, DOI: 10.31857/S0044451023090079

**Координатор работ:** Агафонова Наталья Юрьевна

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

тел. +7 (916)1487665

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

**Грант РФФ** 23-22-00048 (<https://rscf.ru/project/23-22-00048/>).

8. Исследованы корреляции направлений прихода нейтринных событий на глубоководном нейтринном телескопе Baikal-GVD с высокоэнергетическими астрофизическими источниками

С вводом в апреле 2023 года двух новых кластеров рабочий объем Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD превысил в этом году значение  $\approx 0.5$  куб.км в задаче регистрации событий от нейтрино высоких энергий (свыше 100 ТэВ). Детектор содержит в своем составе 12 кластеров глубоководных гирлянд регистрирующей и управляющей аппаратуры (3456 оптических модулей) и сохраняет позицию крупнейшего нейтринного телескопа Северного полушария. При анализе данных, полученных при работе детектора в конфигурациях 2018 – 2022 годов, исследованы корреляции с радиояркими блазарами каскадных событий с энергиями, превышающими 100 ТэВ. Несмотря на то, что на текущем наборе данных не обнаружено статистически значимых эффектов, анализ указывает на ряд возможных ассоциаций как с экстрагалактическими, так и с галактическими источниками. В частности, представлен анализ наблюдаемого триплета нейтринных кандидатов в галактической плоскости, исследована его потенциальная связь с определенными галактическими источниками, рассмотрено совпадение направлений прихода каскадных событий с несколькими яркими блазарами.

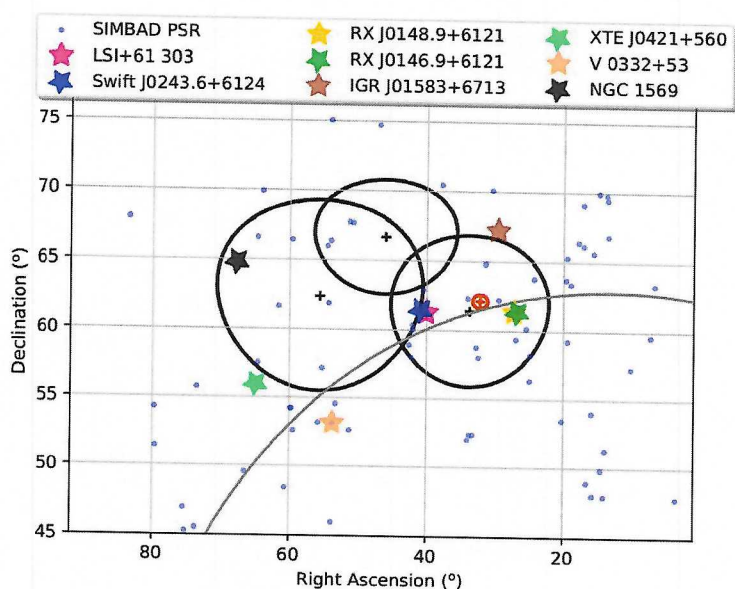


Рисунок 1. Три каскадных события Baikal\_GVD с высокой энергией GVD190216CA, GVD190604CA и GVD210716CA вблизи галактической плоскости (серая линия) и ошибки определения их направлений (черные линии). Точка статистически наиболее значимого превышения потока IceCube над изотропным в северном полушарии показана красным плюсом.

#### Публикации:

Baikal-GVD Collaboration (V.A. Allakhverdyan et al.) and N.A. Kosogorov, Y.Y. Kovalev, G.V. Lipunova, A.V. Plavin, D.V. Semikoz, S.V. Troitsky, et al., Search for directional associations between Baikal Gigaton Volume Detector neutrino-induced cascades and high-energy astrophysical sources, e-Print:2307.07327, Mon.Not.Roy.Astron.Soc., 526, 1, 942-951 (2023)

**Координатор работ:** Домогацкий Григорий Владимирович

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

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



## 9. Детектор настройки сведения пучков и определения светимости коллайдера NICA

Ожидаемое завершение работ по сооружению коллайдера NICA ставит задачи, которые необходимо решить в ближайшее время.. Во-первых, это разработка первоочередных экспериментов в новом интервале энергий сталкивающихся тяжелых ядер. Хотя такие работы были начаты в BNL, преимущество NICA заключается в обеспечении значительно большей светимости, что особенно важно для исследования редких процессов. Сотрудниками ИЯИ РАН предложен эксперимент по исследованию нуклон-нуклонных корреляций при рождении адронов в кинематической области, запрещенной для нуклон-нуклонных столкновений. Проведено моделирование и показано преимущество таких измерений перед работами на фиксированных мишенях. Вторая главная задача, это создание методики и детекторов для отладки коллайдера с целью получения максимальной светимости. Совместно с сотрудниками ЛФВЭ ОИЯИ разработан и создается детектор для определения сходимости сталкивающихся пучков и измерения светимости. Детектор представляет собой симметричную конструкцию из сцинтилляторов и будет установлен и готов для измерений к моменту запуска коллайдера до отладки основных систем установки MPD.

Участники от ИЯИ РАН: Е.В. Карпечев, А.Б.Курепин, Б.О.Лавров, В.С.Попов, Л.А.Якобнюк

Участники от ЛФВЭ ОИЯИ :А.Г.Литвиненко, В.М.Головатюк, А.И.Малахов

### Публикация:

1. А.Б.Курепин, Б.О.Лавров, “ Поиск нуклон-нуклонных корреляций при ядро-ядерных столкновениях на коллайдере NICA”, Ядерная физика 86 (2023) 230
2. S.P. Avdeev, V.M. Golovatyuk, A.I. Malakhov, A.B. Kurepin, A.G. Litvinenko, et al. “Detector for Setting Up Beam Convergence and Determining Luminosity at the Interaction Point on the MPD NICA “, Physics of Atomic Nuclei 86 (2023) 680

**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

## 10. Исследование влияния 3N-сил на величину длины *np*-рассеяния, извлекаемой в реакциях *dd*- и *nd*-развала

В кинематически полном эксперименте по исследованию реакции *nd*-развала при энергиях нейтронов 9 и 11 МэВ канала РАДЭКС ИЯИ РАН впервые получено значение  $^1S_0$  длины *np*-рассеяния. В эксперименте два нейтрона детектировались по разные стороны от направления первичного пучка. Значение  $a_{np} = -25.9 \pm 1.1$  Фм при  $E_n = 9$  МэВ и  $a_{np} = -25.1 \pm 1.3$  Фм при  $E_n = 11$  МэВ получены из сравнения экспериментальной зависимости выхода реакции *nd*-развала от относительной энергии *np*-пары с результатами моделирования (рис. 1). Эти значения близки к данным работы, полученной в SINR (Китай) по исследованию реакции *dd*-развала, но в то же время существенно отличаются от результатов работ, полученных в научных группах TUNL (США) и BONN (Германия) по исследованию реакции *nd*-развала, которые согласуются со значением  $^1S_0$  длины *np*-рассеяния, выведенной из экспериментов по свободному *np*-рассеянию (рис. 2). Полученные данные свидетельствуют об эффективном усилении *np*-взаимодействия в присутствии третьего нуклона, что в свою очередь может быть связано со значительным влиянием трехнуклонных сил.

Рис. 1. Сравнение экспериментальной зависимости выхода  $nd$ -развала от относительной энергии  $np$ -пары при энергии первичных нейтронов  $E = 9 \pm 1$  МэВ (точки) и результатов моделирования для различных значений энергии виртуального  $^1S_0$  уровня  $E_{np}$ : пунктирная кривая – 0.03 МэВ; сплошная кривая – 0.055 МэВ; штрихпунктирная кривая – 0.1 МэВ.

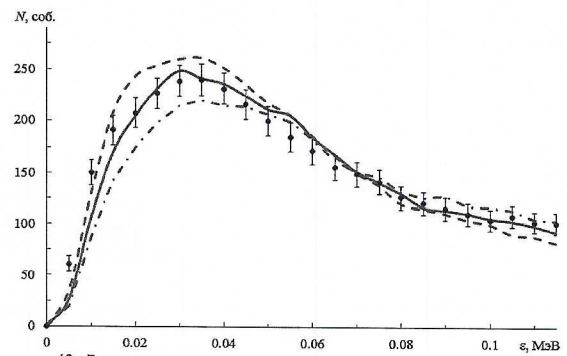
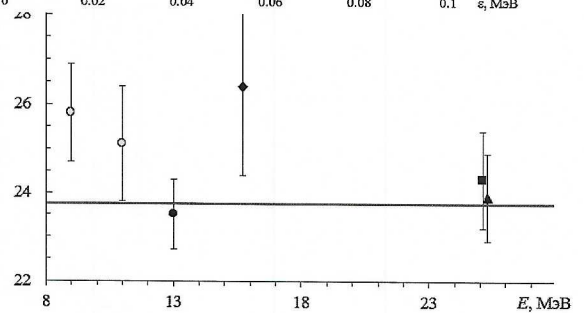


Рис. 2. Значения  $|a_{np}|$  длины рассеяния, извлеченные из экспериментов по  $nd$ - и  $dd$ -развалам в зависимости от энергии налетающих частиц. Точки – данные научных групп: ● – TUNL; ◆ – SINR; ■ – BONN; ▲ – BONN; ○ – ИЯИ. Горизонтальная линия соответствует значению  $a_{np} = -23.748 \pm 0.010$  Фм, извлеченному из экспериментов по свободному  $np$ -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, S.I. Potashev, V.V. Mitcuk // Phys. Atom. Nucl. 2023. V. 86. № 1. P. 44-50. DOI:10.1134/S106377882301026X  
**ПФНИ:** 1.3.3 Ядерная физика и физика элементарных частиц

### 11. Восстановление искаженных и зашумленных сигналов и изображений с помощью тестовых испытаний систем их обработки

Разработаны математические методы восстановления сигналов, искаженных и зашумленных при их обработке линейными стационарными (ЛС) системами, с использованием тестовых испытаний (ТИ) этих систем. В ТИ методах вместо аппаратных функций ЛС систем, как правило, относящихся к классу обобщенных, используются тестовые сигналы из класса основных функций, что позволяет осуществить не слепое восстановление сигналов без определения их функций искажений и на один-два порядка повысить эффективность применения ТИ методов по сравнению с существующими. Например, с помощью существующих методов реконструкции удавалось повысить частотный диапазон систем обработки в 1,5 - 2 раза, а на примере, представленном на Рисунке 1а, ТИ методами восстановлены сигналы с частотным диапазоном более 200 МГц, искаженные делителем напряжения с частотой среза  $\sim 1$  МГц, что соответствует расширению его эффективного частотного диапазона более, чем в 200 раз. Также ТИ методы позволяют избежать принципиальных проблем при использовании техники регуляризации для восстановления реальных недетерминированных сигналов с шумами и неопределенностями. Причем погрешность восстановления зачастую оказывается гораздо меньше, чем уровень зашумления сигналов, что проиллюстрировано на Рисунке 1б.

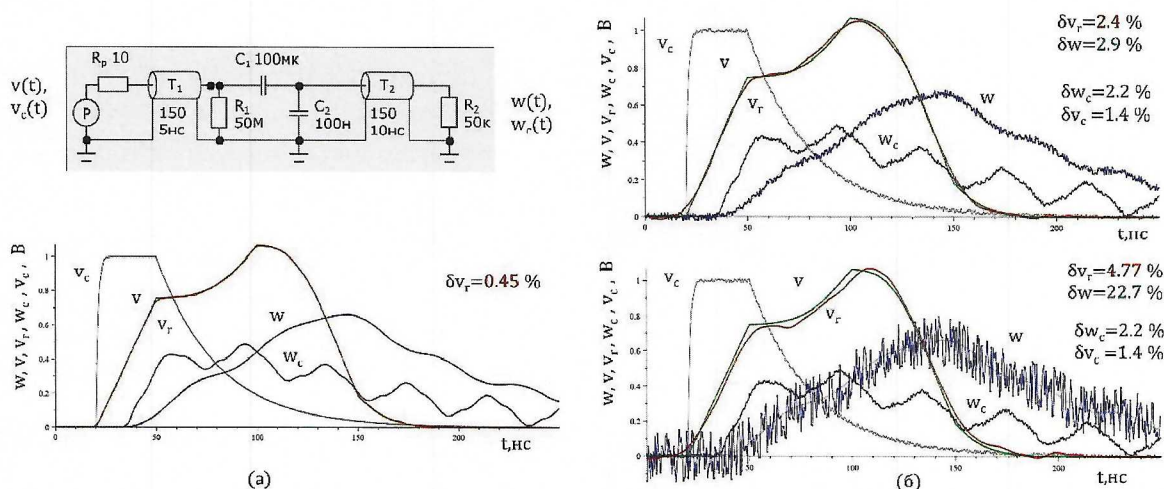


Рисунок 1. Реконструкция  $v_r$  входного сигнала  $v$  из выходного сигнала  $w$ , искаженного емкостным делителем напряжения, с использованием тестовых сигналов  $v_c$  и  $w_c$  без дополнительных шумов в данных (а) и с дополнительными шумами в данных (б). Здесь  $\delta v_r = \|v_r - v\|/\|v\|$  - погрешность реконструкции,  $\delta w = \|\Delta w\|/\|w\|$  - уровень шумов в данных.

Разработанные методы тестовых испытаний имеют большой инновационный потенциал и широкие возможности практического применения во многих областях науки и техники, связанных с измерениями, наблюдениями, приемом-передачей, преобразованием

и другой обработкой сигналов и изображений. Технический и экономический эффект от их внедрения состоит в повышении качества обработки информации математическими методами вместо создания дорогостоящей аппаратуры, ограниченной решением сложных научно-технических проблем. Методы относятся к сфере научных разработок, 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. Патентная защита алгоритмов и программ расчета не проводилась.

#### **Публикации:**

**2023 г.:**

1. Новиков-Бородин А.В. Реконструкция сигналов линейных стационарных систем с помощью тестовых измерений. – Радиотехника и электроника, т.68, № 7, 2023, с.632-649 doi: 10.31857/S0033849423070082, EDN: WPFOFD // Novikov-Borodin A.V. Test Methods for Signal Reconstruction of Linear Stationary Systems. – Journal of Communications Technology and Electronics, vol. 68, No.7, pp.732-747, 2023. doi: 10.1134/S1064226923070082
2. Novikov-Borodin A.V. Elimination of Systematic Distortions in the Signals of LTI Systems using Test Measurements. – Proceedings of 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON-2022), pp.1880-1885, 23 Jan 2023. doi: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016957.
3. Новиков-Бородин А.В. Восстановление сигналов линейных стационарных систем методами тестовых испытаний. – XXV Международная конференция "Цифровая обработка сигналов и ее применение" DSPA-2023, Москва, 29-31 марта, 2023 // РНТОРЭС: Материалы конференции DSPA-2023, с. 82-87.
4. Новиков-Бородин А.В. Восстановление искаженных и зашумленных изображений с помощью тестовых испытаний систем формирования. – XXV Международная конференция "Цифровая обработка сигналов и ее применение" DSPA-2023, Москва, 29-31 марта, 2023 // РНТОРЭС: Материалы конференции DSPA-2023, с. 221-226.

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

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

**ПНФИ:**

- 1.3.3.6. Развитие методов детектирования элементарных частиц, атомных ядер и ионизирующего излучения, методов рентгеновской и нейтронной оптики
- 1.1.2.2. Обратные и некорректно поставленные задачи, методы усвоения данных
- 1.3.2.11. Фундаментальные проблемы физической электроники
- 1.3.6.2. Развитие методов генерации, усиления, преобразования и приема электромагнитных волн

#### ***12. Установки свет сквозь стену для поиска аксионо-подобных частиц АПЧ.***

Лабораторная стратегия поиска аксионоподобных частиц (АПЧ) предполагает их рождение и обнаружение с использованием сильных электромагнитных полей. Как

правило, такие экспериментальные установки называются «свет сквозь стену» (ССС). Одним из вариантов реализации таких СССР установок является накачка электро-магнитным полем радиодапазона, компактных (сверх)-проводящих резонаторов. Установка состоит из двух полостей, разделенных непрозрачной стенкой. АПЧ могут рождаться в первом резонаторе за счет взаимодействия компонентов электромагнитного поля. Генерируемые АПЧ могут проходить сквозь стену и превращаться обратно в фотоны в полости обнаружения. Кроме того, в литературе появилось несколько экспериментальных предложений с радиорезонаторами СССР, в том числе со сверхпроводящими радиочастотными резонаторами. В работе было произведено сравнение различных установок СССР, которые используют как обычные проводящие, так и сверхпроводящие резонаторы. Другим аспектом нашего анализа является оптимизация геометрии СССР установок, которую можно корректировать для достижения более высокой чувствительности к параметрам АПЧ. Также в работе детально обсуждаются технические аспекты реализации установок СССР.

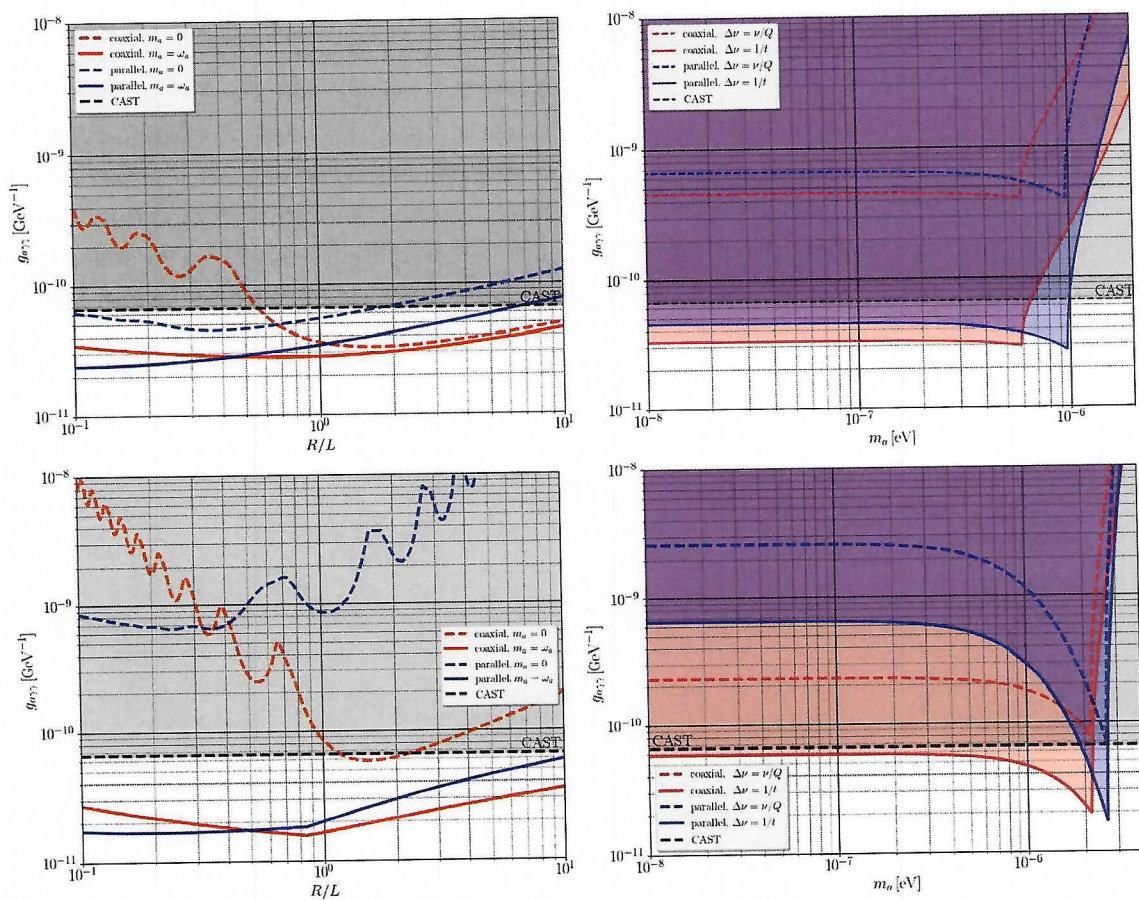


Рисунок 1. Чувствительность обычной проводящей установки (верхние панели) и сверхпроводящей установки (нижние панели) для коаксиального и параллельного расположения резонаторов. Левые панели: зависимость от отношения радиуса полостей к длине  $R/L$  для фиксированного объема. Правые панели: ожидаемая чувствительность, как функция массы АПЧ при оптимальном соотношении  $R/L$ .

Координатор работ: Петр Сатунин

эл. почта: petr.satunin@gmail.com

тел. + 7 (916) 295 81 65

Работа опубликована в журнале

### Публикации:

D. Salnikov, P. Satunin, M. Fitkevich and D. V. Kirpichnikov, "Light-Shining-Through-Wall Cavity Setups for Probing Axion-Like Particles," JETP Lett. 117 (2023) no.12, 889-897

ПНФИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

### 13. Тестирование $\phi$ мезон-ядерного потенциала в околопороговых пион-ядерных реакциях

Существование в природе экзотических ядерных объектов –  $\phi$ -мезик ядер – связанных состояний  $\phi$  мезонов и нуклонов, предсказываемое в ряде теоретических подходов, зависит от соотношения реальной и мнимой частей  $\phi$ -ядерного оптического потенциала. Для них в настоящее время имеются различные и различающиеся между собой теоретические предсказания и только одно экспериментальное значение, полученное в рамках эксперимента KEK-PS E325 (Япония). Следует отметить, что дальнейшее исследование  $\phi$ -ядерного потенциала (или сдвига массы  $\phi$  мезонов в ядерной среде) планируется провести на ускорительном комплексе J-PARC в рамках эксперимента J-PARC E16, а эксперимент J-PARC E29 будет посвящен поиску здесь  $\phi$ -мезик ядер в антипротон-ядерных реакциях.

Тем временем, коллаборация HADES (Германия) недавно впервые измерила полные сечения образования  $\phi$  мезонов на ядрах углерода и вольфрама пионами с импульсом 1.7 ГэВ/с. Анализ этих данных в рамках разработанной нами новой модели (см. Рисунок 1 выше) позволил извлечь величину реальной части  $\phi$ -ядерного потенциала при нормальной ядерной

плотности, составляющую  $\approx -(50-100)$  МэВ при реалистических величинах сечения поглощения  $\phi$  мезонов нуклонами  $\approx 12-25$  мбн, соответствующих мнимой части этого потенциала  $\approx 12-25$  МэВ. Видно, что извлечённая нами величина мнимой части  $\phi$ -ядерного потенциала при нормальной ядерной плотности в несколько раз меньше (по модулю) его реальной части, что способствует существованию в природе связанных состояний  $\phi$  мезонов и нуклонов – важный для будущих экспериментальных поисков вывод данной работы.

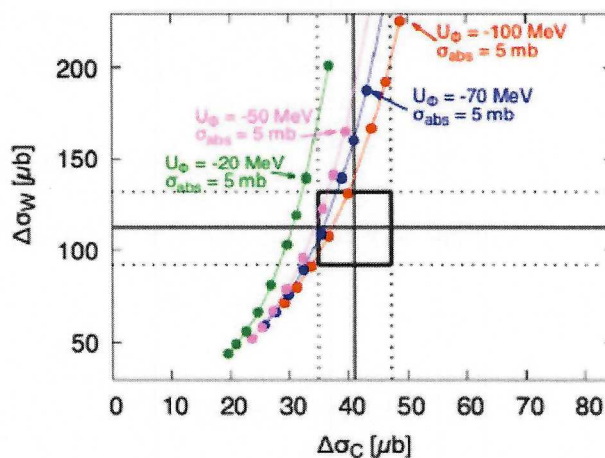


Рисунок 1. 2д-плот показывающий рассчитанные полные сечения образования  $\phi$  мезонов на ядрах углерода и вольфрама в акцептансе спектрометра HADES пионами с импульсом 1.7 ГэВ/с в предположении, что сечение поглощения  $\phi$  мезонов нуклонами составляет 0, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 мбн и глубина  $\phi$ -ядерного потенциала в центральной части ядра составляет -20, -50, -70 и -100 МэВ в сравнении с данными эксперимента HADES – прямоугольник в центре рисунка.

#### Публикации:

Е. Ya. Paryev. Testing the  $\phi$ -nuclear potential in pion-induced  $\phi$  meson production on nuclei near threshold. Nucl. Phys. A 1032 (2023) 122624, arXiv: 2212.13778 [nucl-ex].

**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.**

#### *14. О возможности наблюдения двухпиковой структуры LHCb пентакваркового резонанса $P_{cs}(4459)^0$ со скрытым чармом и странностью $S=-1$ в околопороговых реакциях рождения чармония антикаонами на протонах и ядрах.*

Изучение экзотических адронных состояний – пентакварковых резонансов со скрытым чармом является в настоящее время одной из самых актуальных и интересных тем в адронной и ядерной физике, особенно после обнаружения коллаборацией LHCb резонансов  $P_{cs}(4380)^+$  и  $P_{cs}(4450)^+$  в распадах  $\Lambda_b^0 \rightarrow K-(J/\psi p)$  и далее вместо них, используя улучшенный анализ, пентакварковых состояний  $P_{cs}(4312)^+$ ,  $P_{cs}(4440)^+$  и  $P_{cs}(4457)^+$ . Совсем недавно эта коллаборация открыла новый узкий пентакварк  $P_{cs}(4337)^+$  в распадах  $B_s^0 \rightarrow J/\psi p \{ \bar{p} \}$ . Эти резонансы имеют минимальное кварковое содержание  $|uudc\bar{s}\rangle$ , отличающееся от обычного трехкваркового (для барионов), предсказываемого “наивной” кварковой моделью. Их структура в настоящее время пока неизвестна: то ли это плотно связанные истинные пятикварковые состояния, то ли слабосвязанные молекулярные  $\Sigma_c^+ \{ \bar{D}^0 \}$ ,  $\Sigma_c^+ \{ \bar{D}^{*0} \}$  образования. Совсем недавно коллаборацией LHCb был открыт другой теперь уже “странный” пентакварк  $P_{cs}(4459)^0$  в распадах  $\Xi_b^- \rightarrow K-(J/\psi \Lambda)$  с минимальным кварковым составом  $|udsc\bar{s}\rangle$ . Его внутренняя структура (и квантовые числа) также неизвестны. То ли это истинное пентакварковое состояние, то ли молекулярное состояние типа  $\Xi_c \{ \bar{D}^* \}$ . Более того, дополнительный анализ имеющихся данных показал, что этот пентакварк может иметь двух-пиковую структуру – состоять из двух узких резонансов  $P_{cs}(4455)^0$  и  $P_{cs}(4468)^0$ . Однако они не позволяют в настоящее время подтвердить или опровергнуть эту гипотезу.

В рамках данной гипотезы, нами была изучена возможность наблюдения этой структуры, а также второго недавно открытого коллаборацией LHCb “странного” пентакварка  $P_{cs}(4338)^0$  в других реакциях – в реакциях рождения  $J/\psi$  мезонов антикаонами на протонах и ядерных мишенях вблизи массового порога  $J/\psi \Lambda$ . Впервые показано, что такая возможность существуют как в реакциях на протонной мишени, так и в реакциях на ядерных мишенях (см. прилагаемый выше рисунок). Сделаны предсказания для наблюдаемых. На их основе произведена оценка числа полезных и фоновых событий, позволяющая сделать важный вывод о возможности проведения на ускорительном комплексе J-PARC (Япония, K10 beam line) соответствующего эксперимента. Полученная информация будет способствовать существенному улучшению наших знаний о структуре адронов и низкоэнергетической КХД.

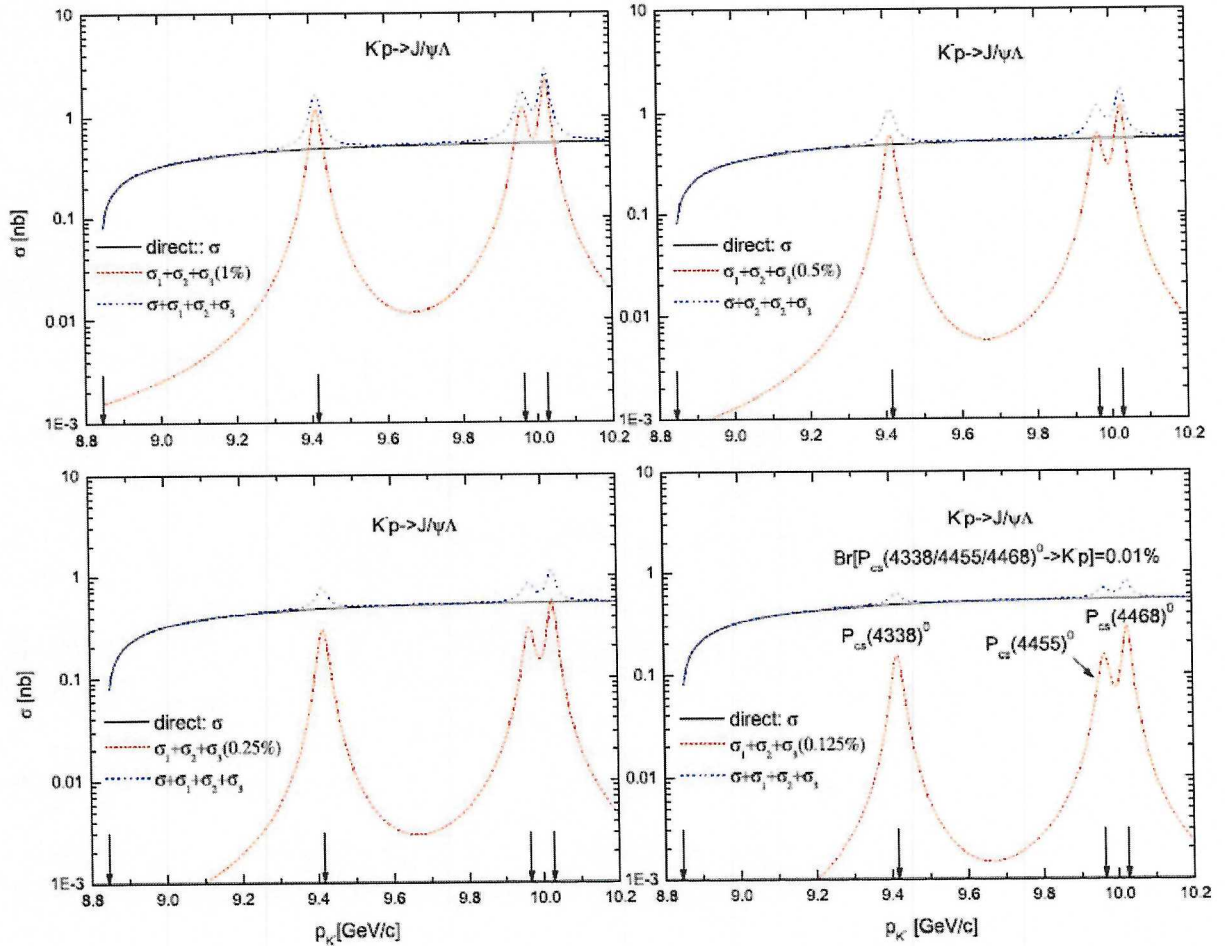


Рисунок 1. Нерезонансное полное сечение реакции  $K^-p \rightarrow J/\psi\Lambda$  (сплошная черная кривая); некогерентная сумма (пунктирная голубая кривая) этого сечения и полного сечения (штриховая красная кривая) резонансного образования  $J/\psi$  в процессах  $K^-p \rightarrow P_{cs}(4338)^0 \rightarrow J/\psi\Lambda$ ,  $K^-p \rightarrow P_{cs}(4455)^0 \rightarrow J/\psi\Lambda$  и  $K^-p \rightarrow P_{cs}(4468)^0 \rightarrow J/\psi\Lambda$ , предполагая, что резонансы  $P_{cs}(4338)^0$ ,  $P_{cs}(4455)^0$  и  $P_{cs}(4468)^0$  имеет спин-четность квантовые числа  $J^P=(1/2)^-$ ,  $J^P=(1/2)^-$  и  $J^P=(3/2)^-$  и распадается по каналам  $K^-p$  и  $J/\psi\Lambda$  с вероятностями 0.01% и 1, 0.5 и 0.25, 0.125% (соответственно, верхние левая и правая панели и нижние левая и правая панели) в зависимости от начального импульса пучка антикаонов в лабораторной системе. Левая и три правые стрелки указывают, соответственно, порог реакции  $K^-p \rightarrow J/\psi\Lambda$  и “резонансные” импульсы 9.417, 9.965 и 10.026 ГэВ/с.

#### Публикации:

Е. Я. Paryev. On the possibility of testing the two-peak structure of the LHCb hidden-charm strange pentaquark  $P_{cs}(4459)^0$  in near-threshold antikaon-induced charmonium production on protons and nuclei.

Nucl. Phys. A 1037 (2023) 122687, arXiv: 2304.03978 [hep-ph].

**Научный руководитель работы: Парьев Эдуард Яковлевич**

эл.почта: paryev@inr.ru

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



**15. Получены спектры антинейтрино изотопов урана и плутония, составляющих топливо ядерных реакторов, которые могут использоваться для дистанционной диагностики активной зоны**

Точные спектры антинейтрино делящихся изотопов требуются для диагностики активной зоны ядерного реактора. Получены новые спектры антинейтрино делящихся изотопов, составляющих топливо ядерного реактора. Использовалась комбинированная методика: расчет спектров антинейтрино и подгонка их к полученным в эксперименте на Ровенской АЭС в 80-х гг. прошлого века. Вычисленные с этими спектрами сечения делящихся изотопов хорошо описывают экспериментально полученное сечение в эксперименте Double Chooz  $^{DC}\sigma_f = (5.71 \pm 0.06) \times 10^{-43}$  см<sup>2</sup>/деление. Полученное по расчетным спектрам сечение при том же составе активной зоны ядерного реактора  $^{INR}\sigma_f = (5.82 \pm 0.12) \times 10^{-43}$  см<sup>2</sup>/деление, что находится в хорошем согласии с экспериментальным значением. Также данные спектры предсказывают с такой же точностью и другие наиболее точные экспериментальные сечения, полученные в Daya Bay и RENO. Полученные спектры могут составить основу нейтринной диагностики ядерных реакторов.

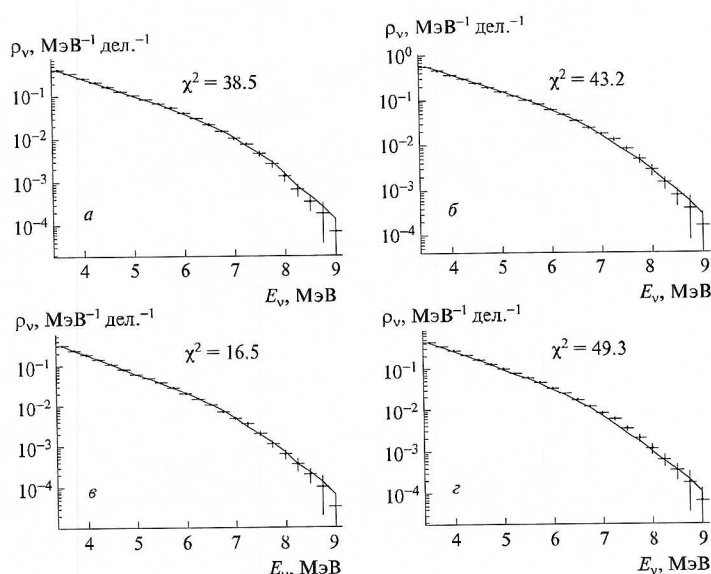


Рисунок 1. Результат подгонки экспериментальных спектров антинейтрино из [12] расчетными: а — <sup>238</sup>U, б — <sup>235</sup>U, в — <sup>241</sup>Pu, г — <sup>239</sup>Pu. Точки с ошибкой — экспериментальные спектры, кривая — подгоночный расчетный спектр.

**Публикации:**

1. А.П. Власенко, П.Ю. Наумов, С.В. Силаева, В.В. Синева. Новые спектры антинейтрино делящихся изотопов ядерного топлива: эксперимент и расчет. ЯФ 86, 24, 2023.

**Координатор работ: Синева Валерий Витальевич**

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

тел. +7 (903)7839034

**ПНФИ 1.3.3.3. Нейтринная физика, астрофизические и космологические аспекты ядерной физики и физики элементарных частиц. 1.3.3.7. Ядерно-физические методы в медицине, энергетике, материаловедении, биологии, экологии, системах безопасности и других областях**

## 16. Измерение инклюзивных сечений рождения состояний кваркония в $pp$ -столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 5.02$ ТэВ на установке ALICE (ЦЕРН).

Проведены измерения инклюзивных сечений рождения состояний кваркония  $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$ ,  $\Upsilon(1S)$ ,  $\Upsilon(2S)$  и  $\Upsilon(3S)$  на установке ALICE в  $pp$ -столкновениях при энергии  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ. Анализ проведен для димюонного канала распада для передней быстроты в диапазоне  $2.5 < y < 4$ . Полные сечения и дифференциальные сечения в зависимости от поперечного момента ( $p_T$ ) и быстроты ( $y$ ) получены для  $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$ ,  $\Upsilon(1S)$  и для отношения сечений  $\psi(2S)$  к  $J/\psi$ . Впервые измерены сечения для трех  $\Upsilon$  состояний, также как и для  $\psi(2S)$ . В зависимости от  $p_T$  и быстроты ( $y$ ) при энергии  $\sqrt{s} = 5.02$  TeV для передних быстрот. Измерения также существенно расширяют опубликованные данные для  $J/\psi$  при этой энергии в связи с увеличением статистики в 12 раз и увеличением диапазона измерений поперечного импульса ( $p_T$ ) до 20 ГэВ/с. Представлено сравнение с измерениями  $pp$ -столкновений на установке ALICE при энергиях  $\sqrt{s} = 5.02, 7, 8$  и 13 ТэВ и обсуждается зависимость сечений рождения от энергии (рис.1). Измерения при разных энергиях столкновений дает возможность изучения непертурбативных аспектов рождения кваркония в различных теоретических моделях. Эти измерения также являются основой для исследования свойств кварк-глюонной плазмы, образующейся в ядро - ядерных столкновениях и для изучения эффектов холодной материи, присутствующих в протон - ядерных и ядро - ядерных соударениях.

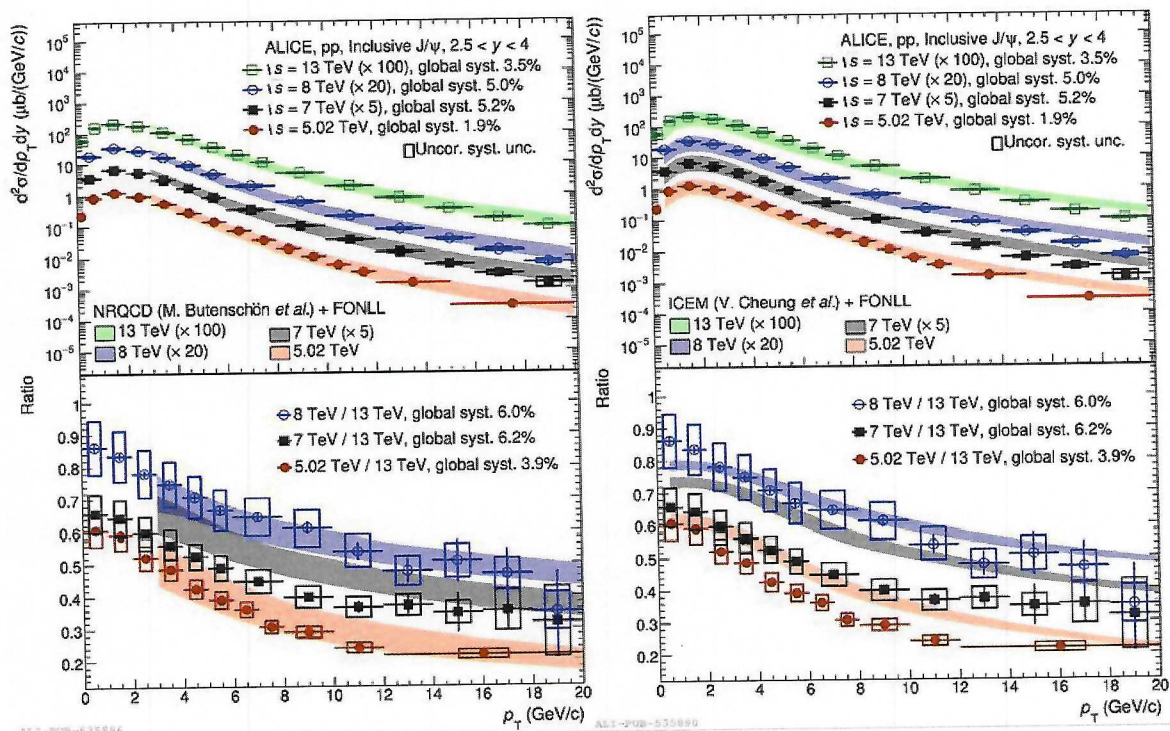


Рис.1. Инклюзивные сечения рождения  $J/\psi$  в зависимости от поперечного импульса, измеренные в  $pp$ -столкновениях при энергии  $\sqrt{s} = 5.02, 7, 8$  и 13 ТэВ (верхние панели) и отношения измеренных сечений при  $\sqrt{s} = 5.02, 7$  и 8 ТэВ к сечениям при 13 ТэВ (нижние панели). Данные сравниваются с NRQCD теоретическими расчетами (левые панели) и с расчетами SEM модели (правые панели).

В анализе экспериментальных данных использованы различные детекторы ALICE, в частности очень важное значение имеет кварцевый Черенковский детектор T0, расположенный с двух сторон от точки взаимодействия IP на расстоянии -70 см и 360 см. Детектор создан в ИЯИ РАН и обслуживается сотрудниками института. В данном анализе

детектор использовался для определения светимости и выделения фоновых событий. Сцинтилляционный детектор V0 также использовался для определения светимости. Два метода дают совместимые значения. Однако, в анализе данных использовался метод с детектором T0, так как он дает меньшую погрешность.

Теоретические модели, основанные на СЕМ (Color Evaporation Model) и NRQCD (Non-Relativistic QCD) хорошо описывают сечения при всех энергиях (рис.1) также, как отношение сечений  $\psi(2S)$  к  $J/\psi$  в измеренной кинематической области. Измерения  $pp$ -столкновений при энергии  $\sqrt{s} = 5.02$  ТэВ дают более точные данные для измерения фактора ядерной модификации кваркониев в столкновениях ядер свинца (Pb-Pb) при той же энергии.

#### **Публикация:**

S.Acharya et al.(ALICE collaboration), "Inclusive quarkonium production in pp collisions at  $\sqrt{s}=5.02$  TeV" Eur.Phys.J C83 N61 (2023). <https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-022-10896-8>

**ИЯИ РАН:** Н.Вознюк, У.Дмитриева, О.Каравичев, Т.Каравичева, Е.Карпечев, А.Б.Курепин, А.Н.Курепин, И.Морозов И.Пшеничный, Д.Серебряков, М.Суханов А.Тихонов, Н.Топильская, Д.Финогеев, А.Фурс,

**Координатор работ:** Каравичева Татьяна Львовна  
Эл.почта: [tatiana@inr.ru](mailto:tatiana@inr.ru), [TatianaKaravicheva@cern.ch](mailto:TatianaKaravicheva@cern.ch)

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

### ***17. Измерение сечений эмиссии нейтронов в результате ультрапериферических столкновений ядер свинца на БАК.***

Экспериментальные исследования взаимодействий ядер высоких энергий на Большом адронном коллайдере (БАК) в основном посвящены изучению таких столкновений, где в зоне геометрического перекрытия ядер может образовываться кварк-глюонная плазма (КГП) — малоизученное состояние горячей и плотной материи, в котором кварки и глюоны свободны. Вместе с тем, в ультрапериферических столкновениях (УПС) ядер на БАК, происходящих без перекрытия ядерных плотностей, благодаря предельно лоренц-сжатым кулоновским полями ядер-партнеров по столкновению ядра также переходят в возбуждённое состояние. Однако в таких УПС характерная энергия ядерного возбуждения чаще всего не превышает нескольких десятков МэВ. Поэтому в результате электромагнитной диссоциации (ЭМД) первичных ядер, происходящей в УПС, испускается небольшое число нуклонов, в отличие от полной ядерной фрагментации во взаимодействиях с геометрическим перекрытием ядер.

В нашей работе сечения эмиссии определённого числа нейтронов в УПС ядер свинца  $^{208}\text{Pb}$  при  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  ТэВ измерены с помощью передних калориметров установки ALICE на БАК. Впервые измерены сечения эмиссии 1, 2, 3, 4 и 5 нейтронов в ЭМД, которая не сопровождается эмиссией протонов и, таким образом, соответствующих образованию вторичных ядер  $^{207,206,205,204,203}\text{Pb}$ . Группа сотрудников ИЯИ РАН, работающая в составе коллаборации ALICE, выполнила обработку данных по эмиссии нейтронов в ЭМД, расчеты по разработанной в ИЯИ РАН модели RELDIS, описывающей ЭМД. Предсказания моделей, включая модель RELDIS, хорошо описывают измеренные сечения. Эти сечения могут быть использованы для оценки влияния вторичных ядер, образующихся в ЭМД, на компоненты БАК, в частности, на сверхпроводящие магниты, а также в ходе проектирования будущего кольцевого коллайдера FCC-hh.

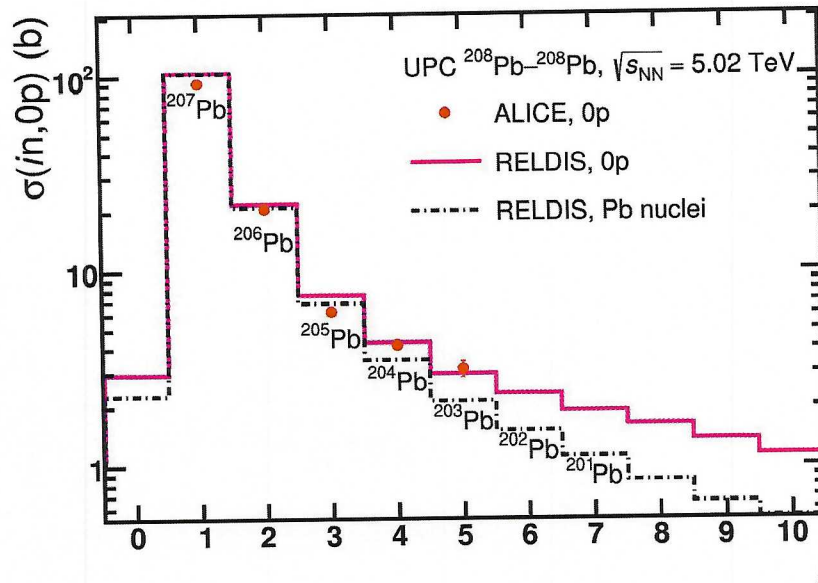


Рисунок 1. Измеренные сечения эмиссии заданного числа нейтронов  $i$  в УПС ядер  $^{208}\text{Pb}$  при  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  ТэВ без эмиссии протонов (точки) и сечения, рассчитанные с помощью модели RELDIS (гистограмма, представленная сплошной линией). Рассчитанные сечения образования определённых вторичных ядер  $^{207}\text{Pb}, ^{206}\text{Pb}, ^{205}\text{Pb}, ^{204}\text{Pb}, ^{203}\text{Pb}, ^{202}\text{Pb}, ^{201}\text{Pb}$  представлены пунктирной гистограммой, с обозначенными на ней символами этих нуклидов.

**Публикации:**

1. S. Acharya et al. (ALICE Collaboration), Neutron emission in ultraperipheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV Phys. Rev. C 107 (2023) 064902, <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.107.064902> <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.04250>

**Координатор работ:** Пшеничнов Игорь Анатольевич

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

тел.: +7 (985) 302 87 07

**ПФНИ:** 1.3.3.2. Фундаментальная физика атомного ядра

**18. Построено эффективное описание скалярных осциллонов в почти квадратичных потенциалах на примере модели монодромии.**

Осциллоны – это компактные осциллирующие сгустки бозонного поля, которые отличаются большими временами жизни. Их осцилляции не являются точно периодическими – осциллоны медленно распадаются за счёт небольшого испускаемого ими излучения. Одна из моделей осциллонов – модель монодромии, применяющаяся для описания поля инфлатона или скалярной тёмной материи.

Последовательно построено эффективное описание осциллонов в модели монодромии при произвольно сильных полях. Отмечено, что слабая нелинейность притягивающего потенциала, уравнивающая расталкивающий эффект пространственной производной, означает большой пространственный размер осциллонов. Построенное эффективное действие обладает глобальной U(1) симметрией во всех порядках, что гарантирует существование сохраняющегося заряда, и, поскольку потенциал теории является притягивающим, – нетопологических солитонов, которые и служат приближённым описанием осциллонов. Проведено сравнение предсказаний эффективной теории с

численно найденными осциллонами в полной теории, см. Рис. 1. Точность предсказаний теории не падает даже при экстремально высоких амплитудах осциллонов.

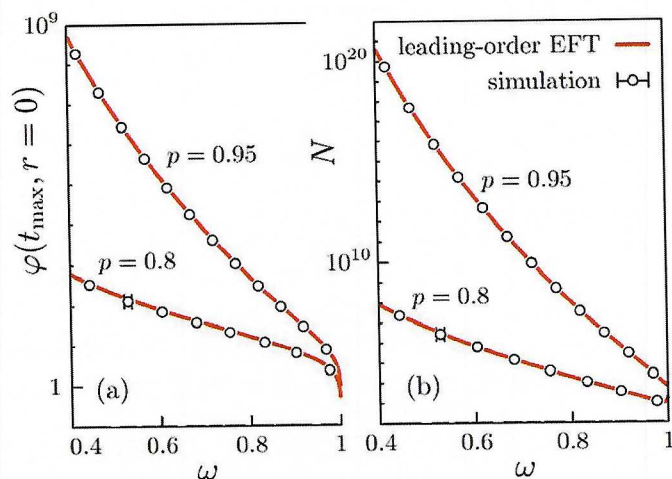


Рисунок 1. (а) Амплитуды колебаний поля в центре и (б) нетопологические заряды осциллонов в модели монодромии при двух значениях степени потенциала  $p$ . Предсказания главного порядка эффективной теории (EFT) показаны сплошными линиями. Кружочки соответствуют численным результатам в полной теории.

**Публикация:** D.G. Levkov, V.E. Maslov, “Analytic description of monodromy oscillons,” *Phys. Rev. D* **108**, 063514 (2023). DOI: 10.1103/PhysRevD.108.063514

**Координатор работ:** Левков Дмитрий Геннадиевич

эл. почта: levkov@ms2.inr.ac.ru

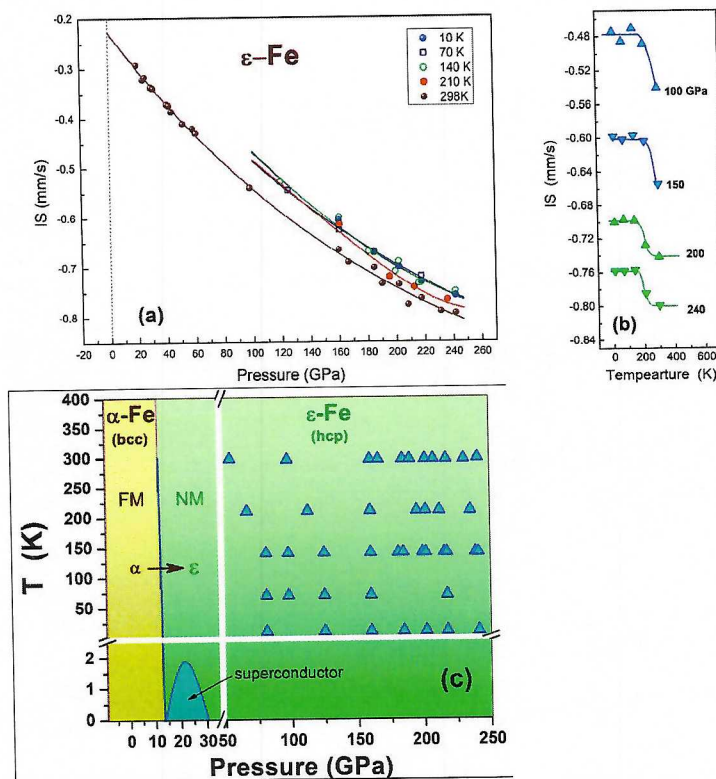
**ПФНИ 1.3.3.3.** Нейтринная физика, астрофизические и космологические аспекты ядерной физики и физики элементарных частиц

**Гранты:** Проект РНФ №22-12-00215

### 19. Электронные и магнитные свойства фазы железа $\epsilon$ -Fe при высоких давлениях до 241 ГПа в области температур 4-300 К

Магнитные и электронные состояния железа в гексагональной плотноупакованной (ГПУ)  $\epsilon$ -Fe фазе исследованы методом синхротронной мессбауэровской спектроскопии на ядрах Fe-57 (методика NFS – nuclear forward scattering или ядерное рассеяние вперёд). Измерения выполнены при сверхвысоких давлениях до 241 ГПа (2 410 000 атмосфер) в диапазоне температур  $T$  от 4 до 300 К, а также во внешних магнитных полях до 5 Тесла. Установлено, что во всей P-T области атомы Fe находятся в немагнитном состоянии (Рис. 1с). Предполагаемая теорией магнитная неустойчивость и квантовые спиновые флуктуации, которые могут быть стабилизированы внешним магнитным полем, не подтверждается нашими измерениями NFS спектров во внешнем магнитном поле. Установлено, что зависимость изомерного сдвига от давления  $IS(P)$  носит нелинейный характер (Рис. 1а), и при максимальном давлении 241 ГПа значение  $IS$  достигает колоссальной отрицательной величины  $\approx -0.8$  мм/с, указывая на очень высокую электронную плотность на ядре железа. При давлениях 100-240 ГПа обнаружены резкие изменения электронной плотности на ядре железа в области температур 100-200 К (Рис. 1б). Это указывает на фазовые переходы с изменением электронной структуры, что может быть

связано с резким увеличением проводимости или даже с возникновением сверхпроводимости.



**Рисунок 1.** (а) Зависимость изомерного сдвига в  $\epsilon$ -Fe железе от давления для различных температур. Сплошные линии – аппроксимация полиномом третьей степени. (б) Температурные зависимости изомерного сдвига для разных давлений. Значения изомерных сдвигов даны относительно  $\alpha$ -Fe, находящегося при комнатной температуре и атмосферном давлении. (в) Фазовая  $P$ - $T$  диаграмма железа: треугольными символами отмечены  $P$ - $T$  точки, в которых измерялись NFS спектры в нашем эксперименте. Все точки относятся к немагнитному состоянию железа.

**Публикация:** A. G. Gavriliuk, V. V. Struzhkin, S. N. Aksenov, A. A. Mironovich, I. A. Troyan, A. G. Ivanova, I. S. Lyubutin, " Electronic and Magnetic Properties of the  $\epsilon$ -Fe Phase at High Pressures up to 241 GPa in the Temperature Range of 4–300 K", *JETP Letters* **117**(2), 126-137 (2023).

DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021364022602986> IF: 1.4 (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) Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 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)

ПНФИ 2021-2030: 1.3.3.5., 1.3.3.7.

Гранты: Проект РНФ № 21-12-00344

## 20. Синтез сверхпроводящих полигидридов железа при высоких давлениях

Железо - один из самых распространенных элементов на нашей планете. Фундаментальные электронные, магнитные и структурные свойства железа и его простых соединений (особенно при высоких давлениях) чрезвычайно важны как для понимания строения сильно коррелированных электронных систем, так и для исследований свойств внутренних слоёв Земли. Гидриды железа рассматриваются в числе возможных соединений в составе мантии и ядра Земли. В то же время в ряду гидридов железа с повышенным содержанием водорода  $\text{FeH}_x$  ( $x > 2$ ) возможны сверхпроводящие фазы, принадлежащие к недавно открытому новому семейству высокотемпературных сверхпроводников – полигидридам металлов. В настоящей работе выполнен последовательный синтез двух фаз полигидридов железа  $\text{FeH}_x(\text{I})$  и  $\text{FeH}_x(\text{II})$  с помощью лазерного нагрева образцов в камерах с алмазными наковальнями в два этапа до температур  $\sim 700$  К и 2000 К при давлениях 178 и 195 ГПа, соответственно. В результате синтеза обнаружено два различных соединения  $\text{FeH}_x$  со сверхпроводящими свойствами. Установлено, что одна из фаз  $\text{FeH}_x(\text{I})$  (предварительно  $\text{FeH}_5$ ), имеет критическую температуру сверхпроводящего перехода  $T_C \sim 24$  К при давлении 180 ГПа, а другая  $\text{FeH}_x(\text{II})$  ( $\text{FeH}_6$ ) -  $T_C \sim 26.5$  К при давлении 195 ГПа. Сверхпроводящее состояние было подтверждено наличием сильного сигнала в PCS (point-contact spectroscopy) спектрах (Рис. 1(с)).

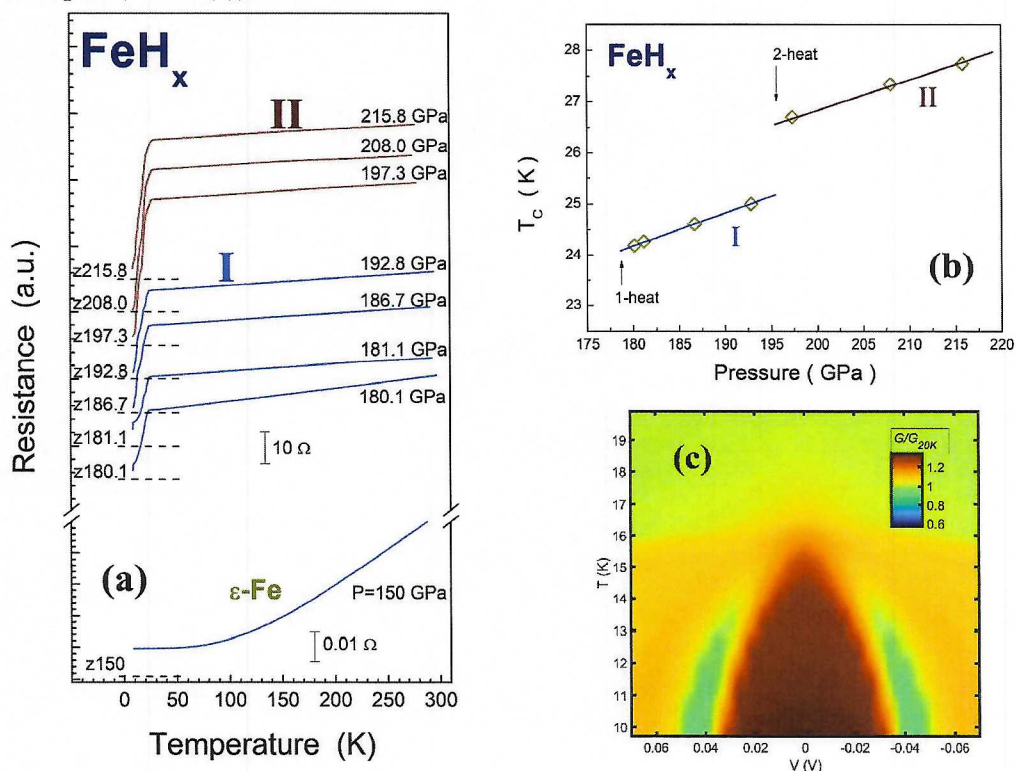


Рисунок 1. (а) Эволюция температурных зависимостей сопротивления  $R(T)$  полигидридов железа  $\text{FeH}_x(\text{I})$  и  $\text{FeH}_x(\text{II})$  с ростом давления. (б) Барическая зависимость критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние  $T_C$  в полигидридах железа  $\text{FeH}_x(\text{I})$  и

FeH<sub>x</sub>(II). (с) Распределение величины сигнала дифференциальной проводимости ( $G = dI(V)/dV$ ) (или PCS спектров) в T-V области (красный и синий цвет показывают, соответственно, большую или меньшую дифференциальную проводимость).

**Публикация:** A. G. Gavriiliuk, I. A. Troyan, V. V. Struzhkin, D. N. Trunov, S. N. Aksenov, A. A. Mironovich, A. G. Ivanova, I. S. Lyubutin, "Synthesis and superconducting properties of some phases of iron polyhydrides at high pressures ", *JETP Letters* **118**(10), (2023).

**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) Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 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)

**ПНФИ 2021-2030:** 1.3.3.5., 1.3.3.7.

**Гранты:** Проект РФФ № 21-12-00344

### ***21. Структурный переход первого рода в NiO при высоких давлениях.***

Значение перехода изолятор-металл в сильно сжатом монооксиде никеля (NiO) для физики сильно коррелированных электронных систем стоит в одном ряду с проблемами высокотемпературной сверхпроводимости в купратах и другими ключевыми проблемами физики, такими, например, как проблема металлизации водорода под давлением. NiO исторически был первым материалом, который оказался испытательным полигоном для понимания сильно коррелированных электронных систем. В пионерских исследованиях Мотта и его сотрудников NiO рассматривался как классический пример «моттовского» изолятора с широкой энергетической щелью d-d ( $E_g$ ), которая возникает из-за сильного локального кулоновского отталкивания электронов между 3d-электронами Ni. В данной работе мы обнаружили изоструктурный переход в NiO, сопровождающий наблюдаемый нами ранее переход в металлическое состояние. Мы также подробно обсуждаем последние теоретические результаты и показываем, что наши данные подтверждают некоторые последние теоретические модели. Представлены результаты структурных исследований NiO в максимально широком на сегодняшний день диапазоне давлений (0-240 ГПа). Начиная с ~110 ГПа мы наблюдаем значительное тригональное искажение исходной кристаллической структуры типа NaCl. При более высоких давлениях экспериментально обнаружен структурный переход с падением объема ~2,7 % в области перехода изолятор-металл. Переход имеет большой гистерезис при разгрузке.



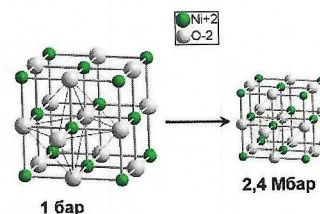
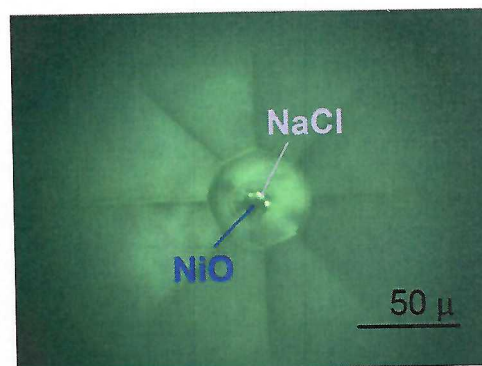
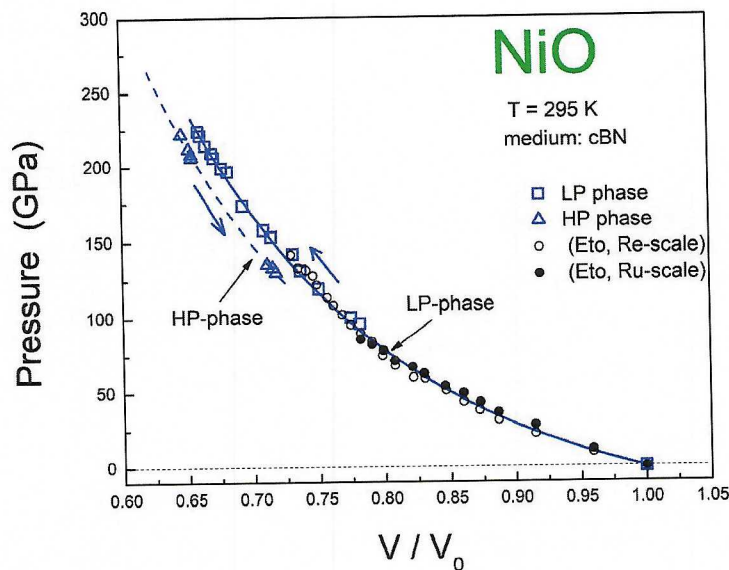


Рисунок 1. (левая панель) Экспериментальная зависимость давление-объем NiO при комнатной температуре. (правая панель) Фотография экспериментального образца в среде хлорида натрия и модель кристаллической решетки NiO при сжатии

**Публикация:** Alexander G. Gavriliuk, Viktor V. Struzhkin, Anna G. Ivanova, Vitali B. Prakapenka, Anna A. Mironovich, Sergey N. Aksenov, Ivan A. Troyan, Wolfgang Morgenroth, "The first-order structural transition in NiO at high pressure", *Communications Physics* **6**, 23 (2023).

**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) Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова, ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 119333 Москва, Россия
- 4) Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 236041, Калининград, Россия
- 5) Center for Advanced Radiation Sources, University of Chicago, Argonne, IL 60439, USA.
- 6) Institut für Geowissenschaften Universität Potsdam, 14469 Potsdam, Germany

**Координатор работ:** Гаврилюк Александр Григорьевич

эл.почта: [gavriliuk@mail.ru](mailto:gavriliuk@mail.ru)

**ПНФИ 2021-2030:** 1.3.3.5., 1.3.3.7.

**Гранты:** Проект РФФ № 21-12-00344

**22. Наблюдение потока ТэВных гамма-квантов от экстремально яркого гамма-всплеска 221009A**

Беспрецедентно яркий гамма-всплеск 221009A наблюдался установкой WCDA, являющейся частью эксперимента LHAASO, с не менее беспрецедентной значимостью, на уровне более 200  $\sigma$  (рис. 1) с направления на источник этой вспышки. Это позволило

измерить временной профиль вспышки в различных энергетических диапазонах от 0.2 до 13 ТэВ и энергетический спектр гамма-квантов в различных временных интервалах, как показано на рис. 2. В работе [2] приведен, поправленный на поглощение гамма-квантов на реликтовом межгалактическом излучении, спектр в источнике, который хорошо согласуется с показателем степенного спектра  $\gamma = -2$ .

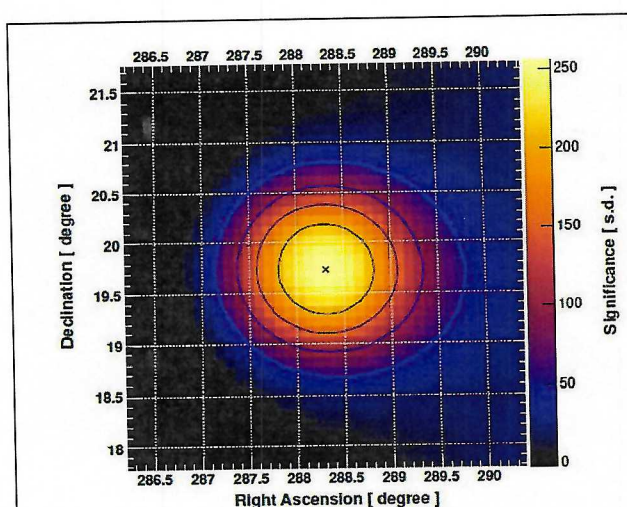


Рис. 1. Карта достоверности наблюдения гамма-всплеска 221009А установкой WCDA.

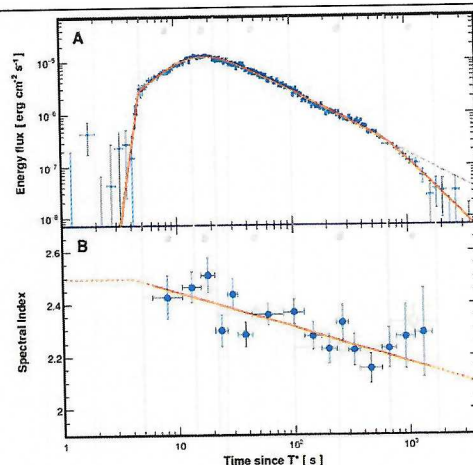


Рис. 2. Временной профиль светимости источника 221009А эволюция спектрального индекса светимости

#### Публикации:

1. LHAASO collaboration. A tera-electronvolt afterglow from a narrow jet in an extremely bright gamma-ray burst 221009A. // *Science* 8 Jun 2023 Vol 380, Issue 6652 pp. 1390-1396.
2. LHAASO collaboration. Very high energy gamma-ray emission beyond 10 TeV from GRB 221009A. arXiv:2310.08845v1 [astro-ph.HE] 13 Oct 2023

Координатор работ: Стенькин Юрий Васильевич

эл.почта: [stenkin@sci.lebedev.ru](mailto:stenkin@sci.lebedev.ru)

тел. +7 9163890906

Участники от ИЯИ РАН:

Стенькин Ю.В., Кулешов Д.А., Куринов К.О., Степанов В.И., Щеголев О.Б.

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

#### 23. Первые ограничения на напряженность внегалактического магнитного поля по наблюдениям гамма-всплеска GRB 221009A

Исключительно яркий гамма-всплеск GRB 221009A был зарегистрирован детекторами эксперимента LHAASO в диапазоне энергий 200 ГэВ – 13 ТэВ. Первичные гамма-кванты от этого источника частично поглощаются на фотонах внегалактического фонового излучения, вторичные электроны и позитроны отклоняются на внегалактическом

магнитном поле и образуют вторичные (каскадные) гамма-кванты. Характеристики наблюдаемого каскадного эха зависят от параметров внегалактического магнитного поля (ВМП). Впервые получены ограничения на напряженность ВМП указанным методом по наблюдениям гамма-всплеска GRB 221009A. Показано, что значения напряженности ВМП в диапазоне от 10-20 до 10-18 Гс исключены.

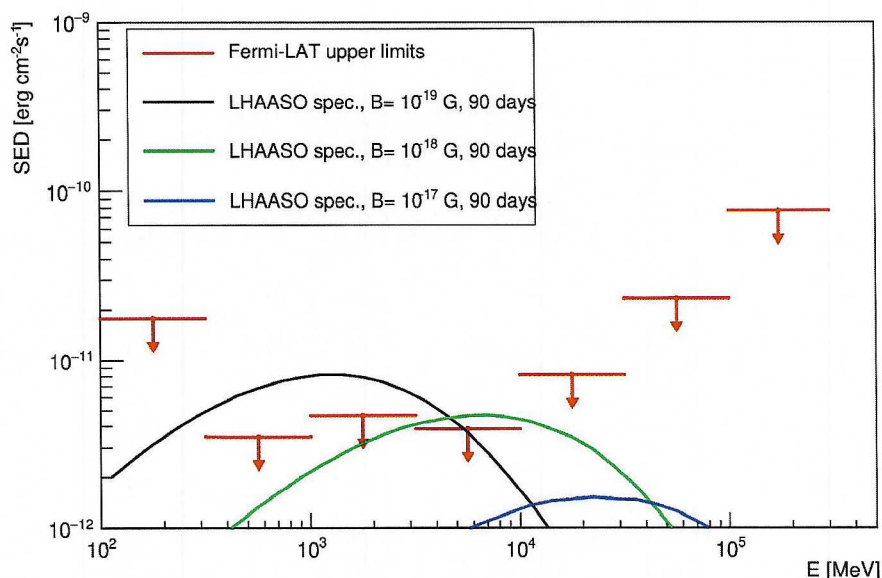


Рисунок 1. Верхние пределы на  $SED = E^2 dN/dE$  каскадного эха от гамма-всплеска GRB 221009A во временном интервале от  $2 \times 10^5$  с до  $90 \text{ д} + 2 \times 10^5$  с относительно триггера детектора Fermi-GBM (красные горизонтальные линии со стрелками) и модельные SED каскадного эха для различных значений  $B$  (кривые).

#### Публикации:

1. T.A. Dzhatdov, E.I. Podlesnyi, G.I. Rubtsov. First constraints on the strength of the extragalactic magnetic field from  $\gamma$ -ray observations of GRB 221009A. MNRAS Lett. 527, L95, 2024. arXiv:2306.05347

Координатор работ: Джатдоев Тимур Ахматович

эл. почта: [timur1606@gmail.com](mailto:timur1606@gmail.com)

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

#### ***24. Подтверждена гипотеза о происхождении нейтрино высоких энергий в блазарах и построена теоретическая модель их рождения***

Источники нейтрино высоких энергий, регистрируемых телескопами IceCube, Baikal-GVD, ANTARES и KM3NeT, остаются предметом интенсивного изучения и споров. Ранее была установлена связь таких нейтрино с блазарами, отобранными по потоку компактной компоненты радиоизлучения. В 2023 г. эта связь была подтверждена с использованием новых нейтринных событий IceCube, зарегистрированных после публикации первого исследования в 2020 г. (статья 1, рис. 1). Было обнаружено, что нейтрино наиболее высоких энергий сопровождаются одновременными нейтрино более низких энергий, если

высокоэнергичное событие пришло от радиоблазара (статья 2, рис. 2). Построена количественная модель рождения нейтрино в радиоблазарах, объясняющая все наблюдения (статья 3, рис. 3).

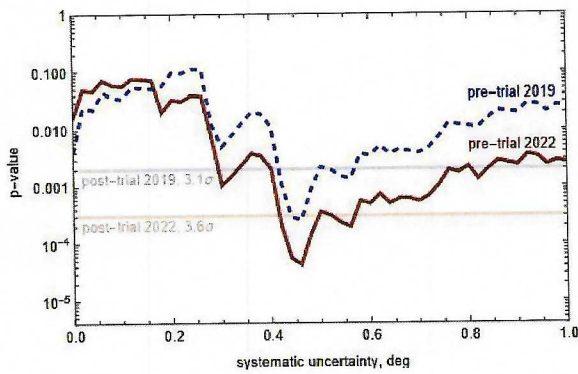


Рис. 1. Сравнение значимости ассоциации высокоэнергичных нейтрино с радиоблазарами по данным до 2019 и до 2022 гг.

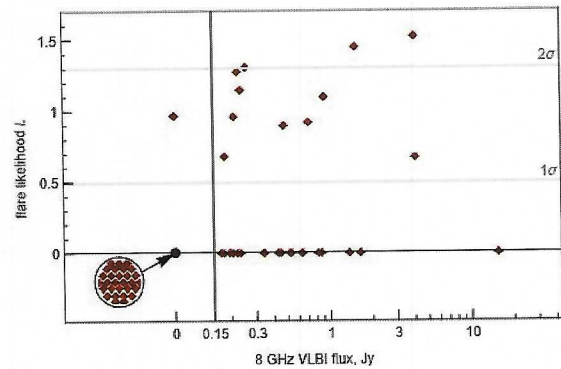


Рис. 2. Значимость одновременных нейтринных вспышек в зависимости от радиопотока блазаров, совпадающих с высокоэнергичным нейтрино. Полная значимость корреляции  $3.8\sigma$  (post trial).

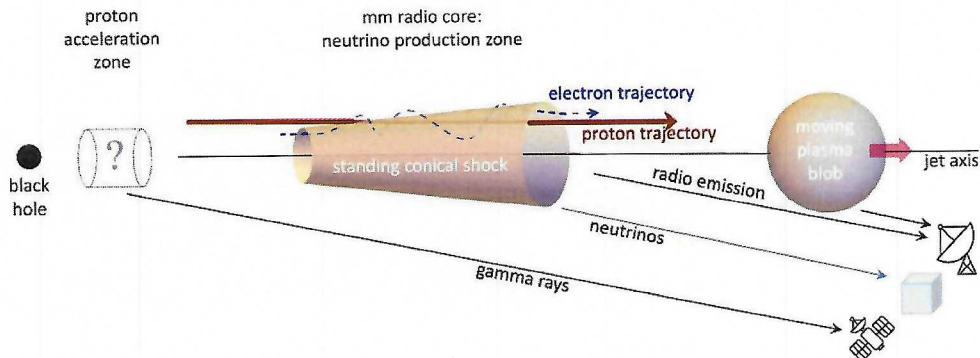


Рис. 3. Схема предложенного механизма рождения нейтрино в радиоблазарах.

**Участники от ИЯИ РАН:** О.Е. Калашев (ОТФ ИЯИ), П.И. Кивокурцева (физфак МГУ и НОЦ ИЯИ), С.В. Троицкий (ОТФ ИЯИ и физфак МГУ); совместно с: Ю.А. Ковалев (АКЦ ФИАН), Ю.Ю. Ковалев (АКЦ ФИАН, МФТИ, MPI Bonn), А.В. Плавин (Harvard), А.И. Сурай (физфак МГУ)

#### Публикации:

- [1] A.V. Plavin, Yu. Yu. Kovalev, Yu. A. Kovalev, S.V. Troitsky, Growing evidence for high-energy neutrinos originating in radio blazars, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 523 (2023) 1799.
- [2] A.I. Suray, S.V. Troitsky, Neutrino flares of radio blazars observed from TeV to PeV, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc. Lett.* 527 (2023) L26.
- [3] O.E. Kalashev, P.I. Kivokurtseva, S.V. Troitsky, Neutrino production in blazar radio cores, *JCAP*, accepted.

**Координатор работ: Троицкий Сергей Вадимович**

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

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

Директор ИЯИ РАН,  
член-корреспондент РАН



Либанов М.В.

Протокол заседания Ученого совета ИЯИ РАН от «07» декабря 2023 г. №9